



## SVILUPPO ECOSOSTENIBILE DEI PORTI

*Gli ingegneri e il mare*

**Trapani 22 giugno 2012**

Sala Conferenze Istituto Tecnico Nautico "Marino Torre"



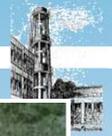
# ***Modelli matematici per la simulazione dell' idrodinamica del moto ondoso e loro applicazione nell' Ingegneria Costiera.***

**DICAM**  
Dipartimento di Ingegneria Civile,  
Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali  
Università degli Studi di Palermo

*Dott. ing. Carlo Lo Re*



- *Posizione del problema*
- *Alcuni modelli numerici*
- *I modelli SPH e LBM*
- *I modelli alla Boussinesq*
- *Linea di riva*
- *Agitazione portuale*
- *Conclusioni*



## Posizione del problema

I dati del moto ondoso sono disponibili al largo grazie alla Rete Ondametrica Nazionale (ISPRA), al fine di essere significativi di ampi tratti di costa.

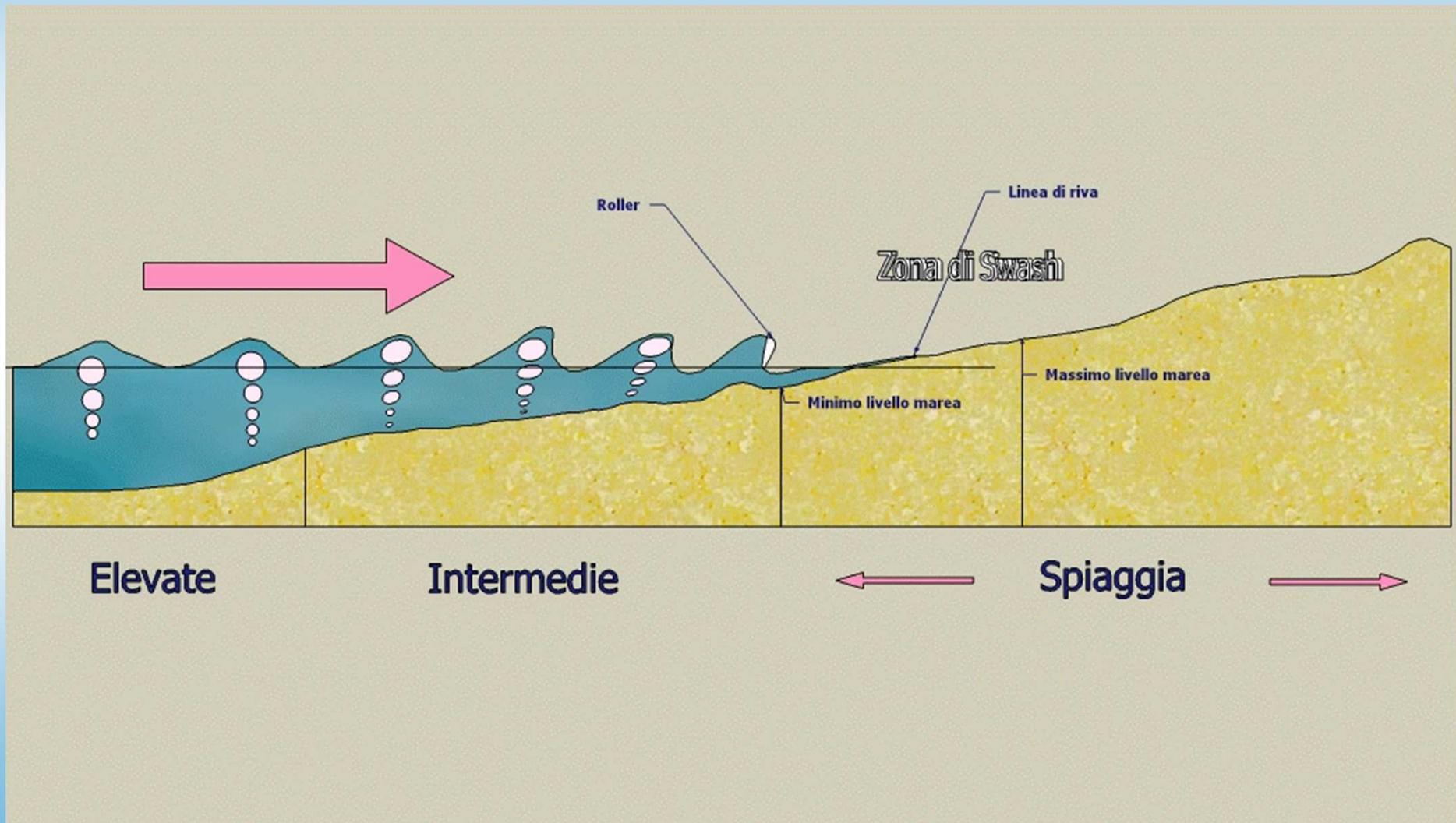
Esiste pertanto una discrasia spaziale tra la disponibilità di dati e la necessità, per le pratiche applicazioni, di informazioni sotto costa.

Durante la propagazione dal largo alla riva variano rapidamente le caratteristiche dell'onda per il verificarsi di fenomeni quali irripidimento (*shoaling*), frangimento (*breaking*), risalita sulla spiaggia (*run-up*), etc.

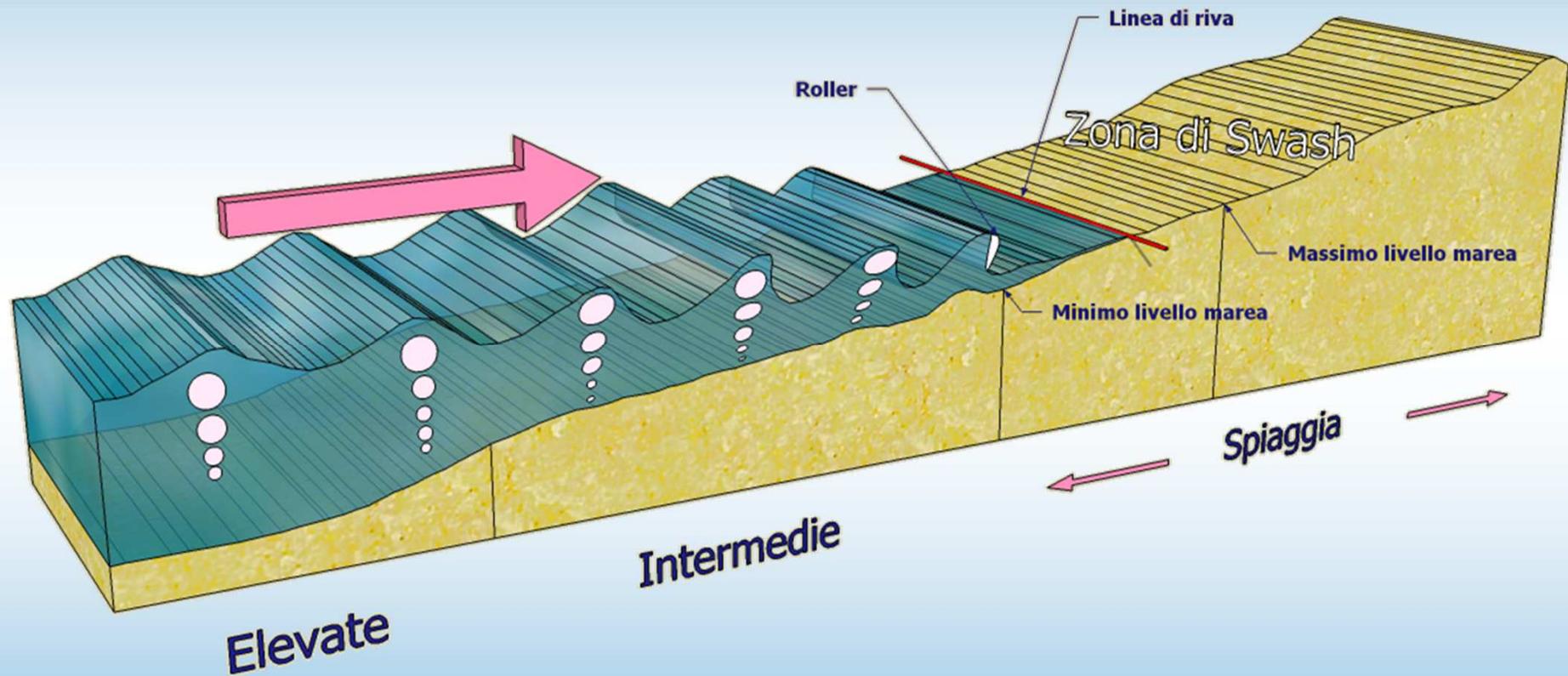


*Risulta quindi necessario adottare modelli di propagazione del moto ondoso che, note le grandezze caratteristiche dell'onda al largo (altezza, periodo e direzione di propagazione), restituiscano le grandezze caratteristiche dell'onda sotto costa.*

# Propagazione del moto ondoso



# Propagazione del moto ondoso

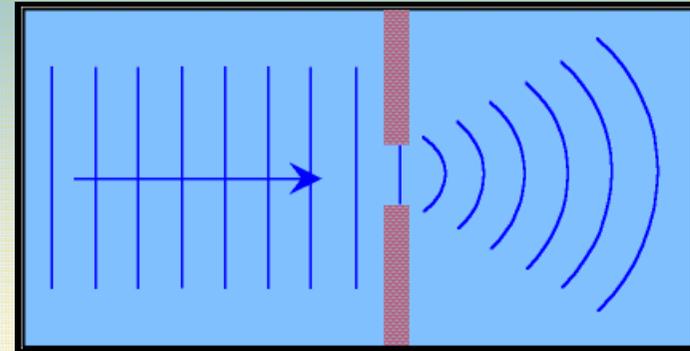


## La diffrazione



Facility: Large-Scale Laboratory Facility For Sediment Transport Research (LSTF). US corp Army. Coastal & hydraulics laboratory.  
<http://chl.erdc.usace.army.mil>

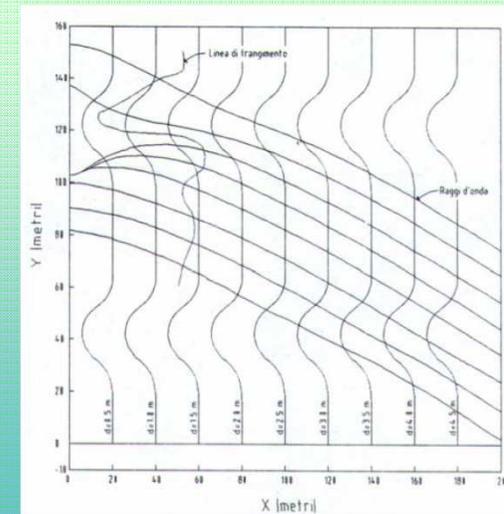
DICAM



## La rifrazione



Nord ovest di Oceanside, CA, USA



# Frangimento e risalita dell'onda



Il frangimento delle onde e la loro risalita sulle spiagge influenzano numerosi fenomeni fisici costieri, come l'erosione dei litorali e l'inondazione delle coste.



