

**Comune di Venezia**

**Settore Legge Speciale**

**Ipotesi di interventi alle bocche con opere  
removibili e relative verifiche idrauliche**

A cura di:

Prof. M. De Santis  
Dipartimento IMAGE – Università di Padova

Dr. G. Umgiesser  
CNR ISMAR – Venezia

Ing. B. Matticchio  
Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l. – Padova

Dicembre 2003

# Indice

<b>1</b>	<b>DEFINIZIONE DEGLI INTERVENTI</b>	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b>Generalità</b>	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>Innalzamento dei fondali – parzializzazione delle bocche</b>	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Innalzamento dei fondali</b>	<b>4</b>
<b>1.4</b>	<b>Canal porto di Lido</b>	<b>4</b>
<b>1.5</b>	<b>Parzializzazione del canal Porto</b>	<b>5</b>
<b>1.6</b>	<b>Canal porto di Malamocco</b>	<b>6</b>
<b>1.7</b>	<b>Canal porto di Chioggia</b>	<b>6</b>
<b>1.8</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>VERIFICHE CON IL MODELLO LOCALE DELLE BOCHE</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Valutazione delle dissipazioni</b>	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>Valutazione del legame tra portata fluente e velocità massima</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>VERIFICHE CON IL MODELLO GENERALE DELLA LAGUNA</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Risultati modellistici</b>	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>Riduzioni delle punte di marea</b>	<b>13</b>
<b>3.3</b>	<b>Riduzione degli scambi mare-laguna</b>	<b>14</b>
<b>3.4</b>	<b>Velocità alle bocche di porto</b>	<b>15</b>
<b>3.5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>LISTA DELLE FIGURE</b>	<b>16</b>

## **1 Definizione degli interventi**

### **1.1 Generalità**

Il Comune di Venezia nell'azione di salvaguardia della Città e della sua Laguna, salvaguardia considerata nella sua globalità, recependo l'atto deliberativo del Consiglio Comunale del 1° aprile, subordinava – come è noto – il suo parere favorevole, al progetto esecutivo di regolazione dei flussi di marea con interventi mobili alle bocche di porto, all'esecuzione di undici punti tra cui:

- riportare le bocche alla loro morfologia naturale favorendo l'innalzamento dei fondali;
- realizzare interventi moderatori dei fenomeni mareali attraverso l'incremento delle resistenze al moto dell'onda nelle bocche di porto;
- possibilità di sperimentazione temporanea con strutture rimovibili;
- predisporre un progetto che tenda alla separazione delle esigenze della navigazione da quelle della salvaguardia in grado di mantenere l'agibilità portuale in qualsiasi condizione.

Lo scrivente, prof. Maurizio De Santis, cooptato come componente esterno del Comitato Tecnico Comunale per la Salvaguardia, metteva a disposizione della citata struttura la propria esperienza trentennale per la definizione ingegneristica di alcuni provvedimenti, enunciati nella già citata delibera. In particolare:

- l'innalzamento dei fondali;
- la realizzazione di strutture rimovibili atte a moderare i fenomeni mareali incrementando la resistenza nelle bocche dei canali-porto.

Infatti, le bocche di porto presentano fondali variabili da bocca a bocca, sia di origine naturale che antropica, che nel tempo hanno raggiunto valori impressionanti rispetto alle condizioni, anch'esse peraltro artificiali, presenti all'inizio del secolo scorso.

### **1.2 Innalzamento dei fondali – parzializzazione delle bocche**

L'innalzamento dei fondali alle bocche dei canali porto della Laguna di Venezia presenta problemi pratici di non facile soluzione.

Infatti in considerazione della tendenza all'aumento del pescaggio delle navi sia commerciali che turistiche una eccessiva riduzione dei fondali potrebbe penalizzare il settore con gravi ripercussioni nell'ambito occupazionale.

