

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

OPERA

PORTO DI PALERMO - ARENELLA COMPLETAMENTO MOLO FORANEO PORTO ARENELLA

CUP: I71J19000040005 (OPERA PNRR)
CIG: 9073719DC8

LIVELLO DI PROGETTAZIONE

PROGETTO ESECUTIVO

ELABORATO

RELAZIONE SULL'AGITAZIONE INTERNA E L'AGIBILITÀ PORTUALE

PROGETTAZIONE



Direzione tecnica:
ING. ELIO CIRALLI

Coordinamento:
ING. GIANCARLO INSERRA

VISTO:

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO
ING. SALVATORE ACQUISTA

AREA TECNICA
ING. LEONARDO TALLO

ELABORATO B.02	SCALA --	NS. RIF. B.02_REL-AGITAZ- AGIB_v001-XXapr2022.docx	COMMESSA - NN. A4 2022ARE - 18	
DATA 20 maggio 2022	REVISIONE 01	REDATTORE VV	CONTROLLO GI	APPROVAZIONE EC

A TERMINI DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETÀ DI QUESTO ELABORATO, CON DIVIETO DI RIPRODURLO, ANCHE IN PARTE, O DI RENDERLO NOTO A TERZI SENZA LE NECESSARIE AUTORIZZAZIONI

INDICE DEI CONTENUTI

1	GENERALITÀ	3
1.1	PREMESSA	3
1.1.1	<i>Il precedente livello progettuale e le approvazioni</i>	3
1.2	IL CORPO DOCUMENTALE	3
1.3	FINALITÀ DELL'ELABORATO	4
1.4	RIFERIMENTI NORMATIVI	4
2	AGITAZIONE INTERNA	7
2.1	DIFFRAZIONE, RIFLESSIONE ED EFFETTI COMBINATI	7
2.2	DESCRIZIONE SINTETICA DEL LAYOUT DI STATO DI FATTO	8
2.3	DESCRIZIONE SINTETICA DELLE OPERE IN PROGETTO	8
2.4	SCelta DELLE ONDE DI RIFERIMENTO PER LE SIMULAZIONI	8
2.5	RISONANZA	9
2.6	SIMULAZIONI ESEGUITE CON MODELLO DIFFRAC	9
3	AGIBILITÀ PORTUALE	12
3.1	ZONIZZAZIONE	13
3.2	ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI	14
4	APPROCCIO CON MODELLO BASATO SULLE EQUAZIONI DI BOUSSINESQ	16
4.1.1	<i>Generalità sul modello</i>	16
4.1.2	<i>Formulazione analitica</i>	17
4.1.3	<i>Simulazioni eseguite</i>	17
4.2	ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI	17

ELENCO DELLE FIGURE

FIGURA 1-1:	SOVRAPPOSIZIONE PRP 1974 - PRP 2018 - STATO DI FATTO	4
FIGURA 2.1 –	COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE – FONTE: THOMPSON, E. F., H. S. CHEN AND L. L. HADLEY, 1996: VALIDATION OF NUMERICAL MODEL FOR WIND WAVES AND SWELL IN HARBOURS. J. OF WATERWAY, PORT, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING, 122,5. 245-257.	11
FIGURA 2.2–	SCHEMA DEI COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE USATI PER LE SIMULAZIONI DELLA DARSENA “ARENELLA”	11
FIGURA 2.3 –	AREE OMOGENEE PER LE VERIFICHE DELL'AGITAZIONE INTERNA DEL PORTO DI ARENELLA	13

ELENCO DELLE TABELLE

TABELLA 1-1:	CORPO DOCUMENTALE DEL PROGETTO	6
TABELLA 2-1 –	ELENCO DELLE SIMULAZIONI ESEGUITE CON DIFFRAC PER LO STUDIO DELL'AGITAZIONE RESIDUA NEL PORTO DELL'ARENELLA	10
TABELLA 3-1:	STIMA DELL'AGIBILITÀ PORTUALE SECONDO RACCOMANDAZIONI PIANC	14
TABELLA 3-2:	STIMA DELL'AGIBILITÀ PORTUALE SECONDO RACCOMANDAZIONI PIANC - OTTIMIZZAZIONI	15

1 Generalità

L'Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sicilia Occidentale, nell'ottica del completamento e della funzionalizzazione della propria offerta portuale, per il Porto dell'Arenella vuole eseguire la definizione dell'opera di sopraflutto secondo la configurazione prevista dal Piano Regolatore Portuale oggi vigente.

La redazione del presente progetto esecutivo è stata affidata alla società di ingegneria Progetti e Opere S.r.l., di cui un direttore tecnico è l'Ing. Elio Ciralli. Quest'ultimo si era già occupato della redazione del precedente livello progettuale (livello definitivo), completamente approvato in ossequio alla normativa dell'epoca.

1.1 Premessa

Il progetto esecutivo, finalità dell'incarico professionale ricevuto, viene redatto sulla scorta dei precedenti livelli di progettazione approvati, compresa la procedura di valutazione ambientale.

1.1.1 Il precedente livello progettuale e le approvazioni

Il progetto definitivo dei lavori di completamento del molo foraneo del Porto dell'Arenella è stato redatto secondo la configurazione del precedente Piano Regolatore Portuale approvato dal Consiglio Superiore dei LL.PP. con voto n.529 del 11.09.1974.

Il progetto è stato approvato dal Comitato Tecnico Amministrativo del Provveditorato Interregionale OO.PP. Sicilia-Calabria ed ha già completato una procedura di verifica di assoggettabilità alla VIA per la quale è stata rilasciata la Determina di non assoggettabilità a VIA con D.G.V.A. del MATTM prot. n. DVA-2010-0024939 del 19/10/2010.

Nelle more del reperimento del finanziamento necessario all'esecuzione dei lavori, fu portata a termine la redazione del nuovo Piano Regolatore Portuale di Palermo che ricomprendeva il Porto dell'Arenella.

Il nuovo Piano Regolatore Portuale eseguì la prevista procedura di Valutazione Ambientale Strategica regionale, per la quale fu emesso apposito D.A. 107/GAB del 29/03/2018 con parere motivato alla procedura integrata V.A.S. - V.Inc.A. "Porto di Palermo - Piano Regolatore Portuale" ai sensi dell'art. 16 del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii., condizionato al rispetto delle prescrizioni ed osservazioni, oltre alle misure di mitigazione già previste nel PRP e fatte proprie nel parere n. 73/2018 della C.T.S. regionale.

Al suddetto Decreto seguì l'approvazione *ope legis* del PRP (art. 5, comma 3, Legge 84/94), sancita con il D.D.G. ARTA RS n. 100 del 30/07/2018 in conformità al parere del Consiglio Regionale dell'Urbanistica espresso con il voto n. 93 del 04 luglio 2018.

