



COMUNE DI RAVENNA



REGIONE EMILIA  
ROMAGNA



DIPARTIMENTO  
BIGEASEZIONE GEOLOGIA



PARCO DELTA DEL PO  
EMILIA-ROMAGNA

ENTE PER I PARCHI E LA  
BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO

**REALIZZAZIONE DI UN NUOVO PENNELLO IN MASSI A PROTEZIONE DEL TRATTO  
DI LITORALE A NORD DI LIDO DI DANTE**

**VERIFICHE DI STABILITÀ**

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ</b>	<b>1</b>

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>2. VERIFICA DI STABILITA' .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Verifica massi mantellata .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Parametri idraulici .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3. Verifica massi testata .....</b>	<b>9</b>
<b>2.4. Scalzamento al piede .....</b>	<b>9</b>
2.4.1. Analisi qualitativa .....	11
2.4.2. Analisi quantitativa al tronco.....	21
2.4.3. Analisi quantitativa in testata.....	22
<b>2.5. Verifica protezione del piede.....</b>	<b>27</b>
<b>3. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>31</b>

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	2



COMUNE DI RAVENNA



REGIONE EMILIA  
ROMAGNA



DIPARTIMENTO  
BIGEASEZIONE GEOLOGIA

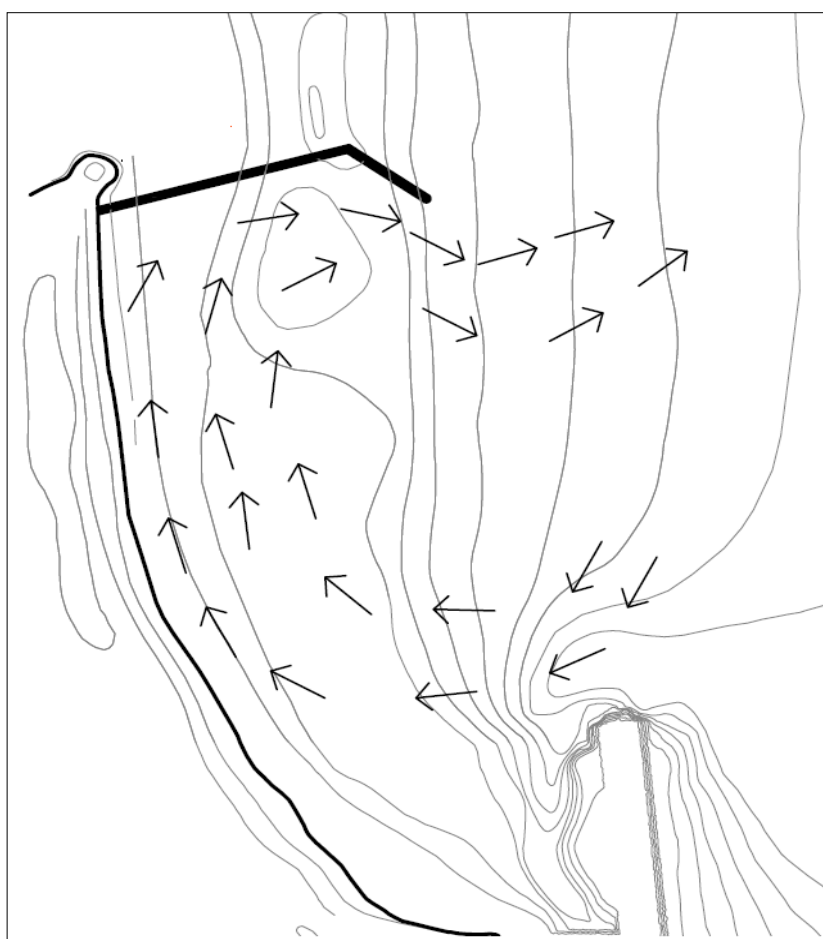


ENTE PER I PARCHI E LA  
BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO

## 1. INTRODUZIONE

Brevemente, la verifica che segue è stata realizzata per precisare le caratteristiche e le condizioni assegnate alla soluzione progettuale D descritta nella relazione specialistica allegata alla documentazione di progetto.

Con questa configurazione, si è ritenuto che un processo di consolidazione del fondale provocherebbe un abbassamento della quota di berma del pennello. Nella zona in esame non sono state svolte prove geotecniche atte a determinare la capacità portante e di consolidamento del fondale. Per tanto, l'opera è stata elevata a +1.50 m sopra il livello medio del mare in modo tale da compensare gli effetti prevedibili di una consolidazione del suolo.



*Figura 1 - Correnti di Risacca nella soluzione progettuale B*

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ</b>	<b>3</b>

## 2. VERIFICA DI STABILITA'

Come già riportato, la soluzione adottata è descritta dalla **Configurazione Progettuale D**. Se ne riportano i dettagli:

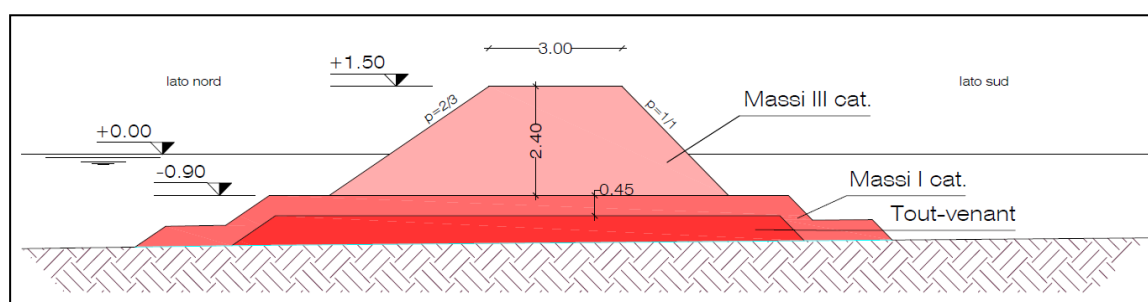


Figura 2 - Pennello: sezione trasversale tipo - configurazione D

- a) Mantellata in doppio strato con massi di III cat. con una quota di berma pari a +1.50 m s.l.m. e scarpate con pendenze di 2:3 sul lato nord e di 1:1 sul lato sud per tutto il primo tratto, scarpate uguali pari a 2:3 per il secondo tratto;
- b) Strato di filtro in singolo strato costituito da massi di I cat. per uno spessore di 0.45 m posizionato sotto lo strato di mantellata con le funzioni di:
  - a. evitare una dispersione di materiale di fondazione con bassa granulometria dovuta alla azione di onde e correnti;
  - b. migliorare la distribuzione del carico di mantellata sulla fondazione;
  - c. creare uno strato di protezione del piede del pennello per mitigare gli effetti di scalzamento. Il prolungamento di questo strato sul fondale è pari a 1.35 m e 1.80 m nella sezione di testata in quanto più sollecitata;
- c) Strato di fondazione composto di misto di cava "Tout-Venant" avente massa compresa tra 0.1 kg e 500 kg secondo prezziario regionale.

Per le verifiche strutturali sono stati utilizzati i valori tabellati in Tabella 1 relativi ai valori di onde nelle condizioni ordinarie e straordinarie (tempo di ritorno pari a 25 anni) per le condizioni di vento Scirocco e Bora.

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ</b>	<b>4</b>

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

	Boa Nausicaa (1)			d=-3.0 m (2)	
PENNELLO_2	Hs0	Tp	Dir	Hs	Dir
BORA_ORD	3.23	7.78	50.00	1.55	67.00
BORA_EXT	4.93	8.55	50.00	1.86	70.10
SCIROCCO_ORD	2.18	7.40	100.00	1.76	87.00
SCIROCCO_EXT	3.62	8.09	100.00	1.89	92.80

Tabella 1 - Valori d'onda di progetto nelle due condizioni Bora e Scirocco, Ordinarie e Straordinarie

Nella colonna (1) sono riportati i valori registrati dalla Boa Nausicaa collocata a circa 8 km a largo di Cesenatico su un fondale di 10 m. i valori in colonna (2) sono determinati tramite la legge di dipendenza tra il periodo di picco delle onde  $T_p$  e l'altezza d'onda significativa  $H_s$ , calcolata con la relazione di *Mathiesen et al.* Riportata nell'“Atlante delle Onde Italiane” (3).