Poiché la quantità d'acqua che si riversa in laguna, con il prodursi dell'alta marea in mare, è proporzionale all'area della bocca interessata, non potendo, per i motivi già illustrati, innalzare entro certi limiti i fondali si è pensato di parzializzare le bocche di porto mediante strutture rimovibili nel rispetto della

sperimentabilità, reversibilità e gradualità così come richiesto dal voto del Consiglio Superiore dei LL.PP. n° 209/82 (Fig. 1).

Va da sé che un restringimento della sezione di una bocca a marea produce un aumento della velocità per cui si rende necessaria, nel caso della utilizzazione di un siffatto accorgimento, la stabilizzazione del fondale a monte e a valle dell'ostacolo.

Per il raggiungimento dello scopo prefissato, cioè la parzializzazione dei canali porti, si può pensare di utilizzare un complesso di manufatti costituiti da cassoni cellulari galleggianti in calcestruzzo armato affondati in sito mediante zavorramento con acqua; la flessibilità del sistema consiste nel fatto che detti cassoni possono essere facilmente allontanati dal sito mediante la rimessa in galleggiamento, allontanando con pompe l'acqua di zavorra, e che possono essere affiancati di testa per aumentare o ridurre la parzializzazione della bocca (Fig. 2 e Fig. 3).

A questo punto la stabilizzazione del fondale risulta avere una duplice funzione e cioè sia quella di piano orizzontale di posa dei cassoni, sia quella di rivestimento antiersivo nell'area antistante l'imboccatura realizzata con l'impiego dei cassoni che possono essere posizionati a piacere, formando così aperture di dimensioni variabili.

Infine può essere introdotto un ulteriore accorgimento, cioè quello di utilizzare nella stessa imboccatura innalzamenti di quota dei fondali differenziati e relativi alla realizzazione di un canale navigabile per le grandi navi ed un canale secondario utilizzabile da natanti di minore pescaggio; ciò a scopo di aumentare l'effetto dissipativo e ridurre in alcuni casi la quantità di materiale da dragare.

### *1.3 Innalzamento dei fondali*

Il semplice innalzamento dei fondali se è vero che tende ad aumentare la resistenza alle correnti di marea è altresì vero che penalizza la navigazione proprio nel momento in cui sia le navi commerciali che passeggeri tendono ad aumentare le relative pescagioni.

Quindi non solo al canal porto di Malamocco si devono garantire tiranti d'acqua minimi compatibili con l'attuale assetto di Porto Marghera ma anche a quello del Lido dove le navi da crociera di ultima generazione impongono l'adozione di fondali fino a pochi anni fa del tutto imprevedibili.

### *1.4 Canal porto di Lido*

Il canal porto di Lido presenta una larghezza media nel suo tratto rettilineo di circa 900,00 m; i fondali variano molto da un lato all'altro delle dighe, presentando bassi fondali in aderenza alla sponda nord che divengono rilevanti in aderenza a quella sud, in particolare la batimetria (-10,00) corre sensibilmente parallela alle dighe e centralmente alle stesse.

Entrando in laguna, il canale porto si apre in due rami formanti due canali, divisi dalla “ Velma del Bacan ”, e precisamente quello a nord “Canale di Tre Porti” con profondità  $-5,00 \div -6,00$  m e quello a sud avente nella sua parte centrale profondità di  $-10,00 \div -12,00$  m e oltre.

Ecco quindi che per rispettare le indicazioni comunali, quelle cioè di ridurre significativamente i fondali senza però penalizzare la navigazione crocieristica si è pensato di realizzare una struttura che permettesse di innalzare i fondali fino a quanto richiesto dalla sperimentazione e precisamente un setto longitudinale rasato a quota  $(-5,00)$  ed in grado di sostenere le spinte delle terre immerse avendo previsto di realizzare due subcanali uno a quota  $(-5,00)$  appunto e l'altro in grado di garantire la navigazione crocieristica portato a quota  $(-11,00)$  (Fig. 4÷Fig. 6).

In effetti un diaframma di cassoni costituiti da palancole metalliche infisso nel fondale fino alla quota caratterizzante il relativo lato del Porto Canale, può garantire la stabilità del complesso strutturale terra-diaframma e quindi parzializzare in senso longitudinale il Canal Porto di Lido in maniera da ridurre i fondali secondo le relative esigenze.

