

# POLITECNICO DI MILANO

FACOLTA' DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE

Corso di Laurea in Ingegneria Civile – Idraulica



## **Studio sperimentale del moto incipiente di massi ciclopici al passaggio di un'onda lunga**

Relatore: Prof. PASSONI Giuseppe

Co-relatore: Ing. ANTONINI Alessandro

Co-relatrice: Dott. BRESSAN Lidia

Tesi di Laurea di:

Monica LOMBARDI Matricola 800826

Anno Accademico 2014/2015

*Milano, 30 Settembre 2015*

### *Ringraziamenti*

*Vorrei ringraziare in particolar modo i miei co-relatori Alessandro Antonini e Lidia Bressan per l'aiuto e il supporto che mi hanno dato in questi mesi e tutte le persone del laboratorio di Idraulica dell'università di Bologna che mi hanno sempre accolto con la massima disponibilità.*

*Un ringraziamento speciale alla mia famiglia e a tutte le persone che mi sono state vicine e mi hanno sempre sostenuto.*

## **Indice**

0. Introduzione.....	10
1. Lo tsunami .....	13
1.1 Generazione dell'onda di tsunami.....	14
1.2 Propagazione dell'onda di tsunami .....	16
1.3 Inondazione delle aree costiere .....	17
1.4 Sistemi di allerta e previsione degli tsunami.....	17
2. Il trasporto dei massi costieri.....	19
2.1 Forza di drag .....	21
2.1.1 Dipendenza dalla forma .....	22
2.1.2 Dipendenza dal numero di Reynolds .....	23
2.1.3 Dipendenza dal numero di Mach .....	24
2.1.4 Dipendenza dalla scabrezza del canale e dal numero di Froude.....	25
2.2 Forza di lift.....	25
2.3 Forza di attrito .....	26
2.4 Forza peso .....	26
2.5 Equilibrio delle forze agenti su un masso .....	27
2.5.1 Onde di maremoto e onde generate dal vento.....	28
3. Modellistica fisica .....	29
3.1.1 Progettazione di un modello fisico .....	29
3.1.2 La modellistica fisica nell'idraulica marittima .....	30
4. Stato dell'arte.....	33
4.1 Studi teorici condotti da Nott, Benner, Nandasena e Paris .....	34
4.2 Studi sperimentali condotti da Nandasena e Imamura.....	41
4.3 Confronto tra altezze e velocità d'onda minime .....	45
4.3.1 Confronto altezze minime.....	45
4.3.2 Confronto velocità minime .....	47

Esperimento in laboratorio.....	53
4.4  Scopo degli esperimenti .....	53
4.5  Descrizione dell'esperimento.....	53
4.6  Setting dell'esperimento.....	54
4.7  Procedimento.....	63
4.8  Strumentazione utilizzata.....	65
4.8.1  DOP 2000 .....	65
4.8.2  Sonde Resistive.....	70
4.8.3  Fotocamera Prosilica.....	71
4.8.4  Sistema LabView .....	72
4.8.5  Laser.....	74
4.8.6  Videocamere .....	74
4.9  Materiali utilizzati .....	75
5.  Analisi e discussione dei Dati.....	77
5.1  Numero di Froude e Reynolds .....	77
5.1.1  Numero Froude .....	77
5.1.2  Numero di Reynolds .....	80
5.2  Altezze d'onda .....	82
5.3  Profilo di velocità ricavato mediante utilizzo del DOP2000 .....	89
5.4  Coefficiente di attrito .....	93
5.5  Identificazione dell'inizio del moto del blocco al variare dei parametri .....	96
5.6  Calibrazione dei coefficienti di drag .....	100
6.  Confronto dati di altezza e velocità minima ricavati sperimentalmente con quelli ottenuti da studi precedenti.....	109
7.  Conclusione .....	115
Bibliografia .....	123
Appendice A .....	125

## Elenco delle Figure

Figura 1: rappresentazione della altezze di run-up raggiunte dallo tsunami (8).....	15
Figura 2: moto delle particelle d'acqua di un'onda di diversi periodi (7).....	16
Figura 3: schema della propagazione di un'onda di tsunami dal mare aperto. (4).....	17
Figura 4: masso roccioso costiero nelle Antille Olandesi (11).....	19
Figura 5: massi rocciosi depositati sulle coste del Giappone (10).....	20
Figura 6: distribuzione spaziale dei massi lungo la costa (12) .....	21
Figura 7: corpo cilindrico in un fluido in moto (13).....	23
Figura 8: variazione della turbolenza che si verifica a valle di un corpo (14).....	23
Figura 9: equilibrio delle forze su un piano inclinato .....	27
Figura 10: forze agenti su un blocco (17) .....	37
Figura 11: orientamento degli assi secondo Benner .....	39
Figura 12: differenti modalità di trasporto del blocco rettangolare (21) .....	44
Figura 13: forze applicate ad un blocco nel caso di moto (21).....	44
Figura 14: andamento altezze calcolate da Nott e Benner.....	46
Figura 15: velocità secondo Nott e Nandasena e relative densità dei massi.....	48
Figura 16: costa dell'Islanda nella penisola di Reykjanes (18).....	49
Figura 17: velocità secondo Nott e Nandasena per massi immersi in acqua.....	49
Figura 18: velocità secondo Nott , Nandasena e Benner .....	50
Figura 19: costa formata principalmente da massi in carbonato cementato (22) .....	51
Figura 20: confronto velocità ottenute mediante le relazioni .....	51
Figura 21: vista dall'alto del fondo del canale .....	54
Figura 22: panoramica del canale. ....	54
Figura 23: istanti iniziali della generazione dell'onda mediante dam break (24) .....	56
Figura 24: panoramica laterale della rampa (sinistra), rampa con zanzariera per attrito (destra) .....	56
Figura 25: camera oscura e posizione fotocamera sulla sinistra.....	58
Figura 26: posizione del DOP numero 1 prima della rampa e della camera oscura.....	59
Figura 27: posizione dei trasduttori DOP all'interno della rampa .....	60
Figura 28: principio di funzionamento del UDV (25) .....	66
Figura 29: principio di funzionamento DOP2000 (26).....	66
Figura 30: trasduttore DOP (sinistra) e unità principale (destra).....	68

---

Figura 31: fenomeno dell'aliasing. (25) .....	69
Figura 32: sonde resistive utilizzate in laboratorio .....	71
Figura 33: fotocamera Prosilica .....	72
Figura 34: pannello frontale del LabView .....	73
Figura 35: schermata principale LabView .....	74
Figura 36: blocchi utilizzati negli esperimenti .....	76
Figura 37: andamento del numero di Froude e delle velocità medie.....	78
Figura 38: andamento del numero di Froude, della velocità media.....	79
Figura 39: andamento del numero di Reynolds .....	81
Figura 40: andamento del numero di Reynolds .....	81
Figura 41: setting dell'esperimento prima del passaggio del fronte d'onda.....	83
Figura 42: setting dell'esperimento al passaggio dell'onda.....	83
Figura 43: andamento delle altezze e della media relativa a cinque differenti prove.....	84
Figura 44: andamento delle altezze medie per i differenti blocchi.....	85
Figura 45: profilo delle altezze (riquadro di sinistra) e profilo dei dati di eco .....	86
Figura 46: profilo delle altezze e profilo dei dati di eco.....	86
Figura 47: confronto delle altezze .....	87
Figura 48: profilo di velocità e andamento della velocità [mm/s] media .....	89
Figura 49: profilo di velocità e relative velocità medie .....	90
Figura 50: profilo di velocità a vuoto e con blocco .....	91
Figura 51: profilo delle altezze nei due casi. ....	92
Figura 52: velocità media prove a vuoto e con volumetto.....	92
Figura 53:rappresentazione delle forze agenti su un blocco su di un piano inclinato .....	93
Figura 54: procedimento di misura del coefficiente di attrito .....	94
Figura 55: BoxPlot per ricavare il coefficiente di attrito .....	95
Figura 56: frame in cui l'onda impatta il blocco 8c .....	96
Figura 57: orientamento blocco 4 rispetto direzione di propagazione del flusso .....	97
Figura 58: blocco 4 ruotato di 45° rispetto alla direzione di propagazione del flusso ....	97
Figura 59: orientamento del blocco 8c rispetto alla direzione del flusso .....	98
Figura 60: orientamento del blocco 8c rispetto alla direzione del flusso .....	98
Figura 61: orientamento del blocco 4c rispetto alla direzione del flusso .....	99
Figura 62: orientamento del blocco 4c rispetto alla direzione del flusso .....	99

Figura 63: rappresentazione dell'altezza frontale (H) del blocco 7c e della relativa altezza bagnata (h) .....	100
Figura 64: forza di drag e forza stabilizzante .....	101
Figura 65: forza stabilizzante e forza di drag con relativo coefficiente.....	102
Figura 66: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 7c .....	117
Figure 67: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 4 .....	117
Figura 68: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 7c ruotato di 45° ...	118
Figura 69: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 4 ruotato di 45° ....	118
Figura 70: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 8c .....	119
Figura 71: confronto delle altezze di moto incipiente per il blocco 4c.....	119
Figure 72: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 8c .....	120
Figure 72: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 4c .....	120

## Elenco delle Tabelle

Tabella 1: valori di altezze secondo Nott e Benner .....	46
Tabella 2: valori dei coefficienti utilizzati da Nott e Benner.....	46
Tabella 3: valori dei coefficienti adimensionali utilizzati da Nott e Nandasena .....	47
Tabella 4: coefficienti di drag.....	52
Tabella 5: parametri di settaggio del DOP2000.....	61
Tabella 6 parametri di settaggio della fotocamera Prosilica.....	62
Tabella 7: prove effettuate con differenti tiranti di altezza iniziale .....	64
Tabella 8: tabella con riportati i valori di peso e densità dei blocchi asciutti e bagnati ..	75
Tabella 9: dimensioni dei volumetti utilizzati .....	76
Tabella 10: Errore sulle minime altezze di inizio del moto.....	88
Tabella 11: tabella con i relativi coefficienti di attrito per i vari blocchi .....	95
Tabella 12: altezze minime di inizio moto per il blocco 4 .....	97
Tabella 13: altezza e velocità minima blocco 4 ruotato di 45° .....	97
Tabella 14: altezza e velocità minima per il blocco 7c.....	97
Tabella 15: altezza e velocità minima per il blocco 7c ruotato di 45° .....	98
Tabella 16: altezze minime per il blocco 8c con asse maggiore.....	98
Tabella 17: altezza e velocità minima per il blocco 8c con asse minore .....	98
Tabella 18: altezze e velocità minime per il blocco 4c con asse maggiore .....	99
Tabella 19: altezze e velocità minime per il blocco 4c asse minore.....	99
Tabella 20: coefficienti di drag per il blocco 4 e blocco 7c.....	102
Tabella 21: coefficienti di drag blocchi 8c e 4c.....	103
Tabella 22: coefficienti di drag utilizzati negli studi .....	105
Tabella 23: errore sul coefficiente di drag .....	106
Tabella 24: confronto tra le altezze di inizio moto ottenute dal modello .....	107
Tabella 25: confronto tra le altezze di moto incipiente per i blocchi 4 e 7c ruotati .....	107
Tabella 26: confronto tra le altezze di moto incipiente per i blocchi 4c e 8c .....	108
Tabella 27: confronto tra le altezze di moto incipiente per i blocchi 4c e 8c .....	108
Tabella 28: altezze minime .....	109
Tabella 29: dimensioni reali dei blocchi utilizzati in laboratorio .....	111
Tabella 30: altezze minime di moto a scala reale .....	111
Tabella 31: confronto con i risultati.....	113



Tabella 32: coefficienti di drag utilizzati negli studi precedenti .....	116
Tabella 33: coefficienti di drag proposti dallo studio effettuato in laboratorio .....	116
Tabella 34: dimensioni e densità dei massi campionati lungo le coste dell'Islanda (18)	125

## ***Sommario***

La presente tesi di laurea descrive lo studio sperimentale condotto in un canale idraulico presso il laboratorio dell'università di Bologna. Negli esperimenti effettuati è stato osservato il moto incipiente di blocchi prismatici causato dall'impatto con un'onda di dam break. I blocchi sono stati sistemati su un piano inclinato posto all'interno del predetto canale lungo la direzione di propagazione del flusso. Le caratteristiche dell'onda sono state ricavate attraverso l'analisi delle immagini acquisite ad alta frequenza e dei dati ottenuti mediante l'utilizzo del velocimetro Doppler a ultrasuoni. In questo modo è stato possibile calcolare l'altezza e la velocità minima dell'onda necessaria a causare lo spostamento dei blocchi. I dati empirici così ottenuti sono stati confrontati con i risultati dei precedenti studi in modo da verificarne l'esattezza e l'attendibilità.

Attraverso un modello semplificato, sono stati calibrati i coefficienti di drag per le varie prove con i differenti volumetti, per descrivere, il più verosimilmente possibile, la forza esercitata dall'onda su questi ultimi nella fase di inizio del moto. I coefficienti così ottenuti variano in funzione della forma e dell'orientamento dei blocchi rispetto alla direzione di propagazione del flusso. Il modello sviluppato ha permesso di poter fare delle previsioni più precise sulle condizioni di moto incipiente dei blocchi.

**Parole chiave:** moto incipiente, trasporto dei massi rocciosi, coefficiente di drag, onda lunga, esperimenti in un canale idraulico

## ***Abstract***

This master thesis describes the experimental study conducted in the laboratory at Università di Bologna. In these tests the incipient motion of prismatic blocks caused by a dam break wave was observed. The blocks were placed on a slope inside a hydraulic channel and along the direction of propagation of the dam break wave. The wave characteristics were studied through frames and velocimeter data analysis. The minimum wave run up and velocity needed to move a block were computed and compared with the results of past studies.

A simplified model was developed to compute the drag coefficients in each test with different blocks. This study was conducted to better describe the impact force of the wave on the mass in the early motion. The value of the obtained coefficients changes as a function of the shape of the blocks and their orientation with respect to the wave propagation.

**Key words:** incipient motion, boulder transport, drag coefficient, long wave, experiments in a hydraulic channel

## **0. Introduzione**

Lo tsunami, definito anche maremoto, è un fenomeno naturale che si può manifestare lungo le coste di tutto il mondo e può avere una potenza devastante, causando perdite di vite umane e distruzione. Proprio per le nefaste conseguenze che può provocare è considerato un problema attuale di rilevante importanza.

Il maremoto può essere un evento di estrema energia e potenza, capace di spostare, trasportare e ricollocare enormi massi lontano dalla posizione originaria, a distanze comprese tra i pochi metri e le centinaia di metri. Il trasporto avviene in funzione della dinamica e della potenza dell'onda ma anche delle caratteristiche fisiche dei blocchi sui quali l'onda s'infrange.

Tra gli tsunami verificatisi nell'ultimo decennio, possiamo ricordare sia quello che ha interessato le coste del Giappone nel 2011, in seguito ad un terremoto di magnitudo momento 9.0 (1) sia quello del 2004 avvenuto nell'oceano Indiano, verificatosi, anche questo, in seguito ad un terremoto di magnitudo 9.0 al largo delle coste di Sumatra (2).

Tale fenomeno colpisce anche le coste del Mediterraneo, considerato un mare ad alto rischio per l'elevata sismicità, la presenza di vulcani attivi sommersi e immersi e la presenza di coste ripide dove possono avvenire frane sottomarine e subaeree. Da citare per esempio il maremoto di Stromboli nel 2002, in seguito ad una frana avvenuta sulla Sciara del fuoco e quello di Messina nel 1908 per cui è ancora in corso un dibattito scientifico sulla causa scatenante dell'evento (3).

Dato che i maremoti sono un fenomeno raro, è importante sottolineare che esistono numerosi dati e osservazioni riguardanti eventi avvenuti nell'ultimo decennio, a partire dal maremoto di Sumatra del 2004, o come per esempio quello del Giappone del 2011, mentre per quanto riguarda i maremoti del passato, come quello del 1908 e per eventi antecedenti, si hanno soltanto dati geologici, racconti storici o misure del secolo scorso. Per questo motivo, uno dei principali metodi che viene utilizzato per descrivere questi eventi estremi del passato si basa sull'analisi delle prove geologiche.

Questi studi hanno portato ad ipotizzare che il rinvenimento sulle nostre coste di massi enormi di varie dimensioni e pesi può essere ricollegato all'impressionante forza di trasporto e alla notevole potenza delle onde di uno tsunami.

Gli studi riguardanti il movimento di questi massi hanno la finalità di fornire importanti informazioni per identificare e interpretare il fenomeno marino responsabile del trasporto, per l'analisi di questi eventi, per interpretare gli effetti degli tsunami e delle mareggiate sull'ambiente costiero nel quale si verificano. Questo consente di effettuare una stima della natura e della magnitudo di questi eventi estremi per poter permettere di valutare il rischio e le possibili conseguenze di disastri futuri; l'obiettivo è di poter studiare possibili interventi e misure di protezione, come ad esempio la progettazione di strutture protettive, l'elaborazione di mappe di pericolosità e di rischio e la pianificazione dell'evacuazione delle aree costiere più soggette a questi eventi.

In questo elaborato saranno descritti e analizzati gli esperimenti sul trasporto di massi da parte di maremoti condotti nel laboratorio di Idraulica dell'Università di Bologna. Lo studio sperimentale si basa sull'osservazione delle varie condizioni di moto di blocchi solidi, posizionati all'interno di un canale idraulico, trasportati da un'onda lunga generata mediante dam break.

Questi test hanno permesso di effettuare un'analisi sperimentale delle caratteristiche dell'onda di bore impattante sui massi (altezza e velocità), che ha consentito di trovare le relazioni che intercorrono tra questa e lo spostamento dei blocchi in funzione delle loro caratteristiche fisiche (densità, forma e dimensioni). Si è analizzato, in particolar modo, il moto incipiente dei blocchi in funzione delle caratteristiche dell'onda impattante. Per moto incipiente si intende la fase iniziale dello spostamento dei corpi, condizione in cui avviene il passaggio da uno stato di quiete ad uno stato di moto.

Per far ciò, sono state analizzate le caratteristiche dell'onda di maremoto impattante sui massi attraverso la determinazione della relativa altezza e velocità mediante un'analisi di immagini acquisite ad alta frequenza e dei dati acquisiti da velocimetri Doppler a ultrasuoni. Attraverso lo studio delle forze agenti sul blocco, è stato ricavato il coefficiente di drag relativo ad ogni prova nonché l'altezza e la velocità minime del fronte d'onda necessarie a provocare lo spostamento del corpo.

I metodi finora utilizzati per studiare il trasporto dei massi si basano su formule idrodinamiche teoriche, (Nott (2012), Nandasena (2012), Benner (2010), Paris (2009)) , che stimano l'altezza o la velocità minime per il trasporto del masso, e che sono state applicate a casi reali senza la possibilità di verificarne la validità o di stimare i parametri reali da utilizzare nelle equazioni proposte. Nandasena e Imamura sono tra i pochi che hanno condotto anche esperimenti in laboratorio e simulazioni numeriche riguardanti il trasporto del masso, mentre parecchi studi utilizzano ancora parametri teorici. Per questo motivo, i dati ottenuti mediante gli esperimenti e descritti in questo elaborato sono stati utilizzati per confrontare i risultati ottenuti dagli studi precedenti e verificare l'applicabilità di tali teorie a diverse situazioni con differenti condizioni iniziali.

## 1. Lo tsunami

Il maremoto, o dal giapponese tsunami che significa onda di porto (4), consiste in una serie di onde marine, caratterizzate da un lungo periodo (o una lunghezza d'onda), che vengono generate dal rapido spostamento di una grande massa d'acqua. Queste onde possono raggiungere, quando si abbattono sulla costa, in casi eccezionali, altezze superiori a 10 metri e possono quindi causare gravi danni e distruzione.

Le onde di tsunami sono descritte mediante la teoria delle onde lunghe in approssimazione di acque basse per le quali la velocità di propagazione di una perturbazione sulla superficie del fluido, qui chiamata celerità, può essere espressa dalla seguente espressione:

$$c = \sqrt{gd} \quad (1.1)$$

dove:  $c$  è la celerità dell'onda,  $d$  è la profondità del fondale marino e  $g$  l'accelerazione di gravità. La velocità dell'onda di tsunami dipende dalla profondità dell'acqua nella quale viaggia.

Le onde di maremoto si distinguono dalle onde comuni, generate dal vento, per via del loro periodo<sup>1</sup> e della loro lunghezza d'onda<sup>2</sup>. Infatti, le onde generate dal vento hanno un periodo che varia tra i 5 e 20 secondi e una lunghezza d'onda che varia tra 10 e 200 metri (4). Le onde di tsunami, invece, a costa presentano periodi che variano tra pochi minuti a circa 2 ore circa e lunghezze d'onda in mare aperto dell'ordine di 100 km (6).

Le onde causate dal vento, inoltre, provocano solo uno spostamento della parte più superficiale dell'acqua, non coinvolgendo un movimento della massa d'acqua in profondità. Cosa che succede, invece, per le onde di maremoto, le quali spostano l'intera colonna d'acqua dal fondale alla superficie (4). E' proprio per questo motivo che si deve la grande quantità di energia che queste possiedono, che permette di spingerle per molte centinaia di metri nell'entroterra e che provoca un impatto più forte sulla costa. Inoltre, bisogna considerare che la dissipazione di energia dell'onda di maremoto, in mare

---

<sup>1</sup> Il periodo di un'onda è il tempo che intercorre tra due creste successive dell'onda. (5)

<sup>2</sup> La lunghezza d'onda è la distanza che intercorre tra due massimi o due minimi di un'onda. Si indica con la lettera  $\lambda$ . (5)

aperto, è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda. Questo spiega come sia possibile che gli tsunami possono percorrere grandi distanze, propagandosi fino dalla parte opposta degli oceani, raggiungendo coste lontane con ancora una notevole quantità di energia.

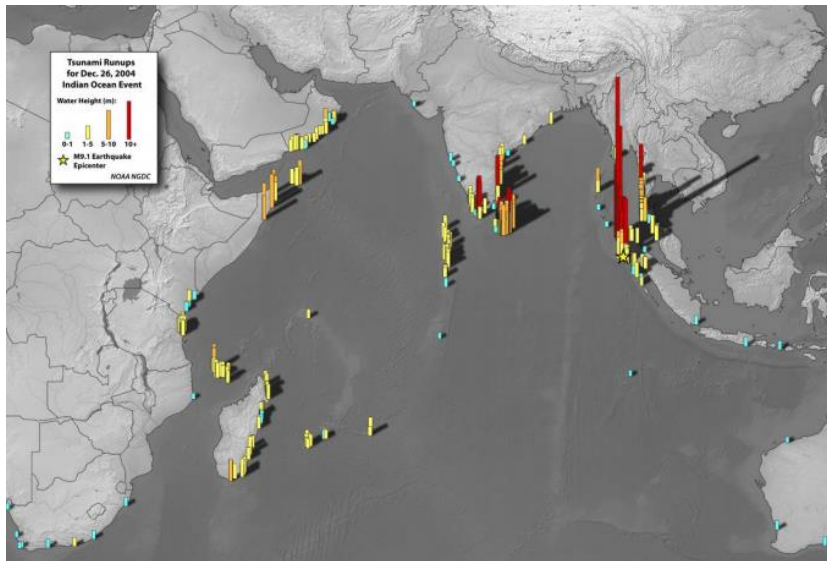
Un'onda di tsunami si può suddividere in tre differenti fasi: generazione da parte di qualsiasi forza che sia in grado di mobilitare la colonna d'acqua, propagazione dal mare aperto alla costa, inondazione della terraferma. L'ultima fase è quella in cui avviene il trasporto di sedimenti e massi rocciosi: i sedimenti e i megaclasti vengono mobilitati per poi essere trasportati e depositati (7).

### **1.1 Generazione dell'onda di tsunami**

La principale causa della generazione di un'onda di tsunami consiste in forti terremoti con epicentro in mare, a profondità non troppo elevate (fino a 40-50 km). Questi movimenti verticali della crosta si verificano soprattutto in corrispondenza dei bordi di contatto tra placche come ad esempio ai margini dell'Oceano Pacifico.

Da ricordare però che non tutti i terremoti che avvengono in mare causano la formazione di onde di tsunami. Di solito, solamente quelli con una magnitudine superiore ad una determinata soglia della scala Richter, e con un determinato meccanismo, provocano lo spostamento dell'intera colonna d'acqua (7).

Uno tsunami causato da un sisma avvenne il 26 Dicembre 2004 al largo delle coste di Sumatra in Indonesia. Un terremoto di magnitudine 9.1 della scala Richter, ad una profondità di 30 km, provocò la formazione di un'onda che raggiunse un'altezza massima di circa 30 m di altezza di run-up (definita come l'altezza massima nell'entroterra raggiunta da un'onda di maremoto) nella provincia di Aceh, sulle coste nord-ovest di Sumatra (8). Questo maremoto ha devastato tutte le aree costiere in un raggio di 10.000 km dall'epicentro, con un numero di vittime che ammonta a circa 250.000 (6). Nella Figura 1 viene riportata una rappresentazione delle massime altezze di run-up registrate lungo le coste dell'oceano Indiano.



**Figura 1: rappresentazione delle altezze di run-up raggiunte dallo tsunami del 2004 lungo le coste dell'oceano Indiano. In rosso sono riportate le altezze di run-up superiori a 10 metri, in arancione quelle comprese tra 5 e 10 metri ed in giallo quelle comprese tra 1 e 5 metri. (8)**

Altri fenomeni che possono causare la generazione di un maremoto sono le frane sottomarine o costiere, che possono essere provocate da instabilità gravitazionale o terremoti, attività o eruzioni vulcaniche in mare o vicino alla costa; perfino l'impatto di un enorme meteorite con l'oceano (fenomeno molto raro). In generale, i maremoti possono essere provocati da una qualsiasi causa perturbatrice che provochi spostamenti di ingenti volumi d'acqua dalla condizione di equilibrio.

Gli tsunami causati da eruzioni vulcaniche sono meno frequenti di quelli generati da terremoti, ma comunque da non sottovalutare. A titolo d'esempio si può riportare il maremoto di Stromboli, nel 2002, dove il crollo in mare di una parte del pendio del vulcano, circa 16 milioni di m<sup>3</sup> di roccia che si estendeva sia sopra il livello del mare sia al di sotto, in seguito all'attività vulcanica, ha provocato la formazione di uno tsunami che si è abbattuto sui paesi di Stromboli e Ginostra fino ad arrivare alle coste settentrionali della Sicilia (6). La magnitudine dell'evento registrata è molto inferiore rispetto a quella dello tsunami che si è abbattuto lungo le coste dell'Indonesia, ma questo evento ha provocato comunque feriti e distruzione di edifici.

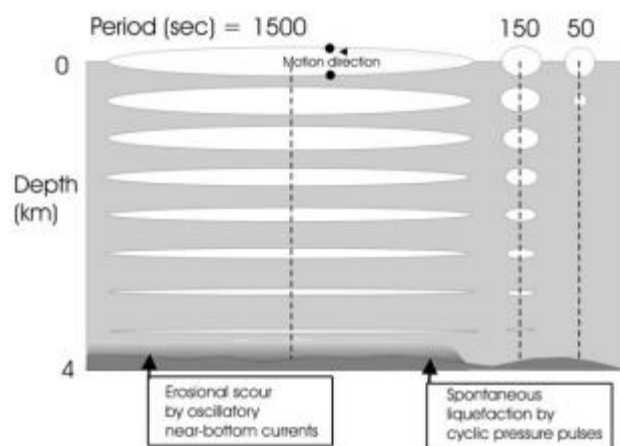
La pericolosità di uno tsunami dipende principalmente dalle caratteristiche del fenomeno che l'ha generato e anche dalle caratteristiche della costa. Ad esempio, l'effetto



dell'onda può essere amplificato dalla presenza di una baia, di un porto o di una laguna che interagiscono con le onde di maremoto.

## 1.2 Propagazione dell'onda di tsunami

Una volta formatasi, l'onda di tsunami si propaga in mare aperto molto velocemente, percorrendo grandi distanze con altezze quasi impercettibili ma con lunghezze d'onda che possono raggiungere alcune centinaia di chilometri. Il passaggio di uno tsunami interessa l'intera colonna d'acqua, dal fondo alla superficie. Come si può vedere nella Figura 2, un'onda di maremoto è caratterizzata da: una componente verticale della velocità, che è maggiore in prossimità della superficie dell'acqua e decresce con l'aumentare della profondità, ed una componente orizzontale che rimane invece costante lungo tutta la colonna d'acqua (7).



**Figura 2: moto delle particelle d'acqua di un'onda di diversi periodi: di un'onda lunga (a sinistra) e di onde corte (a destra). Per un maremoto la componente verticale dello spostamento diminuisce con la profondità, la componente orizzontale rimane costante lungo tutta la colonna d'acqua (7).**

Avvicinandosi alla costa, la velocità del frangente diminuisce a causa della diminuzione di profondità del fondale, con un conseguente rapido aumento dell'altezza d'onda. In questo modo vengono raggiunte, in alcuni casi, anche altezze dell'ordine di qualche decina di metri. Nella Figura 3 viene riportato un esempio delle caratteristiche di propagazione (velocità e lunghezza d'onda) di un'onda di maremoto in funzione della profondità:

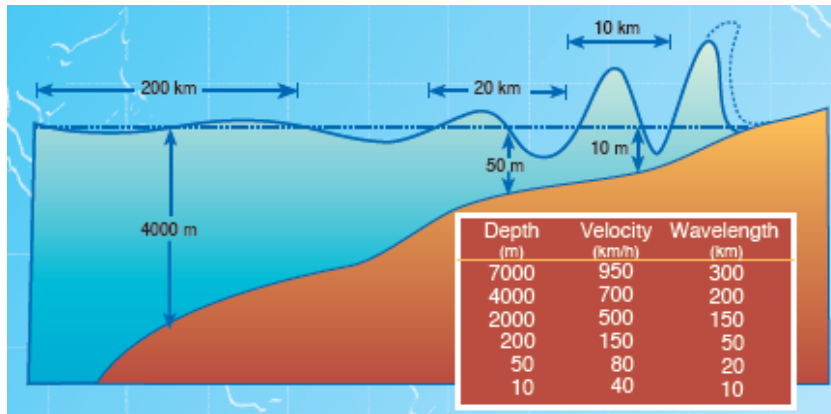


Figura 3: schema della propagazione di un'onda di tsunami dal mare aperto alla costa. (4)

Quando l'onda raggiunge la costa, se il primo arrivo è negativo, inizialmente, le acque costiere si ritirano esponendo il porto ed il fondale. Questo ritiro è un importante e vitale avvertimento dell'arrivo della cresta dell'onda e dell'enorme volume d'acqua (4). È importante sottolineare che il primo arrivo può essere allo stesso modo positivo: il maremoto può arrivare direttamente con un'inondazione della costa, senza il verificarsi di nessun ritiro.

### 1.3 Inondazione delle aree costiere

L'inondazione avviene quando le onde di maremoto si propagano nell'entroterra. In casi estremi può trascinare quasi tutto quello che incontra e può arrivare a penetrare nella costa di numerosi chilometri. L'inondazione è fortemente influenzata dalla morfologia del terreno, dalla vegetazione e dalla potenza dell'onda impattante.

In questa fase avviene il deposito di sedimenti e massi rocciosi che costituiscono le principali prove geologiche del passaggio di un'onda di maremoto. Siccome gli tsunami più potenti sono spesso associati ad una serie di onde, lo studio delle prove geologiche caratterizzato da incertezze e complessità notevoli.

### 1.4 Sistemi di allerta e previsione degli tsunami

Le migliori difese contro uno tsunami comprendono gli allarmi che consentono alla gente di cercare ripari sopraelevati, forniti da sistemi di allarme tsunami, e la pianificazione e la mitigazione preventiva delle coste. Infatti non è tuttora possibile determinare quando avverrà un terremoto e di conseguenza quando sarà generato un maremoto. I sistemi di allarme attuali stimano, sulla base del terremoto già avvenuto, la

possibilità o meno che un maremoto sia generato, e di quale portata. Inoltre, dato che il maremoto è un evento raro, la conoscenza del fenomeno è molto importante. Lo studio del fenomeno ed in particolare del tempo di ritorno di questi eventi estremi si basa sullo studio di tsunami passati. Tra questi studi, si cita per esempio lo studio delle prove geologiche depositate lungo le coste.

Negli ultimi 50-60 anni, a partire dall'oceano Pacifico, sono stati istituiti centri di allarme maremoti nazionali e internazionali, con lo scopo di monitorare la situazione; insieme a programmi per, migliorare i sistemi di mitigazione, per promuovere la ricerca e educare la popolazione a come comportarsi in caso di allarme. Un esempio sono i centri di allarme tsunami del Pacifico e dell'oceano Indiano, che sono tenuti a fornire allarmi per paesi che si affacciano sulle rispettive coste.

Il tempo utile all'evacuazione dipende dalla distanza dalla sorgente (terremoto, frana, eruzione vulcanica) e dall'esistenza di un sistema di allarme per maremoti. Nei sistemi attuali, gli allarmi per un maremoto vengono emessi dopo che è stato registrato un terremoto sottomarino di magnitudine superiore ad una determinata soglia.

## 2. Il trasporto dei massi costieri

Come citato in precedenza, uno dei metodi per stimare l'intensità degli tsunami passati ed eventualmente definirne l'intervallo di ricorrenza si basa sullo studio e sull'analisi dei massi rocciosi depositati sulle coste per opera di onde di maremoto.

I massi costieri sono stati largamente studiati negli ultimi 15 anni in quanto sono una prova geologica importante di eventi marini di elevata potenza e bassa frequenza.

Non esiste una definizione univoca per descrivere un masso roccioso. Alcuni studiosi li hanno catalogati in funzione della loro forma, delle dimensioni e del volume. Altri forniscono solo una delle caratteristiche appena riportate. Ad esempio Sugawara, nel suo studio sugli tsunami, li ha definiti come dei sassi di larghezza superiore a 25.6 centimetri (9). Blair e McPherson classificarono come masso qualsiasi masso avente diametro superiore a 4096 millimetri.

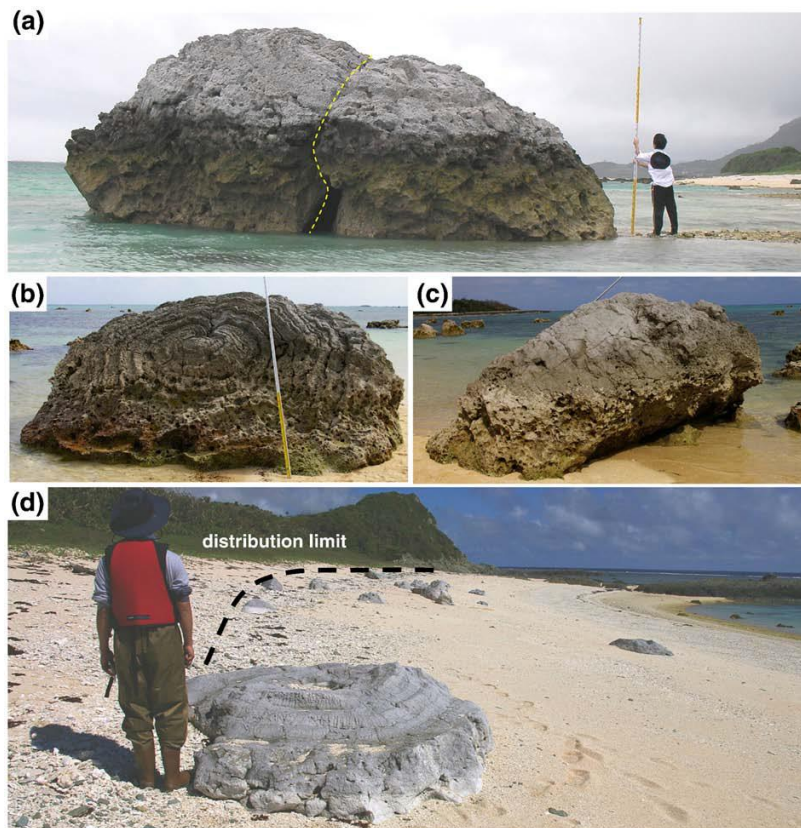
In Giappone sull'isola di Miyako-Yaeyama esiste la tradizione di dare dei soprannomi ai grandi massi rocciosi costieri. Quest'usanza, oltre ad essere sfruttata dai geologi per campionare i massi, è utile anche per stabilire dei punti di riferimento spaziali (10).

