



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**Analisi dell'idrodinamica indotta
da onde che propagano su
fondali a diversa scabrezza**

**Analysis of the hydrodynamics
induced by waves propagating
over seabeds of different
roughness**

Relatore:

Prof. Postacchini Matteo

Correlatore:

Prof. Brocchini Maurizio

Dott. Melito Lorenzo

Tesi di Laurea di:

Lupi Riccardo

INDICE

LISTA DELLE FIGURE	3
LISTA DEI GRAFICI	4
LISTA DEI SIMBOLI	9
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE	10
1.1 Struttura della tesi	10
1.2 Stato dell'arte	12
CAPITOLO 2 METODOLOGIA	19
2.1 Strumentazione adottata	19
2.1.1 Canale	19
2.1.2 Sonde	21
2.1.3 Telecamera e illuminazione	22
2.1.4 Inseminante	23
2.2 Programmi utilizzati	25
2.2.1 Analisi delle sonde	26
2.2.2 Scelta delle configurazioni da studiare	28
2.2.3 Post-processing: fase 1	30
2.2.4 Post-processing: fase 2	32
2.3 Campagna di esperimenti	37
2.3.1 Esperimenti con fondo liscio	37
2.3.2 Condizioni da adottare con fondo scabro	40
2.3.3 Esperimenti con fondo scabro	42
Capitolo 3 RISULTATI E DISCUSSIONE	46
3.1 Tipologia di risultati	46
3.2 Risultati con fondo liscio	46
3.3 Risultati con fondo scabro	70
Capitolo 4 CONCLUSIONI	91
RIFERIMENTI	95

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1. Zona d'interesse nel canale e posizione delle sonde. Le onde propagano da destra (posizione battionde) a sinistra (zona di misura).....	20
Figura 2. Canale.....	20
Figura 3. Battionde.....	20
Figura 4. Scacchiera.....	23
Figura 5. Lampada a led.....	23
Figura 6. Setacci per peperoncino.....	25
Figura 7. Peperoncino immesso in acqua.....	25
Figura 8. Frame originale.....	32
Figura 9. Frame senza background.....	32
Figura 10. Frame con contrasto corretto.....	32
Figura 11. Configurazione dall'alto.....	40
Figura 12. Configurazione sulla zona d'interesse.....	40
Figura 13. Tubo in acqua.....	45
Figura 14. Setaccio.....	45
Figura 15. Particelle nell'ultima prova.....	45
Figura 16. Movimento delle particelle al di sotto del cavo nel caso di fondo liscio.....	53
Figura 17. Movimento delle particelle al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo liscio.....	53
Figura 18. Movimento delle particelle al di sotto della cresta nel caso di fondo liscio.....	53
Figura 19. Movimento delle particelle al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo liscio.....	53
Figura 20. Movimento delle particelle al di sotto della cresta nel caso di fondo scabro.....	75
Figura 21. Movimento delle particelle al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo scabro.....	75
Figura 22. Movimento delle particelle al di sotto del cavo nel caso di fondo scabro.....	76
Figura 23. Movimento delle particelle al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo scabro.....	76

LISTA DEI GRAFICI

Grafico 1. Esempio dell'intersezione con lo zero del segnale della sonda S1.....	26
Grafico 2. Esempio del segnale della sonda S1 senza onde di transizione.....	27
Grafico 3. Esempio grafico (Time, H) con ' <i>Height</i> '=0.0166 m.....	28
Grafico 4. Esempio grafico (Time, T) con ' <i>Period</i> '=1.0014 s.....	28
Grafico 5. $\delta(T, h)$	30
Grafico 6. $h/L(T, h)$	30
Grafico 7. Campo di velocità medio.....	34
Grafico 8. Numero di vettori individuati in vari punti di una griglia....	34
Grafico 9. Campo di vettori di velocità u, v	34
Grafico 10. (T, h).....	42
Grafico 11. (T, δ).....	42
Grafico 12. Intersezione con lo zero del segnale della sonda S1 nel caso di fondo liscio.....	47
Grafico 13. Segnale della sonda S1 senza onde di transizione nel caso di fondo liscio.....	47
Grafico 14. (Time, T) della sonda S1 con ' <i>Period</i> '=0.8001 s nel caso di fondo liscio.....	47
Grafico 15. (Time, H) della sonda S1 con ' <i>Height</i> '=0.0219 m nel caso di fondo liscio.....	48
Grafico 16. Intersezione con lo zero del segnale della sonda S4 nel caso di fondo liscio.....	48
Grafico 17. Segnale della sonda S4 senza onde di transizione nel caso di fondo liscio.....	48
Grafico 18. (Time, T) della sonda S4 con ' <i>Period</i> '=0.8001 s nel caso di fondo liscio.....	49
Grafico 19. (Time, H) della sonda S4 con ' <i>Height</i> '=0.0170 m nel caso di fondo liscio.....	49
Grafico 20. Traiettorie nel caso di fondo liscio.....	51
Grafico 21. Traiettorie in prossimità della superficie libera nel caso di fondo liscio.....	51
Grafico 22. Traiettorie in prossimità del fondo nel caso di fondo liscio.....	52

Grafico 23. Andamento della u al di sotto del cavo nel caso di fondo liscio.....	55
Grafico 24. Andamento della u al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo liscio.....	55
Grafico 25. Andamento della u al di sotto della cresta nel caso di fondo liscio.....	55
Grafico 26. Andamento della u al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo liscio.....	55
Grafico 27. Andamento della v al di sotto del cavo nel caso di fondo liscio.....	56
Grafico 28. Andamento della v al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo liscio.....	56
Grafico 29. Andamento della v al di sotto della cresta nel caso di fondo liscio.....	57
Grafico 30. Andamento della v al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo liscio.....	57
Grafico 31. Serie temporali della u a varie distanze dal fondo nel caso di fondo liscio.....	57
Grafico 32. Serie temporali della u sul fondo nel caso di fondo liscio.....	57
Grafico 33. Mappa di colore delle serie temporali nel caso di fondo liscio.....	58
Grafico 34. Parte iniziale del primo periodo nel caso di fondo liscio.....	60
Grafico 35. Parte centrale del primo periodo nel caso di fondo liscio.....	60
Grafico 36. Parte finale del primo periodo nel caso di fondo liscio.....	60
Grafico 37. Parte iniziale del secondo periodo nel caso di fondo liscio.....	61
Grafico 38. Parte centrale del secondo periodo nel caso di fondo liscio.....	61
Grafico 39. Parte finale del secondo periodo nel caso di fondo liscio.....	61
Grafico 40. Parte iniziale del terzo periodo nel caso di fondo liscio.....	61
Grafico 41. Parte centrale del terzo periodo nel caso di fondo liscio.....	61

Grafico 42. Parte finale del terzo periodo nel caso di fondo liscio.....	62
Grafico 43. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio.....	63
Grafico 44. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio con ' <i>ixProfile</i> '=80.....	64
Grafico 45. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio con ' <i>ixProfile</i> '=100.....	64
Grafico 46. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio con ' <i>ixProfile</i> '=120.....	65
Grafico 47. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio con ' <i>ixProfile</i> '=140.....	65
Grafico 48. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio.....	66
Grafico 49. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio con ' <i>ixProfile</i> '=80.....	66
Grafico 50. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio con ' <i>ixProfile</i> '=100.....	66
Grafico 51. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio con ' <i>ixProfile</i> '=120.....	67
Grafico 52. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio con ' <i>ixProfile</i> '=140.....	67
Grafico 53. Grafico finale rappresentante i vari profili verticali mediati nel caso di fondo liscio.....	68
Grafico 54. Intersezione con lo zero del segnale della sonda S1 nel caso di fondo scabro.....	70
Grafico 55. Segnale della sonda S1 senza onde di transizione nel caso di fondo scabro.....	71
Grafico 56. (Time, T) della sonda S1 con ' <i>Period</i> '=0.7997 s nel caso di fondo scabro.....	71
Grafico 57. (Time, H) della sonda S1 con ' <i>Height</i> '=0.0222 m nel caso di fondo scabro.....	71
Grafico 58. Intersezione con lo zero del segnale della sonda S4 nel caso di fondo scabro.....	72
Grafico 59. Segnale della sonda S4 senza onde di transizione nel caso di fondo scabro.....	72
Grafico 60. (Time, T) della sonda S4 con ' <i>Period</i> '=0.7997 s nel caso di fondo scabro.....	72

Grafico 61. (Time, H) della sonda S4 con ' <i>Height</i> '=0.02179 m nel caso di fondo scabro.....	73
Grafico 62. Traiettorie nel caso di fondo scabro.....	73
Grafico 63. Traiettorie in prossimità del fondo nel caso di fondo scabro.....	74
Grafico 64. Andamento della <i>u</i> al di sotto del cavo nel caso di fondo scabro.....	77
Grafico 65. Andamento della <i>u</i> al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo scabro.....	77
Grafico 66. Andamento della <i>u</i> al di sotto della cresta nel caso di fondo scabro.....	77
Grafico 67. Andamento della <i>u</i> al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo scabro.....	77
Grafico 68. Andamento della <i>v</i> al di sotto del cavo nel caso di fondo scabro.....	78
Grafico 69. Andamento della <i>v</i> al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo scabro.....	78
Grafico 70. Andamento della <i>v</i> al di sotto della cresta nel caso di fondo scabro.....	78
Grafico 71. Andamento della <i>v</i> al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo scabro.....	78
Grafico 72. Serie temporali della <i>u</i> a varie distanze dal fondo nel caso di fondo scabro.....	79
Grafico 73. Serie temporali della <i>u</i> sul fondo nel caso di fondo scabro.....	79
Grafico 74. Mappe di colore delle serie temporali nel caso di fondo scabro.....	80
Grafico 75. Parte iniziale del primo periodo nel caso di fondo scabro.....	81
Grafico 76. Parte centrale del primo periodo nel caso di fondo scabro.....	81
Grafico 77. Parte finale del primo periodo nel caso di fondo scabro.....	82
Grafico 78. Parte iniziale del secondo periodo nel caso di fondo scabro.....	82
Grafico 79. Parte centrale del secondo periodo nel caso di fondo scabro.....	82
Grafico 80. Parte finale del secondo periodo nel caso di fondo scabro.....	82

Grafico 81. Parte iniziale del terzo periodo nel caso di fondo scabro.....	83
Grafico 82. Parte centrale del terzo periodo nel caso di fondo scabro.....	83
Grafico 83. Parte finale del terzo periodo nel caso di fondo scabro.....	83
Grafico 84. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro.....	84
Grafico 85. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro con ' <i>ixProfile</i> '=20.....	85
Grafico 86. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro con ' <i>ixProfile</i> '=60.....	85
Grafico 87. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro con ' <i>ixProfile</i> '=80.....	86
Grafico 88. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro con ' <i>ixProfile</i> '=100.....	86
Grafico 89. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro.....	87
Grafico 90. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro con ' <i>ixProfile</i> '=20.....	87
Grafico 91. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro con ' <i>ixProfile</i> '=60.....	87
Grafico 92. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro con ' <i>ixProfile</i> '=80.....	88
Grafico 93. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro con ' <i>ixProfile</i> '=100.....	88
Grafico 94. Grafico finale rappresentante i vari profili verticali mediati nel caso di fondo scabro.....	90
Grafico 95. Grafico (Posizione, ' <i>Height</i> ') rappresentante l'evoluzione della media dell'altezza H dalla sonda S1 alla sonda S4.....	92
Grafico 96. Grafico riassuntivo dei profili di velocità.....	94

LISTA DEI SIMBOLI

u componente orizzontale del vettore velocità

v componente verticale del vettore velocità

L lunghezza d'onda

T periodo ondoso

H altezza dell'onda

a ampiezza dell'onda

ω frequenza angolare dell'onda

θ fase dell'onda

k numero d'onda

ν viscosità cinematica

η elevazione o profilo della superficie libera

δ spessore dello strato limite

h altezza dell'acqua

h/L profondità relativa

D diametro della carta vetrata

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE

1.1 Struttura della tesi

La presente tesi si propone di approfondire le dinamiche derivanti da onde che si propagano su superfici di diversa scabrezza.

Questa analisi viene perseguita attraverso lo svolgimento di una specifica campagna sperimentale all'interno del Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime dell'Università Politecnica delle Marche (Ancona).

Lo studio si serve dell'esperienza di J. F. A. Sleath (1970) riguardante le misure di velocità eseguite in prossimità del fondo di un canale, prestando attenzione a quella regione denominata strato limite, dove le forze viscosse prevalgono su quelle di inerzia.

Attraverso la sistematica esecuzione degli esperimenti in laboratorio e l'utilizzo di opportuni software di calcolo, nella seguente tesi si valuta l'interazione di un'onda a contatto con due diverse configurazioni.

La prima prevede un letto liscio, sostituito da uno rugoso nella seconda, con la quale si sceglie di variare la scabrezza del fondale.

Riprendendo in parte quanto fatto da Sleath, l'intento è quello di fornire dei risultati e delle considerazioni che si inseriscano adeguatamente in una discussione che è già vasta, data l'importanza di un tema come quello dello strato limite. Infatti, le sue caratteristiche, in particolare il suo spessore, sono state esaminate da un grande numero di autori sotto innumerevoli condizioni sperimentali. Tuttavia, data la complessità dell'argomento, le informazioni riguardanti questa sottile regione adiacente al fondo derivano spesso da valutazioni che possono riguardare altri temi come ad esempio la distribuzione delle pressioni o i campi di velocità. Proprio questo tipo di approccio contraddistingue la tesi.

Si riportano quindi tutti i passaggi effettuati per arrivare a dei commenti finali, potenzialmente sviluppabili in studi futuri.

Quattro sono i capitoli che articolano la seguente tesi.

Nel Capitolo 1, **Introduzione**, viene fornita una breve presentazione dell'elaborato, precisando l'argomento trattato e lo specifico studio a riguardo da cui si è preso spunto per lo svolgimento degli esperimenti.

Il Capitolo 2, **Metodologia**, descrive il setup sperimentale, i software utilizzati e la relativa procedura di analisi delle immagini, mentre nell'ultima parte si riportano tutti i dettagli delle prove effettuate in laboratorio durante la campagna sperimentale.

Il Capitolo 3, **Risultati e discussione**, si concentra su quanto ottenuto dalle prove più soddisfacenti e dalla successiva analisi dei fotogrammi, con particolare attenzione al possibile confronto tra le due diverse configurazioni utilizzate al fondo.

Nel Capitolo 4, **Conclusioni**, si riportano alcune considerazioni finali derivanti dallo studio e dal confronto appena effettuato.

1.2 Stato dell'arte

La campagna sperimentale condotta da J. F. A. Sleath intorno al 1970 ha come punti di partenza degli studi svolti precedentemente da altri autori, in particolare Stokes (1851) e Lamb (1932). Al primo si deve la dimostrazione dell'esistenza di una seconda velocità posseduta in un'onda dalle particelle di fluido, in aggiunta al loro moto orbitale.

Questa nuova componente è chiamata velocità di secondo ordine o, più comunemente, velocità di trasporto di massa. Essa, come dimostrato da esperimenti svolti tenendo conto della componente viscosa del fluido, si discosta dalla previsione di Stokes avente come base l'ipotesi di un fluido perfetto, non viscoso.

L'argomento in comune tra questi studi è l'analisi della distribuzione di velocità in corrispondenza dello strato limite. Tale regione ha una propria influenza anche all'interno del fluido stesso. In particolare, è il rapporto tra l'ampiezza dell'onda a e lo spessore dello strato limite δ ad influenzare la dinamica interna del moto ondoso. Prestando attenzione alla distribuzione di velocità, Stokes definisce la velocità di trasporto di massa come:

$$u(z) = \frac{a^2 \omega \cosh[2k(z-h)]}{2 \sinh^2(kh)} + C, \quad (1)$$

Dove z è la coordinata verticale misurata dal fondo, a ampiezza dell'onda, ω frequenza angolare dell'onda, h altezza media e C una costante arbitraria. In acque profonde, la (1) si semplifica come:

$$u(z) = a^2 \omega \exp(-kz) \quad (2)$$

Da questa e dalla precedente espressione risulta evidente che la velocità cresce al di sopra del fondo, mentre in prossimità di esso si annulla. Tuttavia, queste considerazioni derivano dall'irrotazionalità

del moto e non dai minimi valori dell'ampiezza a , come assunto da Stokes. Sempre secondo il suo approccio, il moto ondoso, una volta avviato, risulta irrotazionale con un trasporto di massa univocamente determinato. Questa e altre assunzioni, alla base della sua teoria, sono però contraddette da esperimenti eseguiti in laboratorio, che mettono in risalto uno spostamento di massa non nullo e differente da quello assunto da Stokes. Tale fenomeno si verifica appena al di fuori di due zone specifiche, quella in prossimità della superficie libera e quella in corrispondenza del fondo. In quest'ultima regione, nel caso di un'onda progressiva, la (1) assume la seguente forma in seguito all'integrazione lungo la verticale z :

$$U = \frac{5a^2\omega}{4\sinh^2(kh)} \quad (3)$$

Nel caso generale di altezza finita, circoscritta e di onda stazionaria, si specifica (Longuet-Higgins 1953, p. 538) che la velocità di trasporto di massa in prossimità del fondo è:

$$U = -\frac{3a^2\omega k}{2\sinh^2(kh)}\sin(2kx), \quad (4)$$

Dove x è la coordinata orizzontale nel sistema di riferimento (x, z) . Com'è evidente, la soluzione differisce di nuovo da quella espressa dal moto irrotazionale (1), che con un'onda stazionaria non prevede alcun trasporto di massa.

Ai fini di interpretare questi risultati, si assume che inizialmente il moto interno del fluido possa essere irrotazionale con il trasporto di massa definito da Stokes. Le sue considerazioni sono quindi valide ma non permangono con la vorticità, lasciando spazio alla soluzione viscosa che descrive il moto finale. Inoltre, emerge che il medesimo flusso interno presenta un andamento differente a seconda del

rapporto a/δ . Infatti, per un'ulteriore approccio ancora più generale, se questo valore è piccolo, la vorticità si espande in tutto il fluido per conduzione o trasporto viscoso, mentre con un rapporto elevato, la diffusione della stessa vorticità avviene a causa della velocità di trasporto di massa. Quest'ultima componente, di cui si è discusso sopra, non risulta dipendere dal rapporto a/δ a contatto con il fondo. Qui a prevalere sono le condizioni al contorno locali ed il moto di prim'ordine. In conclusione, le differenze sostanziali in termini di trasporto di massa si osservano confrontando ciò che avviene nella parte più alta e nella parte più bassa della colonna d'acqua. Nel primo caso, le osservazioni non sono molto differenti da quelle ricavabili dalla teoria irrotazionale di Stokes, mentre nel secondo caso non si riesce a cogliere un'unica considerazione riassuntiva visti i risultati contrastanti che caratterizzano soprattutto le misure nello strato limite.

La regione di maggior interesse è dunque sempre quella che occupa uno spessore di pochi mm al di sopra del fondale, il quale può essere esaminato sotto diverse configurazioni.

Diversi sono stati gli studiosi che si sono cimentati in tale indagine, a partire dallo stesso Stokes e dalla sua analisi della distribuzione di velocità sopra un piano piatto oscillante. Tuttavia, Sleath afferma che la maggior parte delle soluzioni, riguardanti le misure di velocità, si avvicinano a quanto ottenuto da Lamb, a patto che lo spessore dello strato limite δ sia inferiore rispetto alla lunghezza d'onda L . Secondo questa interpretazione, il trasporto di massa svanisce come assunto da Stokes mentre la componente orizzontale di velocità u può essere determinata come:

$$u = u_0[\cos\theta - \exp(-\beta z)\cos(\theta - \beta z)], \quad (5)$$

$$u_0 = \frac{\omega a}{\sinh(kh)}, \quad (6)$$

Dove $\theta = \omega t - kx$, fase dell'onda, $\beta = (\omega/2\nu)^{1/2}$ con ν viscosità cinematica.

Tali soluzioni non possono essere considerate valide in condizioni turbolente e in regime laminare su fondo di sabbia.

Lo studio di Sleath prosegue riprendendo alcune considerazioni fatte fino a quel momento circa l'utilizzo di permanganato di potassio come tracciante.

Da indagini passate, era stato osservato che lasciando cadere cristalli di questo materiale su un fondo sabbioso, si ottenevano lingue di colorante che si sollevavano ad ogni mezzo ciclo d'onda.

Diverse ipotesi erano state azzardate fino ad allora, tra chi sosteneva che tale fenomeno rappresentasse la transizione alla turbolenza nello strato limite e chi che si potesse trattare di separazione in regime laminare dello stesso.

Sleath, dal canto suo, sostiene che il colorante risulti visibile sotto tale forma a causa di vortici formati attorno ai granelli di sabbia sul fondo, considerando che ogni singolo cristallo depositato potesse colorare il vortice generatosi dal singolo grano.

Di conseguenza, l'intero processo di formazione ed espulsione dei vortici va a modificare sicuramente la distribuzione di velocità.

L'intera indagine svolta da Sleath si pone come obiettivo principale quello di stabilire le condizioni sotto le quali è applicabile la (5), oltre che definire a che punto la formazione dei vortici diventa significativa e comprendere la loro influenza sulla distribuzione di velocità.

Il setup sperimentale preso in considerazione da Sleath prevede una vasca lunga 60 piedi, larga 2 piedi e profonda 3. Le onde progressive sono generate da una semplice paletta oscillante ad una frequenza costante.

Inizialmente si utilizza una lastra di vetro, ponendola nel fondo della vasca e ottenendo quindi un fondo liscio ed impermeabile.

Successivamente si fa riferimento a due diversi letti di sabbia grossolana, uno con una profondità del letto di circa 13 pollici e l'altro ottenuto con un sottile strato di sabbia su fondo impermeabile.

Per ultimo si considera un letto di sabbia fine.

La profondità dell'acqua in quiete è tra gli 11 e i 17 pollici, il periodo dell'onda tra 0.8 e 5.5 secondi, la lunghezza d'onda tra 34 e 348 pollici, l'ampiezza dell'onda tra 0.3 e 1.7 pollici, mentre la componente orizzontale della velocità u va da 1.7 pollici/s a 6.2 pollici/s.

In questi test la componente verticale della velocità v è sempre trascurabile rispetto a quella orizzontale, vero scopo degli esperimenti. Inoltre nella vasca, tutto è allestito in modo tale da non avere alcun movimento di sedimenti.

Nello svolgere il test con la lastra di vetro, Sleath si accorge che le condizioni sono molto simili a quelle considerate per ricavare la (5) e ciò porta ad una buona correlazione tra teoria e pratica.

Dai test con letti di sabbia grossolana si ottengono invece risultati contrastanti, dato che in alcune prove la distribuzione di velocità si avvicina alla (5), mentre in altre la differenza è notevole a causa della formazione dei vortici.

In questi casi, la variazione di ampiezza assume la forma di:

$$u = u_0[\cos\theta - \exp(-\beta z/X)\cos(\theta - \beta z/X)], \quad (7)$$

Dove X è una costante compresa tra 1 e 1.8, mentre z rappresenta la distanza verticale verso l'alto misurata dal fondo. Per Sleath, le misure di fase concordano in modo soddisfacente con la (7) per $z > X/\beta$, mentre è notevole un cambiamento in prossimità del letto. Nelle prove con sabbia fine, una piccola differenza della distribuzione di velocità, rispetto alla (5), la si ottiene a distanze maggiori di $1/\beta$

dal fondo, mentre in prossimità di esso questi scostamenti aumentano.

Non è quindi possibile raccogliere questi risultati in un'unica soluzione semplicemente considerando un fattore costante X .

Inoltre, si nota una buona correlazione tra l'entità della perturbazione e il termine βD , ma i vortici risultano troppo piccoli per poter essere distinti. Di conseguenza, non appaiono lingue di colorante.

In tutti i test eseguiti, fatta eccezione per quelli con la lastra di vetro, il valore di u_0 non differisce di più dell'11% da quello teorico ottenuto dalla (5).

Da sottolineare è lo scarso effetto della permeabilità del fondo nei confronti della distribuzione di velocità.

In sostanza, Sleath riscontra un aumento dello spessore dello strato limite ed una riduzione della fase della velocità in prossimità del fondo. Entrambi si dimostrano essere conseguenze della formazione dei vortici. L'aumento dello spessore dello strato limite è inoltre in linea con quanto si aspettava. Siccome la formazione dei vortici è un fenomeno legato alla dimensioni dei grani, egli si attende che la scala del mescolamento sia della stessa dimensione dei grani.

La sabbia grossolana presenta un diametro medio maggiore di $1/\beta$ e il mescolamento deve essere costante in tutto lo strato limite, mentre con una sabbia fine tale fenomeno ha l'obbligo di concentrarsi più intensamente vicino al fondo. Nel voler dimostrare che anche il rapido cambiamento di fase in prossimità del fondo è in linea con quanto ci si aspettava, Sleath suppone che il letto sia il piano $z=0$.

Successivamente, egli osserva che la velocità del fluido, prima della formazione dei vortici, è nulla proprio a $z=0$.

Tale velocità risulta maggiore di quanto sarebbe stata altrimenti solo dopo che i vortici hanno preso forma.

Man mano che la forza dei vortici aumenta, cresce anche la velocità di perturbazione. Questa si annulla bruscamente all'espulsione dei vortici dal letto.

La velocità di perturbazione a $z=0$ si è supposta pari a:

$$u_{pert} = u_p(\theta + \varphi)/\pi, \quad (8)$$

Dove $0 < \theta + \varphi < \pi$, con u_p e φ costanti arbitrarie.

La distribuzione di velocità in prossimità del fondo assume quindi la forma finale:

$$u = u_0[\cos\theta - \exp(-\beta z/X)\cos(\theta - \beta z/X)] \\ + 2u_p \sum_{n=0}^{\infty} (-\beta_n z) [\sin((2n+1)(\theta + \varphi) - \beta_n z) \\ - 2\cos((2n+1)(\theta + \varphi) - \beta_n z)/(2n+1)\pi] / (2n+1)\pi, \quad (9)$$

Dove $\beta_n = \beta(2n+1)^{1/2}/X$.

In conclusione, quanto appena esposto non fa che mostrare un'evidente discordanza tra i vari risultati e i diversi studi. Risulta quindi necessario eseguire ulteriori prove sperimentali ai fini di comprendere meglio la natura del moto in corrispondenza dello strato limite, oltre che l'influenza della scabrezza del fondo.