In definitiva il fondale del Canal Porto, in prossimità delle opere costituenti la parzializzazione della bocca, è previsto sia portato alla profondità di progetto mediante l'innalzamento con l'apporto di materiale sabbioso, sabbioso-ghiaioso di opportuna granulometria tale cioè da risultare stabile in presenza delle velocità di corrente conseguenti al restringimento in fase di sperimentazione.

La parte di fondale sottostante ai manufatti proposti e la fascia immediatamente a monte e a valle degli stessi sarà stabilizzata mediante la posa di materassi costituiti da georete riempita di materiale granulare di limitata pezzatura.

### 1.5 Parzializzazione del canal Porto

Dovendosi realizzare detti restringimenti come opere facilmente rimovibili, avuto riguardo anche alla loro sperimentabilità, cioè la possibilità di aumentare o ridurre la parzializzazione della bocca, la scelta è caduta – come già detto – sull'impiego di cassoni cellulare di calcestruzzo armato prefabbricati, portati in opera galleggianti, affondati mediante lo zavorramento di acqua; l'elasticità del sistema è dovuta al fatto che dette opere, vuotando le celle dall'acqua di zavorra, possono essere rimesse in galleggiamento e quindi allontanate in aree di stoccaggio preventivamente predisposte (Fig. 4÷Fig. 6).

Per rendere poi più facile il posizionamento di detti cassoni, aventi in pianta dimensioni di circa  $30,00 \times 15,00$  m ed altezza variabile a seconda della zona del loro impiego, cioè fondale di  $(-11,00)$  e  $(-5,00)$ , sono previsti inseriti nelle attuali dighe di contenimento dei canali porto dei cassoni, analoghi ai precedenti ma zavorrati in maniera tale da dare un adeguato punto di ancoraggio al resto della struttura.

Dal punto di vista dissipativo si sono sperimentate varie configurazioni geometriche; quella che realizzava un discreto abbassamento di marea, cioè circa  $10 \div 12$  cm, dava per contro velocità che al massimo potevano raggiungere i 3,0 m/s.

Per conseguire simili risultati dissipativi, è stata sperimentata una configurazione che prevede una doppia parzializzazione con l'adozione di due sbarramenti simili distanti tra loro circa 900,00 m.

Si è ottenuta, così, una riduzione della velocità massima che si è attestata intorno ai 2,0 m/s valore ritenuto compatibile con le esigenze di navigazione.

#### *1.6 Canal porto di Malamocco*

Per il canal porto di Malamocco è previsto un innalzamento generale dei fondali portati a (-12,00) rispetto al livello di riferimento medio mare I.G.M..

La metodologia di innalzamento dei fondali rispetta quella usata per il canal porto di Lido e cioè stabilizzazione ed innalzamento dei fondali con materiale di adeguata granulometria e rivestimento, con particolari materassi, di una fascia di canale a ridosso dei manufatti costituenti la parzializzazione della bocca stessa.

La parzializzazione in questo caso è stata ottenuta simulando un modello di riduzione della sezione all'interno del porto canale con un varco di  $240,00 \div 270,00$  m (Fig. 7÷Fig. 9).

In questo caso la velocità di corrente, nel suo momento di massima manifestazione, non ha superato il valore di 2,0 m/s compatibile quindi con la navigabilità in tutte le condizioni anche se la riduzione dei livelli in laguna non è risultata particolarmente efficace.

In definitiva, la geometria dell'intervento consiste nello sperimentare un rialzo dei fondali a quota (-12,00) su tutta la larghezza con l'inserimento dei già citati cassoni in maniera da delimitare un varco delle dimensioni sopra indicate.

#### *1.7 Canal porto di Chioggia*

Anche per la bocca di Chioggia è stato simulato un assetto geometrico simile a quello già utilizzato al Lido, con due quote diverse dei fondali ottenute con l'inserimento di un elemento di diaframma centrale subacqueo; si sono così realizzati due canali uno a quota pari a quella attuale (-7,00) e l'altro rialzato a quota (-6,00) (Fig. 10÷Fig. 12).