Da i sopracitati dati di riferimento sono stati determinati i parametri necessari alla modellazione, illustrati in Tabella 2.

	h [m] (1)	Tp [s] (2)	L [m] (3)	k (4)	Hs [m] (5)	L0 [m] (6)	s_m (7)	Ir_m (8)	Dir [°N] (9)	Frangimento d'onda
BORA_ORD	3,00	7,78	42,21	0,15	1,55	94,42	0,04	3,48	67,00	PLUNGING
BORA_EXT	3,00	8,55	46,38	0,14	1,86	114,04	0,04	3,33	70,10	PLUNGING
SCIROCCO_ORD	3,00	7,40	40,14	0,16	1,76	85,43	0,04	3,18	87,00	PLUNGING
SCIROCCO_EXT	3,00	8,09	43,89	0,14	1,89	102,10	0,04	3,21	92,80	PLUNGING

Tabella 2 - Parametri di riferimento delle quattro condizioni ondose

dove:

$h$	=	profondità fondale alla testata del pennello;
$T_p$	=	periodo di picco dell'onda;
$L$	=	lunghezza d'onda alla testata del pennello $L = T_p \sqrt{gh}$ ;
$H_s$	=	altezza significativa d'onda;
$L_0$	=	lunghezza d'onda a largo $L_0 = 1.56 T^2$ ;
$s_m$	=	pendenza d'onda $s_m = H/L_0$ ;
$Ir_m$	=	Iribarren parameter medio $Ir_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_m}}$ ;

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	5

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

$\alpha$  = angolo pendenza scarpata  $\alpha = 0.59 \text{ rad}$  se 1:1,5.

La caratteristica di frangimento d'onda è in funzione del numero di Iribarren. Esso permette una classificazione qualitativa del tipo di azioni che l'onda avrà sulla struttura e su come essa andrà a dissipare la propria energia. Le onde misurate hanno tutte la caratteristica di frangimento di tipo *surging*, ovvero *a cascata*. In questo caso, le condizioni di frangimento dovute ad una pendenza media dei fondali ( $2\% < m < 4\%$ ) si manifestano con distacco della cresta di un getto liquido che casca in avanti verso il basso; tali condizioni portano ad un frangimento graduale e con un lungo tratto (4).

## 2.1. VERIFICA MASSI MANTELLATA

Per le dighe a scogliera emersa composte da massi naturali si usa generalmente la formula di *Hudson* (1974) nella seguente formulazione:

$$M_{50} = \frac{\rho_s H_s^3}{K_D \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} = \frac{\rho_s H_s^3}{K_D \Delta^3 \cot \alpha}$$

Dove:

$M_{50}$  = massa media delle rocce considerate come cubo equivalente

$$M_{50} = \rho_s D_{n50}^3$$

$\rho_s$  = densità della roccia selezionata ( $\rho_s = 2500 \text{ kg/m}^3$ )

$\rho_w$  = densità dell'acqua marina ( $\rho_w = 1040 \text{ kg/m}^3$ )

$$\Delta = \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) = 1.39$$

$K_D$  = coefficiente di stabilità previsto dalla formula di Hudson in funzione del danno previsto sulla struttura e del tipo di onda agente.

La formula permette di determinare il valore minimo della massa del singolo blocco di mantellata necessario per resistere agli effetti marittimi agenti. Da scelte progettuali si è desiderato un tipo di masso di III cat, ovvero con massa compresa tra 3000 kg e 5000 kg e indice dei vuoti del 25%. Tale scelta è giustificata non solo dal calcolo strutturale della mantellata, ma anche

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	6

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

dall'elevato indice dei vuoti di una scogliera realizzata in III cat. la quale presenta un rapporto più alto tra volume occupato e numero di massi utilizzati, creando di conseguenza una configurazione della mantellata più economica. Nel caso in esame, il parametro  $K_D$  è stato assunto pari a 2.4 relativo a massi naturali con superficie liscia.

La formula di Hudson può essere riscritta nella forma:

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{\frac{1}{3}}$$

dove  $N_s$  viene definito come numero di stabilità dell'opera in esame. Tale parametro indica una maggiore stabilità quanto più il suo valore è prossimo all'unità.

Si riportano in Tabella 3 i risultati ottenuti tramite Hudson, e in Tabella 4 i valori relativi alla scelta progettuale di massi di III cat.

	M_n50	D_n50	KD
BORA ORD	0,40	0,54	2.40
	0,24	0,46	4.00
	0,10	0,34	10.00
BORA EXT	<b>0,48</b>	<b>0,58</b>	2.40
	0,29	0,49	4.00
	0,11	0,36	10.00
SCIRO ORD	<b>0,45</b>	<b>0,57</b>	2.40
	0,27	0,48	4.00
	0,11	0,35	10.00
SCIRO EXT	<b>0,49</b>	<b>0,58</b>	2.40
	0,29	0,49	4.00
	0,12	0,36	10.00

M_n50	D_n50	Stabilità
0,49	0,58	<b>2,34</b>

Tabella 3 - a sinistra: Massa e diametro della condizione minima (Hudson), i valori estremi sono evidenziati; a destra: numero di stabilità relativa al valore maggiore valutato

SCELTA PROGETTUALE						
M [tons]	Dn50 (1)	Vol (2)	Stabilità (3)	r (4)	n (5)	KΔ (6)
<b>3,00</b>	1,06	1,20	1,28	2,17	2,00	1,02

Tabella 4 - Stabilità e caratteristiche dei massi nella scelta progettuale

In Tabella 4 è stato assunto un peso del singolo masso pari al valore minimo consentito dalla categoria scelta. Il valore di stabilità è molto prossimo all'unità e quindi più stabile rispetto al

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	7

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

minimo consentito dalla progettazione secondo Hudson. In colonna (4) è rappresentato lo spessore della mantellata in doppio strato – colonna (5) – determinato secondo la formula:

$$r = nK_{\Delta} \left( \frac{P}{\gamma_s} \right)^{\frac{1}{3}}$$

## 2.2. PARAMETRI IDRAULICI

I parametri idraulici di “run-up” e di portata d’acqua di tracimazione non sono ritenuti necessari per la progettazione del pennello in esame, ma si riporta lo studio effettuato per una migliore caratterizzazione dell’opera.

Il valore di “run-up” individua l’altezza che l’onda percorre sul pennello tenendo in considerazione la permeabilità dello strato di mantellata, la sua inclinazione, il materiale di cui è composto e della pendenza dell’onda. Secondo il *Coastal Engineering Manual*, per scegliere con permeabilità maggiore di 0.5 e con massi naturali, considerata una probabilità di non eccedenza pari al 2%, la formula è:

$$\frac{R_{ui\%}}{H_s} = D \quad se \quad \left( \frac{D}{B} \right)^{\frac{1}{C}} < I_{r_m} < 7.5$$

in cui i valori di B, C e D sono 1.17, 0.46 e 1.97 rispettivamente. Il valore medio di risalita d’onda sulla scarpata della struttura è di circa 3.40 m con i valori d’onda riportati precedentemente, quindi si presume che l’onda tracimerà.

Il valore di tale tracimazione è determinato tramite la formula di Van der Meer secondo quanto riferito nel *Coastal Engineering Manual* in funzione del parametro Iribarren, maggiore di 2 in questo caso.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}} = 0.06 \exp \left( - \frac{5.2R_c \sqrt{s_{op}}}{H_s \tan \alpha * \gamma_s} \right)$$

Dove:

- $q$  = portata di tracimazione in  $m^3/s$ ;
- $R_c$  = elevazione di berma;
- $\gamma_s$  = fattore correttivo in funzione della pendenza di scarpata, inclinazione dell’opera rispetta alla direzione d’onda, della profondità del fondale e del

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	8



 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

tipo di scabrosità della superficie esposta. Si è determinato un valore pari a 0.30.

Risulta che il valore medio di tracimazione in condizioni estreme è pari a  $1.50 \cdot 10^{-3} m^3/s$  e di  $5.95 \cdot 10^{-4} m^3/s$  nelle condizioni d'onda ordinarie.