CAPITOLO 2 METODOLOGIA

2.1 Strumentazione adottata

Ai fini delle indagini di laboratorio, nell'ambito idraulico dell'ingegneria, è necessario utilizzare una vasta gamma di strumenti di lavoro. Le loro caratteristiche e la modalità con le quali sono stati usati devono essere quindi descritte per possedere una conoscenza completa di quanto fatto nell'intera campagna sperimentale.

2.1.1 Canale

Gli esperimenti sono stati svolti nel canale per moto ondoso del laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime dell'Università Politecnica delle Marche (Ancona) (Figura 2.).

Di sezione trasversale rettangolare, esso presenta a monte un sistema dotato di battionde per la generazione del moto ondoso (Figura 3.), facilmente controllabile da una centralina sul posto. Un impianto idraulico, costituito da condotte in PVC, consente di riempire il canale fino ad un'altezza prestabilita. Il suo svuotamento è previsto nel caso si volesse evitare di mantenere ferma l'acqua per un lungo periodo di tempo, con rischio di ristagno della stessa, oppure se fosse richiesta una pulizia dettagliata ai fini dell'esecuzione di un'esperimento. La larghezza e la lunghezza del canale sono di 1 m e 50 m rispettivamente, mentre l'altezza è di 1.3 m. Il canale è costituito da un fondale che, nei 36 metri centrali, è delimitato lateralmente da vetrate. Alle due estremità del canale, dove sono situati, rispettivamente, il battionde ed una spiaggia in ghiaia anti-riflettente, le pareti laterali sono chiuse e costituite da pannelli metallici. La struttura metallica alla base, avente uno spessore di 6

mm, può all'occorrenza essere ricoperta con materiali, come sabbia o sfere di plastica, con lo scopo di ricreare un determinato modello da analizzare. La campagna sperimentale oggetto di questa tesi non ha previsto l'utilizzo di particolari configurazioni al fondo diverse da quella già esistente, tranne per l'impiego di un pannello di carta vetrata che verrà poi descritto (si veda Capitolo 2, Paragrafo 2.3.2). È importante sottolineare che tutti gli esperimenti sono stati svolti proprio nella parte centrale della canaletta (Figura 1., con verso di propagazione delle onde da destra a sinistra), dove è possibile filmare senza ostruzioni visive e dove la piattaforma d'acciaio al fondo presenta un tratto rettilineo compreso tra due piccole rampe. In particolare, la zona d'interesse si limita al tratto situato poco più a valle della prima rampa ascendente.

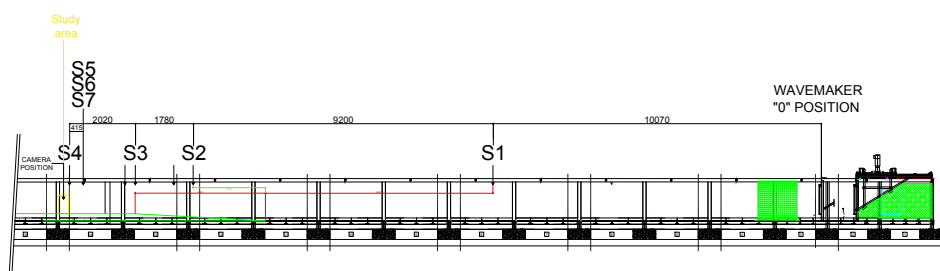


Figura 1. Zona d'interesse nel canale e posizione delle sonde. Le onde propagano da destra (posizione del battionde) a sinistra (zona di misura)



Figura 2. Canale

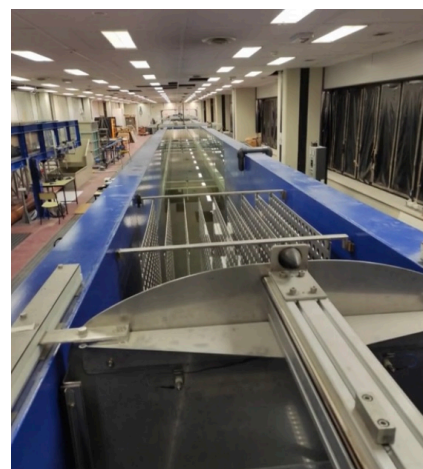


Figura 3. Battionde

2.1.2 Sonde

Sette sono le sonde presenti nel canale, ma solo quattro sono state prese in considerazione nello svolgimento degli esperimenti. A 10.7 m dalla macchina battionde si trova la prima S1, distante 9.2 m dalla seconda S2, in mezzo alla rampa, e 10.98 m dalla terza S3, tra rampa e piattaforma. Alla fine di questa, a 2.2 m dalla S3 vi è la S4, praticamente nella sezione a valle del modello considerato.

Tali sonde elettro-resistive di livello sono composte da due elettrodi paralleli equidistanti attraverso i quali passa il circuito elettrico.

Questo viene chiuso dall'acqua, nella quale tali sensori sono parzialmente sommersi.

Viene così misurata la conduttanza elettrica, proporzionale alla lunghezza della porzione di sonda immersa e, conseguentemente, al livello idrico del canale. L'istante di tempo che intercorre tra un'acquisizione del segnale ed un'altra è di 0.04 secondi. Tutti i dati registrati vengono poi immagazzinati nel computer di controllo.

La calibrazione, ripetuta prima di ogni serie di esperimenti, prevede inizialmente lo spostamento manuale delle sonde che vengono quindi alzate e abbassate. Una volta posizionato il dispositivo ad una determinata altezza, si utilizza un opportuno programma presente nel computer di controllo, che permette di associare al segnale di entrata (Volts) il livello d'acqua (m). Dopo aver maneggiato una sonda, può capitare che si assista ad un piccolo movimento dell'acqua. Bisogna quindi aspettare che la superficie libera non oscilli più per poter procedere con la calibrazione. Il controllo delle sonde avviene a livelli diversi a seconda delle prove eseguite e dell'altezza dell'acqua presente nel canale. Ovviamente, non viene mai escluso il livello 0, al quale si presta particolare attenzione eseguendo una doppia verifica per avere una maggior robustezza della misura in quell'intorno.

2.1.3 Telecamera e illuminazione

Al di fuori del canale, nella zona d'interesse già citata precedentemente, è posta una camera FLARE 12M125 CCD. Questa, avente una risoluzione di 4100 X 3072 pixel e una profondità di pixel di 16 bit, è collegata ad un apposito DVR Express Core.

Al suo interno sono memorizzate tutte le immagini ottenute, che vengono poi recapitate nel computer di controllo.

Da quest'ultimo è possibile avviare ed interrompere la registrazione, ricavando quei fotogrammi che vengono poi analizzati nelle successive operazioni di post-processing.

Uno step fondamentale, che precede l'acquisizione dei video, è la messa a fuoco della telecamera, seguita dalla valutazione del fattore di conversione da pixel a metri. Infatti, importante è ricavare a quanti metri corrisponde un pixel dell'immagine. Quest'ultima operazione viene eseguita mediante una scacchiera, costituita da quadratini aventi lato di 2.5 cm, posizionata su un apposito pannello (Figura 4.). Questo, mantenuto ad una distanza costante dalla telecamera, viene pian piano spostato a destra e a sinistra della stessa. L'intento è quello di convertire gli spostamenti delle particelle, valutabili in pixel, in spostamenti misurabili in unità standard.

Un aspetto che migliora in maniera significativa la qualità dei fotogrammi è avere a disposizione un'illuminazione adeguata.

Negli esperimenti svolti, risultava essere di fondamentale importanza ottenere la giusta luminosità al fondo, focalizzando l'attenzione su uno spazio limitato che non si estendesse per tutta la larghezza del canale. Si è così utilizzata una lampada a led, saldamente posta ad una distanza di pochi cm dal fondo ed opportunamente attrezzata affinché la luce risultasse essere meno dispersiva possibile.

La posizione della lampada consentiva alla stessa di non essere bagnata dalle onde una volta che queste venivano avviate.

Nella Figura 5 si può osservare l'illuminazione con la quale le varie prove sono state eseguite, in condizioni di buio nell'ambiente circostante ad eccezione della lampada appena descritta.

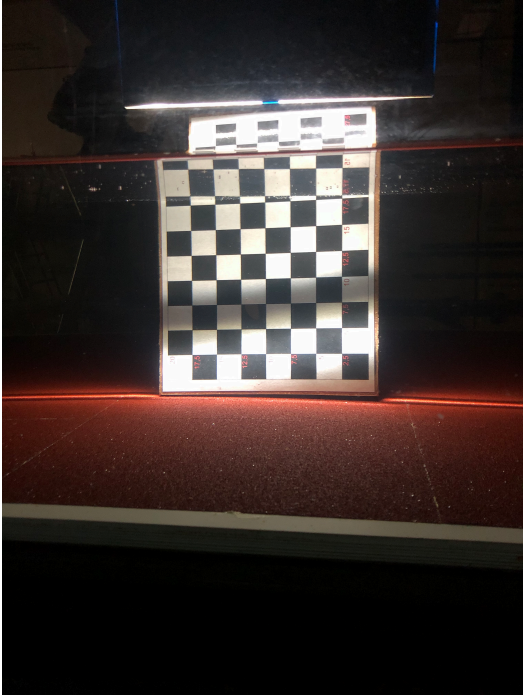


Figura 4. Scacchiera

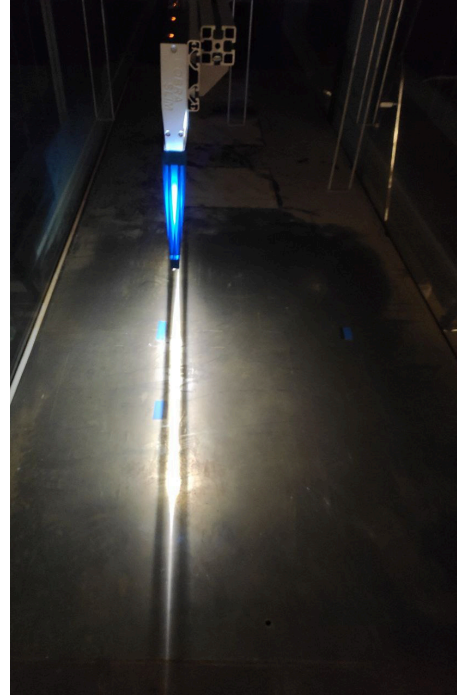


Figura 5. Lampada a led

2.1.4 Inseminante

Per la realizzazione di tutte le prove in laboratorio, si è scelto di utilizzare come inseminante neutro del peperoncino macinato. Il suo impiego facilita il tracciamento dalla videocamera delle particelle, che devono essere il più chimicamente e fisicamente neutre possibili rispetto all'acqua presente all'interno del canale. Ciò permette di avere una stima del campo di velocità durante il passaggio ondoso tramite la tecnica della PTV (Particle Tracking Velocimetry).

Il peperoncino è stato trattato mediante due diversi setacci ASTM 100 e 170 di 0.149 e 0.088 mm rispettivamente (Figura 6.). Sono state così ottenute tre diverse frazioni, poi appositamente raccolte in sacchetti separati.

È stato classificato come peperoncino grossolano quello trattenuto al setaccio 0.149 mm, il cui passante viene in parte tenuto dal sottostante setaccio 0.088 mm. Il trattenuto di quest'ultimo viene indicato come peperoncino medio. Il cosiddetto 'fino' viene invece raccolto come passante al setaccio 0.088 mm.

Quello che è stato poi preso in considerazione per il tracciamento delle particelle è il peperoncino medio, la cui dimensione può essere quindi considerata pari a circa 0.12 mm.

Il metodo per immetterlo in acqua è stato più volte cambiato nel corso degli esperimenti, in funzione del tipo di onda avviata e di fondo allestito. Questi due non sono gli unici fattori condizionanti. Infatti, nella scelta del metodo di inserimento del tracciante nel canale, l'obiettivo principale era ottenere un maggior quantitativo di particelle visibili sul fondo, regione di maggior interesse.

Questa verifica veniva eseguita rapidamente osservando l'immagine fornita dalla telecamera ogni qualvolta si immetteva tale sostanza.

In alcuni casi le particelle faticavano ad avvicinarsi al fondo, rimanendo così in superficie per troppo tempo. In altri accadeva il contrario, ma c'era comunque il rischio che invece di occupare un determinato spessore al di sopra del fondo, esse depositassero totalmente su di esso.

La soluzione più congrua doveva garantire un giusto compromesso tra i diversi casi (Figura 7.).



Figura 6. Setacci per peperoncino



Figura 7. Peperoncino immerso in acqua

2.2 Programmi utilizzati

Il lavoro descritto nella seguente tesi non si limita all'esecuzione degli esperimenti. Infatti, è richiesta anche una vasta analisi, che va a completare ed approfondire quanto già svolto in laboratorio. A tale scopo è stata utilizzato l'ambiente software Matlab, grazie al quale è stato possibile svolgere rapidamente dei calcoli che hanno poi agevolato l'intero processo. Con dei semplici codici si sono analizzati i vari segnali di acquisizione delle sonde, oltre che ricavati parametri importanti partendo dalle note caratteristiche dell'onda. A questo si è aggiunto il pacchetto di codici noto come Part2Track, che utilizza l'approccio della Particle Tracking Velocimetry (PTV) ed è in grado di gestire set di immagini su cui esegue il tracciamento delle particelle. Esso sfrutta il framework di sviluppo di Matlab e consente di effettuare sia operazioni di pre- che di post-processing. Le analisi fatte e i vari step di elaborazione delle immagini sono di seguito descritti.

2.2.1 Analisi delle sonde

Le sonde S1, S2, S3 e S4, prese in considerazione durante lo svolgimento degli esperimenti, rilevano istante per istante come varia il livello dell'acqua in funzione del passaggio dell'onda. Passando da un sensore all'altro, le letture eseguite sono certamente diverse perché cambia la posizione del dispositivo all'interno del canale. Ogni singola sonda è caratterizzata da uno specifico intervallo di tempo in cui il segnale viene acquisito.

Quindi, ciò che è stato fatto tramite Matlab è rappresentare i livelli letti dalle quattro sonde in altrettanti grafici.

Questi raffigurano semplicemente l'elevazione della superficie libera η (asse y) in funzione del tempo (asse x). Dopo aver evidenziato i punti in cui ciascun segnale andava ad intersecare lo zero (esempio nel Grafico 1.), si sono opportunamente rimosse le onde iniziali (esempio nel Grafico 2.). Queste, infatti, appartengono ad una fase transitoria di crescita che è da escludere.

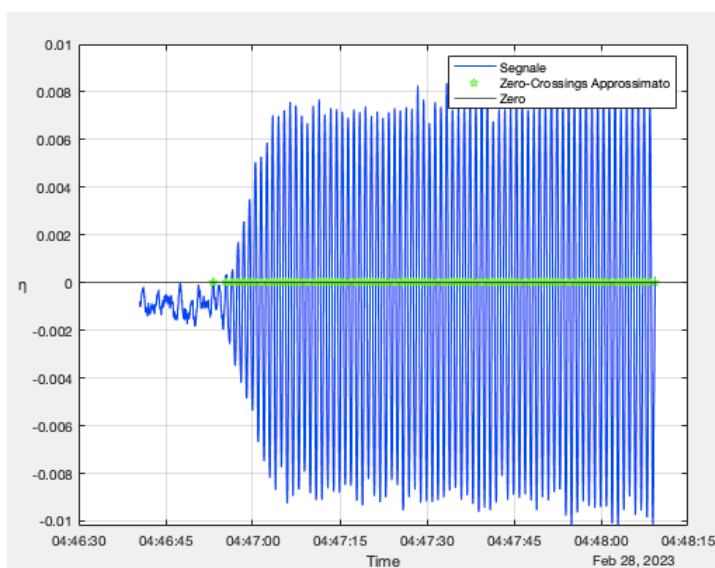
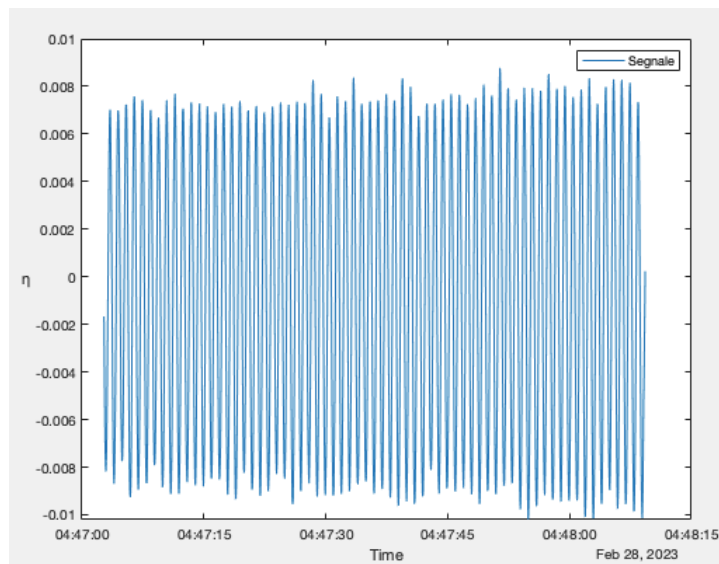


Grafico 1. Esempio dell'intersezione con lo zero del segnale della sonda S1

Grafico 2. Esempio del segnale della sonda S1 senza onde di transizione



Ogni singola onda che costituisce un determinato profilo superficiale può essere individuata mediante il criterio di attraversamento dello zero, meglio noto come *zero crossing method*. In particolare, si distingue lo *zero up-crossing*, attraversamento dello zero in senso ascendente, dallo *zero down-crossing*, che avviene in senso discendente.

L'altezza H ed il periodo T di ogni singola onda vengono così ricavati come i valori numerici dei massimi dislivelli verticali e degli intervalli orizzontali presenti tra due successivi attraversamenti dello zero.

La scelta, per l'analisi qui esposta, è stata quella di operare mediante *zero up-crossing*, servendosi di una funzione Matlab.

Questa ha permesso di ricavare, per ogni segnale, i singoli valori di H e T , graficati poi in funzione del tempo (esempi nel Grafico 3., Grafico 4.). Dalle loro medie si sono ricavati i valori finali dell'altezza '*Height*' e del periodo '*Period*'. Nel seguente caso preso come esempio la prova prevedeva fondo liscio e un'onda alta 2 cm di periodo $T=1$ s, con i due parametri sopra citati che valgono 0.0166 m e 1.0014 s rispettivamente.

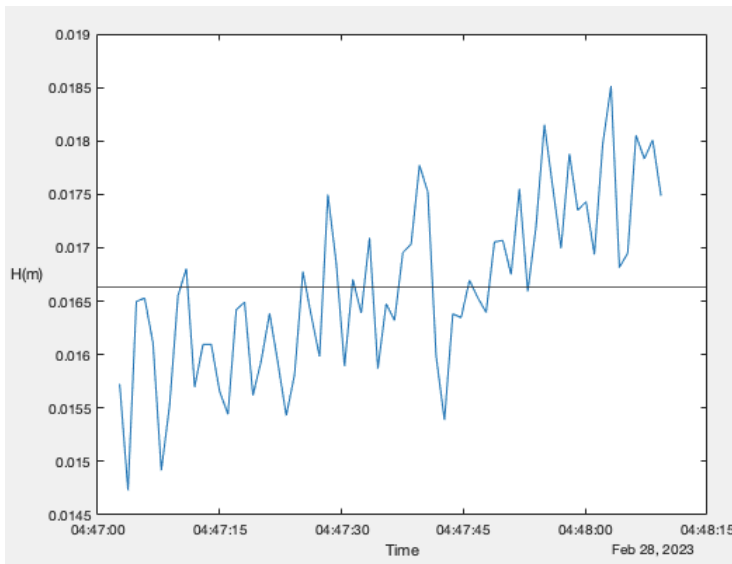


Grafico 3. Esempio grafico (Time, H) con $\text{'Height'}=0.0166 \text{ m}$

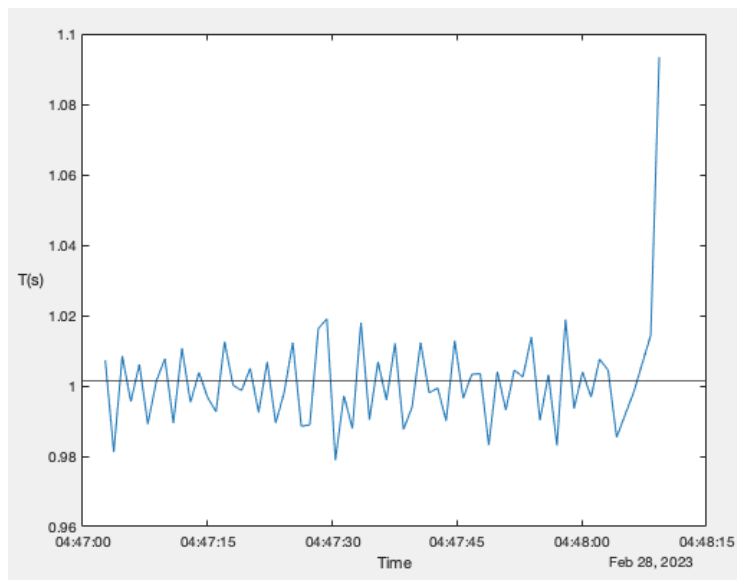


Grafico 4. Esempio grafico (Time, T) con $\text{'Period'}=1.0014 \text{ s}$

2.2.2 Scelta delle configurazioni da studiare

Tutto ciò che è stato svolto in laboratorio e, in generale, l'intero lavoro oggetto di questa tesi, ha rivolto gran parte dell'attenzione a quanto si manifestava vicino al fondo.

L'obiettivo è sempre stato quello di ottenere le migliori condizioni possibili in prossimità del cosiddetto strato limite.

Per il calcolo del suo spessore δ è stata ripresa la teoria di Stokes, dalla quale si ricava la formula:

$$\delta = \sqrt{2\nu/\omega}, \quad (10)$$

Poteva risultare essere di grande aiuto valutare questo parametro in funzione di alcune caratteristiche dell'onda non incognite.

Ad esempio, già noti erano gli intervalli all'interno dei quali potevano oscillare i valori dell'altezza dell'acqua e del periodo ondoso.

Tra 0.1 e 0.5 m era compresa h , mentre T era assunto tra gli 0.5 e i 2 secondi. È stato quindi impostato un semplice script in Matlab che, partendo da questi intervalli di valori, consente di ricavare δ , ma anche la frequenza angolare ω , la lunghezza d'onda L e la profondità relativa h/L .

All'interno del codice è stato necessario richiamare una funzione, precedentemente creata, dalla quale si ricava il parametro L sfruttando la teoria ondosa lineare.

Inoltre, lo spessore dello strato limite e il rapporto adimensionale h/L possono variare in funzione di h e T e la routine permette di approfondire questo tipo di legame tramite delle mappe di colore facilmente analizzabili (Grafico 5., Grafico 6.).

Questa breve analisi, resa possibile dalla rapidità di calcolo di un software come Matlab, aveva come risultati i parametri sopra citati.

La loro valutazione, in particolare quella di δ , ha poi permesso di agevolare la scelta sulle configurazioni da adottare al fondo per lo svolgimento delle prove in laboratorio.

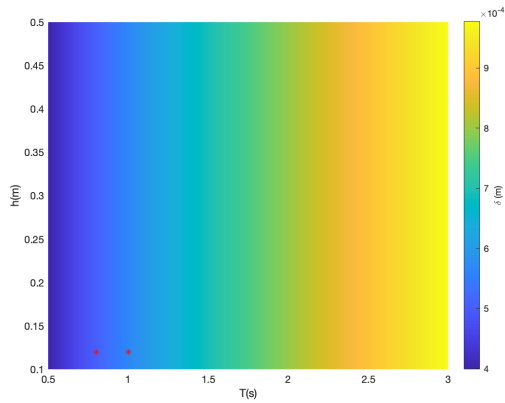


Grafico 5. $\delta(T, h)$

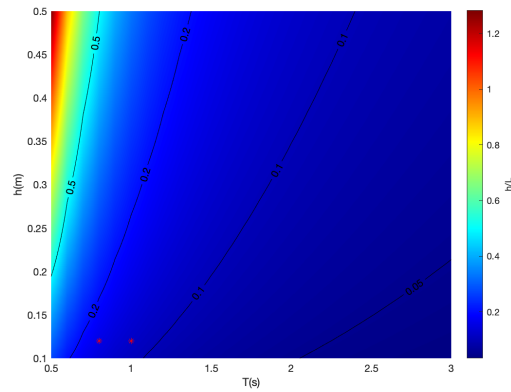


Grafico 6. $h/L(T, h)$

2.2.3 Post-processing: fase 1

Una volta eseguita la registrazione di una prova mediante la telecamera, tutte le immagini acquisite (esempio nella Figura 8.) vengono inizialmente raccolte all'interno di una specifica cartella, che può essere denominata 'raw'. Questa, a sua volta, dev'essere inserita all'interno della cartella di lavoro in Matlab insieme al software Part2Track e allo script `parameter.m`.

Il primo codice da utilizzare, chiamato `RemoveBackground.m`, consente di eliminare eventuali distorsioni (o "rumori") e oggetti non particellari. Questo è richiesto dato che il software Part2Track necessita di lavorare con immagini a sfondo pulito e scuro.

Si stabilisce il numero di frames della cartella 'raw' da analizzare, specificando anche il numero di frames su cui fare la media.

La routine viene eseguita solo per i primi fotogrammi, ossia quelli che si ottengono sottraendo il numero di frames su cui effettuare la media al numero di frames da analizzare.

Più quest'ultimo numero è basso, più lento sarà il processo.

Quindi, una volta individuato il numero di fotogrammi su cui eseguire la media, lo script `RemoveBackround.m` lavora su questo quantitativo di immagini partendo dalla prima della cartella 'raw'.

Determinato il background medio di questi frames, esso viene rimosso dalla prima immagine e così via.

Eseguita la routine, si ottiene una cartella 'noBack' contenente tutti i frames senza background (esempio nella Figura 9.). Una grande differenza rispetto alle immagini iniziali sta nell'assenza del fondo del canale, che viene ritoccato proprio perché considerato un elemento di disturbo nella visualizzazione.