**Run-up dello tsunami del 26 Dicembre 2004, casa travolta dalle acque.  
Fonte: [ioc.unesco.org/iosurveys/seychelles/](http://ioc.unesco.org/iosurveys/seychelles/)**

Tuttavia ancora oggi non esiste una descrizione accurata del campo di moto da essi generato.

# Propagazione del moto ondoso: il fenomeno di frangimento e la surf zone



Quando l'onda, propagandosi su profondità via via decrescenti, presenta una geometria non più in equilibrio con la sua cinematica frange, secondo diverse figure di frangimento.



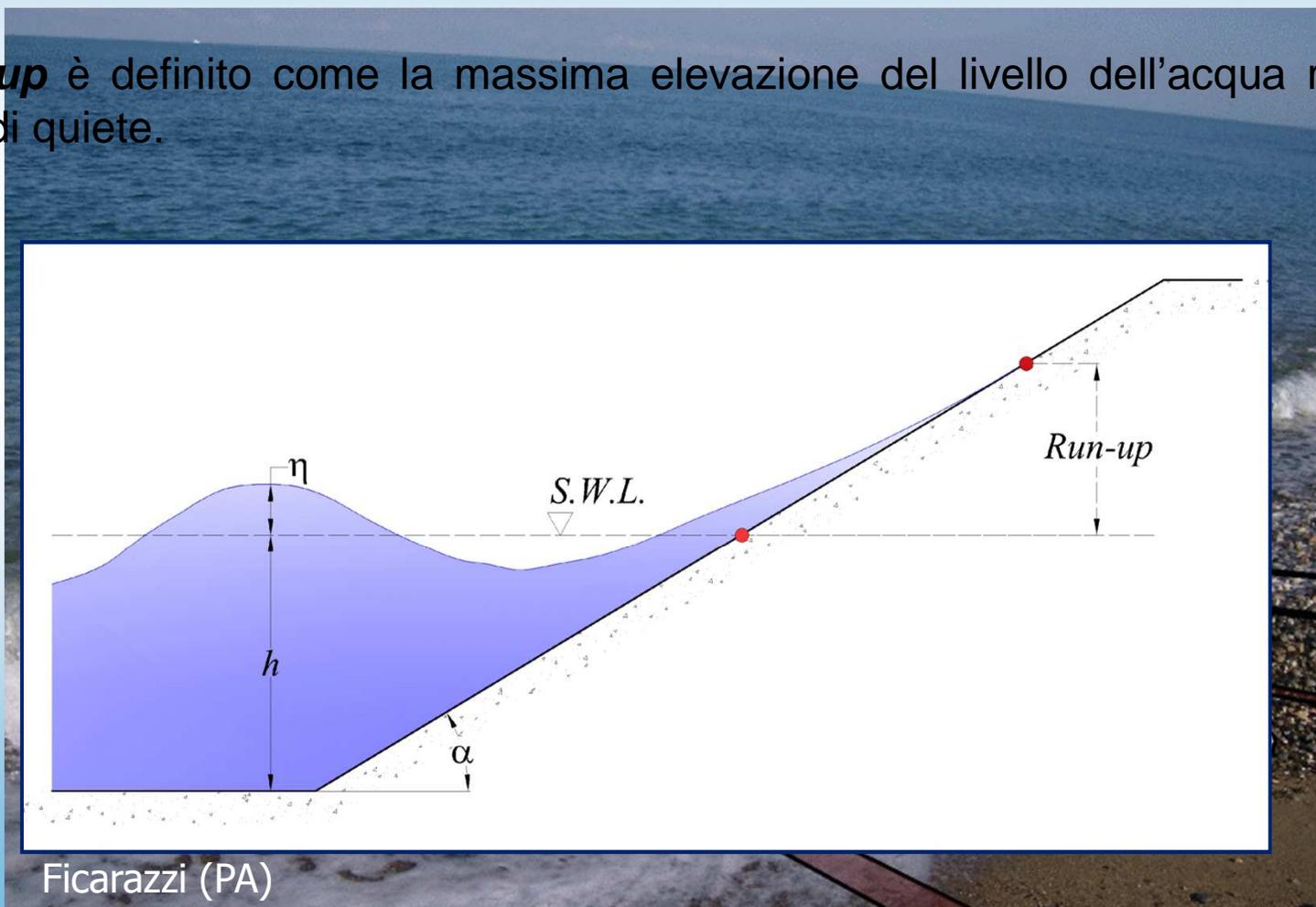
L'onda raggiunge quindi la swash zone, la regione meno indagata, la cui importanza è facilmente percepibile quando si parla di inondazioni.

# Propagazione del moto ondoso: la swash zone e la risalita



La **regione di swash** è quella parte di spiaggia, alternativamente asciutta e bagnata in prossimità della linea di riva, interessata dalla risalita del moto ondoso, *run-up*.

Il ***run-up*** è definito come la massima elevazione del livello dell'acqua rispetto al livello di quiete.



# Modelli matematici per il moto ondoso



-Modelli spettrali

SWAN; WAM; WAVEWATCH III

-Mild Slope equations (2D)

-Integrati sulla verticale:

*Non linear shallow water*

***Boussinesq***

-Modelli lagrangiani:

*SPH Smooth Particle hydrodynamics*

-Modelli a mesoscala:

*LBM Lattice Boltzman Method*

-Modelli Navier-Stokes:

*Modelli RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations)*

*DNS (Direct Numerical Simulation) Navier stokes*

***Modellazione delle condizioni al contorno.***



## Alcuni modelli commerciali:



US Army Corps  
of Engineers®  
Engineer Research and  
Development Center

**Cgwave – Mild slope equation  
Boussinesq.**



**Mike21 – Mild slope equation; Boussinesq**

## Alcuni modelli open source:



**SWAN – Modello Spettrale  
PHAROS – Mild slope equation  
Delft3D**



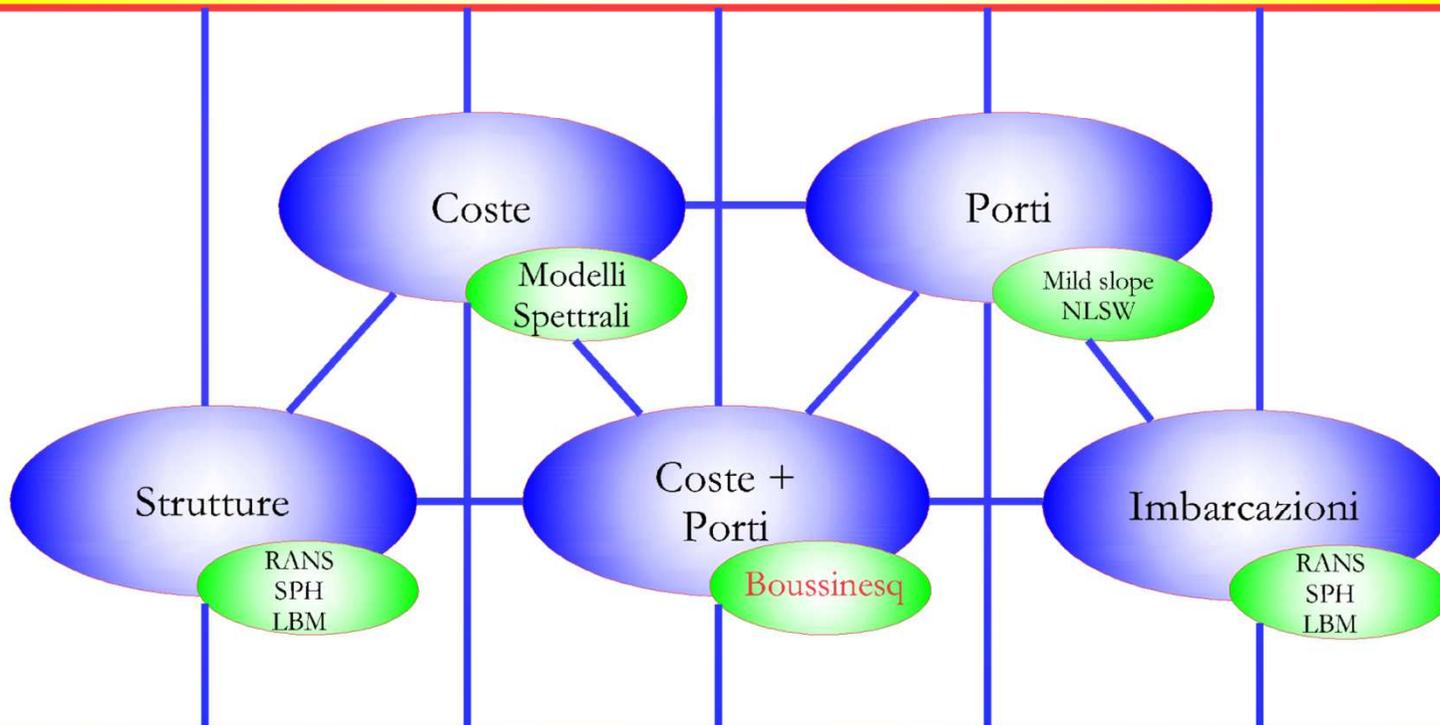
**SPHysics – SPH**



**OpenLBM – Lattice Boltzmann**



## RILIEVO BATIMETRICO ONDE IN INGRESSO



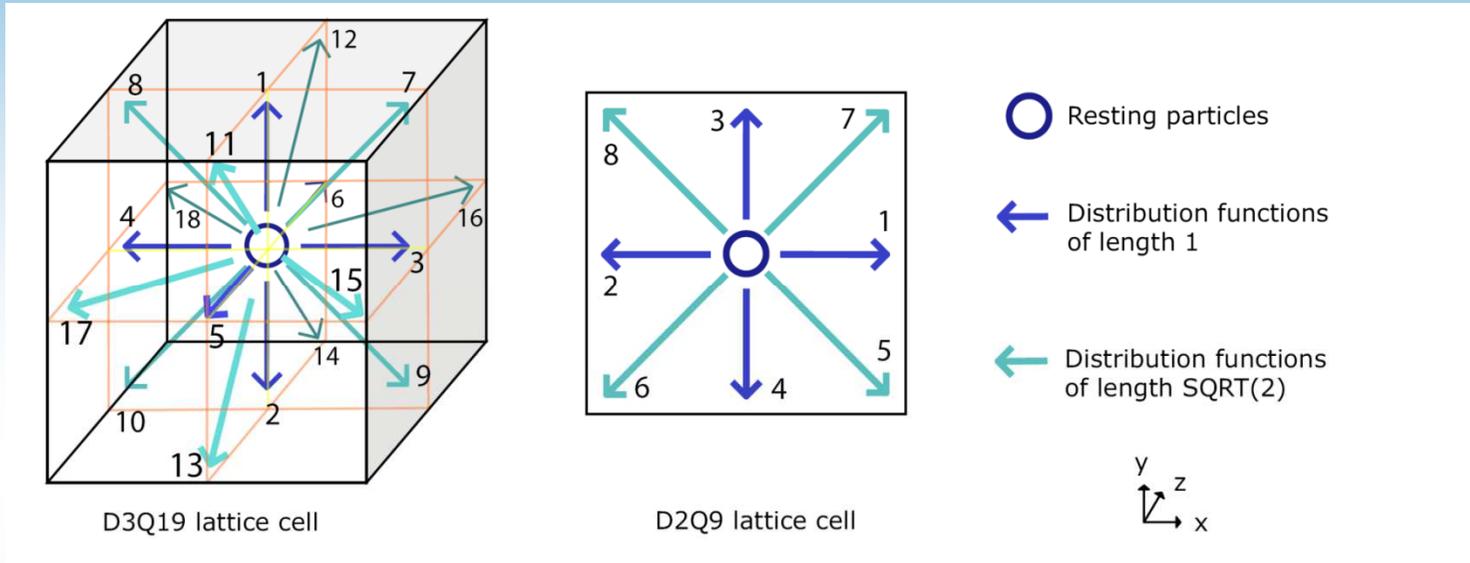
## ANALISI DEI DATI

# Modello Lattice Boltzmann

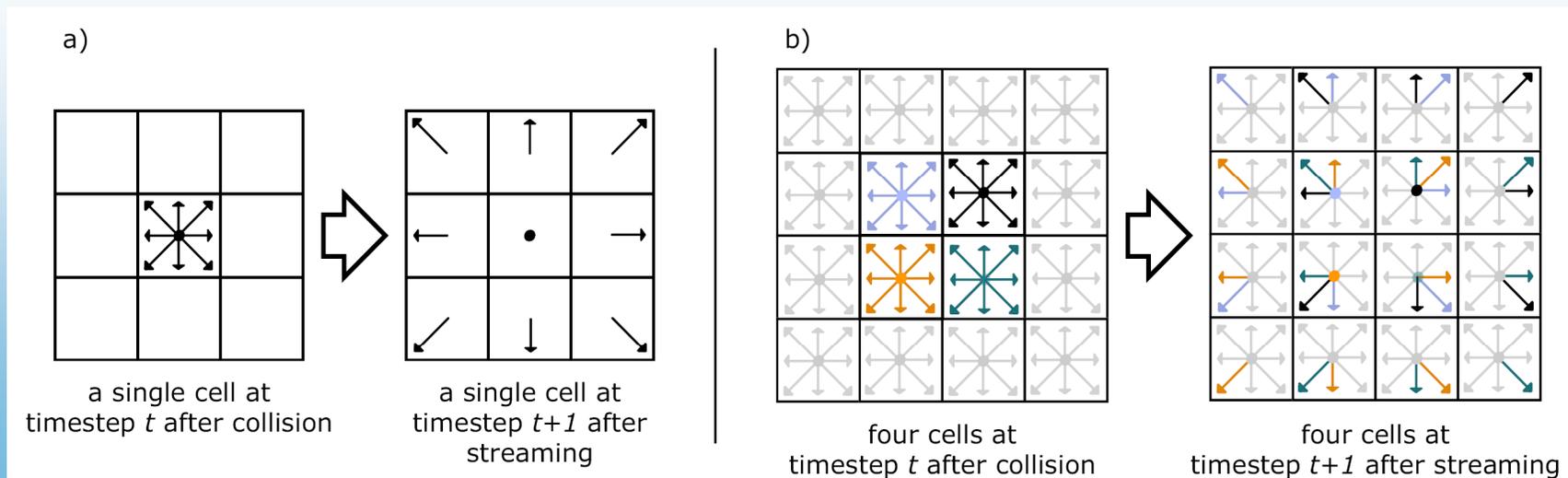
## La discretizzazione su un lattice delle eqq. Boltzmann



### Il lattice



### Il lattice



# SPH- Smooth Particle Hydrodynamics



Una grandezza  $A$  calcolata in una determinata regione dello spazio può essere espressa:

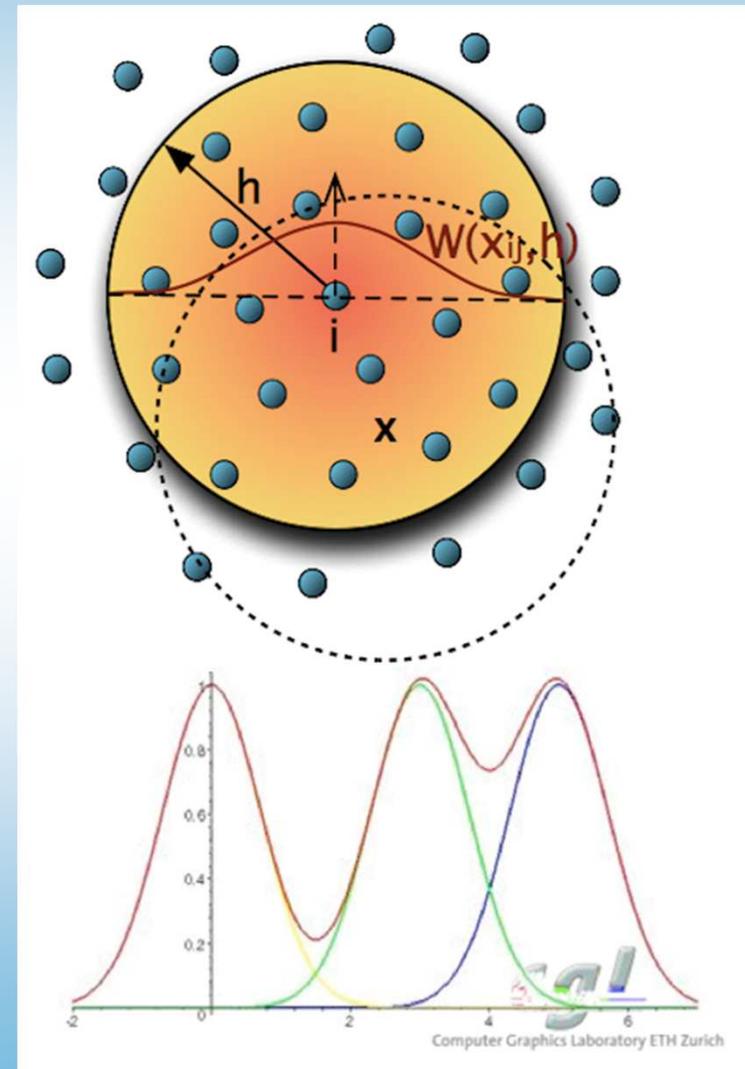
$$A(\mathbf{x}) = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} A_j W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h)$$

Somma di tutte  
le particelle  
ricadenti  
nell'intorno  $h$

Volume  
rappresentato  
dalle particelle

Kernell

Se  $x = i$  (su una particella) si deve includere  $i$  nella somma





# Derivazione dei modelli alla Boussinesq

DICAM

Equazione di continuità

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}} + \frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{z}} = 0$$

Equazioni del moto alla Reynolds

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} + \frac{\partial \hat{u}^2}{\partial \hat{x}} + \frac{\partial \hat{u}\hat{w}}{\partial \hat{z}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{x}} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \hat{\tau}_{xx}}{\partial \hat{x}} + \frac{\partial \hat{\tau}_{xz}}{\partial \hat{z}} \right)$$

$$\frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{t}} + \frac{\partial \hat{u}\hat{w}}{\partial \hat{x}} + \frac{\partial \hat{w}^2}{\partial \hat{z}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{z}} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \hat{\tau}_{xz}}{\partial \hat{x}} + \frac{\partial \hat{\tau}_{zz}}{\partial \hat{z}} \right) - g$$

Adimensionalizzazione e  
*scaling* secondo  $\delta$  e  $\mu$

Integrazione sulla colonna  
d'acqua

Scelta della velocità  
orizzontale caratteristica

# Le equazioni del modello alla *Boussinesq* *Proposto*



Equazione di Continuità

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial [\bar{u}(h + \zeta)]}{\partial x}$$

Equazione del moto

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \bar{u} + \left[ \left( B - \frac{1}{3} \right) h^2 \bar{u}_{xx} - \frac{1}{2} h h_{xx} \bar{u} - h h_x \bar{u}_x \right] \right\}}_{\mathbf{U}} = F'(\zeta, \bar{u}) + F^t(\zeta, \bar{u}_t) + F^b + F^{ati}$$

Variazioni Spaziali

Attrito al fondo

Var. non lin. nel tempo

Frangimento

Espressione sintetica delle equazioni di governo:

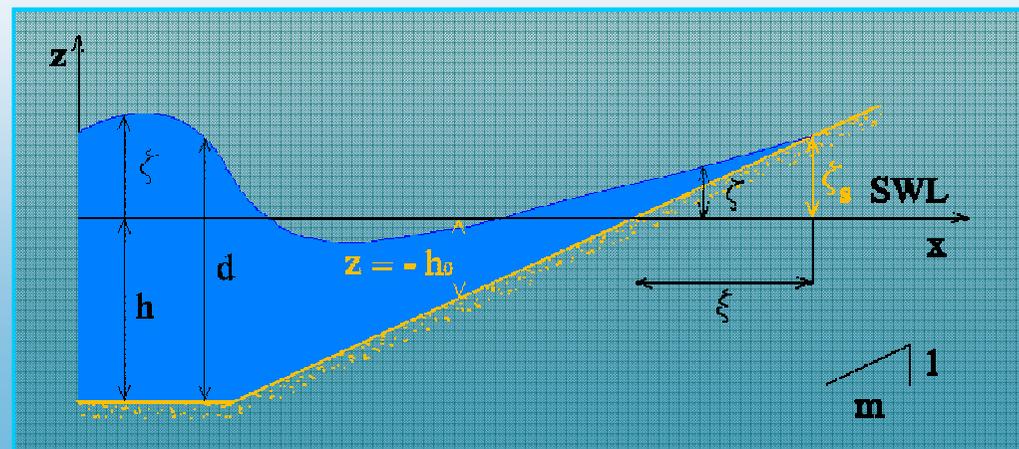
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = E$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = F$$