### 2.3. VERIFICA MASSI TESTATA

Tale elemento strutturale è soggetto a sollecitazioni maggiori dovuti a cambi repentini di corrente e a frangimento di onde su tutta la superficie curvilinea. Questo fenomeno spesso porta a perdite di equilibrio nella zona di collegamento tra mantellata e strato di fondazione. Quindi, sono state utilizzate le specifiche costruttive di creare un elemento più stabile allargando la berma sommersa a 1.80 m per creare una superficie maggiore di appoggio per i massi di III cat.

Per l'elemento di testata viene utilizzata la formulazione di Hudson, già precedentemente illustrata, in cui il coefficiente  $K_D$  è pari a 1.90 in funzione alla diversa classificazione del fenomeno in atto. I risultati ottenuti sono mostrati in Tabella 5.

	<b>KD</b>	<b>Δ</b>	<b>Mn50</b>	<b>Dn50</b>	<b>Stabilità</b>
<b>Bora_ord</b>	1,90	1,39	0,50	0,59	1,90
<b>Bora_ext</b>	1,90	1,39	0,60	0,62	2,14
<b>Scirocco_ord</b>	1,90	1,39	0,57	0,61	2,07
<b>Scirocco_ext</b>	1,90	1,39	0,61	0,63	2,17
<b>Scelta progettuale</b>	<b>1,90</b>	<b>1,39</b>	<b>3,00</b>	<b>1,06</b>	<b>1,28</b>

Tabella 5 - Determinazione massa e diametro dei massi in testata

La scelta progettuale riguardante i massi di III cat. rimane conforme a quanto affermato nel paragrafo 6.1.

### 2.4. SCALZAMENTO AL PIEDE

Il fenomeno dello scalzamento al piede, anche noto come “scouring”, rappresenta uno dei modi di fallimento di scogliere in mare ed è di difficile interpretazione a causa di una scarsa prevedibilità dell'evento e di tutti i parametri che concorrono. Ogni opera localizzata su costa e costruita su materiale terroso o sabbioso soggetto ad elevata erodibilità, sarà soggetta a danni dovuti al fenomeno dello scalzamento del piede. È definito come il fenomeno che rimuove parti del

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ</b>	<b>9</b>

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

fondale granulare tramite forze idrodinamiche di taglio generate da onde, correnti e la loro combinazione, in prossimità di strutture o irregolarità. Il risultato provoca un parziale o totale fallimento delle capacità portanti dell'intera opera, o parte di essa.

Il processo inizia nel momento in cui le forze di taglio idrodinamiche al fondale risultano grandi abbastanza da creare trasporto di sedimenti. Principalmente, tramite ricerche e esperimenti in ambito scientifico, si è dimostrato che lo scalzamento è presente in testata e lungo il tronco del pennello, risultando in conformazioni sabbiose diverse a seconda della posizione considerata.

Strutture marine, emergenti oppure soffolte, causano un cambiamento delle correnti in loco, creando uno o più delle seguenti situazioni dinamiche:

- Deviazione o contrazione del flusso di fluido quando lo stesso passa attraverso i blocchi della mantellata;
- Creazione di vortici cosiddetti “a ferro di cavallo” o “di ritorno” quando l'onda infrange la struttura;
- Creazione di correnti stazionarie nella colonna d'acqua di fronte la struttura quando le onde incidenti e quelle riflesse sulla mantellata si incontrano;
- Generazione di turbolenza di interazione tra fluido e massa di mantellata;
- Nascita di fenomeni di diffrazione, riflessione, shoaling e frangimento di onde in nuove zone;
- Cambio di profondità di fondale e di dinamiche litorali di marea;
- Cambi nelle distribuzioni di pressione sul fondale marino, con conseguente modifica del flusso di fluido tra lo stesso e la massa d'acqua.

L'evento di fallimento in esame avviene a causa dell'erosione di materiale sabbioso alla base della struttura con conseguente crollo degli elementi di mantellata o di fondazione nell'apertura creatasi. Tale erosione, più o meno marcata, è funzione di processi temporali a lungo termine come correnti e/o condizioni marittime stazionarie. Le onde prodotte da mareggiate producono grandi quantità di flusso di sedimenti e quindi sostanziosi cedimenti di elementi strutturali. Tuttavia, la conca creata dall'evento estremo viene colmata automaticamente da fenomeni deposizionali in condizioni di mare ordinarie. Un successivo evento estremo non creerà danni se il fenomeno erosivo precedente non viene superato. (5)

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ</b>	<b>10</b>

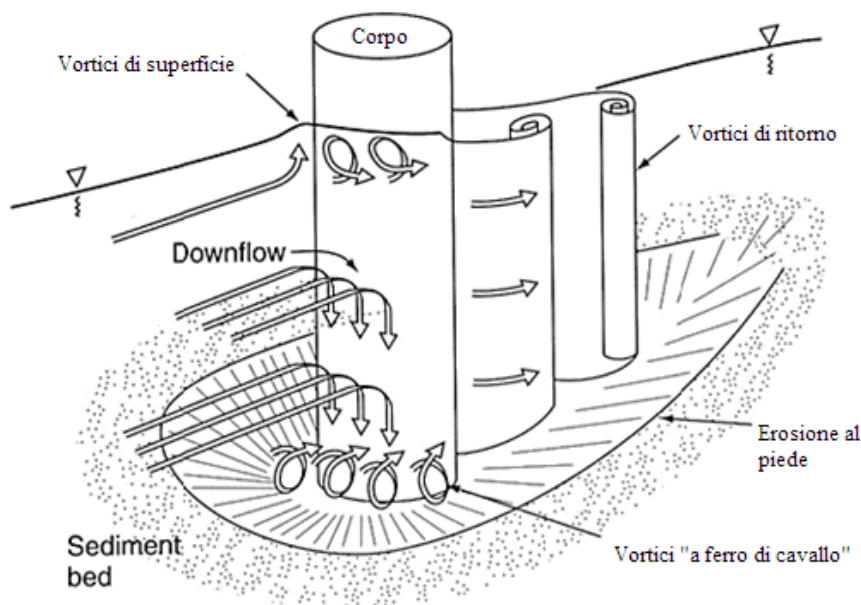


Figura 3 - Classificazione vortici in prossimità di un corpo esterno

Lo studio qui illustrato ha lo scopo di determinare qualitativamente e poi quantitativamente la presenza di scouring nelle due zone di tronco e di testata del pennello.

#### 2.4.1. ANALISI QUALITATIVA

Tale analisi ha l'obiettivo di determinare se eventualmente le condizioni agenti nei punti più soggetti allo scalzamento sono sufficienti all'attivazione dell'erosione del fondale. L'iniziazione dello scouring si ha in base a tre criteri di verifica:

- a) "Amplification factor": i cambi di direzione del flusso di fluido, aumentano le gli stress di taglio sul fondale in prossimità del pennello. Il grado di turbolenza e della velocità della corrente regolano il trasporto dei sedimenti in sospensione e/o meno. L'aumento di azione tagliente viene espressa con l'"amplification factor"  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau_{\infty}}$$

dove:

$\tau$  = aumento di stress di taglio al fondale in prossimità della struttura

$$\tau = \tau_{bc} + \tau_{bw}$$

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	11

$\tau_{\infty}$  = stress di taglio in condizioni normali, ovvero in assenza dell'opera e di flusso indisturbato;

$$\tau_{\infty} = \tau_{bc\infty} + \tau_{bw\infty}$$

$\tau_{bc}$  = azione di taglio dovuta alla sola componente delle correnti;

$$\tau_{bc} = \frac{\rho_w f_c}{8} (u')^2$$

$$\tau_{bc\infty} = \frac{\rho_w f_c}{8} (u'_{\infty})^2$$

$\tau_{bw}$  = azione di taglio dovuta alla componente onde;

$$\tau_{bw} = \frac{1}{4} \rho_w f_w (U_m)^2$$

$$\tau_{bw\infty} = \frac{1}{4} \rho_w f_w (U_{m\infty})^2$$

$u'$  = velocità di corrente media. Per tale valore si è considerato un modello di pressioni lineare e costante, in modo da ottenere una valutazione più conservativa; i dati per la condizione indisturbata sono stati raccolti dallo studio modellistico in allegato, i valori sono tabellati in Tabella 6;