Il nuovo PRP oltre a inserire il Porto dell'Arenella nell'ambito portuale e a definire la destinazione funzionale, ha disegnato le opere foranee in modo leggermente diverso dal precedente PRP (Cfr. Figura 1-1). Questa leggera variazione, come dimostrato negli studi tecnici di supporto al PRP, migliora la protezione del bacino portuale anche al fine di ridurre l'agitazione residua sotto mareggiata, in modo maggiormente compatibile con la sancita funzione di porto turistico e da diporto.

1.2 Il corpo documentale

Il corpo documentale che costituisce il presente livello di progettazione è quello riportato nella seguente Tabella 1-1. Si raccomanda di attenersi sempre alla versione più recente degli elaborati che, se esistenti, superano le precedenti versioni.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



Progetti
CONTRACTING e opere
SUSTAINABLE IDEAS LAB



environmental technologies
www.envitek.eu



ISO 9001

1.3 Finalità dell'elaborato

Il presente elaborato riporta le simulazioni su appositi modelli matematici e le analisi condotte sui risultati per le verifiche necessarie sull'agitazione interna e quindi sull'agibilità portuale sotto mareggiata viva e per eventi di onda lunga.

Sono state provate:

- la configurazione del dispositivo di protezione portuale secondo le previsioni del PRP vigente (2018);
- la configurazione secondo la previsione del presente progetto di completamento del molo di sopraflutto.

Sono stati utilizzati diversi approcci modellistici, anche come indicato durante le fasi approvative del precedente livello di progettazione, testando con riscontro positivo l'efficacia e la sostanziale coerenza di diversi sistemi matematici quali quello che sfrutta la *elliptic mild slope equation* (modello DIFFRAC) e quello basato su una soluzione nel dominio del tempo di equazioni di tipo Boussinesq (modello BOUSS-2D).

1.4 Riferimenti normativi

Il presente progetto è stato redatto ai sensi del D.Lgs. 50/2016 e del regolamento ancora oggi vigente (D.P.R. 207/2010 e ss.mm.ii.).

Il progetto è stato armonizzato, nel rispetto della legge, con i correnti standard di settore, con particolare riferimento a quelli prodotti dall'Associazione Internazionale di Navigazione (A.I.P.C.N. – P.I.A.N.C.), oggi PIANC.

Esso contiene inoltre uno studio con la descrizione del progetto ed i dati necessari per individuare e valutare i principali effetti che il progetto può avere sull'ambiente, con

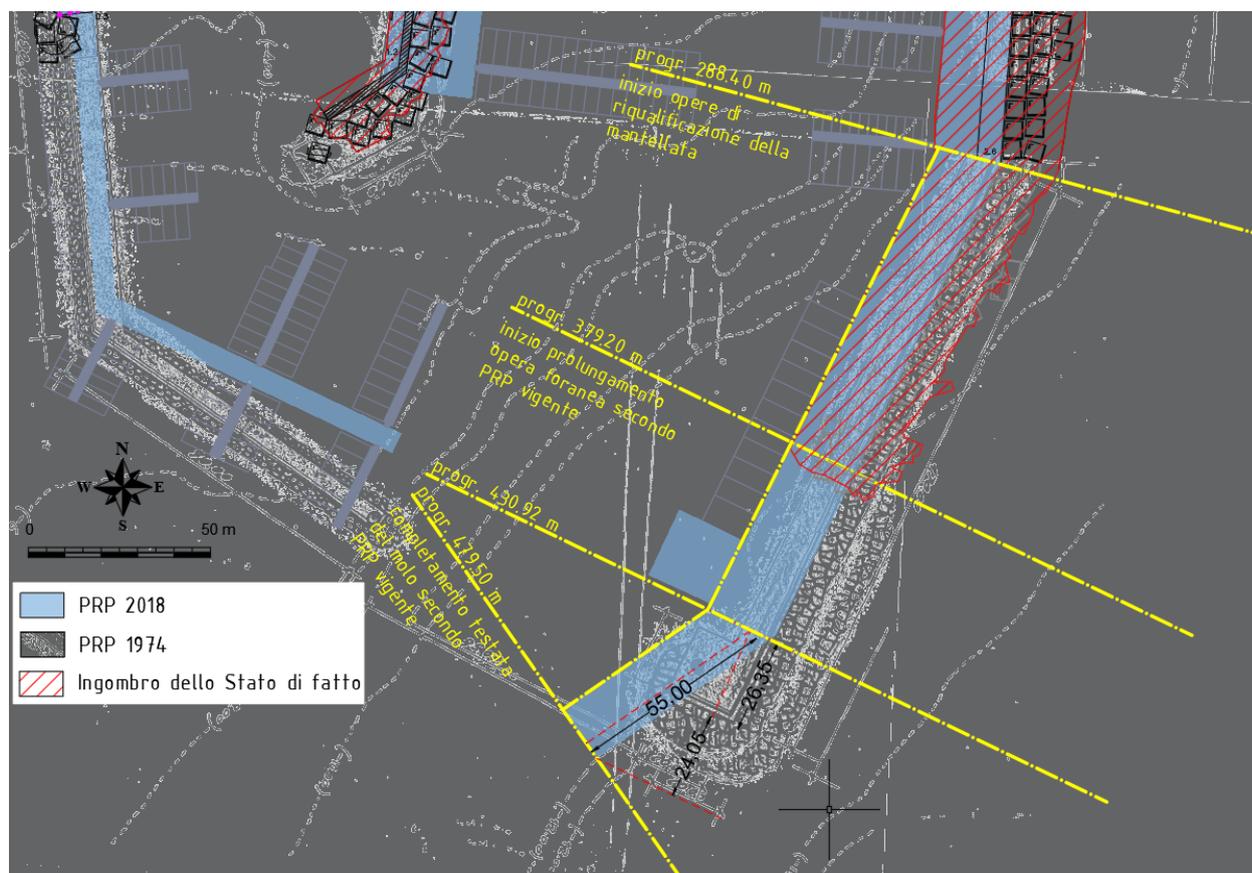


Figura 1-1: Sovrapposizione PRP 1974 - PRP 2018 - Stato di fatto

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



riferimento al comma 6 dell'art.6 del D.Lgs. 152/2006 così come modificato dall'art. 3 del d.lgs. n. 104 del 2017.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