$$\mu = k_0 h_0$$

$$\delta = a / h_0$$

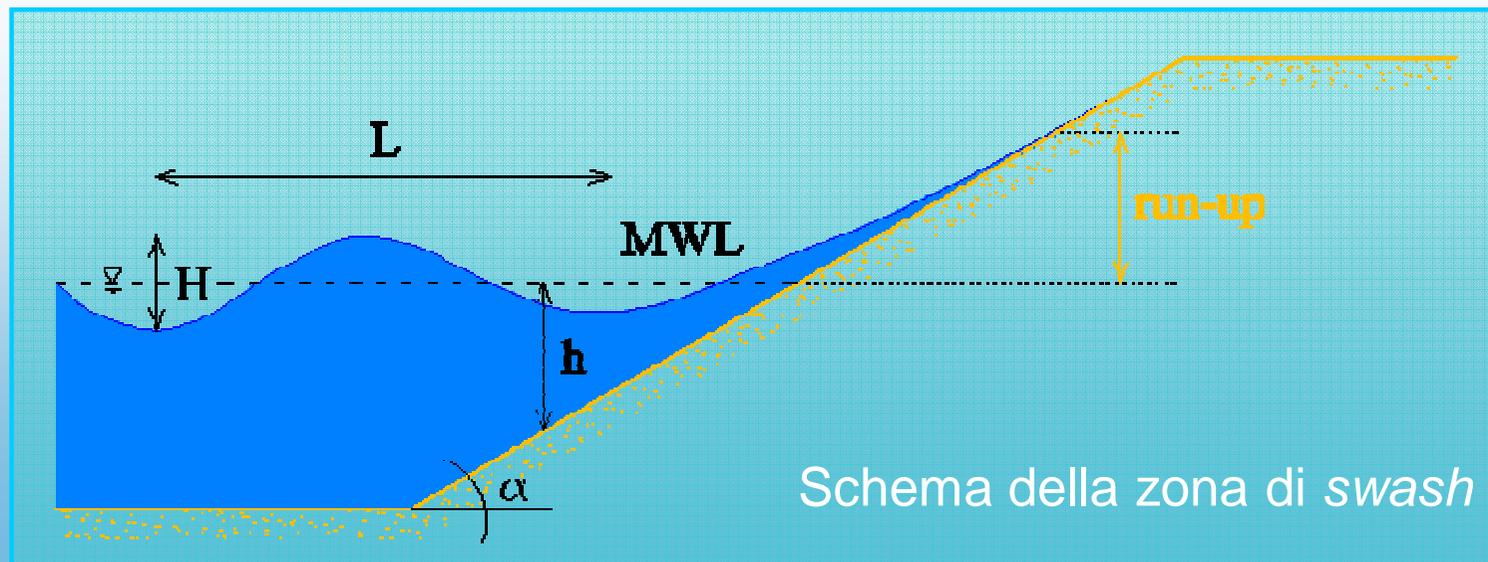
$$O(\mu^4)$$





# I modelli di linea di riva

- *Metodo slot:*
  - { Kennedy et al., 2000
  - { Madsen, Sørensen e Schäffer, 1997
- *Modelli a griglia mobile:*
  - Prasad e Svendsen, 2003
- *Altri modelli:*
  - Karambas e Tozer, 2003
- *Modelli a griglia fissa:*
  - { Bellotti e Brocchini, 2001/2005
  - { Prasad e Svendsen, 2003
- *Modello con estrapolazione:*
  - Linett et al. 2002



Schema della zona di swash

# Le equazioni della linea di riva

DICAM



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{u}_s}{dt} = -g \frac{\partial \zeta_s}{\partial x} \\ \frac{d\xi}{dt} = \bar{u}_s \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Eq. del moto} \\ \text{Condizione} \\ \text{cinematica} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta_s = -h_s \\ h_s = h_d - [(h_d - h_w)(x_d - \xi_w)/(x_d - x_0)] \end{array} \right.$$

$\bar{u}_s$  = velocità della linea di riva;

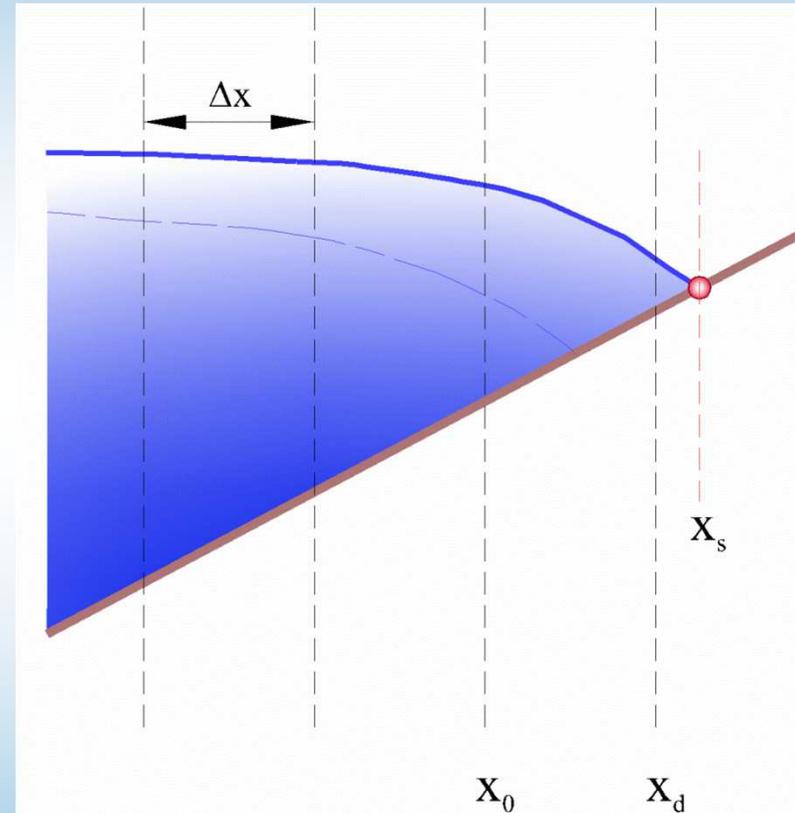
$\zeta_s$  = sopraelevazione della linea di riva;

$\xi$  = coordinata orizzontale della shoreline;

$h_s$  = profondità locale sulla shoreline;

$h_d$  = profondità locale del primo punto asciutto;

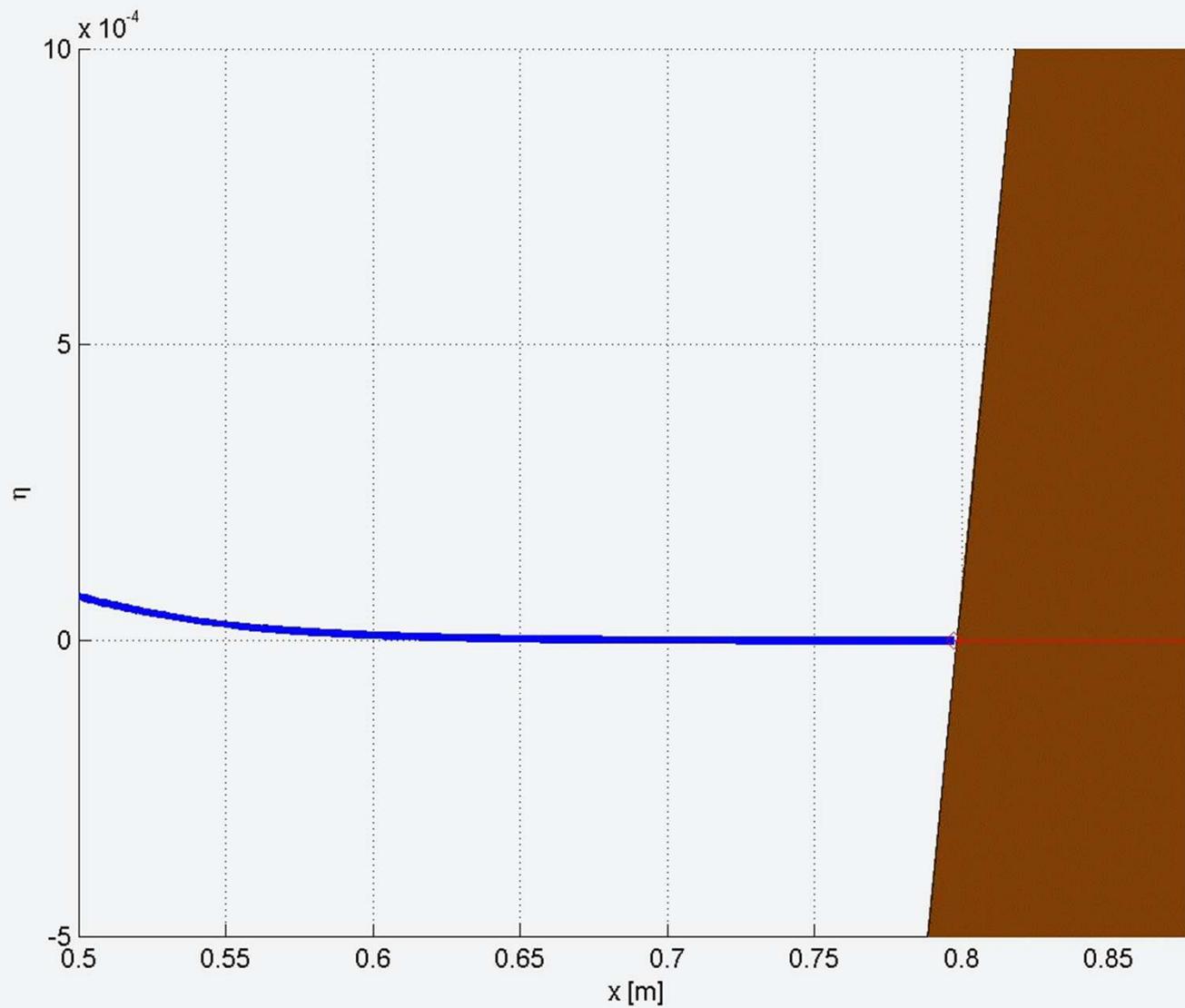
$h_w$  = profondità locale dell'ultimo punto bagnato.



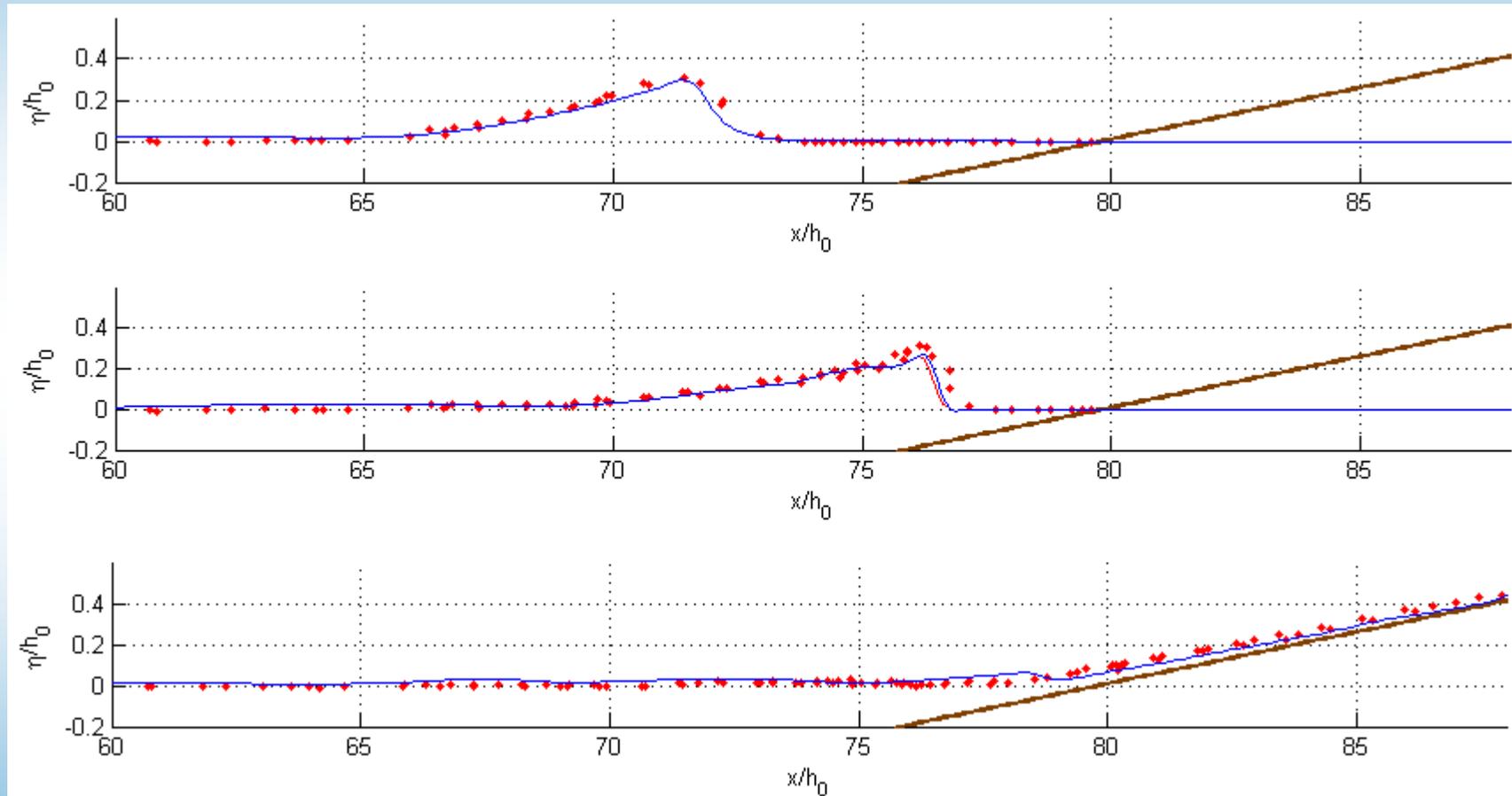
# Risultati con il modello alla *Boussinesq*: *runup* di un onda solitaria