Il tutto ottenuto, anche in questo caso, con la stabilizzazione del fondo e la posa di cassoni in analogia a quanto già illustrato nelle precedenti descrizioni.

#### *1.8 Conclusioni*

Per concludere circa la tipologia degli interventi per simulare su modello matematico la capacità dissipativa degli stessi e segnatamente l'innalzamento

dei fondali ed il restringimento da adottare nelle bocche portuali, avuto anche riguardo al problema della navigazione, si sono testate diverse soluzioni verificandone le capacità dissipative, cioè la riduzione delle altezze di marea in laguna e controllando il campo di velocità di corrente a detti interventi direttamente collegati.

I valori così calcolati sono riportati nei paragrafi che seguono.

## **2 Verifiche con il modello locale delle bocche**

### **2.1 Valutazione delle dissipazioni**

Le configurazioni esaminate per le bocche di Lido, di Chioggia e di Malamocco sono rappresentate in Fig. 13 ÷ Fig. 17, in sovrapposizione ad una rappresentazione a scala di grigi della batimetria implementata nel modello e dedotta dai rilievi del 1990.

Gli interventi, illustrati per gli aspetti ingegneristici nei paragrafi precedenti, consistono, per tutte e tre le bocche, nella realizzazione di un complesso di manufatti galleggianti (cassoni cellulari) che dovranno essere affondati in sito mediante zavorramento con acqua, per ottenere il restringimento localizzato dei canali di bocca con la finalità di incrementare le resistenze idrauliche.

Fa parziale eccezione la configurazione 2 esaminata per la bocca di Malamocco, illustrata in Fig. 16. Essa riguarda, infatti, l'ipotesi di realizzare una partizione della bocca in due canali paralleli mediante l'inserimento di un setto longitudinale della lunghezza di circa 1000 m. L'ipotesi di intervento prevede, inoltre, il rialzo del fondale per tale tratto, portando la parte settentrionale del canale alla quota di -8.0 m e quella meridionale alla quota di -12.0 m.

Tale scenario corrisponde all'ipotesi di realizzare nella bocca di Malamocco una struttura di accesso permanente per le navi.

In tutti i casi esaminati, il calcolo è stato effettuato seguendo la stessa metodologia adottata dagli scriventi in alcune recenti indagini svolte per conto del Comune di Venezia finalizzate alla valutazione della "capacità dissipativa" delle bocche di porto della laguna di Venezia.

In particolare, per le simulazioni è stato impiegato il medesimo modello matematico bidimensionale ad elementi finiti che consente di descrivere la circolazione delle correnti di marea su bassi fondali ed in presenza di complesse geometrie dei contorni, tenendo conto degli effetti dei termini di inerzia convettivi e degli sforzi di Reynolds nel piano orizzontale.

E' stata utilizzata, inoltre, la medesima rappresentazione geometrica delle tre bocche lagunari, secondo la quale il dominio di calcolo si estende ad una porzione della laguna all'interno della bocca e comprende anche un tratto di mare antistante alla bocca stessa. All'interno della laguna, in particolare, la forma del contorno è stata scelta in modo da seguire approssimativamente le curve di egual livello di marea così come risultano da simulazioni effettuate con un modello che descrive la circolazione in tutta la laguna.

I reticoli di calcolo utilizzati sono rappresentati in Fig. 18 ÷ Fig. 19, e risultano composti da un elevato numero di elementi, ritenuto sufficiente per cogliere gli aspetti idrodinamici che interessano. In particolare, il dettaglio della schematizzazione è maggiore laddove sono presenti rapide variazioni delle quote dei fondali o in corrispondenza delle zone in cui sono previsti fenomeni di distacco della corrente con conseguente formazione di circolazioni vorticose.



Le quote del fondo assegnate agli elementi derivano dai rilievi batimetrici disponibili. In particolare, per le bocche e le aree di laguna adiacenti si è fatto uso dei rilievi batimetrici degli anni 1989 - 1993, messi a disposizione dal Consorzio Venezia Nuova, mentre per la porzione di mare antistante sono stati digitalizzati e interpolati i valori delle quote batimetriche riportati dalle carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina.