Nella Figura 4 si può vedere un masso roccioso depositato sulle coste orientali della Bonaire (Antille Olandesi) da un'onda di tsunami. Le tre foto rappresentano le tre parti in cui il blocco si è rotto una volta depositato sulla costa.



Figura 4: masso roccioso costiero nelle Antille Olandesi depositato da un'onda di tsunami (11)

Nelle Figura 5 sono riportate altre fotografie di massi costieri ritrovati sulle coste del Giappone sull'isola di Ishigaki:

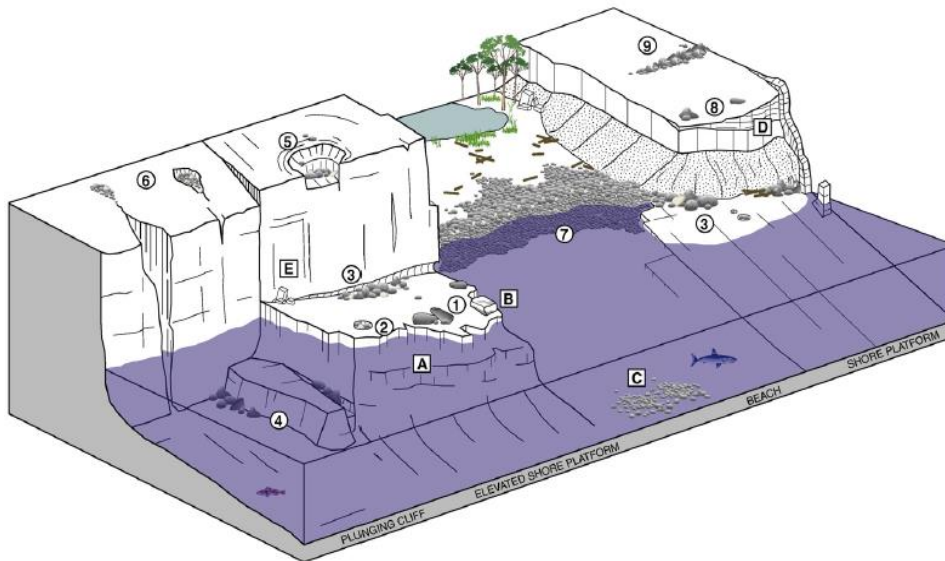


**Figura 5: massi rocciosi depositati sulle coste del Giappone. Nella figura d si può anche osservare il limite di distribuzione oltre il quale non sono stati ritrovati ulteriori depositi (10).**

Come si può osservare dalle Figura 4 e 5, i massi rocciosi depositati da onde di tsunami o da onde comuni generate dal vento hanno forme, dimensioni e peso variabile in funzione del loro ambiente originario, dell'erosione subita durante il trasporto e dell'impatto finale con il terreno. Questi massi possono essere isolati oppure trovarsi in raggruppamenti e possono essere collocati in 4 differenti zone morfologiche (12):

- Al largo
- Sulla costa
- Sulla spiaggia
- Sulla scogliera

Nella Figura 6 viene riportato lo un semplice schema per classificare la posizione iniziale dei clasti introdotto da Paris (12):



**Figura 6:** distribuzione spaziale dei massi lungo la costa. Le lettere rappresentano la posizione iniziale dei massi e i numeri dove i clasti vengono depositati. A: rocce immerse in acqua ( ad esempio la barriera corallina), B: costa rocciosa soggetta all'azione erosiva delle onde, C: depositi immersi in acqua come morene, D: scogliera, E: frane causate dall'erosione della scogliera, 1,2,3: massi depositati sulla costa rocciosa, 4: massi immersi, 5,6,8,9: massi accumulati in cima alla scogliera, 7: massi costieri. (12)

Le condizioni di moto dei massi rocciosi, ad opera di onde di tsunami, vengono determinate analizzando le forze agenti sul blocco prima e durante il passaggio dell'onda. Le forze in questione sono: la forza di lift, la forza peso, la forza di drag e la forza di attrito.

## 2.1 Forza di drag

La forza di drag, o forza idrodinamica, è dovuta al moto relativo tra il fluido e un corpo immerso in esso. Questa forza nasce a causa della differenza di velocità che si genera tra il corpo stesso ed il mezzo in cui esso si muove; causando quindi la formazione di una scia turbolenta alle spalle dell'oggetto. E' definita come la forza risultante che il fluido esercita sul corpo nella direzione della corrente.

La forza di drag totale è data dall'insieme delle forze di pressione agenti sul corpo (drag di pressione) e dagli sforzi tangenziali (drag di attrito) e viene espressa mediante la seguente espressione:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 \quad (2.1)$$

dove:  $C_D$  è il coefficiente di drag,  $A$  è l'area frontale perpendicolare al flusso,  $v$  è la velocità del flusso.

Il coefficiente di drag è un valore adimensionale che dipende dalla forma e dalla rugosità dell'oggetto contenuto nel mezzo, dalle caratteristiche della corrente e quindi dai numeri di Reynolds, Mach e Froude.

### 2.1.1 Dipendenza dalla forma

La dipendenza dalla forma viene anche definita come un drag di pressione, in quanto è dovuta alla pressione applicata sull'oggetto da parte della corrente nel momento in cui questo si muove all'interno del mezzo. Questa dipendenza si manifesta nel momento in cui si verifica una differenza di pressione tra il lato a monte e quello a valle del corpo immerso nella corrente.

In generale, quando un flusso stazionario incontra un oggetto, come ad esempio una lastra piana parallela alla direzione di propagazione del fluido, il campo di pressione è uniforme e si è in presenza di un gradiente di pressione trascurabile. Al contrario, se si misura la pressione lungo la normale locale alla superficie di un corpo curvo si può osservare come questa varia nello spazio e il gradiente, quindi, non potrà più essere considerato trascurabile. Questo è causato dalla variazione di velocità della corrente libera lungo il bordo dello strato limite; dove per strato limite si intende la regione prossima alla superficie del corpo all'interno della quale gli effetti viscosi sono importanti. Quando si verifica questa situazione, il fluido potrebbe non avere energia necessaria per mantenere il contatto con la superficie del corpo. A causa di questo fenomeno, la pressione media della superficie posteriore del corpo è inferiore a quella della superficie anteriore causando la formazione di una scia turbolenta a valle dell'oggetto (13). Attraverso l'osservazione della scia che si verifica è possibile quantificare la differenza di pressione tra il lato a monte e quello a valle dell'oggetto. Maggiore sarà questa turbolenza, maggiore sarà il gradiente e quindi il drag di pressione, come si può vedere in Figura 7.

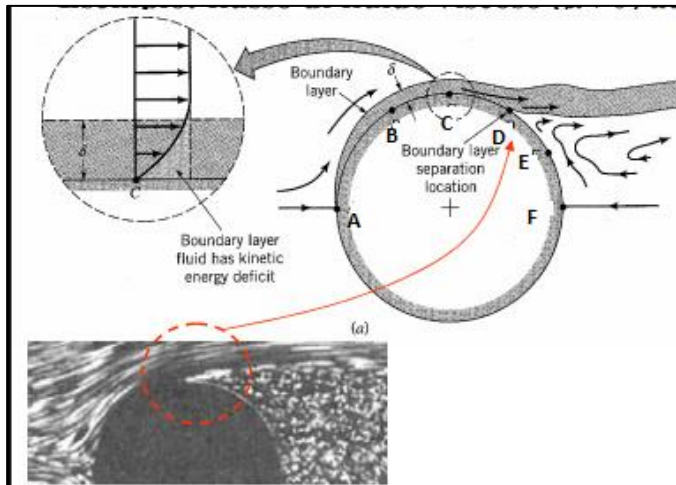


Figura 7: corpo cilindrico in un fluido in moto. Notare la superficie di separazione del fluido (13).

Il coefficiente di drag, quindi, è fortemente influenzato dalla superficie frontale normale alla direzione di propagazione del fluido. Più il corpo è tozzo, maggiore sarà il valore del coefficiente e quindi la scia a valle di questo. La differenza di turbolenza che si genera a valle di un corpo tozzo e di un corpo di forma affusolata viene rappresentata in Figura 8:

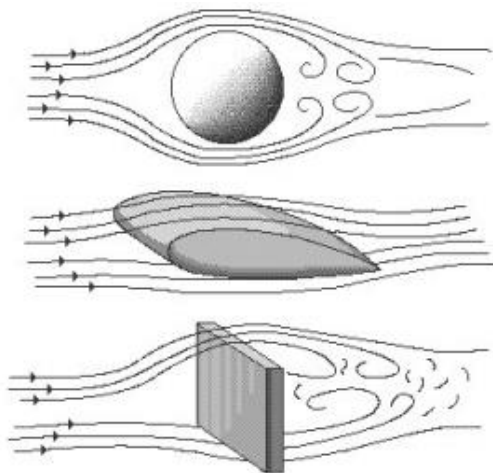


Figura 8: variazione della turbolenza che si verifica a valle di un corpo tozzo e di uno affusolato (14).

### 2.1.2 Dipendenza dal numero di Reynolds

Il coefficiente di drag è fortemente influenzato dal grado di turbolenza della corrente, che è indicato dal numero di Reynolds. Il numero di Reynolds è definito mediante la seguente reazione:

$$Re = \frac{L\rho v}{\eta} \quad (2.2)$$



dove:  $L$  è una lunghezza caratteristica del fenomeno lungo la direzione della corrente,  $\eta$  è la viscosità dinamica del fluido,  $\rho$  è la densità del fluido e  $v$  è la velocità relativa del corpo rispetto alla corrente.

Per bassi valori del numero di Reynolds,  $Re < 1$ , la corrente è laminare ed è quasi completamente simmetrica in un condotto nella direzione del flusso e quindi il contributo del drag sarà dovuto all'effetto della pressione e degli sforzi viscosi che agiscono sulla superficie del corpo. In questo caso si avrà un coefficiente proporzionale alla velocità.

Quando il numero di Reynolds assume valori intermedi, ( $1 < Re < 100$ ), si inizia a sviluppare una scia a valle del corpo che aumenta all'aumentare di  $Re$  e quindi della turbolenza della corrente. Per valori elevati di  $Re$ , la scia diventa sempre più instabile e si creano dei vortici. In questa situazione il coefficiente di drag rimane più o meno costante e la forza di drag è proporzionale al quadrato della velocità del fluido (13, 15).

Di conseguenza, il passaggio da una condizione di moto laminare ad una di moto turbolento può provocare cambiamenti nel valore del coefficiente di drag. Per corpi affusolati (aerodinamici e idrodinamici) il coefficiente di drag cresce con la turbolenza, in quanto la maggior parte del drag è dovuta a sforzi tangenziali che sono maggiori nel moto turbolento. Al contrario, per corpi tozzi il coefficiente di drag decresce con la turbolenza. In quanto lo strato limite diviene turbolento e può penetrare molto di più nella zona a gradiente avverso di pressione, causando una riduzione del drag di pressione e quindi della regione di scia a valle del corpo.

### 2.1.3 Dipendenza dal numero di Mach

Il coefficiente di drag dipende anche dalla comprimibilità di un fluido ovvero dal numero di Mach. Questo corrisponde al rapporto tra la velocità di un oggetto in moto in un fluido e la velocità del suono nello stesso. È espresso dall'equazione 2.3:

$$Ma = \frac{v}{a} \quad (2.3)$$

dove:  $a$  è la velocità del suono nel fluido e  $v$  è la velocità dell'oggetto in moto

All'aumentare della velocità del corpo, la comprimibilità non è più trascurabile. Quindi, per elevati valori del numero di Mach si avrà una comprimibilità molto importante tale

da far diventare secondari gli effetti del numero di Reynolds. Questo perché, le velocità della corrente associate ad un valore del numero di Mach superiore a 0.3 sono accompagnate da notevoli cambiamenti sia nella distribuzione delle pressioni sia nella densità, provocando una variazione anche nel valore del coefficiente di drag (13).

Negli esperimenti condotti la dipendenza del coefficiente di drag dal numero di Mach non è presente a causa delle velocità troppo basse con cui sono state effettuate le prove.

#### **2.1.4 Dipendenza dalla scabrezza del canale e dal numero di Froude**

Il coefficiente di drag dipende anche dalla scabrezza superficiale, specialmente quando il moto dello strato limite è turbolento. La scabrezza, infatti, altera gli sforzi tangenziali alla parete.

Il numero di Froude può essere interpretato come il rapporto tra la velocità con cui si muove una corrente a pelo libero e la velocità di un'onda che si muove sulla superficie. La dipendenza del  $c_D$  dal numero di Froude, è data dall'interazione dell'oggetto con la superficie libera, ovvero dagli effetti dovuti alla formazione delle onde.

### **2.2 Forza di lift**

La forza di Lift è una forza che si verifica quando un corpo è immerso in acqua. È una forza perpendicolare alla direzione di propagazione del flusso d'acqua, anche se non è necessariamente verticale, e che si oppone alla forza peso. Questa forza viene creata dalle differenti pressioni che si creano al passaggio dell'onda sulle due superfici opposte del blocco ( quella superiore e quella inferiore).

La forza di lift si calcola mediante l'equazione 2.4:

$$F_L = C_L \rho A \frac{v^2}{2} \quad (2.4)$$

dove  $C_L$  è il coefficiente di lift,  $\rho$  è la densità dell'acqua,  $A$  è l'area su cui agisce la forza di lift,  $v$  è la velocità del flusso.

Il coefficiente di lift è un valore adimensionale che viene determinato sperimentalmente, mediante prove in laboratorio, analisi semplificate o metodi numerici. Il coefficiente di lift dipende dalla forma dell'oggetto, del numero di Reynolds, di Mach, di Froude e della scabrezza delle superfici come nel caso del coefficiente di drag.

### 2.3 Forza di attrito

La forza di attrito è una forza di contatto passiva, ovvero generata dal semplice contatto tra due superfici e tale da opporsi al movimento di un corpo. L'attrito si differenzia tra attrito statico e dinamico. L'attrito statico è rappresentato da una reazione vincolare che impedisce il movimento di un corpo fermo finché la forza che ne innesca il moto non supera una certa soglia, mentre l'attrito dinamico è la resistenza che si oppone al movimento quando due superfici scorrono l'una rispetto all'altra.

Si distinguono tre differenti tipologie di attrito dinamico:

- Radente: quando due corpi strisciano l'uno sull'altro,
- Volvente: quando un corpo rotola sulla superficie di un altro;
- Viscoso: quando un corpo si muove in un fluido.

Negli studi condotti presso il laboratorio di idraulica dell'università di Bologna, considerando il moto incipiente di un blocco, si considererà solamente l'attrito statico.

La forza di attrito può essere espressa dall'equazione 2.5:

$$F_{att} = \mu_s N \quad (2.5)$$

Dove  $\mu_s$  è il coefficiente di attrito statico e  $N$  è la forza normale alla superficie agente sul masso, generalmente la forza peso. Il coefficiente di attrito statico è un numero adimensionale, che dipende dalla superficie di contatto, con valore sempre inferiore ad 1.

Ponendo il corpo su di un piano inclinato, è possibile ottenere il coefficiente di attrito statico misurando l'inclinazione del piano quando il corpo si muove dove  $\mu_s$  è pari alla tangente dell'angolo del piano inclinato:

$$\mu_s = \tan\vartheta \quad (2.6)$$

### 2.4 Forza peso

La forza peso è la forza che il campo gravitazionale esercita su ogni oggetto dotato di massa attraendolo verso il centro della terra. Questa forza si ottiene mediante la seguente relazione:

$$F_p = P = mg \quad (2.7)$$

dove:  $m$  è la massa del corpo e  $g$  è l'accelerazione di gravità. L'accelerazione di gravità sulla terra ha un valore pari a  $9.8 \text{ m/s}^2$

## 2.5 Equilibrio delle forze agenti su un massa

Ragionando sull'equilibrio delle forze agenti su un massa costiero è possibile valutare le condizioni in cui inizierà a muoversi e quindi trovare l'altezza e velocità d'onda minima necessarie a provocarne lo spostamento.

La forza di lift, viene considerata in tutti gli studi passati (Nott, Nandasena, Benner). Al contrario, per gli esperimenti condotti, descritti e analizzati in questa tesi si utilizzerà un modello semplificato, escludendo tale forza.

Nella Figura 9 viene riportato uno schema delle forze, descritte in precedenza, applicate ad un blocco posizionato su un piano inclinato di un angolo  $\vartheta$ .

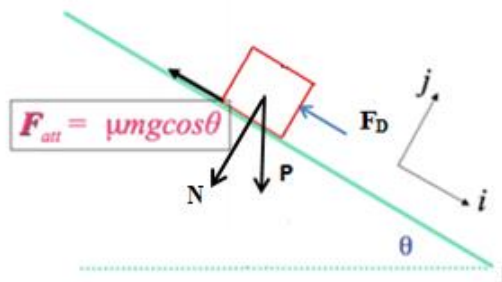


Figura 9: equilibrio delle forze su un piano inclinato

Dove  $N$  è la componente della forza peso normale al piano inclinato:

$$N = mg \cos \theta \quad (2.8)$$

Dall'equilibrio delle forze si deduce che il moto inizia se la forza di drag supera la forza di attrito e la forza peso nella direzione di propagazione del flusso:

$$F_D \geq F_{att} + P_{//} \quad (2.9)$$

Dove  $P_{//}$  è la forza peso proiettata nella direzione parallela al piano inclinato e ottenuta mediante l'equazione seguente:

$$P_{//} = mg \sin \vartheta \quad (2.10)$$

### 2.5.1 Onde di maremoto e onde generate dal vento

Attraverso lo studio dei massi si vuole distinguere se il loro trasporto è dovuto all'azione di un maremoto o a causa di altri eventi estremi come ad esempio mareggiate in seguito ad uragani o tempeste.

Dawson, nel 1994 ed in seguito nel 2007, propose un metodo per effettuare questa distinzione (7). Quest'ultimo si basa sull'analisi della posizione finale dei massi, in seguito al loro trasporto, in termini di distanza orizzontale e altitudine dal mare e sull'osservazione della micro e macro fauna contenuta nei massi. Infatti, una delle principali caratteristiche riscontrate nei massi trasportati da onde di maremoto è la presenza, sulla loro superficie, di una grande quantità di diatomee e foraminiferi fossili spezzati a causa del moto turbolento del flusso d'acqua. In alcuni casi, anche la presenza di molluschi marini incastrati sulla superficie della roccia, presenti di solito in fondali profondi, ne testimonia il trasporto da acque profonde (7).

Un altro metodo, sviluppato da Lorang nel 2010, mette in relazione il periodo dell'onda con la densità del masso, l'altitudine della sua posizione finale dopo il trasporto, l'inclinazione della spiaggia verso il mare e la massima velocità:

$$T = \frac{2}{\left(g \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho}\right) \left(\frac{C_d}{S}\right) \left(\frac{z}{D_i}\right) U_{max}\right)} \quad (2.11)$$

dove :  $T$  è il periodo dell'onda,  $\rho_s$  è la densità del masso,  $\rho_w$  la densità dell'acqua,  $C_d$  il coefficiente di drag,  $S$  la pendenza della spiaggia verso il mare,  $z$  è la quota della posizione finale del masso,  $D_i$  il diametro del masso trasportato e  $U_{max}$  la velocità massima dell'onda. Dall'analisi di questo, è possibile risalire al periodo e quindi al tipo di evento (16).

Nonostante ciò non esiste ancora un metodo univoco per la distinzione tra un masso trasportato da uno tsunami e un altro trasportato da un evento marino di diversa origine di estrema energia.

### 3. Modellistica fisica

Nel campo della modellazione fisica, si definisce: ‘prototipo’ il problema reale in esame e; ‘modello’ una riproduzione del prototipo, in scala ridotta, adeguata all’attuazione dello studio sperimentale del problema. A tal fine è necessario che il modello sia realizzato in ‘similitudine’ con il prototipo. La condizione ideale per la realizzazione di un modello fisico in dimensioni ridotte sarebbe la possibilità di riuscire a riprodurre con scale ben definite tutte le grandezze che governano il fenomeno in esame, laddove per la scala di riproduzione di una grandezza si intende il rapporto tra il valore della stessa nel prototipo e nel modello. Nella realizzazione del modello dovranno essere riprodotte adeguatamente le geometrie, le forme e i materiali.

Tuttavia, in idrodinamica, è abbastanza difficile realizzare modelli in completa similitudine con il prototipo, pertanto è necessario individuare le grandezze da cui dipende principalmente il fenomeno oggetto di studio, così da poterle riprodurre nel modello. In tal modo, però, alcune grandezze ritenute meno significative vengono distorte e, di conseguenza, che bisogna valutare attentamente.

Per capire come scalare il modello si cerca di imporre l’uguaglianza tra le leggi che governano il fenomeno nel prototipo, ricavando quindi le scale delle diverse grandezze; Questa analisi fu introdotta per la prima volta da John William Strutt – Lord Rayleigh. Con tale tecnica si determinano dei numeri indice, ossia delle grandezze adimensionali da cui dipende il fenomeno nel prototipo e che, al fine di rappresentare al meglio il fenomeno reale, devono esibire il medesimo valore nel modello. Tali parametri utilizzati per stabilire le leggi di scala, vengono in generale individuati a partire dalle relazioni che intercorrono tra le forze coinvolte nel fenomeno in studio.

#### 3.1.1 Progettazione di un modello fisico

Nella progettazione di un modello fisico relativo ad un fenomeno reale la fase più importante risulta essere l’analisi dello stesso, ossia l’individuazione di:

- Leggi analitiche o empiriche che lo descrivono,
- Grandezze geometriche e fisiche che intervengono,
- Geometrie e forme degli elementi presenti,

- Materiali impiegabili.

L'analisi dimensionale si esegue sempre quando si applica una similitudine in scala.

La seconda fase della progettazione di un modello consiste nella definizione delle scale geometriche  $N_x, N_y, N_z$  rispettivamente lungo le direzioni  $x, y, z$ . Normalmente esse sono imposte uguali tra di loro, ossia:

$$N_x = N_y = N_z = N_l \quad (3.1)$$

La determinazione di  $N_l$  dipende dalle dimensioni del prototipo e dagli spazi e dalle attrezzature a disposizione. La condizione ideale sarebbe  $N_l = 1$  ossia, il modello di dimensioni uguali al prototipo. Ovviamente, la scala di riduzione  $N_l$  del modello gioca un ruolo fondamentale; infatti, al diminuire di questa si riducono gli effetti scala, da cui si deduce la necessità di avere a disposizione apparati sperimentali di adeguate dimensioni.

### 3.1.2 La modellistica fisica nell'idraulica marittima

La gran parte dei fenomeni che interessano l'idraulica marittima dipende principalmente:

- Dall'inerzia, quindi per modellare al meglio i fenomeni inerziali si utilizza la similitudine di Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gd}} \quad (3.2)$$

dove  $V$  e  $d$  sono rispettivamente una velocità e una dimensione geometrica caratteristiche del fenomeno. Negli esperimenti condotti  $d$  corrisponde all'altezza dell'onda e quindi il denominatore è dato dalla celerità dell'onda, dato che la celerità delle perturbazioni in una corrente con profondità  $h$  è data da  $c = \sqrt{gh}$ . Questo rapporto può essere definito come il rapporto tra le forze d'inerzia del corpo e le forze gravitazionali. Il numero di Froude interessa i problemi con superfici libere.

- Dalla tensione superficiale  $s$ , e quindi dal numero di Weber:

$$We = \frac{V^2 \rho d}{s} \quad (3.3)$$

dove  $\rho$  è la densità del fluido,  $V$  e  $d$  sono rispettivamente una velocità e una dimensione geometrica caratteristiche del fenomeno,

- Dalla viscosità  $\mu$  rappresentata dal numero di Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (3.4)$$

dove  $V$  e  $d$  sono rispettivamente una velocità e una dimensione geometrica caratteristiche del fenomeno. E' di importanza generale in tutti i problemi fluidodinamici in quanto determina la transizione laminare-turbolenta.

- Dalle direzione del moto ondoso rispetto alla linea di costa,
- Dalla batimetria della spiaggia

Seguendo l'approccio dell'analisi dimensionale, l'analogia completa tra modello e prototipo si verifica nel momento in cui, oltre alla similitudine geometrica, della forma e dei materiali, si verificano anche quella cinematica e dinamica. Pertanto, per ottenere l'analogia completa si deve dimostrare l'uguaglianza nel prototipo e nel modello:

$$Fr_p = Fr_m \quad (3.5)$$

$$We_m = We_m \quad (3.6)$$

$$Re_p = Re_m \quad (3.7)$$

Nella pratica sperimentale, tuttavia, si può facilmente dimostrare che il contemporaneo verificarsi di queste tre condizioni non è possibile, se non nel caso in cui nel modello si utilizzasse un fluido diverso da quello del prototipo.

Nei fenomeni dell'idraulica marittima, le grandezze più importanti che entrano in gioco sono le forze inerziali, la quale con l'analisi dimensionale, sono rappresentate dal numero di Froude. Il numero di Froude infatti si riferisce a problemi che trattano superfici libere. I moti a superficie libera essendo principalmente turbolenti e governati dalla inerzia sono meglio rappresentabili tramite la similitudine di Froude

Imponendo l'uguaglianza del numero di Froude nel prototipo e nel modello si ricavano le scale delle grandezze cinematiche, come ad esempio la velocità, e infine, scelti i materiali, si ricavano le scale delle grandezze dinamiche, come ad esempio le forze. Nella fattispecie, gli effetti scala nei modelli basati sulla similitudine di Froude nascono



dall'assunto che la gravità è la forza predominante e che le altre forze si possano ritenere secondarie.

Nel caso del moto ondoso, una volta assunta l'analogia di Froude resta solo da valutare l'effetto dovuto alla non conservazione del numero di Weber e di Reynolds. Infatti, per riprodurre in similitudine il moto ondoso, oltre alla condizione di conservazione del numero di Froude, è necessario non ridurre in maniera eccessiva le dimensioni del modello al fine di contenere gli effetti dovuti alla tensione superficiale, in quanto questi influenzano sia l'evoluzione del moto ondoso che le caratteristiche del frangimento. Tale effetto scala si potrebbe eliminare se fosse possibile imporre nel modello anche il rispetto del numero di Reynolds. Ciò non è possibile. Questo implica che, adottando l'analogia di Froude, ci sia da attendersi un effetto di scala dovuto alla mancata riproduzione del numero di Reynolds. A fronte dell'impossibilità di realizzare modelli che conservino contemporaneamente  $Fr$  e  $Re$  (trascurando di considerare altre grandezze pure influenti nel fenomeno), le ricerche più recenti sono state indirizzate verso il tentativo di individuare ulteriori condizioni di scala rappresentative del trasporto solido da affiancare all'analogia idraulica di Froude. Queste condizioni, interpretano le modalità di trasporto mediante grandezze caratteristiche dello stato ondoso in acque profonde (ad esempio altezza d'onda  $H$  e lunghezza  $L$  a largo) e sedimentologiche (ad esempio il diametro  $D$  e/o la velocità di caduta dei sedimenti in acqua ferma  $w$ ).

In generale, i numeri di Reynolds caratteristici delle correnti sono molto elevati, così che spesso i fenomeni reali non dipendono da questo numero. Gli effetti di  $Re$  possono invece risultare significativi su scale ridotte. Per questo motivo la similitudine rispetto  $Re$ , valida nella realtà, può non essere valida nel modello i cui risultati non sono pertanto paragonabili a quelli del prototipo.

## 4. Stato dell'arte

In numerosi studi riguardanti il rischio di tsunami si cerca di stimare la magnitudine di maremoti avvenuti in passato partendo dall'analisi dei loro depositi, includendo anche i massi rocciosi costieri, in mancanza di precise informazioni al riguardo. Molti fattori influenzano questa analisi come ad esempio le modalità di trasporto, la distanza di trasporto, le proprietà fisiche e geometriche dei megaclasti, la forza idraulica associata agli tsunami e la topografia. Quest'ultima è un fattore molto importante che influisce in maniera significativa sulle modalità di propagazione dell'onda di tsunami. Ad esempio, a seconda dei maremoti la presenza di dune sulla riva può creare un effetto di dissipazione della potenza dell'onda, fungendo quindi da barriera naturale per la protezione dei territori più interni.

Sono stati condotti molti studi per cercare di descrivere il moto dei massi e quindi per risalire alla magnitudine degli tsunami passati.

In questo elaborato sono stati considerati gli studi condotti da Nott, Nandasena, Benner e Paris, nei quali sono state calcolate l'altezza e le velocità minime dell'onda di maremoto necessarie a provocare lo spostamento dei massi, per effettuare un confronto con i risultati ottenuti dagli esperimenti condotti nel laboratorio di idraulica di Bologna.

Jonathan Nott fu il primo a sviluppare delle equazioni idrodinamiche, in conformità a uno studio teorico, per determinare l'altezza e la velocità minima dell'onda necessaria a iniziare il trasporto di massi costieri in funzione delle rispettive condizioni iniziali (immersi, parzialmente sommersi o posti sulla spiaggia). In seguito, queste relazioni furono riviste da altri studiosi come ad esempio Nandasena e Benner. Quest'ultimo, sempre basandosi su studi teorici, migliorò le equazioni di Nott riguardo alla stima della minima altezza del flusso e propose, come fece anche Paris, una soluzione alternativa per il calcolo della minima velocità d'onda.

Anche Nandasena cercò di migliorare le relazioni proposte da Nott riguardo al calcolo della velocità minima, basandosi su esperimenti condotti in laboratorio volti alla calibrazione di un modello per la risoluzione delle relative equazioni idrodinamiche e la descrizione del trasporto dei massi.

Infine, l'ultimo studio sperimentale considerato in questo elaborato riguarda quello condotto da Fumihiko Imamura nel quale sviluppò un modello bidimensionale per descrivere le differenti modalità di spostamento dei blocchi.

#### 4.1 Studi teorici condotti da Nott, Benner, Nandasena e Paris

Come già citato in precedenza, Jonathan Nott elaborò delle equazioni idrodinamiche che si trovano alla base di quasi tutti gli studi seguenti riguardanti il moto dei massi costieri. Queste relazioni correlano le forze agenti sui clasti, al passaggio dell'onda di tsunami, con le relative altezze e velocità d'onda minime necessarie ad iniziare il moto dei blocchi. In questo modo è possibile risalire alla magnitudine dell'onda di maremoto.

Mediante tre differenti approcci sviluppati nel 2002, Nott è riuscito ad analizzare l'equilibrio delle forze agenti sui massi nelle tre condizioni di assetto iniziale del blocco:

- immerso completamente in acqua,
- posizionato sulla costa e non immerso,
- incastrato nella scogliera.

Le forze che agiscono sui massi sono la forza peso, di drag, di Inerzia, di lift e la forza di attrito. Le relazioni utilizzate, per calcolarne il valore, sono le stesse che sono state riportate in precedenza nel capitolo 2.5. Da notare che i coefficienti utilizzati variano in funzione dello studio condotto. Nella Tabella 2 del capitolo 4.3.1: sono riportati i coefficienti utilizzati da Nott.

Da ciò si può stabilire che lo spostamento del clasto, nel caso di posizione iniziale completamente immersa in acqua, inizierà quando la somma della forza di drag  $F_d$  e della forza di lift  $F_l$  sarà maggiore o uguale alla forza resistente  $F_r$ :

$$F_d + F_l \geq F_r \quad (4.1)$$

Per masso subaereo si avrà l'inizio del moto quando la somma delle forze di drag, lift e inerzia sarà superiore o uguale alla forza resistente:

$$F_d + F_l + F_m \geq F_r \quad (4.2)$$

E per masso incastrato nella scogliera si avrà moto quando la forza di Lift sarà maggiore o uguale alla forza resistente:

$$F_l \geq F_r \quad (4.3)$$

Attraverso queste disuguaglianze Nott è stato in grado di ricavare le relazioni 4.4, 4.5 e 4.6 per il calcolo di velocità e altezza minima d'onda nei tre casi studiati:

Blocco immerso in acqua

Nel caso di blocco immerso in acqua la velocità minima necessaria per muovere un clasto è data da:

$$u^2 \geq \frac{2(\rho_s - \rho_w)ag}{c_d \left(\frac{ac}{b^2}\right) + C_L} \quad (4.4)$$

dove  $\rho_s$ ,  $\rho_w$  sono le relative densità dell'acqua e del blocco, a,b,c sono gli assi del blocco,  $C_L$  è il coefficiente di lift e g è l'accelerazione di gravità,  $u = \delta(gH)^{0.5}$  dove H è l'altezza dell'onda e  $\delta$  è un parametro che descrive l'onda.

L'altezza minima necessaria ad iniziarne il moto è stata ricavata mediante l'utilizzo della seguente espressione:

$$H_t \geq \frac{0,25(\rho_s - \rho_w)2a}{(c_d \left(\frac{ac}{b^2}\right) + C_L)} \quad (4.5)$$

dove  $\delta$  viene considerato pari a 4.

Blocco non immerso

Nelle relazioni (4.6) e (4.7), invece, sono riportate le relazioni che descrivono la velocità minima e l'altezza minima per uno scenario di masso non sommerso:

$$u^2 \geq \frac{2[(\rho_s - \rho_w)ag - 2c_m \frac{a}{b} \frac{u}{g}]}{c_d \left(\frac{ac}{b^2}\right) + c_l} \quad (4.6)$$

dove  $u = \delta(gH)^2$

$$H_t \geq \frac{0.25(\rho_s - \rho_w)[(2a - c_m \left(\frac{a}{b}\right) \left(\frac{u}{g}\right)]}{c_d \left(\frac{ac}{b^2}\right) + c_l} \quad (4.7)$$

In questa situazione, a differenza dei casi precedenti, viene considerata anche la forza d'inerzia. Il coefficiente di massa viene determinato empiricamente utilizzando una

relazione dove viene ipotizzato come questo coefficiente dipenda dalla relativa profondità dell'acqua e aumenti drasticamente quando il blocco è investito dall'onda. Una volta che l'oggetto viene sommerso dall'acqua il coefficiente d'inerzia non è più importante ed, infatti, nello scenario di blocco sommerso non viene considerato.

L'accelerazione  $\ddot{u}$  che viene riportata nella formula è quella riferita al primo impatto dell'onda sul blocco. Dopo questo istante l'accelerazione diminuisce rapidamente fino a diventare trascurabile una volta che il fronte d'onda è passato. In questo caso, l'accelerazione ha una scarsa importanza perché variazioni di questo valore danno un piccolo effetto sulla forza totale applicata sul blocco. Per questo motivo viene considerato un valore unitario.

Le equazioni di Nott utilizzate per stimare l'altezza e la velocità minima necessarie per iniziare il trasporto dei massi sono state riviste da Nandasena e Benner. Entrambi hanno eseguito un confronto tra i risultati ottenuti prima e in seguito alle modifiche apportate alle formule originarie.

Benner si accorse di alcune incongruenze nelle relazioni utilizzate da Nott, come ad esempio l'utilizzo della forza d'inerzia senza il relativo braccio nell'equazione dell'equilibrio dei momenti delle forze applicate ad un masso. In questo caso, infatti, è necessario aggiungere il braccio della forza che è dato da  $c/2$ . Dove  $c$  è inteso come l'asse verticale della superficie del volumetto perpendicolare al flusso della corrente. In seguito sono riportate le relazioni utilizzate per ottenere la forza d'inerzia, Eq. (4.8), e per studiare l'equilibrio dei momenti di Nott, (4.9):

$$F_m = \rho_w C_m (abc) \ddot{u} \quad (4.8)$$

dove:  $C_m$  è il coefficiente d'inerzia,  $\rho$  è la densità dell'acqua,  $\ddot{u}$  è l'accelerazione della corrente e a,b,c le dimensioni del masso.

$$M_d + M_l + F_m \geq M_r \quad (4.9)$$

dove:  $M_d$  è il momento della forza di drag,  $M_l$  è il momento della forza di Lift,  $M_r$  è il momento della forza di attrito e  $F_m$  è la forza d'inerzia.