DICAM



# Onda solitaria frangente



Frangimento di un' onda solitaria ( $H/h_0=0.30$ ) e sua risalita su una spiaggia piana 1:19.85  $t(\text{g}/\text{h})^{1/2}=(\text{a}) 15, (\text{b}) 20, (\text{c}) 45$ . La linea continua rappresenta i risultati numerici del modello i punti rappresentano i dati sperimentali di Synolakis (1986).

# Posizionamento della linea di Riva ANALISI DIACRONICA



# Posizionamento della linea di Riva

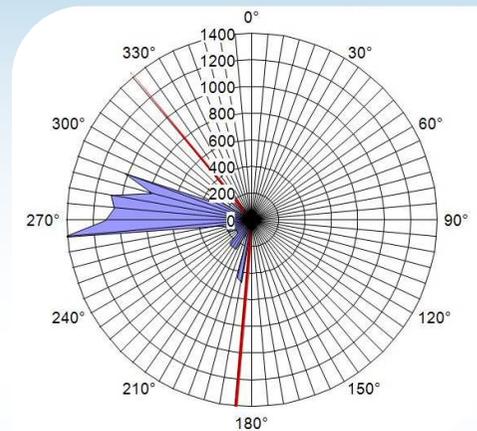


# MARSALA: LIDO SIGNORINO

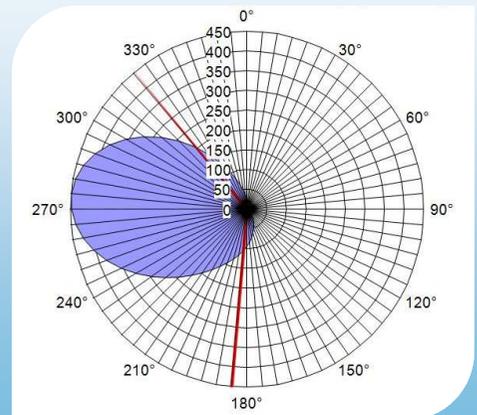
DICAM



*Fetch geografico della spiaggia Lido Signorino*



*Fetch efficace della spiaggia di Lido Signorino*



# IL MODELLO SWAN

Alla batimetrica -60 m:

$$H_s = 5,32 \text{ m}$$

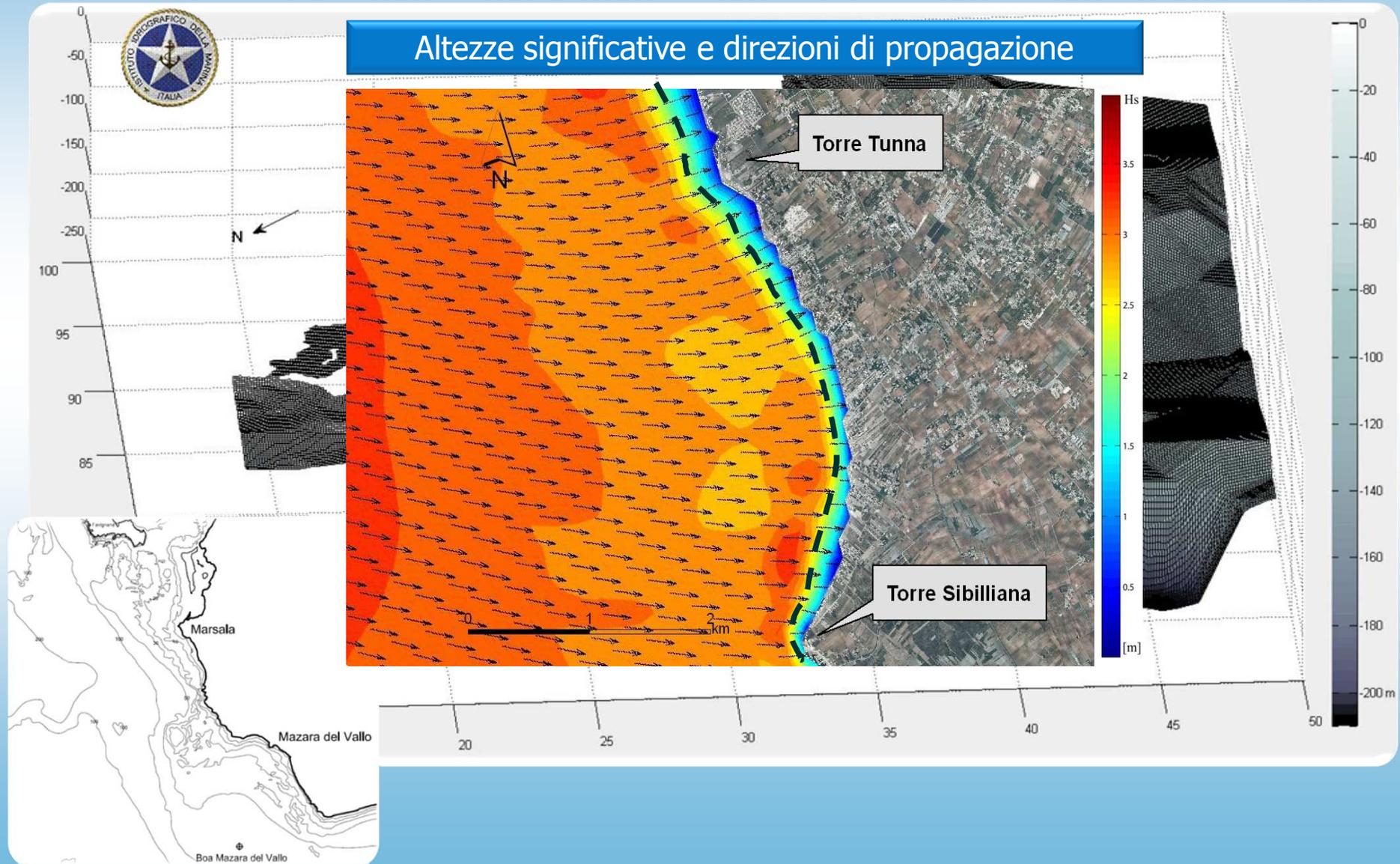
$$T_m = 7,79 \text{ s}$$

Alla batimetrica -5 m:

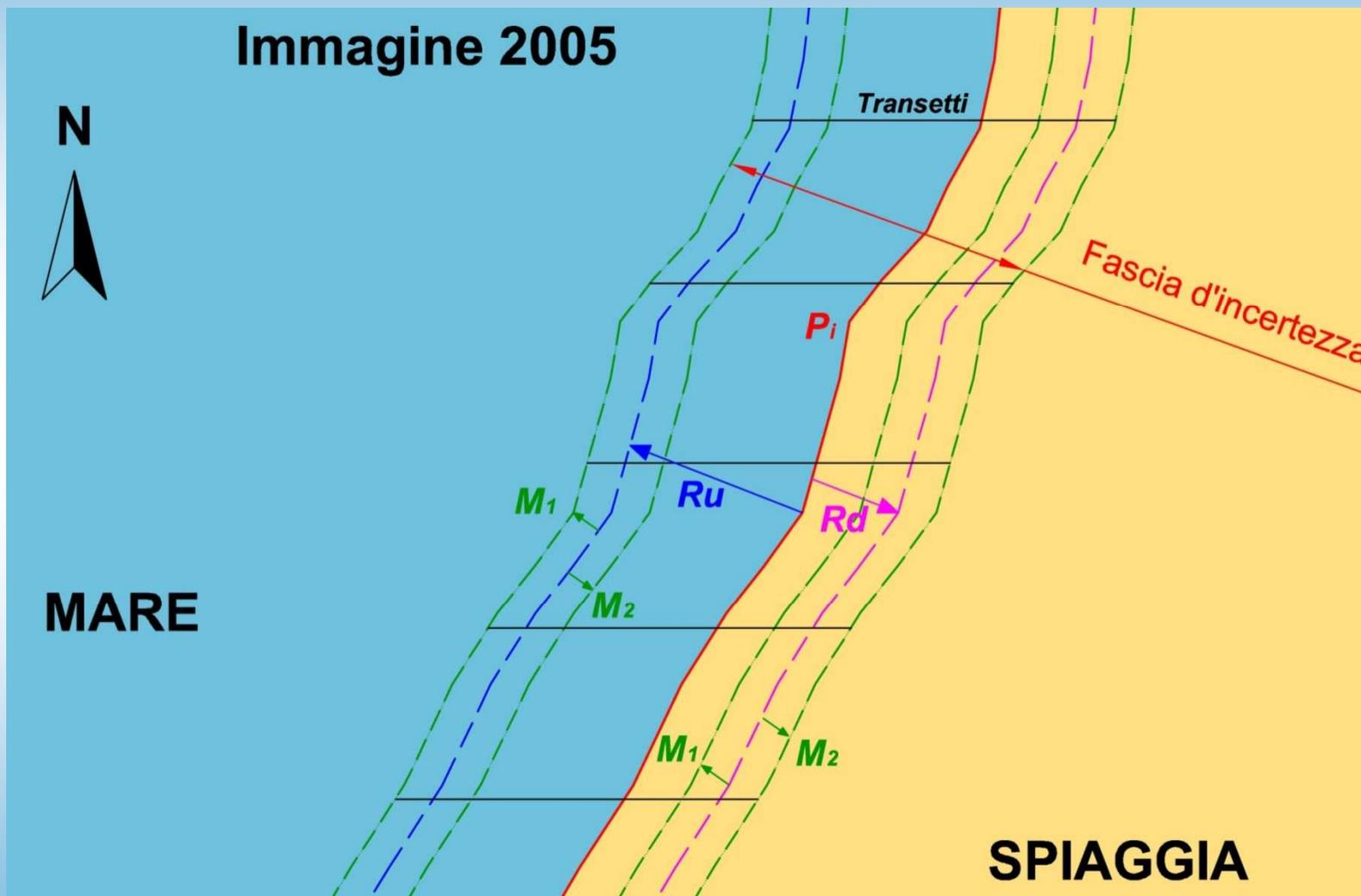
$$H_s = 2,91 \text{ m}$$

$$T_m = 4,66 \text{ s}$$

Altezze significative e direzioni di propagazione

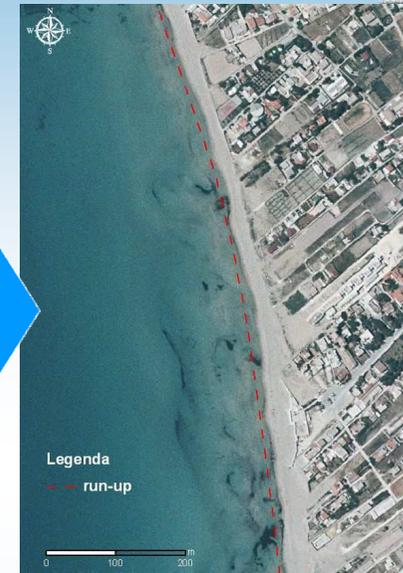
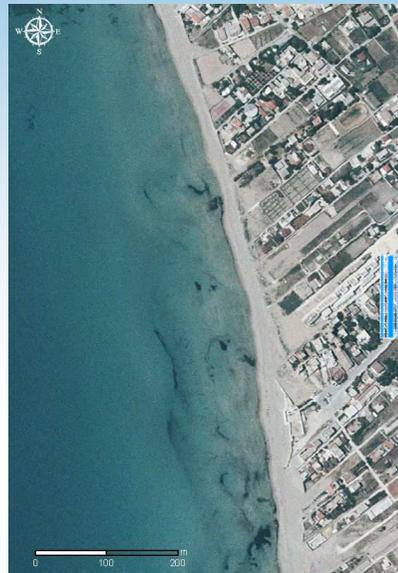


# DETERMINAZIONE DELLA FASCIA D'INCERTEZZA

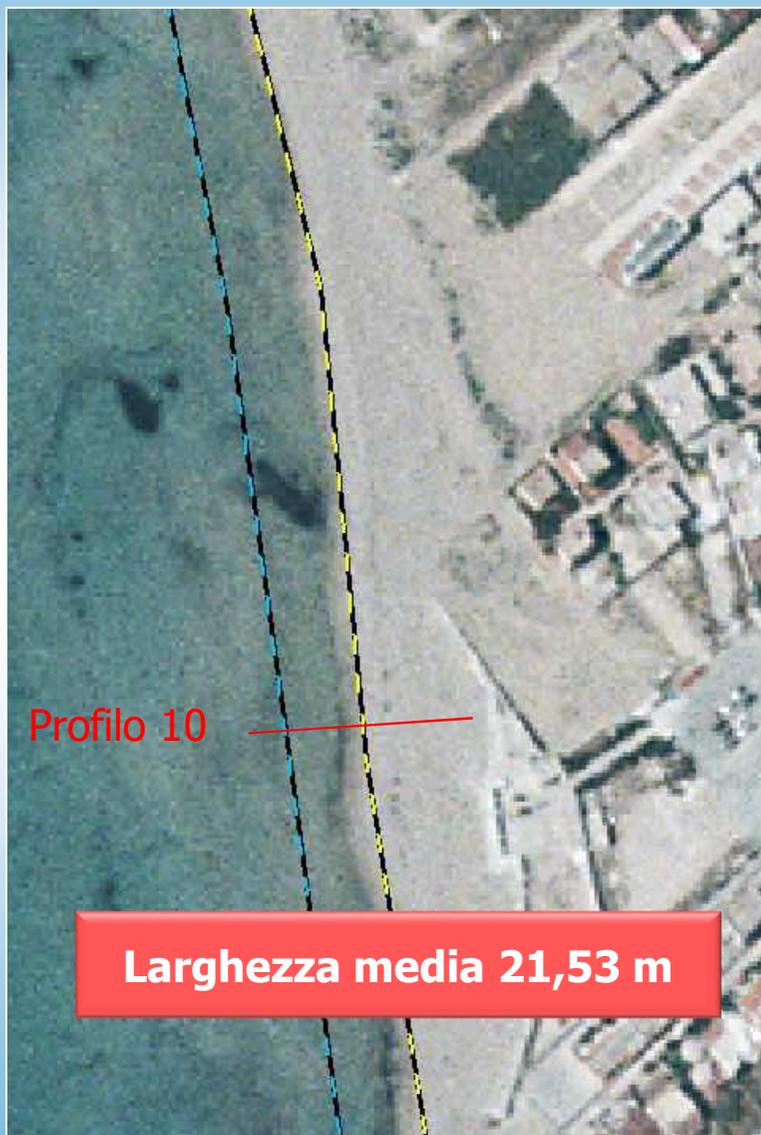


$P_i$  = linea di riva istantanea;  $R_u$  = massimo *run-up*;  $R_d$  = massimo *run-down*;  $M_1$  = valore di massima marea;  $M_2$  = valore di minima marea

# FASCIA D'INCERTEZZA



# FASCIA D'INCERTEZZA

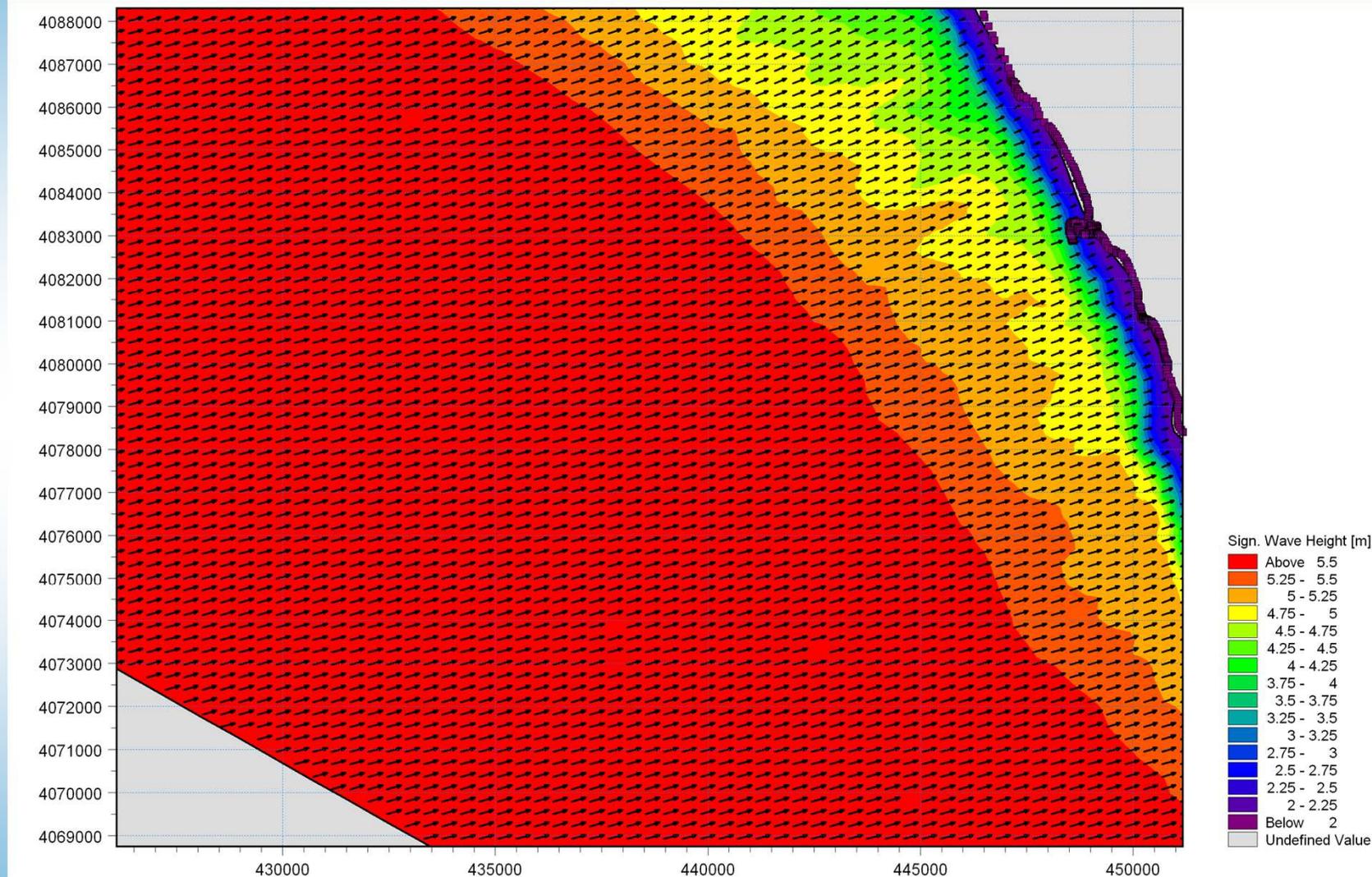


Profilo	Pendenza spiaggia		Larghezza fascia d'incertezza [m]
1	4,95°	8,66 %	19,18
2	5,41°	9,48 %	17,11
3	5,67°	9,93 %	16,71
4	4,99°	8,74 %	19,00
5	5,29°	9,26 %	17,93
6	4,96°	8,67 %	19,16
7	4,20°	7,34 %	22,67
8	4,85°	8,48 %	19,59
9	3,91°	6,93 %	24,37
10	5,30°	9,27 %	17,86
11	5,62°	6,33 %	26,30
12	7,19°	12,61 %	13,13
13	6,20°	10,85 %	15,28
14	6,61°	11,58 %	14,30
15	6,73°	11,79 %	14,05
16	7,01°	12,29 %	13,47
17	4,62°	8,08 %	20,58
18	5,14°	8,99 %	18,47
19	2,61°	4,56 %	36,59
20	3,70°	6,46 %	25,76
21	5,21°	9,11 %	18,21
22	2,44°	4,26 %	39,16
23	3,52°	5,51 %	28,74
24	3,18°	5,56 %	29,97
25	3,65°	6,38 %	26,11
26	3,64°	6,37 %	26,14

