

AUTORITA' PORTUALE DI PALERMO

PORTO DI TERMINI IMERESE *LAVORI DI COMPLETAMENTO DEL MOLO DI SOTTOFLUTTO* PROGETTO DEFINITIVO

Studio Mallandrino 

 **qualityaustria**
SYSTEMZERTIFIZIERT
ISO 9001:2008 NR.09369/0



AUTORITA' PORTUALE DI PALERMO



Progettisti:

Ing. G. Mallandrino

(Responsabile dell'integrazione tra le varie prestazioni specialistiche)

Ing. V. Favara

Ing. A. Novara

Ing. M. A. Rizzo

Ing. P. Traina

Progettazione impianti:

Ing. E. Petralia

Ing. P. Tusa

Collaboratori alla progettazione impianti:

Geom. V. D'Amico

Geom A. Martorana

Coordinatore Sicurezza in fase di progettazione:

Ing. Salvatore Acquista

Responsabile Unico del Procedimento:

Ing. Sergio La Barbera

Elaborati dattiloscritti <i>2. Relazioni tecniche e specialistiche</i>		Data 18/06/2013	Archivio 689
Elaborato	Studio dell'agitazione ondosa interna	Elaborato Favara - Novara	
2.4		Verificato Rizzo 689	Progetto Definitivo 18/06/2013
		Validato Mallandrino	Proprietà riservata L. 633 del 22/04/41



AUTORITÀ PORTUALE DI PALERMO

Porti di Palermo e Termini Imerese

LAVORI DI COMPLETAMENTO DEL MOLO DI SOTTOFLUTTO DEL PORTO DI TERMINI IMERESE

PROGETTO DEFINITIVO

STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSIA INTERNA

INDICE

PREMESSA	2
1. IMPOSTAZIONI DEL PROBLEMA DELLA CONOSCENZA DELLE AGITAZIONI INTERNE	3
1.1 VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE	5
1.2 IL MODELLO MATEMATICO DELLA DIFFRAZIONE.....	13
2. ANALISI DEI RISULTATI.....	15
3. AGIBILITA'	19
3.1 BACINO PORTUALE	19
3.2 IMBOCCATURA PORTUALE.....	22
4. CONCLUSIONI.....	25
APPENDICE: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	26

PREMESSA

Al fine di valutare l'agibilità del porto di Termini Imerese si è proceduto allo studio della penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio liquido nella configurazione riguardante il solo completamento della diga di sottoflutto, per poi, condurre l'analisi della configurazione che prevede anche il prolungamento della diga di sopraflutto, stante la volontà dell'Autorità Portuale di Palermo di realizzare contemporaneamente i due interventi.

In particolare, con riguardo alla configurazione che prevede il completamento della diga di sottoflutto si è proceduto allo studio dell'agitazione ondosa per il caso in cui il prolungamento della diga di sottoflutto sia realizzato con cassoni antiriflettenti non mantellati sul lato mare e il caso in cui i cassoni che costituiscono il corpo diga siano mantellati. Si è, quindi, operato per le tre configurazioni prese in esame un confronto fra lo stato di agitazione all'interno dello specchio liquido protetto e l'escursione massima ammissibile in relazione ai natanti ai quali il dispositivo è destinato.

L'agitazione ondosa è stata valutata utilizzando un modello matematico, che si esporrà di seguito, capace di analizzare il fenomeno della diffrazione per il layout di progetto, procedendo alla simulazione di un'ampia casistica. Il modello adottato assume la teoria lineare di Airy e considera la profondità dell'acqua costante, nonché le strutture di difesa con spessore trascurabile rispetto alle altre dimensioni lineari in gioco; tutto il confine della massa liquida sarà definito attraverso la propria capacità di riflessione, determinata dopo approfondita disamina.

Il porto di Termini Imerese è costituito da una diga foranea in direzione Est-Sud-Est e da quella di sottoflutto in direzione Est, entrambe parzialmente banchinate internamente. Dalla riva si diparte verso levante un ampio molo trapezoidale, completamente banchinato, che suddivide lo specchio liquido definito dalle dighe sopraccitate in due darsene. Nella darsena di levante è stata realizzata una zona di ormeggio per unità da diporto.

L'intervento proposto, in conformità alle previsioni del Piano Regolatore del Porto, prevede il completamento della diga di sottoflutto per uno sviluppo di circa 975 m e della banchina, oggi incompleta, per uno sviluppo di circa 250 m. Per il completamento della diga sono previste tre sezioni tipologiche: pila di massi per il primo tratto, opera a gettata in massi artificiali per il secondo e cassoni cellulari antiriflettenti per il terzo tratto. Infine, la banchina di nuova realizzazione sarà prevista in massi cellulari antiriflettenti.

Nel prosieguo si procederà, pertanto, alla valutazione dell'agitazione ondosa nell'avamposto e nella nuova zona di ormeggio considerando, in un primo momento, il solo

prolungamento della diga prevista in progetto e, successivamente, anche il prolungamento della diga di sopraflutto realizzato mediante un'opera a gettata.

1. IMPOSTAZIONI DEL PROBLEMA DELLA CONOSCENZA DELLE AGITAZIONI INTERNE

Per uno studio particolareggiato dello stato di agitazione all'interno del Porto di Termini Imerese con riguardo alla sua realizzazione non può prescindersi da un'attenta analisi quantitativa della diffrazione attorno alle testate delle strutture di difesa.

Ben sapendo che con il nome di diffrazione si indica l'insieme fenomenologico conseguente alla propagazione delle onde in base a leggi che non seguono quelle della propagazione rettilinea nei mezzi omogenei, e quindi fuori dai dettami dell'ottica geometrica, occorre precisare che il fenomeno si manifesta in modo sensibilmente apprezzabile solo se le onde incontrano un ostacolo capace di limitare l'estensione utile dei fronti a dimensioni dell'ordine della lunghezza d'onda. Ciò comporta che il flusso energetico connesso ad un treno d'onde subisce anche una propagazione attraverso le ortogonali ai fronti d'onde, cioè lateralmente al senso di propagazione delle stesse onde.

Da ciò segue che, nello studio della diffrazione, non può essere ammessa l'ipotesi della conservazione dell'energia attraverso le ortogonali, come già fatto nella rifrazione. Infatti, nel caso, come quello in esame, di diffrazione attorno alla testata di un'opera frangiflutto, le ortogonali convergono tutte in un punto coincidente con la testata stessa.

L'esame teorico della diffrazione del moto ondoso viene, com'è noto, condotto con gli stessi metodi elaborati per lo studio degli analoghi fenomeni nell'ottica e nell'acustica; il fenomeno della diffrazione può essere, infatti, spiegato con il principio di Huygens-Fresnel d'appresso, seppur sinteticamente, ricordato.

Sia S una sorgente puntiforme ed s una superficie chiusa che la contiene in cui ogni elemento dA diviene a sua volta sorgente di onde elementari che, con opportune intensità e fase, si propagano in tutte le direzioni. Ciò, ovviamente, comporta che in un punto posto al di fuori della superficie s , l'intensità della perturbazione che vi giunge è la risultante dell'interferenza di tutte le onde elementari emesse da ciascun elemento ds ; allorché, in particolare, la superficie s sia una superficie d'onda, le diverse componenti elementari risultano in fase.

Ove, per ricondurre subito il discorso al problema della diffrazione, vi sia un ostacolo che taglia la superficie s , in un punto al di fuori di essa perverranno solo le onde elementari emesse dalla porzione di s non intercettata dall'ostacolo.

Ogni punto del fronte d'onda che avanza deve, pertanto, essere considerato come il centro di una perturbazione secondaria che si dirama in tutte le direzioni. La successiva configurazione assunta dai fronti d'onda, dopo un intervallo finito di tempo, nasce, allora, dall'involuppo delle suddette perturbazioni secondarie.

Allorquando un treno d'onde supera la testata di una diga, accanto ad un'aliquota di energia riflessa della diga stessa, una parte dell'energia posseduta dal treno d'onde incidente si propaga a tergo dell'ostacolo. Ove ciò non fosse, infatti, nella zona d'ombra si avrebbe la calma assoluta: il che è un paradosso.

L'aliquota dell'energia riflessa dall'opera dipende, invece, dalla geometria della stessa e, come meglio si vedrà d'appresso, mentre per opere con parete verticale può assumersi un coefficiente di riflessione pari all'unità, per strutture del tipo a gettata il coefficiente in parola dipende, non solo, dall'inclinazione del paramento foraneo e dalla natura della mantellata, sia in termini di natura dei blocchi, sia di collocazione degli stessi, ma anche dalle stesse caratteristiche cinematiche del moto ondoso. Solo in prima approssimazione e per analisi di larga massima è lecito assumere per opere a gettata un valore del coefficiente di riflessione pari a 0,5.

Lo studio della diffrazione, nel senso più generale del termine, affronta la valutazione delle caratteristiche del moto ondoso sia nella zona di riflessione dello stesso, sia nella zona protetta a tergo dell'ostacolo. L'esame dei fenomeni di diffrazione comporta, pertanto, la conoscenza delle agitazioni ondose non solo all'imboccatura ma anche di fronte ed a tergo dell'ostacolo.

La conoscenza dell'agibilità e, pertanto, della connessa affidabilità del dispositivo portuale, implica, quindi, un approfondimento dello studio del fenomeno di che trattasi, la cui soluzione è stata posta sotto forma di grafici e tabelle dal Wiegel nel caso di ostacolo rettilineo semindefinito e perfettamente riflettente che si erge su profondità costante. Ma tale semplificazione può servire solo per un primo orientamento di larga massima, talché, nel caso che qui verrà trattato, relativo al porto di Termini Imerese, si applicherà la teoria nella sua completa formulazione.

1.1 VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE

Quando un treno di onde incide su un'opera, l'energia connessa allo stesso moto ondoso, E_i , si suddivide in tre parti: una, E_r , viene riflessa; un'altra, E_d , viene dissipata; una terza, E_t , viene trasmessa oltre l'ostacolo.

In ogni caso varrà la ovvia condizione che:

$$E_i = E_r + E_d + E_t$$

Nel caso di opere interne al porto destinate all'accosto, a tergo delle quali vi sono grandi piazzali operativi, come è, per altro, assai frequente, si deve considerare nulla ogni trasmissione e l'energia dell'onda incidente si ritroverà sotto forma di energia riflessa e di energia dissipata; quest'ultima sarà da assumere nulla solo nel caso di opere a parete verticale piana, mentre dipenderà dalla geometria dell'opera e dalle caratteristiche cinematiche del moto ondoso nel caso di parete perforata o di banchina a scarpa.

Analizzando, per altro verso, la condizione che si viene a creare all'esterno del porto si dovrà fissare l'attenzione sulle opere di difesa: ma anche in tal caso valgono le considerazioni esposte dianzi, avendosi la riflessione perfetta solo nell'ipotesi di applicazione del tipo a parete verticale tradizionale. Nel caso di opere a gettata vi è certamente un'aliquota non trascurabile di energia dissipata, non essendovi, nella generalità dei casi, la possibilità di escludere, almeno in via di principio, l'energia trasmessa, per la presenza dei numerosi vuoti nell'ammasso artificiale che, appunto, forma la difesa.

Nel caso del porto di Termini Imerese, sia le opere portuali esterne che quelle interne sono tali da trasformare l'energia dell'onda incidente in due sole aliquote: quella riflessa e quella dissipata, dove nel caso di parete verticale piana a diretto contatto con il moto ondoso incidente, anche la seconda quota parte può essere trascurata.

Per tenere conto dell'influenza sul fenomeno di riflessione della inclinazione dell'ostacolo investito si può fare riferimento alla figura 1 che, per il caso di parete impermeabile liscia, riporta l'andamento del coefficiente di riflessione, definito dal rapporto fra l'altezza d'onda riflessa e quella incidente, al variare della pendenza dell'opera e della ripidità dell'onda incidente, cioè, come è noto, del rapporto tra altezza e lunghezza dell'onda.

E' il caso di osservare che il concetto di parete impermeabile impone che la componente della velocità in seno alla massa fluida normale al piano inclinato è nulla; l'ipotesi di parete liscia significa che lungo la stessa parete la componente tangenziale della velocità può cambiare solo per effetto di mutazione nel campo idrodinamico, in relazione alla profondità di ogni singolo punto della parete stessa e giammai per intrinseche caratteristiche di quest'ultima. Nel

»

grafico di figura 2 il medesimo andamento viene esposto invertendo la grandezza posta in ascissa con quella assunta a parametro delle curve, fermo restando la collocazione in ordinata del coefficiente di riflessione che, ovviamente, può assumere il valore unitario solo per parete verticale.

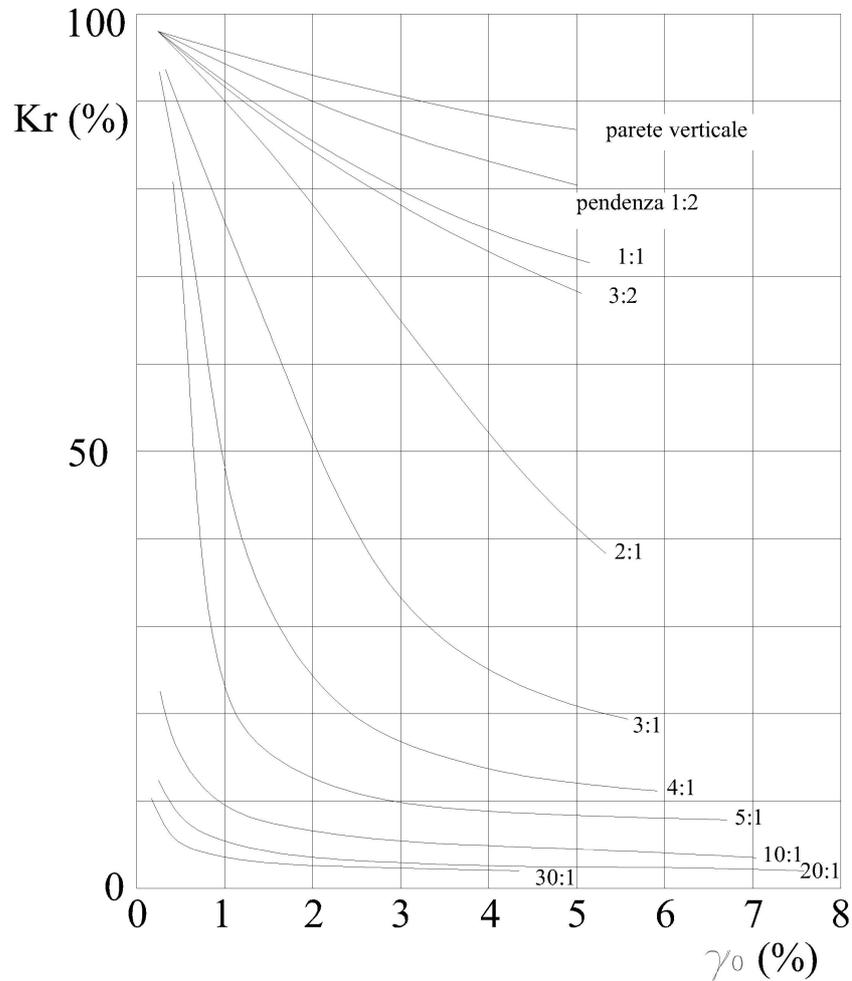


Figura 1 – Coefficiente di riflessione di un piano inclinato liscio di diversa pendenza in funzione della ripidità dell'onda incidente