La taratura di ciascun modello locale è stata effettuata sulla base dei risultati forniti dal già citato modello generale della laguna. Si rimanda ai citati lavori precedenti per una descrizione di tale procedimento, ricordando solo che si è preferito assumere, per tutte e tre le bocche, uno stesso criterio di attribuzione dei coefficienti di resistenza, che nel modello sono rappresentati con il coefficiente della formula di Strickler. I risultati migliori (con differenze massime tra le portate calcolate con i due modelli, di circa il 5 %) sono stati ottenuti assumendo dovunque:  $K_s = 38 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ .

Si deve, peraltro, sottolineare, che la “taratura” del modello assume piena validità solo con riferimento alla simulazione della situazione attuale. Per quanto riguarda le situazioni di progetto, in cui il campo di moto è fortemente governato dai vincoli planimetrici imposti dalla geometria delle opere e dei fondali, e non è possibile disporre di dati sperimentali di confronto, la taratura non è, ovviamente, possibile. Ne consegue che i risultati dei calcoli devono essere considerati, nella sostanza, solo indicativi degli effetti delle opere previste. Una quantificazione più precisa degli effetti dissipativi delle opere potrebbe avvenire o predisponendo modelli fisici in scala adeguata o con sperimentazioni sul reale.

Con il modello sono state predisposte ed effettuate una serie di simulazioni a moto permanente, assegnando le seguenti condizioni al contorno: lungo il bordo del reticolo di calcolo interno alla laguna sono stati mantenuti livelli costanti pari a 0.0 m s.l.m., mentre lungo il bordo in mare sono stati imposti, per ogni simulazione, livelli diversi, sia positivi (simulazione di flusso) sia negativi (simulazioni di riflusso).

Per ogni simulazione, cioè per ogni valore del livello in mare, è stato valutato il valore della portata fluente.

Il legame risultante tra dislivello mare – laguna e portata, che risulta con buona approssimazione di tipo quadratico, di fatto esprime la “capacità dissipativa” della bocca nella sua configurazione attuale. Si può, cioè, ritenere che il maggiore o minore dislivello mare – laguna necessario per far transitare attraverso la bocca una determinata portata, in pratica dipenda dalle maggiori o minori perdite di carico (dissipazioni) che la corrente subisce percorrendo la bocca stessa.

In termini quantitativi, per tutti i casi esaminati vale con buona approssimazione la relazione:  $Q = \alpha \cdot \sqrt{\Delta h}$  in cui  $Q$  indica la portata,  $\Delta h$  indica il dislivello mare-laguna, e il parametro  $\alpha$ , diverso per le condizioni di flusso e di riflusso, esprime la “conduttanza” del sistema che si sta esaminando, e può essere rapportato alla sua “capacità dissipativa”.

Una volta nota l'entità delle dissipazioni (ovvero la “conduttanza”) proprie di ciascuna bocca nello stato di fatto, la valutazione degli effetti degli interventi avviene predisponendo un nuovo modello che descriva anche la presenza delle opere previste,

ed applicando la medesima metodologia di calcolo per valutare la “conduttanza” della nuova configurazione.

I grafici in Fig. 20 ÷ Fig. 22 riportano in diagramma le portate fluenti calcolate in funzione della radice quadrata del dislivello assegnato tra mare e laguna, insieme alle rette che, ai minimi quadrati, meglio approssimano i risultati del calcolo.

Nella tabella seguente sono riportate, in termini percentuali, le variazioni della conduttanza rispetto alla situazione attuale per tutte le configurazioni esaminate.