# Esempio di studio Idraulico marittimo: Modello spettrale

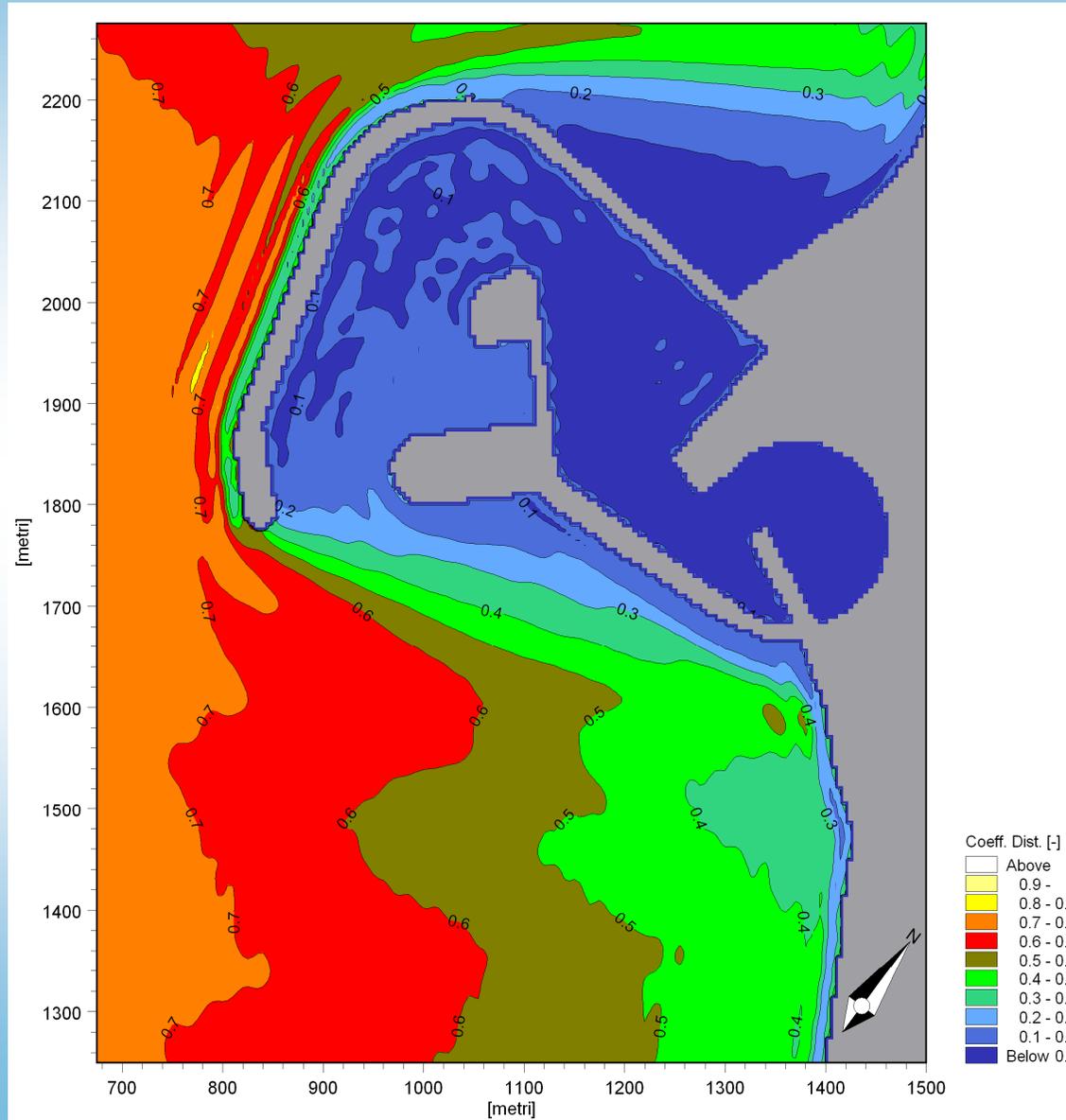


DICAM



Distribuzione del clima ondoso sottocosta nel tratto di mare antistante l'abitato di Scoglitti –  
Tr = 100 anni, direzione media di provenienza delle onde al largo pari a 255°N.

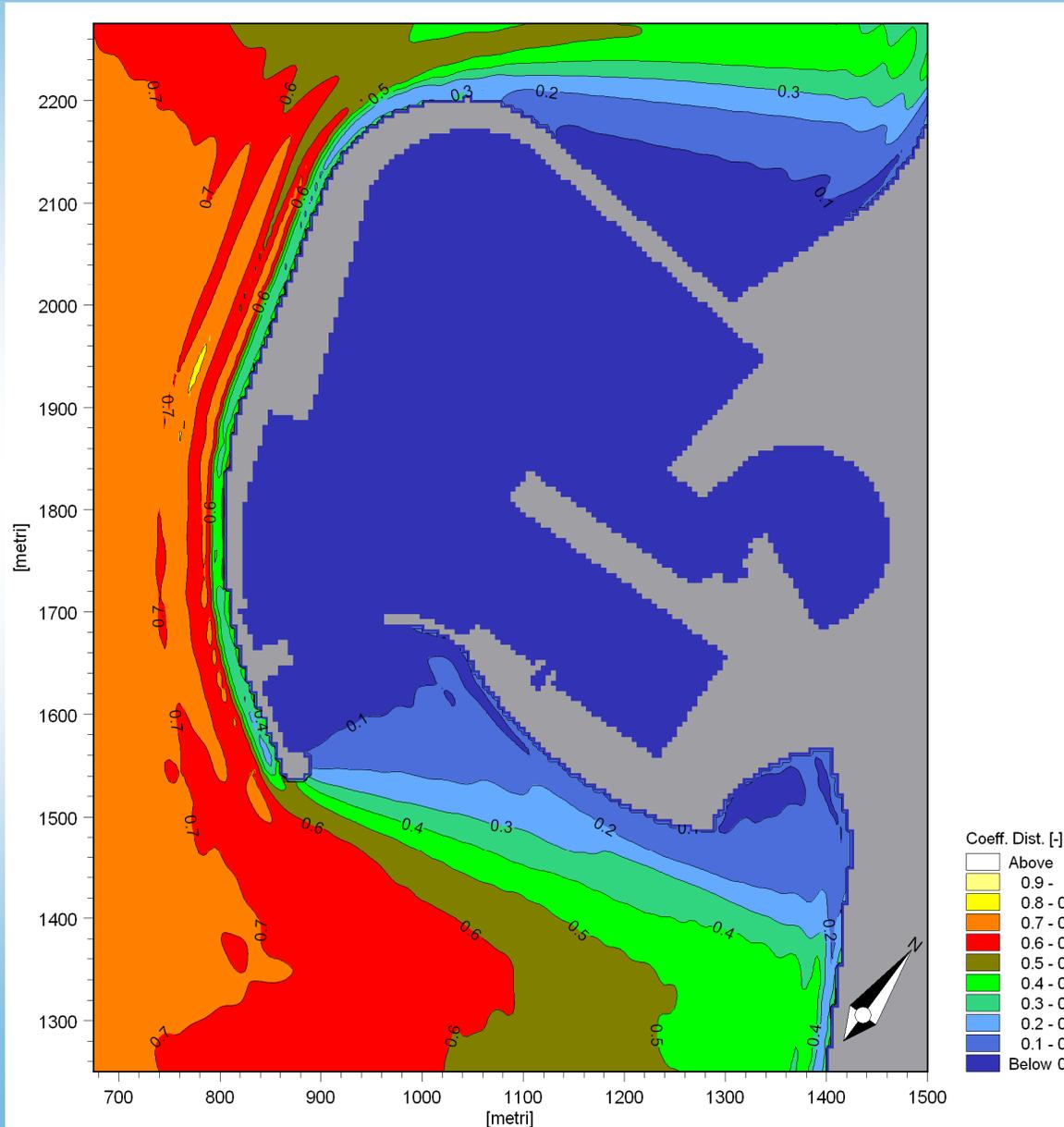
# Esempio di studio Idraulico marittimo: *l'agitazione interna – Modello alla Boussinesq*



coefficiente di disturbo ( $C_d$ ),  
definito come il rapporto tra  
l'altezza d'onda in un  
determinato punto del dominio  
di calcolo e la corrispondente  
altezza d'onda incidente

Distribuzione del coefficiente di  
disturbo per il layout 0 in  
corrispondenza di onde  
provenienti dal settore 240 - 270  
°N.

# Esempio di studio Idraulico marittimo: *l'agitazione interna – Modello alla Boussinesq*



Distribuzione del coefficiente di disturbo per il layout 2 in corrispondenza di onde provenienti dal settore 240 - 270 °N.

# Conclusioni



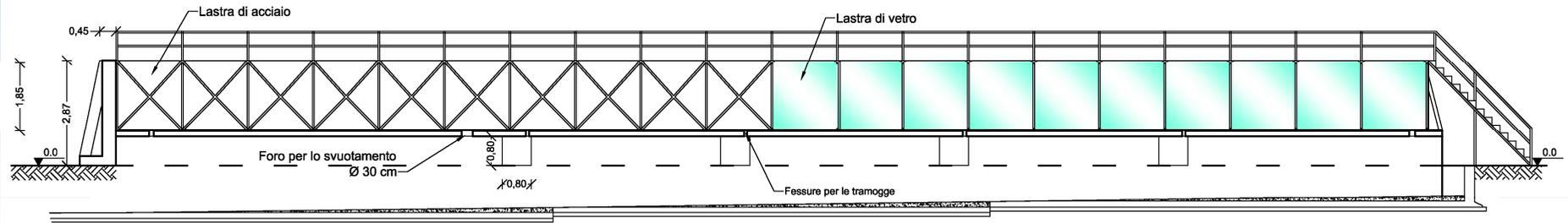
Si è fornita una rapida rassegna dei più noti modelli matematici, citando anche i più innovativi.

Si sono forniti esempi applicativi, riservando maggiore dettaglio nella trattazione dei modelli alla Boussinesq.

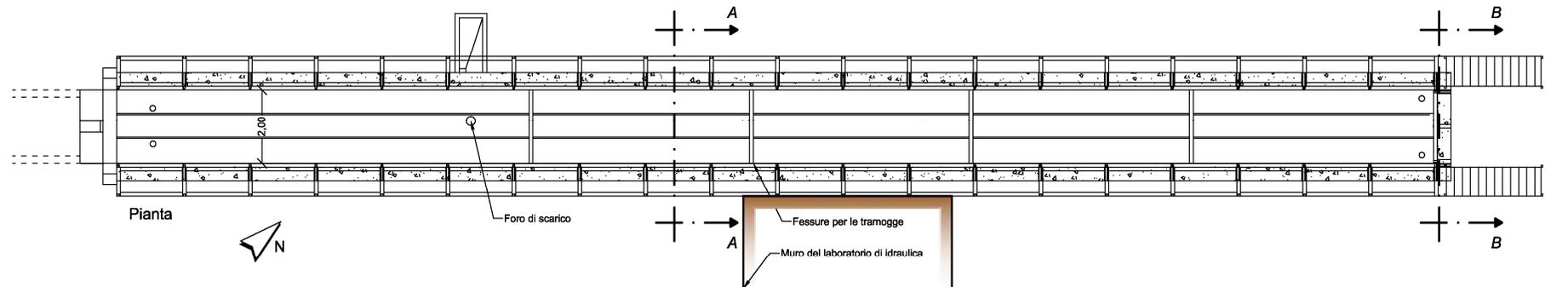
Modelli fisici?