Per rendere più visibili le particelle al software è necessario anche aumentare il contrasto delle immagini. Queste sono composte da pixel, la cui differenza tra massima e minima intensità rappresenta proprio il contrasto. Lo script che consente di eseguire tutto ciò è noto come `AdjustContrast.m`.

Le immagini ora non vengono più prese dalla cartella iniziale 'raw', ma dalla 'noBack', risultato del precedente step eseguito rimuovendo lo sfondo. Lanciando questo script si possono regolare manualmente i nuovi limiti di intensità per ottenere il contrasto desiderato.

Il giusto compromesso sta nell'osservare particelle più luminose, visibili e contemporaneamente non creare distorsioni nei frames. Una volta individuati i limiti '*Minimum*' e '*Maximum*' dell'intensità voluta, si raccolgono tutte le immagini ottenute in una nuova cartella 'contrast'. Questa contiene quindi tutti i fotogrammi a cui è stato rimosso lo sfondo e corretto il contrasto (esempio nella Figura 10.).



Figura 8. Frame originale

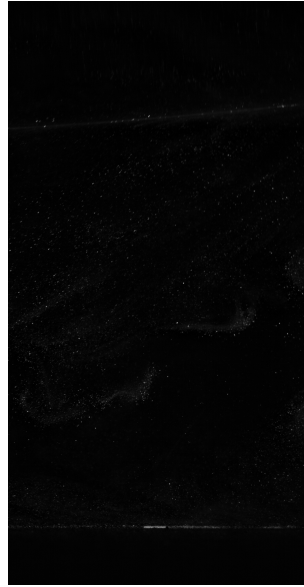


Figura 9. Frame senza background



Figura 10. Frame con contrasto corretto

2.2.4 Post-processing: fase 2

A valle della prima fase di post-processing è necessario considerare un nuovo script, chiamato `parameter.m`.

Esso contiene una serie di parametri molto importanti. Il primo di questi, indicato come `'im_res'` rappresenta la risoluzione della camera utilizzata. In particolare i due numeri scritti descrivono rispettivamente l'altezza e la larghezza del frame.

Il passo temporale tra due frame consecutivi è indicato come `'dt'`, che non è nient'altro che l'inverso del framerate.

I due parametri che regolano il processo sono `'p_size'` e `'p_int'`.

Il primo indica la dimensione media delle particelle in pixel, che si aggira sempre intorno ai valori 7,9,11, mentre il secondo è l'intensità media delle particelle espressa sempre in pixel.

Lanciando questo script non si ottiene nessuna nuova cartella, come invece accade negli step precedenti, ma tale passaggio risulta essere fondamentale per il proseguimento del processo.

Il principale codice Matlab per il tracciamento delle particelle è posto all'interno della cartella 'src', contenuta nel software Part2Track, ed è denominato `main_proc.m`.

Esso prende come immagini di input quelle presenti all'interno della cartella 'contrast', mentre l'output viene fornito sotto forma di un'altra cartella 'results'. Il rilevamento delle particelle viene eseguito mediante l'inseguimento delle stesse, che appaiono nei fotogrammi successivi. Mettendo in rassegna ogni singolo frame, vengono quindi estratte le traiettorie delle particelle, il cui spostamento viene fornito in pixel sotto forma di istogrammi.

Il risultato più importante è però un grafico dal quale emergono, con vari colori, tutti i percorsi orbitali tracciati dalle particelle.

La maggior parte di essi non sono perfettamente chiusi a causa di una mancanza del software Part2Track, che può perdere di vista una certa particella passando da un frame a quello successivo.

Questo difetto non infierisce sull'analisi finale, in quanto le presunte traiettorie possono essere facilmente intuite e ricostruite.

Attenzione va posta nel parametro '`plot_final_results`', dal quale si può ottenere:

- Un grafico rappresentante il campo di velocità medio (esempio nel Grafico 7.)
- Un grafico dal quale leggere il numero di vettori individuati in vari punti di una griglia (esempio nel Grafico 8.)
- Un grafico contenente il campo di vettori di velocità u , v (esempio nel Grafico 9.).

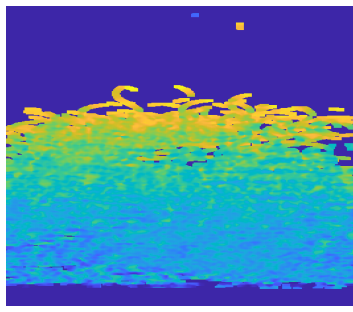


Grafico 7.

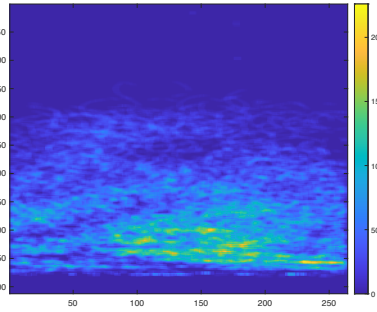


Grafico 8.



Grafico 9.

`VectorFieldVideo.m` è lo script che consente di creare un video nel quale poter osservare il campo di velocità delle particelle appena rilevate con il software `Part2Track`. Avviata la routine, al di sotto della superficie libera sono visibili un insieme di vettori diffusi che si muovono in funzione del passaggio dell'onda. Questo codice opera sovrapponendo ad ogni singolo frame il proprio campo vettoriale.

Il codice Matlab che rappresenta un passo in avanti rispetto a quanto ottenuto dal precedente è `VectorFieldInterpolate.m`. Infatti, è possibile interpolare il campo di velocità che si ha ormai a disposizione, utilizzando una griglia regolare definita da un numero specifico di punti in direzione x e y (mm). Maggiori sono le dimensioni di tale griglia, più ampia risulta la discretizzazione in entrambe le direzioni.

La routine di interpolazione opera ricoprendo ogni singolo frame con il proprio campo di velocità. Il risultato fornisce sempre un video, nel quale è possibile visualizzare non solo il movimento delle particelle in funzione del passaggio dell'onda, ma anche il valore della velocità che esse assumono. Quest'ultimo dato è fornito da una barra a colori. Una colorazione rossa/arancio è indice di velocità massima, mentre una saturazione verde/bluastro rappresenta i valori minimi di velocità. Il valore nullo è evidenziato dal colore giallo.

Tale analisi permette di visualizzare il campo di velocità totale e anche quello delle due singole componenti, quella orizzontale u e quella verticale v . Queste, in funzione delle varie fasi dell'onda, assumono valori diversi in varie regioni al di sotto della superficie libera.

I profili delle velocità orizzontali possono essere ottenuti tramite un ulteriore script contenuto nel software Part2Track, noto come `VelocityVerticalProfiles.m`, che ha diversi parametri in comune con il codice appena descritto. In aggiunta, un importante dato input è rappresentato da `'ixProfile'`. Questo fornisce la collocazione nella griglia della verticale lungo cui vengono estratti i profili di velocità. Per poter ricavare il miglior risultato possibile è necessario fornire al software un grande numero di informazioni, da qui la scelta di ricercare nel singolo fotogramma la zona costituita dal maggior quantitativo di particelle.

Infatti, prima di stabilire il valore del parametro, è opportuno considerare anche un solo frame tra quelli che si hanno a disposizione e cercare di individuare in esso la regione occupata dal maggior numero di particelle. Questa, all'interno del valore scelto di punti in direzione x della griglia regolare, occupa una certa posizione, la quale deve approssimativamente essere indicata proprio dal valore di `'ixProfile'`. La routine consente di ricavare un grafico rappresentante tutti i profili verticali di velocità che occupano una specifica colonna d'acqua in tutti i fotogrammi. Anche qui compare una barra a colori, calcolata in base al numero di profili che si sceglie di rappresentare. L'ordine di colorazione va dal blu al rosso. Il centro del grafico coincide con il valore nullo di u , componente orizzontale del vettore velocità, occupante l'asse delle ascisse. Il primo profilo della velocità orizzontale è indicato dal colore blu, mentre l'ultimo è messo in evidenza dal rosso.

Il codice successivo è chiamato `VelocityFieldPhaseMean.m` e consente di ottenere i campi di velocità mediati in fase. Esso presenta molti dei parametri visti negli script precedenti, come ad esempio `'ixProfile'`. Questo deve assumere lo stesso valore o uno prossimo a quello scelto in `VelocityVerticalProfiles.m`.

Infatti, è opportuno che i risultati di entrambe le ultime due routine vengano ricavati lungo la verticale indicante la posizione in griglia della regione con il maggior numero di particelle tracciate.

`VelocityFieldPhaseMean.m` opera prendendo in considerazione tutti i periodi ondosi della prova. Su questi, viene eseguita una media dei campi di velocità ricavabili dai precedenti profili.

In sostanza, la routine analizza i campi di velocità di tutti i frame che compongono una prova, poi li raggruppa per periodo e ne esegue una media.

`VelocityFieldPeriodMean.m` è l'ultimo script utilizzato nella fase di post-processing. Come è facilmente intuibile, da esso sono ricavabili sempre i campi di velocità, ma questa volta mediati sul periodo. Il procedimento seguito da questo codice è sostanzialmente identico a quello precedente, dato che si esegue una media dei campi di velocità inclusi in un periodo d'onda. Questa operazione è svolta per tutti i periodi che compongono una prova.

Il risultato della routine, fornito sotto forma di un grafico, viene espresso in funzione della componente orizzontale u del vettore velocità, occupante l'asse delle ascisse, mentre il corrispondente asse delle ordinate mostra la distanza verticale misurata dal fondo in mm. I vari profili vengono associati all'errore quadratico del profilo medio rispetto a tutti i profili verticali, della velocità orizzontale u , usati per ottenerlo.

2.3 Campagna di esperimenti

Indipendentemente dalla campagna di prove che si vuole eseguire, bisogna essere consapevoli dei lunghi tempi che caratterizzano l'attività in laboratorio.

Diverse possono essere le problematiche che ostacolano il compimento del processo, da un malfunzionamento di natura tecnologica ad un difetto di uno strumento.

In questo contesto, anche passando da un esperimento ad un altro, l'esecuzione di una procedura standard aiuta a perseguire gli obiettivi che ci si è prefissati.

La campagna di condotta è costituita da un gran numero di prove. Alcune sono state scartate per esiti insoddisfacenti, mentre le altre sono qui esposte.

2.3.1 Esperimenti con fondo liscio

La prima sequenza di esperimenti in laboratorio è stata eseguita considerando il caso di fondo liscio. Semplicemente, questo modello è stato ottenuto riferendosi al canale già esistente, dotato quindi di una piattaforma d'acciaio al fondo che non viene sovrastata da alcun tipo di materiale.

Dopo il riempimento della canaletta, la prima operazione prevista è la calibrazione delle quattro sonde comprese tra il battionde e la rampa discendente.

Di seguito le altezze (m) a cui ogni singolo sensore è stato posto per essere poi calibrato:

- Sonda S1 ai livelli 0,10 ; -0,10 ; 0,00
- Sonda S2 ai livelli 0,14 ; -0,14 ; 0,00
- Sonda S3 ai livelli 0,08 ; -0,08 ; - 0,06 ; 0,00
- Sonda S4 ai livelli 0,08 ; -0,08 ; 0,00

Negli esperimenti precedenti a questo, si era posizionata la telecamera orizzontalmente con una leggera inclinazione verso il basso, in modo tale da inquadrare la superficie libera e soprattutto il fondo. Tuttavia, dalle immagini poi ricavate, la regione dello strato limite appariva in prospettiva. Infatti, con la telecamera così disposta, il letto veniva osservato dall'alto piuttosto che frontalmente. Per far fronte a questo, si è deciso di spostare la camera più in basso lungo la sua verticale. Non solo, essa è stata poi ruotata di 90° gradi, ossia disposta non più orizzontalmente ma verticalmente. Se con questa posizione il fondo appariva frontalmente alla direzione dell'obiettivo, il rischio era di non comprendere la superficie libera nella registrazione. Si è scelto così di inclinare di poco verso l'alto il dispositivo. Questa posizione ed il relativo zoom non sono stati più soggetti a variazioni durante la prova per non invalidare la precedente operazione di calibrazione. L'onda analizzata presentava un'altezza H di 4 cm e un periodo T di 0.8 secondi. Per poter avviare il battionde, è necessario fornirle come input un altro parametro, ossia l'altezza dell'acqua all'interno del canale. Questa misura presa poco prima della rampa ascendente, forniva come valore 60.9 cm mentre in corrispondenza della piattaforma orizzontale, caratterizzante la zona d'interesse, si avevano 12 cm.

Tre prove sono state effettuate in questa prima sequenza di esperimenti:

1. Nella prima, una volta lanciata l'onda sopra descritta, si è subito notato che il peperoncino medio inserito risultava essere troppo poco visibile al fondo. Da qui la scelta di miscelarlo con acqua, che ha portato ai miglioramenti sperati. Dopo 60 secondi dalla partenza delle onde, è stata avviata una registrazione di 40 secondi mediante la telecamera. Attesi ulteriori 60 secondi, se n'è eseguita un'altra di uguale lunghezza.

2. Nella seconda prova si è cercato di migliorare ulteriormente, sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo, la visualizzazione delle particelle al fondo. L'inseminante è stato quindi immesso mediante l'utilizzo di un piccolo tubo che, poggiato direttamente sul fondo del canale, poteva portare al risultato desiderato. Anche in questo caso si è subito rilevato un problema non indifferente. Le particelle, infatti, si adagiavano completamente sul fondo senza occupare un determinato spessore al di sopra di esso. Il problema non si presentava più posizionando il tubicino a metà altezza in acqua, in modo tale che il peperoncino si disperdesse sia in prossimità dello strato limite che della superficie libera. Questa volta la registrazione, lunga sempre 40 secondi, si è fatta partire contemporaneamente all'avvio del moto ondoso.
3. Con le stesse condizioni appena descritte, fatta eccezione per la registrazione avviata dopo 60 secondi, è stata sviluppata l'ultima prova.

I gruppi di immagini raccolti dopo ogni tentativo, ottenuti con un framerate di 120 fps, sono stati poi confrontati per cercare di stabilire quale di essi fornisse il risultato migliore. Questo è stato ricavato dalla terza prova, i cui fotogrammi sono poi stati oggetto di post-processing.

2.3.2 Condizioni da adottare con fondo scabro

Il secondo set di esperimenti in laboratorio ha previsto l'abbandono del modello con fondo liscio, sostituito da quello scabro.

Questo tipo di configurazione è stata ottenuta tramite l'utilizzo di semplice carta vetrata posizionata su un apposito pannello.

Il tutto è stato solidarizzato alla piattaforma d'acciaio al fondo mediante silicone, da lasciar asciugare almeno 2/3 giorni prima dell'inizio delle prove. Come già detto più volte, la sezione del canale che interessava effettivamente era limitata alla piattaforma orizzontale compresa tra le due rampe.

Di conseguenza, la configurazione appena descritta è andata ad occupare solo questo specifico tratto (Figura 11., Figura 12.).



Figura 11. Configurazione dall'alto



Figura 12. Configurazione sulla zona d'interesse

La carta vetrata utilizzata aveva una grana pari a 40 che, utilizzando la formula di conversione¹:

$$\text{Micron} = 11615(\text{Grit})^{-0.933}$$

risulta circa pari ad un diametro $D=0.4 \text{ mm}$ e può essere assimilabile ad uno specifico materiale definito da questa dimensione.

Vista la linea diretta che collega questa campagna sperimentale a quanto fatto da Sleath nel 1970 (si veda Capitolo 1, Paragrafo 1.2), la configurazione utilizzata può essere paragonabile ad un fondo di sabbia, le cui dimensioni coincidono con tale diametro.

Con questo valore di D , sono state fatte alcune considerazioni prettamente teoriche partendo sempre dall'esperienza di Sleath.

In sostanza, si sono considerati i tre rapporti D/δ , meglio definiti come $D\beta$ dallo stesso autore, per poi invertire la relazione:

- $D/\delta=0,28$ da cui $\delta=1,429 \text{ mm}$
- $D/\delta=0,44$ da cui $\delta=0,909 \text{ mm}$
- $D/\delta=0,59$ da cui $\delta=0,678 \text{ mm}$

Con questi valori dello spessore dello strato limite, entrando nel grafico inferiore (Grafico 11.), si sono ricavati i tre periodi ondosi T (s) necessari per generarli.

Dal grafico superiore (Grafico 10.) si può trovare la profondità h (m) e le conseguenti condizioni di acqua bassa, intermedia o alta in cui ci si trova con un'onda di periodo T .

Le informazioni, ricavate da questa breve ma importante analisi, hanno poi aiutato nell'approccio con la nuova configurazione.

¹ <https://www.researchgate.net/post/Is-there-any-equation-to-convert-surface-roughness-from-grit-to-micron>

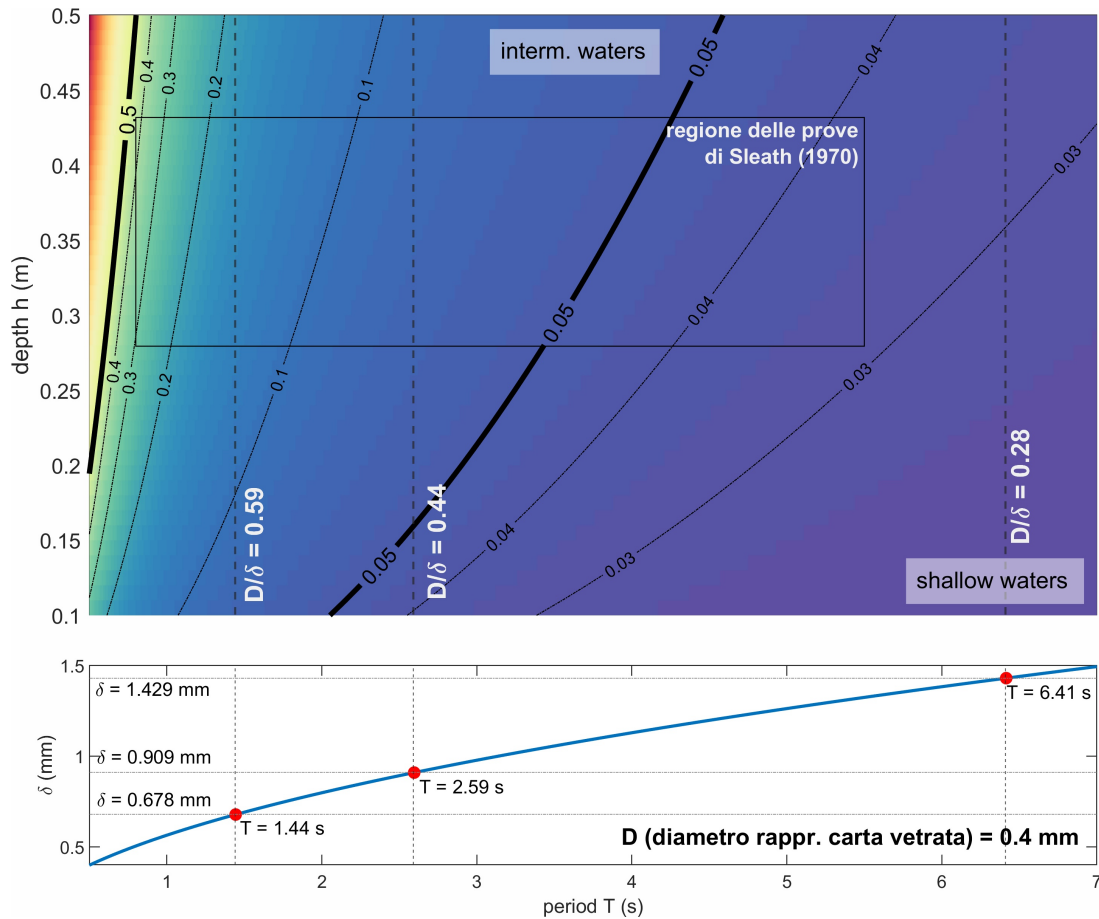


Grafico 10. (T, h) (sopra) Grafico 11. (T, δ) (sotto)

2.3.3 Esperimenti con fondo scabro

Al solito, riempito con acqua il canale, si è eseguita la calibrazione delle quattro sonde elettro-resistive. Queste sono state posizionate alle stesse altezze previste nella precedente configurazione con fondo liscio, fatta eccezione per alcune piccole variazioni.

Infatti:

- Sonda S1 ai livelli 0,10 ; -0,10 ; 0,00
- Sonda S2 ai livelli 0,14 ; -0,14 ; 0,00
- Sonda S3 ai livelli 0,08 ; -0,08 ; 0,00
- Sonda S4 ai livelli 0,06 ; -0,08 ; 0,00

In particolare, non è stato possibile eseguire il controllo all'altezza di 0.08 m per il quarto sensore, che andava a toccare con il fondo del canale. Lo spessore del letto era certamente aumentato con il nuovo assetto con carta vetrata.

Altre modifiche hanno interessato l'apposita apparecchiatura di svolgimento, comprensiva di lampada a led e telecamera.

Dalla loro posizione iniziale, utilizzata nei precedenti esperimenti, entrambe sono state spostate verso monte, ossia verso il battionde. La lampada ha subito una traslazione di 15 cm, mentre la telecamera di 14.5 cm.

Completata la messa a fuoco di quest'ultima tramite l'apposito pannello con scacchiera, si è proseguito misurando l'altezza dell'acqua nel canale. Questa risultava essere di 20 cm in prossimità della sezione d'interesse, mentre di 61.6 cm a monte in corrispondenza del battionde.

L'onda esaminata presentava le stesse caratteristiche delle sperimentazioni con fondo liscio, quindi altezza H di 4 cm e periodo T di 0.8 secondi.

Le prove eseguite sono state quattro:

1. Vista la bontà degli ultimi tentativi con fondo liscio, il primo approccio con la nuova configurazione ne ha seguito in parte le orme. Difatti, il peperoncino medio raccolto è stato bagnato prima della sua immissione in acqua. Questa è avvenuta con l'utilizzo del tubo, immerso a metà altezza (Figura 13.). La registrazione, avviata dopo 60 secondi dalla partenza del moto ondoso, ha consentito di ricavare un video di 40 secondi.
2. La seconda prova è stata svolta nello stesso identico modo della prima. Dalla telecamera si è ricavata una registrazione di circa 40 secondi, iniziata un minuto o poco più dopo il lancio delle onde.

3. Nel cercare di ottenere un esito ancor più soddisfacente, con la penultima prova si è tentato di procedere in maniera differente rispetto a quanto scritto sopra. Il peperoncino medio non è stato miscelato. Non utilizzando tubi o contenitori di alcun tipo, l'inseminante è stato versato su un semplice setaccio, il cui passante andava poi a cadere in acqua (Figura 14.). Tuttavia, anche con una semplice osservazione ad occhio nudo, si poteva notare che le particelle faticavano enormemente ad arrivare al fondo. Da qui la scelta di bagnare il peperoncino con acqua, versare la miscela in un apposito contenitore ed inserirla manualmente nel canale. L'acquisizione del video segue alla lettera quanto fatto con le due precedenti prove.
4. Nell'ultima prova si è utilizzata la miscela di peperoncino e acqua, inserita anche qui tramite il contenitore sopra citato. Questa operazione è stata eseguita direttamente, senza essere preceduta da un altro tipo di immissione. Si è seguito il solito procedimento per la registrazione.

Nonostante la maggior semplicità e rapidità di svolgimento, l'ultima prova (Figura 15.) ha portato ai risultati migliori. Le immagini da essa ricavate, attraverso un framerate di 120 fps, sono state oggetto della successiva analisi in Matlab.

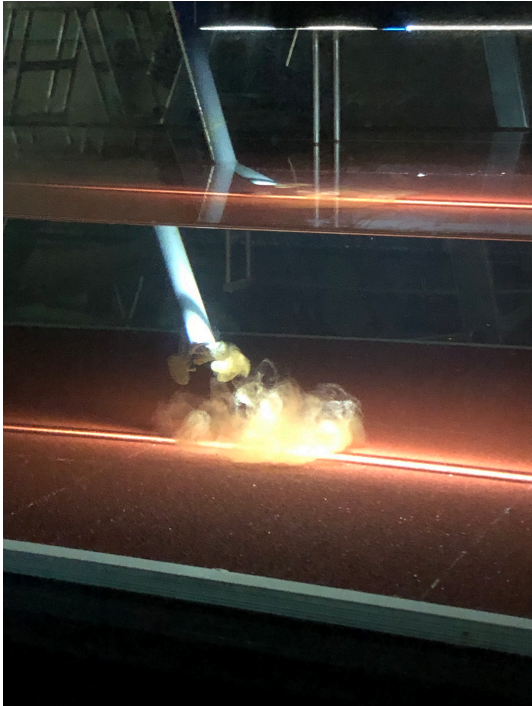


Figura 13. Tubo in acqua



Figura 14. Setaccio



Figura 15. Particelle nell'ultima prova

Capitolo 3 RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Tipologia di risultati

Il capitolo qui presente riporta quanto ottenuto dalle prove eseguite, raccogliendo tutti i casi analizzati e operando un confronto prettamente grafico tra di essi.

I risultati finali sono stati ottenuti sfruttando il lavoro svolto mediante il software Part2Track, precedentemente descritto.

Per ogni esperimento sono mostrate le traiettorie percorse dalle particelle al di sotto della superficie libera, con particolare attenzione al fondo, oltre che il campo di velocità delle singole componenti.

A completamento dell'analisi, sono forniti i profili delle velocità orizzontali e i campi mediati in fase e sul periodo.

3.2 Risultati con fondo liscio

I risultati qui esposti provengono dalla terza ed ultima prova (si veda Capitolo 2, Paragrafo 2.3.1) della prima serie di esperimenti. Come prima operazione si è eseguita l'analisi delle quattro sonde di livello (si veda Capitolo 2, Paragrafo 2.2.1) e dei loro segnali di acquisizione, ricavati dopo aver intercettato l'onda di altezza $H=4\text{ cm}$ e periodo $T=0,8\text{ s}$. Dopo aver rimosso le onde di transizione, si sono individuate, per ogni sensore, le medie del periodo e dell'altezza servendosi della funzione Matlab di `zero up-crossing`. L'andamento del periodo T espresso in funzione del tempo (Grafico 14., Grafico 18.) metteva in evidenza una certa costanza, con un valore medio 'Period' sempre prossimo a 0.8 s per tutti e quattro i sensori. Lo stesso non si poteva dire dell'altezza H (Grafico 15., Grafico 19.), con

un trend che mostrava un decremento spostandosi dalla sonda S1 alla sonda S4. Tuttavia, in termini di ordini di grandezza, si trattava di piccole variazioni passando da un valore della media 'Height' massimo pari a 0.0219 m ad un minimo di 0.0170 m.