La Fig.10 riporta l'equilibrio delle forze, utilizzato da Benner, nel caso di blocco immerso completamente in acqua e blocco non immerso. Il masso viene considerato come un prisma rettangolare e l'area frontale è data dal prodotto tra  $ac$  dove  $c$  è l'altezza della superficie frontale ortogonale al flusso e  $a$  è la larghezza:

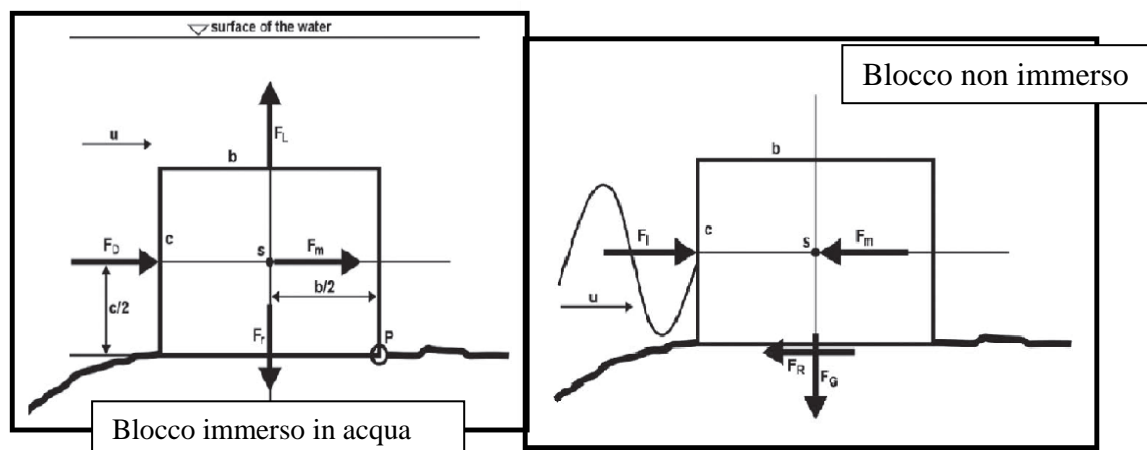


Figura 10: forze agenti su un blocco immerso in acqua e uno posizionato sulla spiaggia.  $F_I$  è la forza d'impatto che genera il moto,  $F_m$  la forza d'inerzia,  $F_L$  la forza di lift,  $F_G$  la forza peso,  $F_R$  la forza d'attrito,  $u$  è la velocità del flusso e ' $a, b, c$ ' sono rispettivamente la larghezza, l'altezza e lo spessore del blocco. (17)

Un'altra discrepanza che Benner analizzò riguarda la forza di sollevamento (lift) introdotta da Nott. Nott, infatti, considera erroneamente come area su cui agisce la forza di lift quella perpendicolare al flusso d'acqua e quindi investita dall'onda data dal prodotto tra  $ac$ . In realtà, la superficie considerata è quella superiore del blocco. Stabilendo per convenzione che  $a, b, c$  rappresentano rispettivamente la larghezza, altezza e spessore del blocco, la superficie superiore è data da  $ab$ , area superiore del blocco, invece che da  $bc$ , che corrisponde alla superficie laterale del prisma. Questa discrepanza è rilevante nel calcolo dell'altezza minima e della velocità necessaria ad iniziare il moto di un megaclasto in quanto, nella realtà, ogni forza fisica dipende principalmente dalle dimensioni del corpo a cui è applicata. Infatti, la forza di lift cresce proporzionalmente con le dimensioni del clasto allo stesso modo della forza di Drag. La forza di sollevamento secondo Nott viene riportata nell' Eq. (4.10), e secondo Benner, nell' Eq. (4.11), mentre l'Eq. (4.12) esprime la relazione per il calcolo dell'altezza minima riformulata da Benner:

$$F_L = 0.5\rho u^2(bc)C_L \frac{b}{2} \quad (4.10)$$

dove  $bc$  è l'area che verrà corretta da Benner in quanto l'area superiore del masso è espressa da  $ab$ .

$$F_L = 0.5\rho u^2(ab)C_L \frac{b}{2} \quad (4.11)$$

dove:  $ab$  corrisponde alla superficie superiore del masso

$$H \geq \frac{0.5bc \left[ \frac{b(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} - \frac{\rho_s c_m \ddot{u}}{\rho_w g} \right]}{c_D c^2 + c_L b^2} \quad (4.12)$$

Benner ha anche proposto una relazione per il calcolo della velocità minima per il movimento del masso in funzione della densità del blocco, delle dimensioni e dell'attrito. Ricordando che, il moto del masso costiero inizia quando la velocità aumenta fino ad un valore superiore a quello che garantisce l'uguaglianza tra la forza resistente e quella a favore del moto, si può arrivare ad ottenere la relazione per la velocità minima proposta da Benner, (Eq. 4.13):

$$u = \sqrt{\{bg\mu (\rho_b/\rho_w)\}} \quad (4.13)$$

In questo modo per ogni valore di densità del blocco e coefficiente d'attrito è possibile calcolare il limite di velocità alla quale inizia lo spostamento del volumetto. (17)

Un altro studio molto importante riguardante il moto dei massi costieri è stato condotto da N.A.K. Nandasena.

Nandasena elaborò delle equazioni fondamentali, basandosi sulle relazioni proposte da Nott, per descrivere la minima velocità dell'onda necessaria per iniziare il movimento di un blocco, prestando attenzione alle tre differenti condizioni iniziali, prima del passaggio dell'onda, proposte da Nott.

Per il suo studio, Nandasena considerò le forze agenti su massi rettangolari di varie dimensioni. Il terreno sul quale si trova il blocco è stato considerato impermeabile e non soggetto ad erosione.

Nel caso in esame  $ac$  corrisponde all'area frontale perpendicolare al flusso,  $ba$  all'area superiore e  $bc$  alla superficie laterale, come in Figura 11:

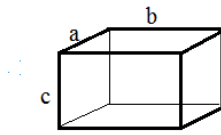


Figura 11: orientamento degli assi secondo Benner

Di seguito vengono riportate solo le relazioni che descrivono i momenti delle forze di drag, di lift e di inerzia che agiscono sui massi in quanto le forze sono state già descritte precedentemente :

- Momento della forza di drag

$$M = F_d \left( \frac{c}{2} \right) \quad (4.14)$$

dove  $F_d$  è la forza di drag e  $c$  la dimensione minore.

- Momento della forza di sollevamento:

$$M = F_l \left( \frac{b}{2} \right) \quad (4.15)$$

$F_l$  è la forza di lift e  $b$  la dimensione intermedia. Se l'altezza della corrente è inferiore all'altezza del blocco la forza di sollevamento (lift) viene considerata pari a zero.

- Momento della forza d'inerzia:

$$M = F_m \left( \frac{c}{2} \right) \quad (4.16)$$

$F_m$  è la forza d'inerzia

- la forza peso:

$$F_g = V(\rho_b - \rho)g \quad (4.17)$$

dove  $\rho_b$  è la densità del blocco;

- Momento della forza di attrito:

$$M = \frac{F_r(b \cos \vartheta + c \sin \vartheta)}{2} \quad (4.18)$$

Dove  $\vartheta$  è la pendenza del terreno alla posizione iniziale del blocco.



L'altezza d'onda considerata è superiore all'altezza del masso e la velocità della corrente è mediata in funzione della profondità.

Lo studio del moto, condotto da Nandasena, è stato effettuato analizzando i momenti delle forze descritte precedentemente, nei tre differenti assetti iniziali prima del passaggio dell'onda di tsunami. Nel caso di blocco non immerso in acqua il moto inizierà quando la somma dei momenti di inerzia, di drag e di lift è superiore al momento della forza resistente:

$$M_d + M_l + M_m \geq M_r \quad (4.19)$$

Nella situazione di masso immerso in acqua invece il moto inizierà quando la somma dei momenti della forza di drag e di lift è maggiore o uguale al momento della forza resistente:

$$M_d + M_l \geq M_r \quad (4.20)$$

Nell' Eq. (4.21) si esprime la minima velocità necessaria, proposta da Nandasena, per iniziare il moto di un masso immerso in acqua che corrisponde a quella per masso non immerso (18):

$$u^2 \geq \frac{2\left(\frac{\rho_b}{\rho_w}-1\right)gc\left(\cos\vartheta+\left(\frac{c}{b}\right)\sin\vartheta\right)}{C_d(c^2/b^2)+C_l} \quad (4.21)$$

Il momento della forza d'inerzia è stato omissso nelle equazioni proposte da Nandasena per i massi non immersi in acqua in quanto l'effetto della forza d'inerzia è relativamente piccolo rispetto a quello della forza di drag durante la propagazione di un'onda di tsunami ed il relativo trasporto del blocco. Per questo motivo, la velocità di trasporto di megaclasti immersi in acqua e non immersi viene descritta dalla stessa equazione.

Nandasena ha anche analizzato le differenti modalità di spostamento dei massi costieri in funzione della velocità. Nell'Eq.(4.22) vengono presentate le relazioni che descrivono le minime velocità necessarie per iniziare il trasporto di un blocco rispettivamente per moto radente, per rotolamento e a salti (18) :

$$u^2 \geq \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2 \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g c (\mu \cos \vartheta + \sin \vartheta)}{C_d \left( \frac{c}{b} \right) + \mu_s C_L} \\ \frac{2 \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g c \left( \cos \vartheta + \left( \frac{c}{b} \right) \sin \vartheta \right)}{C_d \left( \frac{c^2}{b^2} \right) + C_L} \\ \frac{2 \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g c \cos \vartheta}{C_L} \end{array} \right.$$

Dove:  $a, b, c$  sono gli assi del blocco. (4.22)

L'ultimo studio teorico che è stato considerato in questo elaborato riguarda quello di Raphael Paris, nel 2009, che, partendo dall'analisi dei megaclasti depositati dallo tsunami del 2004 a Lhok Nga, a Sumatra in Indonesia, ha elaborato una relazione per il calcolo della minima velocità necessaria al trasporto di un masso.

Le forze applicate su un megaclasto, al momento del passaggio di un'onda di maremoto, sono le stesse utilizzate da Nott precedentemente. In questo modo, risolvendo l'equilibrio di queste forze, è stato possibile ricavare l'Eq. (4.23), per il calcolo della velocità, indipendentemente dall'assetto iniziale del blocco prima del passaggio dell'onda.

$$u = \sqrt{\left( \frac{2mg\mu}{C_d A_n \rho_w} \right)} \quad (4.23)$$

Dove:  $u$  è la minima velocità,  $m$  è la massa del masso,  $g$  è l'accelerazione gravitazionale,  $\mu$  è il coefficiente di attrito,  $C_d$  è il coefficiente di drag,  $A_n$  è l'area del blocco perpendicolare alla direzione di propagazione della corrente,  $\rho_w$  è la densità dell'acqua.

I valori corrispondenti al coefficiente di drag e di attrito utilizzati sono rispettivamente 1.95 e 0.7. (19)

## 4.2 Studi sperimentali condotti da Nandasena e Imamura

Nel 2012, Nandasena ha elaborato e validato un modello numerico per descrivere le varie modalità di trasporto dei massi rocciosi in seguito ad esperimenti condotti presso il laboratorio di ingegneria idraulica della Saitama University

Anche in questo studio sono state analizzate le forze primarie e i loro momenti agenti sul cubo: forza di drag, forza di lift e forza di gravità mentre la forza d'inerzia è stata trascurata. E' stata inoltre introdotta un'altra forza chiamata forza resistente di drag che agisce sul volumetto perpendicolarmente alla rampa. Il moto del fluido viene considerato unicamente nella direzione verticale. (20)

L'esperimento è stato condotto in un canale idraulico di 18 metri di lunghezza, 0,4 metri di larghezza, 0,75 metri di altezza. Il fondo del canale è in legno e ha un gradiente di 1:20. L'onda di tsunami è stata generata attraverso il metodo del "Dam Break". Questo va a simulare la generazione di un'onda a causa ad esempio del cedimento di una diga o di una frana. In prossimità di uno dei due estremi del canale è situato una serbatoio, per contenere il volume d'acqua richiesto per l'esperimento, il quale è delimitato da una paratoia che una volta sollevato bruscamente provoca la generazione dell'onda di tsunami lungo il canale. I tiranti d'acqua utilizzati per la generazione delle onde sono rispettivamente di 30,25,20 e 15 centimetri. Lungo il canale sono posizionate anche delle sonde per la misura dell'altezza del pelo libero e dei misuratori di velocità dell'onda.

I blocchi utilizzati sono fatti in cemento, per simulare il comportamento di massi in corallo poroso, con densità di 2760, 2180 e 1800 kg/m<sup>3</sup> e di forma cubica e rettangolare. I blocchi sono stati posizionati all'interno del canale e ne si sono analizzate le differenti modalità di trasporto al passaggio dell'onda.

Per la verifica della similitudine delle caratteristiche dell'onda di tsunami generata tramite dam break in laboratorio con una reale onda di tsunami, sono stati ricavati i numeri di Reynolds e Freud, corrispondenti alle prove effettuate, che hanno valori rispettivamente in un range tra 10<sup>4</sup> e 10<sup>5</sup> e tra 0,7 e 1. Solo il fronte d'onda è considerato avere un numero di Freud maggiore a 1 e quindi un regime di corrente veloce.

Dalle prove effettuate con i blocchi è stato possibile studiare le varie modalità di trasporto dei massi da parte del flusso d'acqua e anche in funzione dell'attrito. Raramente è stato possibile osservare la stessa massima distanza di trasporto per un singolo blocco durante le tre ripetizioni effettuate per ciascuna prova.

Infine, un altro studio sperimentale importante da ricordare è quello che è stato condotto da Fumihiko Imamura al Disaster Control Research Center della Tohoku University in

Giappone. Attraverso degli esperimenti in un canale a cielo aperto, Imamura ha implementato un modello bidimensionale per studiare le modalità di trasporto dei blocchi e le relative distanze di trasporto (21).

Il setting degli esperimenti consiste in un canale di 10 metri di lunghezza e 30 centimetri di larghezza con un fondo orizzontale. A 300 centimetri dall'estremità a monte è stata posizionata una paratoia che serve per trattenere l'acqua e agisce come un generatore d'onde. Nel canale è stato inoltre posizionato un piano inclinato, ad una distanza di circa 250 metri dalla paratoia, che serve per simulare l'effetto della costa sulla propagazione di un'onda di tsunami. Con l'apertura della paratoia viene generata un'onda che si propaga lungo il canale e sulla rampa fino ad arrivare ad una distanza massima prima dell'inversione del moto. In questo caso si possono misurare velocità opposte a quelle del fronte d'onda iniziale. La superficie della rampa è liscia, impermeabile con un gradiente di 1:10. Anche il fondo del canale è liscio ed impermeabile.

Le altezze d'acqua iniziali presenti nel serbatoio sono: 15,20,25,30 centimetri.

I blocchi utilizzati sono di forma cubica e rettangolare in corallo e silicato e sono posizionati all'inizio del piano inclinato. I volumetti sono stati posizionati con gli assi in direzioni variabili rispetto alla corrente per studiare le varie modalità di trasporto in funzione della posizione iniziale. Le dimensioni sono variabili con densità comprese tra 1,55 e 2,71 g/cm<sup>3</sup>. Dagli esperimenti è stato osservato che il moto principale dei blocchi cubici è a balzi e rotolamento mentre è di moto radente solo nella fase di inversione del moto quando l'onda torna indietro.

La direzione degli assi principali del volumetto rispetto alla direzione di propagazione dell'onda è fondamentale soprattutto per i blocchi rettangolari.

In Figura 12 viene riportato un esempio schematico delle diverse modalità di movimento dei blocchi rettangolari a seconda dell'orientamento degli assi rispetto al fronte d'onda:

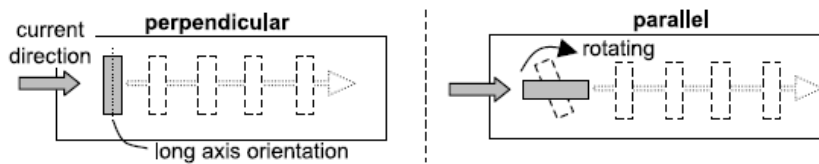


Figura 12: differenti modalità di trasporto del blocco rettangolare in funzione dell'orientamento iniziale dei suoi assi (21)

I coefficienti di attrito statico e dinamico utilizzati in questi esperimenti sono variabili.

Le forze esterne che agiscono sul blocco sono la forza idraulica  $F_m$ , la forza di attrito  $F_b$  e la componente della forza gravitazionale lungo la rampa  $F_g$ , Figura 13. La forza idraulica è la forza che la corrente esercita sul blocco e viene ottenuta dalla somma della forza di inerzia e di quella di drag. Dove il coefficiente di drag viene considerato costante pari a 1.05 per valori di Reynolds inferiori a  $10^4$ .

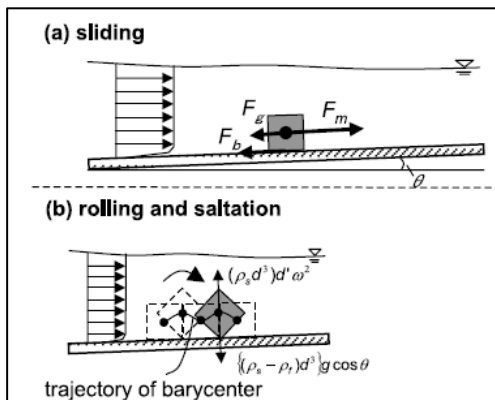


Figura 13: forze applicate ad un blocco nel caso di moto per moto radente (sliding) e nel caso di moto per rotolamento e a rimbalzi (21)

Il modello di Imamura è stato applicato allo tsunami che si è verificato il 24 Aprile 1771 nei pressi delle coste delle isole di Yaeyama e Miyako in Giappone. Questo tsunami ha ucciso più di 12.000 persone e ha raggiunto run up di circa 30 metri, trasportando più di 300 massi in corallo. Per questi blocchi è stato difficile identificare la loro posizione iniziale.

Per validare il modello sono state utilizzate le equazioni riguardanti la teoria delle acque poco profonde e le equazioni non lineari per simulare l'effetto dell'onda lungo la zona costiera e l'area inondata (con una stima di circa 800 metri dalla costa).

I massi considerati sono stati trasportati nell'entroterra dalla prima e dalla seconda onda di tsunami ed in seguito riportati verso la costa dall'onda di ritorno. La traiettoria di moto del blocco osservata risultava variabile a seconda dell'orientazione iniziale dei clasti prima del trasporto. Basandosi sui calcoli, sono state ottenute velocità della corrente comprese tra i 12.5 m/s e i 15 m/s con una forza idraulica di circa  $1,16 \times 10^6$  N e una velocità minima di trasporto dei massi di circa 2m/s. La stima di questi valori è molto importante per lo studio del comportamento dei grandi tsunami avvenuti in passato. (21)

### **4.3 Confronto tra altezze e velocità d'onda minime**

Nei paragrafi seguenti sono stati confrontati i risultati ottenuti, utilizzando le relazioni proposte in letteratura, riguardanti il calcolo dell'altezza e delle velocità minime d'onda necessarie a causare l'inizio dello spostamento dei massi.

#### **4.3.1 Confronto altezze minime**

Nella Figura 14 è stato riportato un confronto tra l'andamento delle minime altezze d'onda necessarie al trasporto di un masso roccioso secondo Benner (17) e Nott (22). Il confronto sulle altezze è stato eseguito solamente in conformità a questi ultimi studi in quanto Nandasena e Paris hanno proposto delle relazioni solo per il calcolo della minima velocità dell'onda. Per quanto riguarda le relazioni di Nott, sono state utilizzate quelle proposte nel 2002, le quali tengono conto della posizione iniziale dei massi.

I clasti studiati sono quelli che sono stati ritrovati lungo le coste di Oak Beach in Australia (22). Le densità dei blocchi sono tutte costanti e sono pari a  $2700 \text{ kg/m}^3$ . Le dimensioni dei blocchi invece sono variabili e vengono riportate nella Tabella 1 con le relative velocità ricavate. Da ricordare che Nott ha elaborato due differenti approcci per il calcolo della minima altezza in funzione della posizione iniziale del masso prima del passaggio dell'onda, al contrario Benner utilizza un'unica relazione indipendentemente dall'assetto iniziale.

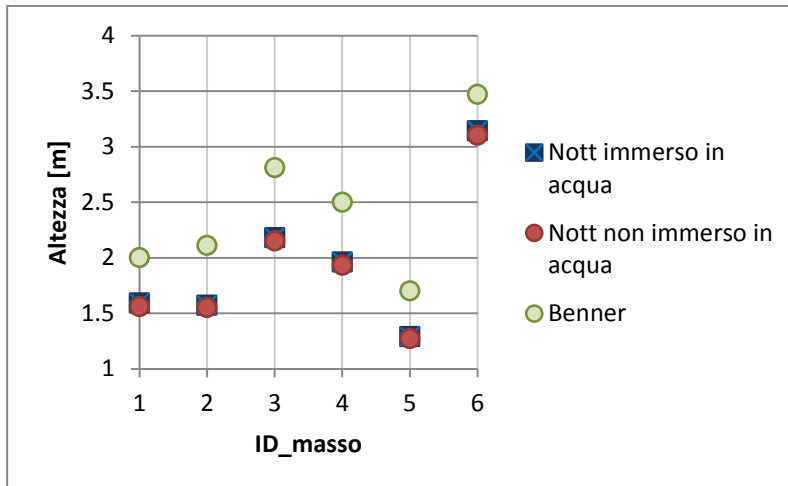


Figura 14: andamento altezze calcolate da Nott e Benner

Tabella 1: valori di altezze secondo Nott e Benner con le relative dimensioni dei clasti

ID	a [m]	b [m]	c [m]	Nott blocco non immerso [m/s]	Nott blocco immerso in acqua [m/s]	Benner [m/s]
1	8,4	3	2,3	1.56	1.59	2.0
2	4.2	3.8	3.6	1.55	1.57	2.11
3	5.3	3.9	2.7	2.15	2.18	2.81
4	4.3	3.5	2.4	1.93	1.96	2.5
5	3.4	3.2	3.1	1.27	1.29	1.7
6	8.9	4	2	3.10	3.14	3.47

Dove  $a, b, c$  sono rispettivamente le tre dimensioni del masso (larghezza, altezza, spessore).

Nella Tabella 2 sono riportati invece i valori dei coefficienti adimensionali utilizzati da Nott e Benner:

Tabella 2: valori dei coefficienti utilizzati da Nott e Benner nelle equazioni idrodinamiche

	Nott	Benner
coefficiente di lift ( $C_L$ )	0.178	0.15
coefficiente di massa ( $C_m$ )	1	1
coefficiente di drag ( $C_D$ )	2	1.2

Come si può osservare dai dati, le tre differenti metodologie di calcolo permettono di ottenere risultati abbastanza simili. Le differenze dipendono principalmente dall'utilizzo di differenti valori del coefficiente di drag e di lift.

I risultati ottenuti, applicando le relazioni proposte da Nott, sono molto simili tra loro in quanto differiscono solo per il termine d'inerzia, presente nel caso di massa non immerso in acqua. In seguito questo termine verrà trascurato definitivamente da Nandasena in quanto il contributo apportato è minimo. Al contrario, il coefficiente di lift viene sempre considerato anche quando il setting iniziale del megaclasto non è immerso in acqua.

Per quanto riguarda Benner, egli propone un'unica relazione che considera sia il termine d'inerzia che di lift per qualsiasi massa considerato.

#### 4.3.2 Confronto velocità minime

Scicchiato, invece, ha condotto un confronto sulle velocità minime necessarie a provocare l'inizio del moto dei massi campionati lungo le coste del mar Ionio utilizzando le relazioni proposte da Nandasena, Nott e in seguito anche da Benner. (23)

I massi sono stati ritrovati su pendii e terrazze situate tra i 3 e i 5 metri sopra al livello del mare, con pendenze inclinate verso il mare. Le densità considerate sono:  $2130 \text{ kg/m}^3$ ,  $2280 \text{ kg/m}^3$  e  $2590 \text{ kg/m}^3$ .

I relativi valori dei coefficienti adimensionali considerati sono riportati nella Tabella 3:

**Tabella 3: valori dei coefficienti adimensionali utilizzati da Nott e Nandasena**

	<b>Nott</b>	<b>Nandasena</b>
<b>Coefficiente di lift (<math>C_L</math>)</b>	0.178	0.178
<b>Coefficiente di massa (<math>C_m</math>)</b>	1	-
<b>Coefficiente di drag (<math>C_D</math>)</b>	2	1.92
<b>Coefficiente attrito statico (<math>\mu_S</math>)</b>	-	0.7
<b>Coefficiente attrito dinamico (<math>\mu_D</math>)</b>	-	0.6
<b>Inclinazione del fondale <math>\vartheta</math></b>	-	20



Nella Figura 15 sono riportati i valori delle velocità ottenute utilizzando le equazioni di Nott e Nandasena, nel caso di massi con posizione iniziale immersa in acqua. In appendice A sono riportati i valori corrispondenti alle dimensioni, alla densità e alle minime velocità ricavate dei clasti analizzati.

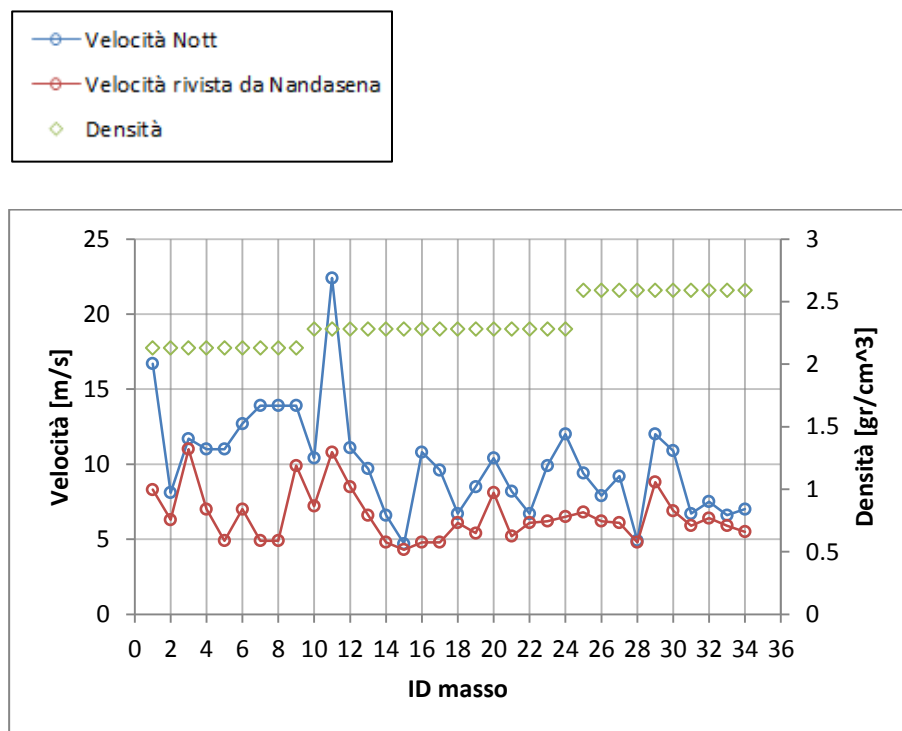


Figura 15: velocità secondo Nott e Nandasena e relative densità dei massi

Come si può osservare, in Figura 15, le velocità minime ottenute mediante la relazione di Nandasena (linea rossa) sono inferiori di circa il 56% rispetto a quelle ottenute mediante la relazione di Nott (18).

Le due relazioni utilizzate permettono di ottenere risultati differenti a causa delle diverse aree per il calcolo della forza di lift, dei valori del coefficiente di drag utilizzati e a causa dell'utilizzo, solamente nell'equazione di Nandasena, dell'angolo di inclinazione del fondale o della costa e dei coefficienti di attrito statico e dinamico. Quindi, i risultati ottenuti mediante quest'ultima relazione possono essere molto variabili a seconda dei valori di  $\theta$  e della combinazione di valori di attrito statico e dinamico utilizzati.

In un altro studio (18) sono state ottenute anche le velocità minime per un campione composto da 47 massi depositati lungo le coste dell'Islanda meridionale e occidentale in condizioni immerse, Figura 17, e non immerse, Figura 18, ad una distanza di deposito

compresa tra i 210 e 550 metri dal mare. Le densità utilizzate corrispondono ai valori: 2300 - 2400 – 2600 – 2700 kg/m<sup>3</sup> mentre le dimensioni sono riportate in appendice A.

In Figura 16 è riportata una raffigurazione del luogo dove sono stati ritrovati i massi:

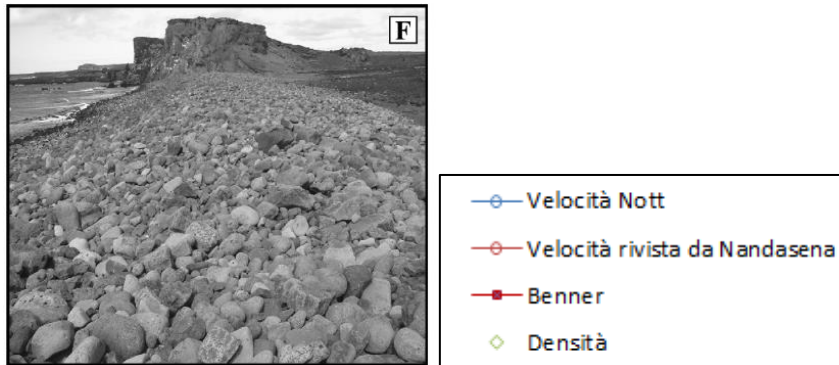


Figura 16: costa dell'Islanda nella penisola di Reykjanes (18)

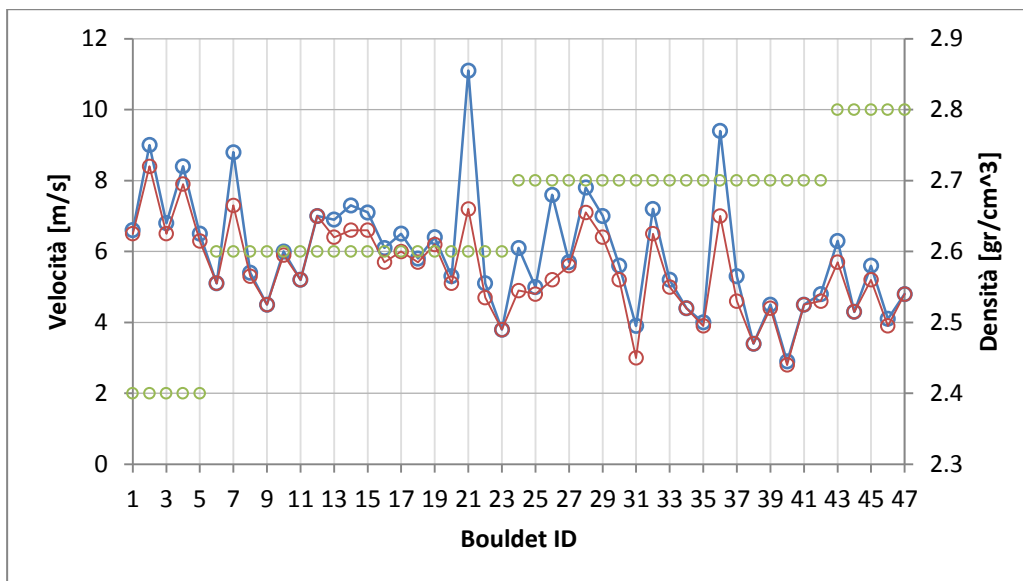


Figura 17: velocità secondo Nott e Nandasena per massi immersi in acqua

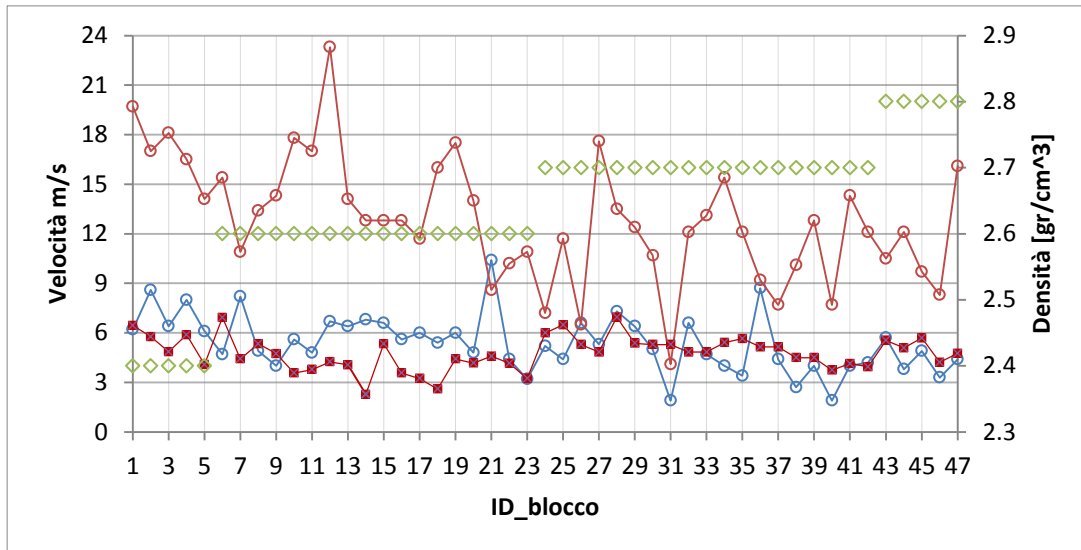


Figura 18: velocità secondo Nott , Nandasena e Benner per massi non immersi in acqua

Dai grafici si può osservare come le velocità ottenute, mediante le differenti relazioni, comportino notevoli differenze di risultati nel caso di massi non immersi e valori più simili nel caso di massi immersi in acqua. In quest'ultimo caso le differenze dipendono principalmente dal cambiamento di area di lift su cui agisce la forza di lift. Per massi subaerei invece, le discrepanze dipendono sostanzialmente dall'omissione, nel calcolo di Nandasena, della forza d'inerzia oltre che dai differenti valori dei coefficienti adimensionali riportati precedentemente.

Nella Figura 18 il confronto è stato eseguito non solo con le velocità di Nandasena e Nott ma anche introducendo le velocità calcolate utilizzando la relazione proposta da Benner. Come si può osservare, la relazione proposta da Benner consente di ottenere risultati molto più simili a quelli ottenuti mediante la relazione di Nott.

Infine, viene anche riportato un confronto tra le velocità ottenute tramite le relazioni di Benner, Paris e Nandasena. Il campione di massi analizzato è composto da 26 clasti depositati sulle coste di Cairns nell'Australia nord orientale. Le dimensioni dei blocchi sono variabili ma presentano tutti lo stesso valore di densità pari a  $2700 \text{ kg/m}^3$ . (18) Nella Figura 19 viene riportata una raffigurazione del luogo dove sono stati ritrovati i clasti:



Figura 19: costa formata principalmente da massi in carbonato cementato a Cairns (22)

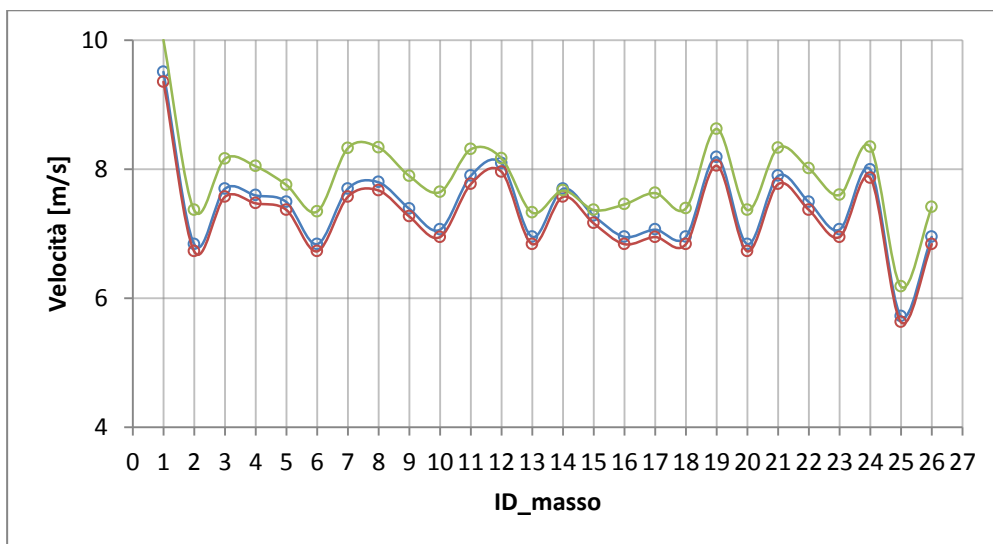
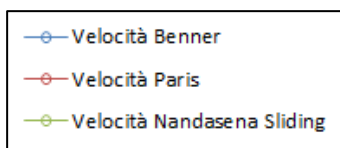


Figura 20: confronto velocità ottenute mediante le relazioni di Benner, Etienne, Nandasena e Paris

Come si può osservare dalla Figura 20, i valori di velocità ottenute da Benner, Paris e Nandasena sono molto simili tra di loro nonostante le relazioni utilizzate siano abbastanza differenti. Le relazioni utilizzate non si differenziano in funzione della posizione iniziale del masso prima del passaggio dell'onda.