ELENCO DEGLI ELABORATI DI PROGETTO	
codice	titolo elaborato
EE.00	Elenco elaborati
A - ELABORATI GENERALI	
A.01	Relazione generale
B - RELAZIONI SPECIALISTICHE	
B.01	Relazione idraulica marittima
B.01.01	Relazione idraulica marittima: allegati
B.02	Relazione dell'agitazione residua e dell'agibilità portuale
B.02.01	Relazione dell'agitazione residua e dell'agibilità portuale: allegati
B.03	Relazione sulla dinamica della costa
B.04	Relazione sismica
B.05	Relazione geotecnica
B.06	Relazione sul dimensionamento e la stabilità idraulica
B.07.01	Relazione di calcolo delle strutture
B.07.01	Relazione di calcolo delle strutture: allegati
B.08	Relazione paesaggistica
Studio Geologico (a cura del dott. Paolo Nania)	
B.09 - 1	Relazione geologica
B.09 - 1.1	Geolocalizzazione indagini geognostiche e sismiche
B.09 - 2	Indagini sismiche MASW
B.09 - 3	Indagini sismiche HVSR
B.09 - 4	Elaborazione geotecnica dei test penetrometrici (Spt) eseguiti in foro
B.09 - 5	Raccolta dati stratigrafici e laboratorio geotecnico
B.09 - 5.1	Analisi e prove di laboratorio geotecnico (a cura di CON.GEO Srl)
B.09 - 6	Tavole cartografiche
RILIEVI TOPOGRAFICI, BATIMETRICI E BIOENOTICI (A CURA DI ARENA SUB SRL)	
R.01	Relazione illustrativa dei rilievi batimetrici e bioenotici
R.01.01	Allegato: Processing Report
R.01.02	Allegato: Video subacquei dei transetti (da trasmettere su richiesta)
T.1	Ortofoto e profili di sezioni
T.2	Ortofoto e Piano Quotato
T.3a	Carta morfologico-batimetrica (isobate)
T.3b	Carta morfologico-batimetrica (rilievo ombreggiato color coded)
T.3c	Carta morfologico-batimetrica (rilievo ombreggiato grey-scale)
T.4a	Carta morfologico-batimetrica (isobate) - Spiaggia Vergine Maria
T.4b	Carta morfologico-batimetrica (shaded relief) - Spiaggia Vergine Maria
T.5	Carta dei tipi di fondo (color coded seabed features)
T.6	Carta del mosaico acustico Side Scan Sonar
RELAZIONE ARCHEOLOGICA PREVENTIVA (A CURA DOTT. ARCHEOL. F. FAZIO - ARENA SUB SRL)	
VIARCH.01	Relazione archeologica preventiva a seguito dei rilievi
VIARCH.01.01	Relazione archeologica preventiva: Carta del potenziale archeologico
C - ELABORATI GRAFICI	
C.SF - STATO DI FATTO	
C.SF.01.01	Carta nautica - Cartografia IGM - Carta Tecnica Regionale - Ortofoto
C.SF.01.02	Stralcio PRG - Stralci PRP - Stato di completamento
C.SF.01.03	Carta dei vincoli paesaggistici e territoriali
C.SF.02.01	Planimetria e sezioni dello stato di fatto
C.SF.02.02	Inventario visuale
C.OP - STATO DI PROGETTO	
C.OP.01	Planimetria sinottica delle opere in progetto
C.OP.02	Planimetria di dettaglio
C.OP.03	Raffronto SDF - PRP vigente - Opere in progetto
C.OP.04	Piano di tracciamento delle opere
C.OP.05	Sezioni tipo di progetto
C.OP.06	Quaderno delle sezioni di computo
C.OP.07	Particolari costruttivi e arredo portuale
C.OP.08.01	Cassoni cellulari: piante e sezioni
C.OP.08.02	Cassoni cellulari: carpenterie
C.OP.09	Modalità esecutive e fasi costruttive
C.OP.10	Siti di cava e deposito
D - ELABORATI DEGLI IMPIANTI	
D.IE.01	Impianti Elettrici e Illuminotecnici: Relazione descrittiva e di calcolo
D.IE.02	Impianti Elettrici e Illuminotecnici: Schema di installazione
D.IS.01	Impianti Idrici: Relazione descrittiva e di calcolo
D.IS.02	Impianti Idrici: Schema di installazione
E - PIANO DI MANUTENZIONE DELL'OPERA E DELLE SUE PARTI	
E.01	Manuale d'uso
E.02	Manuale di manutenzione
E.03	Programma di manutenzione
F - PIANO DI SICUREZZA E COORDINAMENTO E INCIDENZA DELLA MANODOPERA	
F.01	Piano di sicurezza e coordinamento
F.02	Planimetria delle aree di cantiere
G - ELABORATI ECONOMICI ED AMMINISTRATIVI	
G.01	Elenco dei prezzi unitari
G.02	Analisi dei prezzi
G.03	Quadro incidenza della manodopera
G.04	Computo metrico estimativo
G.05	Quadro economico
G.06	Cronoprogramma
G.07	Capitolato speciale d'appalto
G.08	Schema di contratto di appalto
SPA	STUDIO PRELIMINARE AMBIENTALE
VINCA	SCREENING DI INCIDENZA AMBIENTALE

Tabella 1-1: Corpo documentale del progetto

B.02 - RELAZIONE SULL'AGITAZIONE INTERNA E L'AGIBILITÀ PORTUALE

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



2 Agitazione interna

In generale un bacino portuale dovrebbe consentire al naviglio un'entrata sicura in "quasi" tutte le condizioni di mare e vento, la possibilità di manovrare agevolmente, un ormeggio sicuro per le persone e per le stesse navi, nonché lo svolgimento dell'operatività in banchina.

Tutti questi elementi, che hanno ovviamente una dimensione differente a seconda del tipo di utenza portuale (dalle navi container alle piccole imbarcazioni da diporto), del tipo di attività portuale (dalla darsena tecnica di cantiere, allo scalo RO-RO, al porto turistico) e del grado di operatività che il porto deve assumere nel tempo (ad esempio un porto rifugio dovrebbe essere sempre operativo mentre un porto turistico può accettare anche diversi giorni all'anno di *down-time*), possono essere verificati considerando diversi parametri di cui il più importante è il moto ondoso residuo interno.

Lo studio della tranquillità portuale (dall'inglese *harbour tranquillity*) è un argomento molto complesso e richiede l'ausilio di adeguati modelli per la più affidabile valutazione di come le onde interagiscono con le strutture.

Un fattore molto importante da valutare preliminarmente e che condiziona anche la costruzione del modello numerico è la determinazione delle onde di input. Nel modello è infatti possibile impostare qualsiasi direzione dell'onda, periodo e altezza ma nella realtà non tutte le direzioni sono caratterizzate da stessa altezza o periodo. Un'attenta valutazione dei risultati dello studio meteomarino deve quindi indirizzare l'operatore a scegliere i più corretti stati ondometrici per il sito in questione.

2.1 Diffrazione, riflessione ed effetti combinati

Le informazioni fondamentali per valutare le condizioni di agitazione nell'ambito di un bacino sono l'altezza, il periodo e la direzione dell'onda in ciascun punto di esso; dal momento che, come nella quasi totalità dei casi, non sono disponibili registrazioni dirette di queste grandezze nell'ambito del sito in studio, è necessario far riferimento ad un modello di trasformazione in grado di trasferire le informazioni relative alle onde al largo, ottenute nei capitoli precedenti, al sito di interesse.