# Il Progetto

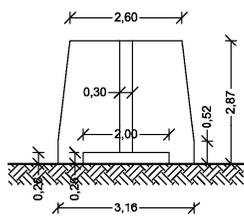
DICAM



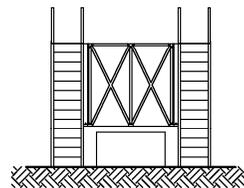
Prospetto-sezione



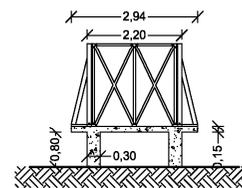
Pianta



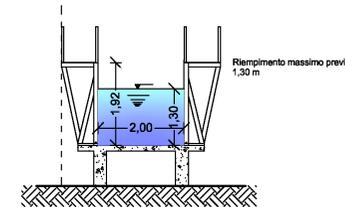
Prospetto NO



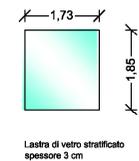
Prospetto SE



Sezione B-B



Sezione A-A

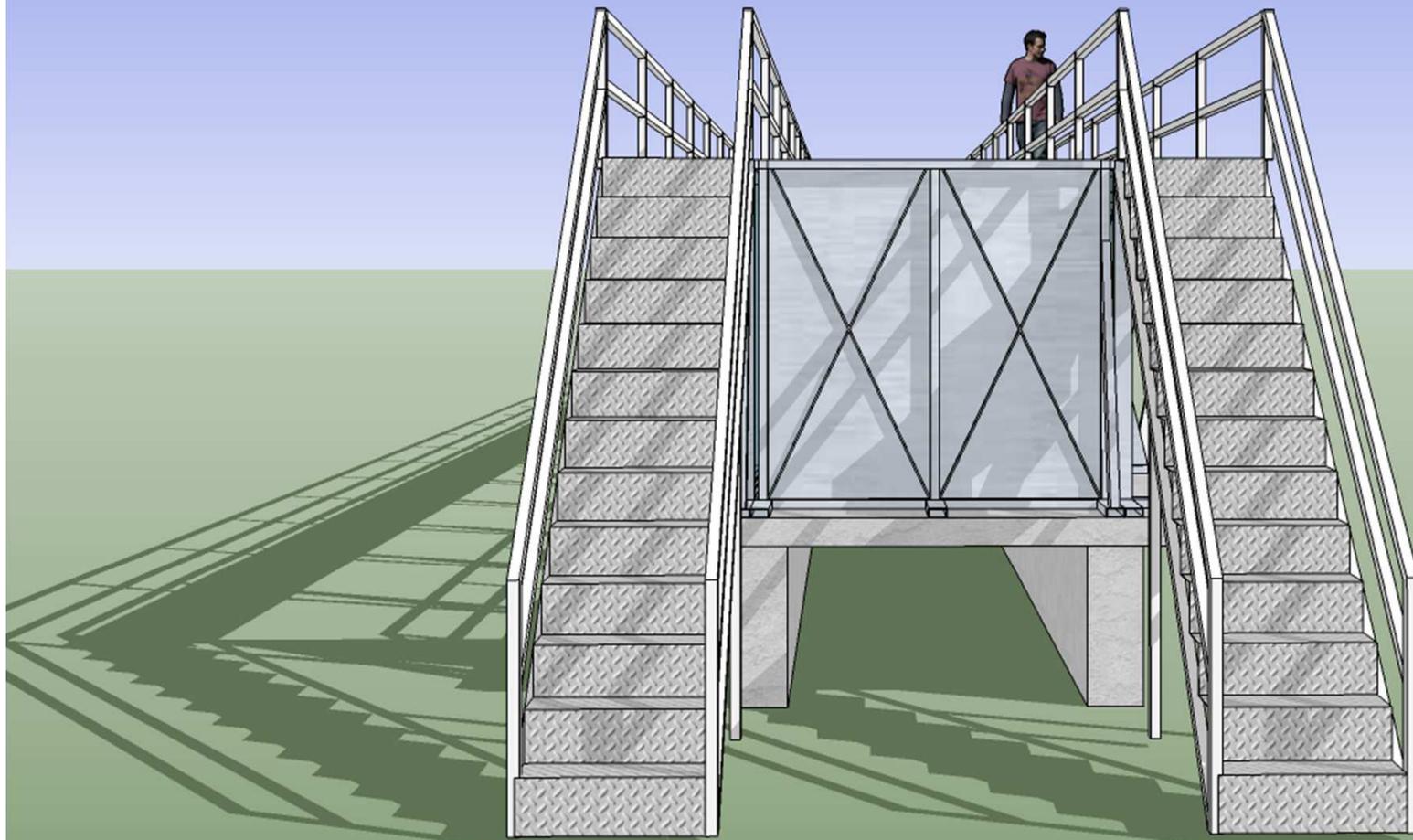


Lastra di vetro stratificato spessore 3 cm



UNIVERSITÀ DEGLI INGEGNERI  
DI TRAPANI





# La macchina ondogena



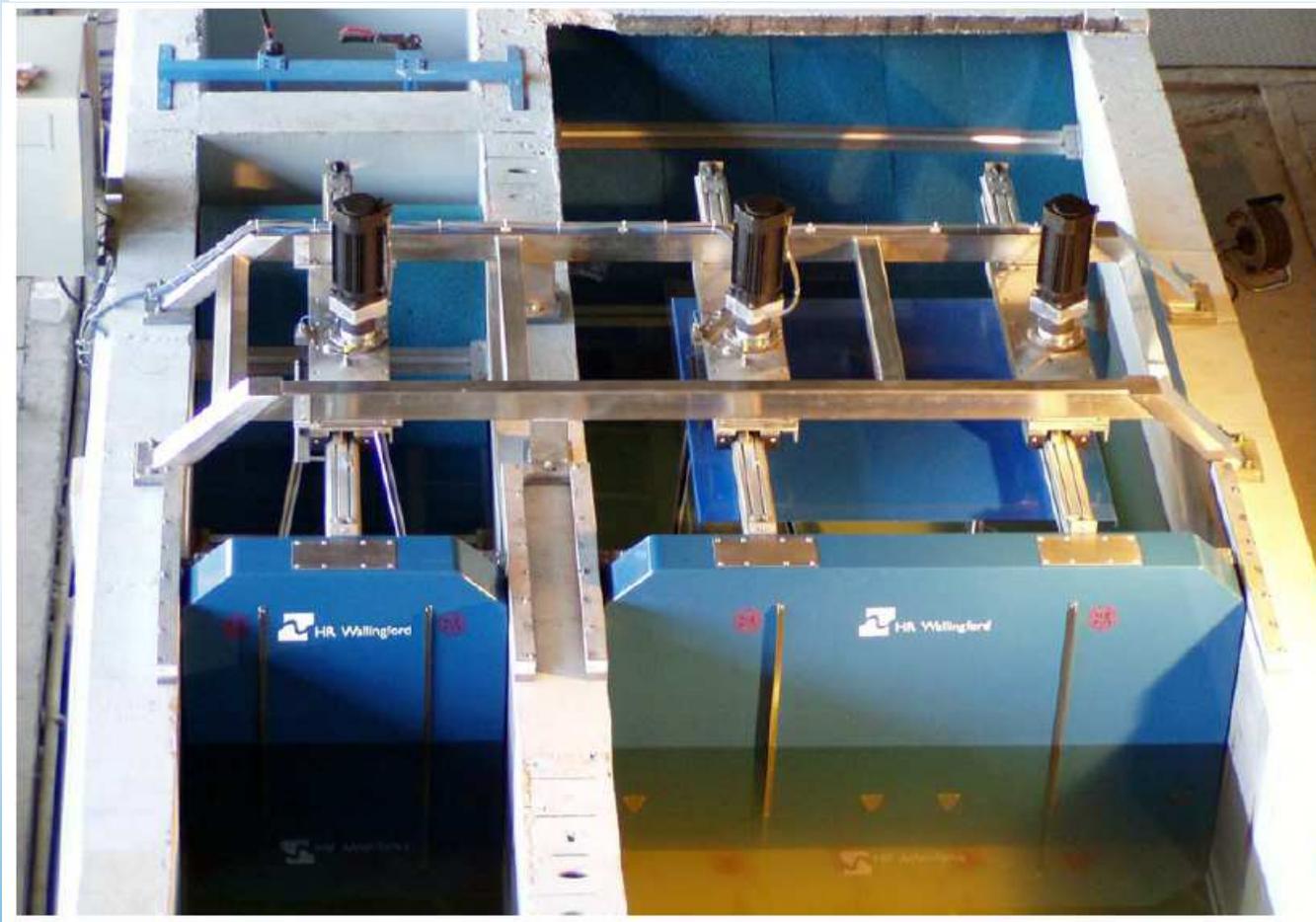
DICAM

Flume wavemakers for physical models – EQ012

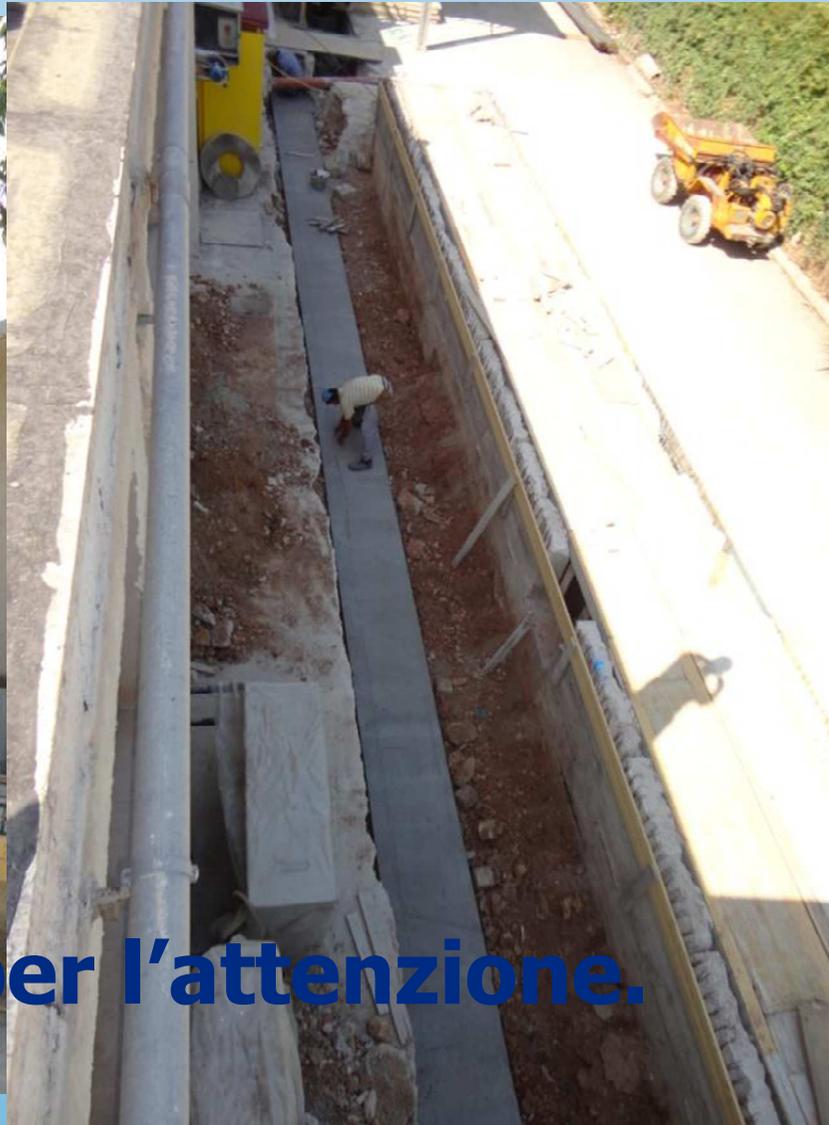
Long and short crested sea generation software for physical models – EQ010

Wave gauges for physical models – EQ009

Data acquisition & analysis software for physical models – EQ007



# IL CANTIERE



**Grazie per l'attenzione.**