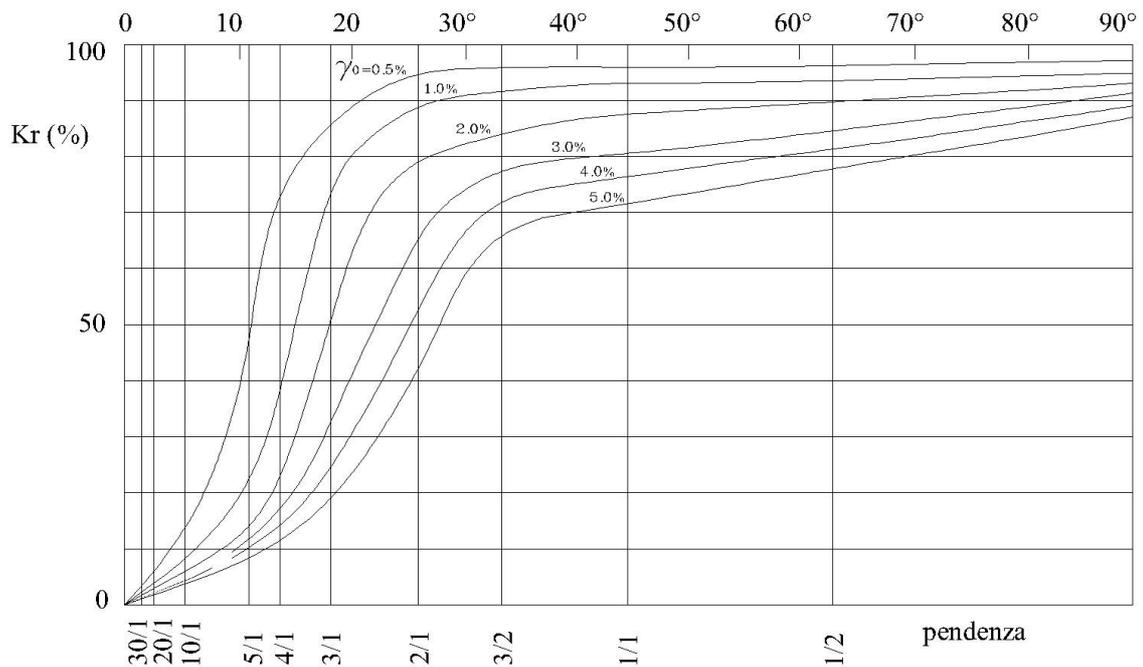


Figura 2 – Coefficiente di riflessione di un piano inclinato liscio per diverse ripidità dell'onda incidente in funzione della pendenza dell'ostacolo

La figura 3 consente un approccio più vicino alle pratiche applicazioni perchè porge, al variare delle stesse grandezze geometriche dell'opera e cinematiche del moto ondoso, l'andamento del valore del coefficiente di riflessione reale, in relazione a quello teorico dianzi considerato, attraverso l'introduzione di un fattore correttivo, ρ , che, appunto tiene conto del fatto che la parete non è, nei fatti, né impermeabile, né liscia; per il caso di materiale minuto disposto a formazione di paramenti fortemente irregolari si propone di assumere il valore 0.8; nel caso in cui, viceversa, lo stesso paramento sia costituito da materiale regolarmente disposto si indica il valore 0.35; nell'ipotesi di paramenti realizzati in scogliere si indicano valori compresi fra 0.30 e 0.60.

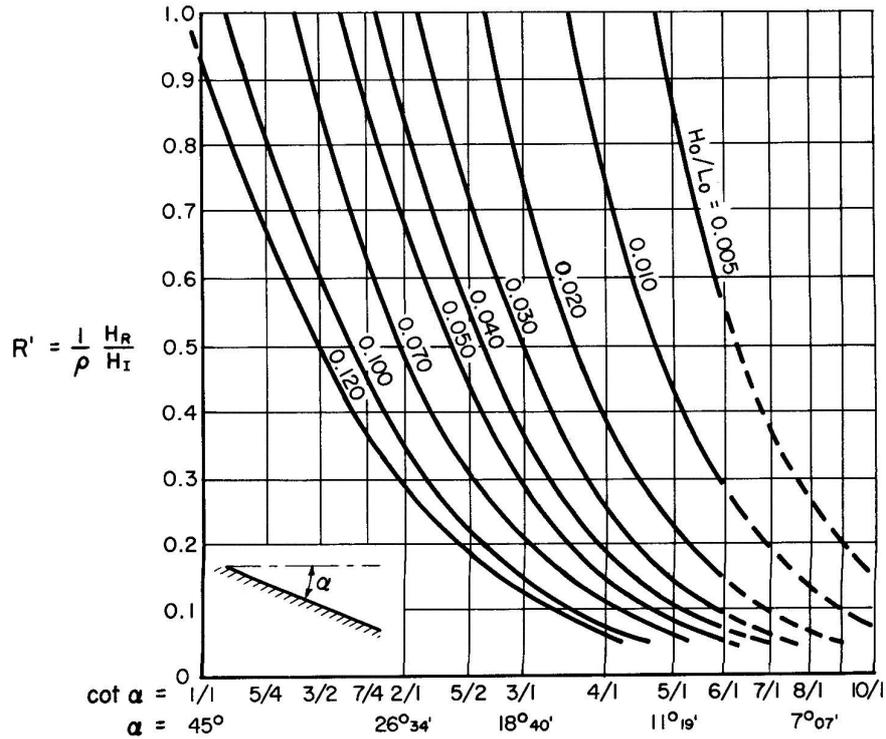


Figura 3 - Andamento del valore del coefficiente di riflessione reale in relazione a quello teorico attraverso l'introduzione di un fattore correttivo ρ

Per una rappresentazione, ancora meglio aderendo ai casi concreti, si propone il ricorso al grafico di figura 4 che riporta l'andamento del coefficiente di riflessione per tre casi relativi ad altrettante diverse nature della parete, in funzione del parametro detto *surf similarity*:

$$\xi = \frac{1.0}{\cot \theta \sqrt{\frac{H_i}{L_0}}}$$

che contiene indicazioni sia della geometria dell'opera sia delle caratteristiche cinematiche del moto ondoso, come l'altezza e la lunghezza.

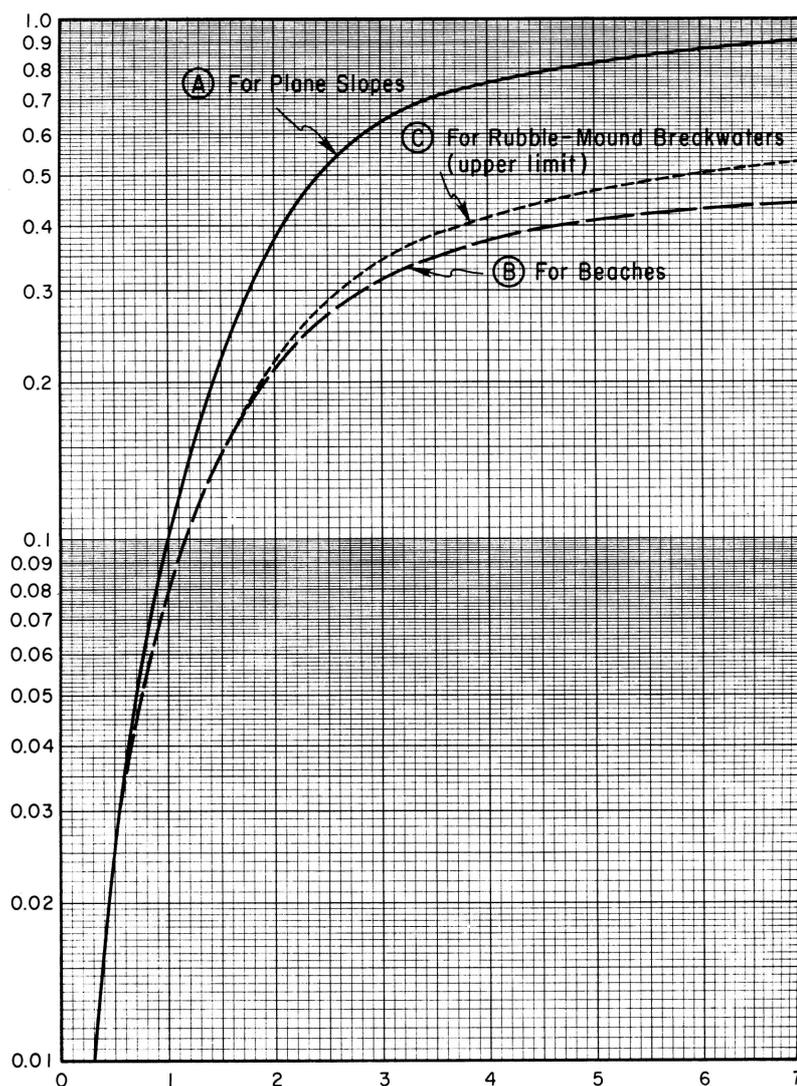


Figura 4 - Andamento del coefficiente di riflessione per tre casi relativi ad altrettante diverse nature della parete in funzione del parametro surf similarity

Tuttavia, nel caso di scogliere, i valori ottenuti dal precedente grafico debbono ulteriormente essere corretti attraverso l'introduzione di due coefficienti riduttivi capaci di tener conto, rispettivamente, della dimensione caratteristica, d_g , dei blocchi che formano la mantellata e del frangimento dell'onda incidente, nonché del numero di ordini che formano la mantellata stessa e del rapporto fra la predetta dimensione caratteristica dei blocchi e l'altezza dell'onda.

Il primo coefficiente riduttivo si ottiene dalla figura 5, il secondo, dalla tabella 1 sotto riportata.

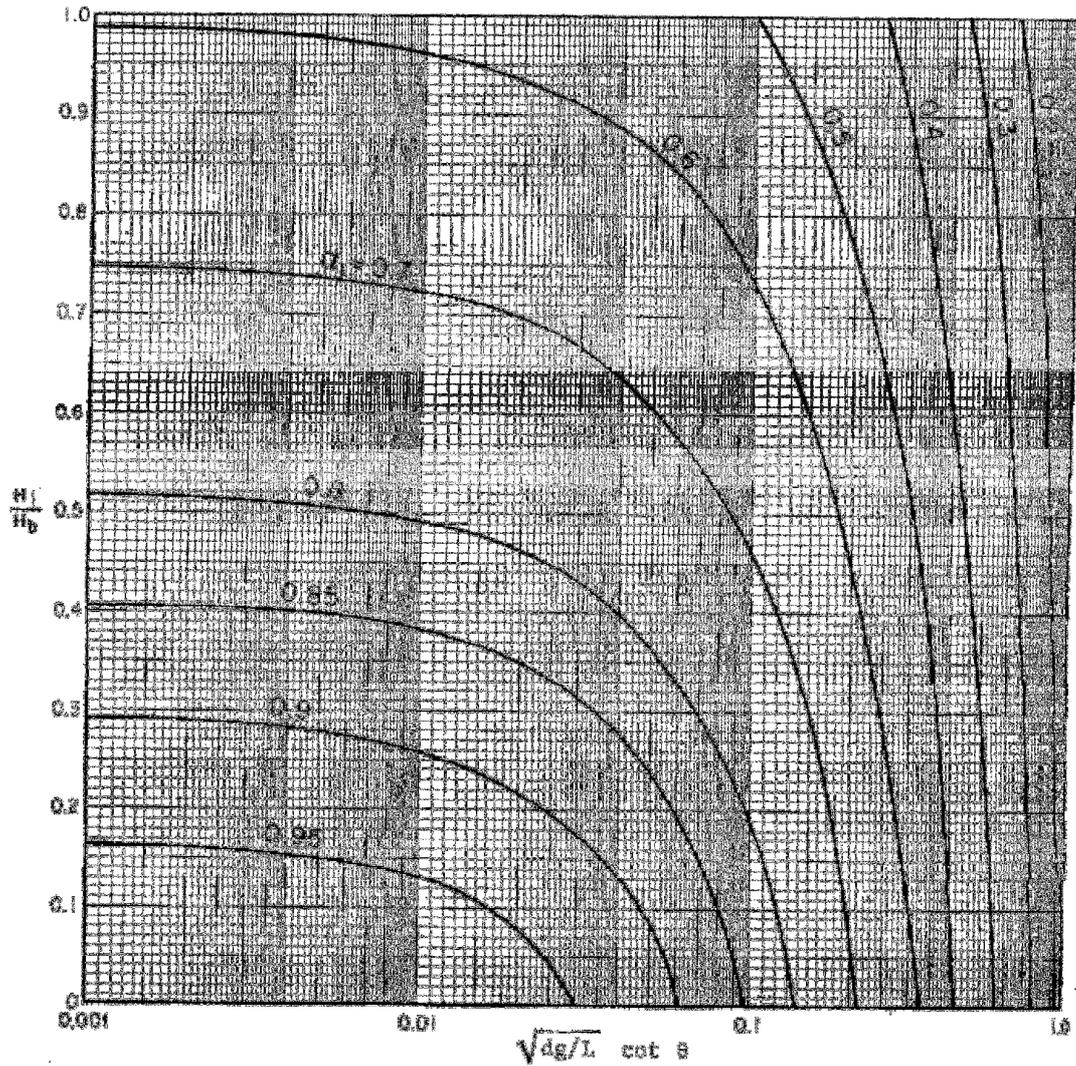


Figura 5 – Andamento del coefficiente riduttivo α_1

d_g/H_i	n			
	1	2	3	4
<0.75	1.00	0.93	0.88	0.78
da 0.75 a 2.0	1.00	0.71	0.70	0.69
>2.0	1.00	0.58	0.52	0.49

Tabella 1 - Coefficiente correttivo α_2 al variare del numero di ordini che formano la mantellata e del rapporto fra dimensione caratteristica dei blocchi ed altezza dell'onda.

Per ciò che concerne la configurazione di futura realizzazione del porto di Termini Imerese è stata, quindi, definita la geometria sia delle opere di difesa che di quelle interne, non solo con riguardo alla disposizione planimetrica, ma anche con riferimento alla capacità di riflessione delle onde. Attraverso la conoscenza della sezione trasversale è stato possibile, infatti, definire il coefficiente “ a ”, di cui si parlerà al successivo paragrafo, che, come detto, dipende dall’inclinazione del paramento foraneo, dalla natura e dalla geometria della mantellata.