Con lo spostamento dell'onda dalla zona delle acque profonde (rapporto tra lunghezza dell'onda e profondità minore o uguale a 2) alla zona delle acque basse, i parametri fondamentali subiscono delle variazioni principalmente a seguito dei fenomeni rifrattivi, diffrattivi e riflessivi.

Il fenomeno della diffrazione consiste nel trasferimento di energia lateralmente rispetto alla cresta dell'onda; esso risulta evidente allorché un treno d'onda intercettato da un ostacolo (molo, promontorio etc.) pone in oscillazione la massa liquida dello specchio acqueo retrostante l'ostacolo stesso, con onde di espansione laterale radiali aventi per centro l'estremità di questo.

L'approccio tradizionalmente usato nei decenni passati (*wave ray theory*), secondo il quale l'energia del moto ondoso può trasferirsi esclusivamente in direzione normale alle creste dell'onda, trascura di fatto la presenza dei fenomeni diffrattivi nella zona di transizione, attribuendo la modifica delle caratteristiche dell'onda esclusivamente a fenomeni rifrattivi.

Nell'ambito della zona costiera, e più ancora all'interno di bacini protetti, si risentono pesantemente gli effetti combinati della diffrazione e della riflessione, potendosi questi sommare in modo tale da dar luogo a condizioni peggiori rispetto a quelle presenti a largo (risonanza).

A partire dagli anni '80, i ricercatori impegnati nel campo dell'ingegneria costiera hanno riconosciuto l'importanza degli effetti combinati della rifrazione e della diffrazione da una

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE



parte, della diffrazione e della riflessione dall'altra, e hanno cominciato a sviluppare teorie e modelli che ne potessero tener conto. Esiste oggi una copiosa serie di teorie disponibili che consentono di descrivere in maniera appropriata i fenomeni sopra richiamati, che caratterizzano il moto ondoso nella sua migrazione da acque profonde ad acque basse. Modelli per la risoluzione di fase basati sull'equazione *mild-slope* oppure sulle equazioni di tipo Boussinesq sono più adatte per i problemi che coinvolgono la riflessione/diffrazione delle onde, ad esempio nelle insenature costiere e nei porti. La *mild-slope* e le equazioni di Boussinesq sono equazioni integrate verticalmente per la propagazione ondosa nel piano orizzontale bidimensionale secondo diverse ipotesi fatte per la variazione del moto del fluido sulla profondità dell'acqua. La derivazione dell'equazione *mild slope* presuppone una variazione coseno iperbolico del potenziale di velocità con la profondità, coerente con le onde lineari monocromatiche in acqua di arbitraria mentre la derivazione dell'equazione di Boussinesq assume un profilo quadratico, valido per le onde d'acqua bassa con lunghezze d'onda molto più lunghe dell'acqua profondità.

2.2 Descrizione sintetica del layout di stato di fatto

L'approdo di Arenella è situato nella zona più settentrionale dell'area di competenza dell'autorità portuale di Palermo. Il porto è costituito da un molo di sopraflutto lungo circa 420 m e orientato verso Sud e costituito da due bracci uno con asse orientato per circa 180°N e lungo 280 m e l'altro orientato per circa 200°N e lungo 140 m. Il molo è radicato a riva nel lato nord. L'imboccatura presenta l'asse orientato per 200°N ed ha una larghezza di circa 145 m tra la testata del molo di sopraflutto e quella del molo di una seconda darsena interna alla prima.

La batimetria del sito si presenta abbastanza regolare con le isobate che seguono l'andamento della costa fino alla profondità dei 15 m.

2.3 Descrizione sintetica delle opere in progetto

Il progetto prevede il completamento dell'opera foranea di sopraflutto in assoluta coerenza planimetrica con quanto previsto nel PRP del 2018 approvato e vigente (D.D.G. della R.S. n. 100 del 30/07/2018). In merito al Porto dell'Arenella il PRP vigente prevede un prolungamento dell'opera prevista.

Per gli aspetti funzionali il porto è in Area A, sub-Area A5 "Porto Turistico dell'Arenella". Per una descrizione visuale e quantitativa delle opere si rimanda agli elaborati grafici di questo progetto.

2.4 Scelta delle onde di riferimento per le simulazioni

La scelta delle onde di riferimento attiene ad un certo livello di performance dell'operatività portuale e per quanto tale diviene requisito di progetto. Secondo le finalità suddette, stabilita la funzione del bacino portuale e la tipologia del naviglio e delle operazioni ammesse, gli standard correnti definiscono quali siano i livelli di agitazione compatibile.

L'analisi statistica ed il clima d'onda trasferito dal largo sottocosta hanno consentito di scegliere un set di onde di riferimento per le simulazioni che possano rispondere alle suddette raccomandazioni.

La prima considerazione che proviene dall'analisi del trasferimento del clima d'onda è che sottocosta le onde tendono a disporsi con le creste parallele alla battigia naturale. Nel caso in specie le direzioni delle mareggiate sottocosta si mantengono comprese tra 35° e 119°, con le onde maggiori provenienti dal settore orientale.

Pe le analisi in questione si sono considerate quindi le onde direzionali provenienti da 45°N, 90°N e 135°N con periodi di 6s, 10 e 14 s.

2.5 Risonanza

Per quanto riguarda i fenomeni di risonanza sono state simulate onde con periodi di 30 e 60 s. Dai risultati si nota che le due darsene (più interna e più esterna) si comportano disponendo le linee nodali e ventrali ortogonalmente all'asse maggiore dei rettangoli che le circoscrivono. I coefficienti di amplificazione sono compresi tra 0.8 e 0.6 per la darsena esterna e tra 0 e 1.8-2.0 per la darsena interna. Le altezze di tali onde, che sono comunque difficilmente prevedibili e rilevabili in natura, sono molto limitate – come riportato in letteratura – e hanno dei valori dell'ordine dei pochi centimetri. Pertanto l'esaltazione anche di 2 volte non appare preoccupante. In genere per i grandi porti commerciali si ritiene accettabile un'esaltazione dell'onda fino a 5 volte. In ogni caso la risonanza portuale è un fenomeno determinato sostanzialmente dalla forma e dimensione planimetrica dei bacini e che non dipende dal coefficiente di riflessione delle opere di bordo.

2.6 Simulazioni eseguite con modello DIFFRAC

La darsena di Arenella è situata nella zona più settentrionale dell'area di competenza dell'autorità portuale di Palermo. Il porto è costituito da un molo di sopraflutto lungo circa 420 m e orientato verso Sud e costituito da due bracci uno con asse orientato per circa 180°N e lungo 280 m e l'altro orientato per circa 200°N e lungo 140 m. Il molo è radicato a riva nel lato nord. L'imboccatura presenta l'asse orientato per 200°N ed ha una larghezza di circa 145 m tra la testata del molo di sopraflutto e quella del molo di una seconda darsena interna alla prima.