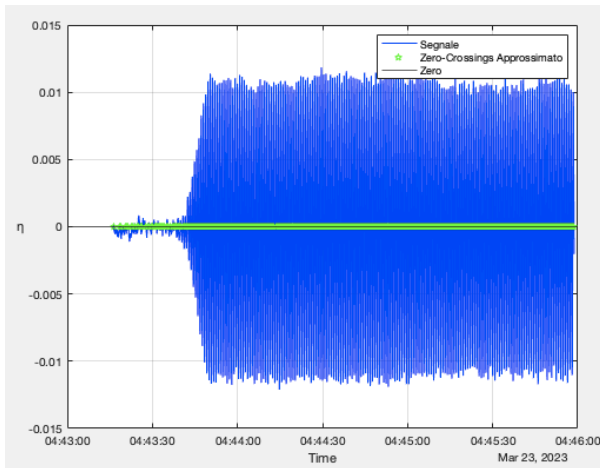


Grafico 12. Intersezione con lo zero del segnale della sonda S1 nel caso di fondo liscio

Grafico 13. Segnale della sonda S1 senza onde di transizione nel caso di fondo liscio

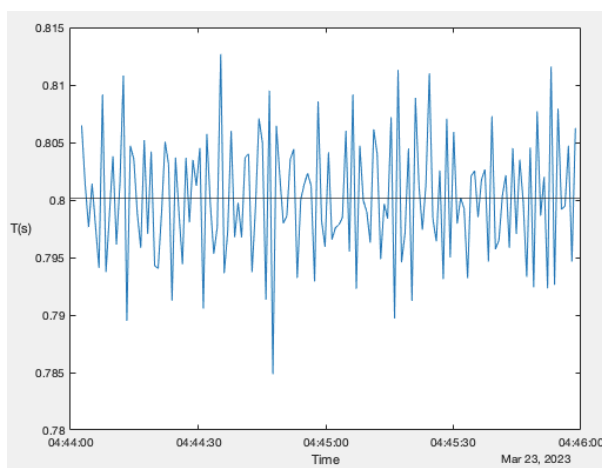
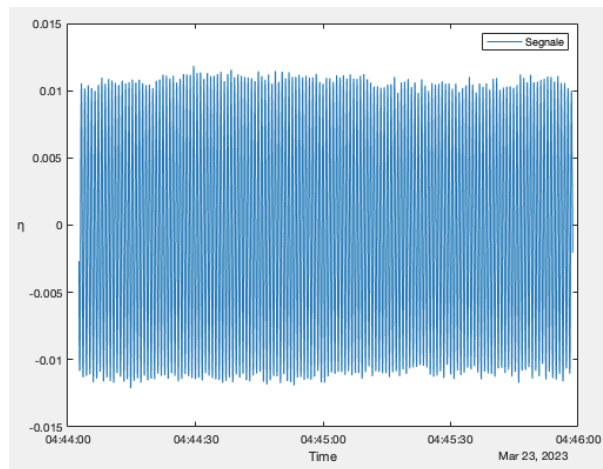


Grafico 14. (Time, T) della sonda S1 con 'Period'=0.8001 s nel caso di fondo liscio

Grafico 15. (Time, H) della sonda S1 con 'Height'=0.0219 m nel caso di fondo liscio

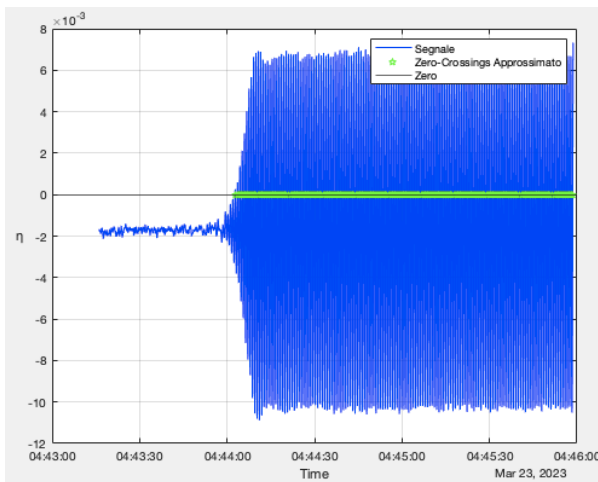
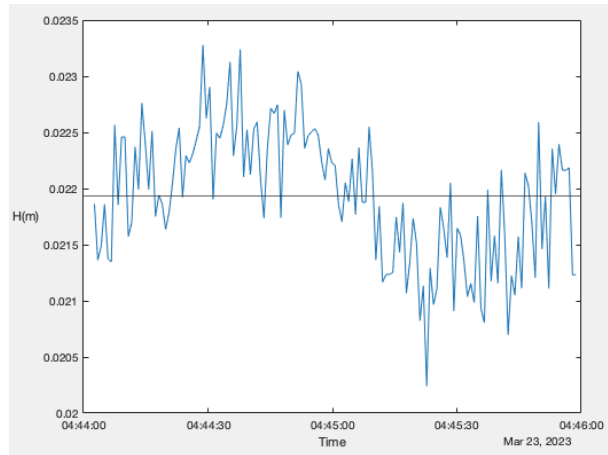
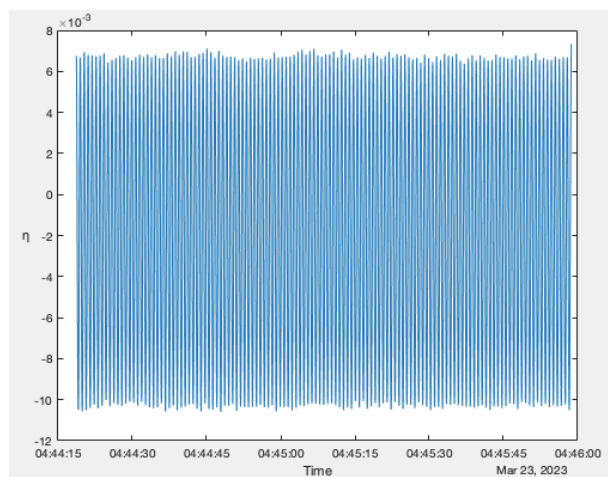


Grafico 16. Intersezione con lo zero del segnale della sonda S4 nel caso di fondo liscio

Grafico 17. Segnale della sonda S4 senza onde di transizione nel caso di fondo liscio



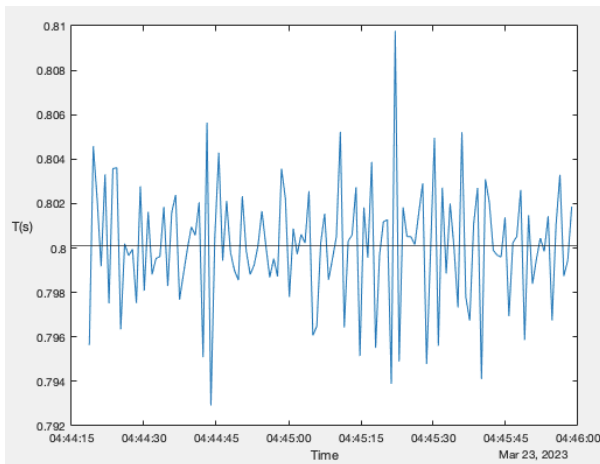
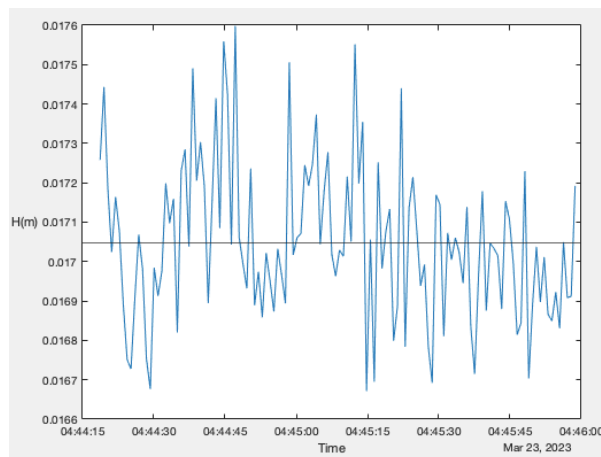


Grafico 18. (Time, T) della sonda S4 con $\text{'Period'}=0.8001$ s nel caso di fondo liscio

Grafico 19. (Time, H) della sonda S4 con $\text{'Height'}=0.0170$ m nel caso di fondo liscio



Sono state 608 le immagini raccolte mediante la telecamera, sottoposte poi ai due step che costituiscono la fase di pre-processing. Il primo di questi, che consiste nella rimozione del background, è stato eseguito considerando 40 frames sui quali effettuare la media. La regolazione del contrasto è invece avvenuta individuando un *'Minimum'* ed un *'Maximum'*, di 3688 e 4607 rispettivamente. A questo è seguito il consueto tracciamento delle particelle. Solo il tipo di configurazione adottata al fondo appariva già come un importante indizio sul tipo di esito che ci si doveva attendere, in particolare riguardo alle traiettorie percorse dalle particelle in moto.

Dalla teoria ondosa lineare di Airy, è infatti risaputo che non vi è alcun trasporto di massa durante la propagazione di un'onda progressiva.

La singola particella, percorrendo ciclicamente lo stesso tipo di traiettoria, risulta muoversi continuamente attorno alla sua posizione di quiete.

Entrando più nel dettaglio, Airy ha anche cercato di definire la legge che governa il movimento della particella d'acqua, individuandola nella semplice equazione di un'ellisse.

A seconda della profondità d'acqua considerata, le traiettorie ellittiche possono assumere di volta in volta una conformazione diversa, rimanendo comunque chiuse. Tuttavia, sia che si tratti di acque basse, intermedie o alte, l'orbita al fondo si riduce ad un tratto lineare, percorso ripetutamente avanti-indietro.

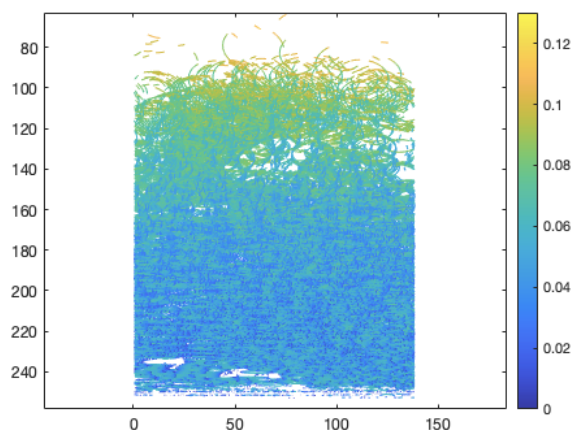
In tutte le prove eseguite e descritte in questa tesi, la condizione è sempre stata quella di acque intermedie, definita da un rapporto h/L compreso tra $1/20$ e $1/2$. Quindi, ciò che ci si aspettava era che le traiettorie percorse dalle particelle rispecchiassero quanto scritto sopra, rispettando la teoria lineare in condizioni di acque di profondità finita. Tale verifica veniva eseguita mediante il codice principale del software Part2Track, `main_proc.m`. Prima di questo è stato necessario completare la prima fase del post-processing prevista dallo script `parameter.m`.

Qui si sono compilate le varie voci (si veda Capitolo 2, Paragrafo 2.2.4), concentrandosi sui due parametri `'p_size'` e `'p_int'`.

Per il primo è stato scelto il valore di 7 pixel, mentre per il secondo quello di 7000, basandosi su esperienze derivanti da precedenti esperimenti.

Il risultato ottenuto dal tracciamento delle particelle è mostrato nel grafico seguente:

Grafico 20. Traiettorie nel caso di fondo liscio



Le stesse forme assunte dalle orbite ellittiche a varie altezze confermavano quanto studiato e dimostrato da Airy in condizioni di acque intermedie. In particolare, le ellissi apparivano più schiacciate in prossimità della superficie libera (Grafico 21.), dove il semiasse orizzontale era maggiore di quello verticale.

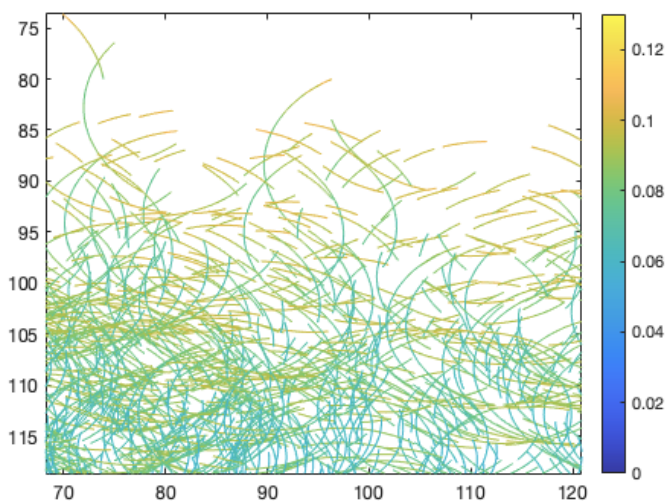
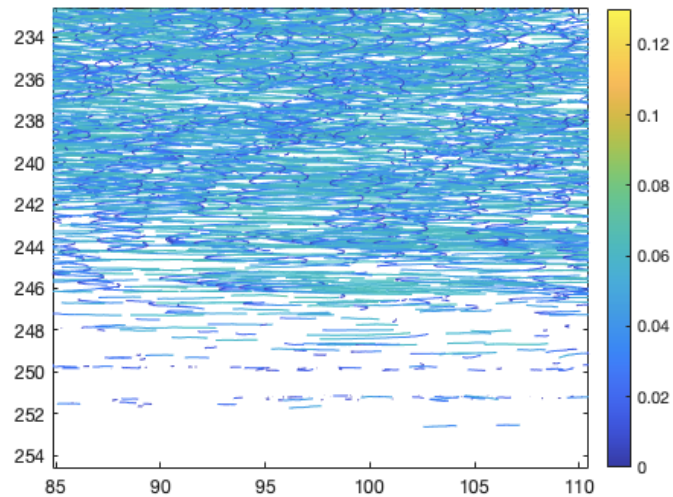


Grafico 21. Traiettorie in prossimità della superficie libera nel caso di fondo liscio

La disuguaglianza tra i due semiasse veniva mantenuta spostandosi dall'alto verso il basso. Infatti, il semiasse orizzontale rimaneva maggiore del verticale fino al fondo, dove il primo continuava ad essere diverso da zero mentre il secondo si annullava. Prestando attenzione alla regione di pochi mm presente al di sopra del fondo, ciò che saltava subito all'occhio era che le orbite ellittiche, che

comparivano in tutta la soprastante colonna d'acqua, degeneravano in dei semplici tratti lineari (Grafico 22.). Questo non faceva che rispettare quanto detto sopra circa la teoria ondosa lineare.

Grafico 22. Traiettorie in prossimità del fondo nel caso di fondo liscio



Nella successiva fase di post-processing, eseguita con lo script `VectorFieldVideo.m`, si è potuto osservare il movimento continuo delle particelle tracciate dal software in funzione del passaggio dell'onda.

Ancora una volta i risultati erano in accordo con i dettami della teoria di Airy. Nelle figure seguenti è semplice verificare il tipo di spostamento subito dalle particelle in funzione delle varie fasi dell'onda. Al di sotto del cavo, si assisteva ad un moto con verso opposto rispetto a quello di propagazione del moto ondoso (Figura 16.). La fase successiva rappresentava il nodo discendente, sotto il quale le particelle si rivolgevano verso l'alto (Figura 17.). Con l'arrivo della cresta l'oscillazione proseguiva seguendo questa volta il verso di propagazione dell'onda, contrariamente a quanto avvenuto con il cavo (Figura 18.). Successivamente si assisteva ad una disposizione verso il basso delle particelle a dimostrare il passaggio alla fase di nodo ascendente (Figura 19.).

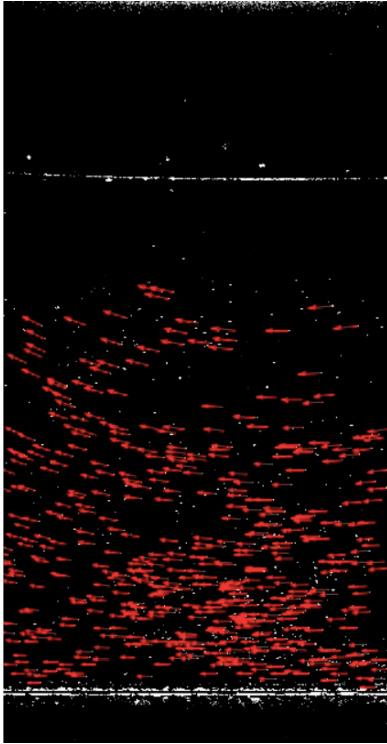


Figura 16. Movimento delle particelle al di sotto del cavo nel caso di fondo liscio

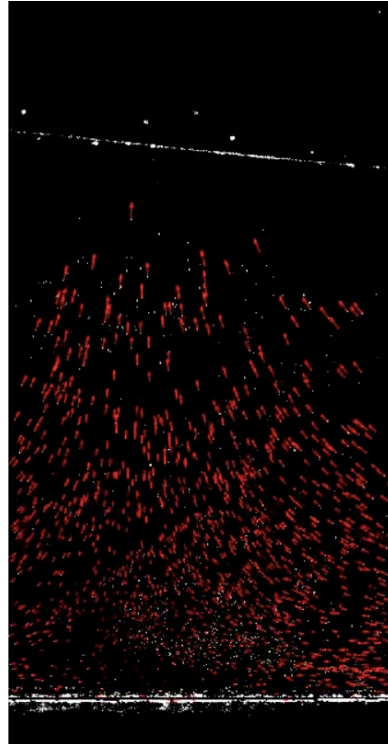


Figura 17. Movimento delle particelle al di sotto nodo discendente nel caso di fondo liscio

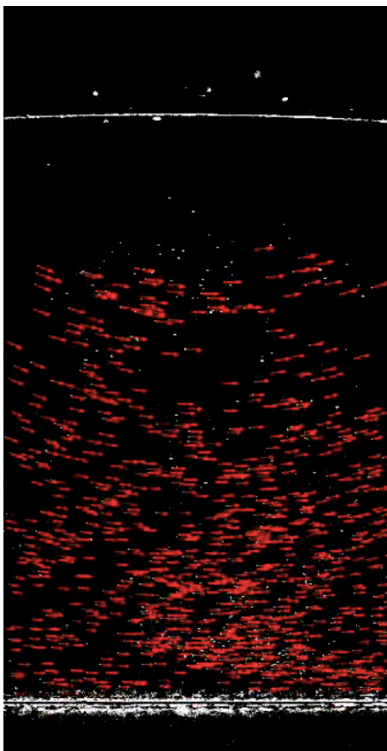


Figura 18. Movimento delle particelle al di sotto della cresta nel caso di fondo liscio

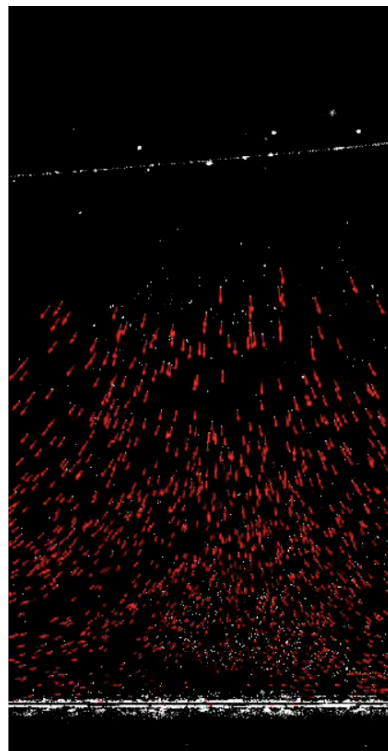


Figura 19. Movimento delle particelle al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo liscio

Già osservando queste figure poteva essere di facile intuizione capire come varia il campo di velocità al transito dell'onda. Tuttavia, questo appariva in maniera molto più chiara una volta completato l'ultimo step, che prevedeva $608-40=568$ fotogrammi come con il precedente `VectorFieldVideo.m`.

È con lo script `VectorFieldInterpolate.m` che Part2Track consente di ottenere i campi di velocità interpolati, servendosi di tutto quello che si è ricavato dai precedenti codici. Anche qui, prima di mostrare i risultati, è opportuno ricordare l'approccio della teoria lineare nei confronti del campo di velocità al di sotto di un'onda progressiva. Le due componenti u , v del vettore velocità presentano un andamento diverso in funzione sia delle varie fasi dell'onda sia della quota considerata.

Come accade per le traiettorie, un altro fattore condizionante è la profondità dell'acqua. La disuguaglianza tra le due componenti è più evidente in condizioni di acque basse che di acque profonde.

La u presenta un'intensità sempre maggiore della v . Non solo, mentre la prima deve ridursi a valori minimi ma non nulli una volta raggiunto il fondo, a contatto con esso, la seconda deve annullarsi. Questo deve avvenire nel rispetto della condizione al contorno di tipo cinematico, la quale garantisce un'assenza di flusso ortogonale attraverso una qualsiasi superficie di interfaccia.

L'andamento del campo di velocità si ottiene fornendo dei dati input allo script citato sopra. Tra questi, le dimensioni della griglia e il fattore di smoothing influenzano particolarmente la bontà del risultato finale.

Per il primo parametro si sono scelti 200 punti in direzione x e 300 in direzione y , mentre per il secondo si è optato per il valore di 0.5.

La componente orizzontale u si comportava come mostrato nei seguenti grafici:

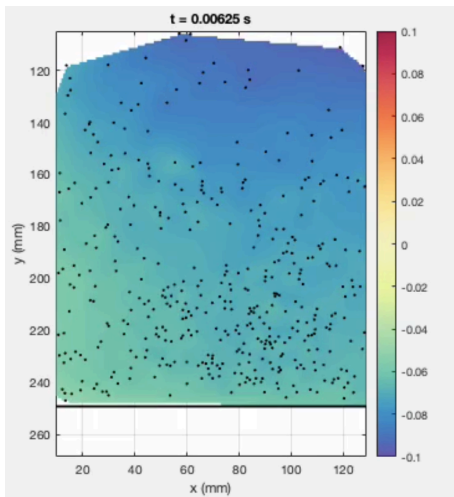


Grafico 23. Andamento della u al di sotto del cavo nel caso di fondo liscio

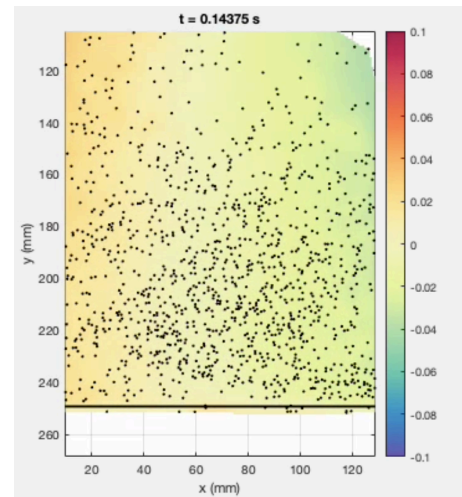


Grafico 24. Andamento della u al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo liscio

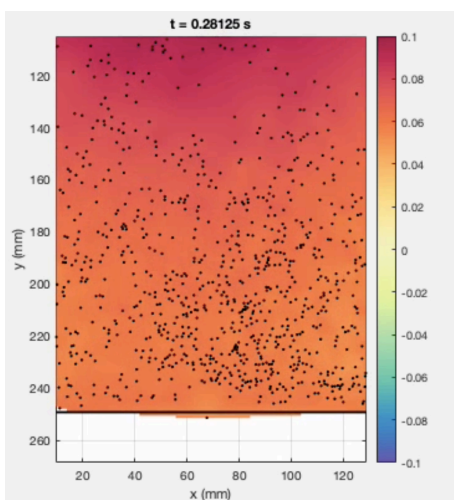


Grafico 25. Andamento della u al di sotto della cresta nel caso di fondo liscio

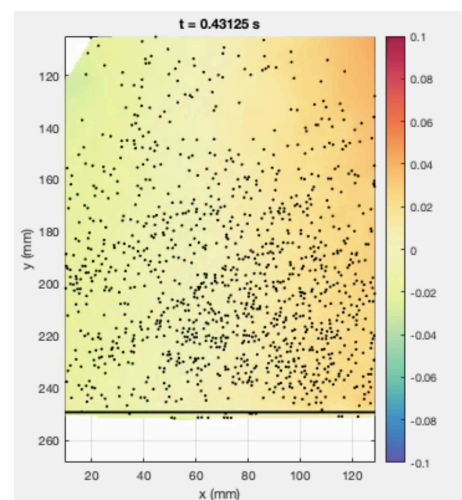


Grafico 26. Andamento della u al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo liscio

Dalla barra a colori, come già detto (si veda Capitolo 2, Paragrafo 2.2.4), una colorazione blu corrispondeva ad un valore di velocità negativo. Questo era da assumere come dimostrazione che le particelle si muovevano nel verso opposto a quello di propagazione del moto ondoso.

Tale andamento indicava che si era in presenza di quella fase dell'onda nota come cavo (Grafico 23.).

Continuando nella visualizzazione del video ottenuto da `VectorFieldInterpolate.m`, si assisteva ad un cambio di colore da blu a giallo. Il valore nullo di u segnalava uno spostamento non orizzontale delle particelle, che muovendosi verso l'alto si trovavano al di sotto del nodo discendente (Grafico 24.). Successivamente si osservava una colorazione rossa indice di velocità massima positiva. Questo non poteva che accadere in corrispondenza della cresta, con le particelle che seguivano lo stesso verso di propagazione dell'onda (Grafico 25.). Infine, con il nodo ascendente si ritornava ad una componente orizzontale nulla come dimostrato da un movimento verso il basso (Grafico 26.).

La componente verticale v , data la sua intensità trascurabile, era caratterizzata da valori inferiori rispetto a quelli assunti dalla componente orizzontale.