$U_m$  = massima velocità orbitale al fondale

$$\frac{U_m}{a} = \frac{\omega}{\sinh kh}$$

$a$  = ampiezza d'onda

$\omega$  = frequenza circolare d'onda

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$k$  = numero d'onda

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$\rho_w$  = densità del fluido ( $\rho_w = 1040 \text{ kg/m}^3$ )

	<b>u'_inf</b>		<b>Um_inf</b>		<b>u'</b>	
	<b>TRONCO</b>	<b>TESTATA</b>	<b>TRONCO</b>	<b>TESTATA</b>	<b>TRONCO</b>	<b>TESTATA</b>
<b>Bora_ord</b>	0.50	0.50	2.20	1.63	0.60	0.70
<b>Bora_ext</b>	0.80	0.80	2.21	1.64	1.20	1.10
<b>Scirocco_ord</b>	0.50	0.50	2.08	1.53	0.80	0.40
<b>Scirocco_ext</b>	0.50	0.50	2.24	1.66	0.40	0.60

Tabella 6 - Valori velocità in esame

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ</b>	<b>12</b>

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

$f_i$  = fattore di frizione relativo alla corrente o alle onde, di cui  
( $i = w, c$ ):

$$f_c = 0.12 \left( \frac{h}{k_s} \right)^{0.33}$$

$$f_w = 0.3 \left( \frac{A}{k_s} \right)^{-0.6}$$

$k_s$  = scabrosità effettiva del fondale

$$k_s = 1.5 * d_{n50}$$

$A$  = ampiezza d'orbita dell'onda in prossimità del fondale

$$A = \frac{H (\sinh k(z + h))}{2 \sinh kh}$$

$d_{n50}$  = diametro corrispondente al 50% del passante della sabbia di fondale.

Si noti che per il calcolo delle componenti di taglio in condizioni di flusso indisturbato, si fa utilizzo delle formulazioni, con la differenza che i valori delle velocità considerate sono da riferirsi alla condizione in loco. La velocità orbitale al fondale è stata considerata, con buona approssimazione, costante per entrambe le situazioni, in quanto le differenze di altezza d'onda nelle due situazioni non misurano sostanziali discrepanze. Gli stress di taglio sono direttamente proporzionali alle velocità di corrente nei punti considerati. Tramite la modellazione eseguita sul software MIKE-21 HD, vengono considerati i due punti con velocità maggiore per entrambe le condizioni ordinarie e straordinarie di progetto. Precisamente si farà riferimento ai punti illustrati in Figura 4.

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	13

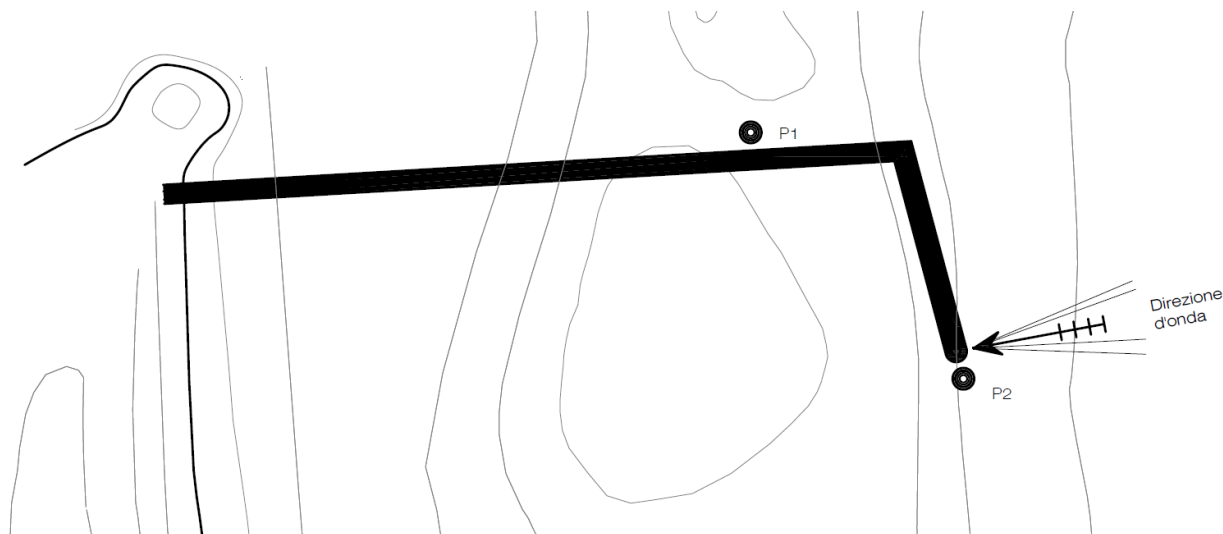


Figura 4 - Punti con più alta velocità di corrente per le condizioni ondose di progetto. Sono evidenziati i punti soggetti a velocità di corrente più elevata P1 e P2

L'erosione avviene quando le azioni risultanti dovute alla presenza della struttura sono più gravose rispetto a quelle originarie, quando cioè  $\alpha > 1.0$ ; altrimenti sarà presente un'attività di deposizione. I risultati di tale analisi sono illustrati da Tabella 7 a Tabella 10.

- b) “Shield parameter”: questo è il criterio di analisi più importante nella classificazione del movimento e trasporto dei sedimenti in ambito marino, oltre che nella determinazione delle estensioni geometriche del fenomeno in prossimità dei blocchi della struttura. Come per l'amplification factor, anche in questo metodo si confrontano le condizioni originarie del luogo rispetto a quelle create con la presenza del pennello. Il parametro di Shield nella condizione non-disturbata è:

$$\theta = \frac{f_w}{2} \frac{U_m^2}{(\rho_s - \rho_w) d_{n50}}$$

dove:

$U_m$  = massima velocità orbitale al fondale

$$\frac{U_m}{a} = \frac{\omega}{\sinh kh}$$

$a$  = ampiezza d'onda

$\omega$  = frequenza circolare d'onda

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	14

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

$k$  = numero d'onda

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$\rho_s$  = densità della sabbia ( $\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3$ )

Il parametro critico di Shield  $\theta_{cr}$ , viene determinato graficamente tramite il grafico che lo mette in relazione con il parametro di Reynolds, indicatore di turbolenza in un fluido. Tramite prove sperimentali si è dimostrato che il parametro di Shield è costante per flussi turbolenti e che tale approssimazione è valida anche per flussi quasi turbolenti. Il valore dello Shield parameter per tali condizioni varia tra 0.03 e 0.06, si è assunto pertanto un valore di 0.04. Si riporta Reynolds:

$$Re = \frac{U_m d_{n50}}{\nu}$$

dove:

$\nu$  =  $1.05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ; viscosità cinematica del fluido.

I risultati di tale analisi sono illustrati da Tabella 7 a Tabella 10.

- c) Keulegan-Carpenter number: il numero di Keulegan-Carpenter è un parametro utilizzato per determinare la nascita di vortici “a ferro di cavallo” e “di ritorno” principalmente nella zona in testata di dighe a scogliera, quindi la sua valutazione viene rimandata all'analisi quantitativa dello scalzamento al piede in zona testata. Per lo studio, utilizzando la teoria lineare delle onde, il suo valore viene determinato come segue:

$$KC = \frac{U_m T}{B}$$

dove:

$B$  = diametro della sezione di testata al fondale

Il processo di erosione e di movimento del sedimento dovuto all'azione di onde e/o correnti può avvenire tramite semplice traslazione sul fondo oppure in sospensione. Generalmente, le particelle vengono trasportate fino ad una posizione di equilibrio dinamico in cui  $\alpha < 1.0$  e  $\theta < \theta_{cr}$ . Si dimostra che nella situazione analizzata, le particelle non verranno trasportate in sospensione idraulica, infatti la condizione di sospensione in liquido sarà presente finché la seguente relazione è rispettata:

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	15

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

$$\frac{v_f}{U_m} < 1.0$$

dove:

$v_f$  = velocità di caduta di una particella nel fluido considerato (6)

$$v_f = \left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d_{n50}^3 \nu^2 \right] = 13.67 \text{ m/s}$$

$d_{n50}$  = 0.10 mm; diametro corrispondente al 50% del passante della sabbia di fondale.