Nella Tabella 4 sono riportati i valori dei coefficienti di drag utilizzati:

**Tabella 4: coefficienti di drag**

	<b>Nandasena</b>	<b>Benner</b>	<b>Paris</b>
<b>Coefficiente di drag (<math>C_D</math>)</b>	1.92	1.2	1.5

## **5. Esperimento in laboratorio**

### **5.1 Scopo degli esperimenti**

Gli esperimenti effettuati presso il laboratorio di Idraulica dell'università di Bologna, nel canale idraulico all'uopo predisposto, consentono di analizzare e determinare le minime altezze e velocità d'onda necessarie per iniziare il moto di blocchi prismatici posizionati su un piano inclinato lungo la direzione di propagazione del flusso.

Nel presente elaborato, i dati empirici ottenuti saranno confrontati con i risultati dei precedenti studi in modo da verificarne l'esattezza e la veridicità.

Inoltre, attraverso un modello semplificato, si cercherà di calibrare il coefficiente di drag per le varie prove con i differenti volumetti, per descrivere, il più verosimilmente possibile, la forza esercitata dall'onda su questi ultimi nella fase di inizio del moto. In pratica, si analizzerà il moto incipiente dei blocchi in funzione delle loro caratteristiche fisiche e dell'intensità del flusso d'acqua generato mediante dam break.

### **5.2 Descrizione dell'esperimento**

Ad una delle due estremità del canale idraulico è stato posizionato un serbatoio d'acqua delimitato da una paratoia mobile. Ad una distanza di circa 3 metri da quest'ultima è stato inserito un piano inclinato sopra il quale sono stati posizionati dei blocchi prismatici.

Attraverso l'apertura manuale della paratoia (il c.d. dam break) è stata generata un'onda lunga che si propaga lungo il canale e sulla rampa dove andrà ad impattare il blocco prismatico per poi proseguire fino ad arrivare ad una distanza massima (quando esaurisce l'energia) prima dell'inversione del moto.

Con il variare del volume d'acqua immesso nel serbatoio si generano onde con altezza e velocità differente, le quali – se di forza sufficiente - provocano l'inizio del moto dei volumetti.

### 5.3 Setting dell'esperimento

Il canale idraulico utilizzato per gli esperimenti ha una lunghezza di 11 metri e una larghezza di 0.5 metri. Le prove sono state condotte in similitudine di Froude 1:100. In questo caso il numero di Froude è il numero puro che si mantiene costante tra gli esperimenti ed il fenomeno.

Il fondo del canale è orizzontale, impermeabile, liscio ed è realizzato in acciaio, Figura 21.



Figura 21: vista dall'alto del fondo del canale

Nella Figura 22 inoltre, è possibile vedere una panoramica dell'intero canale:

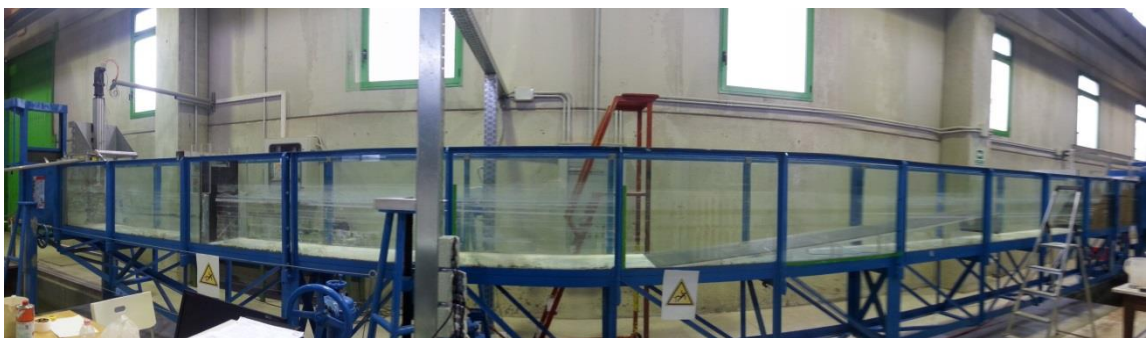


Figura 22: panoramica del canale: all'estremità sinistra della panoramica è posizionato il serbatoio dell'acqua e la paratoia mentre nella parte destra della figura si può vedere la rampa. In questa foto la camera oscura non era ancora stata realizzata.

Ad una estremità del canale è stato creato un serbatoio o vasca di contenimento, di lunghezza di 2 metri e larghezza di 0,5 metri delimitata, ad una estremità, dalla parete finale del canale e, all'altra estremità, da un paratoia mobile in plexiglass. Nella vasca, a seconda del tipo di prova che si vuole eseguire, verranno immagazzinati differenti

volumi d'acqua. Il sollevamento veloce, non automatizzato della paratoia, in 3-4 centesimi di secondo è il meccanismo che permette di generare onde lunghe con caratteristiche molto simili a quelle delle onde di tsunami. Questa modalità si chiama Dam Break.

Il Dam Break consiste in un improvviso cedimento o collasso di una diga o di una struttura idraulica di contenimento. Questo cedimento provoca il rilascio incontrollato di un volume d'acqua con conseguente formazione di un'onda di piena determinata dal violento deflusso delle acque verso valle. Per questo motivo, ogni bacino artificiale è soggetto a continuo e attento monitoraggio per la valutazione della stabilità della struttura, il controllo del flusso d'acqua nel fiume e per la mitigazione di possibili disastri futuri.

Il fenomeno del Dam Break è stato largamente studiato in passato attraverso numerose simulazioni numeriche e analitiche basate sulla teoria delle acque poco profonde e sulla risoluzione delle equazioni di Navier Stokes in 2D.

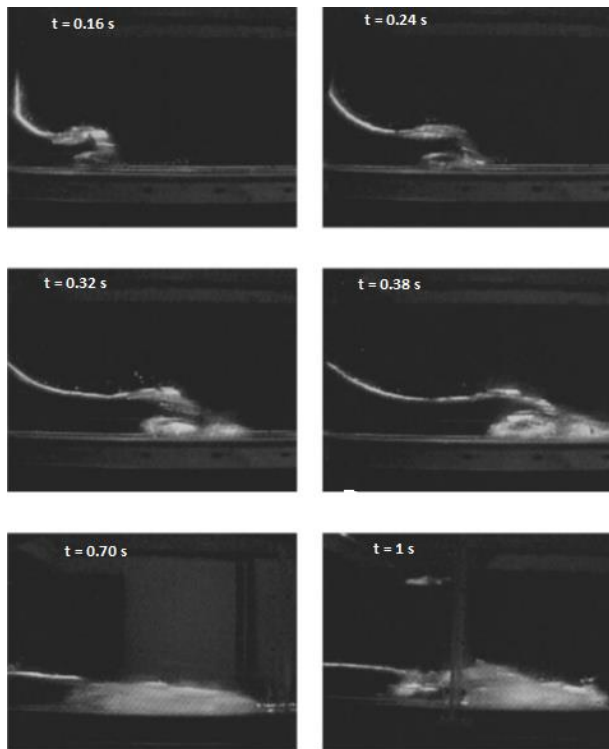
In laboratorio, il fenomeno dello tsunami si può modellare sperimentalmente attraverso la generazione dell'onda con Dam Break.

Negli esperimenti condotti presso il laboratorio di Bologna, la paratoia è in plastica con un peso di circa 5 chili. La paratoia inizialmente separa l'acqua in quiete, che si trova nel serbatoio, dal resto del canale dove è presente un sottile velo d'acqua di altezza che varia tra 0.5-1 cm.

Attraverso lo studio condotto da Stansby, nel 1997, è possibile avere delle immagini che rappresentano gli istanti iniziali di propagazione dell'onda di dam break in seguito alla sua generazione mediante dam break. Il pelo libero dell'acqua è stato illuminato da un fascio laser e il fondo del canale sul quale si propagherà l'onda è asciutto. (24)

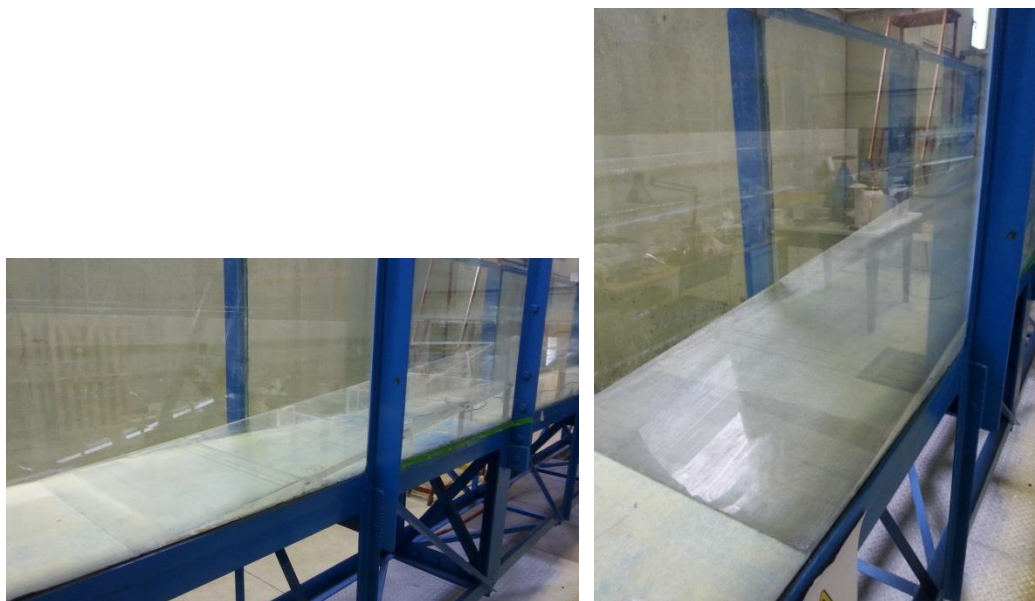
I primi istanti di propagazione dell'onda lunga generata in laboratorio partendo da un'altezza d'acqua nel serbatoio di 0.1 metri sono riportati nella Figura 23. La situazione rappresentata è molto simile a quella ricreata nel laboratorio di idraulica dell'università di Bologna.





**Figura 23: istanti iniziali della generazione dell'onda mediante dam break al variare del tempo (24)**

Negli esperimenti condotti e descritti in questo elaborato è stata inoltre sistemata una rampa all'interno del canale, Figura 24, ad una distanza di circa 3,10 metri verso valle dalla paratoia. La rampa utilizzata è in plexiglas con uno spessore di 2 centimetri e un angolo d'inclinazione di circa  $5.7^\circ$ .



**Figura 24: panoramica laterale della rampa (sinistra), rampa con zanzariera per attrito (destra)**

Sulla rampa è stata posizionata una zanzariera in plastica a maglie quadrate con passo di 1 millimetro, per aumentare il coefficiente di attrito e quindi meglio approssimare la l'attrito tra il blocco e la superficie del canale. La rete è fissata alle estremità della rampa in modo da evitare la formazione di pieghe o rigonfiamenti che potrebbero interferire con le prove.

Sulla rampa sono state, inoltre, disegnate delle linee parallele, ortogonali rispetto alla direzione di propagazione del flusso, ogni 10 centimetri per poter quantificare la massima distanza di trasporto dei blocchi.

L'onda generata, quindi, percorre il canale, si propaga lungo la rampa fino ad un massimo, impatta il blocco e riscende il piano inclinato come onda di ritorno.

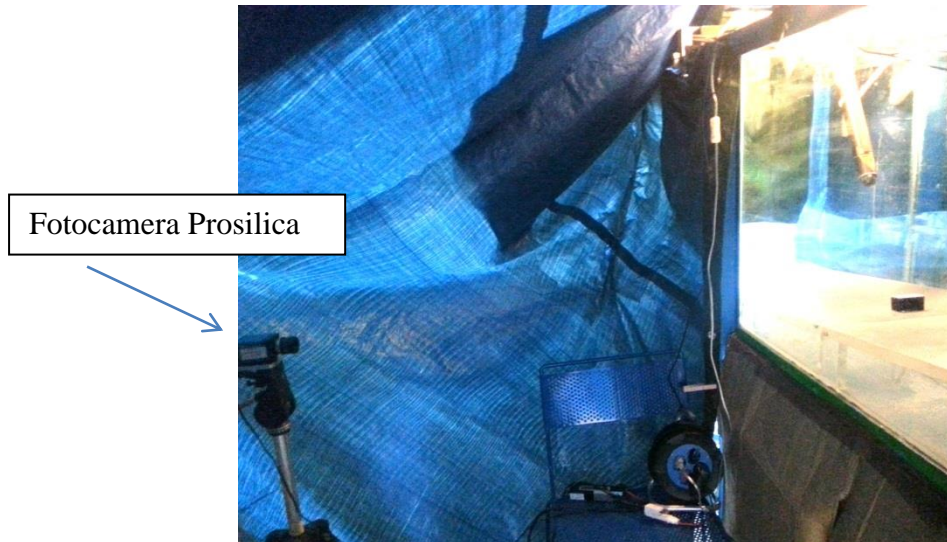
Lungo il canale sono posizionate 3 sonde resistive rispettivamente a 16, 28 e 194,5 centimetri dalla paratoia utilizzate per seguire il fronte d'onda e monitorare la propagazione del flusso.

Per studiare l'arrivo del fronte d'onda sui blocchi, determinarne l'inizio del moto e ricavare le altezze d'onda, è stata utilizzata una fotocamera Prosilica GE1910C ad alta risoluzione CCD con GigE Vision Interface (Gigabit Ethernet Interface). La fotocamera è settata con un'esposizione di 9500 microsecondi che permette di ottenere una frequenza massima di acquisizione di 104 frame al secondo. In questi esperimenti la frequenza di acquisizione voluta è di 100 frame al secondo. Le dimensioni dell'inquadratura sono 640x480 pixel. La fotocamera è posizionata a lato del canale in due posizioni differenti a seconda che si effettui un'acquisizione al buio con laser o una con illuminazione.

In entrambi i casi la fotocamera si trova ad una distanza di circa un metro dal canale ed è situata in posizione frontale. La fotocamera si trova in una camera oscura che è stata creata appositamente per ottenere immagini più accurate e per evitare di avere riflessi indesiderati durante l'acquisizione dei dati nelle varie ore della giornata.

Per le acquisizioni con luce, il centro focale è centrato sul blocco e la messa a fuoco è al centro del canale. In questo modo si hanno delle acquisizioni frontali per determinare con precisione il momento d'inizio del moto del blocco.

Per le inquadrature al buio con laser, invece, la fotocamera è a fuoco sul masso ed il centro focale è appena sopra al blocco per poter osservare, da una posizione leggermente rialzata rispetto alla rampa, il pelo libero illuminato dal fascio laser. Nella Figura 25 si può osservare l'interno della camera oscura e la posizione della fotocamera.



**Figura 25: camera oscura e posizione fotocamera sulla sinistra**

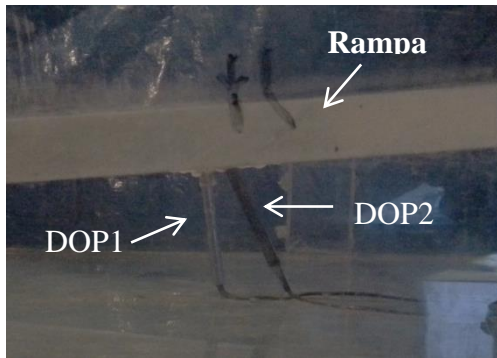
Per misurare direttamente il profilo delle velocità all'interno del corpo fluido dovuto al moto dell'onda, generata mediante dam break, sono stati utilizzati tre velocimetri a ultrasuoni DOP2000. Un trasduttore DOP è stato posto sul fondo del canale poco prima dell'inizio della rampa ad una distanza dalla paratoia di circa 2,67 metri. Da ricordare che le velocità sono sempre misurate lungo l'asse del DOP. Nella Figura 26 è riportata una foto della disposizione di questo trasduttore all'interno del canale.



**Figura 26: posizione del DOP numero 1 prima della rampa e della camera oscura**

Gli altri due trasduttori DOP sono stati posizionati all'interno della rampa in un cavità chiusa creata appositamente. Tra DOP e la rampa in plexiglass è stato inserito un gel, per permettere il giusto funzionamento del dispositivo. Infatti, il gel va a simulare la presenza di acqua nella cavità in modo da creare continuità nel mezzo di propagazione delle onde sonore onde evitare deviazioni della propagazione delle onde.

Un DOP è sistemato con orientamento verticale rispetto al piano della rampa mentre l'altro è inclinato di 20 gradi rispetto alla verticale al piano della rampa. Lo scopo è quello di misurare due componenti della velocità, quella verticale e obliqua, per ottenere la misura del vettore velocità e non solo del modulo in una sola direzione. Questi due trasduttori DOP sono stati posti in prossimità del blocco. In questo modo si possono misurare le due componenti della velocità dell'onda in corrispondenza del blocco. Nella Figura 27 è mostrata la posizione degli strumenti all'interno della rampa:



**Figura 27: posizione dei trasduttori DOP all'interno della rampa**

In prossimità dell'inizio della rampa è stata creata una camera oscura utilizzando teli di plastica. La camera oscura si trova nella parte di canale dove si andrà ad osservare il moto incipiente del blocco, mediante l'acquisizione delle immagini, e dove sono posizionati i 2 DOP e la fotocamera ad alta frequenza. La camera oscura è stata creata per ottenere immagini più accurate e per evitare di avere riflessi indesiderati durante l'acquisizione dei dati nelle varie ore della giornata. Il laser, inoltre, si vede solo al buio.

Durante le prove al buio, la rampa è stata illuminata da un laser con fascio in asse con il blocco. Il laser ha illuminato la superficie del pelo libero, in prossimità del blocco, al passare del fronte d'onda ottenendo così delle immagini da cui è facilmente individuabile il pelo libero. In questo modo è possibile, mediante elaborazione delle immagini in Matlab, ricavare le relative altezze d'onda e confrontarle con quelle ricavate mediante DOP.

I blocchi sono stati posizionati sulla rampa con vari orientamenti ad una distanza fissa di un centimetro dal DOP nella direzione di propagazione dell'onda. Sono stati posizionati ad una distanza dalla paratoia di circa 3.50 metri per permettere all'onda di propagarsi e svilupparsi completamente. Gli orientamenti utilizzati nel caso di prisma cubico sono:

- perpendicolare alla direzione del flusso,
- ruotato di 45 gradi rispetto alla perpendicolare alla direzione di propagazione del flusso,

Per quanto riguarda i prismi rettangolari gli orientamenti sono i seguenti:

- lato lungo perpendicolare alla direzione di propagazione del flusso,

- lato corto perpendicolare alla direzione di propagazione del flusso,
- lato lungo ruotato di 45 gradi rispetto alla perpendicolare alla direzione di propagazione del flusso,

Una videocamera digitale è stata posizionata sopra al blocco per poter osservare il moto del blocco all'arrivo dell'onda. La videocamera è stata utilizzata solo nelle prove con illuminazione.

Le prove sono state ripetute diverse volte per verificare la ripetibilità dei dati, per diminuire gli errori ed eliminare le componenti caotiche del fenomeno.

Un'altra videocamera è stata posizionata sempre all'interno della camera oscura, in posizione rialzata rispetto al canale in modo da poter osservare il moto dei blocchi e la massima distanza di trasporto. Le videocamere vanno attivate manualmente all'inizio di ogni prova.

In seguito sono stati riportati i parametri utilizzati per settare i DOP, Tabella 5 e la fotocamera Prosilica, Tabella 6.

**Tabella 5: parametri di settaggio del DOP2000**

	<b>DOP1 – channel 1</b>	<b>DOP 2 – channel 2</b>	<b>DOP 3 – channel 3</b>
<b>Emissione</b>			
<b>Frequenza di acquisizione dell'impulso [Hz]</b>	15625	8064	8064
<b>Frequenza di emissione [MHz]</b>	4000	4000	4000
<b>Lunghezza dell'impulso [cycles]</b>	8	8	2
<b>Ricezione</b>			
<b>Risoluzione [ns]</b>	1750	1750	750
<b>Sensitività</b>	Medium	Medium	Medium
<b>Profondità iniziale [mm]</b>	10,5	0,75	0,75
<b>Elaborazione dati</b>			
<b>Numero di gates</b>	5	50	156
<b>Emissione/profilo</b>	16	16	16

Come si può evincere dai parametri, il numero di gates al quale viene registrato il segnale è differente a seconda del trasduttore DOP considerato. Questo perché varia il profilo di velocità. Siccome le misure del DOP si riferiscono a diversi volumi del fluido a diverse distanze, il numero dei gates corrisponde al numero di questi volumetti. In termini di distanza il gate è inteso come la distanza di questi volumi del fluido dal DOP.

Si evidenzia che il trasduttore DOP1 corrisponde al trasduttore DOP posizionato sul fondo del canale prima della rampa, il trasduttore DOP2 corrisponde a quello inclinato di 20 gradi rispetto alla verticale della rampa e il trasduttore DOP3 è quello posizionato lungo la perpendicolare alla rampa.

Nel primo trasduttore DOP il numero di gates è pari a 5 perché si vuole ottenere una velocità media e quindi si considerano i dati corrispondenti a 5 punti vicini. Al contrario i gates aumentano per gli altri due dispositivi perché sono posizionati più vicino al blocco e si necessita di un profilo di velocità. Siccome nei primi gates l'eco è molto disturbato, nel setting del DOP si può regolare anche il valore corrispondente alla starting depth che, come si può vedere dalla tabella, è differente per ogni dispositivo.

Sono riportati i valori con cui la fotocamera prosilica è stata settata, Tabella 6:

**Tabella 6** parametri di settaggio della fotocamera Prosilica

<b>Acquisizione</b>	
<b>Trigger</b>	
<b>Modalità di acquisizione</b>	Continuo
<b>Acquisition frameCount</b>	1000
<b>Frequenza acquisizione immagini [frame/s]</b>	100
<b>Esposizione</b>	
<b>Tempo esposizione [s]</b>	9500
<b>Guadagno</b>	
<b>Guadagno</b>	10

## 5.4 Procedimento

Le prove sono state condotte nel canale idraulico sopra descritto. L'onda lunga è stata ricreata mediante l'utilizzo della tecnica di Dam Break. Per garantire la ripetibilità delle misure, ogni tipologia di prova è stata effettuata più volte, alcune al buio impiegando il laser, altre invece con illuminazione per poter utilizzare le videocamere.

Le prove sono state pianificate variando le seguenti cose:

- il livello d'acqua iniziale presente nel serbatoio prima della generazione dell'onda mediante Dam Break,
- la tipologia di blocco utilizzato in funzione della densità e della forma,
- il posizionamento del blocco sulla rampa (perpendicolare al flusso o con orientamento ruotato di 45 gradi rispetto alla perpendicolare al flusso). In caso di blocco rettangolare si è deciso se orientare il lato lungo o il lato corto in direzione perpendicolare a quella del flusso.

La valutazione della ripetibilità delle prove è di fondamentale importanza in questi esperimenti in quanto, essendo la procedura di apertura della paratoia eseguita manualmente, è possibile che si verifichino condizioni differenti in ogni prova.

Le altezze d'acqua iniziali presenti nel serbatoio variano in funzione del tipo di blocco utilizzato. In generale, si parte da un'altezza d'acqua critica, con la quale il blocco non si muove, fino ad arrivare, eseguendo prove per ogni centimetro di altezza aggiunta, a valori di altezze che garantiscano il movimento del blocco in tutte le ripetizioni.

Inizialmente sono state eseguite delle prove a vuoto, senza la presenza del volumetto nel canale, per studiare le caratteristiche del flusso (altezza e velocità) indisturbato. I valori delle altezze del pelo libero delle prove a vuoto, ricavati tramite analisi delle immagini in Matlab, si rivelano di fondamentale importanza perché servono per calibrare i valori di livello ottenuti utilizzando il velocimetro DOP2000.

Le prove a vuoto sono state eseguite con i seguenti tiranti di altezze iniziali [cm]: 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 24, 25, 26.

Nella Tabella 7 è riportato un elenco delle prove eseguite con i diversi blocchi e le relative altezze d'acqua utilizzate per la generazione dell'onda di dam break:



**Tabella 7: prove effettuate con differenti tiranti di altezza iniziale per differenti orientamenti dei blocchi rispetto alla direzione di propagazione del flusso. LL = lato lungo rivolto verso il flusso, LC=lato corto rivolto verso il flusso**

Blocco 7c		Blocco 4		Blocco 8c		Blocco 4c			
<i>Orientamento del blocco rispetto alla direzione di propagazione del flusso</i>									
0°	45°	0°	45°	0°	45°	0°	45°		
<i>Altezza iniziale d'acqua presente nel serbatoio [cm]</i>									
17	17	15	15	LL	LC	19	LL	LC	16
18	18	16	16	19	25	20	15	16	17
19	19	17	17	20	26	21	16	17	18
20	20	18	18	21	27	22	17	18	19
-	21	19	19	22	28	23	18	19	20
-	-	20	20	23	29	24	19	20	-
-	-	-	-	24	-	25	20	21	-
-	-	-	-	-	-	-	-	22	-
-	-	-	-	-	-	-	-	23	-

Come già descritto sopra, i primi livelli d'acqua utilizzati corrispondono ai livelli critici per i quali non si ha il moto del blocco. Per questo motivo, alcune volte, sono state eseguite più prove, con un determinato livello, per ottenere un maggior numero di dati così da aumentare l'accuratezza della misura e garantire la loro ripetibilità. Alcune prove, in seguito, sono state escluse dopo l'analisi di ripetibilità.

Bisogna anche considerare che, dato il minimo intervallo di tempo tra un esperimento ed il successivo ed essendo il canale orizzontale, non è stato possibile procedere ad un controllo accurato della minima quantità di acqua rimasta sul fondo dopo il passaggio dell'onda. Per questo motivo si avranno condizioni iniziali leggermente diverse per ogni prova. Il sottile velo d'acqua che rimane in canale presenta altezze differenti fino ad un valore massimo poco inferiore a 2 centimetri. A causa di ciò, con una quantità d'acqua maggiore si tenderà ad avere un fronte d'onda più ripido, in quanto l'attrito è superiore, ma con velocità inferiori. La diminuzione delle velocità di propagazione del fronte non comporta, però, una diminuzione degli effetti che possono verificarsi sul blocco. Anzi, un fronte d'onda più ripido può avere maggiori conseguenze sui blocchi.

All'inizio di ogni prova, l'acquisizione dei dati mediante sistema LabView è fatta partire in contemporanea con il sollevamento manuale del gate in plastica.

Mediante l'utilizzo del software LabView è possibile far partire l'acquisizione dati in contemporanea delle sonde, del DOP2000 e della fotocamera Prosilica. I video invece saranno attivati manualmente all'inizio di ogni prova con illuminazione nella camera oscura.

In seguito all'acquisizione, si procede con l'analisi dei dati di velocità e delle immagini.

## **5.5 Strumentazione utilizzata**

Di seguito viene riportato un elenco ed una descrizione della strumentazione utilizzata durante le prove:

- DOP 2000,
- Sonde resistive,
- Fotocamera Prosilica GE680 ad alta risoluzione in bianco e nero,
- Videocamere digitali,
- Fascio laser per illuminare il pelo libero dell'acqua,
- Sistema LabView per il controllo e la sincronizzazione degli strumenti durante le prove,

### **5.5.1 DOP 2000**

Il velocimetro DOP2000 è stato utilizzato in questi esperimenti per misurare il profilo di velocità nel mezzo liquido in maniera non invasiva. Il DOP2000 utilizzato, è un velocimetro doppler a ultrasuoni non intrusivo.

Il principio di funzionamento del velocimetro si basa sullo sfruttamento dell'effetto Doppler. L'effetto Doppler è stato spiegato per la prima volta nel 1842 dallo scienziato austriaco Christian Doppler. Sebbene sia stato scoperto studiando le onde sonore esso vale per tutti i tipi di onda. L'effetto Doppler consiste in un cambiamento apparente della frequenza o della lunghezza d'onda di un'onda acustica o elettromagnetica risultante sia dal movimento dell'emettitore sia dal movimento relativo del ricevitore. Il velocimetro Doppler è forse l'unica tecnica che sia in grado di misurare il profilo di velocità in un mezzo liquido che contiene un sufficiente numero di particelle in sospensione come sabbia, bolle d'aria ed emulsioni.

Il velocimetro sonoro Doppler è formato da una sonda, che funge alternativamente da emettitore e ricevitore, la quale invia periodicamente un breve impulso sonoro, ad una frequenza conosciuta, che si propaga attraverso l'acqua. Non appena l'impulso passa attraverso il volume di misura, l'energia acustica è riflessa in tutte le direzioni grazie a particolari traccianti o particelle presenti nel mezzo liquido. Assumendo che le particelle riflettenti siano abbastanza piccole da rappresentare adeguatamente il flusso del fluido si può considerare la velocità delle particelle uguale a quella del fluido (25). In questo modo, una parte dell'energia riflessa torna indietro lungo l'asse del ricevitore, dove viene campionata dal velocimetro Doppler che ne misura la frequenza e il profilo di velocità.

Nelle Figura 28: principio di funzionamento del UDV (25)                      Figura. 30 e stato riportato in maniera schematica il principio di funzionamento del velocimetro Doppler sopra descritto:

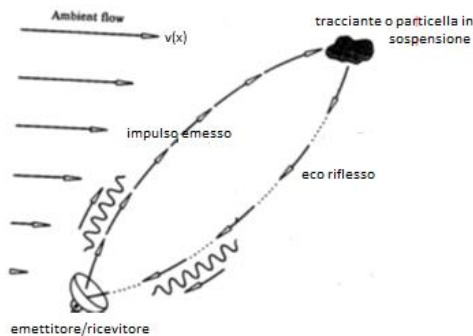


Figura 28: principio di funzionamento del UDV (25) (26)

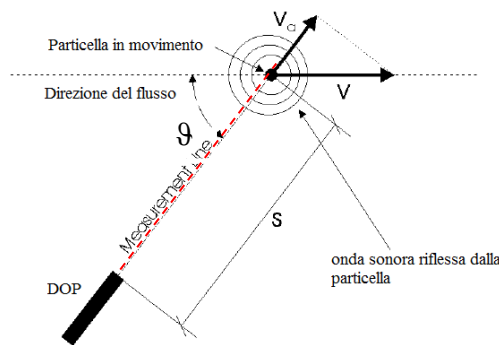


Figura 29: principio di funzionamento DOP2000

La traiettoria della particella forma un angolo  $\theta$  con la direzione di propagazione delle onde sonore lungo l'asse del trasmettitore. Il velocimetro Doppler misura solo la componente di velocità lungo la linea di misura, che in Fig. 29 è rappresentata da una linea tratteggiata rossa in asse con il dispositivo. La velocità della particella può quindi essere ricavata mediante la seguente formulazione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**(5.1):

$$v = \frac{cf_D}{2f_e \cos\theta} \tag{5.1}$$

Dove  $f_e$  e  $f_D$  sono rispettivamente la frequenza di emissione e quella Doppler.

Infine, la frequenza registrata da un ricevitore fisso è stata ottenuta mediante l'utilizzo della seguente relazione (5.2):

$$f' = f_0 \left( \frac{c \pm v}{c \mp v} \right) \quad (5.2)$$

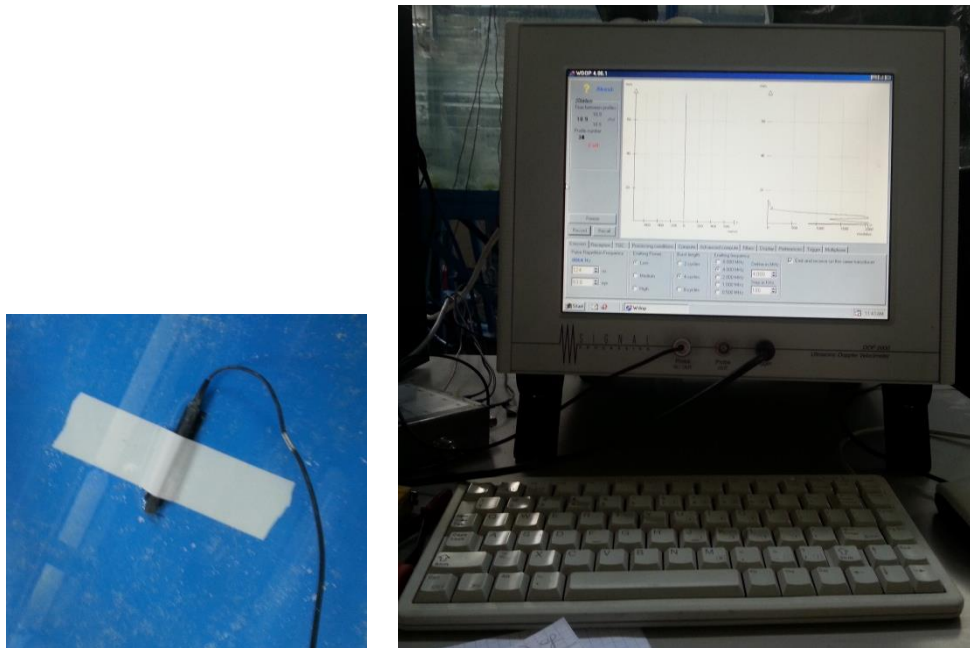
dove  $v$  è la velocità del riflettore [m/s]. La scelta della frequenza di campionamento è molto importante quando si eseguono degli esperimenti. Di solito, frequenze maggiori contenute nel segnale analogico richiedono frequenze di campionamento superiori per riprodurlo adeguatamente. (27)

Il vantaggio principale dell'uso di questo dispositivo consiste nel fatto che è in grado di offrire informazioni spaziali associate a valori di velocità istantanea. Infatti, se gli echi sono ricevuti continuamente entro una definita finestra temporale si può ottenere un profilo di velocità completo. Invece di misurare il ritardo tra il segnale emesso e quello ricevuto, l'eco di ritorno viene campionato in determinati intervalli di tempo, relativi a differenti profondità. Il segnale che corrisponde a profondità adiacenti arriva in tempi differenti e può essere ordinato in differenti canali, in questo modo si può effettuare una misura della velocità in differenti punti lungo l'asse del fascio di ultrasuoni.

Per convenzione la velocità è considerata negativa quando il target è in movimento verso il trasmettitore.

In seguito il segnale Doppler è campionato e convertito in digitale da un convertitore analogico/digitale (A/D). Il segnale quindi è memorizzato e filtrato. La conversione da analogico a digitale viene effettuata memorizzando il segnale in punti discreti. Questi punti di solito sono spazati nel tempo ad intervalli regolari che vengono chiamati intervalli di campionamento.

Il DOP2000, oltre al trasmettitore/ricevitore, è composto da un'unità principale formata da uno schermo e da una tastiera integrata con un trasduttore ultrasonico con relativo cavo, come si può vedere in Figura 30:



**Figura 30: trasduttore DOP (sinistra) e unità principale (destra)**

Utilizzando il software fornito per l'utilizzo del DOP2000, si può selezionare la disposizione del funzionamento del trasduttore, la sequenza temporale e molti altri parametri. I parametri utilizzati per settare il DOP sono riportati nella tabella numero Tabella 5. L'unità principale è in grado di lavorare con un set di tre differenti frequenze (2/4/8 MHz). Le basse frequenze sono di solito utilizzate per applicazioni su grande scala grazie alle buone caratteristiche di propagazione del segnale.

Lo schermo del velocimetro è sostanzialmente un normale computer che opera con sistema Windows NT.

### LIMITAZIONI

Anche l'utilizzo del velocimetro Doppler è affetto da alcune limitazioni.