Inoltre, dove la u risultava nulla o prossima allo zero, la v si avvicinava al suo valore massimo. Il suo andamento in funzione del passaggio dell'onda era il seguente:

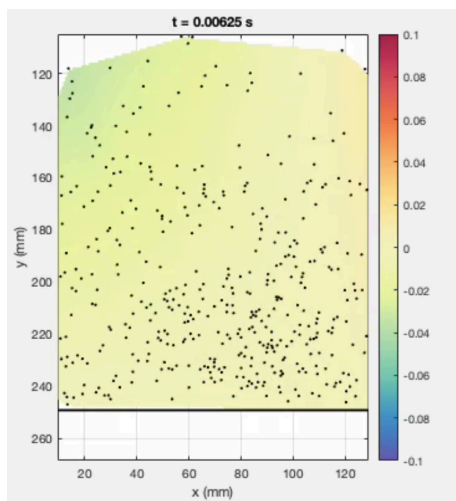


Grafico 27. Andamento della v al di sotto del cavo nel caso di fondo liscio

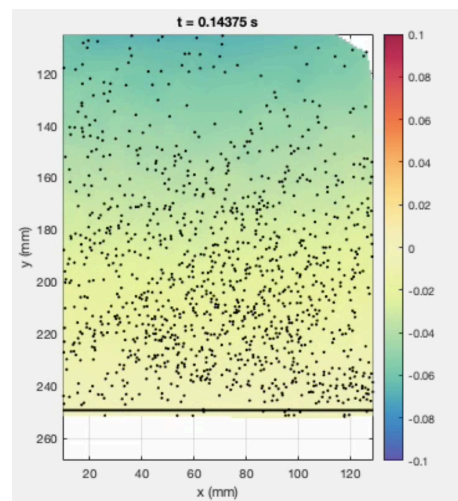


Grafico 28. Andamento della v al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo liscio

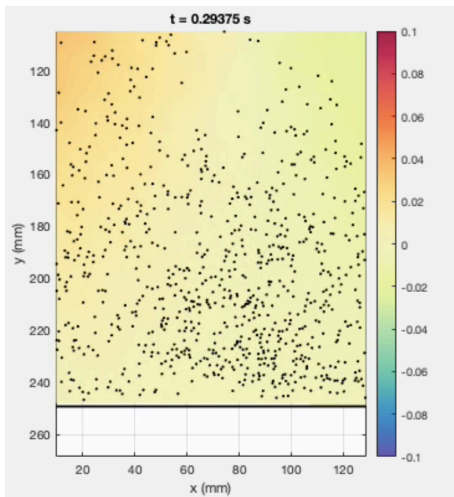


Grafico 29. Andamento della v al di sotto della cresta nel caso di fondo liscio

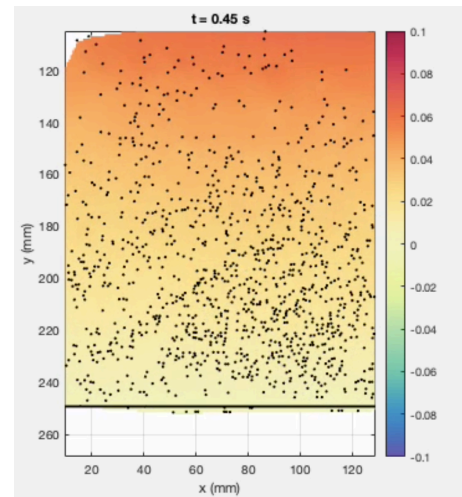


Grafico 30. Andamento della v al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo liscio

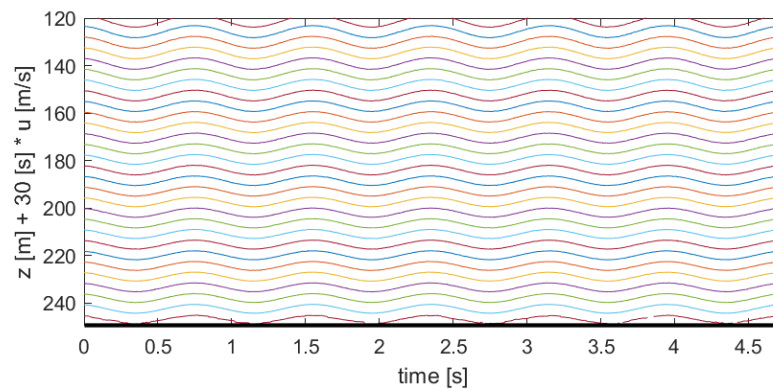


Grafico 31. Serie temporali della u a varie distanze dal fondo nel caso di fondo liscio (sopra)

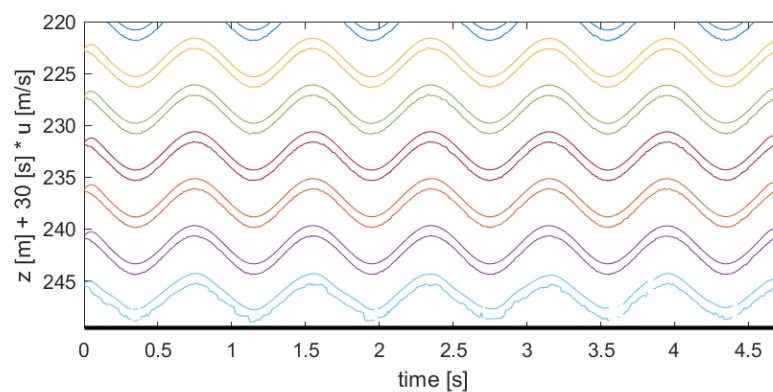


Grafico 32. Serie temporali della u sul fondo nel caso di fondo liscio (sotto)

Dove si osservava una prevalenza di colore giallo, le particelle procedevano orizzontalmente, quindi con un valore di v nullo. Questo caratterizzava il cavo e la cresta dell'onda. Al contrario, i due nodi discendente ed ascendente mettevano in risalto una componente verticale massima. Il moto era rivolto verso l'alto ed il basso, rispettivamente. Al fondo, nonostante i bassi valori di entrambe, ad essere predominante era sempre la velocità orizzontale u .

Si è poi scelto di rappresentare le serie temporali di quest'ultima componente a diverse distanze z dal fondo (Grafico 31.), sempre con particolare interesse alla regione più bassa dello spessore di pochi mm (Grafico 32.). Attraverso la funzione 'lowpass' di Matlab si sono rimosse le alte frequenze, mostrando il segnale originale (linea inferiore) e quello filtrato (linea superiore) attraverso una coppia di linee dello stesso colore. A completamento di quanto fatto, sempre servendosi delle funzionalità grafiche di un software come Matlab, si è rappresentata la mappa di colore delle stesse serie temporali (Grafico 33.).

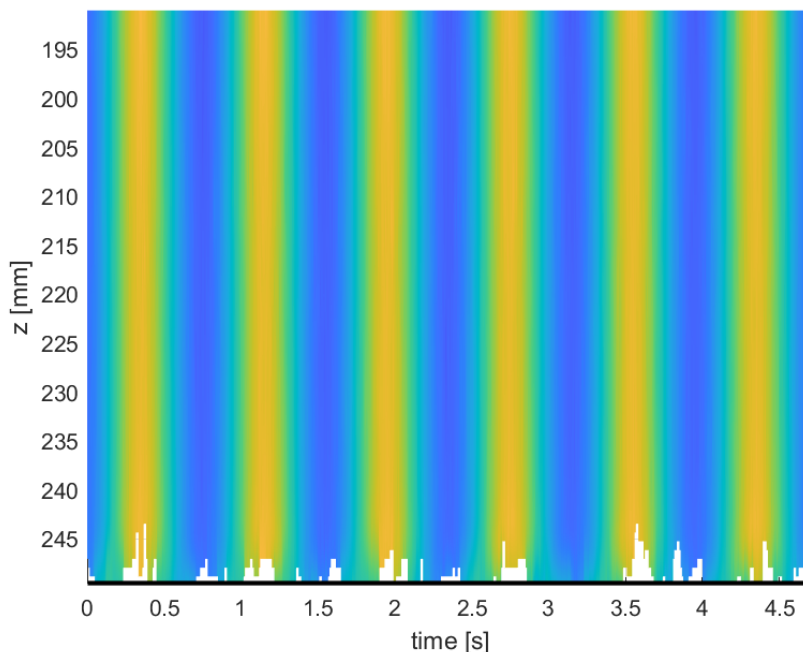


Grafico 33. Mappa di colore delle serie temporali nel caso di fondo liscio

La u rimaneva il principale oggetto di studio anche nel passaggio allo script `VelocityVerticalProfiles.m`. Le dimensioni della griglia ed il tipo di smussamento rimanevano invariati dal precedente codice.

Osservando un singolo fotogramma, contenuto nella cartella 'contrast', era evidente che le particelle occupassero maggiormente una regione situata poco più a destra della metà dell'immagine.

Quindi, dati i 200 punti interpolanti in direzione x , si è optato per un 'ixProfile' pari a 130.

Rispetto a quanto fatto con `VectorFieldInterpolate.m`, a variare era il quantitativo di fotogrammi sui quali far operare la routine.

Infatti, si voleva verificare se vi fosse anche una piccola variazione nei profili di velocità durante lo svolgimento dell'esperimento.

Interessava soprattutto osservare l'andamento della componente orizzontale u in tre diverse fasi di un'intera prova, concentrandosi quindi sull'istante iniziale, centrale e finale.

Il periodo ondoso T era di 0.8 secondi, di conseguenza 96 erano i frames comprendenti un'oscillazione d'onda completa.

Per il primo periodo ondoso della prova i profili di velocità sono stati ottenuti facendo operare la routine sui primi 96 fotogrammi.

Questi sono stati divisi in tre intervalli di 32 frames ciascuno.

Il primo grafico (Grafico 34.) lo si è ottenuto facendo lavorare la routine dal primo al 32° frame.

Il secondo blocco di immagini, compreso tra la 33esima e la 64esima, ha consentito di ricavare i profili di velocità in un secondo grafico (Grafico 35.).

Un terzo (Grafico 36.) è stato derivato dalla stessa routine eseguita però dal 65° al 96° fotogramma.

L'unione di questi tre grafici rappresentava il periodo d'onda iniziale, costituito quindi da tutti i primi 96 frame di velocità.

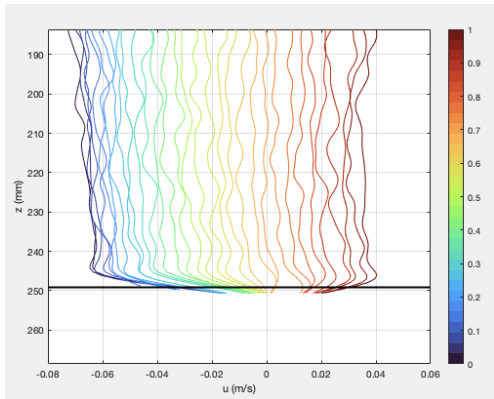


Grafico 34. Parte iniziale del primo periodo nel caso di fondo liscio

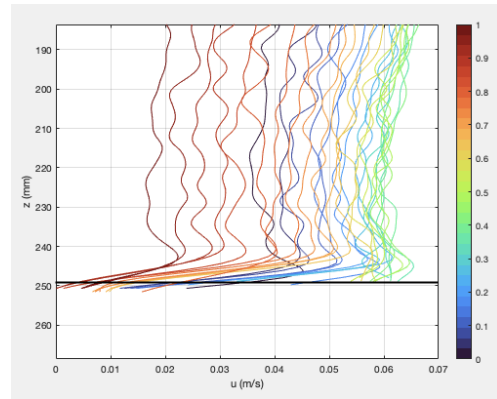


Grafico 35. Parte centrale del primo periodo nel caso di fondo liscio

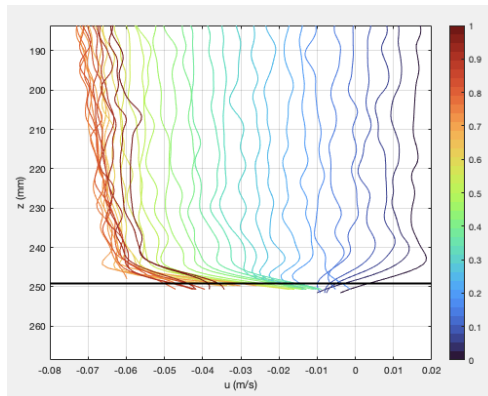


Grafico 36. Parte finale del primo periodo nel caso di fondo liscio

Un esempio di periodo ondoso occupante la metà della prova si è individuato nel gruppo di fotogrammi compreso tra il 194° ed il 289°. Con la stessa procedura vista sopra, da tre blocchi di 32 frame ciascuno si sono ottenuti tre grafici. Questi, insieme, mettevano in evidenza il periodo d'onda centrale dell'esperimento con fondo liscio (Grafico 37., Grafico 38., Grafico 39.).

Il periodo ondoso finale è stato ricavato dall'intervallo di frames compreso tra il 388° ed il 489° (Grafico 40., Grafico 41., Grafico 42.).

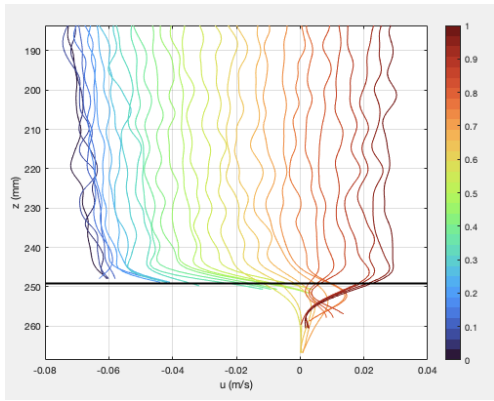


Grafico 37. Parte iniziale del secondo periodo nel caso di fondo liscio

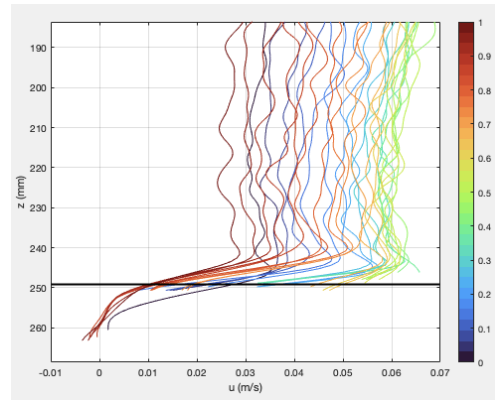


Grafico 38. Parte centrale del secondo periodo nel caso di fondo liscio

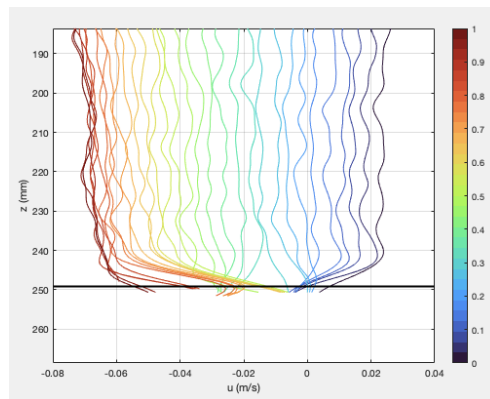


Grafico 39. Parte finale del secondo periodo nel caso di fondo liscio

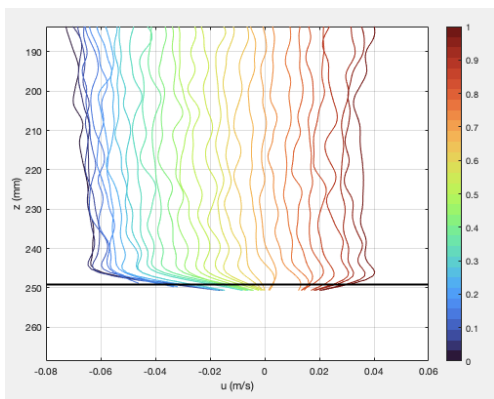


Grafico 40. Parte iniziale del terzo periodo nel caso di fondo liscio

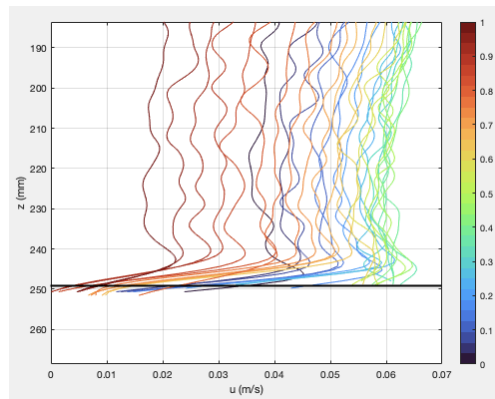


Grafico 41. Parte centrale del terzo periodo nel caso di fondo liscio

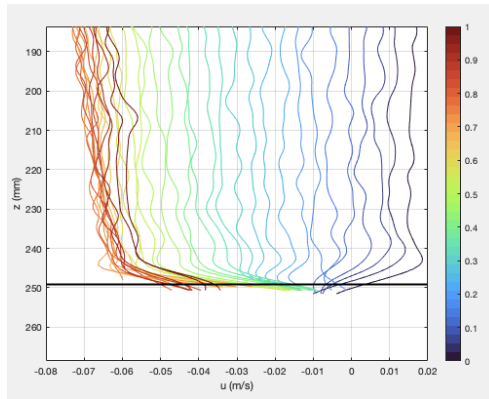


Grafico 42. Parte finale del terzo periodo nel caso di fondo liscio

Congiungendo i tre grafici, derivanti da tre blocchi di 32 frames ciascuno, si ricavava una visione d'insieme.

I risultati, così esposti, evidenziavano un andamento pressoché costante della componente orizzontale u nei tre diversi momenti della prova eseguita con la configurazione di fondo liscio.

Variazioni sostanziali non comparivano neanche mettendo a confronto tra loro i vari istanti, quelli iniziali, centrali e finali, dei tre singoli periodi ondosi.

Un minima differenza rispetto al periodo iniziale e quello mediano, la si poteva magari visualizzare nel periodo finale prestando attenzione ai profili di velocità positivi, occupanti quindi la parte alla destra del valore nullo di u . La forma "gobba" assunta da questi in prossimità del fondo, sia nella parte iniziale che in quella centrale e finale, dell'ultimo periodo d'onda, sembrava leggermente più accentuata rispetto a quello che si poteva riscontrare nel primo e nel secondo periodo. Osservando invece i valori assunti dalla u lungo l'asse delle ascisse, si è rapidamente constatato che questa oscillava sempre tra un massimo di 0.06 m/s ed un minimo di -0.06 m/s, con il valore negativo che indicava il movimento in senso opposto delle particelle rispetto a quello della propagazione ondosa.

In sostanza, sia al di sotto della cresta che in corrispondenza del cavo, si assisteva ad un valore massimo della componente orizzontale pari a 0.06 m/s. Tali misure andavano a caratterizzare ovviamente il range di flusso libero, ossia quella parte di fluido sufficientemente distante dal fondo da non essere influenzato da esso.

Questa semplice considerazione riguardante il valore della componente orizzontale si è poi dimostrata valida anche nel successivo step del post-processing. Infatti, si è proseguito con Part2Track, in particolare con `VelocityFieldPhaseMean.m`, il cui frutto è sempre un grafico (Grafico 43.) rappresentante però l'andamento medio del flusso in funzione della fase dell'onda considerata.

Ai fini di ottenere profili di velocità che si mantenessero più verticali possibili fino al fondo, si è scelto di variare di poco l'`'ixProfile'`.

Rispetto al valore di 130 visto nel precedente script, si è optato per 135, senza cadere nell'errore di estrarre un grafico con un'eccessiva sovrapposizione dei profili.

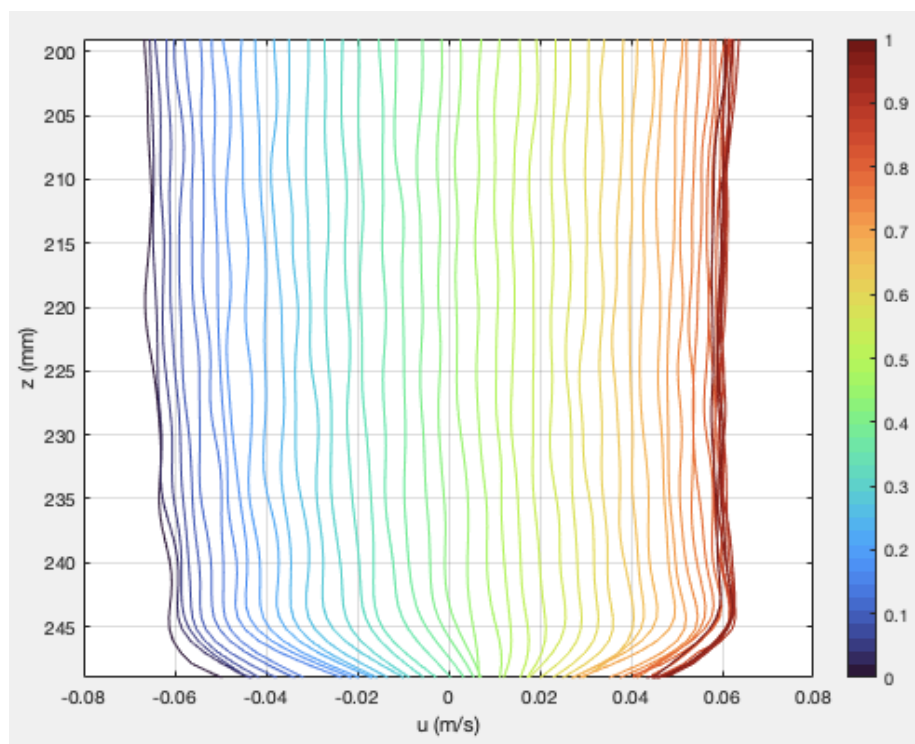


Grafico 43. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio

Le considerazioni fatte non potevano essere considerate corrette senza eseguire altre verifiche. Interessava soprattutto provare che il risultato così ottenuto non dipendesse dalla posizione x scelta all'interno della griglia.

Per fare questo, era necessario ricavare ulteriori grafici rappresentanti campi di velocità mediati in fase, i cui profili venivano però estratti lungo una verticale diversa rispetto a quella scelta precedentemente.

I valori dell' *'ixProfile'* dovevano comunque rappresentare delle regioni ben popolate di particelle.

Si è così scelto di considerare quattro diverse zone (Grafico 44., Grafico 45., Grafico 46., Grafico 47.) definite da altrettanti valori di *'ixProfile'*, pari a 80, 100, 120 e 140 rispettivamente.

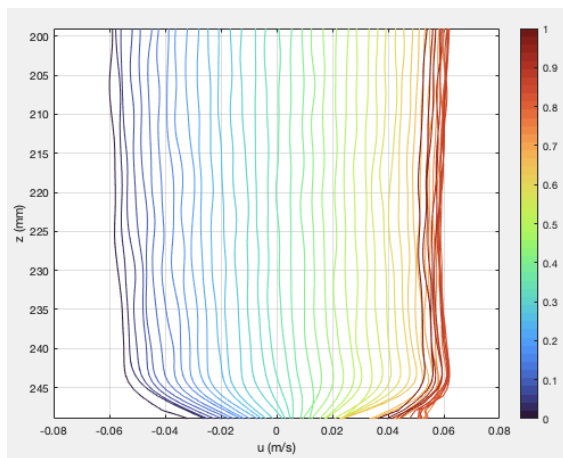


Grafico 44. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio con *'ixProfile'*=80

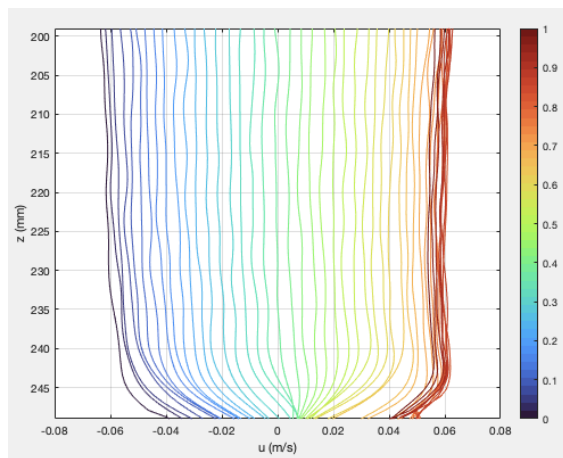


Grafico 45. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio con *'ixProfile'*=100

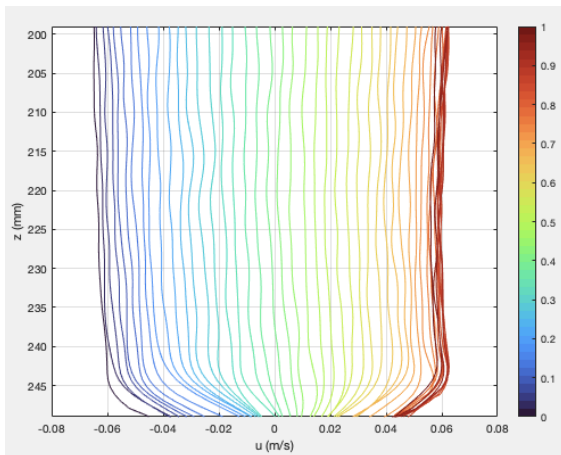


Grafico 46. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio con `'ixProfile'=120`

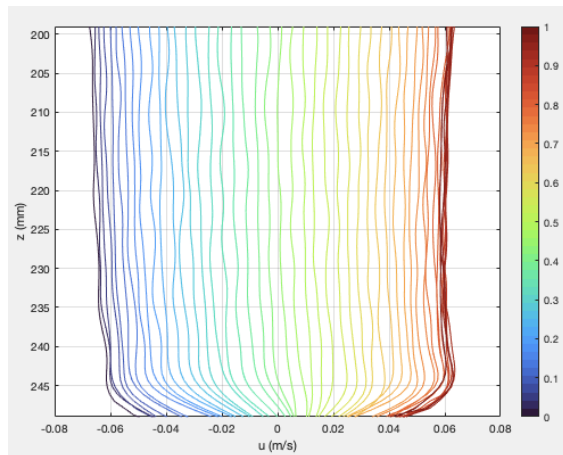


Grafico 47. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo liscio con `'ixProfile'=140`

Da questa verifica era evidente che le considerazioni fatte precedentemente non dipendevano dalla scelta della verticale lungo la quale estrarre i profili, a patto che questa occupasse una zona comunque ricca di particelle tracciate.

Ulteriori campi di velocità, questa volta mediati sul periodo, sono stati ottenuti da `VelocityFieldPeriodMean.m`.