Introdotta quanto sopra, si riportano i risultati di calcolo da Tabella 7 a Tabella 10.

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ</b>	<b>16</b>





COMUNE DI RAVENNA

REGIONE EMILIA  
ROMAGNADIPARTIMENTO  
BIGEASEZIONE GEOLOGIAENTE PER I PARCHI E LA  
BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO

BORA condizione ORDINARIA			
SCOURING? SI		SCOURING? SI	
TRONCO		TESTATA	
P1 di erosione h=2.25		P2 di erosione h=3	
amplification factor	EROSION	amplification factor	EROSION
a=(tau/tau_inf)	1,43	a=(tau/tau_inf)	1,95
$\tau$	1,35	$\tau$	1,99
$\tau_{inf}$	0,94	$\tau_{inf}$	1,02
$\tau_{bc\_inf}$	0,92	$\tau_{bc\_inf}$	1,01
$\tau_{bw\_inf}$	0,026	$\tau_{bw\_inf}$	0,014
$\tau_{bc}$	1,32	$\tau_{bc}$	1,98
$\tau_{bw}$	0,026	$\tau_{bw}$	0,014
u'	0,60	u'	0,70
u'_inf	0,50	u'_inf	0,50
fc	2,87	fc	3,15
fw	0,0021	fw	0,0020
A	0,60	A	0,64
dn50	0,00010	dn50	0,00010
ks	0,000150	ks	0,000150
h	2,25	h	3,00
Uw	2,20	Uw	1,63
Shield's factor EROSION		Shield's factor EROSION	
$\theta$	1,07	$\theta$	0,90
$\theta_{crit}$	0,04	$\theta_{crit}$	0,04
Re	28,90	Re	30,09
v	1,05E-06	v	1,05E-06
dn50	0,00010	dn50	0,00010
Uf	0,30	Uf	0,32
$\tau_{inf}$	0,94	$\tau_{inf}$	1,02

Tabella 7 - Scouring per la condizione di progetto Bora Ordinaria

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	17



COMUNE DI RAVENNA

REGIONE EMILIA  
ROMAGNADIPARTIMENTO  
BIGEASEZIONE GEOLOGIAENTE PER I PARCHI E LA  
BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO

BORA condizione STRAORDINARIA			
SCOURING?	SI	SCOURING?	SI
TRONCO		TESTATA	
P1 di erosione h=2.25		P2 di erosione h=3	
amplification factor	EROSION	amplification factor	EROSION
a=(tau/tau_inf)	2,24	a=(tau/tau_inf)	1,89
$\tau$	5,31	$\tau$	4,90
$\tau_{inf}$	2,37	$\tau_{inf}$	2,60
$\tau_{bc\_inf}$	2,35	$\tau_{bc\_inf}$	2,58
$\tau_{bw\_inf}$	0,023	$\tau_{bw\_inf}$	0,012
$\tau_{bc}$	5,29	$\tau_{bc}$	4,89
$\tau_{bw}$	0,023	$\tau_{bw}$	0,012
u'	1,20	u'	1,10
u'_inf	0,80	u'_inf	0,80
fc	2,87	fc	3,15
fw	0,0019	fw	0,0018
A	0,72	A	0,77
dn50	0,00010	dn50	0,00010
ks	0,000150	ks	0,000150
h	2,25	h	3,00
Uw	2,21	Uw	1,64
Shield's factor		Shield's factor	
EROSION		EROSION	
$\theta$	0,96	$\theta$	1,27
$\theta_{crit}$	0,04	$\theta_{crit}$	0,04
Re	45,83	Re	47,93
$\nu$	1,05E-06	$\nu$	1,05E-06
dn50	0,00010	dn50	0,00010
Uf	0,48	Uf	0,50
$\tau_{inf}$	2,37	$\tau_{inf}$	2,60

Tabella 8 - Scouring per la condizione di progetto Bora Straordinaria

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	18

SCIROCCO condizione ORDINARIA					
SCOURING?			SCOURING?		NO
TRONCO			TESTATA		
P1 di erosione h=2.25			P2 di erosione h=3		
amplification factor	EROSION		amplification factor	DEPOSITION	
a=(tau/tau_inf)	2,56	a=(tau/tau_inf)	0,64		
τ	2,35	τ	0,65		
τ_inf	0,92	τ_inf	1,01		
τ_bc_inf	0,92	τ_bc_inf	1,01		
τ_bw_inf	0,003	τ_bw_inf	0,002		
τ_bc	2,35	τ_bc	0,65		
τ_bw	0,003	τ_bw	0,002		
u'	0,80	u'	0,40		
u'_inf	0,50	u'_inf	0,50		
fc	2,87	fc	3,15		
fw	0,00025	fw	0,00025		
A	0,68	A	0,73		
dn50	0,00010	dn50	0,00010		
ks	0,000150	ks	0,000150		
h	2,25	h	3,00		
Uw	2,08	Uw	1,53		
Shield's factor		EROSION			
θ	0,12	θ	0,20		
θ_crit	0,04	θ_crit	0,04		
Re	28,55	Re	29,91		
v	1,05E-06	v	1,05E-06		
dn50	0,00010	dn50	0,00010		
Uf	0,30	Uf	0,31		
τ_inf	0,92	τ_inf	1,01		

Tabella 9 - Scouring per la condizione di progetto Scirocco Ordinaria



COMUNE DI RAVENNA

REGIONE EMILIA  
ROMAGNADIPARTIMENTO  
BIGEASEZIONE GEOLOGIAENTE PER I PARCHI E LA  
BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO

SCIROCCO condizione STRAODINARIA			
SCOURING? NO		SCOURING? SI	
TRONCO		TESTATA	
P1 di erosione h=2.25		P2 di erosione h=3	
amplification factor DEPOSITION		amplification factor	EROSION
a=(tau/tau_inf)	0,65	a=(tau/tau_inf)	1,43
$\tau$	0,61	$\tau$	1,47
$\tau_{inf}$	0,94	$\tau_{inf}$	1,02
$\tau_{bc\_inf}$	0,92	$\tau_{bc\_inf}$	1,01
$\tau_{bw\_inf}$	0,024	$\tau_{bw\_inf}$	0,012
$\tau_{bc}$	0,59	$\tau_{bc}$	1,45
$\tau_{bw}$	0,024	$\tau_{bw}$	0,012
u'	0,40	u'	0,60
u'_inf	0,50	u'_inf	0,50
fc	2,87	fc	3,15
fw	0,0018	fw	0,0018
A	0,73	A	0,78
dn50	0,00010	dn50	0,00010
ks	0,000150	ks	0,000150
h	2,25	h	3,00
Uw	2,24	Uw	1,66
Shield's factor EROSION		Shield's factor	EROSION
$\theta$	0,97	$\theta$	0,36
$\theta_{crit}$	0,04	$\theta_{crit}$	0,04
Re	28,87	Re	30,07
v	1,05E-06	v	1,05E-06
dn50	0,00010	dn50	0,00010
Uf	0,30	Uf	0,32
$\tau_{inf}$	0,94	$\tau_{inf}$	1,02

Tabella 10 - Scouring per la condizione di progetto Scirocco Straordinaria

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	20

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

#### 2.4.2. ANALISI QUANTITATIVA AL TRONCO

Come precedentemente illustrato, il fenomeno dello scalzamento al piede della struttura dovuto all'erosione del fondale, interessa principalmente due punti dell'opera: il primo posizionato lungo il tronco, il secondo interessa la testata. Dopo aver appurato che le forze agenti nel sistema sono sufficienti per innescare un cedimento dell'opera nel terreno, si procede con una quantificazione del fenomeno. Si specifica che tale analisi deriva da prove sperimentali eseguite su modelli fisici in scala, è quindi consigliato di verificare la loro validità in loco dopo la fase esecutiva per poter meglio comprendere i meccanismi creatosi.