Una limitazione è legata al teorema di Nyquist che è un limite che riguarda la digitalizzazione di tutti i dati. Siccome l'informazione è disponibile solo periodicamente, esisterà una velocità massima misurabile del flusso che dipende dalla frequenza di ripetizione. La seguente relazione permette di ottenere la velocità massima:

$$v_{max} = \frac{c}{4(2)f_e \cos \theta T_{prf}} \quad (5.3)$$

Dove  $T_{prf}$  è la frequenza di campionamento,  $f_e$  è la frequenza di emissione dell'impulso,  $c$  è la velocità del suono, e  $\vartheta$  è l'angolo che la traiettoria della particella forma con la direzione di propagazione delle onde sonore lungo l'asse del trasmettitore. (25)

Se la velocità misurata è superiore alla massima velocità ottenuta mediante la relazione (5.3) si avrà distorsione nel segnale e perdita di informazione.

In questa situazione, tutte le frequenze che si trovano al di sopra della metà della frequenza di campionamento ( $T_{prf}$ ) vengono distorte o rimandate nella regione corrispondente alle basse frequenze. Nella Figura 31 si possono vedere gli effetti dell'aliasing:

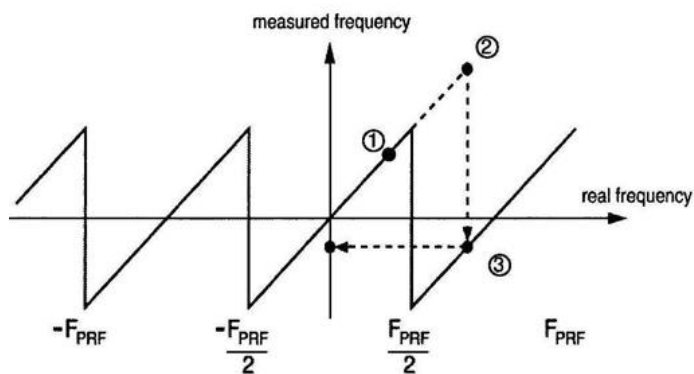


Figura 31: fenomeno dell'aliasing. (25)

Come si può vedere, al punto 1 nella Figura 31, la frequenza Doppler reale è inferiore al limite di Nyquist, che corrisponde alla metà della frequenza di campionamento ( $T_{prf}/2$ ), in questo modo la frequenza è uguale alla frequenza reale. Al punto 2, la frequenza Doppler reale è maggiore al limite di Nyquist, quindi viene rimandata al punto 3 che permette di ottenere una velocità negativa. In quest'ultima situazione la misura è affetta dal fenomeno dell'aliasing.

E' possibile evitare l'aliasing facendo una buona configurazione e stimando in anticipo le velocità misurate. Sfortunatamente non sempre è possibile rimuoverlo. Per questo motivo bisogna spesso controllare la presenza di distorsione nell'evoluzione della misura. (26)

La seconda limitazione da tenere in considerazione riguarda la massima profondità alla quale la velocità può essere misurata. Ricordando che l'impulso sonoro si muove nel

mezzo ad una velocità che dipende dalle proprietà fisiche del mezzo stesso, questo limite viene determinato dal tempo necessario all'impulso sonoro per viaggiare dal trasmettitore al target e viceversa. Questo intervallo di tempo è costante e definito dalla frequenza di ripetizione dell'impulso. Il massimo periodo di ripetizione  $T_{prf}$  viene ricavato mediante la seguente relazione:

$$P_{max} = \frac{T_{prf}c}{2} \quad (5.4)$$

La profondità massima e la velocità massima sono correlate tra di loro mediante la seguente relazione:

$$P_{max}v_{max} = \frac{c^2}{8f_e} \quad (5.5)$$

dove:  $c$  è la velocità del suono,  $f_e$  è la frequenza di emissione,  $P_{max}$  è la profondità massima.

Questa relazione mostra come maggiore è la velocità misurata, minore sarà la profondità di campionamento. Quindi, utilizzando un'adeguata combinazione di valori di frequenza, profondità di campionamento e angolo d'inclinazione si può ottenere un setting ottimale. (26)

## 5.5.2 Sonde Resistive

### 5.5.2.1 Principio di funzionamento e apparato Hardware

Una sonda resistiva per la misura del moto ondoso è un semplice e preciso dispositivo per rilevare le variazioni dei livelli d'acqua, consistente in due elettrodi in acciaio inossidabile distanziati e paralleli tra di loro. Per le sonde utilizzate in questi esperimenti la distanza tra i due elettrodi è di circa 0,5 centimetri. E' comunemente utilizzata per misurare il livello dell'altezza di un liquido conduttivo.

Il principio di funzionamento di tale dispositivo si basa sul fatto che la resistenza elettrica della sonda è in funzione del livello dell'acqua. La misura della resistenza è effettuata applicando tensioni dell'ordine di alcuni volt fra le due sonde. Da ciò si può osservare come la resistenza fra gli elettrodi nell'aria sia molto elevata, al contrario, quando gli elettrodi sono immersi in un liquido conduttivo la resistenza diminuisce rapidamente, consentendo quindi il passaggio di una corrente elettrica che viene rilevata

dal sistema di misura. La sonda, infatti, essendo di tipo resistivo è sensibile alla conduttività elettrica dell'acqua.

Uno speciale supporto, con fori di posizione accuratamente intervallati, è disponibile per il fissaggio della sonda ed il suo posizionamento lungo il canale.

Prima del loro utilizzo le sonde devono essere tarate. In questo modo si ricava per ognuna di esse la relazione che intercorre tra tensione ed altezza d'acqua fornendo una curva di calibrazione.

In questo esperimento le sonde non sono utilizzate per misurare le relative altezze d'acqua. L'assenza d'acqua nel canale all'inizio di ogni prova è il motivo principale per cui le sonde non possono essere utilizzate per misurare il livello del liquido in quanto non è possibile effettuare la calibrazione. In questo caso le sonde sono utilizzate per valutare l'arrivo del fronte d'onda e quindi misurarne il tempo e gli istanti di propagazione.

In Figura 32 vengono mostrate le sonde utilizzate in laboratorio:

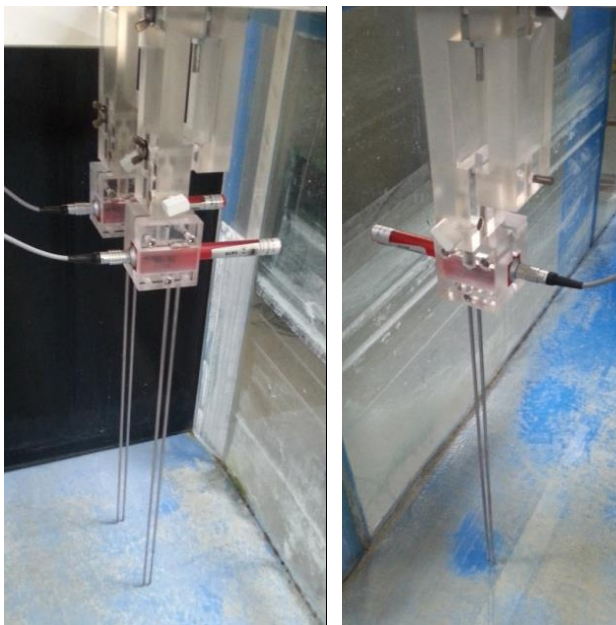


Figura 32: sonde resistive utilizzate in laboratorio

### 5.5.3 Fotocamera Prosilica

Per studiare l'arrivo del fronte d'onda sui blocchi, il moto del blocco e ricavare le altezze d'onda, è stata utilizzata una fotocamera Prosilica GE680 ad alta risoluzione CCD con



GigE Vision Interface (Gigabit Ethernet Interface). La fotocamera GE680 incorpora il sensore Kodak per una eccellente immagine di qualità in risoluzione HD (1080p). Questa particolare camera è in grado di effettuare 200 frames al secondo ad una risoluzione VGA (640x480) non compressa. Riesce ad avere una risoluzione fino a 16 Megapixel con un obiettivo di 35 mm.

Le acquisizioni sono effettuate in bianco e nero. Nella Tabella 6 sono riportati i parametri di settaggio della fotocamera e la frequenza di acquisizione utilizzata.

In questa camera è compreso l'Image Capture Software. Di solito è utilizzata per ispezioni ad alta velocità e robotica.

Nella Figura 33 è riportata un'immagine della fotocamera utilizzata:



**Figura 33: fotocamera Prosilica**

#### **5.5.4 Sistema LabView**

La gestione sincronizzata del dispositivo DOP2000, delle sonde e della camera Prosilica viene effettuata mediante l'utilizzo del sistema di acquisizione dati LabView. Il LabView è un software per la progettazione grafica di sistemi.

Negli esperimenti condotti, il LabView è utilizzato principalmente per acquisire dati, per il controllo degli strumenti e la sincronizzazione dell'acquisizione dei dati.

I programmi in LabView sono chiamati Virtual Instruments, VI, perché il loro aspetto e funzionamento è simile a quello di strumenti fisici, come oscillatori e multimetri. Quando si crea un nuovo VI, si visualizzano due finestre: la finestra front panel e il diagramma a blocchi. Queste due finestre costituiscono l'ambiente di sviluppo principale del LabView.

Il Front Panel è l'interfaccia utente del VI. Nella Figura 34 è riportata un'immagine del pannello frontale utilizzato:

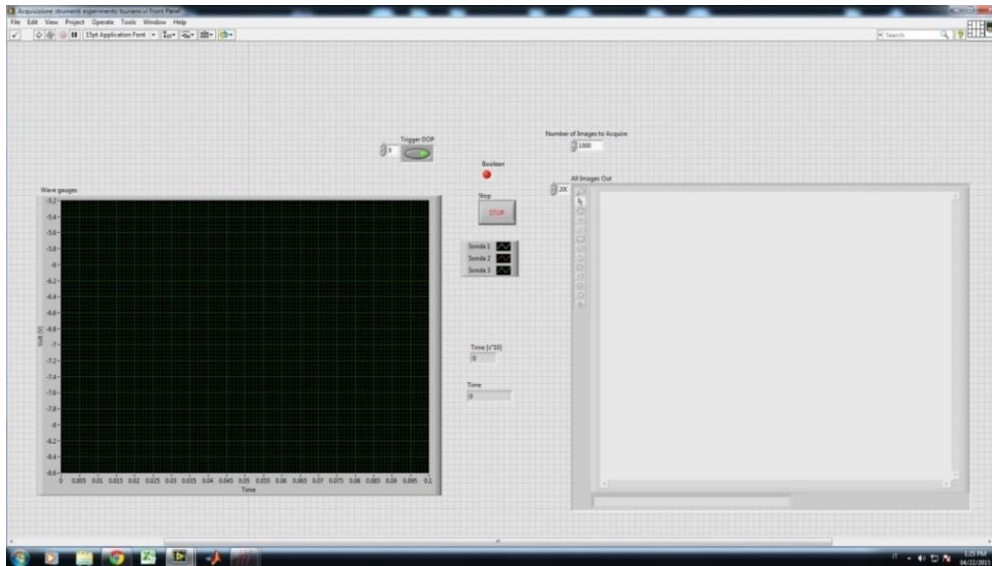
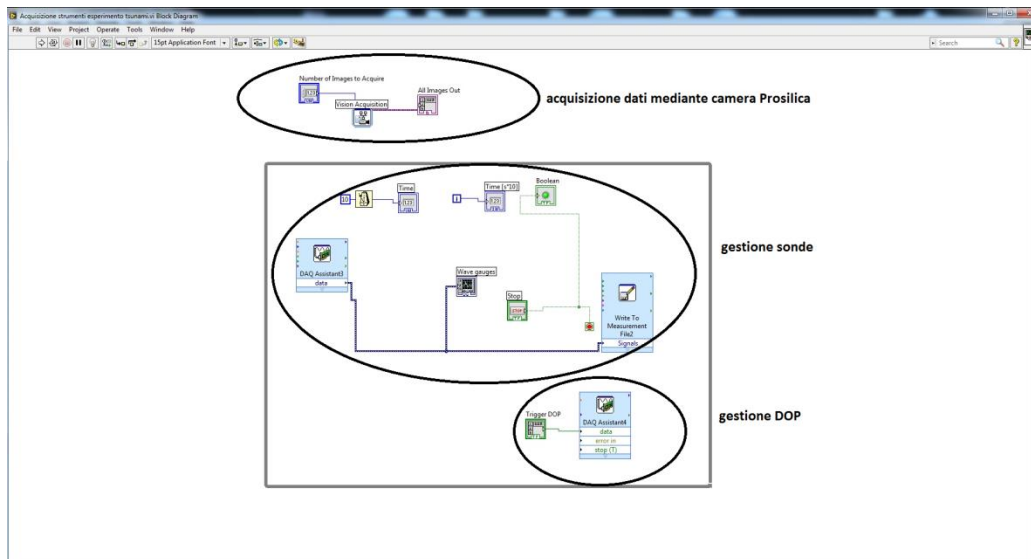


Figura 34: pannello frontale del LabView

Come si può vedere il pannello frontale è formato da una toolbar e da due riquadri. Nel caso in esame nella finestra di sinistra verrà visualizzato l'andamento del flusso registrato dalle sonde e in quella di destra verrà visualizzato l'ultimo frame acquisito dalla fotocamera Prosilica.

Il diagramma a blocchi invece è l'interfaccia grafica che permette di visualizzare e impostare il funzionamento e la gestione dei dispositivi che vengono utilizzati. Come si può vedere dalla figura riportata in seguito, il diagramma a blocchi è formato da una serie di blocchi o icone che rappresentano i dispositivi utilizzati e i relativi collegamenti. Il diagramma si può suddividere in differenti parti a seconda degli strumenti utilizzati, Figura 35. Nel caso in esame il diagramma è suddiviso in 3 parti:

- acquisizione dei dati mediante camera Prosilica,
- gestione delle sonde,
- gestione del DOP.



**Figura 35:** schermata principale LabView

Per ogni applicazione è possibile impostare una differente configurazione del LabView in modo da avere una gestione ottimale dei dispositivi. Negli esperimenti effettuati, il LabView è stato utilizzato per attivare contemporaneamente l'acquisizione tramite DOP, camera e sonde. A differenza di questi ultimi però, il DOP ha un suo terminale che acquisisce i dati. In questo caso il LabView viene solo utilizzato per triggerare il DOP a differenza della camera Prosilica e delle sonde che acquisiscono i dati tramite questo software di gestione.

### 5.5.5 Laser

Per illuminare il fronte d'onda nella camera oscura viene utilizzato un laser con un fascio di luce. In questo modo si riesce a distinguere facilmente il pelo libero dell'acqua in corrispondenza della mezzaria del canale, ovvero in prossimità del blocco. Il laser è stato utilizzato solo per le acquisizioni al buio, in quanto per le acquisizioni con illuminazione diventa praticamente inutile.

### 5.5.6 Videocamere

Sono state utilizzate anche due videocamere per studiare il moto dei blocchi e la massima distanza di trascinarsi da parte dell'onda generata.

## 5.6 Materiali utilizzati

Come già descritto in precedenza, i massi rocciosi hanno un peso di qualche tonnellata e vengono trasportati da onde di tsunami o mareggiate di elevata energia. I blocchi utilizzati in questo esperimento sono di minori dimensioni. Come riportato, la scala utilizzata è quella di Froude 1:100.

I blocchi utilizzati sono stati realizzati in cemento e cemento artificiale per pavimenti e sono prismi di forma cubica e rettangolare. Utilizzando volumetti in cemento si cerca di rappresentare clasti più leggeri come quelli che nella realtà sono fatti in materiale poroso come il corallo.

Nella Tabella 8 sono riportate le densità dei blocchi utilizzati in condizioni asciutte ed in seguito ad una immersione in acqua di qualche ora:

**Tabella 8:** tabella con riportati i valori di peso e densità dei blocchi asciutti e bagnati

<b>ID</b>	<b>Peso Asciutto [gr]</b>	<b>Peso Bagnato [gr]</b>	<b>Densità asciutto [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Densità bagnato [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Forma</b>
<b>4</b>	46,06	53,03	1678,70	1932,93	Cubica
<b>4c</b>	142,64	170,01	1597,27	1903,81	Rettangolare
<b>7c</b>	258,66	268,38	2326,63	2414,08	Cubica
<b>8c</b>	172,65	173,61	2581,78	2596,13	Rettangolare

In particolare il blocco 4, prisma di forma cubica, è stato ottenuto in laboratorio unendo acqua e malta cementizia.

Al contrario, i volumetti 4c,7c,8c sono stati ottenuti, mediante taglio con sega circolare ad acqua, da blocchi di materiale già presente in laboratorio. Si tratta di cemento artificiale per pavimentazioni e sono prismi di forma cubica e rettangolare.

Le densità dei blocchi sono state determinate prima da asciutti e in seguito dopo un immersione in acqua di circa una settimana per valutarne la variazione. E' importante avere dati precisi al riguardo per saper con precisione il peso e la densità.

Come si può vedere dalla tabella, i blocchi 4 e 4c sono quelli che risentono maggiormente dell'immersione prolungata in acqua. Le densità infatti, variano in un

range compreso tra i  $1500 \text{ kg/m}^3$  e i  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Per questo motivo, gli esperimenti verranno effettuati utilizzando blocchi che sono stati immersi in acqua per un determinato tempo.

Nella Tabella 9 sono riportate le dimensioni dei blocchi utilizzati e nella Fig. 36 sono presentati i volumetti:

Tabella 9: dimensioni dei volumetti utilizzati

Blocco ID	lato 1 [cm]	lato 2 [cm]	lato 3 [cm]
4	3	3	3
4c	3	3	5,5
7c	3	3	3
8c	3	3	5,5



Figura 36: blocchi utilizzati negli esperimenti

## 6. Analisi e discussione dei Dati

Per quanto riguarda l'analisi dei dati si è proceduto nel seguente modo:

- Stima dei numeri di Froude e Reynolds, calcolati in laboratorio, e confronto con i valori ricavati dagli studi di eventi reali del passato o da esperimenti simili per la verifica delle condizioni di similitudine.
- Calcolo delle altezze del flusso ricavate dall'analisi delle immagini e dei dati di eco mediante l'utilizzo di Matlab,
- Analisi delle velocità del flusso misurate mediante velocimetro,
- Calcolo del coefficiente di attrito,
- Calcolo dei coefficienti di drag per le prove effettuate

### 6.1 Numero di Froude e Reynolds

Inizialmente si è provveduto a calcolare i numeri di Froude e Reynolds del flusso ricreato in laboratorio mediante la tecnica del Dam Break, in modo da confrontare questi valori con quelli che si verificano nella realtà in occasione di un'onda di maremoto e verificarne la similitudine. Entrambi i numeri sono adimensionali e sono utilizzati per determinare le caratteristiche importanti di un flusso a superficie libera.

#### 6.1.1 Numero di Froude

Il numero di Froude è stato ottenuto mediante il rapporto tra la velocità media del flusso e la velocità gravitazionale dell'onda, in altre parole la sua celerità. Questo rapporto può essere definito come il rapporto tra le forze d'inerzia del corpo e le forze gravitazionali.

Nelle correnti a superficie libera è presente una forma di dissipazione energetica causata dalle ondulazioni che si formano sulla superficie della corrente e che crescono di importanza con il crescere del numero di Froude,

Il numero di Froude viene utilizzato nello studio delle correnti fluviali a pelo libero. Da tale numero si può capire rapidamente se la corrente in una certa sezione sarà lenta o veloce, e quando c'è il passaggio da una all'altra si verifica il risalto idraulico o un salto diretto (15):

- $Fr > 1$  la corrente è veloce (predominano le forze inerziali),
- $Fr < 1$  la corrente è lenta (predominano le forze gravitazionali),

- $Fr = 1$  la corrente è nel suo punto critico (corrente instabile).

Negli studi recenti, si è cercato di stimare, da misure, il numero di Froude per descrivere un evento di tsunami. Ad esempio, Sugawara ha osservato valori compresi tra 0.6 e 2 in funzione della potenza dell'evento (9). Per il maremoto verificatosi in Giappone a Meiwa, nel 1771, è stato calcolato un numero di Froude minore di 1 (21) mentre per quello avvenuto a Tohoku, sempre in Giappone, sono stati considerati valori compresi tra 1.14 e 1.5 (1). Mentre per gli esperimenti condotti da Nandasena (20) e Imamura (21) sono stati stimati valori compresi tra 0.7 e 1.

Dall'analisi dei dati è stato calcolato che il numero di Froude ha valori compresi intorno all'unità per la prima parte degli esperimenti condotti.

In seguito, è riportato l'andamento del numero di Froude, relativo agli esperimenti condotti, riferito a due altezze significative di generazione: quella massima ( $H = 28\text{cm}$ ) e quella minima ( $H = 17\text{cm}$ ) con cui sono stati effettuati gli esperimenti.

Nella Figura 37 e Figura 38 si può osservare l'andamento medio del numero di Froude in nero e le relative velocità del flusso e altezze d'onda per gli istanti iniziali della prova considerata:

- $H = 17\text{cm}$  (la legenda è nella pagina seguente)

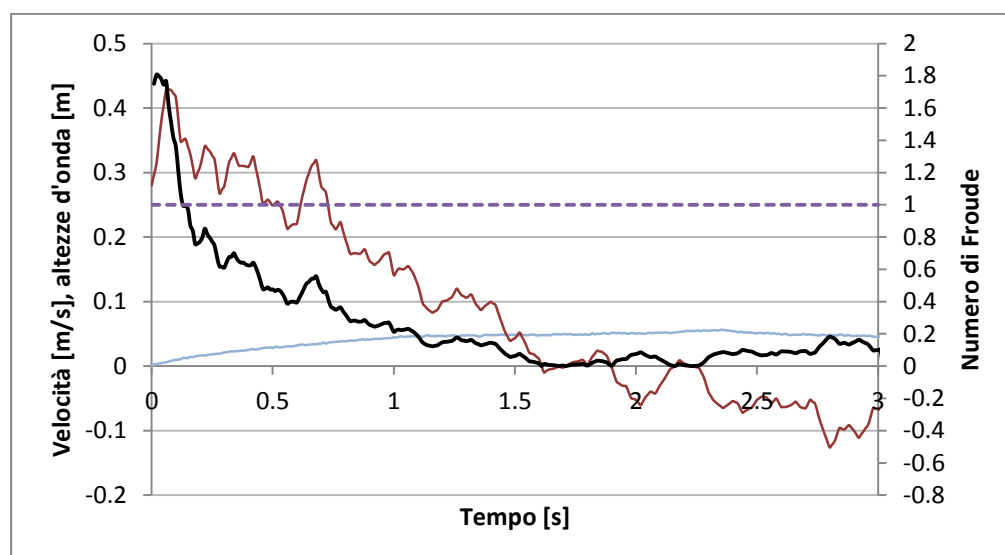
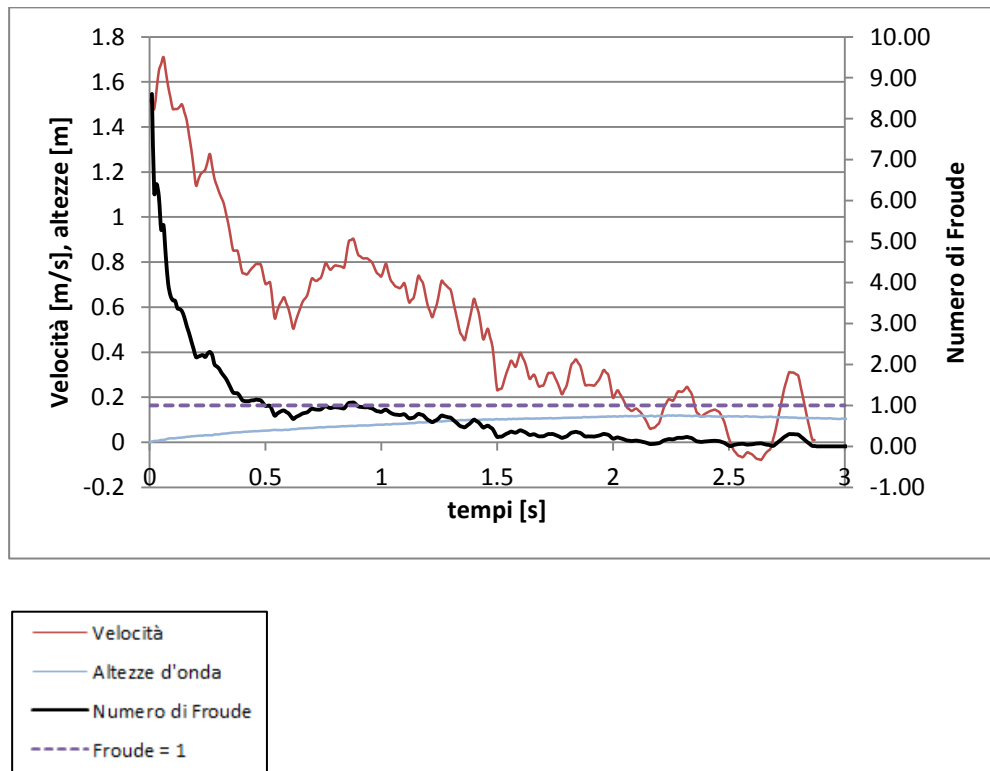


Figura 37: andamento del numero di Froude e delle velocità medie per un'altezza iniziale presente nel serbatoio di 17 cm

-  $H = 28\text{cm}$



**Figura 38:** andamento del numero di Froude, della velocità media e dell'altezza d'onda per un tirante iniziale di 28 cm

Dai grafici si può osservare che per alcuni istanti temporali iniziali il numero di Froude è superiore ad 1. Quindi ci si trova nella condizione di corrente veloce. Questo vale per la cresta dell'onda all'inizio del flusso e vale per un tempo relativamente breve rispetto alla durata totale dell'evento. In seguito, il numero di Froude decresce e rimane con un valore inferiore ad uno per tutta la seconda parte del flusso. Ci si trova quindi in una corrente lenta che predomina.

Il numero di Froude è fortemente dipendente dall'altezza del flusso e dalla sua velocità. Maggiore è il suo valore minore sarà l'altezza d'onda e viceversa.

Per valori relativamente bassi del tirante iniziale di generazione, come ad esempio  $H=17\text{cm}$ , il numero di Froude è inferiore ad 1 per la maggior parte della durata della prova, al contrario per altezze iniziali d'acqua superiori, come ad esempio  $H=28\text{cm}$ , il numero di Froude è maggiore di 1 per un tempo superiore ma complessivamente la corrente rimane in regime subcritico.



Confrontando i risultati ottenuti con lo studio di Nandasena si può osservare una buona corrispondenza dei valori ottenuti.

### 6.1.2 Numero di Reynolds

Il numero di Reynolds è utilizzato in fluidodinamica per stabilire la transizione tra moto laminare e moto turbolento e si ottiene dal rapporto tra le forze inerziali e le forze viscosse. Ecco che quindi lavorare a bassi Reynolds vuol dire dover tener conto di tutti quegli effetti derivanti da forze viscosse e quindi da forze di tipo superficiale.

A tal proposito si considerano tre casi:

- $Re \leq 2200$ : regime laminare
- $2200 \leq Re \leq 10000$ : regime di transizione
- $Re \geq 10000$ : regime turbolento

Utilizzando la relazione seguente viene calcolato il numero di Reynolds per gli esperimenti condotti:

$$Re = \frac{vD}{\mu} \quad (6.1)$$

Dove:  $v$  è la velocità del flusso,  $D$  è la larghezza della faccia del blocco su cui agisce il flusso e  $\mu$  è la viscosità dell'acqua pari a  $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . (15)

Il numero di Reynolds di un evento di tsunami è in genere molto elevato dell'ordine di  $10^7$ , come osservato da Imamura per lo tsunami di Meiwa del 1771. (21) Questo valore però non è riproducibile negli esperimenti condotti in laboratorio all'interno del canale idraulico.

La Figura 39 e Figura 40 mostrano l'andamento medio del numero di Reynolds in funzione della velocità del flusso per le altezze significative iniziali di 17 e 28 centimetri:

- H = 17cm

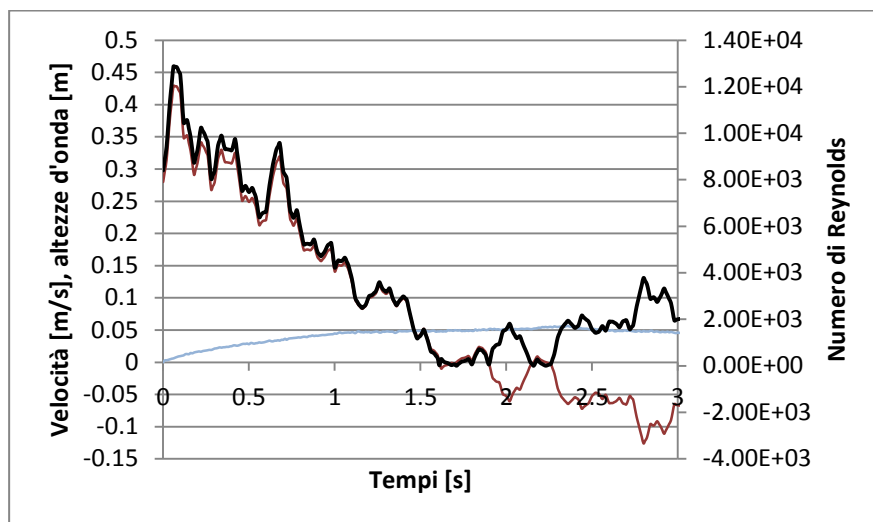
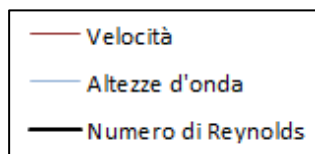


Figura 39: andamento del numero di Reynolds, delle velocità medie e delle altezze d'onda.

- H = 28cm

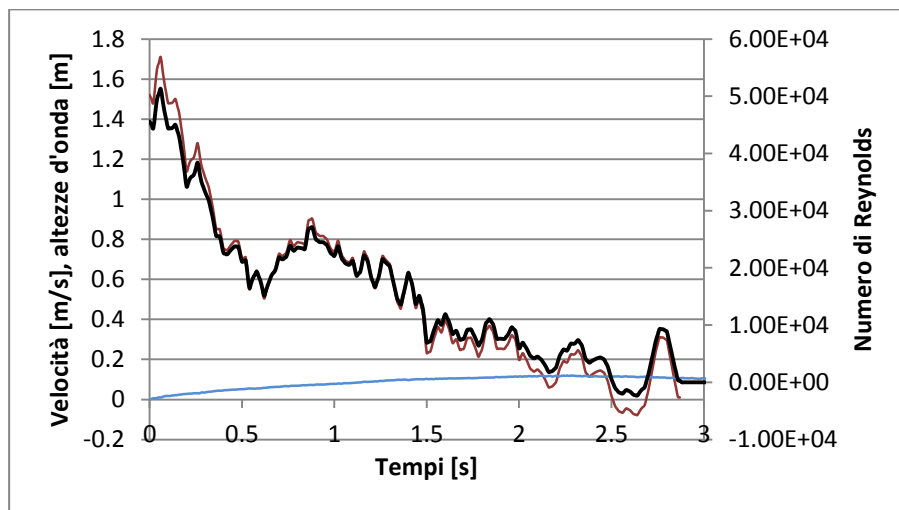


Figura 40: andamento del numero di Reynolds, della velocità media e delle altezze per un tirante iniziale di H=28cm

L'andamento medio del numero di Reynolds è riportato in nero. Come si può evincere dalla figura, per valori di velocità massimi, relativi alla prova H=28 cm, il numero di

Reynolds varia in un range di valori compresi tra  $5.0 \cdot 10^4$  e  $1.0 \cdot 10^4$ . Si può quindi affermare che con tiranti iniziali abbastanza elevati il moto si trova in regime turbolento. Al contrario, per valori relativamente bassi del tirante iniziale,  $H=17\text{cm}$ , il numero di Reynolds varia tra  $1.2 \cdot 10^4$  e  $10^3$ . Questo significa che il moto non è puramente turbolento e motivo di ciò potrebbe essere dovuto alla non scalabilità della densità dell'acqua. In questo modo, infatti, si tende a sovrastimare la viscosità e quindi la forza di drag.

Dagli esperimenti condotti non è stato possibile ottenere numeri di Reynolds dell'ordine di  $10^7$ , come osservato da Imamura, in quanto risulta impossibile soddisfare entrambe le scale di Reynolds e Froude. Per questo motivo è considerato più importante soddisfare la condizione sul numero di Froude.

I valori del numero di Reynolds ottenuti sono molto simili a quelli ricavati da Imamura e Nandasena nei loro esperimenti in laboratorio.

## 6.2 Altezze d'onda

Come riportato in precedenza, le altezze dell'onda generata in laboratorio, con la tecnica del Dam Break, sono state ricavate utilizzando il software di calcolo Matlab mediante il quale è stato possibile eseguire un'analisi delle immagini e dei dati di eco ottenuti dal velocimetro. Attraverso l'analisi dell'eco registrato dal DOP è stato possibile ricavare anche le altezze del flusso.

Per l'analisi delle immagini sono state utilizzate le acquisizioni effettuate al buio con il laser. Quest'ultimo, infatti, illumina la superficie libera del flusso d'acqua al passaggio del fronte d'onda in prossimità del masso, permettendo così una facile individuazione del pelo libero. Le altezze sono state ricavate utilizzando due particolari routine in Matlab: la prima permette la calibrazione dell'immagine e quindi la rimozione di distorsioni dovute all'obiettivo della fotocamera la seconda permette di ricavare le altezze mediante l'individuazione manuale della superficie libera per ogni frame acquisito.

La Figura 41 mostra come il fascio laser illumina la rampa ed il blocco prima del passaggio dell'onda, mentre la Figura 42 mostra un istante dell'impatto del fronte sul masso di forma cubica.



Figura 41: setting dell'esperimento prima del passaggio del fronte d'onda

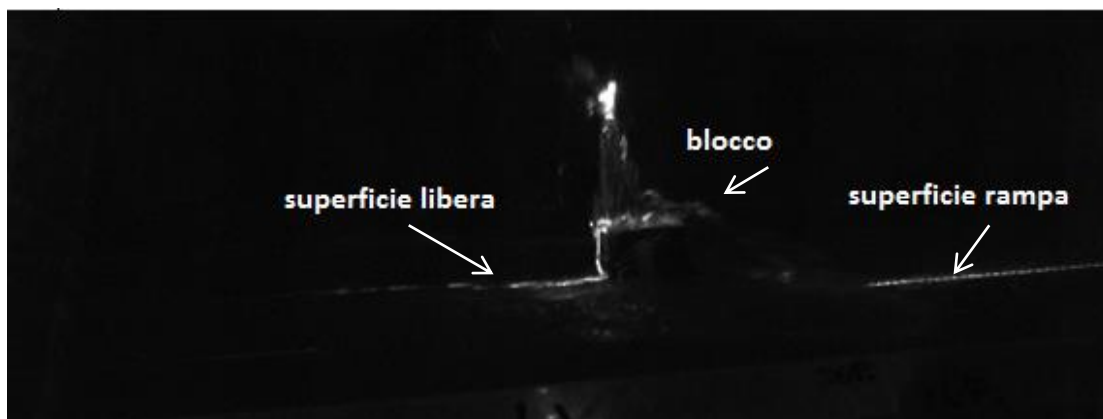
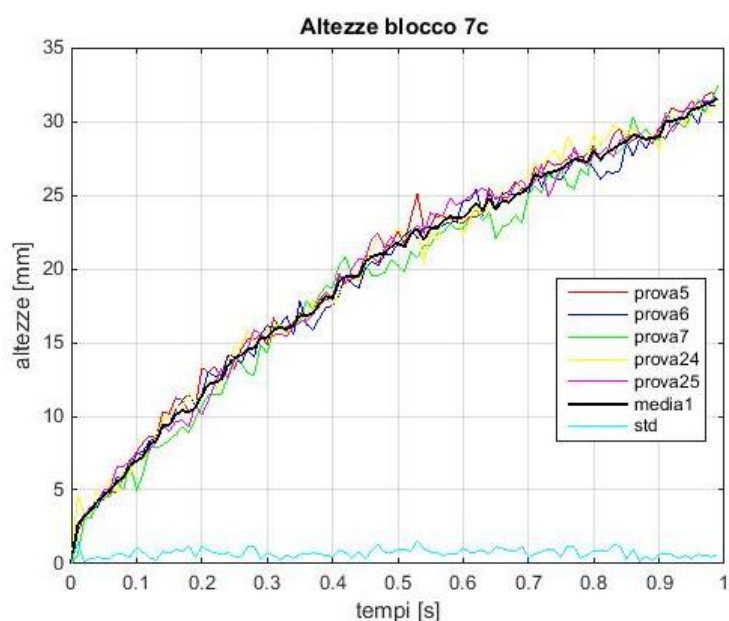


Figura 42: setting dell'esperimento al passaggio dell'onda

Per l'analisi delle altezze in Matlab, il pelo libero è stato individuato manualmente utilizzando il comando *ginput*. Quest'ultimo permette di identificare dei punti sulla figura, posizionando il cursore con il mouse, per ottenerne le relative coordinate. Nel caso in esame, i punti corrispondono alla superficie libera dell'acqua illuminata dal fascio laser. Un esempio è riportato nella Figura 42 dove, in prossimità del blocco, è chiaramente visibile il pelo libero del fronte. Una volta eseguita la routine, dall'interpolazione delle coordinate ottenute è possibile ricavare l'andamento quantitativo della superficie dell'acqua e quindi i valori delle altezze cercate. Le altezze che sono state calcolate corrispondono a quelle in prossimità del primo e del secondo DOP, posizionati nella rampa, e ad una distanza fissa di 1 centimetro verso valle dal DOP2. Questo procedimento è stato eseguito per ogni serie di immagini relativa ad ogni prova effettuata con il fascio laser. In seguito, le serie di valori ottenute dall'analisi di più prove con stesso tirante iniziale sono state mediate, così da ricavare un unico andamento di altezze medie del fronte d'onda per ogni differente condizione iniziale.