<b>Bocca di Lido</b>				
<i>Flusso entrante</i>			<i>Flusso uscente</i>	
	$\alpha$	$\Delta\%$	$\alpha$	$\Delta\%$
<b>attuale</b>	16055	--	17890	--
<b>Li1a</b>	7909	50.7	7693	57.0
<b>Li1b</b>	9087	43.4	8868	50.4
<b>Li2</b>	8173	49.1	7779	56.5
<b>Li3a</b>	9144	43.0	8701	51.4
<b>Li3b</b>	9178	42.8	8772	51.0
<b>Li4</b>	11077	31.0	10347	42.2
<b>Li5</b>	8639	46.2	8561	52.1

<b>Bocca di Malamocco</b>				
<i>Flusso entrante</i>			<i>Flusso uscente</i>	
	$\alpha$	$\Delta\%$	$\alpha$	$\Delta\%$
<b>attuale</b>	19183	--	18407	--
<b>Ma1a</b>	12011	37.4	10110	45.1
<b>Ma1b</b>	12563	34.5	10698	41.9
<b>Ma2</b>	15090	21.3	14211	22.8
<b>Ma3</b>	12323	35.8	11328	38.5
<b>Ma4a</b>	11377	40.7	9779	46.9
<b>Ma4b</b>	13742	28.4	11220	39.0

<b>Bocca di Chioggia</b>				
<i>Flusso entrante</i>			<i>Flusso uscente</i>	
	$\alpha$	$\Delta\%$	$\alpha$	$\Delta\%$
<b>attuale</b>	11126	--	10992	--
<b>Ch1</b>	8333	25.1	8750	20.4

*Tabella 1 - Variazioni percentuali della conduttanza calcolate per le configurazioni esaminate*

Dalla tabella si evince che, nel caso della bocca di Lido, le configurazioni esaminate producono diminuzioni della conduttanza variabili tra il 31 e il 51 % in flusso e tra 42 e il 57 % in riflusso.

Per la configurazione esaminata relativa alla bocca di Chioggia, la diminuzione della conduttanza risulta del 25 % in flusso e del 20 % in riflusso.

Nel caso della bocca di Malamocco, gli interventi producono diminuzioni della conduttanza variabili tra il 21 e il 41 % in flusso e tra 23 e il 47 % in riflusso.

In Fig. 23 ÷ Fig. 25, sono riportati, a titolo di esempio, i campi di velocità calcolati per alcune configurazioni, ritenute tra le più rispondenti agli effetti attesi, ovvero la configurazione 5 per Lido, la configurazione 4b per Malamocco e la configurazione 1 per Chioggia.

## *2.2 Valutazione del legame tra portata fluente e velocità massima*

L'inserimento delle opere provoca, come emerge dai campi di velocità calcolati con il modello (Fig. 23 ÷ Fig. 25), una sostanziale modifica del campo di moto in tutto il canale di bocca (data la natura bidimensionale del modello impiegato, si tratta, è bene ricordarlo, della velocità media su tutta la verticale). In particolare si osserva un locale incremento della velocità della corrente, rispetto alla situazione attuale, in corrispondenza dei restringimenti e nelle zone immediatamente adiacenti. Contemporaneamente, peraltro, l'aumento delle dissipazioni riduce le portate scambiate attraverso le bocche nel corso del medesimo evento di marea, e tale riduzione dipende sia dalle caratteristiche dell'evento considerato, sia dal ruolo giocato dalle altre due bocche lagunari.

Con le simulazioni descritte, che fanno riferimento ad un campo di moto stazionario calcolato per ciascuna bocca presa singolarmente, non è pertanto possibile una stima dell'entità dell'incremento della velocità della corrente che ci si può attendere per l'inserimento delle opere.

In base alle simulazioni effettuate si è, tuttavia, osservato che, una volta individuata, nel campo delle velocità, la zona in cui queste ultime raggiungono i loro valori massimi, la relazione tra la velocità in quel punto e la portata complessiva fluente è sostanzialmente lineare. E' possibile, in pratica, stabilire un legame tra portata fluente e velocità massima, che può essere utilizzato, come è illustrato nel seguito, con il modello generale della laguna che simula l'andamento delle portate nel corso di periodi prolungati (1 o 2 anni).