Il punto analizzato, individuato come  $P_2$  in Figura 4, è ad una profondità di 2.5 m. Secondo *Sumer and Fredsøe* (2000) (7), per la sezione al tronco, la profondità di erosione  $S$  è in funzione dell'angolo della scarpata della mantellata rispetto l'orizzontale, dell'altezza e la lunghezza d'onda incidente e la profondità del punto considerato, nella formulazione seguente:

$$\frac{S}{H} = \frac{f(\alpha)}{\left[ \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \right]^{1.35}}$$

dove:

$S$  = profondità di scouring;

$f(\alpha) = 0.3 - 1.77 \exp\left(-\frac{\alpha}{15}\right) = 0.11$

$\alpha = 0.59 \text{ rad}$ ; angolo della scarpata

Bora_ORD		Bora_EXT		Scirocco_ORD		Scirocco_EXT	
h	2,25	h	2,25	h	2,25	h	2,25
f(a)	0,11	f(a)	0,11	f(a)	0,11	f(a)	0,11
S	0,75	S	1,02	S	0,79	S	0,96

Seguendo, invece, le direttive secondo *Sumer, Fredsøe, Zanuttigh and Lamberti* (2015) (8), l'erosione al tronco per una scogliera sommersa risulta avere lo stesso comportamento analitico di quello per una scogliera emersa, ovvero in funzione della sola altezza d'onda. La formulazione ricavata dallo studio sperimentale risulta essere:

$$\frac{S}{H} \approx 0.37$$

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	21

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

Bora_ORD	Bora_EXT	Scirocco_ORD	Scirocco_EXT
S 0,31	S 0,37	S 0,35	S 0,38

#### 2.4.3. ANALISI QUANTITATIVA IN TESTATA

I meccanismi di trasporto di sedimenti in prossimità della testata sono identificati come:

- a) Erosione indotta da correnti stazionarie, i cui effetti sono visibili sul fronte della testata che viene colpito dal flusso di fluido.

Secondo il *Coastal Engineering Manual, Part VI, equazione (VI-5-262)*, questo è espresso in funzione del numero Keulegan-Carpenter (KC) e del diametro della testata al fondale. Il parametro KC viene determinato considerando, esclusivamente per questo caso, considerando un'altezza d'onda pari a  $H = H_s/\sqrt{2}$ . Nella formula seguente, il parametro  $C_u$  rappresenta il fattore di incertezza e assume una media unitaria con deviazione standard pari a 0,2.

$$\frac{S_m}{B} = 0.04C_u[1 - e^{-4(KC-0.05)}]$$

Bora_ORD	Bora_EXT	Scirocco_ORD	Scirocco_EXT
Um 0,96	Uw 1,16	Uw 1,08	Uw 1,17
a 0,55	a 0,66	a 0,62	a 0,67
Tp 7,78	Tp 8,55	Tp 7,40	Tp 8,09
Tn 0,55	Tn 0,55	Tn 0,55	Tn 0,55
KC 0,32	KC 0,43	KC 0,35	KC 0,41
B 23,00	B 23,00	B 23,00	B 23,00
Cu_max 1,20	Cu_max 1,20	Cu_max 1,20	Cu_max 1,20
Cu_min 0,80	Cu_min 0,80	Cu_min 0,80	Cu_min 0,80
S_max 0,74	S_max 0,86	S_max 0,77	S_max 0,84
S_min 0,49	S_min 0,58	S_min 0,51	S_min 0,56

Lo studio svolto da *Sumer, Fredsøe, Zanuttigh e Lamberti (2015)* (8) definisce degli intervalli di profondità raggiungibile in funzione del rapporto tra l'elevazione della scogliera e l'altezza d'onda, del parametro KC e del diametro della testata. Come illustrato in Figura 5, il caso in esame rientra nella zona in cui il rapporto  $S/B$  è

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	22

compreso tra i valori 0,02 e 0,04. Tale studio permette di avere una stima della lunghezza di scouring che si otterrà sul fondale, determinabile graficamente tramite il grafico illustrato in Figura 6. Il caso studio rientra nell'intervallo  $L_y/B$  tra i valori 0,80 e 1,30.

Bora_ORD		Bora_EXT		Scirocco_ORD		Scirocco_EXT	
KC	0,32	KC	0,43	KC	0,35	KC	0,41
S_min	0,46	S_min	0,46	S_min	0,46	S_min	0,01
S_max	0,92	S_max	0,92	S_max	0,92	S_max	0,02
Ly_min	18,40	Ly_min	18,40	Ly_min	18,40	Ly_min	0,33
Ly_max	29,90	Ly_max	29,90	Ly_max	29,90	Ly_max	0,54

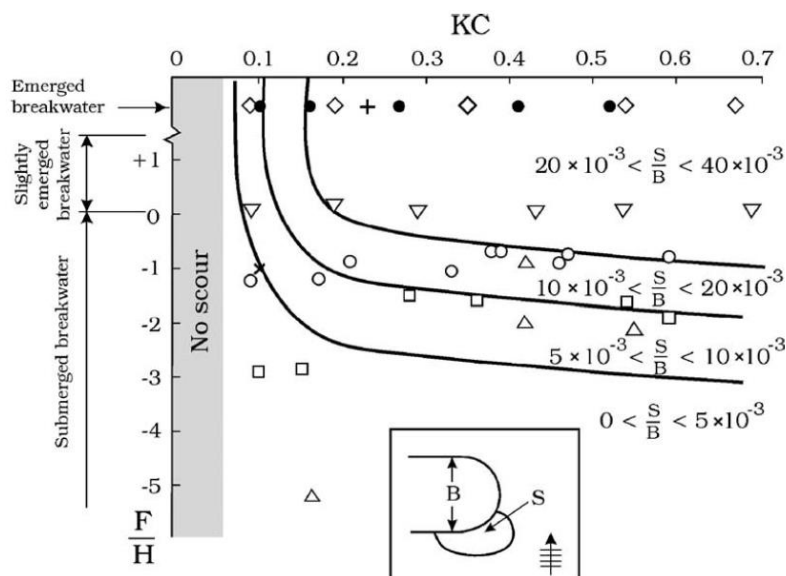


Figura 5 - Massima profondità di erosione indotta da correnti in funzione di KC e  $F/H$



COMUNE DI RAVENNA



REGIONE EMILIA  
ROMAGNA



DIPARTIMENTO  
BIGEASEZIONE GEOLOGIA



ENTE PER I PARCHI E LA  
BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO

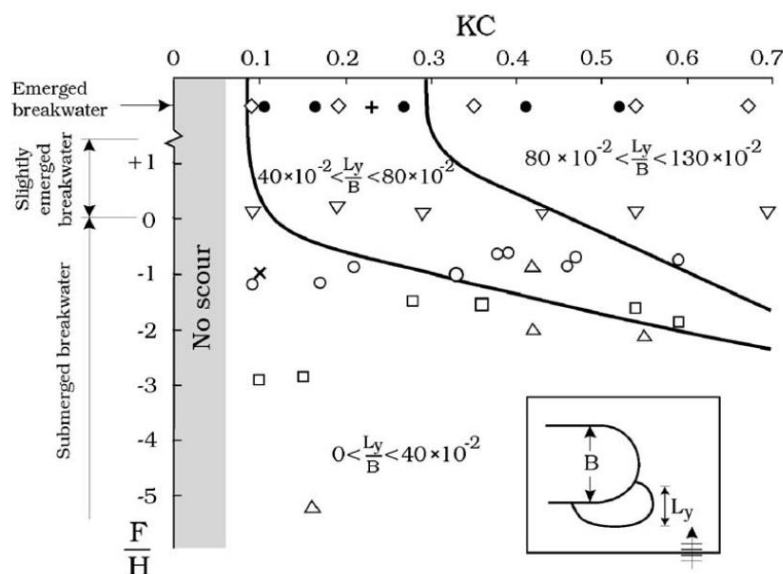


Figura 6 - Estensione sul fondale dell'erosione indotta da correnti in funzione di KC e F/H

- b) Erosione indotta dall'infrangersi delle onde che agisce sul lato opposto dell'elemento a causa della rottura del fronte d'onda lungo il profilo a tronco di cono della mantellata e conseguente rilascio di energia che impatta sul sedimento sabbioso.