Nella Figura 43 è riportato l'andamento delle altezze del fronte d'onda, in prossimità del blocco 7c e la deviazione standard per alcune prove aventi ciascuna lo stesso tirante iniziale d'acqua nel serbatoio (corrispondente a 20 centimetri). Per tutti i grafici riportati in seguito sono stati considerati solamente gli istanti iniziali del passaggio dell'onda, in quanto, per lo studio del moto incipiente non sono necessari i dati di altezze relativi all'intera prova. Nonostante ciò, per alcuni esperimenti ne è stato ricavato il profilo completo per il confronto con i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati di eco.



**Figura 43: andamento delle altezze e della media relativa a cinque differenti prove con stesso tirante iniziale di 20 cm**

Nel grafico è stato riportato un esempio di analisi con solamente cinque differenti serie di altezze, riferite ad una serie di prove con stesso tirante iniziale, per semplificarne la visualizzazione. Per avere risultati più precisi il confronto deve essere effettuato con un maggior numero di prove.

Nella Figura 44 sono riportati dei grafici che rappresentano l'andamento delle altezze medie per ogni blocco per ogni tirante iniziali d'acqua con cui sono state eseguite le prove:

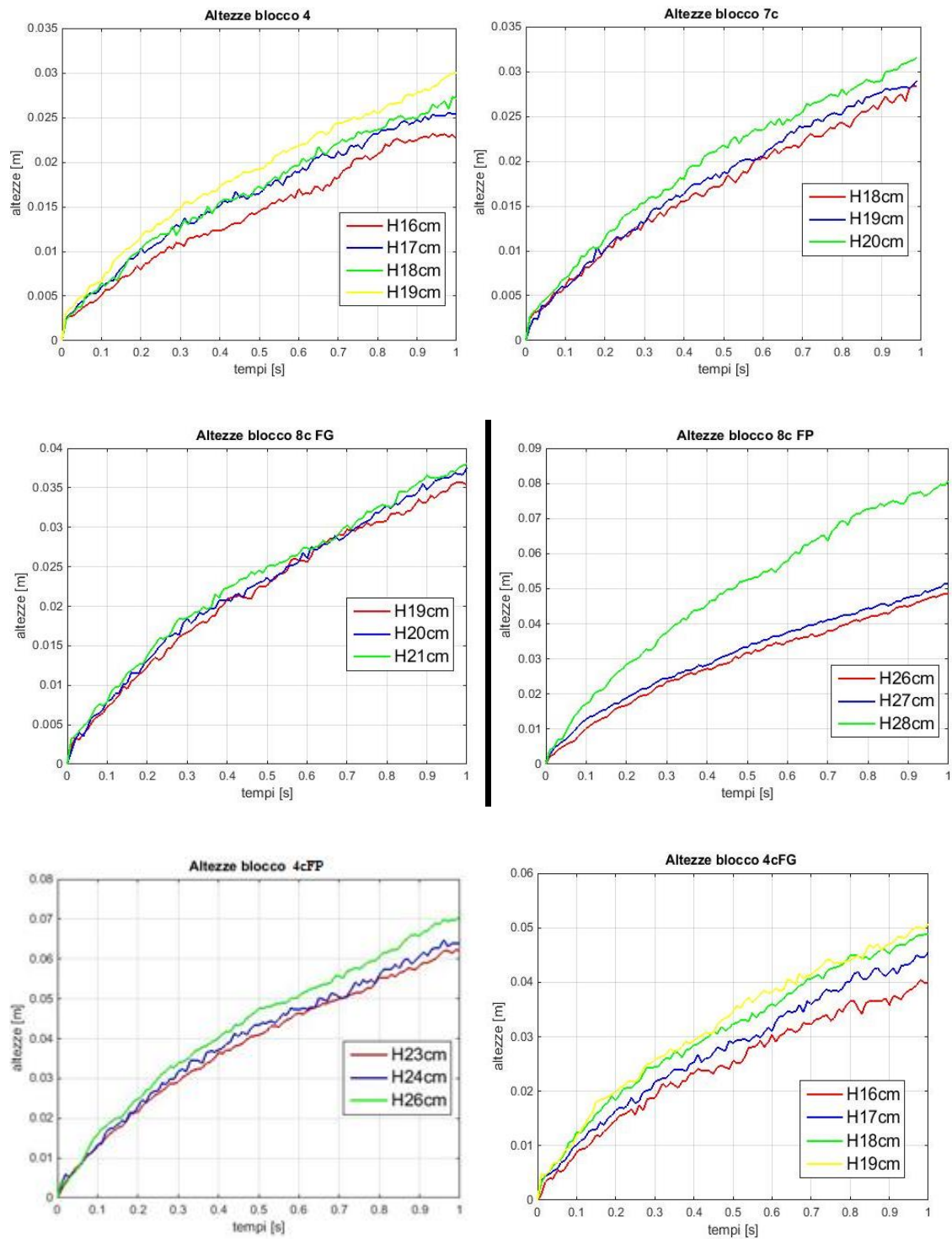


Figura 44: andamento delle altezze medie per i differenti blocchi

Un altro metodo che è stato utilizzato per il calcolo del profilo delle altezze, consiste nell'analisi Matlab dei picchi dei dati di eco ricavati mediante l'utilizzo del velocimetro DOP2000. Infatti, all'arrivo del fronte d'onda si verifica una riflessione molto forte

dell'eco sulla superficie libera, plottando i valori è possibile ottenere il profilo del livello idrico.

Mediante l'utilizzo del software Matlab è stato possibile condurre questa analisi e decidere anche il valore dell'intensità dell'eco da considerare, per ogni prova, per scartare i dati di rumore, Figura 46. In seguito è stata riportata una rappresentazione del profilo di altezze ottenuto, dall'analisi dei picchi dei dati di eco, per le prove eseguite con un tirante iniziale di generazione presente nel serbatoio pari a 20 centimetri, Figura 45.

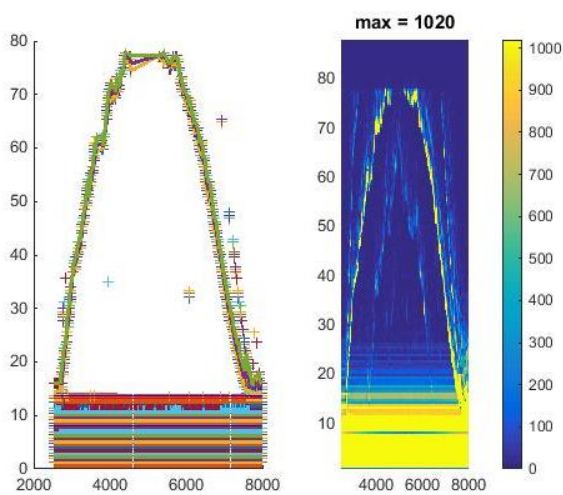


Figura 45: profilo delle altezze (riquadro di sinistra) e profilo dei dati di eco (riquadro a destra)

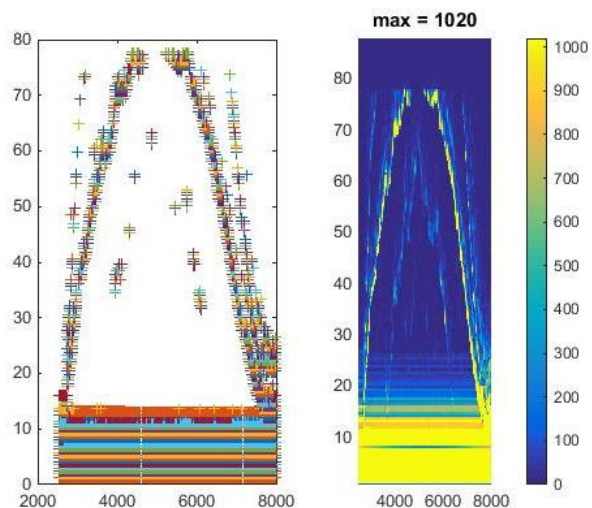


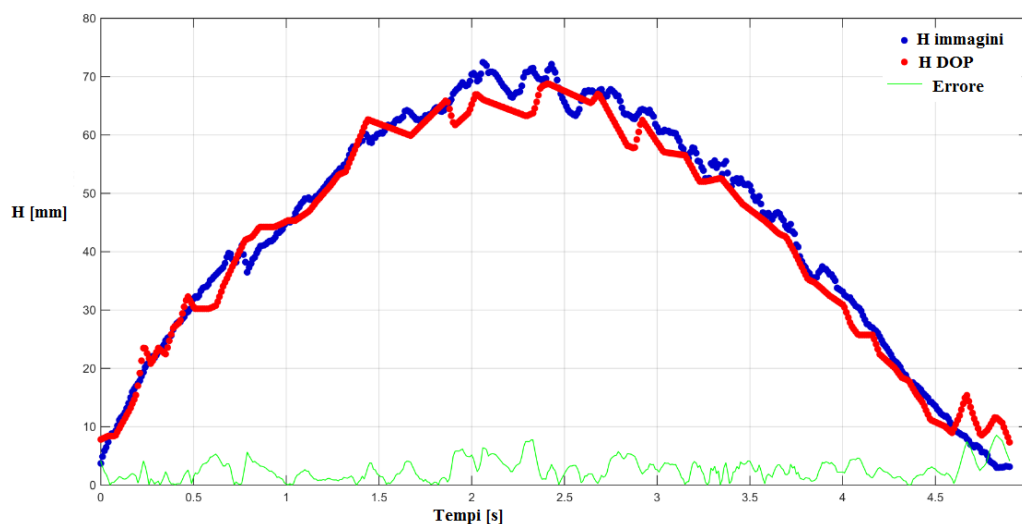
Figura 46: profilo delle altezze (riquadro di sinistra) e profilo dei dati di eco (riquadro di destra). L'intensità dell'eco considerato in questa figura è superiore rispetto alla figura 49, infatti nei dati di livello si può notare un maggior rumore.

Una volta stimati i profili delle altezze e al fine di verificare l'esattezza dei dati di livello ottenuti mediante l'analisi dell'eco si è provveduto a confrontare questi ultimi con quelli ricavati dall'analisi delle immagini.

Il profilo delle altezze del flusso ottenuto dalle immagini è stato utilizzato per calibrare i dati DOP di eco al fine di utilizzarli come dati di livello.

Dal momento che, tra la superficie del flusso ed i velocimetri, posizionati all'interno della rampa, vi è un divisorio in plexiglass, è indispensabile eseguire il confronto dei dati di livello ottenuti dall'analisi dell'eco con i profili di altezze ottenuti dall'elaborazione delle immagini al fine di essere certi che lo strato di plexiglass non possa influire sui dati ottenuti. Nella Fig. 48 viene mostrato l'andamento del profilo di altezze ottenuto dall'analisi dell'eco e quello ottenuto dall'analisi delle immagini.

I valori ottenuti nei due casi sono abbastanza simili, Figura 47, soprattutto nella prima parte del moto fino ad un tempo di circa 2 secondi, dove l'errore è minimo. Le differenze aumentano in prossimità del valore massimo, quindi intorno ad un tempo compreso tra 2 e 2.5 secondi. La causa di tali differenze potrebbe dipendere da imprecisioni nella misura e nell'analisi dei dati per via della presenza di turbolenze o da limitazioni nella misura del DOP in quanto questo dispositivo non vede oltre un'altezza massima di circa 7-8 centimetri.



**Figura 47: confronto delle altezze ricavate tramite analisi delle immagini (blu) e dell'eco (rosso) per un tirante iniziale di acqua pari a 20 centimetri**



Le prove sono state ripetute più volte per avere una maggiore ripetibilità dei dati ma non è stato possibile controllare alcune condizioni iniziali, come l'apertura manuale della paratoia e la quantità d'acqua che rimane nel canale tra una prova e l'altra. Quest'ultima può influire sulla misura dell'altezza e velocità del flusso ripido.

L'errore sulle altezze dipende dalla precisione dell'analisi delle immagini e dell'istante, quindi del frame, in cui si identifica l'inizio del moto del blocco. Conoscendo l'intervallo di acquisizione tra un frame e il successivo, pari a 0.01 secondi, il valore delle altezze corrispondente all'inizio del moto del volumetto oscillerà tra un valore minimo e uno massimo misurato nei due frame precedenti e nei due frame successivi a quello scelto, Tabella 10:

**Tabella 10: Errore sulle minime altezze di inizio del moto riferito a meno due frame e più due frame l'istante considerato**

<b>b7c</b>				<b>b7c_45°</b>			
<i>tirante iniziale</i>	<b>Altezze di inizio moto [m]</b>			<i>tirante iniziale</i>	<b>Altezze di inizio moto [m]</b>		
	Valore min.	Valore considerato	Valore max.		Valore min.	Valore considerato	Valore max.
<b>H18cm</b>	0.011	0.011	0.012	<b>H18cm</b>	0.029	0.03	0.031
<b>H19cm</b>	0.011	0.012	0.012	<b>H19cm</b>	0.019	0.02	0.021
<b>H20cm</b>	0.012	0.011	0.013	<b>H20cm</b>	0.017	0.017	0.018
<b>b4</b>				<b>b4_45°</b>			
<b>H17cm</b>	0.012	0.012	0.013	<b>H17cm</b>	0.027	0.028	0.028
<b>H18cm</b>	0.008	0.008	0.009	<b>H18cm</b>	0.023	0.023	0.023
<b>H19cm</b>	0.006	0.006	0.007	<b>H19cm</b>	0.012	0.013	0.013
<b>b8c_Faccia rettangolare</b>							
<b>H19cm</b>	0.017	0.018	0.018				
<b>H20cm</b>	0.010	0.011	0.012				
<b>H21cm</b>	0.008	0.010	0.010				
<b>b8c_Faccia quadrata</b>							
<b>H26cm</b>	0.016	0.018	0.019				
<b>H27cm</b>	0.012	0.013	0.014				
<b>H28cm</b>	0.013	0.016	0.02				
<b>b4c_Faccia rettangolare</b>							
<b>H17cm</b>	0.010	0.009	0.010				
<b>H18cm</b>	0.010	0.011	0.012				
<b>H19cm</b>	0.011	0.012	0.013				
<b>b4c_Faccia quadrata</b>							
<b>H23cm</b>	0.013	0.014	0.014				
<b>H24cm</b>	0.015	0.015	0.015				
<b>H26cm</b>	0.016	0.016	0.017				

Come si può osservare, l'errore sulle altezze è dell'ordine di  $\pm 0.001$  metri. Solo in alcuni casi è di circa  $\pm 0.002$  metri. E' un errore minimo che provoca minime variazioni sul valore del coefficiente di drag, come calcolato nel capitolo 5.6.

### 6.3 Profilo di velocità ricavato mediante utilizzo del DOP2000

Il profilo delle velocità, invece, è stato ricavato dall'analisi in Matlab dei dati ottenuti mediante l'utilizzo del DOP2000.

Di seguito, sono riportati alcuni grafici ricavati dall'analisi delle velocità del flusso relative alle prove con un'altezza iniziale di generazione pari a 20 centimetri:

- Profilo di velocità media ottenuto direttamente dal velocimetro DOP, Figura 48.

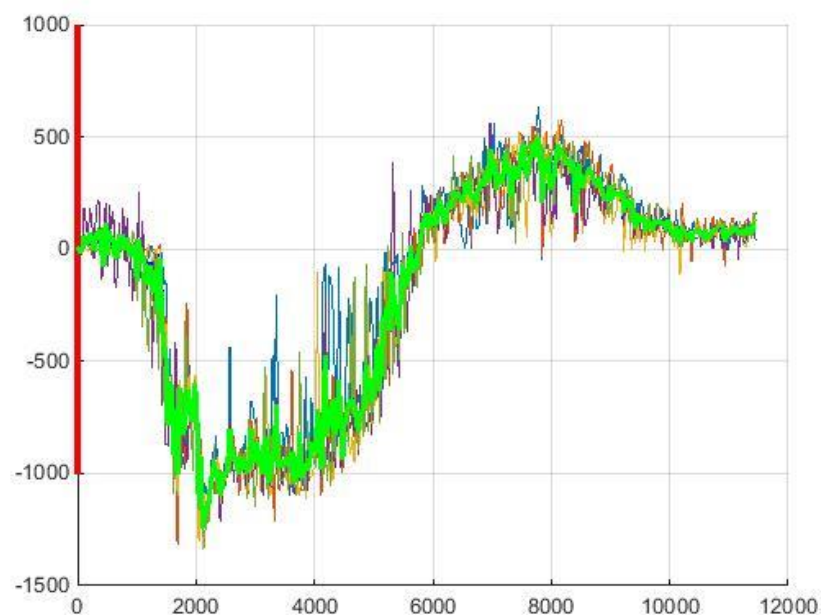
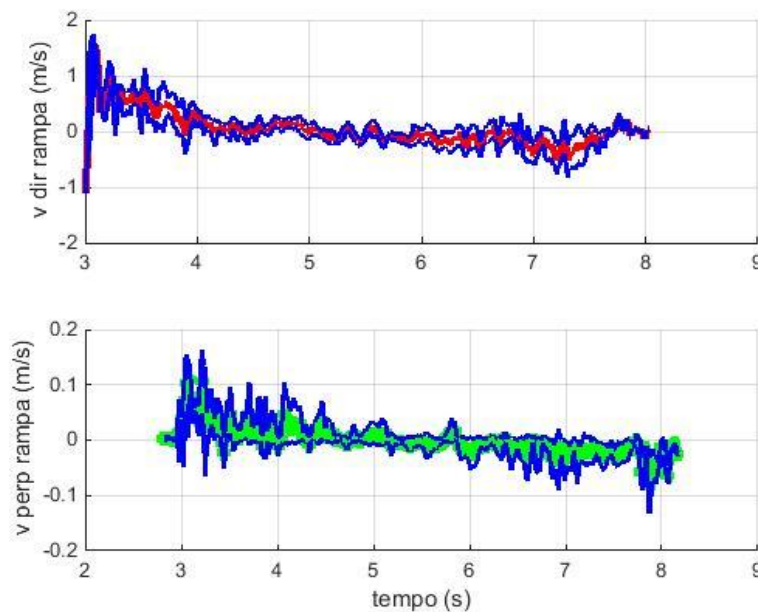


Figura 48: profilo di velocità e andamento della velocità [mm/s] media in verde in funzione del tempo [s]

Per questa prova, è stato considerato un tempo massimo pari a 11500 millisecondi. Si ricorda che, per ogni ripetizione analizzata è necessario definire il tempo massimo entro il quale si vuole eseguire l'analisi dei dati di velocità e di eco. Dalla figura si può vedere il profilo di velocità corrispondente all'onda di bore (velocità negative) e quello

corrispondente all'onda di ritorno (velocità positive). Sempre all'inizio dell'analisi in Matlab è necessario definire la velocità massima e minima da considerare. In questo modo si applica un filtro; eliminando oscillazioni singole troppo elevate o troppo basse che possono essere dovute ad imprecisioni nella misura o alla presenza di vortici.

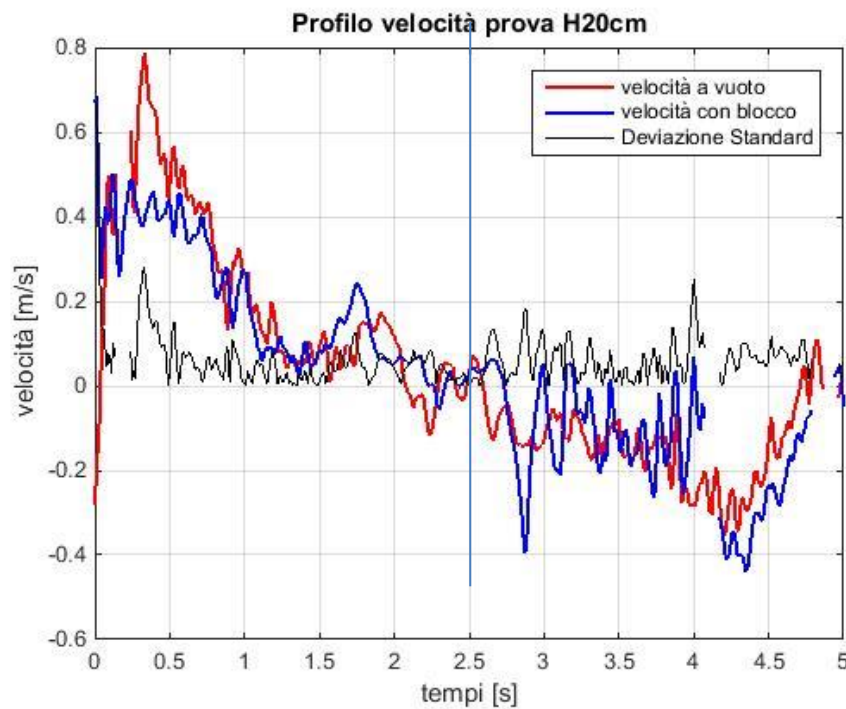
- Profilo delle velocità, parallela e perpendicolare alla rampa, ricavato componendo il vettore di velocità dei dati ottenuti dai due DOP2000 posizionati sulla rampa, Figura 49:



**Figura 49: profilo di velocità e relative velocità medie nella direzione della rampa e perpendicolare alla rampa**

Attraverso lo studio delle componenti delle velocità misurate dal DOP2 e dal DOP3 è stato possibile ottenere la direzione della velocità vera del flusso e le sue proiezioni rispettivamente perpendicolare e parallela alla rampa.

Dall'analisi dei dati DOP è stato possibile osservare come il profilo di velocità media del flusso, la componente nella direzione della rampa, delle prove eseguite a vuoto sia superiore rispetto a quello delle prove eseguite in presenza del volumetto; Figura 50:



**Figura 50: profilo di velocità a vuoto e con blocco**

Considerando solamente l'onda di bore, quindi fino ad un tempo di circa 2.5 secondi, è chiaramente osservabile un abbattimento del picco iniziale della velocità nelle prove con il volumetto, Figura 51. Questo si verifica in quanto la misura delle caratteristiche dell'onda è stata effettuata in prossimità del blocco che disturba la normale propagazione del flusso. Quest'ultimo, infatti, viene perturbato dalla presenza del volumetto. Per questo motivo nell'analisi dei coefficienti adimensionali sono state utilizzate le velocità delle prove a vuoto per avere così dei dati indisturbati. L'influenza del blocco sulla misura si può osservare anche nei dati di livello ricavati dall'analisi delle immagini, Figura 51. Le altezze delle prove effettuate senza il volumetto, infatti, presentano un profilo più simmetrico e senza particolari oscillazioni rispetto a quelle ottenute dall'analisi delle prove in presenza del blocco.

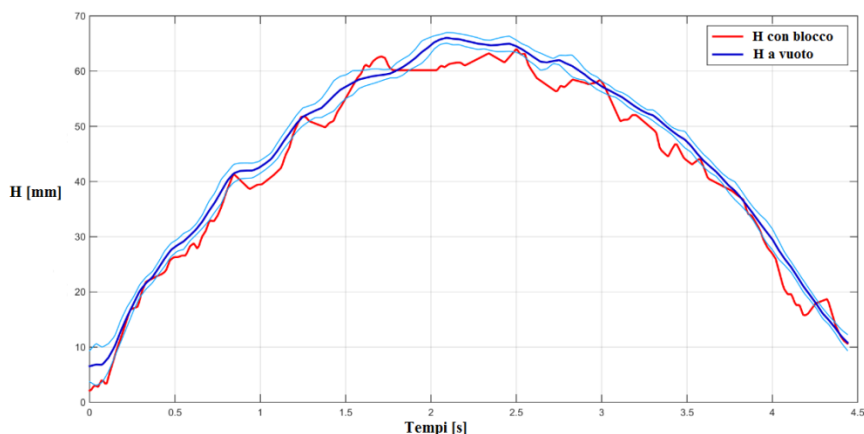


Figura 51: profilo delle altezze nei due casi: prova con blocco e prova a vuoto. In blu viene rappresentato il profilo di altezza media ricavato dall'analisi dei dati DOP, mentre in azzurro la velocità media senza e con la deviazione standard.

Infine, è stato riportato un grafico riassuntivo del confronto tra le altezze e le relative velocità medie del flusso per le prove aventi tirante iniziale di generazione dell'onda pari a 20 centimetri, Figura 52. Dal grafico si possono chiaramente osservare i differenti profili di velocità e altezze medie a seconda che le prove siano state eseguite a vuoto o con il volumetto. Nel profilo delle altezze si distingue chiaramente l'andamento più regolare dei dati di livello relativi alle prove a vuoto. Lo stesso confronto si può osservare per quanto riguarda le velocità del flusso, i dati che si riferiscono alle prove a vuoto presentano un andamento più regolare con minori oscillazioni.

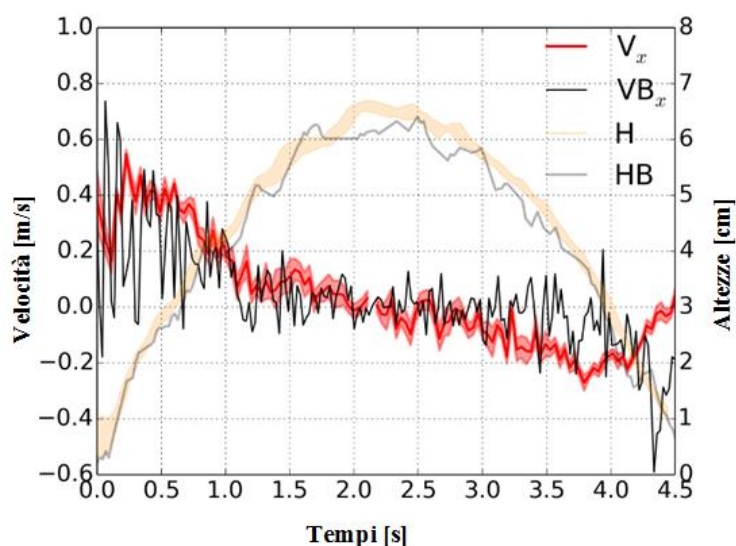


Figura 52: velocità media prove a vuoto e con volumetto con relative altezze d'onda in funzione del tempo.  $V_x$ : velocità a vuoto lungo la rampa,  $V_{B_x}$ : velocità con volumetto, H: altezze a vuoto e HB: altezze con volumetto.

## 6.4 Coefficiente di attrito

Nel caso in esame in cui si analizza il moto incipiente di un blocco inizialmente fermo, posizionato su di una rampa inclinata di un angolo  $\vartheta$  rispetto all'orizzontale, viene considerato solo l'attrito statico. La forza di attrito statico viene espressa come il prodotto tra il coefficiente di attrito e la forza normale esercitata per contatto tra le due superfici. Viene riportato uno schema delle forze agenti sul blocco, Figura 53:

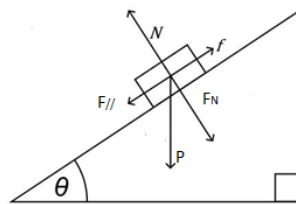


Figura 53: rappresentazione delle forze agenti su un blocco su di un piano inclinato

Nella figura si possono vedere le relazioni dalle quali si ottengono le relative forze agenti sul blocco di massa  $m$ :

- $F_N$  = componente della forza peso nella direzione perpendicolare al piano inclinato =  $mg\cos\vartheta$
- $F_{//}$  = componente della forza peso nella direzione parallela al piano inclinato =  $mg\sin\vartheta$
- $f$  = forza di attrito =  $\mu_s F_N$
- $P$  = forza peso =  $mg$

Nel caso in cui non ci sono sollecitazioni esterne, caso statico, il blocco rimarrà in equilibrio sul piano inclinato finchè la componente della forza peso nella direzione parallela al piano inclinato non sarà superiore alla forza di attrito.

$$F_{//} \geq f = \mu_s F_N \quad (6.2)$$

dove:  $\mu_s$  è il coefficiente di attrito statico

I blocchi sono stati pesati con una bilancia ad alta precisione per determinarne la loro massa.

Il coefficiente di attrito è determinato sperimentalmente posizionando il blocco su di un piano orizzontale, in plexiglas, sul quale è posizionata la rete utilizzata negli esperimenti per simulare l'attrito dovuto alla morfologia del terreno. Variando l'inclinazione del piano, rispetto all'orizzontale, si troverà un angolo  $\vartheta$  per il quale il blocco comincerà a muoversi. L'angolo viene misurato utilizzando un goniometro in acciaio. La tangente di quest'angolo rappresenta il valore del coefficiente di attrito statico  $\mu_s$ . Infatti il blocco, prima dell'inizio del moto è soggetto solo alla forza peso e alla forza di attrito in accordo con la seconda legge della dinamica riportata in seguito:

$$mgsen\vartheta = \mu_s mgcos\vartheta$$

$$\mu_s = tan\vartheta \quad (6.3)$$

Nella Figura 54 viene riportata un'immagine del procedimento di misura del coefficiente di attrito:



**Figura 54: procedimento di misura del coefficiente di attrito**

Per ottenere un valore preciso del coefficiente di attrito, questo procedimento è stato eseguito per ogni blocco considerato, ripetendo la misura più volte per ogni blocco.

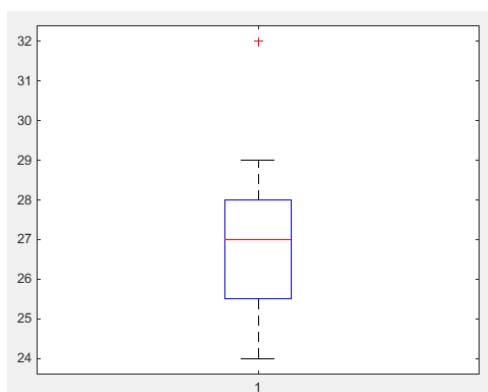
In seguito, tramite funzione *BoxPlot* in Matlab, si è ottenuto il valore preciso del coefficiente di attrito. Il BoxPlot, chiamato anche diagramma a scatola e baffi, è una

procedura statistica non parametrica che è utilizzata per identificare i relativi parametri statistici in un fenomeno in cui non si conosce a priori la distribuzione analitica. L'esame del boxPlot permette quindi, di identificare l'eventuale simmetria della distribuzione considerata. (28) Vengono riportati, Tabella 11, i coefficienti di attrito medi ottenuti relativi ad ogni volumetto:

**Tabella 11: tabella con i relativi coefficienti di attrito per i vari blocchi**

<b>Blocco 4</b>	<b>Blocco 4c</b>	<b>Blocco 7c</b>	<b>Blocco 8c</b>
0,51	0,65	0,50	0,54

Viene anche riportato il BoxPlot ricavato dalle misure dell'angolo di attrito relativo al blocco 7c, Figura 55:



**Figura 55: BoxPlot per ricavare il coefficiente di attrito**

Come si può vedere dalla figura, il BoxPlot è formato da:

- Un rettangolo diviso in due parti, delimitato dal primo e dal terzo quantile rispettivamente  $q_{1/4}$  e  $q_{3/4}$ . La linea rossa che lo divide in due corrisponde alla mediana  $q_{1/2}$ . La lunghezza del rettangolo è data dalla differenza interquartile  $DI$ :

$$DI = q_{\frac{3}{4}} - q_{\frac{1}{4}} \quad (6.4)$$

- Le linee tratteggiate che escono dal rettangolo sono delimitate dal valore massimo e valore minimo trovati nel modo seguente:

$$T_1 = \max(\text{valore minimo}, q_{\frac{1}{4}} - 1.5DI) \quad (6.5)$$

$$T_2 = \min(\text{valore massimo}, q_{\frac{3}{4}} + 1.5DI) \quad (6.6)$$



Dove  $DI$  è la differenza interquartile.

Queste linee ottenute vengono chiamate baffi.

- Le osservazioni il cui valore è più piccolo di  $T_1$  o più grande di  $T_2$  vengono considerate come dati anomali (outlier). Nella figura in alto l'outlier è rappresentato da un segno + in rosso.

Dal grafico riportato sopra si può osservare una leggera asimmetria nella distribuzione dei valori ottenuti. Infatti, la distribuzione di dati è tanto più simmetrica quanto più le lunghezze dei baffi e le altezze dei rettangoli risultano simili tra di loro.

### 6.5 Identificazione dell'inizio del moto del blocco al variare dei parametri

Una volta ottenuti i profili medi della velocità del flusso e delle relative altezze d'onda per le varie prove effettuate, è possibile ricavare le minime velocità e altezze del fronte necessarie ad iniziare il moto dei blocchi nelle varie prove.