Sulla base di quanto fatto con il precedente script, si è scelto di considerare un `'ixProfile'=135` per poi verificare il grafico ottenuto (Grafico 48.) ricavandone altri quattro (Grafico 49., Grafico 50., Grafico 51., Grafico 52.) da altrettanti verticali.

Seguendo lo stesso ordine dei campi mediati in fase, i risultati sono stati acquisiti da un `'ixProfile'` pari a 80, 100, 120 e 140 rispettivamente.

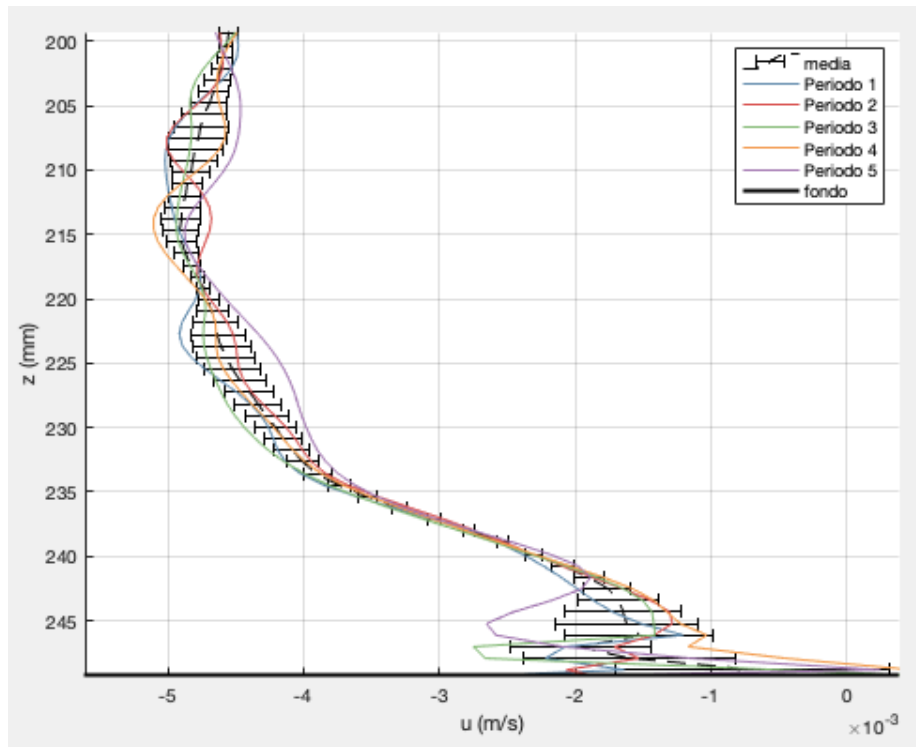


Grafico 48. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio

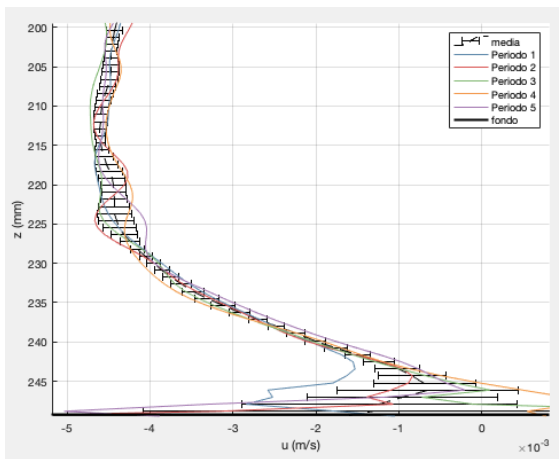


Grafico 49. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio con $ixProfile=80$

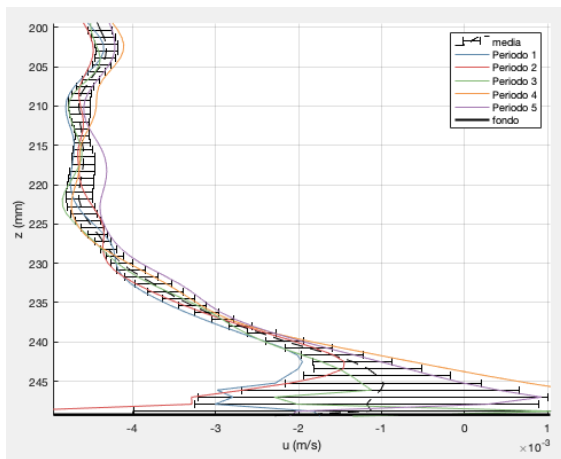


Grafico 50. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio con $ixProfile=100$

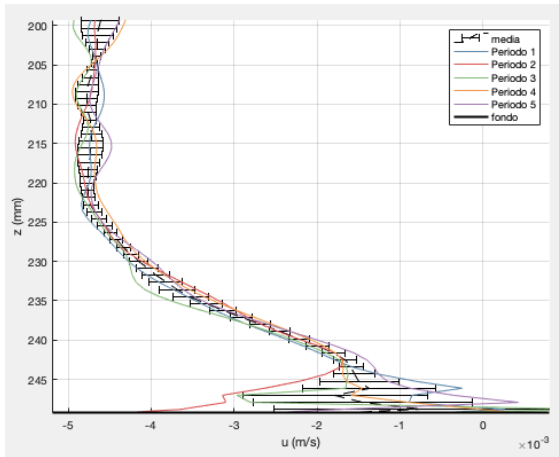


Grafico 51. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio con `'ixProfile'=120`

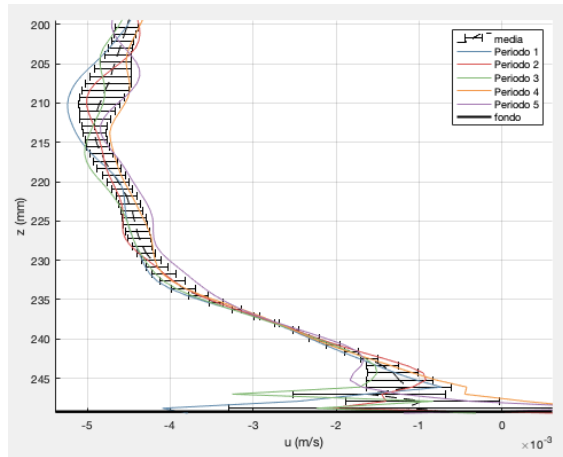


Grafico 52. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo liscio con `'ixProfile'=140`

Com'è evidente dagli assi x e y, si è scelto di restringere la valutazione dei seguenti risultati. La componente orizzontale della velocità u oscillava all'interno di un range di valori compresi tra $-0,005$ e $0,001$ m/s. Per quanto riguarda la distanza verticale z misurata dal fondo, si è optato per una limitazione che consentiva di considerare solo i 5 cm al di sopra del fondale.

L'andamento del profilo medio, rappresentato dal tratteggio nei grafici (u, z) , non presentava notevoli differenze alle varie posizioni considerate.

Per ogni singolo `'ixProfile'` preso, la componente orizzontale u assumeva valori abbastanza elevati anche a pochi mm dal fondo.

Ad esempio, questo lo si poteva riscontrare ad una distanza di circa 17/18 mm dal fondale, dove la velocità valeva all'incirca -0.004 m/s in tutti e cinque i grafici ricavati. Ovviamente, valori notevolmente più bassi e quindi più prossimi allo zero si ottenevano proprio in prossimità del letto del canale.

La tipica legge logaritmica, che contraddistingueva tutti i profili compreso quello medio, metteva inoltre in evidenza le note

caratteristiche dello strato limite. Nello specifico, il cambio di curvatura appariva ad una distanza di circa 20 mm dal fondo. Nelle sue vicinanze, i profili presentavano un ulteriore inarcamento. Ancor più ristretta era invece la zona contraddistinta dalle maggiori variazioni dello scarto quadratico medio, che comparivano sempre in prossimità del fondale, principalmente perché il tracciamento mediante la tecnica della PTV risultava più complicato vicino al fondo a causa delle componenti turbolente della velocità, portando alla mancanza di alcuni dati durante alcune fasi dell'onda. In particolare, ad un'altezza di circa 5 mm, si individuavano gli errori più elevati, nonostante fossero piccoli in termini di ordini di grandezza. Solamente ad una distanza di circa 10 mm dal letto, si potevano osservare dei valori più bassi. Invece, un andamento piuttosto costante e verticale lo si riscontrava spostandosi verso l'alto, per tutti i valori di 'ixProfile' considerati. Con lo scopo di ottenere risultati ancor più soddisfacenti, si è scelto di operare mediante la funzione 'lowpass' di Matlab anche per i profili verticali, dopo aver utilizzato la stessa tecnica di filtraggio per le serie temporali.

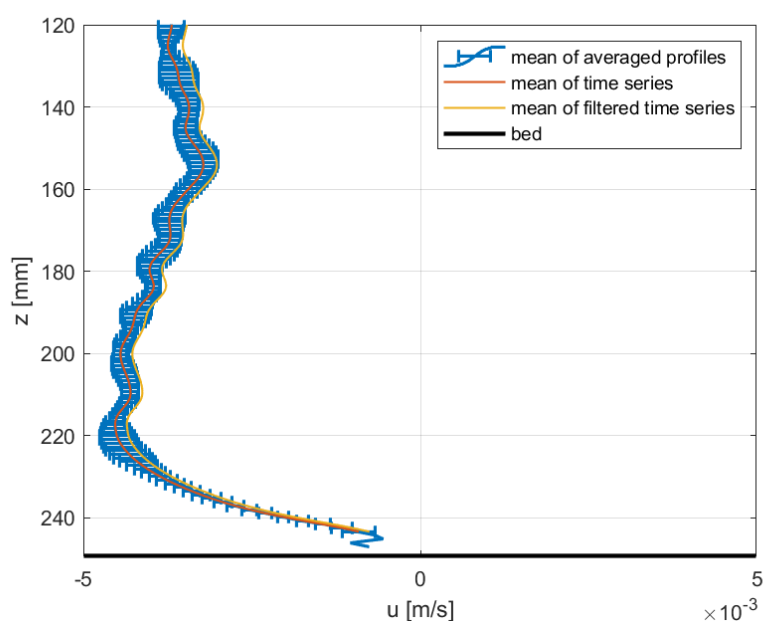


Grafico 53. Grafico finale rappresentante i vari profili verticali mediati nel caso di fondo liscio

Il grafico ottenuto (Grafico 53.) mostrava il campo di velocità della componente orizzontale, con una nuova media eseguita lungo tutta la serie. Questa si andava ad affiancare a quella effettuata su tutti i profili verticali, prevista dall'approccio seguito fino ad ora.

Il colore giallo metteva in evidenza il profilo filtrato.

L'operazione effettuata non aveva portato comunque a grandi differenze nei confronti della distribuzione verticale della velocità orizzontale u .

3.3 Risultati con fondo scabro

Il seguente paragrafo illustra quanto ricavato dalla configurazione con carta vetrata. Le letture eseguite dalle sonde S1, S2, S3 e S4 sono state oggetto della stessa analisi vista nel caso di fondo liscio (si veda Capitolo 2, Paragrafo 2.2.1). Quindi, una volta rappresentata l'elevazione della superficie libera e rimosse opportunamente le prime onde, si è operato mediante *zero up-crossing* per tutti e quattro i sensori di livello. Come con la precedente configurazione, si è notata una certa stabilità di valori per la media '*Period*', vicino ai soliti 0.8 s per ogni sonda (Grafico 56., Grafico 60.). Spostandosi dalla prima alla quarta, l'andamento di *H* (Grafico 57., Grafico 61.) aveva mostrato una tendenza decrescente. Infatti, si aveva un valore più grande di '*Height*' alla S1, nello specifico uguale a 0.0222 m. Con la S4 compariva invece un minimo di 0.0179 m. In particolare, il massimo era molto simile a quello ottenuto con fondo liscio, mentre uno scarto maggiore lo si poteva riscontrare nel minimo.

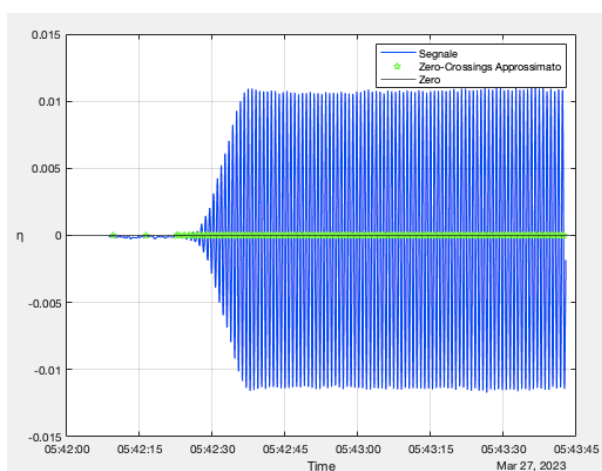


Grafico 54. Intersezione con lo zero del segnale della sonda S1 nel caso di fondo scabro

Grafico 55. Segnale della sonda S1 senza onde di transizione nel caso di fondo scabro

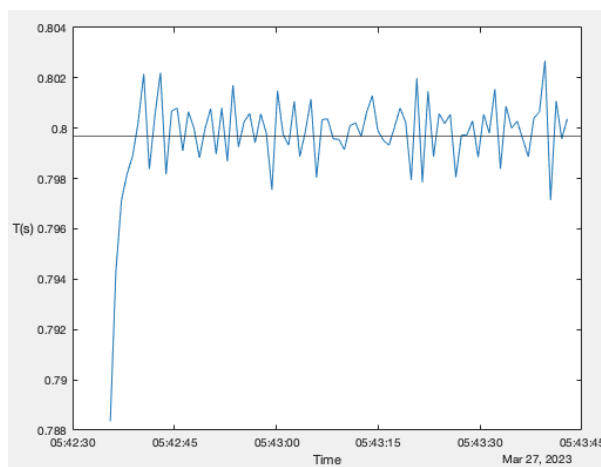
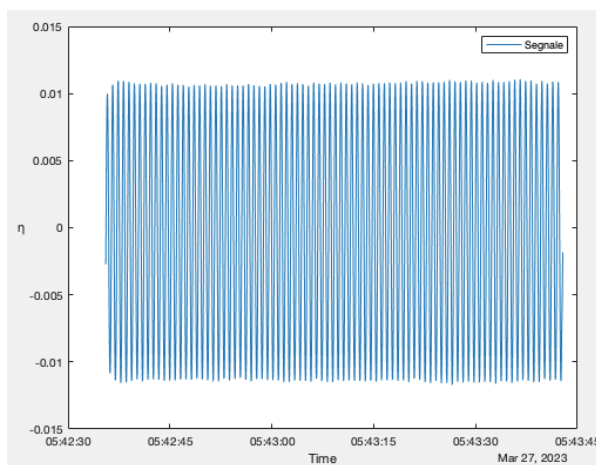
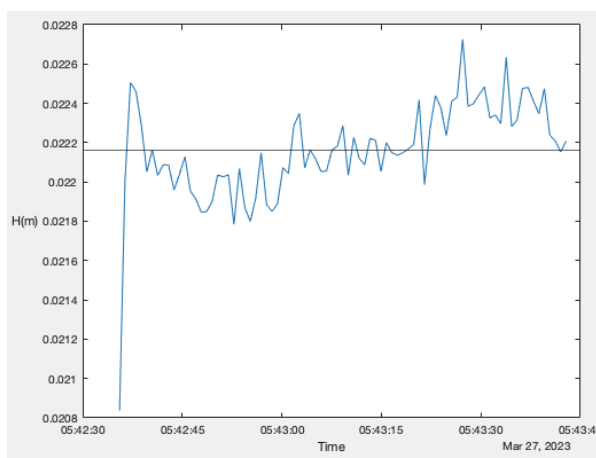


Grafico 56. (Time, T) della sonda S1 con $\text{'Period'}=0.7997$ s nel caso di fondo scabro

Grafico 57. (Time, H) della sonda S1 con $\text{'Height'}=0.0222$ m nel caso di fondo scabro



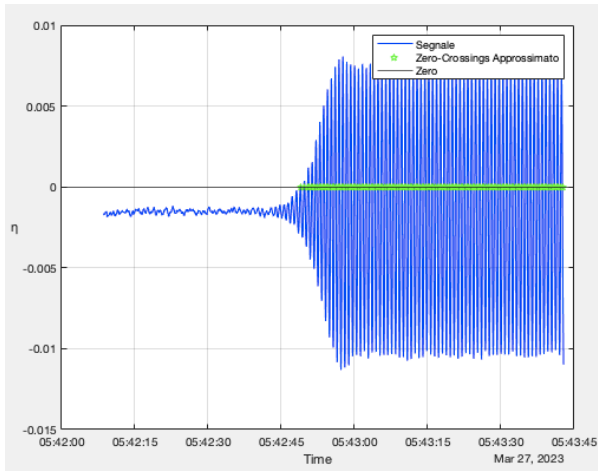


Grafico 58. Intersezione con lo zero del segnale della sonda S4 nel caso di fondo scabro

Grafico 59. Segnale della sonda S4 senza onde di transizione nel caso di fondo scabro

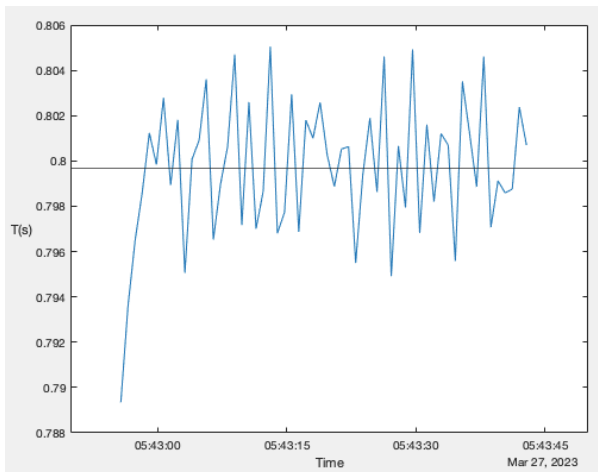
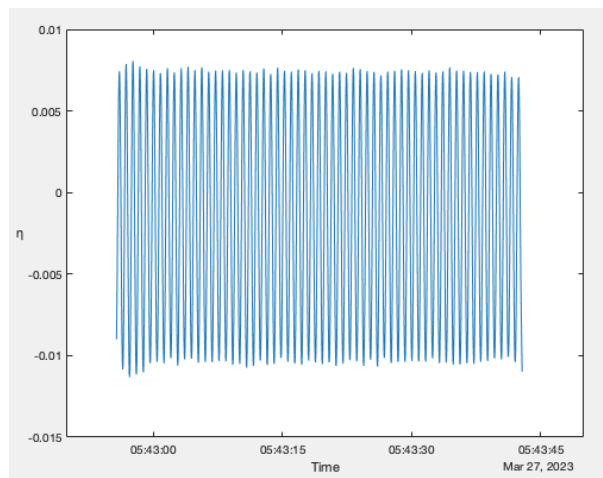
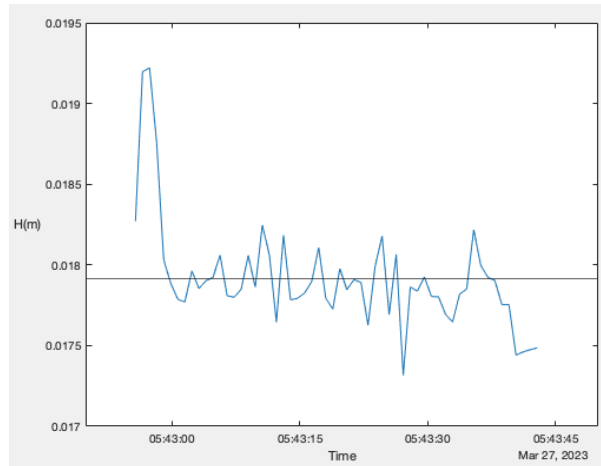


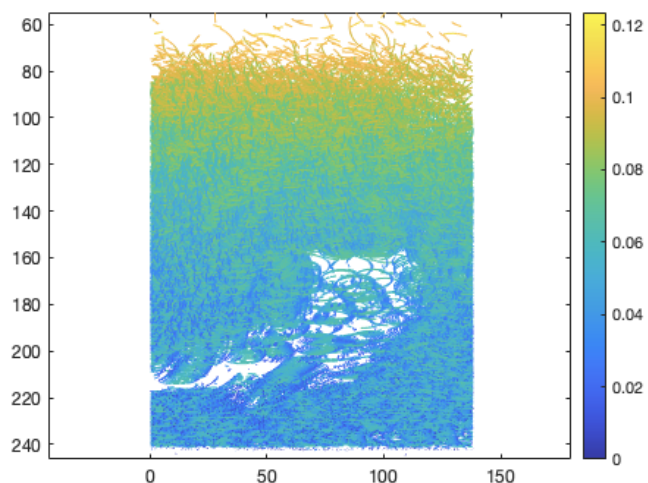
Grafico 60. (Time, T) della sonda S4 con $\textit{Period}'=0.7997$ s nel caso di fondo scabro

Grafico 61. (Time, H) della sonda S4 con $'Height'=0.0179$ m nel caso di fondo scabro



I 1000 fotogrammi derivanti dall'ultima prova sono stati considerati validi per essere analizzati mediante Part2Track. Ai fini della rimozione del background, si sono scelti 40 frames per eseguire la media come nel caso di fondo liscio. Al contrario, più elevati sono stati i limiti di intensità assunti nella regolazione del contrasto. Per evitare distorsioni e per rendere le particelle più visibili, si è determinato un *'Minimum'* di 5945 ed un *'Maximum'* di 7453. I valori già visti nelle prove con fondo liscio sono stati ripresi per le dimensioni dei fotogrammi, quelle delle particelle e la loro intensità. Nello specifico, si è optato per $'p_size'=7$ e $'p_int'=7000$. Il tracciamento delle particelle ha evidenziato una sostanziale similitudine con i risultati dei precedenti test, come evidenziato dal seguente grafico delle traiettorie:

Grafico 62. Traiettorie nel caso di fondo scabro



D'altronde, l'onda avviata presentava le stesse caratteristiche e non ci si aspettavano grandi differenze rispetto a quanto ottenuto con la prima configurazione. Per approfondire quanto mostrato dal grafico soprastante, si è presa in considerazione la regione d'acqua in prossimità del fondo:

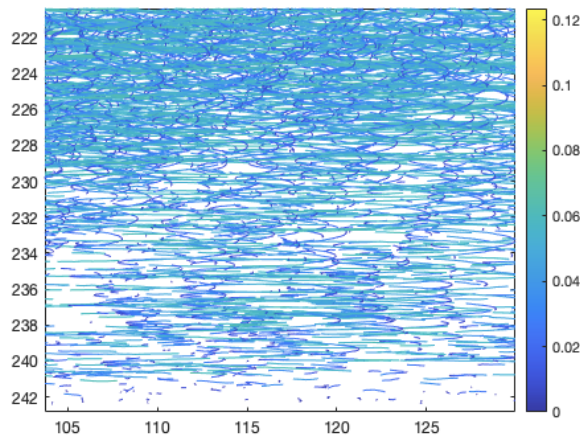


Grafico 63. Traiettorie in prossimità del fondo nel caso di fondo scabro

Le orbite ellittiche comparivano in tutta la colonna d'acqua per poi essere sostituite da tratti lineari nei pochi mm al fondo, aspetto in comune con i risultati dei precedenti esperimenti. Tuttavia, con l'allestimento della carta vetrata, lo strato limite al fondo presentava una scabrezza diversa rispetto a quella praticamente ininfluenza che offriva il fondo liscio. Lo stesso spessore di questa regione era cambiato passando da una configurazione all'altra.

Queste piccole ma importanti variazioni influenzavano inevitabilmente il movimento delle particelle in prossimità del fondo del canale.

Prestando particolare attenzione, si è notato che la transizione dalle traiettorie orbitali a quelle lineari avveniva in modo più evidente nelle prove eseguite con fondo liscio. Dal Grafico 22 era abbastanza chiaro dove le ellissi degeneravano in segmenti. Lo stesso non si può dire del Grafico 63, in cui le orbite ellittiche apparivano fino a pochi mm dal fondo, come evidenziato da un limitato numero di tratti lineari.

Ciò era probabilmente dovuto alle strutture coerenti che si generavano ed evolvevano maggiormente al fondo nelle prove a fondo scabro.

Proseguendo nell'analisi con Part2Track si è ricavato poi il video nel quale si è potuto osservare l'oscillazione delle particelle al passaggio dell'onda (Figura 20., Figura 21., Figura 22, Figura 23.).

Dati i 1000 frame iniziali, 960 sono stati esaminati in questa e nella routine di seguito descritta.