Sulla scorta dei dati forniti dalla letteratura sono stati attribuiti i seguenti coefficienti di riflessione:

- opere a parete verticale (cassone, pila di massi): $K_r = 0,85$;
- mantellate in massi artificiali: $K_r=0,5$;
- opere antiriflettenti (cassone forato, masso cellulare antiriflettente): $K_r=0,65$;
- spiaggia: $K_r=0,20$;
- scogliera naturale: $K_r=0,40$

Nel seguito si rappresentano graficamente i valori dei coefficienti di riflessione adottati per le varie tipologie costruttive del Porto di Termini Imerese per le tre configurazioni prese in esame che indicheremo nel seguito layout 1, 2 e 3.

I layout 1 e 2 si riferiscono alla configurazione che prevede il solo completamento della diga di sottoflutto e si differenziano per il valore del coefficiente di riflessione assunto per il lato mare del prolungamento della diga.

Infine, il layout 3 rappresenta la configurazione planimetrica del Porto di Termini Imerese a seguito del completamento della diga di sottoflutto e del prolungamento di quella di sopraflutto.

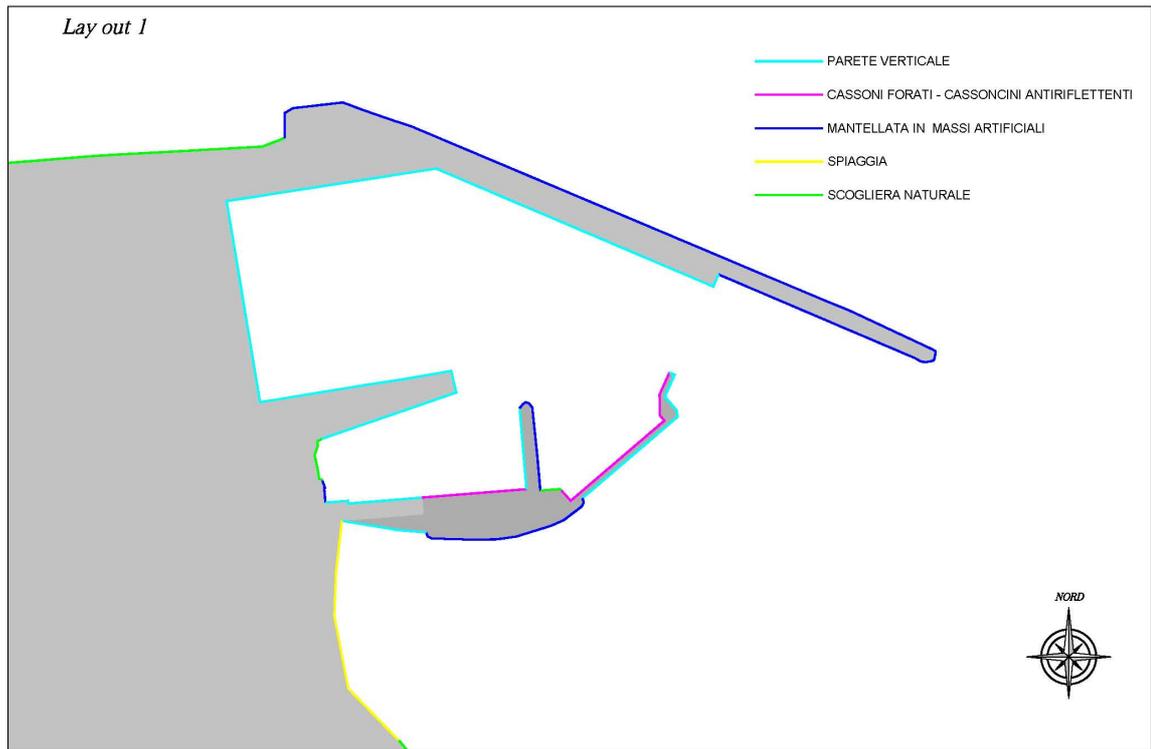


Figura 6 – *Layout 1 (Completamento della diga di sottoflutto – ultimo tratto lato mare in parete verticale): Valori dei coefficienti di riflessione*

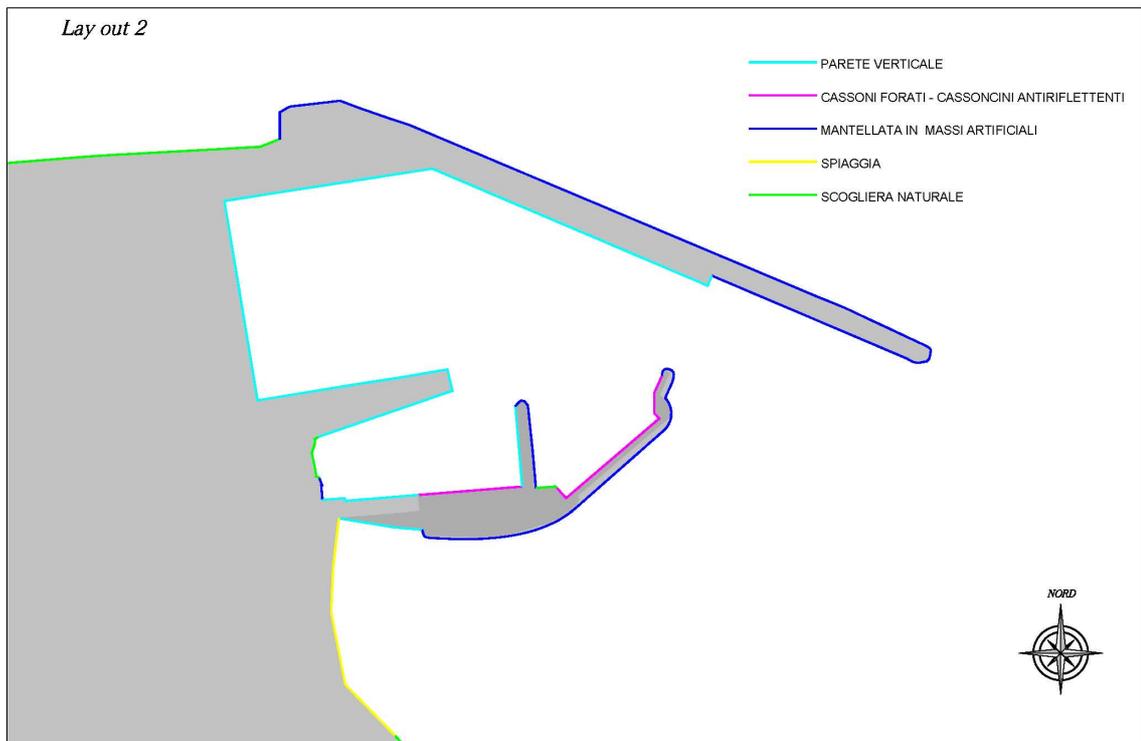


Figura 7 – *Layout 2 (Completamento della diga di sottoflutto – ultimo tratto lato mare mantellato): Valori dei coefficienti di riflessione*

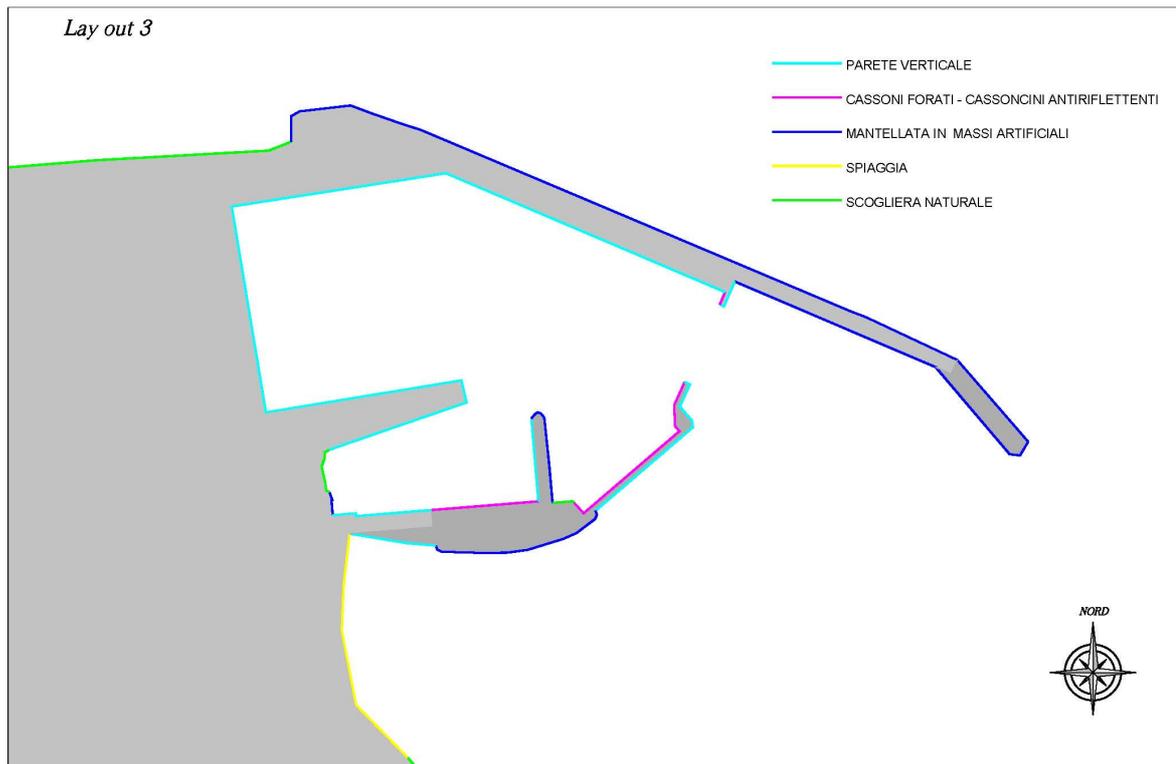


Figura 8 – *Layout 3 (Completamento della diga di sottoflutto e prolungamento della diga di sopraflutto): Valori dei coefficienti di riflessione*

1.2 IL MODELLO MATEMATICO DELLA DIFFRAZIONE

Nell'ipotesi di linearizzazione delle equazioni del moto ondoso irrotazionale in seno ad una massa di fluido perfetto ed introducendo le seguenti condizioni ai limiti:

- pressione nulla in superficie;
- fondo fisso ed impermeabile, in modo che la componente verticale della velocità sia ivi nulla;
- frangionde impermeabile e di geometria nota, anche in termini di capacità di riflessione dello stesso;
- proprietà additiva del potenziale, talchè il potenziale totale sia la somma di quello dovuto all'onda diffratta e di quello dell'onda incidente;
- assenza di frangimento;

il fenomeno risulta retto dalla seguente nota equazione di Laplace scritta in coordinate cilindriche (r, ϕ, z) con origine nella testata del frangiflutti:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial \phi}{r^2 \partial \alpha} + \frac{\partial \phi}{r \partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

essendo ϕ la funzione potenziale della velocità, la cui espressione può scriversi:

$$\phi = \frac{Hg}{2\sigma} \times \frac{chk(h+z)}{chkh} \varphi(r, \alpha)$$

cioè:

$$\phi = \varphi(r, \alpha) \cosh k(h+z) e^{-j\sigma t}$$

con:

σ frequenza angolare pari a $2\pi/T$

k numero d'onda pari a $2\pi/L$, calcolato tramite la funzione di dispersione della teoria lineare

h generico valore della profondità

Essendo:

$$\varphi(r, \alpha) = \rho(r, \alpha) e^{i\beta(r, \alpha)}$$

una funzione complessa dipendente solo dalle coordinate planimetriche del punto e non dell'affondamento z .

In tal modo sarà sempre soddisfatta la condizione di fondo fisso ed impermeabile:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)_{z=-h} = 0$$

e la condizione di Poisson:

$$g \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0$$

che si riduce alla:

$$kg \cdot \operatorname{tgh}(kh) = \sigma^2$$

Il problema viene così ridotto ad un problema piano dove la funzione incognita $\varphi(r, \alpha)$ può essere determinata in base alle condizioni al contorno, risolvendo la seguente equazione di Helmholtz:

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0$$

avendo indicato con ∇^2 è il noto operatore di Laplace, definito nel piano coincidente con il livello indisturbato del mare.

Indicando con φ_i l'aliquota di funzione complessa corrispondente alla sola onda incidente e con φ_d quella della sola onda diffratta, si avrà, per la proprietà additiva del potenziale:

$$\varphi = \varphi_i + \varphi_d$$

In definitiva si avrà pertanto:

$$\Delta_2 \varphi_d + k^2 \varphi_d = 0$$

Con la classica condizione all'infinito di Sommerfield:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \varphi_d}{\partial r} - jk \varphi_d \right) = 0$$

Dalle suddette equazioni, ricordando che il profilo η è legato al potenziale dalla seguente relazione:

$$\eta = \left(\frac{1}{g} \times \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=0}$$

Si ottiene:

$$\eta = \frac{H}{2} \varphi(r, \alpha) e^{i \left[\beta(r, \alpha) - \sigma - \frac{\pi}{2} \right]}$$

L'altezza d'onda diffratta è, quindi, proporzionale a quella incidente per tramite del modulo di una funzione complessa ed è sfasata rispetto all'onda incidente di una quantità che dipende dall'argomento della funzione complessa stessa $\varphi(r, \alpha)$.

Espressione della funzione complessa fu fornita da Sommerfield per l'ottica ed estesa da Penney e Price alle onde liquide monocromatiche; la soluzione della suddetta funzione complessa richiede l'uso degli integrali di Fresnel e l'introduzione di variabili ausiliarie.

Il caso particolare del Porto di Termini Imerese verrà affrontato mediante il ricorso ad un modello numerico basato sulle considerazioni teoriche dianzi esposte.

2. ANALISI DEI RISULTATI

Utilizzando il modello matematico esposto al precedente paragrafo, è stato analizzato il fenomeno della diffrazione per i tre layout del porto di Termini Imerese, procedendo alla simulazione di un'ampia casistica.

Il modello, come detto, assume la teoria lineare di Airy e considera la profondità dell'acqua costante, nonché le strutture di difesa con spessore trascurabile rispetto alle altre dimensioni lineari in gioco.

Al fine di rendere più espressivi i risultati cui si è pervenuti, si è adottato un tipo di rappresentazione adimensionale riportando, al posto dei valori dell'altezza d'onda, quelli del coefficiente d'altezza definito, com'è noto, dal rapporto fra l'altezza d'onda diffratta e quella incidente.

Tale rappresentazione, a differenza di quella ove si riportano direttamente i valori delle altezze, si presenta, per la linearità del fenomeno, con carattere di maggiore generalità, potendosi facilmente condurre utili confronti fra diverse condizioni ondamiche incidenti.

L'analisi del clima ondoso sottocosta ha permesso di individuare le direzioni di provenienza più significative ai fini della valutazione dell'agitazione ondosa all'interno dello specchio liquido portuale. Lo studio della diffrazione è stato condotto, quindi, per onde provenienti da 0°N e periodi 6, 8, 10 e 12 s e per onde da 60°N e periodi 6, 8, 10 e 12 s.