Dall'analisi delle immagini è possibile identificare l'attimo in cui il blocco inizia il moto e quindi la relativa altezza minima del flusso. Dal confronto con le altezze ricavate dal DOP è possibile risalire al tempo corrispondente l'inizio del moto ed alla relativa velocità. Questo permette di identificare la corrispondente velocità a vuoto che è stata utilizzata per analizzare le forze agenti sul volumetto e calibrare il coefficiente di drag. In Figura 56 è stato riportato un frame in cui l'onda impatta il blocco 8c:

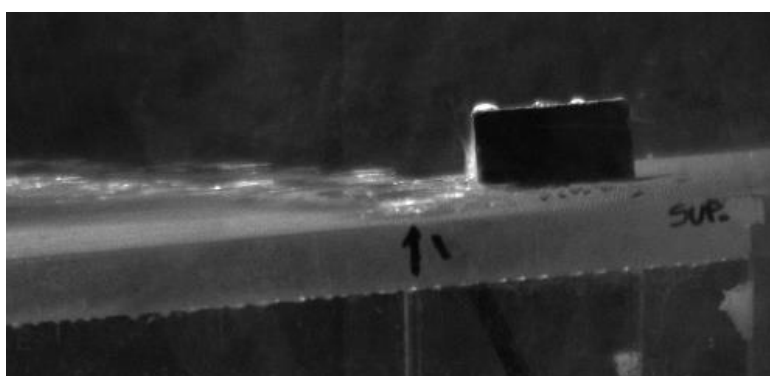


Figura 56: frame in cui l'onda impatta il blocco 8c

Le relative altezze e velocità minime necessarie a causare lo spostamento dei blocchi sono riportate nelle tabelle seguenti:

- Blocco 4 : superficie quadrata perpendicolare al flusso

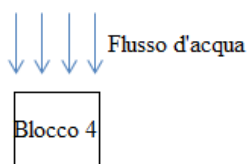


Figura 57: orientamento blocco 4 rispetto direzione di propagazione del flusso

Tabella 12: altezze minime di inizio moto per il blocco 4

Blocco 4 (orientamento perpendicolare alla direzione del flusso)							
Condizioni iniziali di generazione del flusso							
16cm		17cm		18cm		19cm	
<i>H min</i> [m]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]
no moto		1.2	0.296	0.8	0.39	0.6	0.48

- Blocco 4: ruotato di 45° rispetto alla direzione del flusso

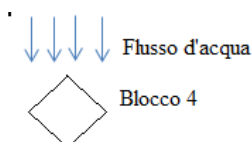


Figura 58: blocco 4 ruotato di 45° rispetto alla direzione di propagazione del flusso

Tabella 13: altezza e velocità minima blocco 4 ruotato di 45° rispetto alla direzione di propagazione del flusso

Blocco 4 - 45°					
Condizioni iniziali di generazione del flusso					
17cm		18cm		19cm	
<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]
2.8	0.24	2.3	0.3	1.3	0.43

- Blocco 7c : superficie quadrata perpendicolare al flusso

Tabella 14: altezza e velocità minima per il blocco 7c

Blocco 7c					
Condizioni iniziali di generazione del flusso					
18cm		19cm		20cm	
<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]
1.1	0.37	1.2	0.455	1.0	0.58

- Blocco 7c: ruotato di 45° rispetto direzione propagazione del flusso (vedi

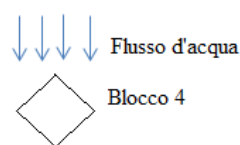


Figura 58)

Tabella 15: altezza e velocità minima per il blocco 7c ruotato di 45°

Blocco 7c - 45°					
Condizioni iniziali di generazione del flusso					
18cm		19cm		20cm	
H min	V min	H min	V min	H min	Vmin
2.8	0.3	1.7	0.46-0.47	1.3	0.52

- Blocco 8c (superficie rettangolare perpendicolare al flusso)

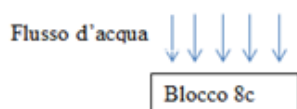


Figura 59: orientamento del blocco 8c rispetto alla direzione del flusso

Tabella 16: altezze minime per il blocco 8c con asse maggiore perpendicolare alla direzione del flusso

Blocco 8c (Asse maggiore perpendicolare al flusso)							
Condizioni iniziali di generazione del flusso							
18cm		19cm		20cm		21cm	
H min [m]	V min [m/s]	H min [cm]	V min [m/s]	H min [cm]	V min [m/s]	H min [cm]	V min [m/s]
no moto		1.7	0.45	1.1	0.54	1.0	0.61

- Blocco 8c (superficie quadrata perpendicolare al flusso)

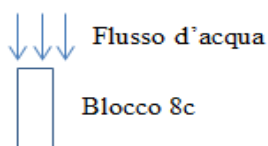


Figura 60: orientamento del blocco 8c rispetto alla direzione di propagazione del flusso

Tabella 17: altezza e velocità minima per il blocco 8c con asse minore perpendicolare alla direzione del flusso

Blocco 8c (Asse minore perpendicolare al flusso)					
Condizioni iniziali di generazione del flusso					
26cm		27cm		28cm	
H min [cm]	V min [m/s]	H min [m]	V min [m/s]	H min [m]	V min [m/s]
0.9	0.93	1.0	1.0	1.3	1.3

- Blocco 4c (superficie rettangolare perpendicolare al flusso)

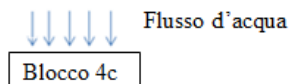


Figura 61: orientamento del blocco 4c rispetto alla direzione di propagazione del flusso

Tabella 18: altezze e velocità minime per il blocco 4c con asse maggiore perpendicolare alla direzione del flusso

<b>Blocco 4c (Asse maggiore perpendicolare al flusso)</b>					
<i>Condizioni iniziali di generazione del flusso</i>					
17cm		18cm		19cm	
<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]
2.0	0.31	1.6	0.38	1.2	0.53

- Blocco 4c (superficie quadrata perpendicolare al flusso)

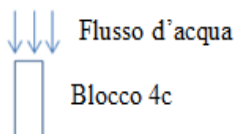


Figura 62: orientamento del blocco 4c rispetto alla direzione di propagazione del flusso

Tabella 19: altezze e velocità minime per il blocco 4c asse minore perpendicolare alla direzione del flusso

<b>Blocco 4c (Asse minore perpendicolare al flusso)</b>					
<i>Condizioni iniziali di generazione del flusso</i>					
23cm		24cm		26cm	
<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]	<i>H min</i> [cm]	<i>V min</i> [m/s]
1.4	0.8	1.3	0.9	1.5	0.8

Nelle tabelle sono state evidenziate in rosso le altezze di generazione per il quale si ha il movimento del blocco solo in alcune delle prove effettuate.

Come si può osservare nelle tabelle precedenti, nelle varie prove eseguite sono stati ottenuti valori di altezze minime di inizio del moto decrescenti con l'aumentare del tirante iniziale di generazione dell'onda presente nel serbatoio. Questo è giustificato dal fatto che, all'aumentare del volume d'acqua iniziale immesso nel serbatoio si generano

onde di dam break con velocità ogni volta superiori. Questo aumento di velocità determina una diminuzione dell'altezza minima necessaria ad iniziare il moto dei volumetti posizionati sulla rampa come è stato possibile osservare dai risultati ottenuti.

A parte minime eccezioni, in tutte le prove è stato stimato lo stesso andamento.

## 6.6 Calibrazione dei coefficienti di drag

Utilizzando un modello semplificato nel quale la forza di drag è considerata come unica forza sollecitante agente sul blocco, è stato possibile calibrare il valore del coefficiente di drag necessario per descrivere le condizioni di inizio del moto dei volumetti nelle varie prove.

Le forze prese in considerazione sono state descritte nel capitolo 2.5. Nel nostro esperimento è stata considerata anche la forza di Archimede. In questo studio la forza di sollevamento non è stata presa in considerazione in quanto i blocchi, inizialmente, non sono totalmente immersi in acqua ma vengono sommersi poco alla volta al passaggio dell'onda.

Una volta ricavate, mediante l'analisi Matlab delle immagini, le serie mediate di altezze del flusso d'acqua relative alle varie prove, è stato possibile calcolare il volume asciutto ed il volume bagnato del blocco istante per istante al passaggio dell'onda. Conoscendo l'altezza minima di inizio del moto, è stato ricavato il corrispondente rapporto di altezza bagnata ( $h$ ) su altezza totale frontale ( $H$ ) del volumetto, Figura 63.

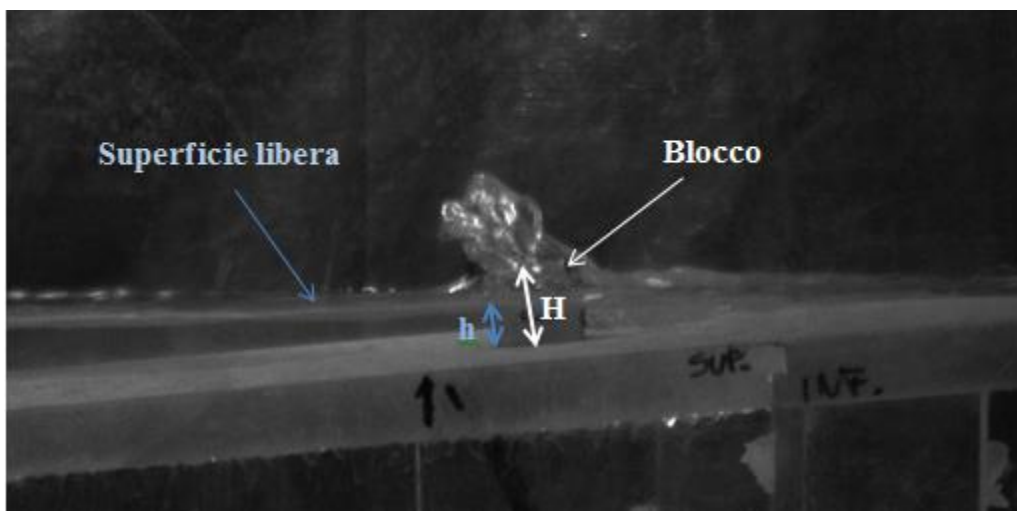


Figura 63: rappresentazione dell'altezza frontale ( $H$ ) del blocco 7c e della relativa altezza bagnata ( $h$ )

Il coefficiente di drag è stato determinato in modo da ottenere l'intersezione della forza stabilizzante e della forza sollecitante del flusso d'acqua in prossimità del corrispondente rapporto  $h/H$  calcolato in precedenza. L'intersezione corrisponde all'istante in cui la forza di drag eguaglia la forza stabilizzante del blocco. Di seguito sono riportate le relazioni utilizzate:

$$\begin{aligned} \text{Peso totale} &= P_{\text{asciutto}} + P_{\text{bagnato}} = \\ &= V_{\text{asciutto}} * \rho_{\text{blocco asciutto}} + V_{\text{bagnato}} * (\rho_{\text{blocco asciutto}} - \rho_{\text{acqua}}) \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\text{Forza stabilizzante} = P_{\text{bagnato} \parallel} + P_{\text{bagnato} \perp} * \mu_s + P_{\text{asciutto} \parallel} + P_{\text{asciutto} \perp} * \mu_s$$

$$\text{Forza di drag} = \frac{1}{2} c_D \rho_w A_{\text{bagnata}} v^2 \quad (6.8)$$

dove:  $v$  è la velocità ricavata dall'analisi delle prove a vuoto,  $A_b$  è l'area bagnata frontale del volumetto, e  $c_D$  è il coefficiente di drag che varia a seconda della prova considerata,  $P_{\parallel}$  è la componente del peso parallela al piano inclinato,  $P_{\perp}$  è la componente del peso perpendicolare al piano e  $\mu_s$  è il coefficiente di attrito statico ricavato precedentemente. Si ricorda che la pendenza della rampa in plexiglass è di  $5.7^\circ$ .

L'intersezione tra le due forze per la prova con tirante iniziale di acqua pari a 20 cm e in presenza del blocco 7c viene riportata nella Figura 64. In questo caso, l'altezza minima di inizio moto è pari a 0.013 metri, che corrisponde ad un'altezza bagnata di circa il 41% dell'altezza totale dell'area frontale del blocco. In funzione di questa percentuale, è stato scelto un coefficiente di drag pari a 0.65.

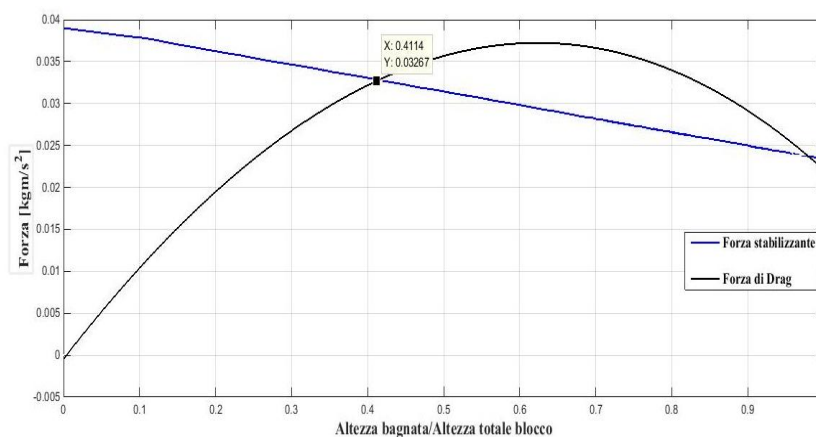


Figura 64: forza di drag e forza stabilizzante per le prove con tirante iniziale di 20 cm in presenza del blocco 7c

Questo procedimento è stato ripetuto per tutte le prove eseguite.

Viene anche riportato un grafico che mostra le differenze nella forza di drag al variare del relativo coefficiente, sempre per il caso con il blocco 7c e un tirante di generazione pari a 20 centimetri, Figura 65.

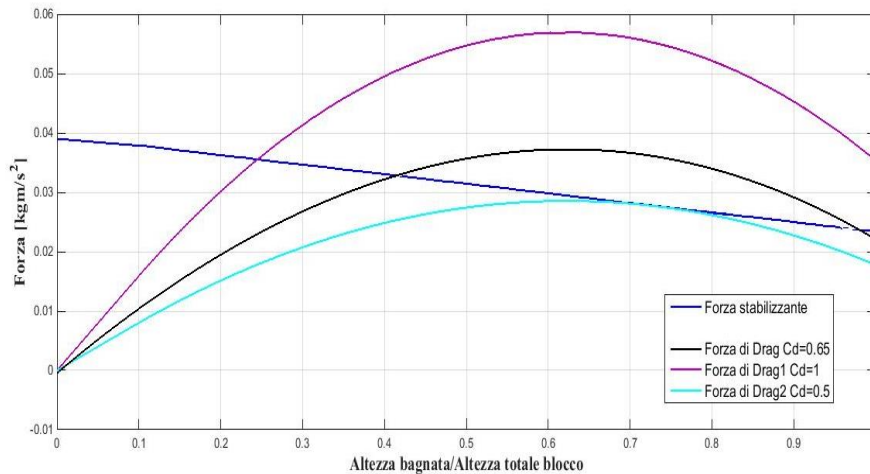


Figura 65: forza stabilizzante e forza di drag con relativo coefficiente pari a 0.5, 0.65, 1

Come si può notare, minore è il coefficiente, maggiore sarà l'area bagnata; per un  $c_D$  pari a 1 si ha il moto per  $h/H$  pari a 25% mentre per un  $c_D$  pari a 0.5 si ha il moto in corrispondenza di  $h/H$  pari a 72%.

Nella Tabella 20 e Tabella 21 sono riportati i coefficienti di drag ottenuti per le prove effettuate in laboratorio. Il confronto è stato effettuato tra prismi aventi la stessa forma e la stessa superficie frontale ortogonale alla direzione di propagazione del flusso. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per i blocchi 4 e 7c:

Tabella 20: coefficienti di drag per il blocco 4 e blocco 7c

b4			
H17cm	H18cm	H19cm	Media
1.6	1.45	1.34	1.46
45°			
H17cm	H18cm	H19cm	Media
1	0.8	0.85	0.88

b7c			
H18cm	H19cm	H20cm	Media
1.35	1.25	1.1	1.23
45°			
H18cm	H19cm	H20cm	Media
1	0.95	0.85	0.81

Come si può osservare nelle tabelle sopra riportate, è possibile affermare che il coefficiente di drag dipende principalmente dalla forma e dall'orientamento del blocco

rispetto alla direzione di propagazione dell'onda. Ad esempio, considerando i volumetti 4 e 7c, posizionati con una faccia ortogonale al flusso, i valori dei coefficienti si possono considerare costanti per entrambi i blocchi nonostante la variazione del tirante iniziale d'acqua presente nel serbatoio. Il valore medio considerato e l'errore minimo misurato sono:

- $c_D = 1.4 \pm 0.2$  per il blocco 4;
- $c_D = 1.2 \pm 0.15$  per il blocco 7c;

La stessa cosa vale per il caso con orientamento ruotato di  $45^\circ$  rispetto alla direzione di propagazione della corrente. I coefficienti si possono considerare costanti con valore medio ed errore minimo riportati in seguito:

- $c_D = 0.8 \pm 0.2$  per il blocco 4;
- $c_D = 0.9 \pm 0.1/0.2$  per il blocco 7c

Il confronto è stato possibile in quanto i blocchi sono entrambi di forma cubica.

Nella Tabella 21 è riportato il confronto tra i coefficienti di drag ottenuti e le rispettive medie per i prismi rettangolari 4c e 8c:

Tabella 21: coefficienti di drag blocchi 8c e 4c

b8c_(superficie rettangolare)			
H19cm	H20cm	H21cm	Media
0.65	0.8	0.65	0.7

b4c_(superficie rettangolare)			
H17cm	H18cm	H19cm	Media
0.65	0.5	0.6	0.6

b8c_(superficie quadrata)			
H26cm	H27cm	H28cm	Media
0.5	0.5	0.3	0.43

b4c_(superficie quadrata)			
H23cm	H24cm	H26cm	Media
0.4	0.3	0.25	0.32

Il confronto è stato effettuato tra i blocchi aventi la stessa faccia ortogonale alla direzione di propagazione del flusso, ad esempio tra il blocco 4c e 8c considerando la faccia rettangolare o quella quadrata.

Anche in questo caso l'errore è minimo e i valori medi sono confrontabili:

- superficie rettangolare ortogonale al fronte d'onda:
  - $c_D = 0.7 \pm 0.1$  per il blocco 8c con valore medio: 0.7



- $c_D = 0.7 \pm 0.1$  per il blocco 4c con valore medio: 0.6
- superficie quadrata ortogonale al fronte d'onda:
  - $c_D = 0.4 \pm 0.1$  per il blocco 8c con valore medio: 0.43
  - $c_D = 0.3 \pm 0.1$  per il blocco 4c con valore medio: 0.32

Come si può notare dai risultati, i valori medi dei coefficienti di drag per i blocchi aventi la stessa forma e orientati con la stessa superficie ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda sono molto simili e in alcuni casi coincidono. Per questo motivo è possibile considerare dei valori medi finali in funzione di ciò:

- $c_D = 1.3$  per i blocchi cubici orientati di  $90^\circ$  rispetto alla direzione di propagazione del flusso;
- $c_D = 0.91$  per i blocchi cubici orientati di  $45^\circ$  rispetto alla direzione di propagazione del flusso;
- $c_D = 0.65$  per i prismi rettangolari con superficie rettangolare rivolta verso la direzione di propagazione del flusso;
- $c_D = 0.4$  per i prismi rettangolari aventi la superficie quadrata rivolta verso la direzione di propagazione del flusso.

Come si può evincere dai risultati ottenuti, per i prismi rettangolari con superficie quadrata ortogonale alla direzione del flusso (blocco 4c e 8c) sono stati ricavati dei coefficienti di drag inferiori rispetto a quelli calcolati negli altri casi. Questo potrebbe essere dovuto ad imprecisioni nella misura che potrebbero essere causate da una maggiore velocità del flusso e dalla presenza di maggiori turbolenze. Come si può notare, nella Tabella 21, i tiranti d'acqua iniziali di generazione presenti nel serbatoio, relativi alle prove con i blocchi 4c e 8c aventi superficie quadrata ortogonale al flusso, sono elevati rispetto a quelli delle altre prove. Questo provoca un aumento delle velocità del flusso e una diminuzione della forza stabilizzante che mantiene in equilibrio il blocco.

Questo studio ha permesso di ottenere differenti coefficienti di drag in funzione della forma e dell'orientamento dei blocchi rispetto alla direzione di propagazione del flusso, con ciò differenziandosi dai precedenti studi condotti da Nandasena (20), Imamura (21), Nott (22) e Benner (17).

Come è stato precedentemente riportato, sia Nandasena (20) che Imamura (21) nei loro esperimenti, in un canale idraulico, hanno sempre considerato un coefficiente di drag costante indipendentemente dalla forma del volumetto considerato e dal relativo orientamento. Anche Nott (22) e Benner (17) hanno sempre considerato un valore costante da inserire nelle equazioni idrodinamiche per il calcolo della minima altezza e velocità d'onda necessaria ad iniziare il moto di un masso roccioso. La scelta di un solo coefficiente potrebbe comportare imprecisioni nella determinazione dell'altezza e velocità d'onda minime necessarie ad iniziare lo spostamento del masso. Negli esperimenti in laboratorio sono stati utilizzati prismi di forma regolare facilmente distinguibile, nella realtà questo non è possibile in quanto i massi trasportati e depositati sulla costa non hanno forme ben definite. Ciò non toglie che comunque si potrebbero effettuare delle classificazioni di massima in funzione della forma e delle dimensioni per poter utilizzare coefficienti di drag diversi a seconda della forma del masso.

In seguito sono riportati i coefficienti di drag utilizzati negli studi precedenti, Tabella 22.

**Tabella 22: coefficienti di drag utilizzati negli studi di Nandasena (20), Nott (22), Benner (17) e Imamura (21)**

	$C_D$
<b>Nandasena</b>	1.92
<b>Nott</b>	1.2
<b>Benner</b>	1.2
<b>Imamura</b>	1.05

Nella Tabella 23 è riportata la variazione del coefficiente di drag in funzione dell'errore sulle altezze minime riportate in Tabella 10:

Tabella 23: errore sul coefficiente di drag

Coefficiente di drag				Coefficiente di drag			
b7c				b7c_45°			
Tirante iniziale	C <sub>d</sub> min	C <sub>d</sub>	C <sub>d</sub> max	Tirante iniziale	C <sub>d</sub> min	C <sub>d</sub>	C <sub>d</sub> max
H18cm	1.35	1.35	1.32	H18cm	1	1	1
H19cm	1.2	1.25	1.25	H19cm	0.7	0.7	0.67
H20cm	1.15	1.1	1.1	H20cm	0.7	0.7	0.64
b4				b4_45°			
H17cm	1.65	1.63	1.61	H17cm	1	1	1
H18cm	1.4	1.4	1.3	H18cm	0.75	0.75	0.75
H19cm	1.25	1.25	1.1	H19cm	0.7	0.8	0.8
b8c_Faccia rettangolare							
H19cm	0.64	0.65	0.63				
H20cm	0.73	0.8	0.86				
H21cm	0.6	0.65	0.72				
b8c_Faccia quadrata							
H26cm	0.5	0.6	0.63				
H27cm	0.44	0.5	0.56				
H28cm	0.23	0.3	0.34				
b4c_Faccia rettangolare							
H17cm	0.58	0.65	0.71				
H18cm	0.67	0.75	0.78				
H19cm	0.59	0.6	0.64				
b4c_Faccia quadrata							
H23cm	0.3	0.4	0.45				
H24cm	0.27	0.31	0.36				
H26cm	0.20	0.25	0.3				

L'errore massimo che si riscontra è compreso tra  $0.15 \div 0.1$ . Negli altri casi l'errore è sempre inferiore, con valori compresi tra 0.01 e 0.06. Nelle prove con i prismi rettangolari gli errori sono minori rispetto a quelle con prismi cubici. Una spiegazione potrebbe essere che i blocchi, a causa delle maggiori dimensioni e densità, siano meno influenzati da minime variazioni della forza dell'onda ricreata determinata dalla variazione del livello d'acqua presente nel serbatoio. Maggiori differenze avrebbero potuto verificarsi usando tiranti iniziali di generazione superiori.

Per quanto riguarda le velocità minime, l'errore ha un'incidenza inferiore sul valore del coefficiente di drag in quanto la misura della velocità avviene ogni 0.032 secondi.

Si sono inoltre calcolate le altezze di moto incipiente inserendo, nel modello sopra descritto, i coefficienti di drag ottenuti da questo studio (vedi capitolo 6.6). I dati di livello così ottenuti sono stati confrontati con le altezze ricavate dall'analisi delle immagini per valutare se i calcoli così effettuati fossero corrispondenti e/o verosimili con quanto osservato negli esperimenti. Nella Tab.24, sono riportati i dati di livello ottenuti e segnatamente:

- in colore nero sono evidenziate le altezze minime di moto incipiente ricavate dall'analisi delle immagini degli esperimenti condotti;
- in colore rosso sono riportati i dati di livello calcolati utilizzando i coefficienti di drag ricavati mediante le formule (6.7) e (6.8) funzione della forma e dell'orientamento iniziale dei blocchi all'interno del canale;
- in colore verde sono riportate le restanti altezze che corrispondono a quelle ottenute utilizzando i coefficienti di drag proposti da Nandasena (20), Benner (17) e Nott (22) e Imamura (21).

**Tabella 24: confronto tra le altezze di inizio moto ottenute dal modello sviluppato utilizzando differenti coefficienti di drag per i blocchi 4 e 7c**

	<b>b4</b>			<b>b7c</b>		
	Altezze di inizio del moto [m]					
	<b>H17cm</b>	<b>H18cm</b>	<b>H19cm</b>	<b>H18cm</b>	<b>19cm</b>	<b>H20cm</b>
<b>Immagini</b>	<b>0.012</b>	<b>0.008</b>	<b>0.006</b>	<b>0.011</b>	<b>0.012</b>	<b>0.010</b>
<b><math>C_D</math> (lab) = 1.3</b>	<b>0.010</b>	<b>0.009</b>	<b>0.006</b>	<b>0.012</b>	<b>0.010</b>	<b>0.008</b>
<b><math>C_D</math> = 1.95</b>	<b>0.008</b>	<b>0.005</b>	<b>0.003</b>	<b>0.007</b>	<b>0.006</b>	<b>0.005</b>
<b><math>C_D</math> = 1.2</b>	<b>no</b>	<b>0.009</b>	<b>0.006</b>	<b>0.015</b>	<b>0.012</b>	<b>0.009</b>
<b><math>C_D</math> = 1.05</b>	<b>no</b>	<b>0.01</b>	<b>0.007</b>	<b>No</b>	<b>0.015</b>	<b>0.01</b>

**Tabella 25: confronto tra le altezze di moto incipiente per i blocchi 4 e 7c ruotati di 45° rispetto alla direzione di propagazione del flusso**

	<b>b4_45°</b>			<b>b7c_45°</b>		
	Altezze di inizio del moto [m]					
	<b>H17cm</b>	<b>H18cm</b>	<b>H19cm</b>	<b>H18cm</b>	<b>H19cm</b>	<b>H20cm</b>
<b>Immagini</b>	<b>0.028</b>	<b>0.023</b>	<b>0.013</b>	<b>0.028</b>	<b>0.017</b>	<b>0.013</b>
<b><math>C_D</math> (lab) = 0.92</b>	<b>0.029</b>	<b>0.018</b>	<b>0.011</b>	<b>0.030</b>	<b>0.014</b>	<b>0.013</b>
<b><math>C_D</math> = 1.95</b>	<b>0.011</b>	<b>0.009</b>	<b>0.005</b>	<b>0.013</b>	<b>0.005</b>	<b>0.006</b>
<b><math>C_D</math> = 1.2</b>	<b>0.020</b>	<b>0.014</b>	<b>0.008</b>	<b>0.020</b>	<b>0.011</b>	<b>0.009</b>
<b><math>C_D</math> = 1.05</b>	<b>0.025</b>	<b>0.016</b>	<b>0.010</b>	<b>0.024</b>	<b>0.012</b>	<b>0.011</b>

Tabella 26: confronto tra le altezze di moto incipiente per i blocchi 4c e 8c con superficie rettangolare ortogonale alla direzione di propagazione del flusso

	b8c_FG			b4c_FG		
	Altezze di inizio del moto [m]					
	H19cm	H20cm	H21cm	H17cm	18cm	H19cm
<b>Immagini</b>	<b>0.017</b>	<b>0.011</b>	<b>0.010</b>	<b>0.018</b>	<b>0.016</b>	<b>0.010</b>
<b><math>C_D</math> (lab) = 0.65</b>	<b>0.017</b>	<b>0.013</b>	<b>0.010</b>	<b>0.018</b>	<b>0.012</b>	<b>0.009</b>
<b><math>C_D = 1.95</math></b>	<b>0.004</b>	<b>0.004</b>	<b>0.003</b>	<b>0.007</b>	<b>0.005</b>	<b>0.005</b>
<b><math>C_D = 1.2</math></b>	<b>0.007</b>	<b>0.007</b>	<b>0.005</b>	<b>0.01</b>	<b>0.007</b>	<b>0.006</b>
<b><math>C_D = 1.05</math></b>	<b>0.01</b>	<b>0.008</b>	<b>0.006</b>	<b>0.012</b>	<b>0.007</b>	<b>0.006</b>

Tabella 27: confronto tra le altezze di moto incipiente per i blocchi 4c e 8c con superficie quadrata ortogonale alla direzione di propagazione del flusso

	b8c_FP			b4c_FP		
	Altezze di inizio del moto [m]					
	H26cm	H27cm	H28cm	H23cm	24cm	H26cm
<b>Immagini</b>	<b>0.009</b>	<b>0.010</b>	<b>0.011</b>	<b>0.014</b>	<b>0.013</b>	<b>0.015</b>
<b><math>C_D</math> (lab) = 0.4</b>	<b>0.012</b>	<b>0.009</b>	<b>0.007</b>	<b>0.015</b>	<b>0.013</b>	<b>0.010</b>
<b><math>C_D = 1.95</math></b>	<b>0.003</b>	<b>0.003</b>	<b>0.003</b>	<b>0.004</b>	<b>0.003</b>	<b>0.004</b>
<b><math>C_D = 1.2</math></b>	<b>0.004</b>	<b>0.004</b>	<b>0.002</b>	<b>0.005</b>	<b>0.005</b>	<b>0.005</b>
<b><math>C_D = 1.05</math></b>	<b>0.005</b>	<b>0.005</b>	<b>0.005</b>	<b>0.006</b>	<b>0.004</b>	<b>0.004</b>

Come si può osservare dalle tabelle n. 24,25,26 e 27, le altezze ottenute nel presente studio sono molto simili alle altezze minime rilevate dall'analisi delle immagini degli esperimenti condotti. Al contrario, si riscontrano maggiori differenze nell'analisi delle altezze ottenute utilizzando, nel modello, i coefficienti di drag proposti in letteratura e qui considerati per confronto.

L'utilizzo del coefficiente di drag proposto da Nandasena (20) permette di ottenere dei valori di altezze che sottostimano quelli osservati in laboratorio, al contrario, i valori dei coefficienti proposti da Benner (17), Nott (22) e Imamura (21) permettono di ottenere livelli d'acqua abbastanza simili nel caso dei blocchi 4 e 7c, mentre, per i blocchi 8c e 4c si ottengono valori che discostano parecchio dalle condizioni osservate.

## 7. Confronto dati di altezza e velocità minima ricavati sperimentalmente con quelli ottenuti da studi precedenti

E' stato eseguito anche un ulteriore confronto tra i risultati ottenuti negli esperimenti condotti presso il laboratorio di Idraulica di Bologna e quelli ricavati utilizzando equazioni idrodinamiche proposte in studi precedenti.

Nelle formule idrodinamiche sono stati utilizzati i coefficienti di drag, Inerzia e lift proposti dai vari ricercatori, mentre, per le caratteristiche fisiche dei blocchi (forma, dimensioni e densità) sono stati inseriti i valori di quelle dei prismi creati nel laboratorio di Bologna.

Il primo dato messo a confronto riguarda le altezze minime necessarie per iniziare il moto dei blocchi come si può osservare nella Tabella 28.

Tabella 28: altezze minime secondo Nandasena, Benner e gli studi condotti nel laboratorio di Bologna

### Altezze minime di inizio moto [m]

Blocco 4						
Nott		Benner	Esperimenti laboratorio Bologna			
<i>Masso non immerso in acqua</i>	<i>Masso immerso in acqua</i>		<i>H17cm</i>	<i>H18cm</i>	<i>H19cm</i>	
-0.0235	0.0098	0.0078	0.012	0.008	0.006	
						<b>Media</b>
						0.0087

Blocco 7c						
Nott		Benner	Esperimenti laboratorio Bologna			
<i>Masso non immerso in acqua</i>	<i>Masso immerso in acqua</i>		<i>H18cm</i>	<i>H19cm</i>	<i>H20cm</i>	
-0.036	0.015	0.012	0.011	0.012	0.011	
						<b>Media</b>
						0.011

Blocco 8c_superficie rettangolare ortogonale alla direzione del flusso						
Nott		Benner	Esperimenti laboratorio Bologna			
<i>Masso non immerso in acqua</i>	<i>Masso immerso in acqua</i>		<i>H19cm</i>	<i>H20cm</i>	<i>H21cm</i>	
-0.044	0.018	0.014	0.017	0.011	0.010	
						<b>Media</b>
						0.015

Blocco 8c_superficie quadrata ortogonale alla direzione del flusso						
Nott		Benner	Esperimenti laboratorio Bologna			
<i>Masso non immerso in acqua</i>	<i>Masso immerso in acqua</i>		<i>H26cm</i>	<i>H27cm</i>	<i>H28cm</i>	
-0.024	0.01	0.043	0.009	0.010	0.013	
						<b>Media</b>
						0.011

Blocco 4c_superficie rettangolare ortogonale alla direzione del flusso						
Nott		Benner	Esperimenti laboratorio Bologna			
<i>Masso non immerso in acqua</i>	<i>Masso immerso in acqua</i>		<i>H17cm</i>	<i>H18cm</i>	<i>H19cm</i>	
-0.024	0.01	0.007	0.02	0.016	0.012	
						<b>Media</b>
						0.016

Blocco 4c_superficie rettangolare ortogonale alla direzione del flusso						
Nott		Benner	Esperimenti laboratorio Bologna			
<i>Masso non immerso in acqua</i>	<i>Masso immerso in acqua</i>		<i>H23cm</i>	<i>H24cm</i>	<i>H26cm</i>	
-0.013	0.005	0.023	0.014	0.013	0.015	
						<b>Media</b>
						0.014

I dati delle altezze ricavati mediante la relazione di Nott per massi con posizione iniziale non immersa in acqua sono sempre negativi (risultato impossibile in natura) quindi non attendibili, mentre, quelli con posizione iniziale immersa in acqua solo in alcuni casi presentano delle similitudini con quelli di questo studio.

La presenza di risultati negativi potrebbe essere dovuta alla non applicabilità delle formule su scala ridotta.

Per quanto riguarda le altezze, ricavate utilizzando la relazione proposta da Benner, i dati ottenuti si avvicinano molto ai valori medi delle altezze ricavate in laboratorio con vari tiranti iniziali di generazione, tranne alcuni casi nei quali le differenze aumentano anche in modo considerevole (cfr. blocco 8c faccia quadrata ortogonale al flusso).

Queste differenze tra i dati di livello possono essere dovute all'uso di valori differenti del coefficiente della forza di drag, d'inerzia e di lift. Si ricorda che, nello studio condotto in laboratorio a Bologna, la forza d'inerzia e quella di lift sono state trascurate.

In laboratorio, inoltre, sono stati ottenuti diversi valori di altezze d'onda a seconda del tirante iniziale di generazione presente nel serbatoio, al contrario, nelle equazioni idrodinamiche di Nott e Benner non viene effettuata nessuna distinzione di questo tipo.

A questo punto, sempre con le medesime relazioni e con gli stessi procedimenti di calcolo, si è provveduto ad eseguire il confronto delle altezze minime di inizio del moto con i volumetti in scala reale anziché in similitudine di Froude 1:100, Tabella 29.

**Tabella 29: dimensioni reali dei blocchi utilizzati in laboratorio**

	Dimensioni [m]		
<b>Blocco 4</b>	a=3	b=3	c=3
<b>Blocco 7c</b>	a=3	b=3	c=3
<b>Blocco 8c</b>	a=3	b=3	c=5.5
<b>Blocco 4c</b>	a=3	b=3	c=5.5

**Tabella 30: altezze minime di moto a scala reale**

Altezze minime di inizio moto [m]				
Blocco 4				
Nott		Benner	Altezza media esperimenti laboratorio Bologna	
Non immerso	Immerso			
0.94	0.98	0.78	0.8	

Blocco 7c				
Nott		Benner	Altezza media esperimenti laboratorio Bologna	
Non immerso	Immerso			
1.5	1.5	1.28	1.1	



<b>Blocco 8c_faccia rettangolare</b>			
<b>Nott</b>		<b>Benner</b>	<b>Altezza media esperimenti laboratorio Bologna</b>
<i>Non immerso</i>	<i>Immerso</i>		
1.78	1.85	1.48	1.5

<b>Blocco 8c_faccia quadrata</b>			
<b>Nott</b>		<b>Benner</b>	<b>Altezza media esperimenti laboratorio Bologna</b>
<i>Non immerso</i>	<i>Immerso</i>		
0.97	1	4.3	1.0

<b>Blocco 4c_faccia rettangolare</b>			
<b>Nott</b>		<b>Benner</b>	<b>Altezza media esperimenti laboratorio Bologna</b>
<i>Non immerso</i>	<i>Immerso</i>		
1	1	0.78	1.6

<b>Blocco 4c_faccia quadrata</b>			
<b>Nott</b>		<b>Benner</b>	<b>Altezza media esperimenti laboratorio Bologna</b>
<i>Non immerso</i>	<i>Immerso</i>		
0.54	0.56	2.3	1.4

Come si può osservare dai dati sopra riportati, i risultati ottenuti nel laboratorio di Bologna sono abbastanza simili a quelli ottenuti attraverso l'utilizzo dei parametri e della formula proposti da Benner. Solo nel caso del blocco 8c, con faccia quadrata ortogonale alla direzione di propagazione della corrente, e del blocco 4c si osserva una certa differenza tra i dati di livello. Differenza che si riscontra anche nei calcoli effettuati in scala ridotta.