A circa 460 m verso Sud dell'imboccatura di Arenella si trova il porto di Acquasanta che ha il molo di sopraflutto radicato a riva e orientato con normale a circa 20°N. In pratica il molo di Acquasanta ha una posizione parallela all'imboccatura di Arenella a 450 m di distanza.

La batimetria del sito si presenta abbastanza regolare con le isobate che seguono l'andamento della costa fino alla profondità dei 15 m con pendenze dell'ordine del 10%.

Le simulazioni effettuate sono riportate in Tabella 2-1.

		Dir. onda (°N)	Periodo onda (s)	Configurazione	Codice di calcolo utilizzato
					DIFFRAC
1	Arenella	45	6	Stato di fatto	X
2	Arenella	45	10	Stato di fatto	X
3	Arenella	45	14	Stato di fatto	X
4	Arenella	90	6	Stato di fatto	X
5	Arenella	90	10	Stato di fatto	X
6	Arenella	90	14	Stato di fatto	X
7	Arenella	135	6	Stato di fatto	X
18	Arenella	45	6	PRP 2018	X
19	Arenella	45	10	PRP 2018	X
20	Arenella	45	14	PRP 2018	X
21	Arenella	90	6	PRP 2018	X
22	Arenella	90	10	PRP 2018	X
23	Arenella	90	14	PRP 2018	X
24	Arenella	135	6	PRP 2018	X
25	Arenella	135	10	PRP 2018	X
26	Arenella	90	30	PRP 2018	X
27	Arenella	90	60	PRP 2018	X
28	Arenella	45	10	PRP 2018 + banch. antirifl.	X
29	Arenella	45	10	PRP 2018 + Acquisanta	X
30	Arenella	45	14	PRP 2018 + Acquisanta	X

Tabella 2-1 – Elenco delle simulazioni eseguite con DIFFRAC per lo studio dell'agitazione residua nel Porto dell'Arenella

Sono stati applicati, con criterio cautelativo, coefficienti di riflessione di 0.05 per spiaggia (quasi completamente assorbente) 0.40 per scogliere in massi e per falesie e 0.90 per pareti verticali come le banchine interne e le dighe esterne in cassoni.

Si riporta di seguito il diagramma di riferimento per la valutazione del coefficiente di riflessione (Cfr. Figura 2.1).

I risultati di output grafico dei modelli matematici sono tutti riportati nell'apposito elaborato, a cui si rimanda:

- B.02.01 Relazione dell'agitazione residua e dell'agibilità portuale: allegati

Le immagini dell'output del modello riportano le isolinee del coefficiente di agitazione che si ricava all'interno del dominio di calcolo. Per avere il campo delle altezze d'onda più simili alle altezze d'onda che effettivamente si verificano (si ricordi che il modello ha il limite di simulare solo onde monocromatiche che si discostano notevolmente dalle onde reali) è sufficiente moltiplicare il coefficiente che restituisce il calcolo per l'altezza d'onda incidente di cui si vuole conoscere il comportamento dentro al porto. Si aggiunga in ogni

caso che l'onda monocromatica è un'onda regolare, con periodo e altezza costanti, senza dispersione direzionale; pertanto considerare solamente onde monocromatiche permette di andare a favore di sicurezza.

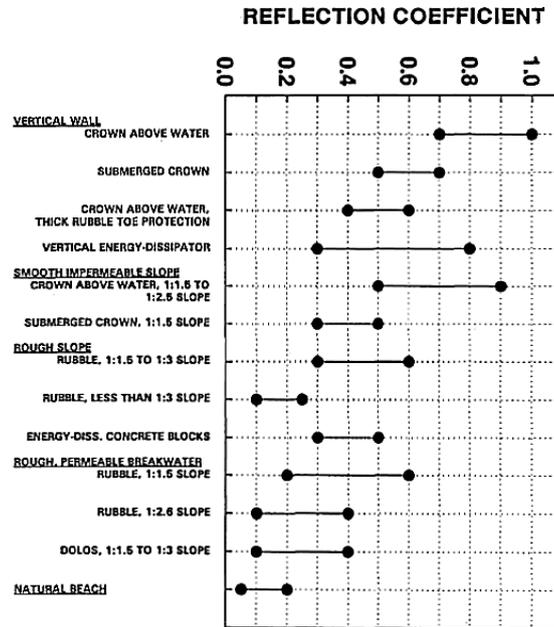


Figura 2.1 – Coefficienti di riflessione – fonte: Thompson, E. F., H. S. Chen and L. L. Hadley, 1996: Validation of numerical model for wind waves and swell in harbours. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 122,5. 245-257.

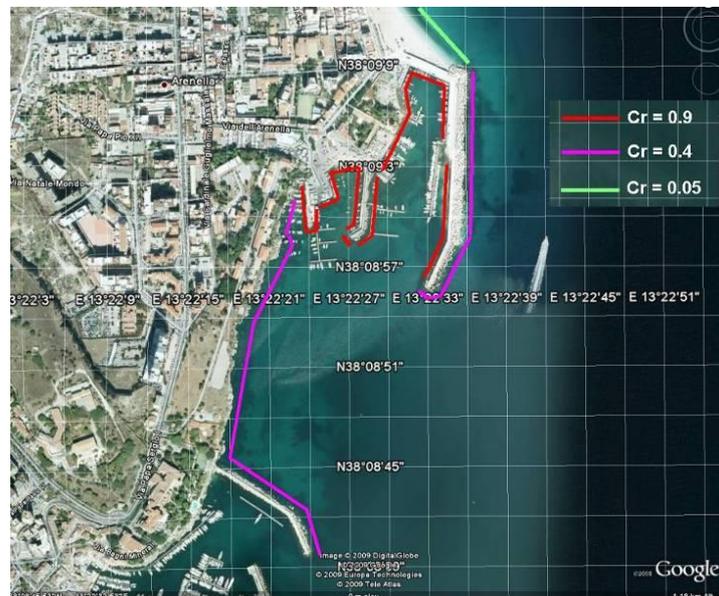


Figura 2.2– Schema dei coefficienti di riflessione usati per le simulazioni della darsena “Arenella”

3 Agibilità portuale

Le condizioni di agibilità portuale dipendono dallo stato di agitazione residua degli specchi acquei sotto mareggiate incidenti.

Lo stato di agitazione è diversamente tollerabile a seconda della tipologia di traffico cui sono destinati i bacini portuali e le banchine, con maggiore sensibilità per le infrastrutture per la navigazione da diporto, soprattutto quando destinate al ricovero di naviglio di piccola dimensione.

Una attenzione particolare deve essere posta alle imboccature ed ai canali di accesso, dove l'eventuale frangenza del moto ondoso comporterebbe l'impossibilità di governo delle piccole imbarcazioni.

Come vanno analizzate le escursioni dei livelli idrici, eventualmente connessi a fenomeni di risonanza portuale (sesse), per stimare non solo l'influenza sulle operazioni di banchina, ma la stessa tenuta in sicurezza delle linee di ormeggio.