Sono state condotte le prove per i predetti valori del periodo, utilizzando il sopra richiamato modello al primo ordine, originariamente sviluppato, come noto, da Sommerfield per le onde luminose e successivamente esteso da Penny e Price al caso di onde liquide.

Si è proceduto, quindi, al calcolo del coefficiente di diffrazione con riguardo alle seguenti superfici liquide (fig. 9): avamposto (zona 1) e zona di ormeggio (zona 2).

In particolare, il modello adottato consente di condurre l'analisi statistica dei valori dei coefficienti di diffrazione ottenuti in ogni punto della griglia del dominio di calcolo. Tuttavia, data la variabilità spaziale di tali coefficienti si è ritenuto cautelativo considerare il valore del coefficiente di diffrazione associato al 75° percentile che rappresenta il valore al di sotto del quale si situa il 75% dei dati.

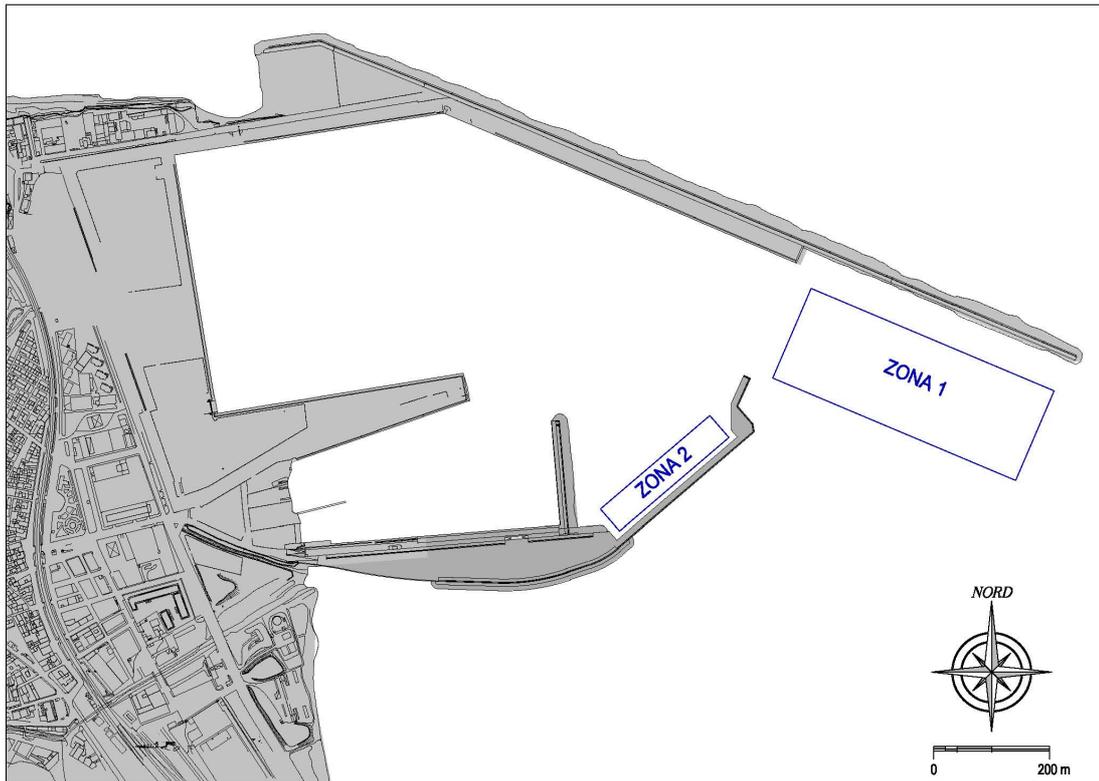


Figura 9 – Avamporto e zona di ormeggio

Nella tabella che segue si riportano i valori dei coefficienti di diffrazione ottenuti per le tre configurazioni prese in esame simulando onde provenienti da 0°N e 60°N (Tab. 2).

		Dir. (°N)	Periodo			
			6 s	8 s	10 s	12 s
ZONA1	LAYOUT 1	0° N	0.138	0.120	0.115	0.103
		60° N	0.789	0.772	0.727	0.720
	LAYOUT 2	0° N	0.126	0.112	0.105	0.102
		60° N	0.778	0.768	0.721	0.715
	LAYOUT 3	0° N	0.044	0.040	0.039	0.036
		60° N	0.555	0.552	0.548	0.544
ZONA2	LAYOUT 1	0° N	0.052	0.048	0.038	0.022
		60° N	0.069	0.059	0.044	0.042
	LAYOUT 2	0° N	0.050	0.045	0.031	0.020
		60° N	0.051	0.047	0.042	0.038
	LAYOUT 3	0° N	0.036	0.031	0.028	0.017
		60° N	0.043	0.037	0.035	0.022

Tabella 2 - Valori dei coefficienti di diffrazione nell'avamporto e nella zona di ormeggio

Il raffronto fra gli esiti delle prove condotte, come esposte nelle figure riportate in appendice alla presente relazione, che, appunto, rappresentano, con diversi colori, i campi caratterizzati da predeterminati valori dell'altezza d'onda interna per valori unitari di quella incidente, mostra che per la zona 1 il coefficiente di diffrazione assume il valore minimo di 0.036 ed il valore massimo di 0.789; per la zona 2 il coefficiente di diffrazione va da un valore minimo di 0.017 fino ad un valore massimo di 0.069 (Tab. 2). Come risulta, infatti, intuitivo la nuova zona di ormeggio, poichè protetta dagli attacchi del moto ondoso, risulta caratterizzata da coefficienti di diffrazione di gran lunga inferiori a quelli presenti nell'avamposto.

Si osserva, inoltre, che le simulazioni condotte per i casi di prolungamento della diga di sottoflutto realizzato con cassoni non mantellati (layout 1) e con cassoni mantellati (layout 2) mostrano che i coefficienti di diffrazione assumono valori leggermente inferiori per quest'ultima configurazione data la maggiore capacità della mantellata di dissipare l'energia dell'onda incidente.

Infine, il coefficiente di diffrazione assume, in entrambe le zone individuate e per onde provenienti dalla medesima direzione, valori più elevati per il layout 1 e si riduce per il layout 3. La configurazione che prevede il completamento della diga di sottoflutto ed il prolungamento di quella di sopraflutto (layout 3) garantisce, infatti, nelle zone "avamposto" e "ormeggio" una protezione dagli attacchi del moto ondoso maggiore rispetto a quella che prevede il solo completamento della diga di sottoflutto (layout 1-2), com'era logico attendersi. Per i tre layout individuati i valori massimi del coefficiente di diffrazione si raggiungono per eventi con direzione di provenienza di 60°N, mentre, quelli minimi sono sempre associati agli eventi con direzione di 0°N, com'è intuitivo.

Le onde provenienti da 60°N penetrano nell'avamposto con scarsa attenuazione. Nell'avamposto si ha, infatti, un coefficiente di diffrazione dell'ordine di 0.7 per i layout 1 e 2 e di 0.5 per il layout 3, mentre la zona riservata alle imbarcazioni commerciali risulta caratterizzata da valori del coefficiente di diffrazione variabili tra 0.06 e 0.04 per i layout 1 e 2 e compresi tra 0.04 e 0.02 per il layout 3.

Per onde provenienti dalla direzione 0°N si hanno, invece, nella zona dell'avamposto valori del coefficiente di diffrazione dell'ordine di 0.1 per i layout 1 e 2 e di 0.04 per il layout 3, mentre nell'area destinata all'ormeggio i valori del coefficiente di diffrazione sono compresi nell'intervallo 0.05-0.02 per i layout 1 e 2 e risultano variabili tra 0.04 e 0.02 per il layout 3.

3. AGIBILITA'

In applicazione a quanto già detto in premessa, al fine della valutazione dell'agibilità, si è già dianzi ricavato lo stato di agitazione all'interno del bacino protetto, conseguente alla diffrazione attorno alle testate delle opere proposte in questa sede.

In particolare, nei paragrafi che seguono si procederà alla valutazione dell'agibilità dell'avamposto e della nuova zona di ormeggio prevista nel presente progetto (cfr. par. 3.1) ed all'analisi dell'agitazione ondosa all'imboccatura del porto di Termini Imerese (cfr. par. 3.2).

Le caratteristiche delle onde utilizzate per la determinazione delle altezze d'onda diffratte sono state tratte dall'elaborazione dei dati della boa RON di Capo Gallo (cfr. All. 2.1 – *Studio Idraulico Marittimo*).

In dettaglio, sono state prese in esame le altezze d'onda in un punto sottocosta posto alla profondità di -11,0 m in prossimità dell'imboccatura portuale nella configurazione che prevede il solo completamento della diga di sottoflutto (Tab. 3).

TEMPO DI RITORNO (anni)	Dir. (° N)	Largo		Punto sottocosta
		Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)
1	0° N	3.663	7.65	2.851
50	0° N	7.671	11.08	4.550
1	60° N	2.062	5.74	1.546
50	60° N	5.701	9.55	3.709

Tabella 3 - *Eventi estremi in un punto sottocosta in prossimità dell'imboccatura portuale*

3.1 BACINO PORTUALE

Al fine di determinare l'altezza d'onda residua presente nella zona dell'avamposto l'altezza d'onda significativa all'imboccatura portuale associata ad un fissato tempo di ritorno (Tab. 3) è stata moltiplicata per il valore del coefficiente di diffrazione calcolato dal modello. All'interno dello specchio acqueo dell'avamposto il coefficiente di diffrazione minimo si verifica per onde provenienti da 0°N e periodo 12 sec, mentre quello massimo per onde provenienti da 60°N e periodo 6 s (Tab. 2).

Le altezze d'onda residue nell'avamposto (Zona 1) sono riassunte nella tabella seguente.

ZONA 1	Tr=1 anno		Tr=50 anni	
	Dir. 0°N Hs=2.851 m	Dir. 60°N Hs=1.546 m	Dir. 0°N Hs=4.550 m	Dir. 60°N Hs=3.709 m
LAYOUT 1	0.29	1.22	0.47	2.93
LAYOUT 2	0.29	1.20	0.47	2.89
LAYOUT 3	0.10	0.86	0.16	2.06

Tabella 4 - Altezza d'onda residua (m) nell'avamporto (Zona 1)

L'avamporto, poichè interessato dalle manovre di evoluzione delle navi, presenta uno stato di agitazione ammissibile maggiore di quello che compete alle zone di ormeggio.

Le condizioni peggiori di agitazione ondosa nell'avamporto si riscontrano per le configurazioni che non prevedono il prolungamento del sopraflutto (layout 1 - 2), condizione, questa, che si ritiene potere essere, nella peggiore delle ipotesi, transitoria. Tuttavia, le condizioni di agitazione nell'avamporto, per onde con tempo di ritorno pari a 1 anno, risultano compatibili alla navigazione per entrambe le direzioni considerate. Con riferimento alle onde associate al tempo di ritorno 50 anni, invece, si osservano altezze d'onda residue di piccola entità per la direzione 0°N che aumentano per onde provenienti dalla direzione 60°N, generando una limitata agibilità per tali mareggiate estreme. Si riferisce, comunque, che per tale tempo di ritorno nel layout 3 l'altezza d'onda sottocosta generata da onde provenienti da 60°N si riduce di circa il 45% nell'avamporto, che, pertanto, assolve la funzione di smorzamento del moto ondoso alla quale è destinato.

L'operatività degli specchi liquidi adibiti a finalità portuale viene valutata attraverso il confronto, da un lato, fra lo stato di agitazione ivi determinato dalle onde che aggirano l'ostacolo e penetrano all'interno del bacino portuale e, dall'altro lato, le condizioni di massima mobilità ammissibili per i natanti in relazione alla effettiva possibilità che siano svolgibili, senza incorrere in condizioni di pericolo, le operazioni alle quali i natanti stessi sono destinati e che, essenzialmente dipendono dal tipo di mezzo marittimo, nonché dalla stessa natura delle operazioni che detto mezzo è chiamato a svolgere.

Sotto questo profilo si evidenzia fin d'ora che il natante possiede sei gradi di libertà e che il suo moto viene assimilato a quello di un corpo rigido e, pertanto, descritto attraverso la traiettoria del suo baricentro; i sei gradi di libertà vengono definiti, come è ovvio, da tre coordinate lineari e da tre angolari.

In questa sede interessa verificare, in particolare, che le massime escursioni della superficie libera in prossimità dell'accosto siano inferiori al sussulto consentito al natante per lo svolgimento delle proprie funzioni.

Il primo passo consiste nel calcolare, utilizzando i valori del coefficiente di diffrazione individuati, le altezze d'onda diffratte nella zona destinata all'accosto, a partire dalle altezze d'onda sottocosta.

Con riguardo alle navi Ro-Ro, che certamente rappresentano i possibili fruitori della nuova zona di ormeggio del Porto di Termini Imerese, si assumeranno i seguenti valori limite, come suggerito dalla Associazione Internazionale Permanente dei Convegni di Navigazione (AIPCN):

Avanzo	0.8 m;
Deriva	0.6 m;
Sussulto	0.8 m;
Alambardata	1°;
Beccheggio	1°;
Rollio	4°.

Anche all'interno dello specchio acqueo destinato all'ormeggio dei suddetti natanti (Zona 2) il coefficiente di diffrazione minimo si verifica per onde provenienti da 0°N e periodo 12 sec, mentre quello massimo per onde provenienti da 60°N e periodo 6 s.

Considerando le onde con tempo di ritorno 1 anno e 50 anni (Tab. 3), le altezze d'onda residue all'interno del bacino commerciale sono riassunte nella tabella seguente.

ZONA 2	Tr=1 anno		Tr=50 anni	
	Dir. 0°N Hs=2.851 m	Dir. 60°N Hs=1.546 m	Dir. 0°N Hs=4.550 m	Dir. 60°N Hs=3.709 m
LAYOUT 1	0.06	0.11	0.10	0.26
LAYOUT 2	0.06	0.08	0.09	0.19
LAYOUT 3	0.05	0.07	0.08	0.16

Tabella 5 - Altezza d'onda residua (m) nella nuova zona destinata all'ormeggio (Zona 2)

Nella zona destinata all'accosto delle navi Ro-Ro, l'altezza d'onda diffratta assume, in tutte le simulazioni condotte, valori inferiori al valore limite del sussulto necessario per consentire il regolare trasbordo delle merci. Per tutte le condizioni meteomarine prese in esame, i valori dell'altezza d'onda residua presentano, infatti, valori compresi tra 5 e 26 cm.