I risultati ottenuti tramite l'utilizzo delle formule di Nott (capitolo 4.1), nel caso dei blocchi 4, 7c e 8c (superficie rettangolare), non presentano una grande differenza con i dati ottenuti in laboratorio a Bologna, al contrario le diversità aumentano con riferimento al blocco 4c e ai rispettivi orientamenti. Si può notare un rilevante scostamento dei valori per il blocco 4c (superficie quadrata ortogonale alla direzione del flusso) dove, considerando un masso non immerso, si ha una differenza massima di altezza ottenuta di circa 0.86 metri rispetto al valore di livello ricavato nel presente studio. La causa di ciò potrebbe essere ricondotta, come riportato in precedenza, all'utilizzo di valori differenti dei coefficienti adimensionali di lift, drag e inerzia e dei coefficienti di attrito.

Il secondo confronto è stato effettuato utilizzando i dati di velocità minima [m/s] ottenuti nelle varie ripetizioni, Tabella 31:

**Tabella 31: confronto con i risultati ottenuti in laboratorio a Bologna dei dati di velocità minima [m/s] ottenuti utilizzando le relazioni idrodinamiche di Nandasena, Benner, Nott e Paris**

Blocco 4							
Nott	Benner	Nandasena		Paris	Laboratorio di Bologna		
<i>Non immerso</i>		<i>Moto radente</i>	<i>Rotolamento</i>		<i>H17cm</i>	<i>H18cm</i>	<i>H19cm</i>
0.48	0.57	0.53	0.52	0.49	0.29	0.38	0.48

Blocco 7c							
Nott	Benner	Nandasena		Paris	Laboratorio di Bologna		
<i>Non immerso</i>		<i>Moto radente</i>	<i>Rotolamento</i>		<i>H18cm</i>	<i>H19cm</i>	<i>H20cm</i>
0.6	0.64	0.67	0.66	0.6	0.37	0.45	0.59

Blocco 8c_ superficie rettangolare							
Nott	Benner	Nandasena		Paris	Laboratorio di Bologna		
<i>Non immerso</i>		<i>Moto radente</i>	<i>Rotolamento</i>		<i>H19cm</i>	<i>H20cm</i>	<i>H21cm</i>
1.86	0.7	0.71	0.7	0.88	0.46	0.54	0.61

Blocco 8c_ superficie quadrata							
Nott	Benner	Nandasena		Paris	Laboratorio di Bologna		
<i>Non immerso</i>		<i>Moto radente</i>	<i>Rotolamento</i>		<i>H26cm</i>	<i>H27cm</i>	<i>H28cm</i>
0.48	0.94	0.94	0.95	0.65	0.93	1.0	1.3

Blocco 4c_ superficie rettangolare							
Nott	Benner	Nandasena		Paris	Laboratorio di Bologna		
<i>Non immerso</i>		<i>Moto radente</i>	<i>Rotolamento</i>		<i>H17cm</i>	<i>H18cm</i>	<i>H19cm</i>
0.49	0.52	0.53	0.52	0.49	0.31	0.38	0.53

Blocco 4c_ superficie quadrata							
Nott	Benner	Nandasena		Paris	Laboratorio di Bologna		
<i>Non immerso</i>		<i>Moto radente</i>	<i>Rotolamento</i>		<i>H23cm</i>	<i>H24cm</i>	<i>H26cm</i>
0.36	0.7	0.7	0.7	0.48	0.77	0.90	0.89

Analizzando i dati di velocità minima ottenuti in seguito ai vari esperimenti, (cfr. tabella superiore), si può inizialmente constatare che, all'aumentare del volume d'acqua iniziale contenuto nel serbatoio - necessario per generare l'onda di dam break - si presenta una maggiore corrispondenza dei risultati ottenuti nel laboratorio di Bologna con quelli

ottenuti dagli studi precedenti. Mentre, con tiranti iniziali d'acqua minori, i risultati si discostano maggiormente da quelli da noi ottenuti.

Pertanto si può ipotizzare che maggiore è il volume d'acqua con cui è stata generata l'onda di dam break più simili, sono i valori di velocità minima, ottenuti in laboratorio, rispetto a quelli ricavati dagli studi precedenti.

In conclusione, si rileva che i risultati ottenuti sperimentalmente nel laboratorio di Bologna, si allineano maggiormente a quelli ottenuti utilizzando le relazioni proposte dagli studi precedenti nelle ipotesi in cui la velocità del flusso e l'altezza d'acqua iniziale presente nel serbatoio siano elevate.

## 8. Conclusioni

Negli esperimenti condotti e descritti in questo elaborato è stata simulata e studiata la forza che un'onda lunga, generata mediante Dam Break in un canale idraulico, esercita su dei blocchi prismatici - posizionati su una rampa inclinata di  $5.7^\circ$  inserita all'interno del canale - causando il movimento di questi ultimi.

Mediante questi esperimenti è stato possibile determinare le altezze e velocità minime del fronte d'onda necessarie ad iniziare lo spostamento dei volumetti aventi differente forma, densità e posizione iniziale.

Utilizzando i dati di livello e di velocità minima ricavati, è stato inoltre possibile calibrare i coefficienti di drag, utilizzando un modello semplificato, per descrivere la variazione della forza sollecitante che il flusso d'acqua esercita sui blocchi prismatici.

I risultati di altezza e velocità minima, ottenuti in laboratorio, sono stati poi confrontati con i dati ricavati da studi in letteratura (Nott (22), Nandasena (18), Benner (17) e Paris (12) ) per valutarne l'attendibilità. Il confronto è stato eseguito sia a scala reale sia in similitudine di Froude 1:100.

Sulla base delle altezze minime ottenute, è stato possibile osservare che, l'equazione idrodinamica di Nott (22), per il caso di massi non immersi in acqua, non è applicabile agli esperimenti condotti in similitudine di Froude 1:100. Mentre, a scala reale, sia le relazioni presentate da Benner (17) sia quelle di Nandasena (18) presentano valori simili ai risultati ottenuti in laboratorio a Bologna tranne alcuni casi in cui si hanno importanti scostamenti dei valori. Causa di ciò potrebbe essere dovuta all'utilizzo di differenti valori dei coefficienti di lift, di drag e d'inerzia.

I dati di velocità ottenuti, sia attraverso l'utilizzo delle relazioni idrodinamiche sia quelli osservati in laboratorio, tendono a essere sempre più simili con l'aumentare della forza dell'onda generata ovvero con l'aumentare del volume d'acqua iniziale presente nel serbatoio.

La parte più importante di questo studio ha riguardato, invece, il calcolo del coefficiente di drag. Negli studi in letteratura, è sempre stato utilizzato lo stesso coefficiente di drag per ogni altezza e velocità minima ottenuta, Tabella 32:

**Tabella 32: coefficienti di drag utilizzati negli studi precedenti**

	$C_D$
<b>Nandasena</b>	1.92
<b>Nott</b>	1.2
<b>Benner</b>	1.2
<b>Imamura</b>	1.05

Attraverso il presente studio è stato possibile calibrare e proporre dei coefficienti di drag variabili in funzione della forma e dell'orientamento iniziale dei blocchi rispetto alla direzione di propagazione del flusso, Tabella 33:

**Tabella 33: coefficienti di drag proposti dallo studio effettuato in laboratorio a Bologna**

<b>Coefficiente di drag</b>	
<b>1.3</b>	<i>Prismi cubici orientati di 90° rispetto alla direzione di propagazione del flusso</i>
<b>0.9</b>	<i>Prismi cubici orientati di 45° rispetto alla direzione di propagazione del flusso</i>
<b>0.65</b>	<i>Prismi rettangolari con superficie rettangolare ortogonale alla direzione di propagazione del flusso</i>
<b>0.4</b>	<i>Prismi rettangolari con superficie quadrata ortogonale alla direzione di propagazione del flusso</i>

La variabilità del coefficiente di drag, così ottenuto, potrebbe essere un ulteriore elemento da considerare per ottenere risultati più accurati negli studi riguardanti il calcolo delle caratteristiche (altezza e velocità) di un'onda di tsunami responsabile del trasposto dei massi. Oltre ciò, si potrebbero tenere in considerazione ed analizzare altre forze, come ad esempio, la forza di lift o di inerzia che potrebbero essere utilizzate per uno studio più accurato.

Attraverso il confronto tra i dati di livello ottenuti analiticamente e quelli osservati dalle immagini è stato possibile stabilire l'attendibilità del modello studiato. In seguito sono riportati i grafici che riportano il confronto tra le altezze ottenute mediante l'analisi delle immagini e quelle ottenute utilizzando il modello e i coefficienti di drag descritti in questo scritto e proposti in letteratura.

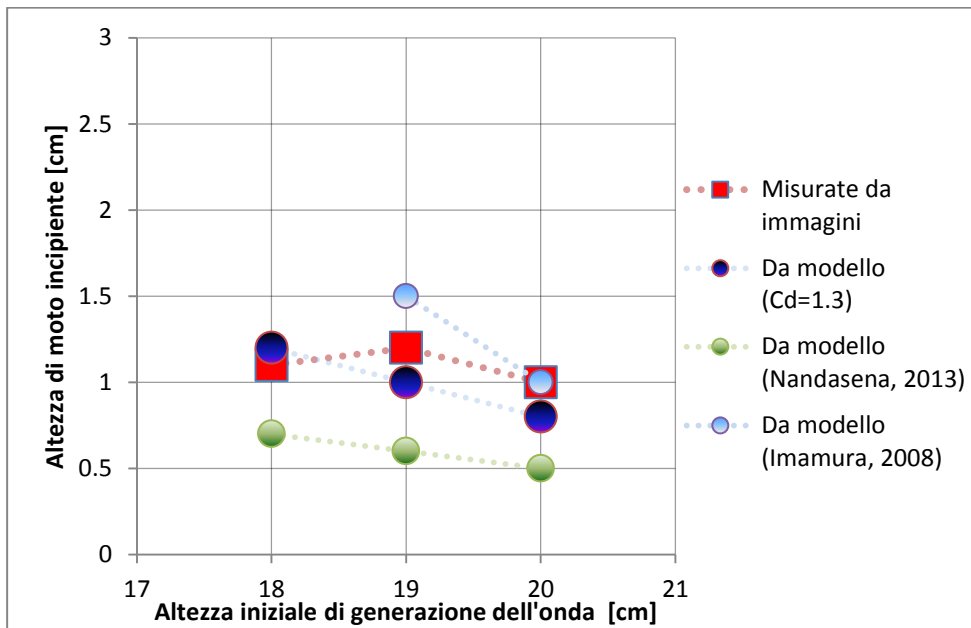


Figura 66: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 7c

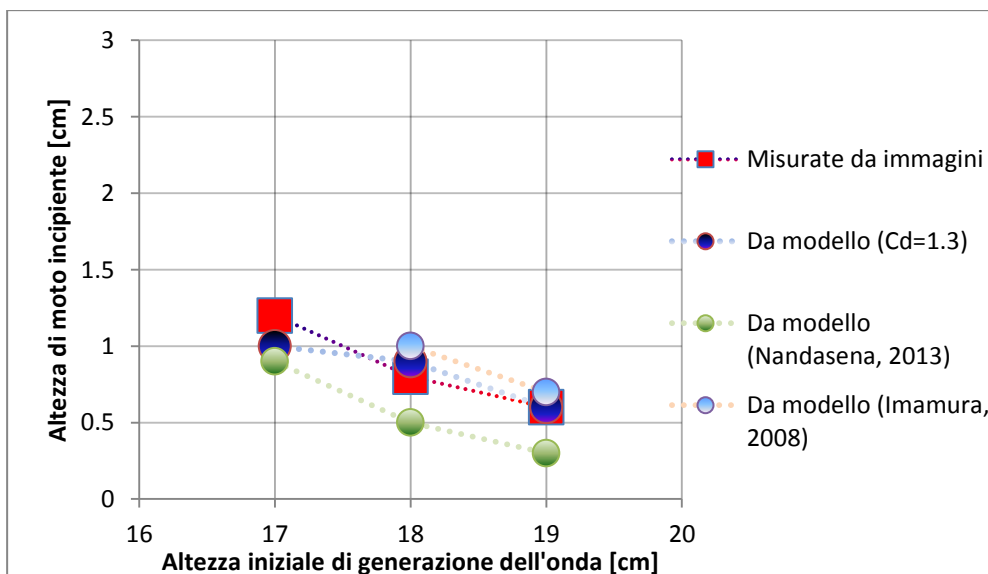


Figure 67: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 4

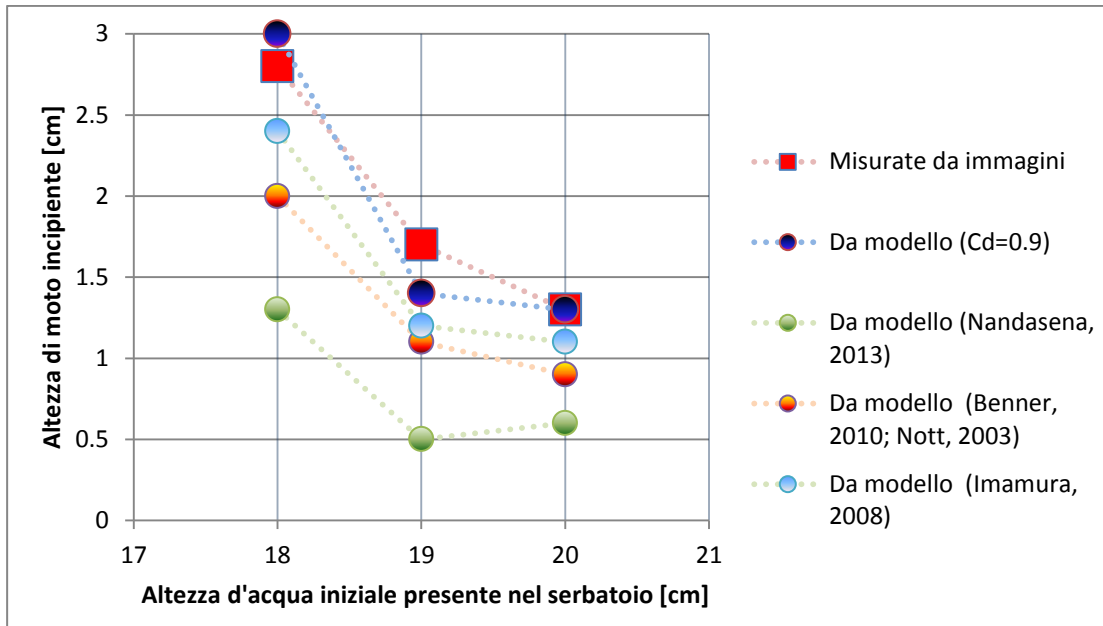


Figura 68: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 7c ruotato di 45° rispetto alla direzione di propagazione del flusso

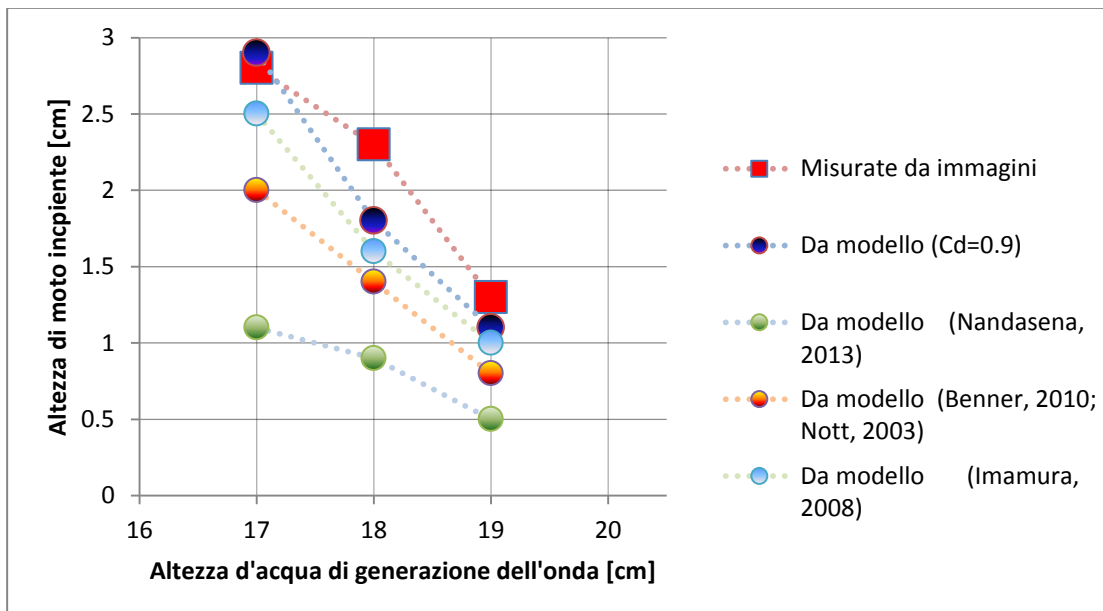


Figura 69: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 4 ruotato di 45° rispetto alla direzione di propagazione del flusso

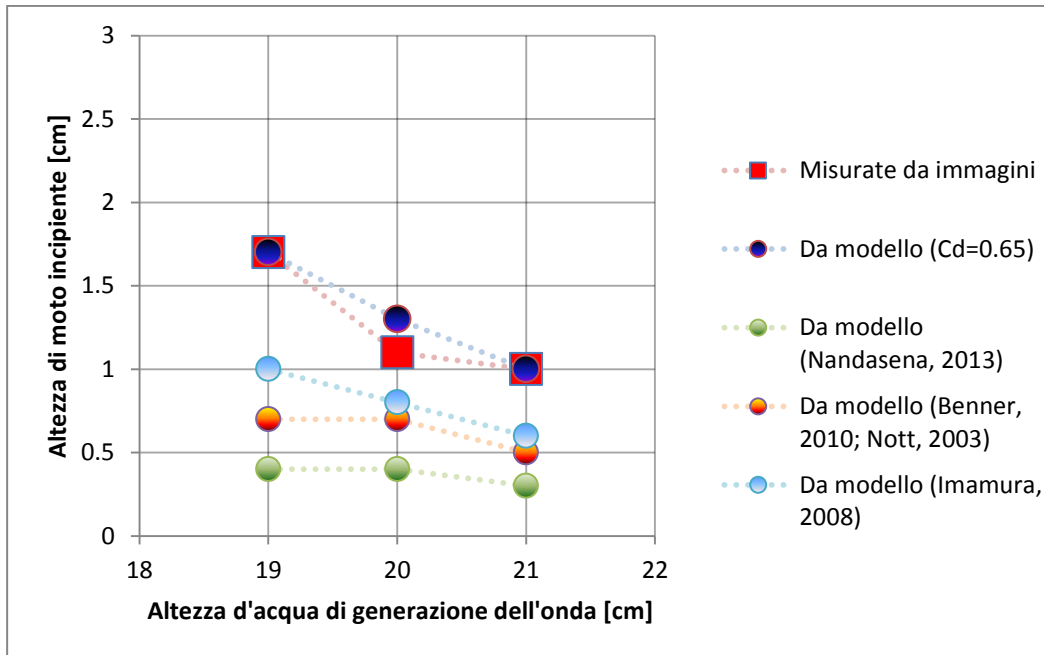


Figura 70: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 8c con superficie rettangolare ortogonale alla direzione di propagazione del flusso

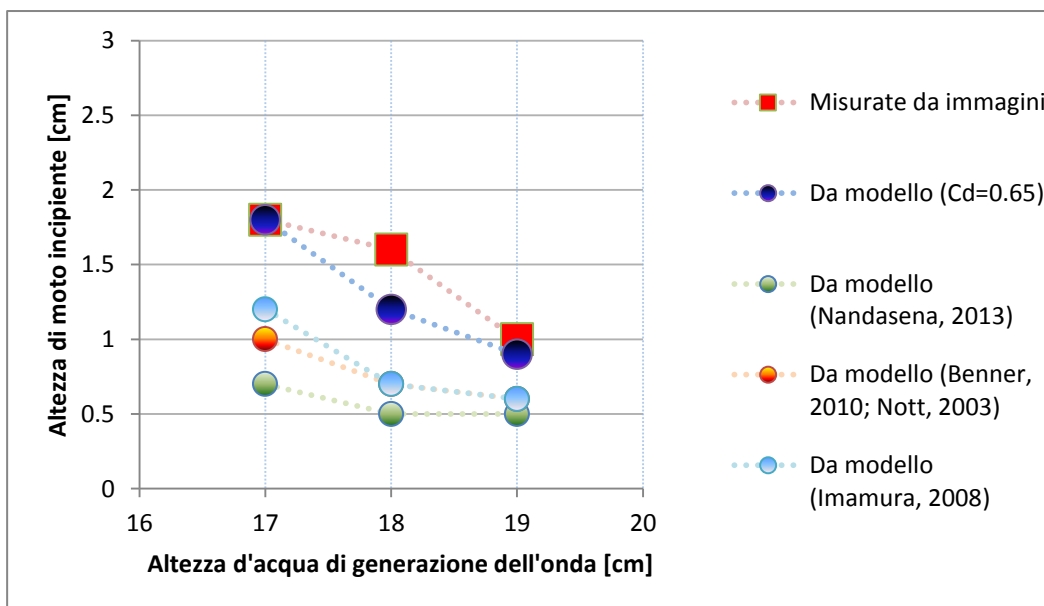


Figura 71: confronto delle altezze di moto incipiente per il blocco 4c con superficie rettangolare ortogonale alla direzione di propagazione del flusso



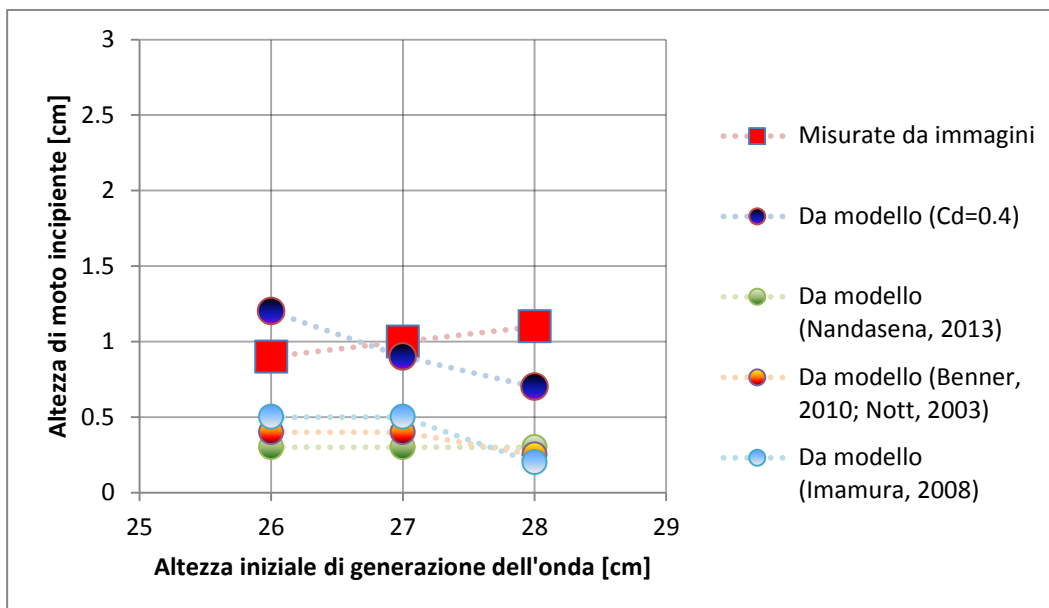


Figure 72: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 8c con superficie quadrata ortogonale alla direzione di propagazione del flusso

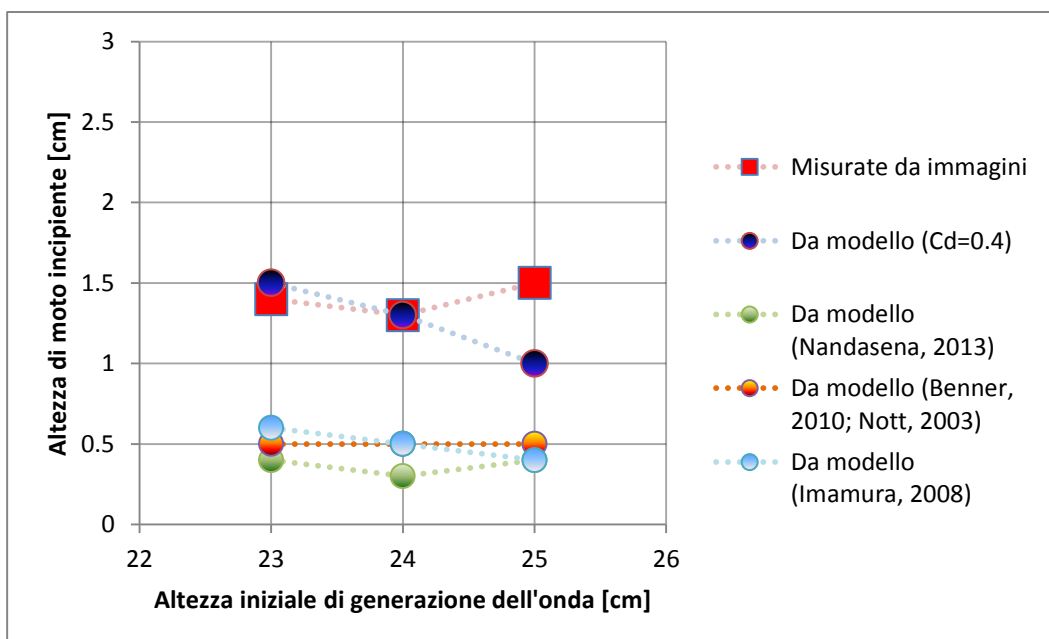


Figure 73: confronto tra le altezze di moto incipiente per il blocco 4c con superficie quadrata ortogonale alla direzione di propagazione del flusso

Come si può osservare dai grafici sopra riportati, le altezze di moto incipiente ricavate analiticamente, inserendo nel modello i coefficienti di drag calcolati in questo elaborato, discostano di poco dai dati di livello osservati in laboratorio e, pertanto, è possibile ottenere le altezze d'inizio del moto dei vari blocchi con una maggiore precisione

rispetto agli studi precedenti. Dai risultati ottenuti è stato riscontrato un errore medio pari a centimetri -0.1, con una tendenza a sottostimare i dati degli esperimenti.

Ad esempio, dal grafico n. 70, che rappresenta i risultati ottenuti per il blocco 8c con superficie rettangolare ortogonale alla direzione di propagazione del flusso, si può notare come il modello sviluppato in questo elaborato permetta di ottenere valori coincidenti o comunque molto prossimi a quelli degli esperimenti.

Invece, i risultati ottenuti, inserendo nel modello il coefficiente di drag proposto da Nandasena (20), presentano un maggiore scostamento di valori rispetto ai dati di livello osservati in laboratorio. In questo caso l'errore medio calcolato è pari a centimetri -0.85 e risulta di segno negativo in quanto le altezze ottenute tendono sempre a sottostimare i valori osservati.

Al contrario, utilizzando nel modello i coefficienti proposti rispettivamente da Benner (17), Nott (22) e Imamura (21) si sono riscontrate delle altezze più vicine a quelle osservate nelle immagini; nonostante ciò i risultati ottenuti tendono sempre a sottostimare quanto osservato in laboratorio.

Alla luce dello studio condotto, si può concludere come, mediante l'utilizzo del modello sopra descritto e dei coefficienti di drag proposti in questo elaborato, sia stato possibile prevedere con migliore approssimazione di quella attuale le condizioni di moto incipiente dei blocchi, in quanto, con la verifica effettuata osservando le immagini, i risultati ottenuti sono più vicini alla realtà di quelli conseguiti utilizzando i coefficienti di drag proposti dagli studi precedenti.

## Bibliografia

1. Fritz H, Phillips D, Okayasu A, Shimozone T. The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kedennuma Bay using LIDAR. *Geophysical research letters*. 2012; Vol. 39: pp. 1-6.
2. Nandasena NAK, Paris R, Tanaka N. Numerical assessment of boulder transport by the 2004 Indian ocean tsunami in Lhok Nga, West Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Comput Geosci*. 2011 9; Vol. 37(9): pp. 1391-9.
3. Terremoto Reggio Calabria - Messina 1908 [Internet].: Dipartimento di Protezione Civile [Consultato il 15/06/2015]. Disponibile sul sito: [http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/calabro\\_messinese.wp](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/calabro_messinese.wp).
4. Tsunami - the great waves [Internet].: UNESCO/IOC NOAA ITIC; 2014 [Consultato il 30/06/2015]. Disponibile sul sito: [http://itic.ioc-unesco.org/images/stories/about\\_tsunamis/great\\_waves/Great\\_Waves\\_v.2014\\_sm.pdf](http://itic.ioc-unesco.org/images/stories/about_tsunamis/great_waves/Great_Waves_v.2014_sm.pdf).
5. Physics of Tsunamis [Internet].: National Geophysical Data Center, NOAA; 2015 [Consultato il 22/05/2015]. Disponibile sul sito: [http://ntwc.arh.noaa.gov/?page=tsunami\\_science](http://ntwc.arh.noaa.gov/?page=tsunami_science).
6. Bignami D, Bobbi S, Murachelli A, PAssoni G, Regalini E, Riboni V. Calamità naturali: capire per agire. Associazione Ingegneri Ambiente e Territorio [Internet]. 2005: [Consultato il 26/05/2015].
7. Dawson AG, Stewart I. Tsunami deposits in the geological record. *Sediment Geol*. 2007 8/15; Vol. 200(3-4): pp.166-83.
8. DECEMBER 26, 2004 SUMATRA, INDONESIA EARTHQUAKE AND TSUNAMI – TENTH ANNIVERSARY UPDATE [Internet].: National centers for environmental information; 2014 [Consultato il 14/07/2015; ]. Disponibile sul sito: [http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/data/publications/2004\\_1226.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/data/publications/2004_1226.pdf).
9. Sugawara D, Goto K, Jaffe BE. Numerical models of tsunami sediment transport — Current understanding and future directions. *Mar Geol*. 2014 6/1; Vol. 352(0): pp.295-320.
10. Goto K, Kawana T, Imamura F. Historical and geological evidence of boulders deposited by tsunamis, southern Ryukyu Islands, Japan. *Earth-Sci Rev*. 2010 9; Vol. 102(1-2):pp. 77-99.
11. Pignatelli C, Sansò P, Mastronuzzi G. Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Mar Geol*. 2009 5/1; Vol. 260(1-4): pp. 6-18.
12. Paris R, Naylor LA, Stephenson WJ. Boulders as a signature of storms on rock coasts. *Mar Geol*. 2011 5/1; Vol. 283(1-4): pp. 1-11.

13. Ballio F, Guadagnini A, Malavasi S, Orsi E, Riva E. Note degli insegnamenti di Meccanica dei Fluidi 1 - Strato Limite: principali caratteristiche ed effetti. 2013.
14. Attrito viscoso. [Internet]: Consultato il 14/08/2015], Disponibile sul sito: [http://koi0009.altervista.org/\\_2\\_FISICA/attrito\\_viscoso.pdf](http://koi0009.altervista.org/_2_FISICA/attrito_viscoso.pdf).
15. D.Citrini GN. Idraulica. Seconda edizione ed. Milano: CEA; 1987.
16. Lorang MS. A wave-competence approach to distinguish between boulder and megaclast deposits due to storm waves versus tsunamis. *Mar Geol.* 2011 5/1; Vol. 283(1-4): pp. 90-7.
17. Benner R, Browne T, Bruckner H, Kelletat D, Scheffers A. Boulder Transport by Waves: Progress in Physical Modelling. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues.* 2010; Vol. 54: pp. 127-146.
18. Nandasena NAK, Paris R, Tanaka N. Reassessment of hydrodynamic equations: Minimum flow velocity to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis). *Mar Geol.* 2011 3/15; pp. 281(1-4): Vol. 70-84.
19. Paris R, Fournier J, Poizot E, Etienne S, Morin J, Lavigne F, et al. Boulder and fine sediment transport and deposition by the 2004 tsunami in Lhok Nga (western Banda Aceh, Sumatra, Indonesia): A coupled offshore-onshore model. *Mar Geol.* 2010 1/15; Vol. 268(1-4): pp. 43-54.
20. Nandasena NAK, Tanaka N. Boulder transport by high energy: Numerical model-fitting experimental observations. *Ocean Eng.* 2013 1/1; Vol.57(0): pp. 163-79.
21. Imamura F, Goto K, Ohkubo S. A numerical model for the transport of a boulder by tsunami. *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2008;113(C1).
22. Nott J. Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting. *Earth Planet Sci Lett.* 2003 5/15; Vol. 210(1-2): pp. 269-76.
23. Scicchitano G, Monaco C, Tortorici L. Large boulder deposits by tsunami waves along the Ionian coast of south-eastern Sicily (Italy). *Mar Geol.* 2007 3/27; Vol. 238(1-4): pp. 75-91.
24. Stansby PK, Chegini A, Barnes TCD. The initial stages of dam break flow. *Journal of Fluid Mechanics.* 1998; Vol. 374: pp. 407-424.
25. Messer M. Pulsed ultrasonic doppler velocimetry for measurement of velocity profiles in small channels and capillares [Tesi]. Georgia Institute of Tecnology; 2005.
26. Geisler T. Ultrasonic velocity profile measurements in experimental hydraulics [Tesi]. Graz University of Technology; 2001.

27. Background of ultrasonic doppler velocimetry [Internet]. [Consultato il 16/07/2015]. Disponibile sul sito: [http://www.signal-processing.com/intro\\_udv.html](http://www.signal-processing.com/intro_udv.html).

28. Lecture notes [Internet]. Pavia; 02-03-2010 [Consultato il 25/05/2015]. Disponibile sul [sito: http://economia.unipv.it/pagp/pagine\\_personali/ctaranto/Forma%20distribuzione\\_box\\_plot.pdf](http://economia.unipv.it/pagp/pagine_personali/ctaranto/Forma%20distribuzione_box_plot.pdf).

## Appendice A

Dimensioni e densità dei massi trovati lungo le coste dell'Islanda.

**Tabella 34: dimensioni e densità dei massi campionati lungo le coste dell'Islanda (18)**

ID	Dimensioni dei massi [m]			Densità [gr/cm <sup>3</sup> ]
	a	b	c	
1	3,6	3	2,6	2,4
2	3,4	3,2	1,7	2,6
3	4,5	2,3	1,8	2,7
4	3,2	2,7	1,5	2,7
5	1,85	1,8	1,1	2,7
6	1,9	1,5	1,3	2,7
7	2,4	2,4	0,8	2,4
8	1,7	1,7	1,2	2,4
9	1,6	1,3	1,2	2,6
10	2,7	1,9	1,65	2,8
11	1,7	1,6	1,5	2,8
12	3,5	3,1	3	2,7
13	3,7	1,85	1,1	2,7
14	3	1,8	0,9	2,7
15	1,9	1,8	0,9	2,7
16	2,1	1,5	0,9	2,7
17	1,6	1,5	0,75	2,7
18	2,1	1,9	1,5	2,6
19	3	2	1,6	2,8
20	2,4	1,5	1,15	2,6
21	3	2,5	0,5	2,4
22	2,2	1,2	0,7	2,4
23	1,05	0,85	0,7	2,6
24	1,1	0,95	0,3	2,6
25	1,4	1,2	0,8	2,6
26	1,45	1,1	0,25	2,6
27	2,45	1,88	1,7	2,7
28	2,75	2,05	1	2,7

---

29	1,9	1,7	0,85	2,7
30	1,5	1,1	0,6	2,8
31	0,39	0,35	0,1	2,6
32	2,1	1,7	0,8	2,7
33	2,3	1,3	0,95	2,7
34	1,3	1,3	1,3	2,7
35	1,7	0,9	0,8	2,7
36	2,3	1,9	0,5	2,6
37	1,2	0,85	0,35	2,6
38	0,7	0,7	0,6	2,6
39	1,45	1,1	0,9	2,7
40	0,65	0,45	0,35	2,6
41	1,5	1,3	1,2	2,6
42	1,82	1,16	0,86	2,6
43	1,45	1,4	0,65	2,6
44	1,2	1	0,8	2,7
45	1,2	1,15	0,55	2,6
46	0,9	0,7	0,4	2,6
47	1,45	1,4	1,35	2,8