Secondo il PRP vigente con D.D.G. della R.S. n. 100 del 30/07/2018 il Porto dell'Arenella è in Area A, sub-Area A5 "Porto Turistico dell'Arenella".

In quanto porto turistico gli standard correnti di settore sono quelli richiamati dal D. Interministeriale 14/04/1998 "Approvazione dei requisiti per la redazione dei progetti da allegare ad istanze di concessione demaniale marittima per la realizzazione di strutture dedicate alla nautica da diporto.", che fa particolare riferimento a quelli prodotti dall'Associazione internazionale permanente dei congressi di navigazione (oggi PIANC, www.pianc.org) e a eventuali ulteriori standard adottati su scala regionale.

Tra i diversi standard e linee guida esistenti in letteratura si possono quindi ben considerare le "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici", emanate dal PIANC Italia nel 2002.

Si riportano di seguito le condizioni raccomandate.

"A5. Agitazione interna

Valori raccomandati della altezza d'onda significativa ammissibile all'interno del porto (con periodi di picco spettrali compresi tra 2 e 8 s):

- condizione di "comfort" (particolarmente importante nel caso di porti in cui si prevede la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni):

$H_s = 0.15$ m

per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;

- condizione di "sicurezza":

$H_s = 0.30$ m

per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;

- condizione "limite":

$H_s = 0.50$ m

per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

Si ricorda che la sicurezza dell'ormeggio è anche funzione della direzione di propagazione del moto ondoso all'interno del porto e del sistema di ormeggio. Essa risulta più favorevole per direzione di propagazione parallela all'asse longitudinale dell'imbarcazione e/o per ormeggio con finger laterale. In questi casi, i valori suddetti possono essere aumentati a discrezione del progettista (comunque mai oltre il 50%).

Una particolare attenzione deve essere rivolta alla previsione di fenomeni di risonanza del moto ondoso (sesse) causa principale della cosiddetta "risacca", anche attraverso l'ausilio di appositi modelli matematici."



3.1 Zonizzazione

Ai fini di una puntuale disamina delle agitazioni residue dello specchio acqueo protetto, utile anche per fornire una “zonizzazione” finalizzata alla più corretta gestione degli ormeggi, nella Figura 3.1 è rappresentata la suddivisione del layout in esame in aree funzionalmente omogenee (imboccatura, le banchine della darsena principale e la piccola darsena a Ovest).

La identica zonizzazione viene considerata per il layout “stato di fatto” al fine di effettuare i confronti.

In funzione delle ondatezioni più gravose per i vari tempi di ritorno da considerare, per ciascuna area vengono letti i valori caratteristici dei coefficienti di agitazione generati dall’onda di calcolo simile, come risultati dalle simulazioni condotte.

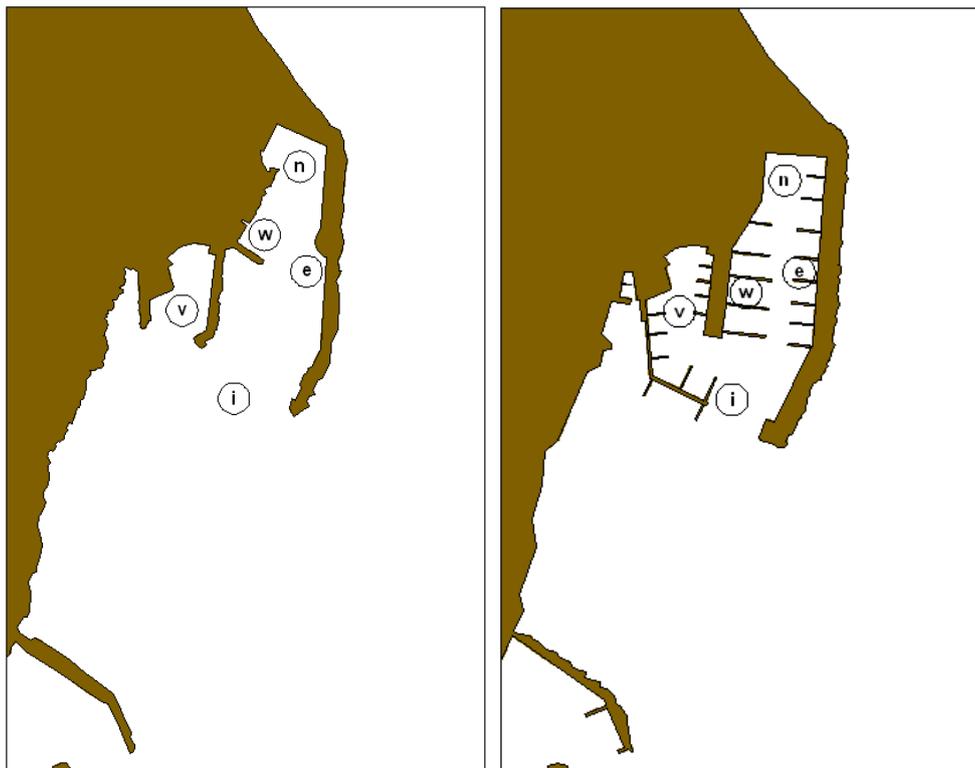


Figura 3.1 – Aree omogenee per le verifiche dell’agitazione interna del porto di Arenella

Di seguito vengono riportate le tabelle riepilogative delle agitazioni in ciascuna zona che indicano sia i coefficienti di agitazione (C_a) che le altezze d’onda relative (H) ricavate sulla base delle considerazioni fatte precedentemente.

onde per Porti Arenella e Acquisanta calcolate				onde per porti Arenella e Acquisanta usate nel modello				Arenella SDF									
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	H (m)	T (s)	Dir (°N)	Considerazioni	i		e		n		w		v	
								ca	H (m)	ca	H (m)	ca	H (m)	ca	H (m)	ca	H (m)
5 gg/anno	1.5	3.2	45	1	6	45	periodo a favore di sicurezza	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.3	0.5
	1	2.2	90	1	6	90	periodo a favore di sicurezza	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2
Tr 5 anni	3.5	10	38	1	10	45	direzione a favore di sicurezza	0.2	0.7	0.2	0.7	0.0	0.0	0.2	0.7	0.3	1.1
	3.1	8.3	90	1	10	90	periodo a favore di sicurezza	0.4	1.2	0.2	0.6	0.4	1.2	0.2	0.6	0.2	0.6
Tr 10 anni	3.25	11.1	30	1	10	45	direzione a favore di sicurezza	0.2	0.7	0.2	0.7	0.0	0.0	0.2	0.7	0.3	1.0
	3.3	9.1	90	1	14	90	periodo a favore di sicurezza	0.6	2.0	0.4	1.3	0.2	0.7	0.4	1.3	0.2	0.7
Tr 50 anni	5.3	12.5	40	1	14	45	periodo a favore di sicurezza	0.2	1.1	0.2	1.1	0.2	1.1	0.2	1.1	0.4	2.1
	4.2	10	90	1	10	90		0.4	1.7	0.2	0.8	0.4	1.7	0.2	0.8	0.2	0.8
onda di Scirocco	0.7	4	135	1	6	135	periodo a favore di sicurezza	0.6	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.6	0.4
	0.7	-	-	1	10	135	periodo a favore di sicurezza	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
onda lunga 1	unit.	30	-	1	30	90		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
onda lunga 2	unit.	60	-	1	60	90		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