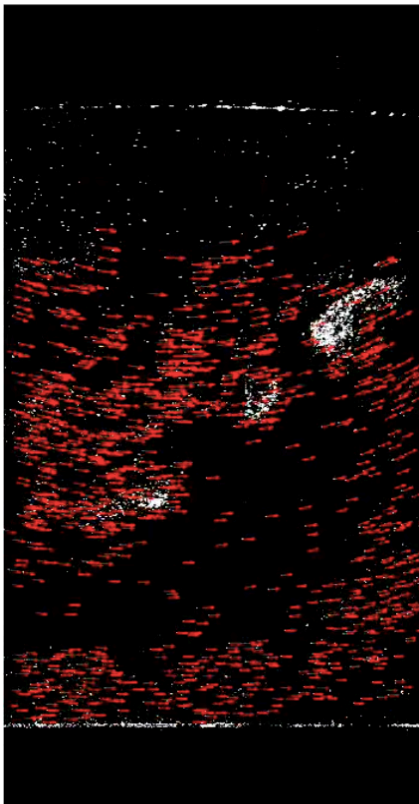


Figura 20. Movimento delle particelle al di sotto della cresta nel caso di fondo scabro

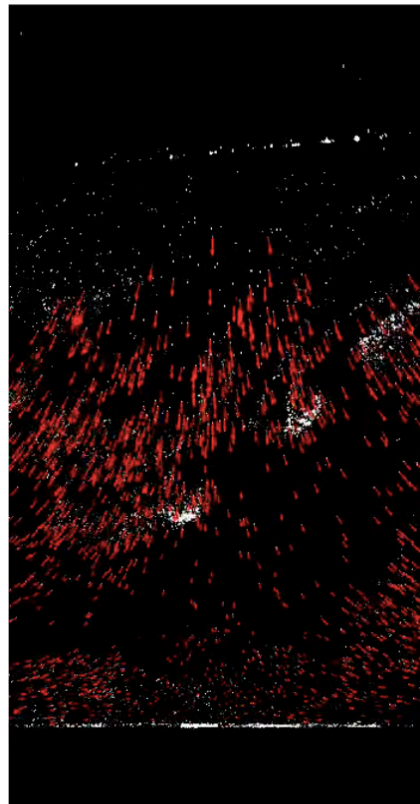


Figura 21. Movimento delle particelle al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo scabro

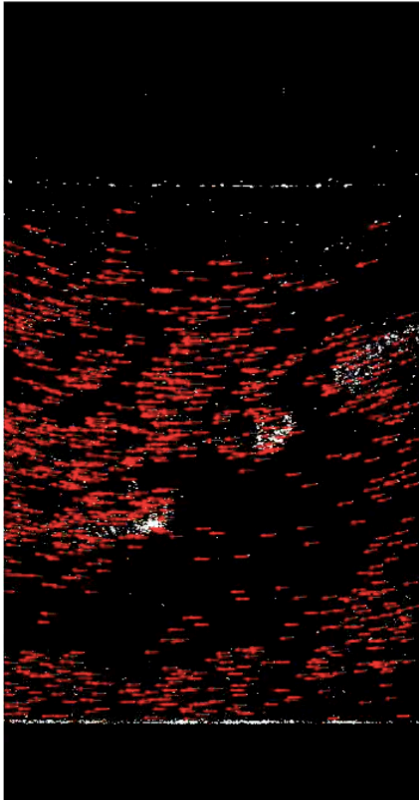


Figura 22. Movimento delle particelle al di sotto del cavo nel caso di fondo scabro

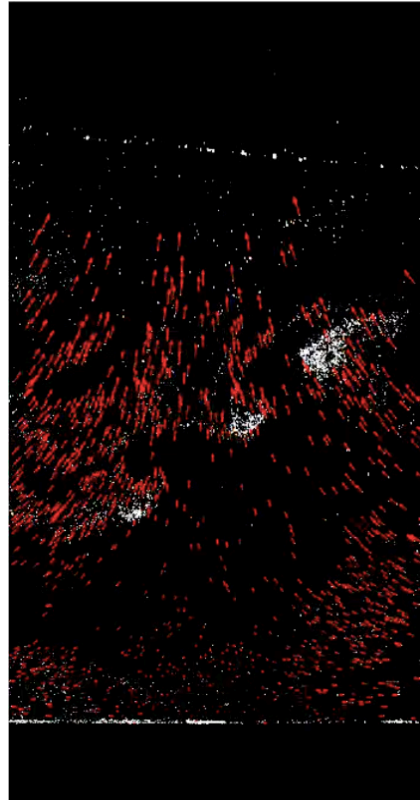


Figura 23. Movimento delle particelle al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo scabro

Nel passaggio successivo, da completare con `VectorFieldInterpolate.m`, si sono ripresi gli stessi valori utilizzati per il caso di fondo liscio, sia per le dimensioni della griglia, 200×300 , che per il coefficiente di smoothing, $S=0.5$.

La routine consentiva quindi di osservare attraverso dei video i campi di velocità interpolati per entrambe le componenti.

Sono riportati gli andamenti della componente orizzontale u :

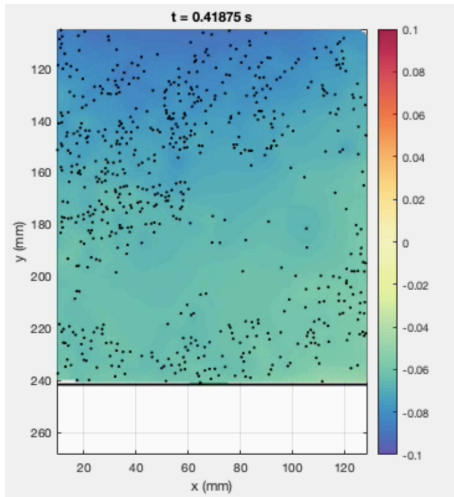


Grafico 64. Andamento della u al di sotto del cavo nel caso di fondo scabro

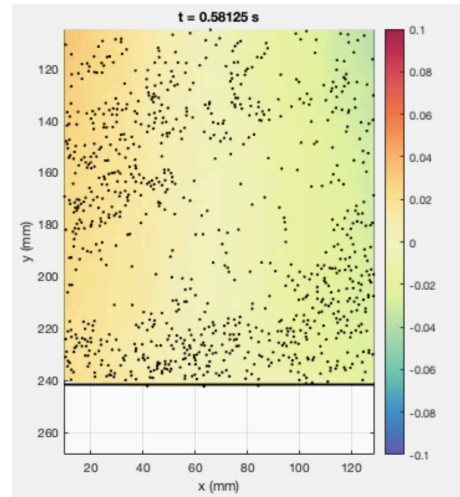


Grafico 65. Andamento della u al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo scabro

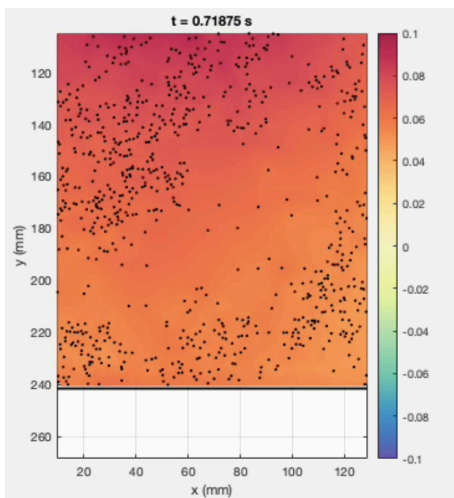


Grafico 66. Andamento della u al di sotto della cresta nel caso di fondo scabro

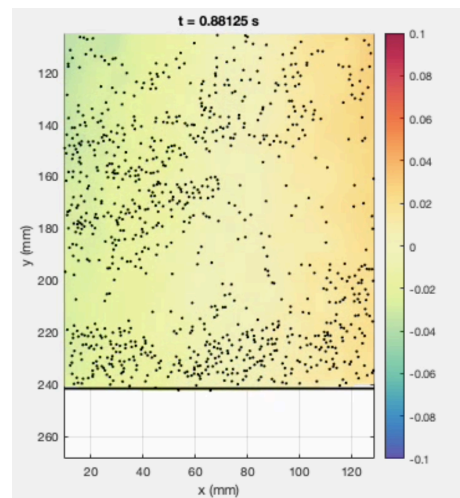


Grafico 67. Andamento della u al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo scabro

E la variazione della componente verticale v :

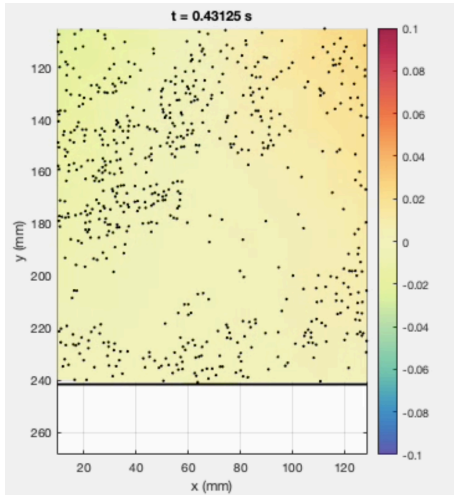


Grafico 68. Andamento della v al di sotto del cavo nel caso di fondo scabro

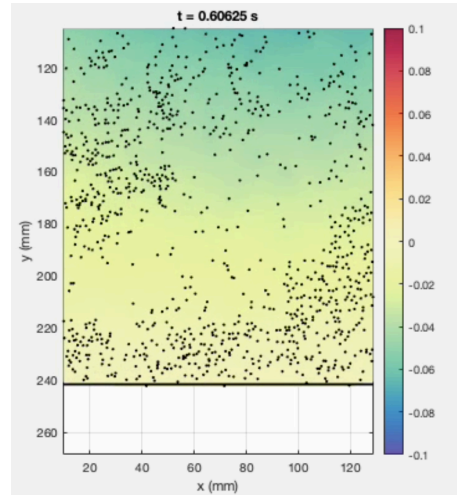


Grafico 69. Andamento della v al di sotto del nodo discendente nel caso di fondo scabro

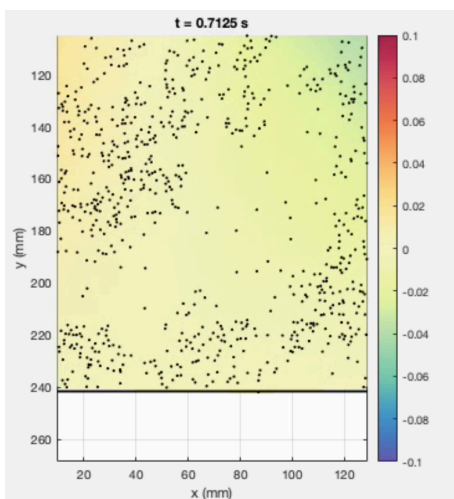


Grafico 70. Andamento della v al di sotto della cresta nel caso di fondo scabro

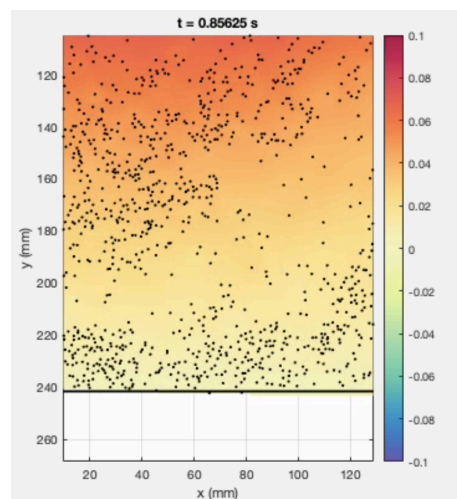


Grafico 71. Andamento della v al di sotto del nodo ascendente nel caso di fondo scabro

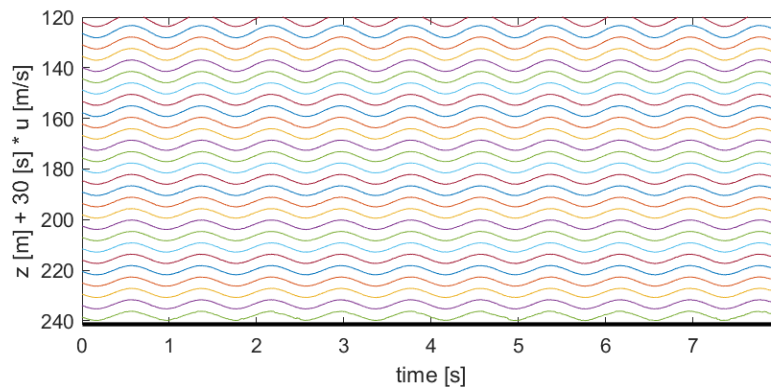


Grafico 72. Serie temporali della u a varie distanze dal fondo nel caso di fondo scabro (sopra)

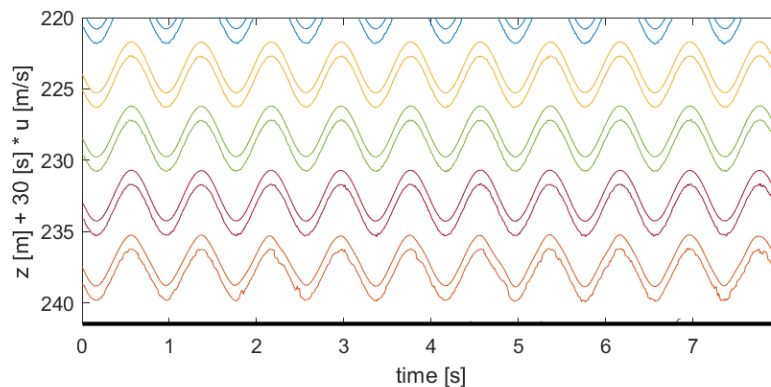


Grafico 73. Serie temporali della u sul fondo nel caso di fondo scabro (sotto)

Come fatto per la precedente configurazione, si sono sfruttate le proprietà grafiche di Matlab e la sua funzione *'lowpass'* allo scopo di rappresentare le serie temporali originali e filtrate della componente orizzontale u a varie distanze dal fondo, per poi concentrare l'analisi proprio in prossimità di esso.

Confrontando al solito i due casi, in quello con fondo scabro si potevano notare dei picchi e dei cavi molto più accentuati. Ciò era particolarmente evidente nella regione di pochi mm presente al di sopra del letto (Grafico 73.), ma risultava visibile anche osservando l'andamento della u al di sopra di tutta la colonna d'acqua (Grafico 72.).

Allo scopo di perfezionare quanto mostrato dagli ultimi due grafici, le stesse serie temporali sono state riprodotte sotto forma di una mappa di colore (Grafico 74.).

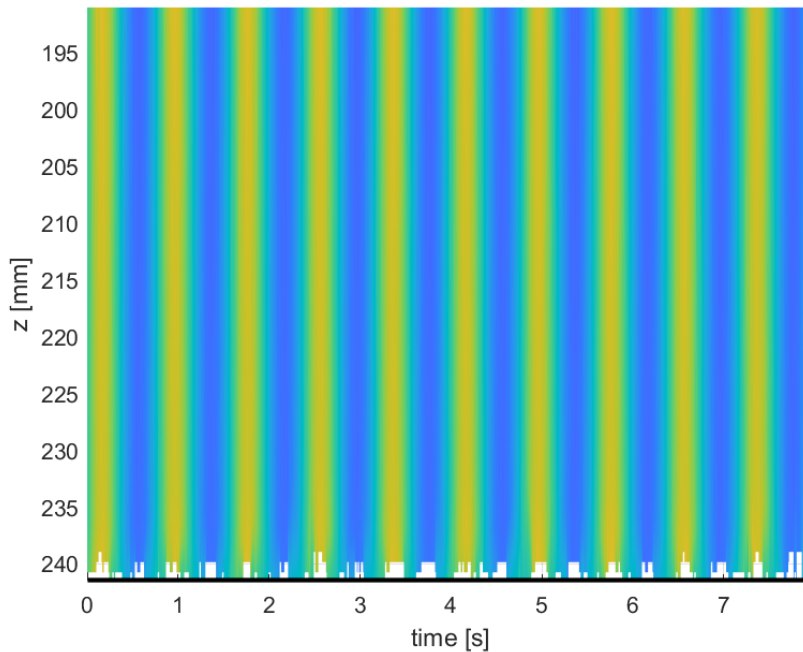


Grafico 74. Mappa di colore delle serie temporali nel caso di fondo scabro

Si è continuata l'analisi con `VelocityVerticalProfiles.m`, tramite il quale estrarre i profili delle velocità orizzontali. Per prima cosa è stata considerata la cartella 'contrast' relativa alla prova in questione, dalla quale si è preso come riferimento un singolo fotogramma.

Da una sua semplice osservazione, si è constatato che le particelle occupavano maggiormente la parte bassa a sinistra.

Considerando una griglia 200x300, rimasta invariata dal caso di fondo liscio, si è optato per un 'ixProfile' pari a 40. Ai fini di migliorare la qualità dei profili di velocità, lo smussamento è stato garantito da un coefficiente $S=0.5$.

Sempre con l'intento di verificare possibili variazioni nei grafici, la routine è stata eseguita su tre diversi intervalli di fotogrammi come

fatto negli esperimenti con fondo liscio. L'analisi dal primo al 32° frame ha permesso di ottenere la prima parte del primo periodo d'onda (Grafico 75.). Dalla 32esima alla 64esima immagine si è analizzata quella centrale (Grafico 76.), mentre quella finale contraddistingueva i frames dal 64° al 96° (Grafico 77.). Anche qui, l'insieme di questi tre grafici consentiva di osservare il primo periodo ondoso.

Il periodo d'onda che occupava la metà della prova è stato individuato considerando tutti i fotogrammi compresi tra il 485° ed il 580°. Al solito, solo mettendo insieme i tre grafici (Grafico 78., Grafico 79., Grafico 80.) si poteva avere una visione completa.

L'ultimo periodo d'onda comprendeva i frames dal 776° all'871°. All'interno di questo blocco, se ne sono considerati tre più piccoli, sempre costituiti da 32 immagini ciascuno. Da questi si sono ottenuti i consueti tre grafici (Grafico 81., Grafico 82., Grafico 83.) che, messi insieme, consentivano di visualizzare interamente il periodo ondoso finale.

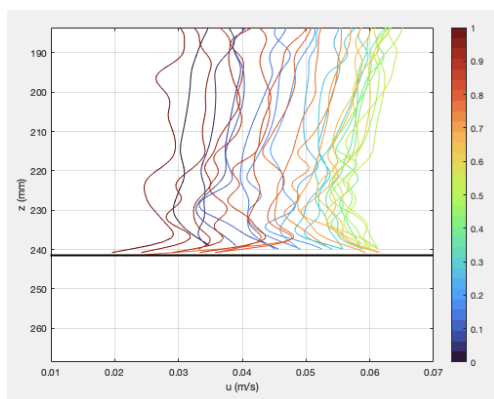


Grafico 75. Parte iniziale del primo periodo nel caso di fondo scabro

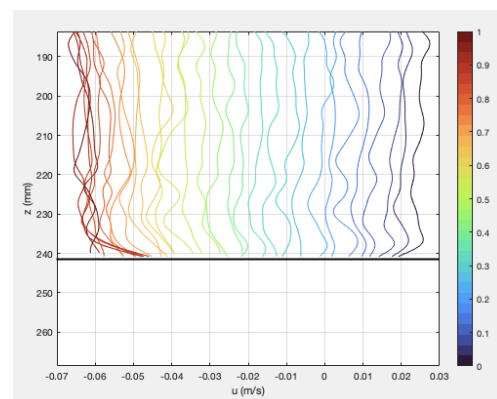


Grafico 76. Parte centrale del primo periodo nel caso di fondo scabro

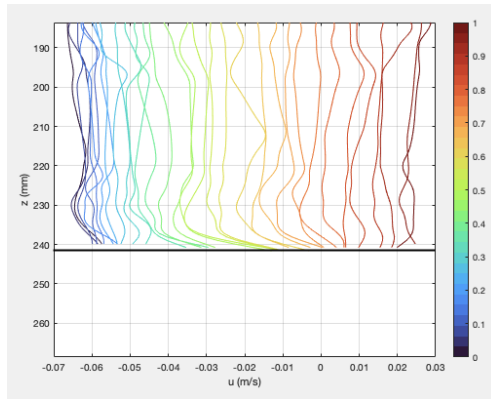


Grafico 77. Parte finale del primo periodo nel caso di fondo scabro

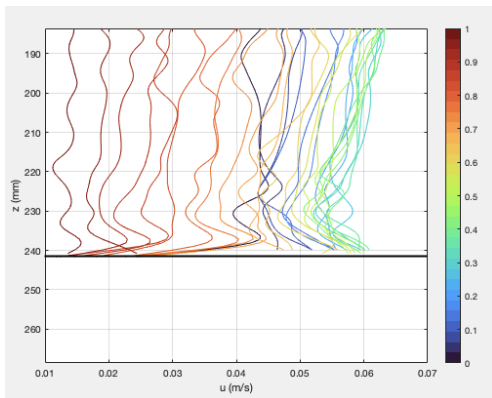


Grafico 78. Parte iniziale del secondo periodo nel caso di fondo scabro

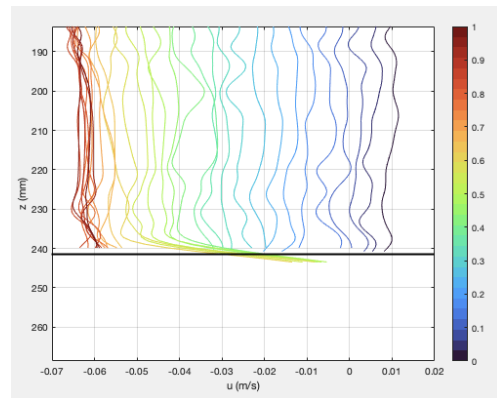


Grafico 79. Parte centrale del secondo periodo nel caso di fondo scabro

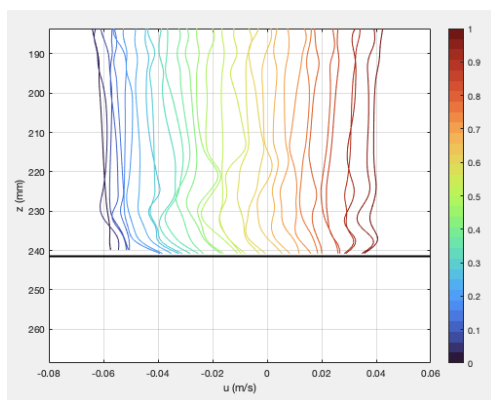


Grafico 80. Parte finale del secondo periodo nel caso di fondo scabro

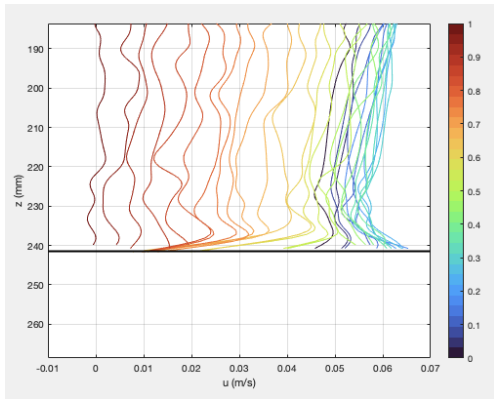


Grafico 81. Parte iniziale del terzo periodo nel caso di fondo scabro

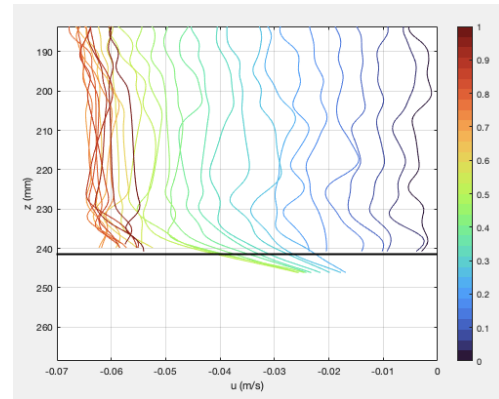


Grafico 82. Parte centrale del terzo periodo nel caso di fondo scabro

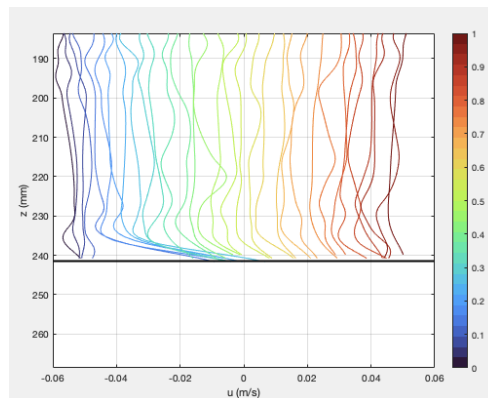


Grafico 83. Parte finale del terzo periodo nel caso di fondo scabro

L'evoluzione della componente orizzontale u dimostrava una certa continuità con quanto detto per il caso di fondo liscio, mantenendosi praticamente invariata anche passando da un periodo ondosio all'altro. Lo stesso range di velocità per il flusso libero, compreso tra -0.06 e 0.06 m/s, compariva ugualmente con fondo scabro. Rispetto alla precedente configurazione, l'irregolarità dei singoli profili è risultata essere maggiormente evidente. Questa caratteristica poteva in realtà derivare da un quantitativo non molto elevato di particelle tracciate, tuttavia era chiara e visibile soprattutto in prossimità del fondo.

É in questa zona che l'incurvamento dei profili di velocità appariva in modo più vistoso, a dimostrazione del passaggio ad una configurazione con una scabrezza superiore rispetto a quella fornita da un letto liscio.

Il post-processing si doveva proseguire mediante lo script `VelocityFieldPhaseMean.m`, compreso sempre nel software `Part2Track`. Per il suo parametro più importante, `'ixProfile'`, si è mantenuto lo stesso valore di 40, la cui bontà era sta già verificata in precedenza. La routine, come accaduto anche per le prove con fondo liscio, consentiva di ricavare un grafico più pulito rispetto a quanto ottenuto da `VelocityVerticalProfiles.m`, dove per pulizia si intende una maggiore monotonia o equilibrio degli stessi profili di velocità. Nonostante questo, un'eccedenza nei profili appariva proprio nello spazio adiacente al fondo, a supporto di quanto detto sopra per i grafici dal 75 all'83. Di seguito il campo di velocità mediato in fase ottenuto dagli esperimenti con fondo scabro:

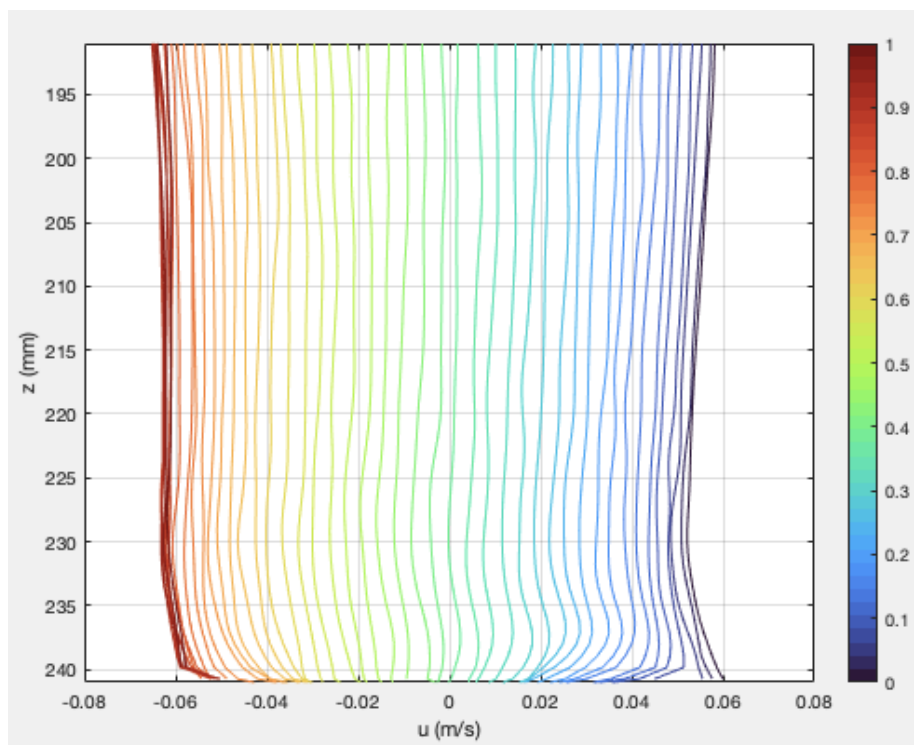


Grafico 84. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro

La distribuzione ordinata che contraddistingueva la parte superiore dei profili di velocità veniva appunto interrotta, nella parte bassa, da una forma "gobba". Questo si osservava nella destra del grafico, occupata da valori positivi della componente orizzontale, mentre un andamento piuttosto verticale permaneva nella zona a sinistra dello zero. Una simile considerazione non poteva essere fatta per il caso di fondo liscio (Grafico 43.), in cui il campo di velocità mediato in fase seguiva una certa monotonia a varie distanze dal fondo. Come con la precedente configurazione, si è scelto di verificare quanto ottenuto estraendo ulteriori campi di velocità mediati in fase. Questi sono stati ricavati considerando quattro verticali diverse rispetto a quella rappresentata dal precedente $\text{'ixProfile'}=40$. Il suo valore è stato di poco variato, scegliendo di porlo pari a 20, 60, 80 e 100 (Grafico 85., Grafico 86., Grafico 87., Grafico 88.), in modo tale da ottenere informazioni sempre nelle zone contraddistinte da un buon quantitativo di particelle.