3.2 IMBOCCATURA PORTUALE

Allo scopo di approfondire lo studio dell'agitazione ondosa all'imboccatura del porto di Termini Imerese sono state condotte le simulazioni per un'onda avente direzione di attacco ortogonale all'asse della bocca portuale e, quindi, capace di entrare indisturbata all'interno dello specchio liquido protetto. Si rammenta, infatti, che la configurazione planimetrica prevista per la testata della diga di sottoflutto potrebbe generare fenomeni di concentrazione di energia in corrispondenza dell'imboccatura. Si è ritenuto, quindi, opportuno, analizzare lo stato di agitazione per due diverse tipologie costruttive della testata della diga: a parete verticale e mantellata con massi artificiali della stessa tipologia di quelli posti a protezione della diga di sottoflutto esistente.

In particolare, lo studio della diffrazione è stato condotto per onde provenienti dalla direzione 135°N, poichè rappresenta la condizione più gravosa ai fini della penetrazione delle onde attraverso l'imboccatura portuale, nonostante il clima ondoso sottocosta non presenti eventi provenienti da tale direzione. Si tratta, pertanto, di un'ipotesi fortemente cautelativa.

Si è proceduto, quindi, al calcolo del coefficiente di diffrazione con riguardo alle due tipologie costruttive previste per la testata della diga.

Anche in questo caso si è ritenuto cautelativo considerare il valore del coefficiente di diffrazione associato al 75° percentile per i motivi sopra esposti.

Nella tabella che segue si riportano i valori dei coefficienti di diffrazione ottenuti per i due casi presi in esame simulando onde provenienti da 135°N e periodi 9 e 12 s (Tab. 6).

	Periodo	
	9 s	12 s
Mantellata	1.013	1.000
Parete verticale	1.066	1.027

Tabella 6 - Valori dei coefficienti di diffrazione all'imboccatura

Il raffronto fra gli esiti delle prove condotte, come esposte nelle figure da 10 a 13, mostra che nel caso di testata con parete verticale il coefficiente di diffrazione assume valori di poco superiori a quelli che competono all'ipotesi di testata mantellata. Pertanto, alla luce di quanto sopra si propone di prevedere la realizzazione, in corrispondenza della testata della diga, di un'opera a gettata in massi artificiali con berma rasata a quota del livello medio mare al fine di dissipare l'energia dell'onda incidente generata, anche, dal passaggio delle navi in ingresso al porto e garantire maggiori condizioni di sicurezza in corrispondenza dell'imboccatura portuale.

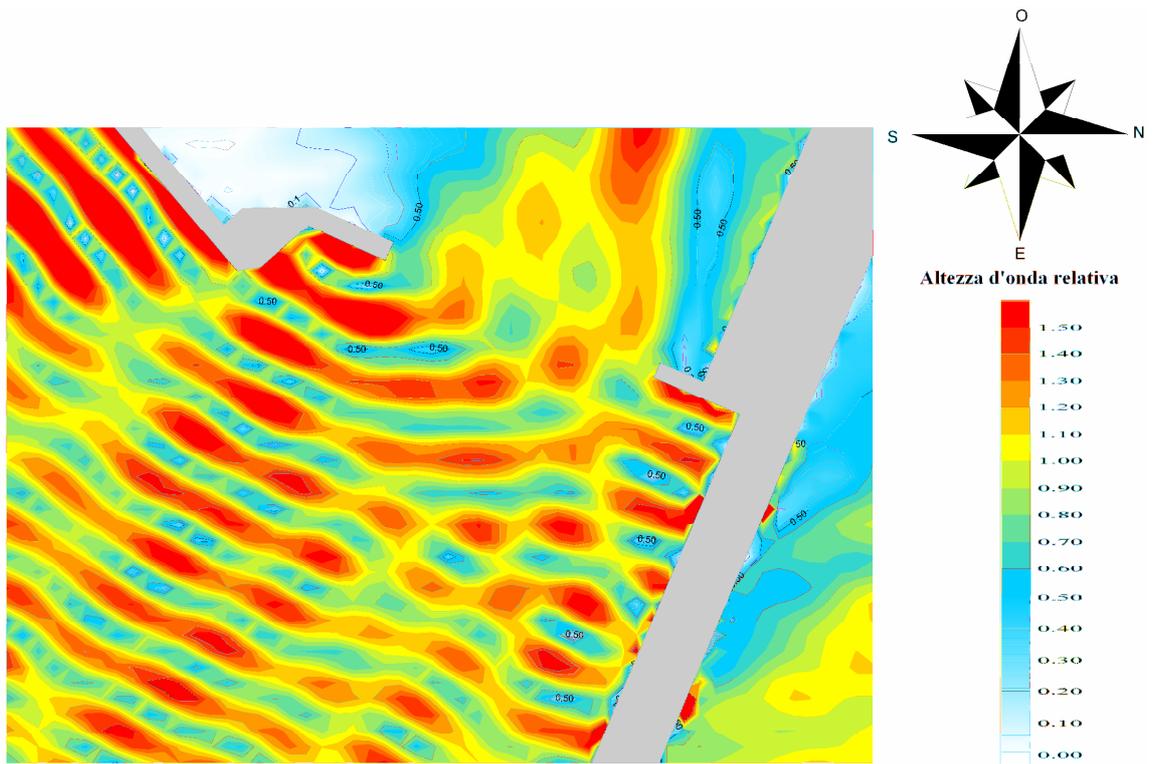


Figura 10 - Diffrazione per onde provenienti dalla direzione 135°N e periodo 9 sec: testata della diga a parete verticale

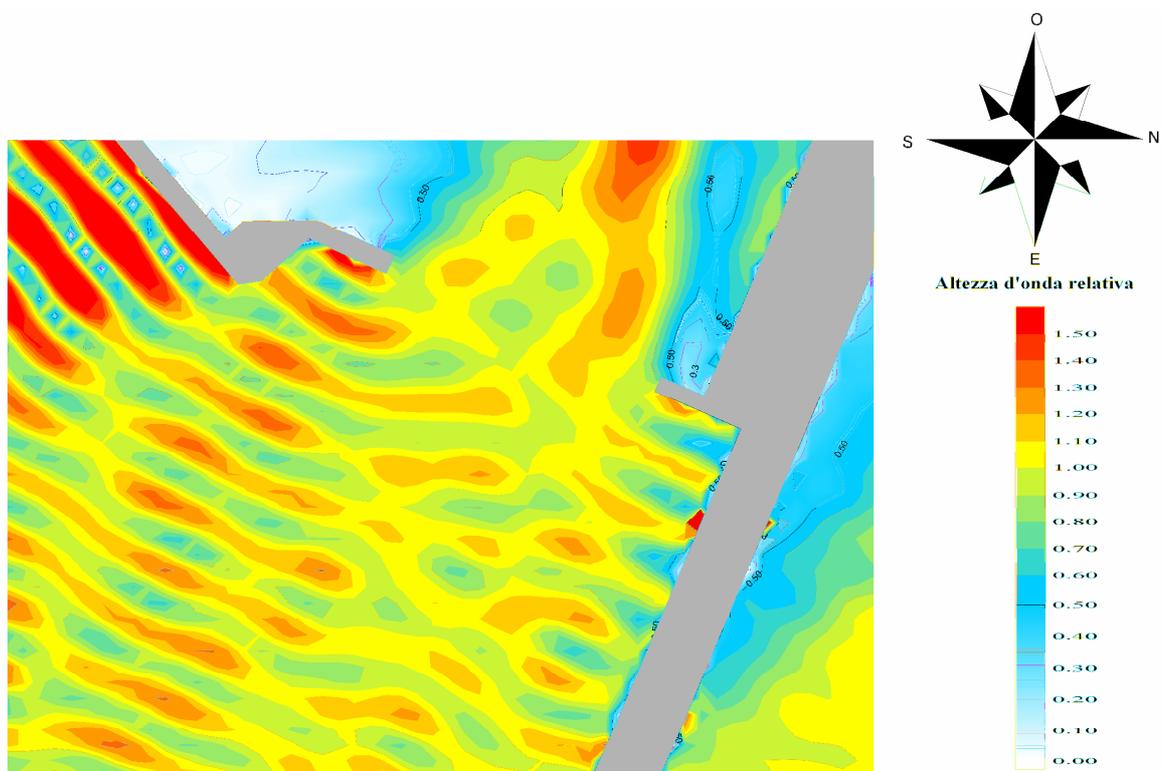


Figura 11 - Diffrazione per onde provenienti dalla direzione 135°N e periodo 9 sec: testata della diga mantellata

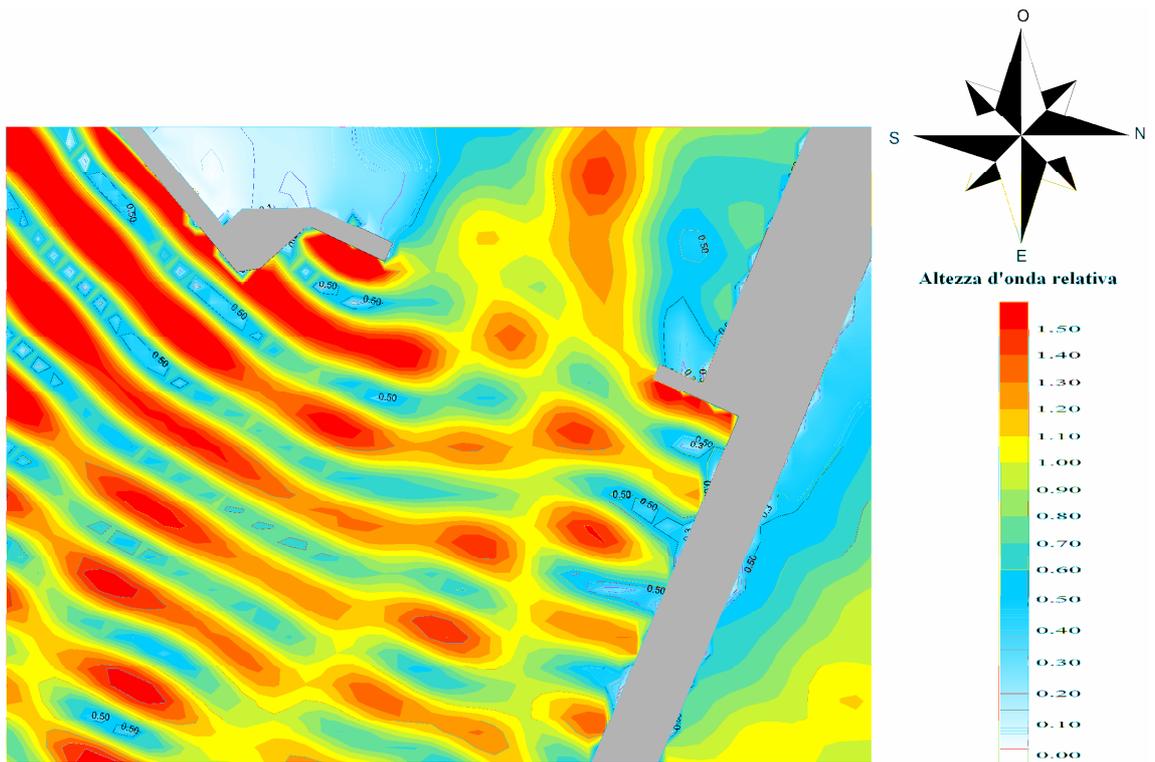


Figura 12 - Diffrazione per onde provenienti dalla direzione 135°N e periodo 12 sec: testata della diga a parete verticale

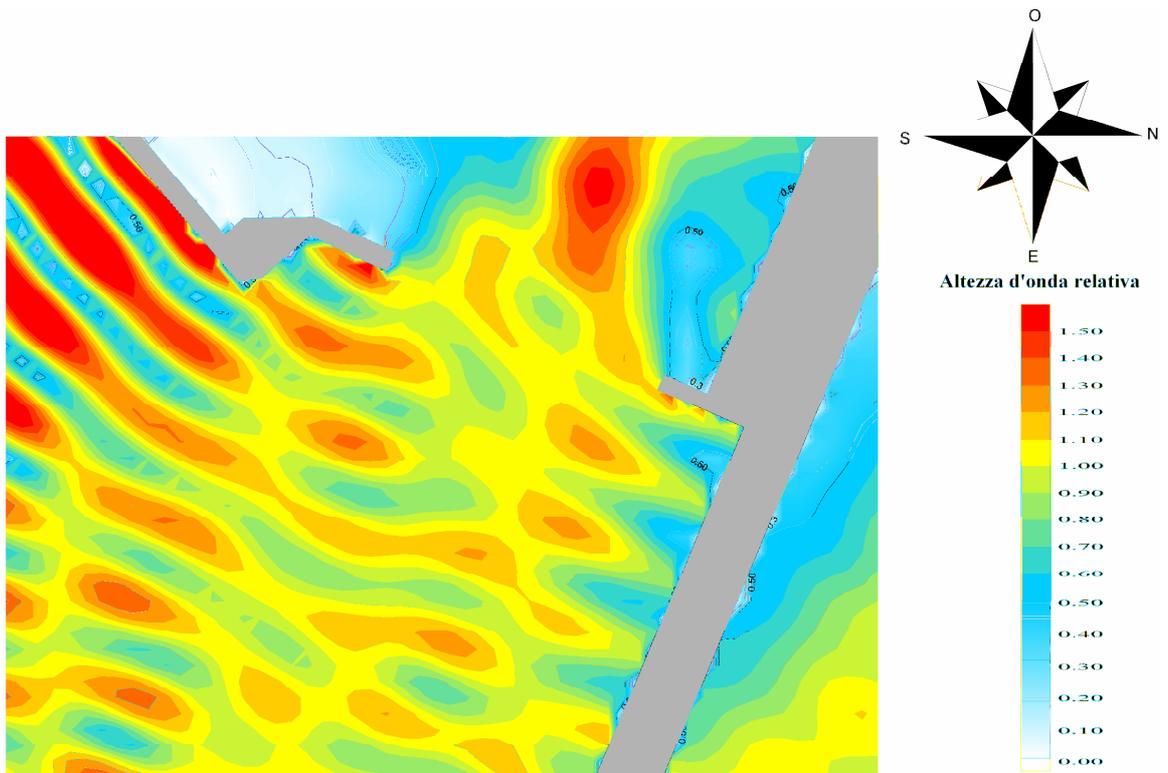


Figura 13 - Diffrazione per onde provenienti dalla direzione 135°N e periodo 12 sec: testata della diga mantellata

4. CONCLUSIONI

In sintesi, dalla verifica dello stato di agitazione ondosa del porto di Termini Imerese emerge la considerazione che lo specchio acqueo portuale, ancorché in assenza del prolungamento della diga di sopraflutto garantisce condizioni di agitazione ammissibile nell'avamporto e nella nuova zona di ormeggio per tutti i casi considerati ad eccezione del caso di onde provenienti da 60°N associate ad un tempo di ritorno pari a 50 anni, che tuttavia non pregiudica il normale svolgimento delle attività portuali.