onde per Porti Arenella e Acquisanta calcolate				onde per porti Arenella e Acquisanta usate nel modello				Arenella PRP 2018									
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	H (m)	T (s)	Dir (°N)	Considerazioni	i		e		n		w		v	
								ca	H (m)	ca	H (m)	ca	H (m)	ca	H (m)	ca	H (m)
5 gg/anno	1.5	3.2	45	1	6	45	periodo a favore di sicurezza	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.0	0.0
	1	2.2	90	1	6	90	periodo a favore di sicurezza	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Tr 5 anni	3.5	10	38	1	10	45	direzione a favore di sicurezza	0.4	1.4	0.4	1.4	0.2	0.7	0.2	0.7	0.2	0.7
	3.1	8.3	90	1	10	90	periodo a favore di sicurezza	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tr 10 anni	3.25	11.1	30	1	10	45	direzione a favore di sicurezza	0.2	0.7	0.4	1.3	0.4	1.3	0.4	1.3	0.2	0.7
	3.3	9.1	90	1	10	90	periodo a favore di sicurezza	0.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tr 50 anni	5.3	12.5	40	1	14	45	periodo a favore di sicurezza	0.2	1.1	0.2	1.1	0.2	1.1	0.2	1.1	0.2	1.1
	4.2	10	90	1	10	90		0.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
onda di Scirocco	0.7	4	135	1	6	135	periodo a favore di sicurezza	0.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1	0.35	0.25	0.35	0.2
	0.7	-	-	1	10	135	periodo a favore di sicurezza	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
onda lunga 1	unit.	30	-	1	30	90		0.4	-	0.4	-	0.4	-	0.4	-	0.0	-
onda lunga 2	unit.	60	-	1	60	90		0.8	-	0.8	-	0.8	-	0.8	-	1.8	-

Tabella 3-1: Stima dell'agibilità portuale secondo raccomandazioni PIANC

3.2 Analisi dei risultati ottenuti

Per le ondate da Grecale, 45°N, si osserva che il fenomeno di maggior rilievo è costituito dalla riflessione del molo di sopraflutto di Acquisanta che governa la penetrazione del moto ondoso nel bacino dell'Arenella.

Tale situazione non è ovviabile a meno di configurazioni del dispositivo portuale radicalmente diverse dalle attuali storicizzate. Sarebbe tuttavia mitigabile riducendo l'azione riflessiva del molo dell'Acquisanta.

Con la configurazione delle opere foranee secondo le previsioni del PRP 2018, si ha un sensibile miglioramento per le direzioni principali dell'onda incidente rispetto allo stato di fatto, tuttavia non ancora tale da rientrare nei limiti indicati dalle Raccomandazioni PIANC. Occorre tuttavia osservare che i risultati del modello tendono ad essere cautelativi e non sono tali da essere assunti rigorosamente, essendo significativi per prendere a confronto situazioni diverse.

Con onda da Scirocco, 135°N, si hanno condizioni sempre accettabili considerando anche che l'onda imposta nel modello è più gravosa di quella reale.

Per approfondire il problema dell'agitazione interna, generata con le onde del I Quadrante, sono state eseguite ulteriori simulazioni modificando il coefficiente di riflessione delle banchine nord ed est non riscontrando però miglioramenti decisivi. Si è ritenuto in ogni caso opportuno prevedere per le nuove banchine dei dispositivi antiriflettenti (celle antirisacca e similari).

A fini di studio, per meglio evidenziare l'effetto dell'azione riflessiva del molo dell'Acquasanta sulle onde incidenti, è stato anche simulato un ulteriore layout che preveda l'inserimento di una spiaggia localizzata alla radice del molo di Acquasanta che ne limitasse la riflessione. Quest'ultima simulazione ha dato dei risultati più che positivi sia per le onde da 45°N (tutti i periodi) che per le onde da 90°N. Di seguito si riportano i risultati ottenuti (Cfr. Tabella 3-2).

In conclusione appare senz'altro opportuno, oltre all'allungamento del sopraflutto come previsto dal PRP vigente, la realizzazione di una spiaggia sabbiosa o ghiaiosa a debole pendenza alla radice del molo dell'Acquasanta nonché di costruire le nuove banchine dotandole di accorgimenti antirisacca.

	onde per Porti Arenella e Acquasanta calcolate			onde per porti Arenella e Acquasanta usate nel modello				Arenella miglior. PRP con spiaggia su molo Acquasanta									
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	H (m)	T (s)	Dir (°N)	Considerazioni	i		e		n		w		v	
								Ca	H (m)	Ca	H (m)	Ca	H (m)	Ca	H (m)	Ca	H (m)
5 gg/anno	1.5	3.2	45	1	6	45	periodo a favore di sicurezza										
	1	2.2	90	1	6	90	periodo a favore di sicurezza										
Tr 5 anni	3.5	10	38	1	10	45	direzione a favore di sicurezza	0.20	0.70	0.05	0.18	0.00	0.00	0.05	0.18	0.05	0.18
	3.1	8.3	90	1	10	90	periodo a favore di sicurezza										
Tr 10 anni	3.25	11.1	30	1	10	45	direzione a favore di sicurezza	0.20	0.65	0.05	0.16	0.00	0.00	0.05	0.16	0.05	0.16
	3.3	9.1	90	1	10	90	periodo a favore di sicurezza										
Tr 50 anni	5.3	12.5	40	1	14	45	periodo a favore di sicurezza	0.20	1.06	0.05	0.27	0.00	0.00	0.05	0.27	0.05	0.27
	4.2	10	90	1	10	90	periodo a favore di sicurezza										
onda di Scirocco	0.7	4	135	1	6	135	periodo a favore di sicurezza										
	0.7	-	-	1	10	135	periodo a favore di sicurezza										
onda lunga 1	unit.	30	-	1	30	90			-		-		-		-		-
onda lunga 2	unit.	60	-	1	60	90			-		-		-		-		-

Tabella 3-2: Stima dell'agibilità portuale secondo raccomandazioni PIANC - ottimizzazioni



4 Approccio con modello basato sulle equazioni di Boussinesq

Il parere favorevole del Comitato Tecnico Amministrativo del Provveditorato Interregionale Opere Pubbliche Sicilia e Calabria, n. 351/10 dell'adunanza del 16/03/2010 sul progetto definitivo di completamento del molo di sopraflutto dell'Arenella, ha prescritto che:

“Relativamente agli studi dell'agitazione interna al bacino portuale si ritiene che in sede di stesura del progetto esecutivo vadano adottati modelli matematici basati sulla soluzione numerica delle equazioni di Boussinesq in due dimensioni. A tal fine particolare attenzione va rivolta alla scelta delle onde di riferimento per le relative simulazioni, sia in termini di variabilità direzionale del clima ondoso incidente sottocosta (opportunamente ed interamente trasferito dal largo), sia di valori di altezza d'onda significativa.”