Secondo il *Coastal Engineering Manual, Part VI, equazione (VI-5-264)*, la profondità creata dipende dall'altezza d'onda significativa e da un parametro di frangimento espresso come  $(T_w \sqrt{gH})/h$  in cui il numeratore indica la quantità d'acqua marina che infrange il pelo libero di fluido dal lato opposto della testata; al denominatore il valore  $h$  indica l'altezza che l'onda deve penetrare per giungere sul fondale.

$$\frac{S_m}{H_s} = 0.01 C_u \left( \frac{T_p \sqrt{gH_s}}{h} \right)^{\frac{3}{2}}$$

dove:

$C_u$  = fattore di incertezza con valore medio unitario e deviazione standard pari a 0.34.

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	24





COMUNE DI RAVENNA



REGIONE EMILIA  
ROMAGNA



DIPARTIMENTO  
BIGEASEZIONE GEOLOGIA



ENTE PER I PARCHI E LA  
BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO

Bora_ORD		Bora_EXT		Scirocco_ORD		Scirocco_EXT	
C2 max	1,34	C2 max	1,34	C2 max	1,34	C2 max	1,34
C2 min.	0,66	C2 min.	0,66	C2 min.	0,66	C2 min.	0,66
h	3,00	h	3,00	h	3,00	h	3,00
Hs	1,55	Hs	1,86	Hs	1,76	Hs	1,89
S_max	0,67	S_max	1,06	S_max	0,77	S_max	1,00
S_min	0,33	S_min	0,52	S_min	0,38	S_min	0,49

Lo studio svolto da *Sumer, Fredsøe, Zanuttigh e Lamberti* (2015) (8) individua delle fasce di valori, sia per la profondità massima raggiunta che per l'ampiezza del fenomeno in planimetria, in funzione del parametro di frangimento e di  $F/H$ , come riportato in Figura 7 e Figura 8.

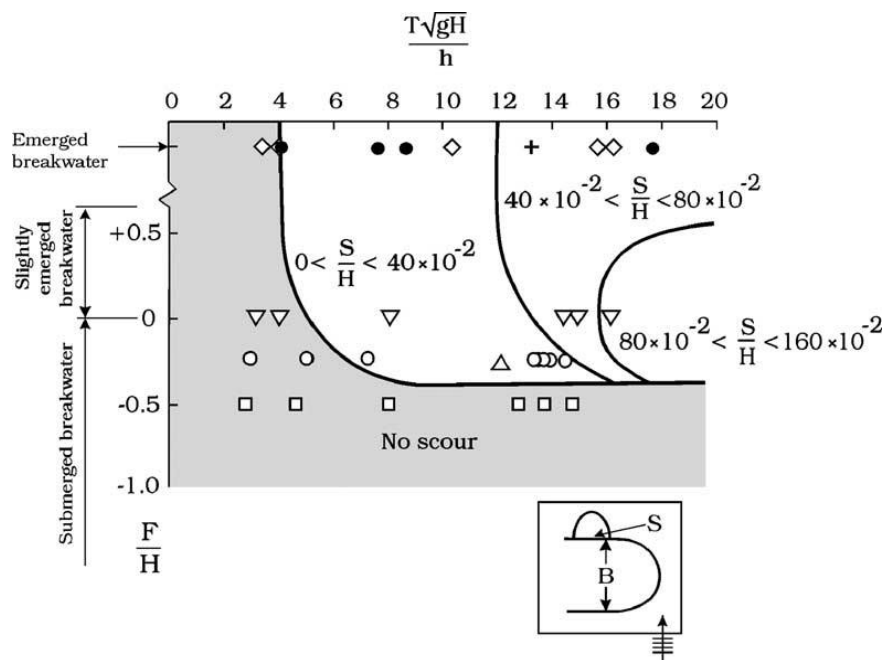


Figura 7 - Massima profondità di erosione dovuta al frangimento d'onda

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	25

Bora_ORD		Bora_EXT		Scirocco_ORD		Scirocco_EXT	
$T(\sqrt{gH})/h$	10,1	$T(\sqrt{gH})/h$	12,1	$T(\sqrt{gH})/h$	10,2	$T(\sqrt{gH})/h$	11,6
H	1,55	H	1,86	H	1,76	H	1,89
S_max	0,62	S_max	0,74	S_max	0,70	S_max	0,76
L_y	5,65	L_y	6,58	L_y	6,28	L_y	6,67

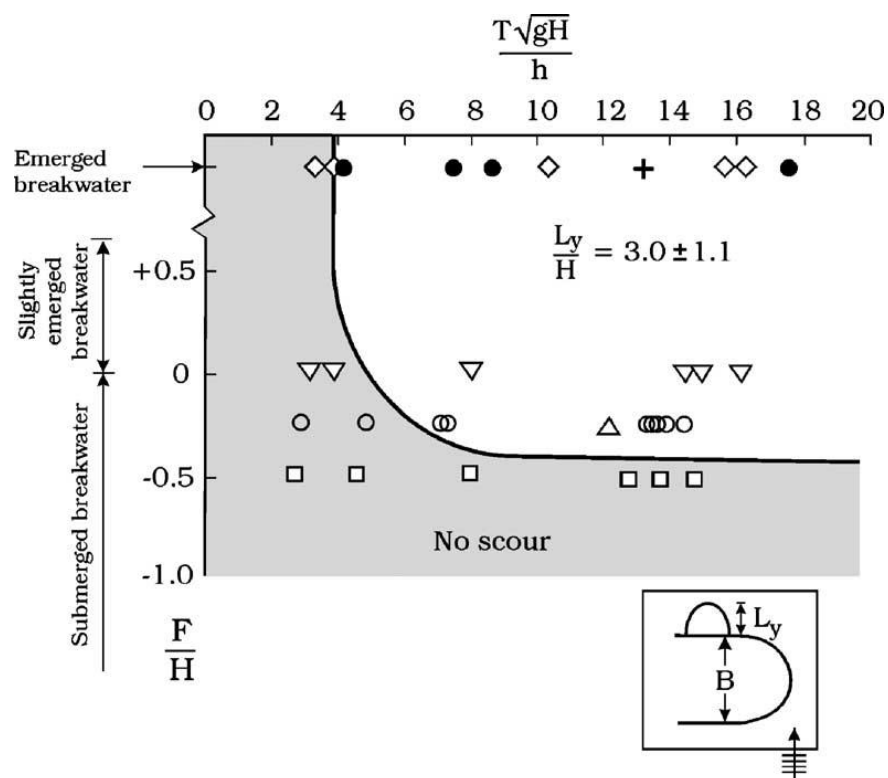


Figura 8 - Massima estensione di erosione dovuta al frangimento d'onda

Come evidenziato negli stessi studi di ricerca riportati, queste equazioni sono state sviluppate per scogliere impermeabili e con superfici lisce. La permeabilità e la scabrezza delle dighe a scogliera diminuisce gli effetti meccanici in gioco durante tale processo. I valori sopra riportati di profondità e estensione di erosione sono pertanto da considerarsi come un limite massimo conservativo necessario ad avere una piena visione della condizione più gravosa che si potrà verificare in presenza della nuova opera.

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

Alla base di ciò, si assume un valore medio di profondità di erosione pari a 0,60 m sia per la zona del tronco del pennello – in cui si ottiene un valore medio di 0,62 m – che per la sezione di testata – con profondità media determinata pari a 0,59 m e 0,67 m per i due meccanismi analizzati.

## 2.5. VERIFICA PROTEZIONE DEL PIEDE

Avendo constatato la presenza del fenomeno di erosione e quindi della probabilità di un fallimento strutturale ingente, si prevede la stesura in aggiunta di uno strato di massi di I cat. alla base dell'opera in modo da contrastare lo slittamento di massi di mantellata nella zona erosa. Tale scelta di materiale deriva dalla necessità di voler creare una maggiore continuità strutturale con lo strato di filtro e quindi evitare la presenza di discontinuità di massi, oltre che a rendere più semplici ed economiche le fasi costruttive in fase di esecutivo.