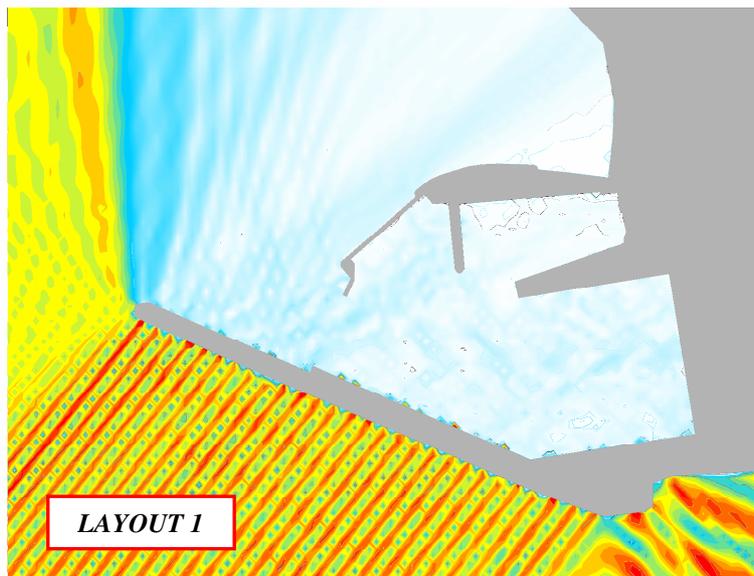
In particolare, le simulazioni condotte per i casi di prolungamento della diga di sottoflutto realizzato con cassoni non mantellati (layout 1) e con cassoni mantellati (layout 2) mostrano che i coefficienti di diffrazione assumono valori leggermente inferiori per quest'ultima configurazione data la maggiore capacità della mantellata di dissipare l'energia dell'onda incidente. Tuttavia, la scelta progettuale di realizzare il prolungamento della diga di sottoflutto con cassoni antiriflettenti non mantellati risulta condivisibile poiché garantisce, comunque, l'operatività della struttura portuale a fronte di una considerevole economia. Inoltre, la contemporanea o, al più, la successiva realizzazione del prolungamento della diga di sopraflutto contribuirà alla riduzione dello stato di agitazione ondosa dello specchio liquido portuale poiché fornirà una maggiore protezione dagli attacchi del moto ondoso proveniente da Grecale. Infatti, la configurazione che prevede il completamento della diga di sottoflutto ed il prolungamento di quella di sopraflutto (layout 3) fornisce nelle zone "avamporto" e "ormeggio" coefficienti di diffrazione inferiori a quelli che competono al caso di solo completamento della diga di sottoflutto, com'era logico attendersi.

L'esito dello studio dell'agitazione ondosa in corrispondenza dell'imboccatura portuale evidenzia l'opportunità di prevedere, in corrispondenza della testata della diga, un'opera a gettata in massi artificiali con berma rasata a quota del livello medio mare al fine di dissipare l'energia dell'onda incidente generata, anche, dal passaggio delle navi in ingresso al porto e migliorare le condizioni di agibilità dell'imboccatura portuale.

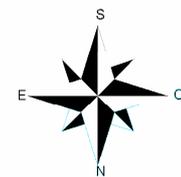
I risultati dello studio condotto per la valutazione dello stato di agitazione residua all'interno dello specchio liquido protetto, consentono, quindi, di affermare che il layout del Porto di Termini Imerese, proposto nel progetto definitivo risulta idoneo allo scopo e, il prolungamento della diga di sopraflutto, a fortiori, garantirà, uno stato di agitazione residua ammissibile.

APPENDICE: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

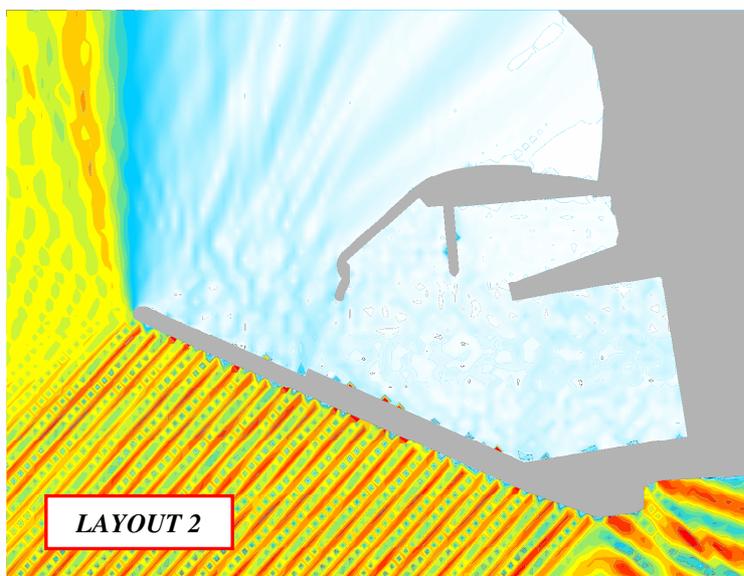
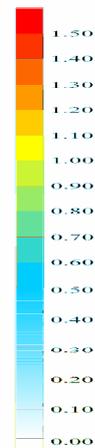
ONDE PROVENIENTI DALLA DIREZIONE 0°N E PERIODO 6 SEC



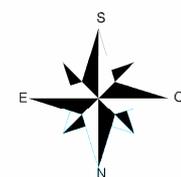
LAYOUT 1



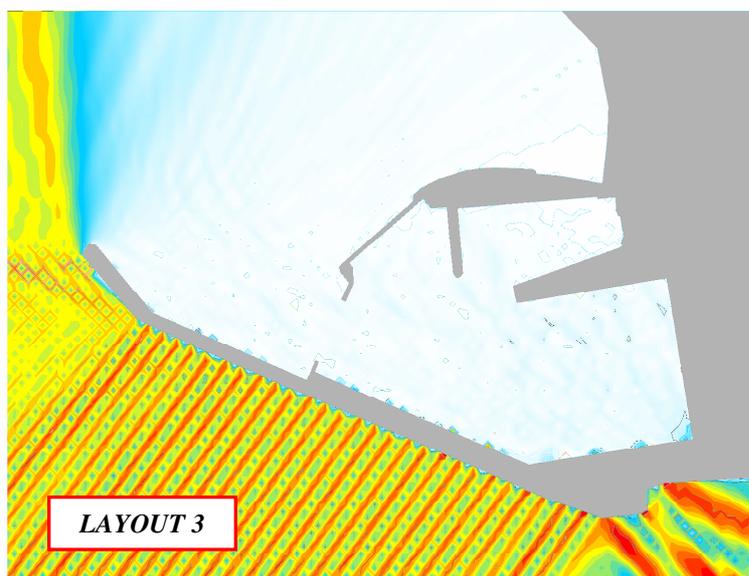
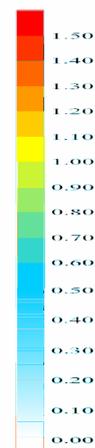
Altezza d'onda relativa



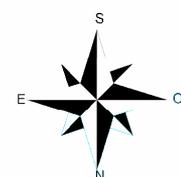
LAYOUT 2



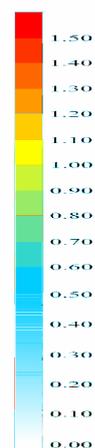
Altezza d'onda relativa



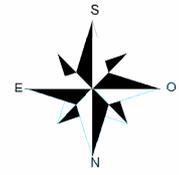
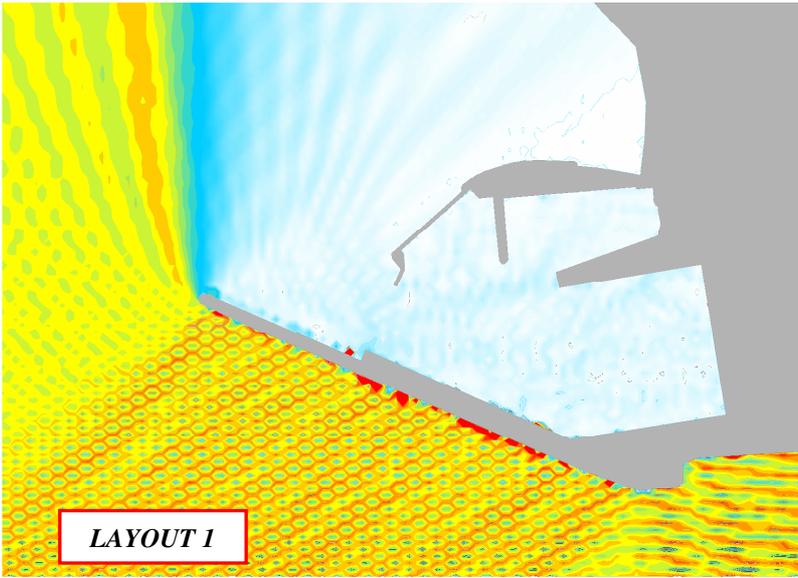
LAYOUT 3



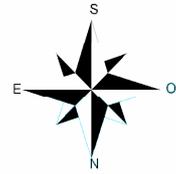
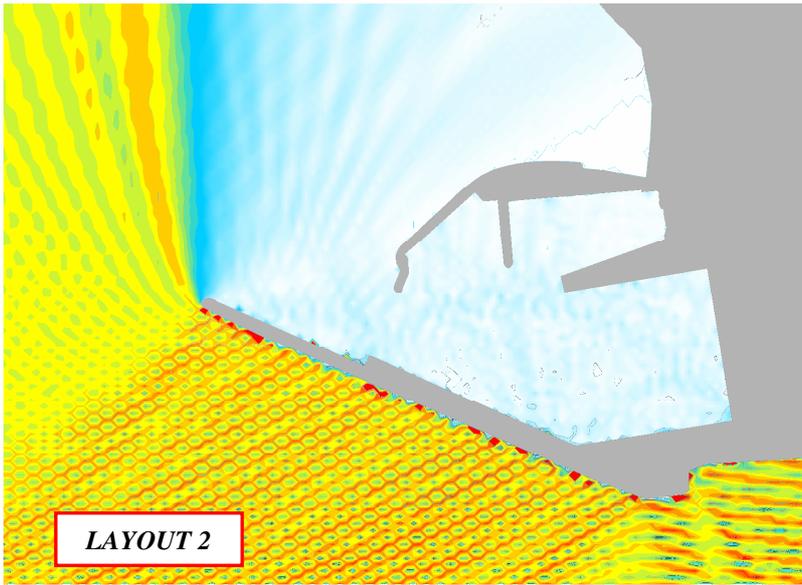
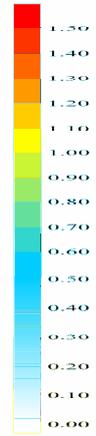
Altezza d'onda relativa



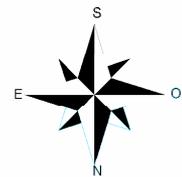
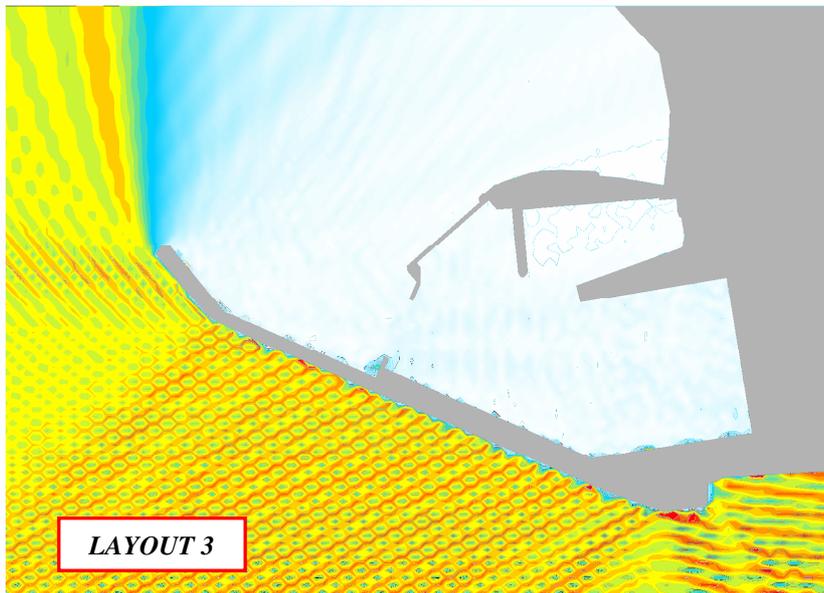
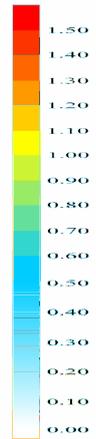
ONDE PROVENIENTI DALLA DIREZIONE 0°N E PERIODO 8SEC



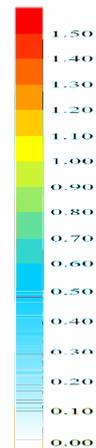
Altezza d'onda relativa



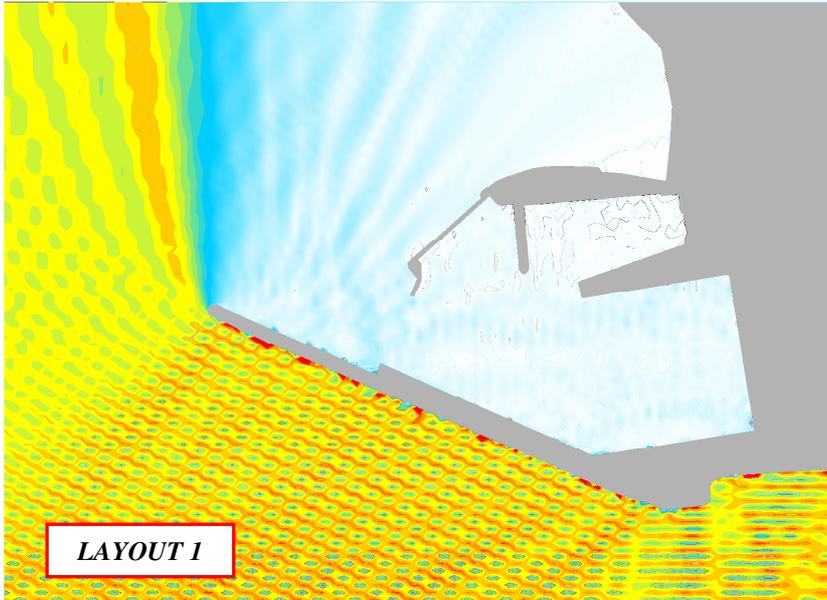
Altezza d'onda relativa



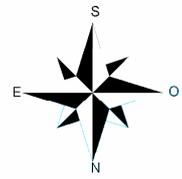
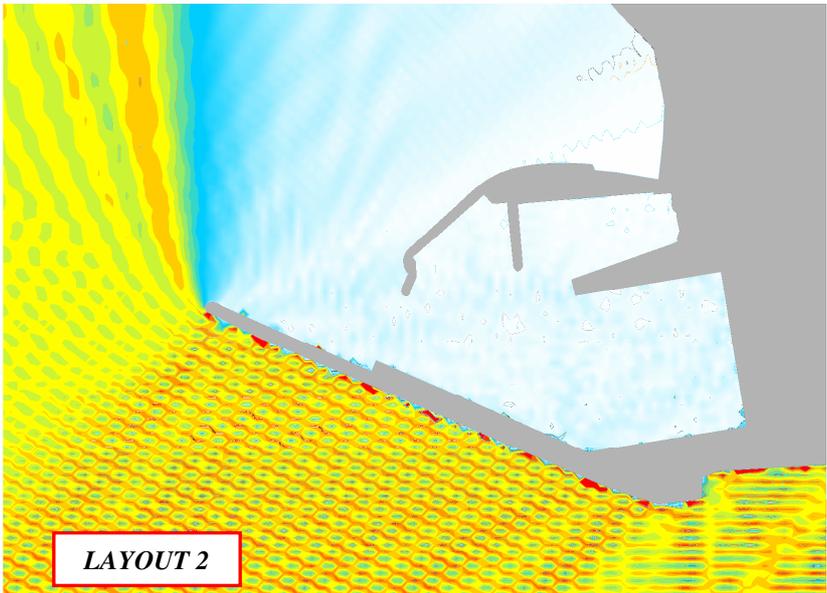
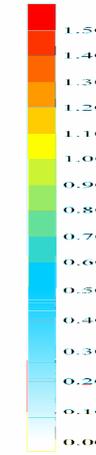
Altezza d'onda relativa