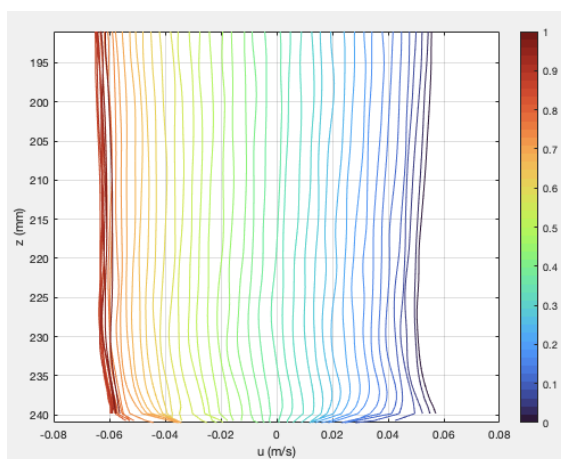


Grafico 85. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro con $\text{'ixProfile'}=20$

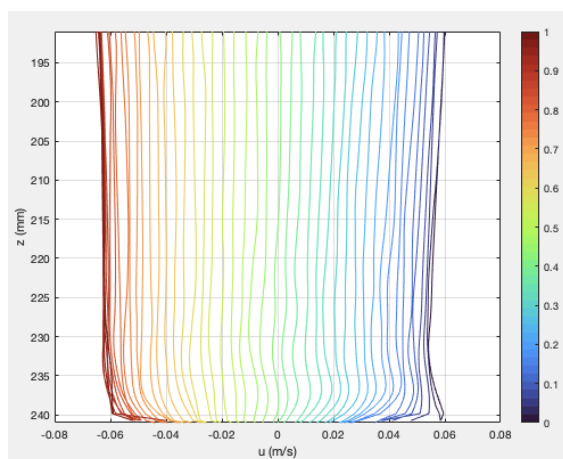


Grafico 86. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro con $\text{'ixProfile'}=60$

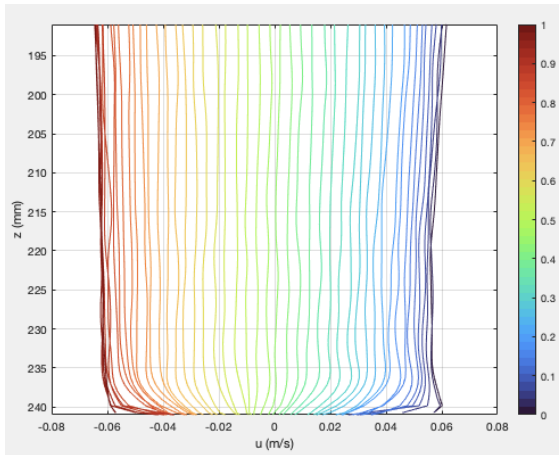


Grafico 87. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro con *'ixProfile'*=80

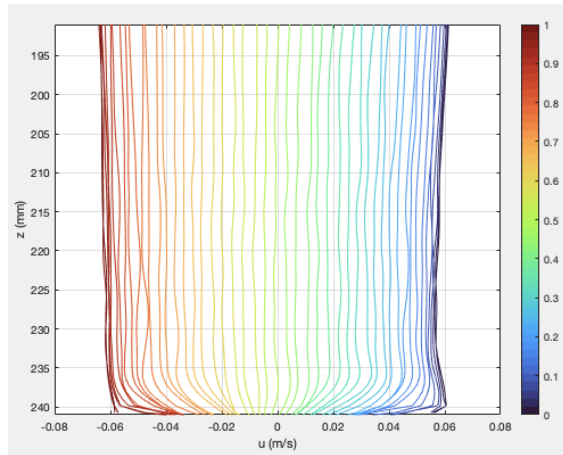


Grafico 88. Campo di velocità mediato in fase nel caso di fondo scabro con *'ixProfile'*=100

Come nel caso di fondo liscio, la verifica eseguita non aveva fatto che confermare quanto dedotto dal primo risultato (Grafico 84.).

L'andamento dei profili di velocità e la loro tipica forma, comprensiva del surplus al fondo, di cui si è discusso sopra, dimostravano di non dipendere strettamente dal valore di *'ixProfile'*.

Questo parametro appariva anche nel codice successivo, **VelocityFieldPeriodMean.m.**

Per quanto riguarda la scelta dei suoi valori, si è seguito l'ordine dei campi mediati in fase. Quindi, riconoscendo la regione più popolata di particelle lungo la verticale rappresentata da *'ixProfile'*=40, si è ottenuto un primo grafico (Grafico 89.).

Ponendo poi tale parametro pari a 20, 60, 80 e 100 si è verificato il risultato ottenuto considerando le solite quattro regioni ricche di particelle tracciate (Grafico 90., Grafico 91., Grafico 92., Grafico 93.)

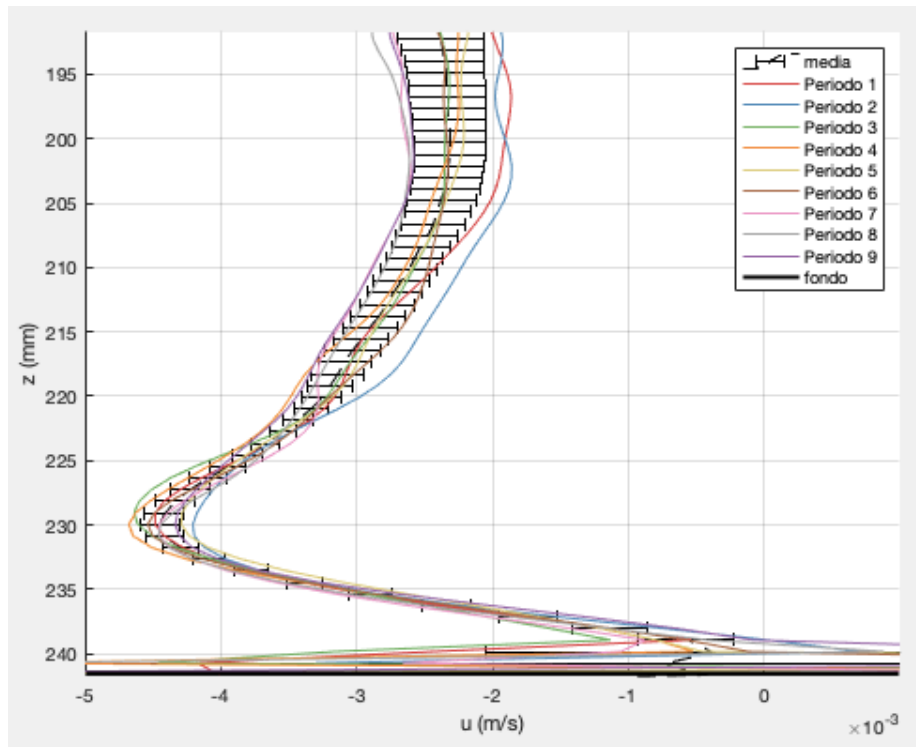


Grafico 89. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro

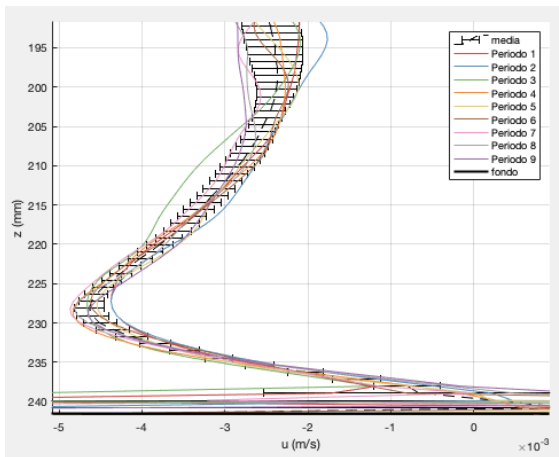


Grafico 90. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro con $ixProfile=20$

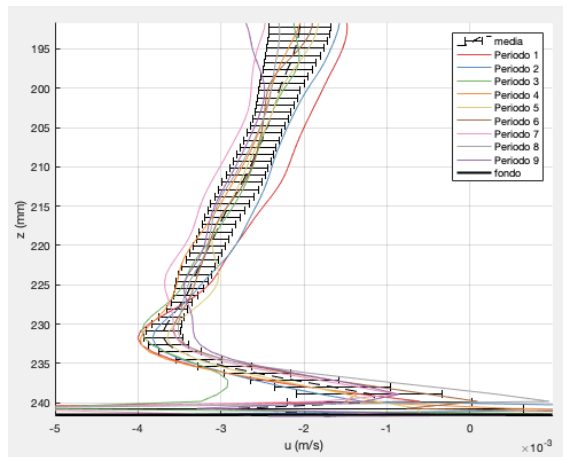


Grafico 91. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro con $ixProfile=60$

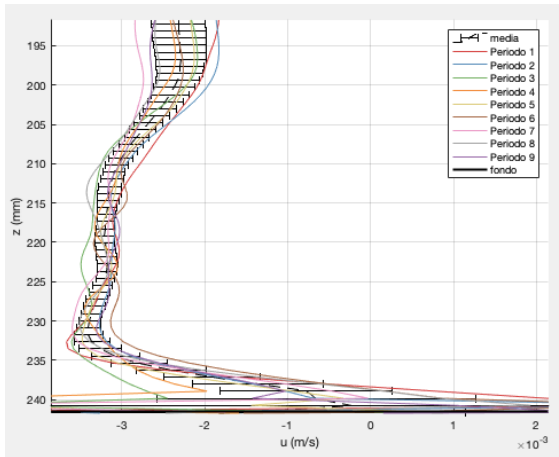


Grafico 92. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro con 'ixProfile'=80

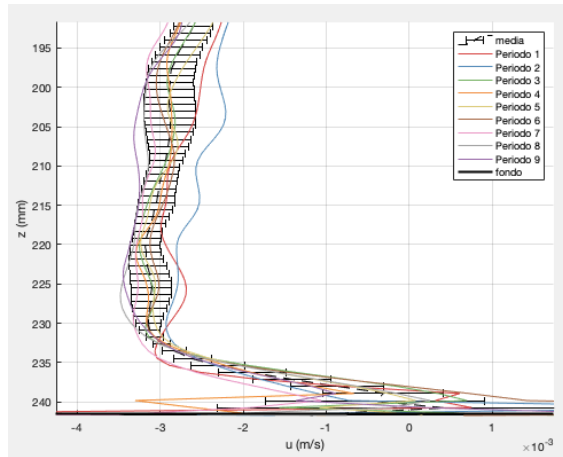


Grafico 93. Campo di velocità mediato sul periodo nel caso di fondo scabro con 'ixProfile'=100

Anche con la configurazione a fondo scabro, si sono apportati dei limiti agli assi x e y dei grafici, occupati dalla componente orizzontale u e dalla distanza verticale z rispettivamente. Per entrambe, i range di valori coincidevano con quelli selezionati con la precedente configurazione. La prima oscillava da -0.005 a 1 m/s, mentre con la seconda si è scelto di far riferimento solo ai 5 cm al di sopra del fondale. Rispetto al caso con fondo liscio, dal confronto dei vari grafici (u, z) si sono osservati valori diversi della u . Ad esempio, un suo valore pari a -0.003 m/s si poteva riscontrare a circa 6/7 mm dal fondo. Questo valeva per tutte e cinque le verticali considerate. Tuttavia, la stessa osservazione non era valida per il caso di fondo liscio, dove una simile u compariva ad una distanza di 12/13 mm dal fondale. I risultati derivanti dalla configurazione senza carta vetrata avevano mostrato il tipico profilo logaritmico, soggetto al classico incurvamento in prossimità del fondo. Questa dinamica caratteristica dello strato limite era ancor più visibile nel caso con carta vetrata, come evidenziato dal punto d'inflexione che si posizionava ad una distanza di circa 11/12 mm dal fondale. A confronto di quanto

osservato nel caso di fondo liscio, per tutte e cinque le posizioni esaminate, si poteva notare una maggior ripidità dei profili. Tuttavia, questi erano molto meno inarcati nella parte più bassa. In quella alta, un rigonfiamento caratterizzava i campi di velocità estratti dalle prime due verticali (Grafico 89., Grafico 90.), le cui posizioni erano più vicine alle regioni maggiormente popolate di particelle. Questa tendenza risultava meno evidente già dal terzo valore di *'ixProfile'* (Grafico 91.), mentre un andamento molto più verticale lo si poteva osservare negli ultimi due grafici (Grafico 92., Grafico 93.). Tali differenze derivavano dalla scelta di verticali diverse lungo le quali erano stati ricavati i risultati, che rappresentavano le zone quantitativamente più affollate di particelle. Ciò poteva anche essere dovuto all'effetto delle strutture coerenti (es. vortici), che sono più marcate nel caso di fondo scabro rispetto al caso di fondo liscio e che potevano influenzare significativamente l'idrodinamica anche lungo l'asse principale di propagazione ondosa. Come con la precedente configurazione, si riscontravano variazioni maggiori dello scarto quadratico medio avvicinandosi al fondo. Il passaggio da piccoli a grandi valori appariva meno evidente spostandosi dall'alto verso il basso, rispetto al caso con fondo liscio in cui questa transizione era più visibile. Ad una distanza di circa 3/4 mm dal fondale iniziavano a comparire gli errori più elevati, a causa della mancanza di particelle e valori di velocità nella parte bassa del dominio. Infine, il filtro fornito dalla funzione *"lowpass"* di Matlab ha permesso di ottenere un risultato migliore, come mostrato dal Grafico 94. Come con la configurazione con fondo liscio, si è eseguita una nuova media su tutta la serie temporale, che si andava ad aggiungere a quella effettuata su tutti i profili, già vista con il metodo precedente.

Nello stesso grafico si è scelto di includere anche il profilo verticale filtrato, messo in evidenza dal colore giallo e ricavato rimuovendo le alte frequenze dal segnale analizzato.

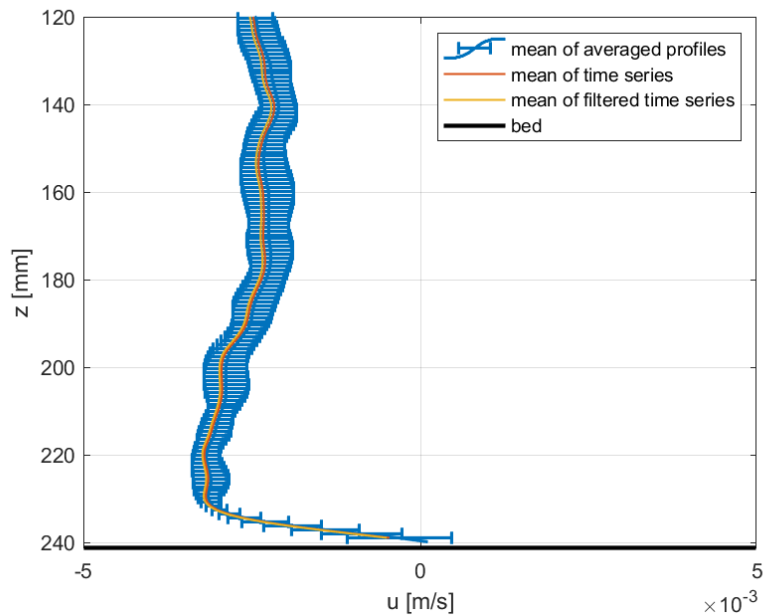


Grafico 94. Grafico finale rappresentante i vari profili verticali mediati nel caso di fondo scabro

Con la configurazione senza carta vetrata, la tecnica di filtraggio presa in considerazione non aveva portato a notevoli variazioni nella distribuzione verticale della velocità. La stessa considerazione poteva essere considerata valida nel caso con fondo scabro.

Capitolo 4 CONCLUSIONI

Diverse sono le dinamiche che possono svilupparsi in seguito alla propagazione di una o più onde al di sopra di superfici di diversa scabrezza. In questo contesto, la presente tesi è rivolta ad analizzare un singolo treno di onde su due differenti tipi di fondale e tutto ciò che ne deriva, con particolare attenzione ai campi di velocità e alle caratteristiche dello strato limite. A tale scopo si è utilizzato il setup sperimentale offerto dal Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime dell'Università Politecnica delle Marche (Ancona).

Nel canale si sono svolte due serie di esperimenti, entrambe perseguite mediante lo studio della stessa onda, caratterizzata da un'altezza di 4 cm ed un periodo di 0.8 s.

La prima serie di prove è stata condotta considerando una configurazione di fondo liscio, rappresentata dalla piattaforma già esistente nel canale. Nella seconda, la configurazione a fondo scabro è stata ottenuta mediante semplice carta vetrata. La scelta di questo tipo di materiale può essere giustificata dal fatto che l'intera campagna sperimentale presentava un nesso logico con quanto eseguito da Sleath nel 1970. La sua esperienza ha infatti fornito più di uno spunto, sia da un punto di vista teorico che da un punto di vista pratico, a partire proprio dai diversi tipi di configurazioni da studiare. Software come Matlab e toolbox come Part2Track hanno permesso di completare quanto eseguito in laboratorio. Le loro funzionalità sono state utilizzate per il post-processing, che ha fornito i risultati che sono poi l'oggetto di studio della presente tesi. Una serie di operazioni è stata seguita sia nello svolgimento pratico delle prove che nella successiva analisi delle sonde e delle immagini. Mediante questo procedimento si sono ricavati i risultati più importanti, espressi sotto forma di grafici.

Se ne è ottenuto uno (Grafico 95.) rappresentante, per entrambi le configurazioni al fondo, l'evoluzione lungo il canale del valore medio dell'altezza. Questa si riferiva al parametro '*Height*' calcolato per ogni singola sonda, dalla prima S1, occupante la posizione 0 nel grafico di seguito esposto, all'ultima S4, distante 13 m dalla prima.

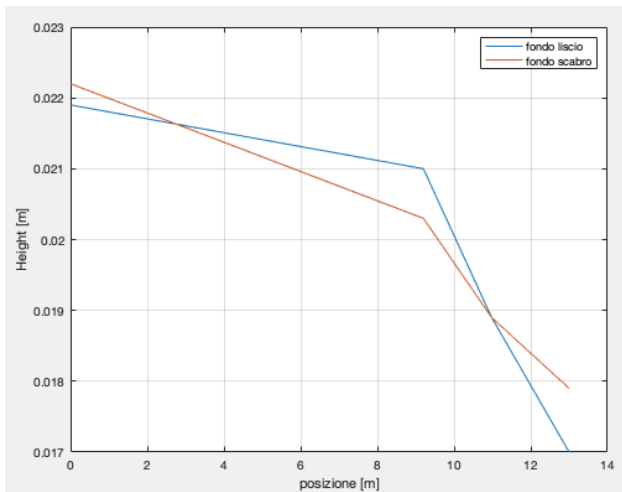


Grafico 95. Grafico (Posizione, '*Height*') rappresentante l'evoluzione della media dell'altezza *H* dalla sonda S1 alla sonda S4

L'andamento della media '*Height*' mostrava come questa diminuisse man mano che ci si spostava dal primo all'ultimo sensore di livello, raggiungendo un valore minimo più piccolo nel caso con fondo liscio. Invece, si riscontrava, per entrambi i casi analizzati, un andamento pressoché costante del periodo medio '*Period*', sempre vicino a 0,8 secondi per tutte le sonde.

I grafici rappresentanti le traiettorie percorse dalle particelle non hanno evidenziato particolari anomalie rispetto a quanto ci si aspettava. Infatti, si sono riscontrati i tipici percorsi orbitali sia nella prova con fondo liscio che in quella con fondo scabro. In quest'ultimo caso, le orbite ellittiche comparivano nell'intera colonna d'acqua per degenerare nelle consuete traiettorie lineari proprio in prossimità del fondo, mentre con la prima configurazione questa transizione occupava una regione maggiore.

Attraverso altri due script di Part2Track si è potuto osservare il movimento continuo delle particelle tracciate e i relativi campi di velocità interpolati su una griglia regolare. Tutte queste operazioni hanno preceduto l'acquisizione delle informazioni più importanti, riguardanti i profili e i campi delle velocità orizzontali.

Per entrambe le configurazioni, i primi hanno evidenziato un andamento pressoché costante della componente orizzontale u . Questa, anche analizzando fasi diverse di una singola prova, non presentava visibili variazioni in termini di valore e di sviluppo. Interessanti risultati hanno invece riguardato i campi di velocità mediati in fase. In entrambi i casi, il flusso libero oscillava all'interno dello stesso range di valori, mentre piccole ma importanti differenze esistevano in prossimità del fondo. Infatti, un surplus di velocità appariva nei profili positivi nel caso di fondo scabro, ad evidenziare un trend non monotono tipico della dinamica dello strato limite. Una maggiore verticalità fino al fondo contraddistingueva invece i profili nel caso di fondo liscio, contraddistinto da una scabrezza sicuramente inferiore. Sempre con quest'ultima configurazione, le medie eseguite sul periodo avevano messo in evidenza un maggior incurvamento dei profili in prossimità del fondo, con un punto d'inflessione più alto rispetto al test con carta vetrata. In questo, infatti, si erano estratti profili molto più ripidi ma meno inarcati vicino al fondale. Proprio in tale regione, in entrambi i casi analizzati, si erano individuate le differenze maggiori tra i vari profili e quello medio, come evidenziato dai valori dello scarto quadratico medio.

In conclusione, i risultati primari mostravano che la diversa scabrezza andava a modificare i profili, in particolare vicino al fondo, dove la loro forma era certamente più influenzabile dalle dinamiche dello strato limite (Grafico 96.).

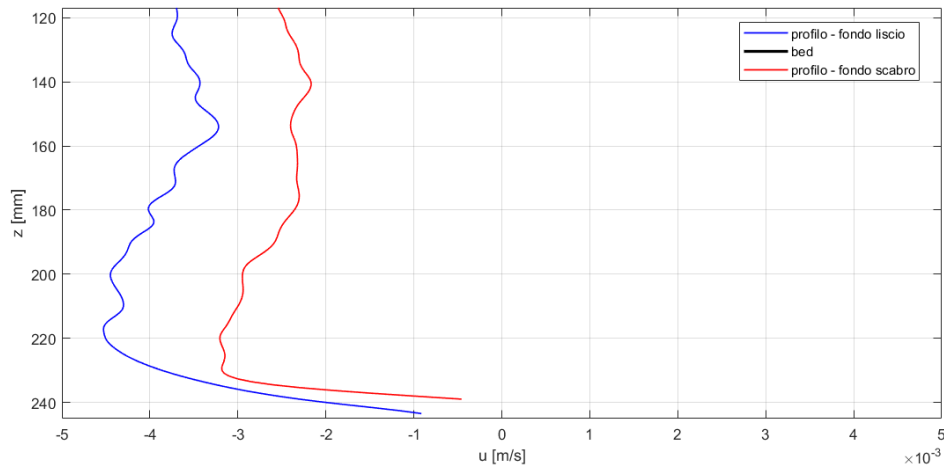


Grafico 96. Grafico riassuntivo dei profili di velocità

Tuttavia, i campi di velocità derivanti dagli esperimenti con fondo scabro mostravano dei risultati apparentemente discordanti tra un'analisi e l'altra. Le variazioni più interessanti si riscontravano al fondo. Era quindi possibile la presenza di una turbolenza che, avente una frequenza maggiore rispetto a quella dell'onda stessa, si potesse sviluppare durante il test.

Le difformità che derivano da questo fenomeno sono state corrette mediante una semplice tecnica di filtraggio garantita da una funzione di Matlab. Questa ha consentito di eliminare le fluttuazioni di velocità di periodo inferiore a quello dell'onda esaminata, in modo tale da poter considerare solo le oscillazioni che derivavano dall'effettivo passaggio dell'onda. Tuttavia, non si è osservato un cambiamento evidente nel risultato generale della distribuzione verticale di velocità. Per approfondire e chiarire nel migliore dei modi questi meccanismi servirebbero ulteriori analisi, considerando che l'intero studio oggetto della tesi è assolutamente preliminare e da riprendere. Sarebbero auspicabili sviluppi futuri, sia in termini di ricerche più dettagliate che di nuovi esperimenti.

RIFERIMENTI

[1] Sleath J. F. A. (1970). Velocity measurements close to the bed in a wave tank. Department of Engineering, University of Cambridge.

[2] Longuet-Higgins M. S. (1953). Mass transport in water waves.
Tratto da: <https://www.jstor.org/stable/91480>

[3] Janke T., Schwarze R., Bauer K. (2020). Part2Track: A MATLAB package for double frame and time resolved Particle Tracking Velocimetry.

[4] Mancinelli A., Lorenzoni, C. (A.A. 2021/2022). Dispense corso Ingegneria Costiera. Università Politecnica delle Marche.