La scelta progettuale citata non ricade in nessuna categoria di soluzione strutturale trattata da normative o letteratura scientifica. Pertanto, si è proceduto con la verifica considerando l'elemento di protezione coincidente con la classificazione di:

- a) “*stone blanket*”: elemento costituito da uno strato posizionato alla rinfusa di rocce con diametro omogeneo e utilizzato come protezione in aree suscettibili all'erosione dovuta a forti correnti di fluido. La progettazione di tale elemento si basa sulla selezione delle dimensioni delle rocce tale per cui gli stress di taglio richiesti per un loro spostamento siano maggiori di quelli sviluppati dalle correnti e presenti sul fondale di applicazione.

Seguendo quanto indicato nel *Coastal Engineering Manual – Part VI* (9), l'individuazione del diametro di roccia necessario a resistere alla corrente agente risponde alla seguente formulazione:

$$\frac{d_{30}}{h} = S_f C_s \left[ \left( \frac{w_w}{w_a - w_w} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\bar{u}}{\sqrt{K_1 g h}} \right) \right]^{\frac{5}{2}}$$

dove:

$d_{30}$  = diametro corrispondente al 30% del passante in analisi granulometrica del materiale;

$S_f$  = 1.1; fattore di sicurezza;

$C_s$  = 0.30; coefficiente di stabilità durante il moto;

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	27

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

$w_w$  =  $\rho_w g$ ; peso specifico dell'acqua marina;

$w_a$  =  $\rho_a g$ ; peso specifico dell'elemento di armatura;

$\bar{u}$  = velocità media di corrente considerata, (assunta pari alla velocità di corrente in presenza del pennello in 2.4.1);

$K_1$  = fattore che tiene in considerazione l'inclinazione del fondale e dell'angolo di risposta degli elementi;

$$K_1 = \sqrt{1 - \left( \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi} \right)}$$

$\theta$  =  $3^\circ$ ; massimo angolo di pendenza del fondale registrato;

$\phi$  =  $40^\circ$ ; angolo di risposta degli elementi;

Avendo determinato il  $d_{30}$ , si procede con la determinazione del diametro equivalente  $d_{50}$  in base alla legge:

$$d_{50,min} = \left( \frac{1.7M_{30}}{\rho_a} \right)^{\frac{1}{3}}$$

I risultati sono illustrati in Tabella 11.

- b) “Toe” o berma al piede: costituito da rocce di cava, la sua funzione principale è quella di dare supporto allo strato principale della mantellata e di prevenire i danni risultanti da erosione. Il principio di stabilità si basa sul fatto che i massi che garantiscono una solidità strutturale della scogliera, si poggino su di esso, aumentando così la stabilità globale.

Per tale verifica si fa riferimento alla legge di Van der Meer per la stabilità di berme in due strati di rocce naturali al piede di scogliere a gettata. Data la scelta progettuale di considerare un unico strato di materiale di prolungamento allo strato di massi in I cat., si specifica che la validità di tale verifica è necessaria a determinare l'ordine di grandezza necessario per garantire una determinata stabilità strutturale locale. La formula è espressa come segue:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left( 0.24 \frac{h_b}{D_{n50}} + 1.6 \right) N_{od}^{0.15}$$

dove:

$h_b$  = profondità alla cresta della berma al piede;

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	28

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

$N_{od} = 2.0$ , danno alla protezione accettabile; numero di elementi in moto in un'area con larghezza pari a 3-5 massi.

La soluzione è stata ricercata tramite un processo iterativo: avendo fissato un valore al parametro  $N_{od}$ , si è determinato il diametro  $D_{n50}$  tale per cui l'uguaglianza risultasse verificata. Successivamente si è determinato il numero di stabilità  $N_s$ . I risultati sono mostrati in Tabella 12.

	Bora_ORD		Bora_EXT		Scirocco_ORD		Scirocco_EXT	
	TRONCO	TESTATA	TRONCO	TESTATA	TRONCO	TESTATA	TRONCO	TESTATA
d50 [m]	0,0013	0,0018	0,0072	0,0054	0,0026	0,0004	0,0005	0,0012
W50 [kg]	5,24E-09	1,34E-08	9,49E-07	3,98E-07	4,54E-08	2,02E-10	2,51E-10	4,23E-09
W30 [kg]	3,08E-09	7,90E-09	5,58E-07	2,34E-07	2,67E-08	1,19E-10	1,47E-10	2,49E-09
d30 [m]	0,0028	0,0039	0,0161	0,0121	0,0058	0,0010	0,0010	0,0027
Sf	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Cs	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
w_w	10,25	10,25	10,25	10,25	10,25	10,25	10,25	10,25
w_a	24,53	24,53	24,53	24,53	24,53	24,53	24,53	24,53
u_bar	0,60	0,70	1,20	1,10	0,80	0,40	0,40	0,60
K1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
theta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
phi	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
h	2,25	3,00	2,25	3,00	2,25	3,00	2,25	3,00
							M_max	9.5E-07
							d50_max	0,007

Tabella 11 - Analisi dimensionale dello strato di protezione dall'erosione del fondale ("Stone Blanket")

	BORA ORD		BORA EXT		SCIRO ORD		SCIRO EXT	
Hs	1,55	1,55	1,86	1,86	1,76	1,76	1,89	1,89
Δ	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39
dn50	0,34	0,21	0,49	0,36	0,44	0,31	0,50	0,37
hb	-0,34	-0,21	-0,49	-0,36	-0,44	-0,31	-0,50	-0,37
Nod	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ns	3,27	5,35	2,74	3,76	2,87	4,10	2,70	3,67
							M_max	0,32
							d50_max	0,50

Tabella 12 - Analisi dimensionale dello strato di protezione dall'erosione del fondale ("Berma al piede")

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	29

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

Quanto sopra dimostra che il diametro scelto, pari a 0.45 m, per evitare il fallimento della struttura dovuto all'erosione del fondale è sufficiente a garantire in primis la stabilità dello stesso verso le correnti presenti e la stabilità dell'insieme mantellata-fondazione poi. L'estensione dello strato di protezione non deve garantire la copertura dell'intero processo erosivo, ma deve essere sufficiente a garantire che uno spostamento di massi non coinvolga gli strati superiori. In base all'esperienza nel settore e norme di progettazione dettate nello *Shore Protection Manual* (6), conducono ad una larghezza pari a 3 o 4 massi. Si assume quindi un'estensione pari a 1.35 m lungo il tronco e 1.80 m in sezione di testata, essendo una zona critica.

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ</b>	<b>30</b>

 COMUNE DI RAVENNA	 REGIONE EMILIA ROMAGNA	 DIPARTIMENTO BIGEASEZIONE GEOLOGIA	 ENTE PER I PARCHI E LA BIODIVERSITÀ – DELTA DEL PO
--	--	--	--

### 3. BIBLIOGRAFIA

1. **Masina, M. e Ciavola, P.** *Analisi dei livelli marini estremi e delle acque alte lungo il litorale ravennate*. s.l. : Studi Costieri, 2011. p. 87-101.
2. **Calabrese, L., Luciani, P. e Perini, L.** *Stato delle aree critiche del litorale della costa Emiliano-Romagnola*. 2012.
3. *Individuazione, mediante modellazione numerica e verifica di varie ipotesi di difesa, della soluzione progettuale ottimale per la protezione del tratto di litorale a nord di Lido di Dante*. **Archetti, R.** s.l. : DICAM - Università di Bologna, 2017.
4. **Milano, M.** *Idraulica marittima*. s.l. : Maggioli Editore, 2008.
5. *Subsidence phenomena of the coastal structures into offshore sandy seabed: a review*. **Khan-Mozahedy, A.B.M.** 7, s.l. : International Journal of Scientific & Engineering Research, 2015, Vol. 6.
6. **Engineeris, U.S. Army Corps of.** *Shore Protection Manual*. 1984.
7. *Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater*. **Sumer, B.M. and Fredsøe, J.** s.l. : Coastal Engineering, 2000.
8. *Local scour at roundhead and along the trunk of low crested structures*. **Sumer, B.M., et al., et al.** s.l. : Coastal Engineering, 2015.
9. **Engineers, U.S. Army Corps of.** *Coastal Engineering Manual*. s.l. : USACE, 2012.
10. **Tomasicchio, U.** *Manuale di Ingegneria portuale e costiera*. s.l. : Biblioteca Tecnica Hoepli, 2011.

Data	Intervento	Documento	Pagina
	-	VERIFICHE DI STABILITÀ	31