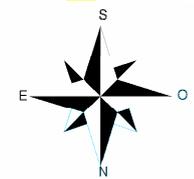
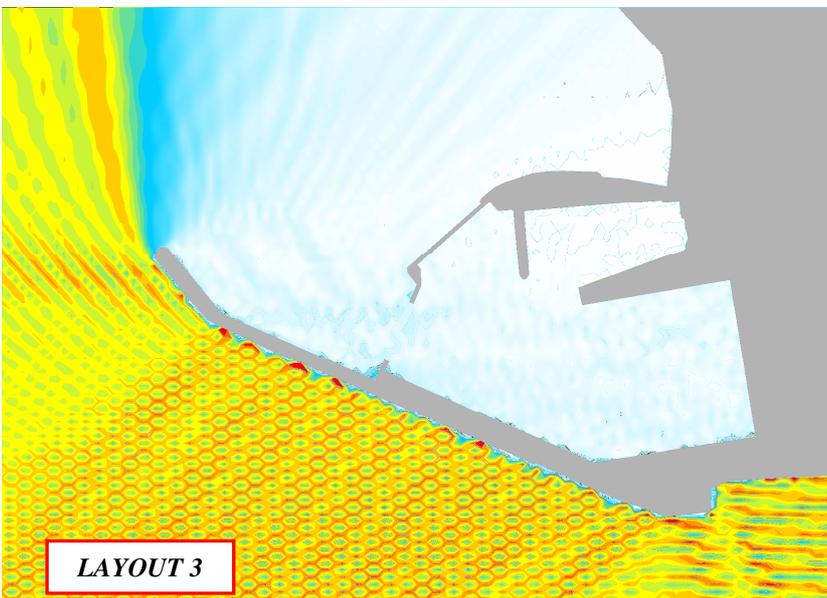
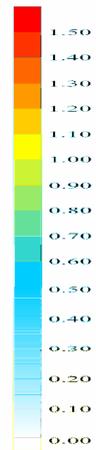
ONDE PROVENIENTI DALLA DIREZIONE 0°N E PERIODO 10 SEC



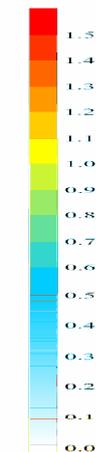
Altezza d'onda relativa



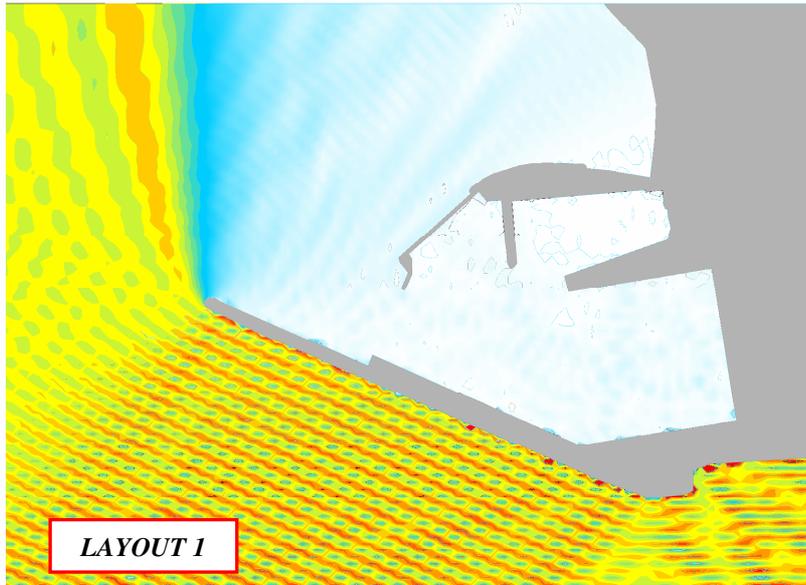
Altezza d'onda relativa



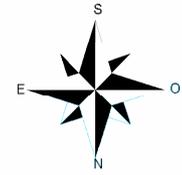
Altezza d'onda relativa



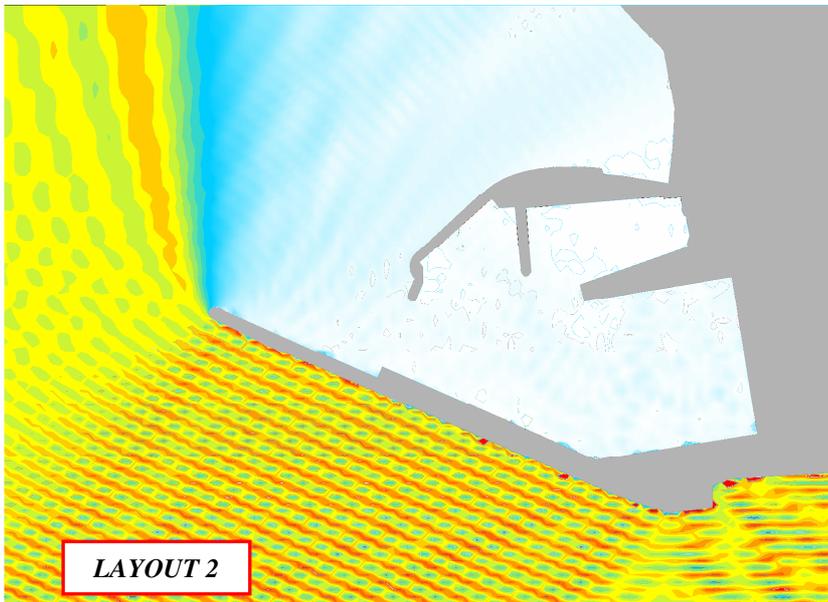
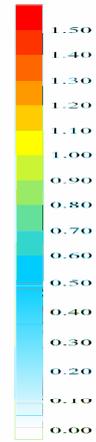
ONDE PROVENIENTI DALLA DIREZIONE 0°N E PERIODO 12 SEC



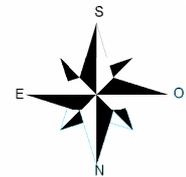
LAYOUT 1



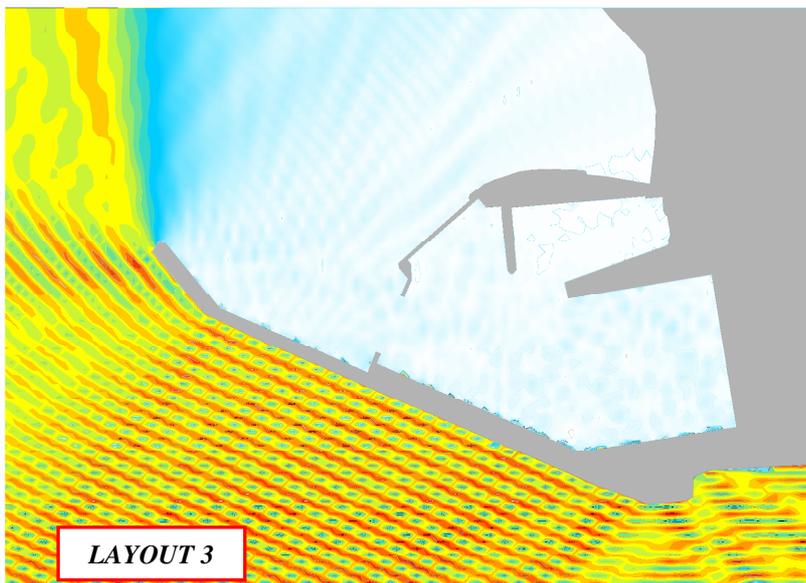
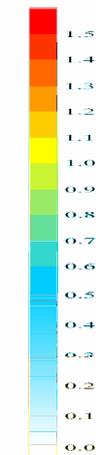
Altezza d'onda relativa



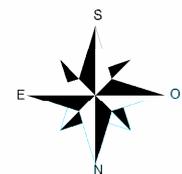
LAYOUT 2



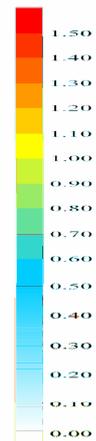
Altezza d'onda relativa



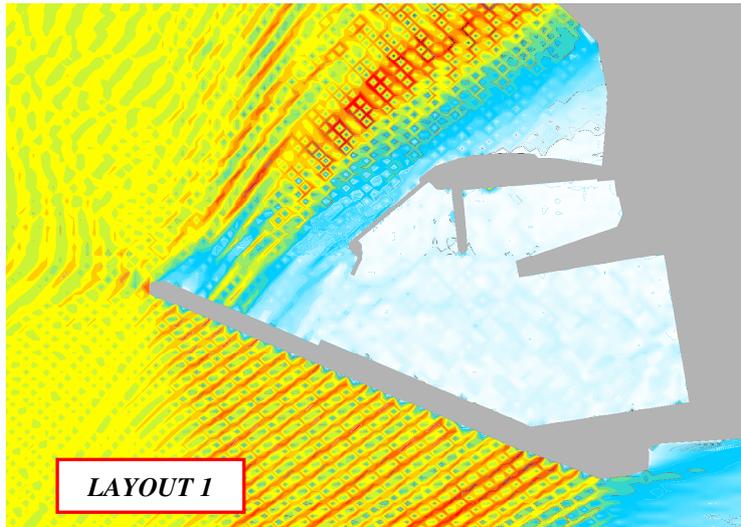
LAYOUT 3



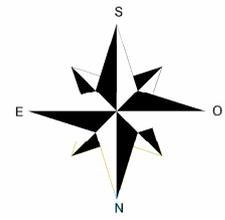
Altezza d'onda relativa



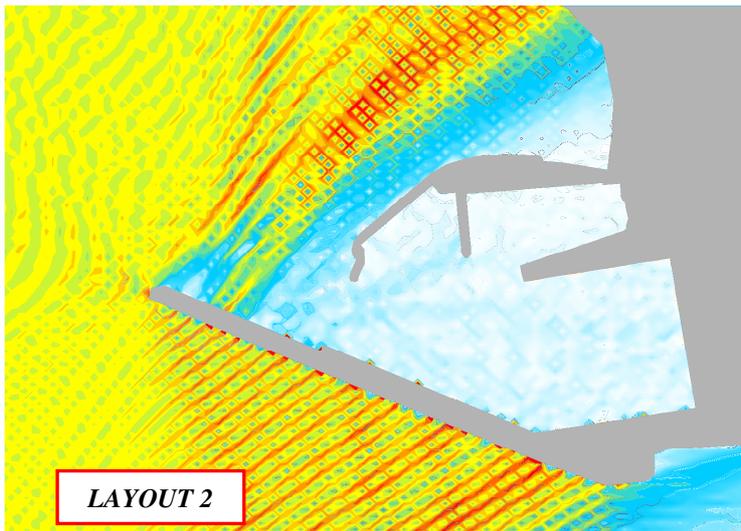
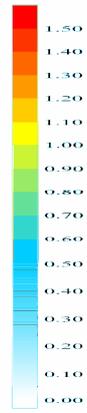
ONDE PROVENIENTI DALLA DIREZIONE 60°N E PERIODO 6 SEC



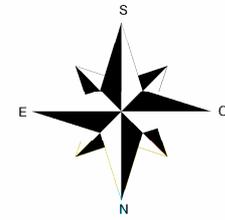
LAYOUT 1



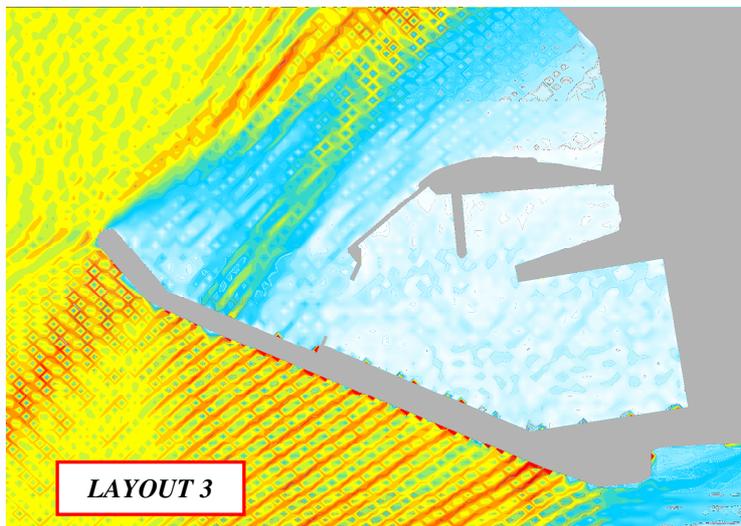
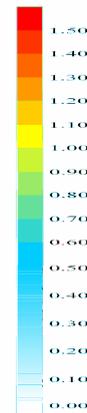
Altezza d'onda relativa