Il parere quindi richiedeva una specifica analisi condotta sulla configurazione del progetto esecutivo, a prescindere dal completamento del dispositivo di protezione portuale rispetto alle previsioni del vigente PRP 2018.

4.1.1 Generalità sul modello

Il modello numerico utilizzato è BOUSS-2D, sviluppato da O. G. Nwogu e Z. Demirbilek sotto l'egida del U.S.Army Corp of Engineers (USACE). Si tratta di un modello numerico per simulare la propagazione e la trasformazione delle onde nelle regioni costiere e nei porti, basato su una soluzione a dominio temporale delle equazioni di tipo Boussinesq. Le equazioni di governo sono valide in modo uniforme da acque profonde a quelle poco profonde e possono simulare la maggior parte dei fenomeni di interesse nella zona costiera e nei bacini portuali, tra cui shoaling e rifrazione su topografia variabile, riflessione e diffrazione vicino alle strutture, dissipazione di energia dovuta al frangimento delle onde e all'attrito del fondo, trasferimento di energia spettrale incrociata dovuta a interazioni non lineari onda-onda, correnti *longshore* indotte dal frangimento e *rip currents*, interazione onda-corrente e interazione onda con strutture porose. Molti dei processi tipici che accadono nelle insenature e nei porti possono essere studiati utilizzando BOUSS-2D.

BOUSS-2D può essere applicato ad una vasta gamma di problemi di ingegneria costiera e marittima, compresa la trasformazione complessa delle onde su piccole regioni costiere (1-5 km), l'agitazione interna e gli studi di risonanza portuale, il frangimento su ostacoli sommersi, rottura dei modelli di circolazione indotta vicino alla costa, interazione onda-corrente vicino alle bocche di marea, generazione di onde infra-gravità da gruppi di onde corte, e trasformazione delle onde intorno alle isole artificiali.

Le equazioni di BOUSS-2D possono simulare la maggior parte dei fenomeni idrodinamici di interesse nelle regioni costiere e nei bacini portuali, tra cui:

- a. Shoaling.
- b. Rifrazione.
- c. Diffrazione.
- d. Riflessione e trasmissione totale/parziale.
- e. Attrito inferiore.
- f. Interazioni non lineari onda-onda.
- g. Rottura dell'onda e runup.
- h. Correnti indotte dall'onda.
- i. Interazione onda-corrente.



4.1.2 Formulazione analitica

BOUSS-2D si basa su equazioni di tipo Boussinesq derivate da Nwogu (1993, 1996). Le equazioni sono equazioni integrate in profondità per la conservazione della massa e la quantità di moto per le onde non lineari che si propagano in acque poco profonde e intermedie. Queste possono essere considerate una variazione delle equazioni per acque poco profonde che sono spesso utilizzate per simulare i flussi di marea nelle regioni costiere. Per onde di breve periodo, le velocità orizzontali non sono più uniformi con la profondità e la pressione non è idrostatica. Il profilo verticale del campo di flusso è ottenuto espandendo il potenziale di velocità, Φ , come una serie di Taylor su

$$\begin{aligned} \Phi(x, z, t) = & \phi_\alpha + \mu^2 (z_\alpha - z) [\nabla \phi_\alpha \cdot \nabla h] \\ & + \frac{\mu^2}{2} [(z_\alpha + h)^2 - (z + h)^2] \nabla^2 \phi_\alpha + O(\mu^4) \end{aligned} \quad (1)$$

un'elevazione arbitraria, z_α , nella colonna d'acqua. Per le onde di lunghezza L , molto maggiore della profondità dell'acqua, h , la serie viene troncata al secondo ordine, con il risultato di una variazione quadratica del potenziale di velocità sulla profondità:

dove $\Phi_\alpha = \Phi(x, z_\alpha, t)$, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, e $\mu = h/L$ è una misura della dispersione di frequenza. Le velocità orizzontale e verticale sono ottenute dalla velocità potenziale:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(x, z, t) = \nabla \Phi = & \mathbf{u}_\alpha + (z_\alpha - z) [\nabla(\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \nabla h] \\ & + \frac{1}{2} [(z_\alpha + h)^2 - (z + h)^2] \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

$$w(x, z, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -[\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla h + (z + h) \nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha] \quad (3)$$

dove $\mathbf{u}_\alpha = \nabla \Phi|_{z_\alpha}$ è la velocità orizzontale a $z = z_\alpha$.

Le ulteriori assunzioni e sviluppi possono essere tratte dalla letteratura tecnica di supporto al modello ed in particolare da "BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors - Report 1: Theoretical Background and User's Manual", Okey George Nwogu e Zeki Demirbilek, ERDC/CHL TR-01-25, September 2001.

4.1.3 Simulazioni eseguite

Come indicato nel parere reso dal CTA, sono stati considerati stati del mare irregolari ben rappresentativi delle condizioni estreme probabili, sia in termini di direzioni di propagazione che di altezza d'onda significativa, come stimati dall'analisi statistica del clima d'onda e dalle elaborazioni successive di trasferimento sottocosta¹.

Sono quindi stati testati tutti gli stati del mare propagati sottocosta con Tempi di Ritorno pari a 1, 5 e 50 anni, al fine di fornire le informazioni richieste dalle sopra citate Raccomandazioni Tecniche del PIANC.

4.2 Analisi dei risultati ottenuti

I risultati ottenuti per il layout di progetto sono sempre stati confrontati con quelli relativi allo stato di fatto.

Le immagini riportate nell'allegato (Cfr. Elab. B.02.01) dimostrano l'efficacia del prolungamento dell'opera di sopraflutto secondo la configurazione di PRP. La maggiore

¹ Cfr. gli elaborati facenti parte del corpo documentale di progetto:

- B.01 Relazione idraulica marittima
- B.01.01 Relazione idraulica marittima: allegati

protezione del bacino portuale risulta evidente e sensibile anche in assenza del completamento del modo di sottoflutto.

Viene altresì confermata la cautelatività dei risultati ottenuti col modello DIFFRAC, per le considerazioni già esposte, e quindi i livelli di agitazione residua inferiori, calcolati col modello BOUSS-2D a parità di condizioni al contorno.

COMMITTENTE



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sicilia Occidentale

PROGETTAZIONE