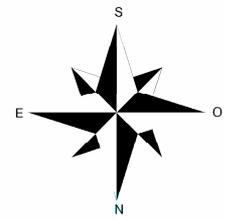
LAYOUT 2



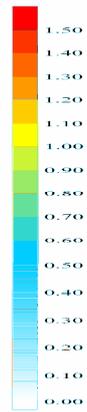
Altezza d'onda relativa



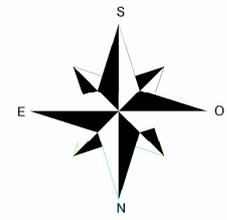
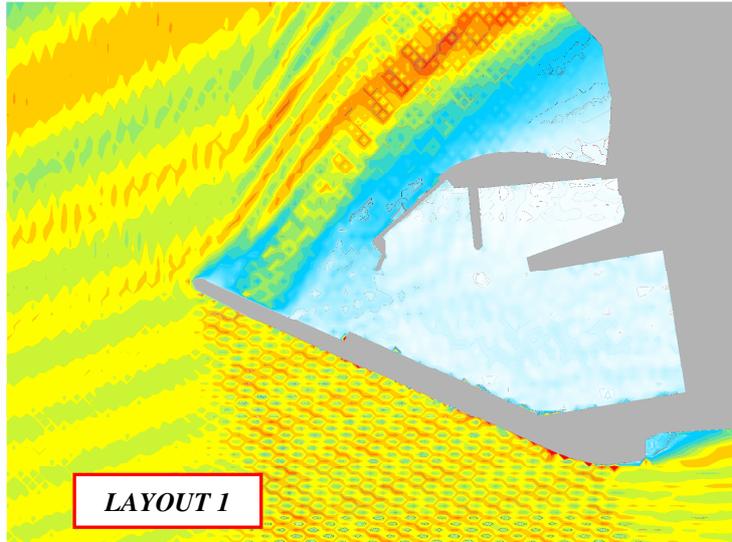
LAYOUT 3



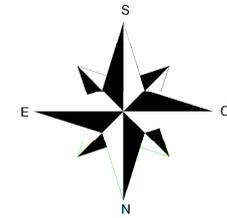
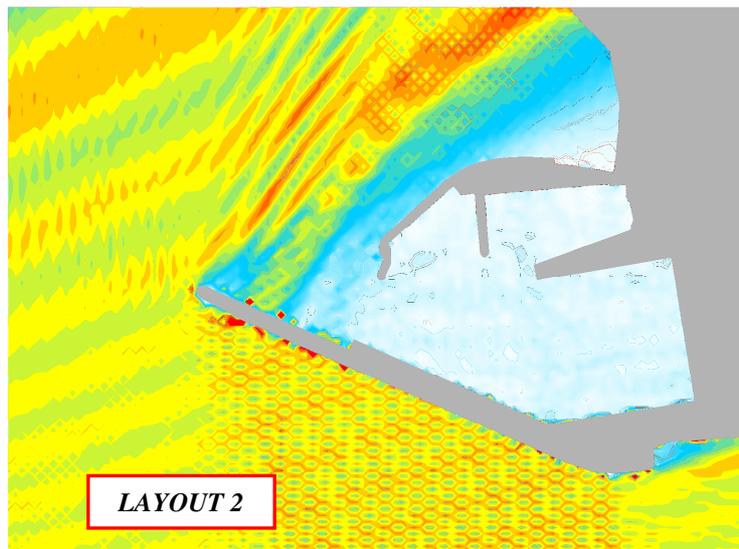
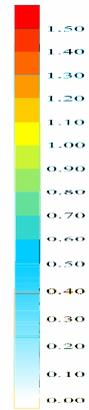
Altezza d'onda relativa



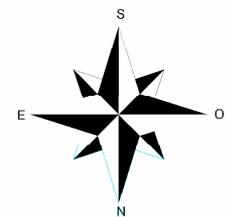
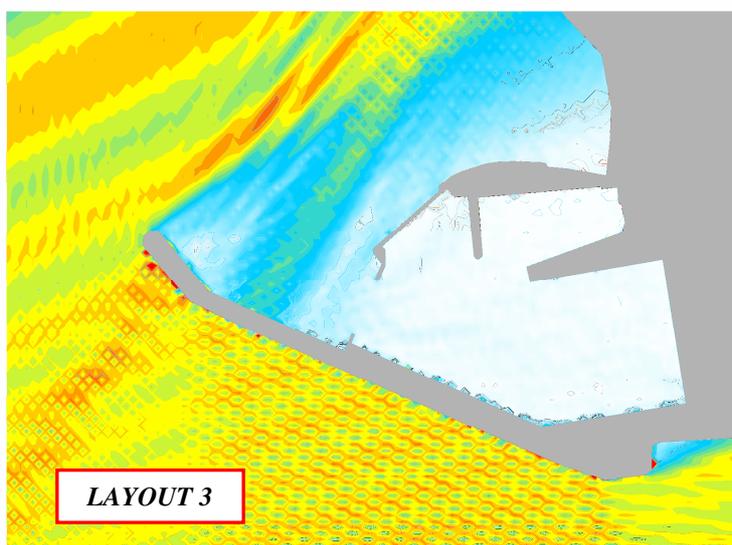
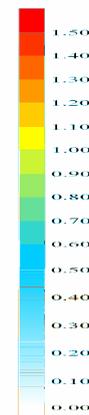
ONDE PROVENIENTI DALLA DIREZIONE 60°N E PERIODO 8 SEC



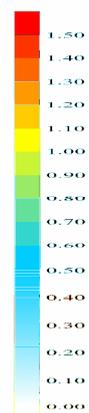
Altezza d'onda relativa



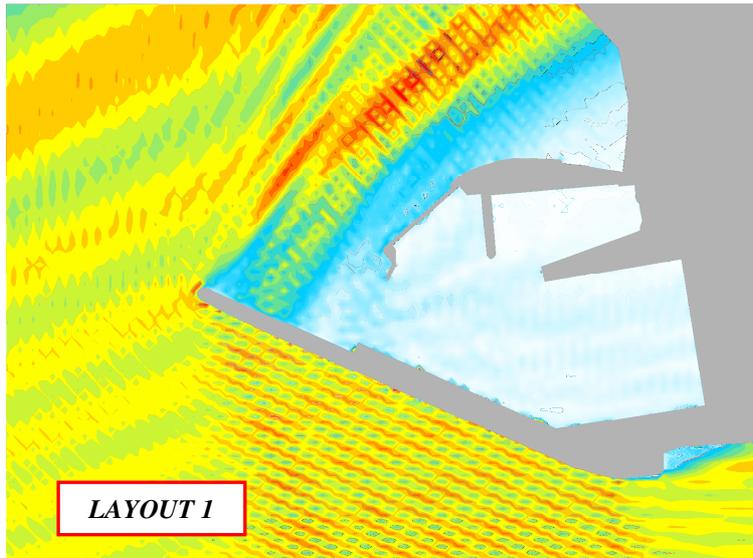
Altezza d'onda relativa



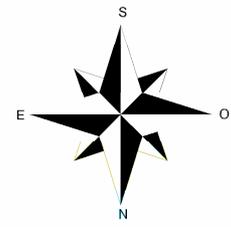
Altezza d'onda relativa



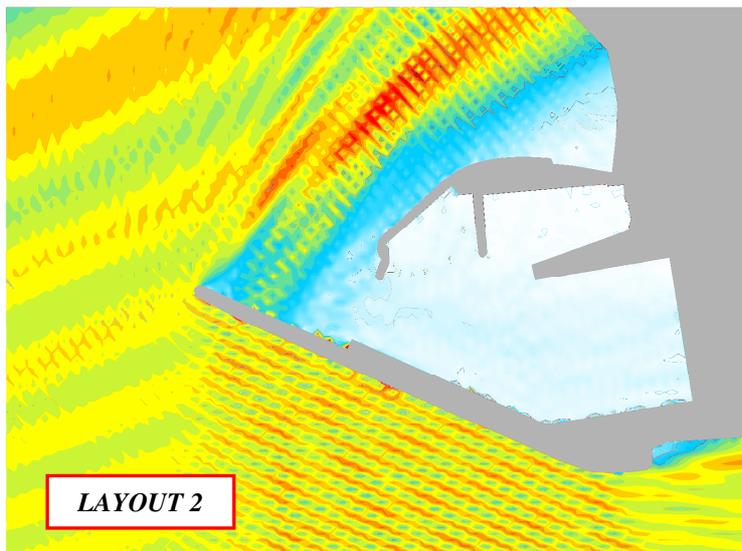
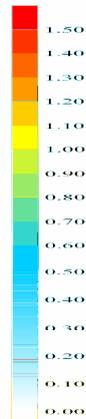
ONDE PROVENIENTI DALLA DIREZIONE 60°N E PERIODO 10 SEC



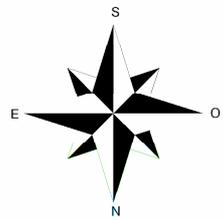
LAYOUT 1



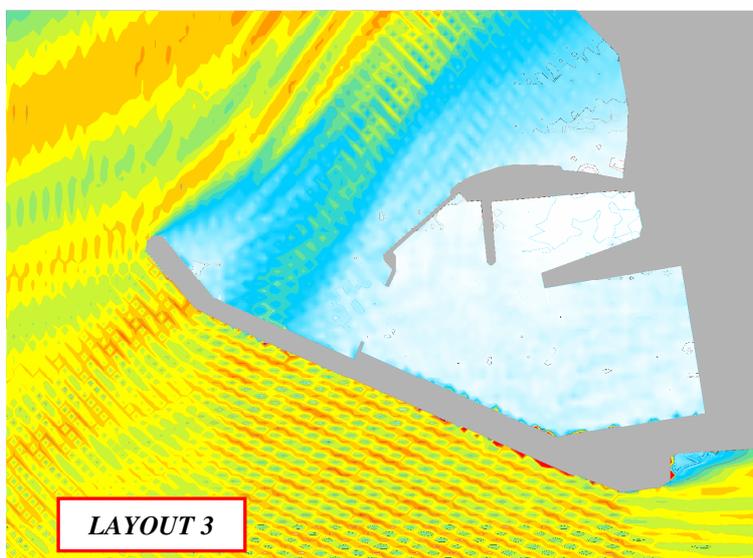
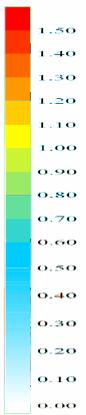
Altezza d'onda relativa



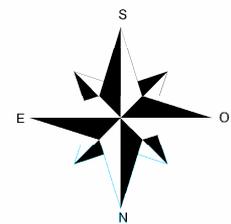
LAYOUT 2



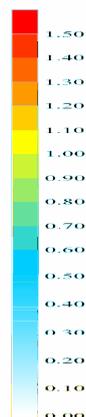
Altezza d'onda relativa



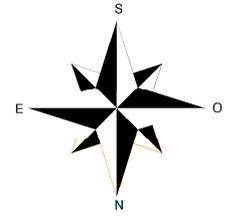
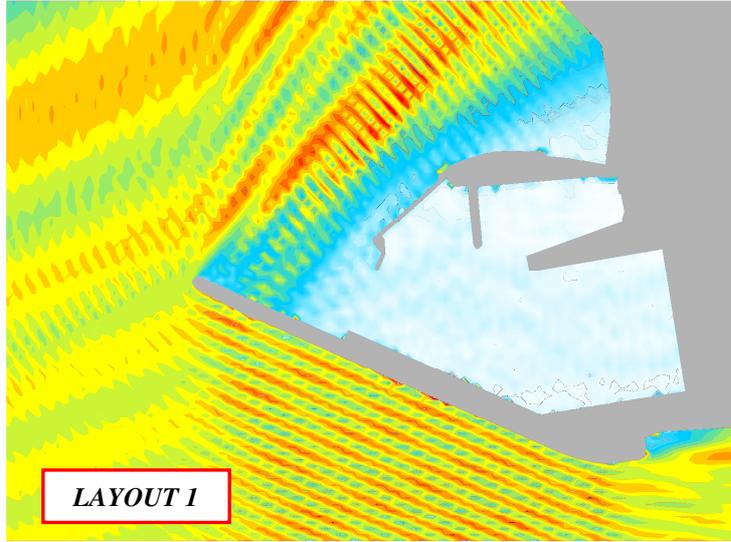
LAYOUT 3



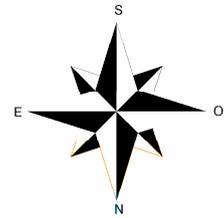
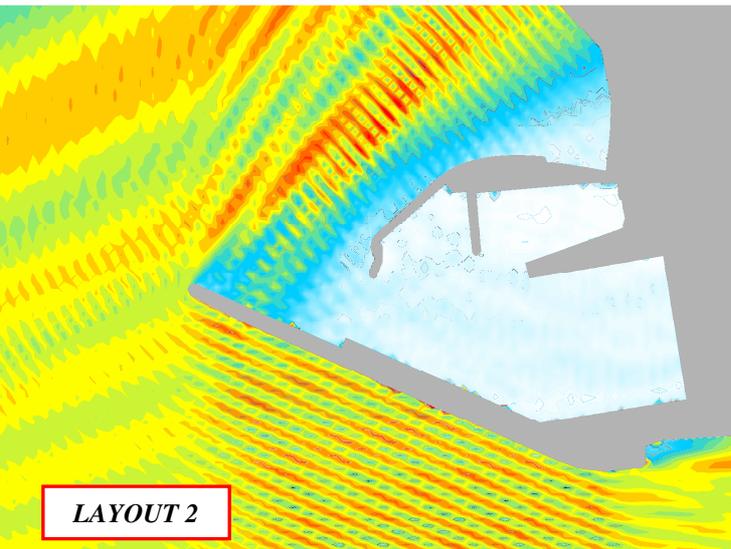
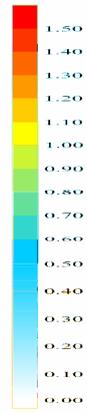
Altezza d'onda relativa



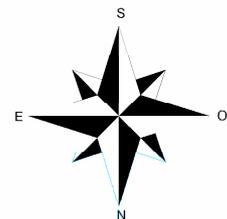
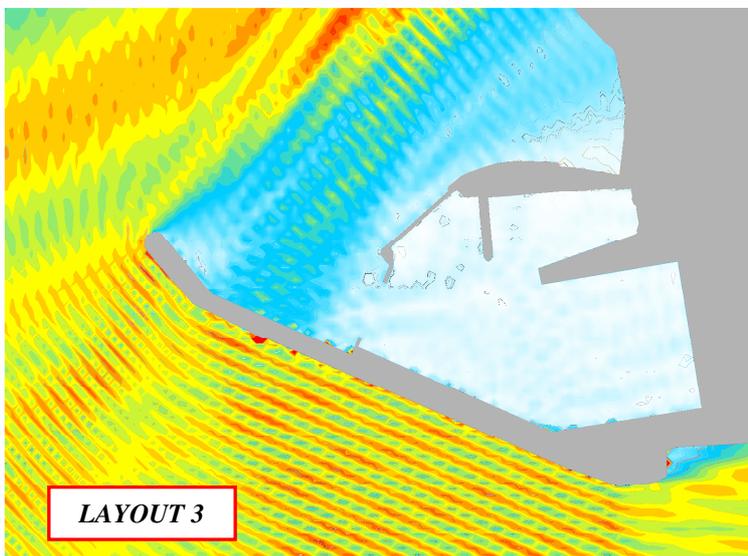
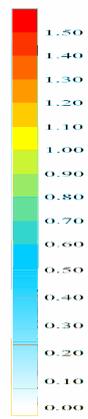
ONDE PROVENIENTI DALLA DIREZIONE 60°N E PERIODO 12 SEC



Altezza d'onda relativa



Altezza d'onda relativa



Altezza d'onda relativa