Le Fig. 26 ÷ Fig. 28 riportano, pertanto, in forma grafica, per ciascuna configurazione e per ciascuna portata fluente simulata con il modello locale delle bocche in condizioni stazionarie, il valore della velocità massima calcolata.

I grafici riportano anche le rette che meglio approssimano i dati, individuate con il metodo dei minimi quadrati. Il punto del campo di moto considerato è quello in cui, in prossimità dei restringimenti, la velocità calcolata assume, in assoluto, il valore massimo, a sola esclusione delle maglie immediatamente a ridosso degli spigoli dei pennelli. Si tratta, dunque, del punto più "penalizzato" del campo di moto, se ci si riferisce all'interferenza delle velocità più elevate con la navigazione. A titolo indicativo, peraltro, dai campi di velocità stessi si può stimare che, nelle configurazioni esaminate, la velocità media nella stessa sezione (cioè nel

restringimento) sia generalmente inferiore a quella massima per entità dell'ordine del 10 %. Si può anche osservare, in generale, che la velocità media nel canale di bocca si riduce rispetto alla situazione attuale (essendo minori le portate fluenti a parità di evento di marea) e che la zona in cui le velocità locali sono superiori a quelle che si verificano nella situazione attuale è generalmente limitata agli specchi d'acqua adiacenti ai restringimenti e a valle di questi ultimi.

La tabella seguente riporta, per ciascuna configurazione, il coefficiente che esprime la portata rispetto alla velocità massima, in una relazione del tipo  $Q = \beta \cdot v_{\max}$ , e la sua variazione rispetto alla situazione attuale. La relazione così individuata, è quella utilizzata per le valutazioni sulla permanenza di velocità massime superiori a prefissati valori, effettuate con il modello generale della laguna e descritte nel seguito.

### Bocca di Lido

	<i>Flusso entrante</i>		<i>Flusso uscente</i>	
	$\beta$	$\Delta\%$	$\beta$	$\Delta\%$
<b>attuale</b>	6682	--	6239.1	--
<b>Li1a</b>	1745	73.9	1669	73.2
<b>Li1b</b>	2035	69.5	2021	67.6
<b>Li2</b>	1779	73.4	1660	73.4
<b>Li3a</b>	2443	63.4	2353	62.3
<b>Li3b</b>	2607	61.0	2522	59.6
<b>Li4</b>	2503	62.5	2312	62.9
<b>Li5</b>	2371	64.5	2365	62.1

### Bocca di Malamocco

	<i>Flusso entrante</i>		<i>Flusso uscente</i>	
	$\beta$	$\Delta\%$	$\beta$	$\Delta\%$
<b>attuale</b>	5630	--	6123	--
<b>Ma1a</b>	2482	55.9	2339	61.8
<b>Ma2</b>	3731	33.7	3913	36.1
<b>Ma3</b>	2775	50.7	2517	58.9
<b>Ma4a</b>	2242	60.2	2156	64.8
<b>Ma4b</b>	2567	54.4	2552	58.3

### Bocca di Chioggia

	<i>Flusso entrante</i>		<i>Flusso uscente</i>	
	$\beta$	$\Delta\%$	$\beta$	$\Delta\%$
<b>attuale</b>	3553	--	4089	--
<b>Ch1</b>	2150	39.5	2000	51.1

*Tabella 2 - Variazioni percentuali della relazione tra velocità massima e portata fluente calcolate per le configurazioni esaminate*

### 3 Verifiche con il modello generale della laguna

#### 3.1 Risultati modellistici

Le configurazioni sopra descritte sono state combinate tra loro per simulare alcuni scenari di interventi alle bocche. Complessivamente ne sono stati indagati 6.

Per riferimento, le combinazioni delle configurazioni di tutti gli scenari sono riportate nella Tabella 3 in cui si può notare, tra l'altro, come un intervento alla bocca di Chioggia (configurazione C1) venga ipotizzato solo negli ultimi tre scenari.

Nome	Configurazioni alle bocche
Scenario 1	Ma1a, Li1a, Chioggia aperta
Scenario 2	Ma2, Li2, Chioggia aperta
Scenario 3	Ma1a, Li3a, Chioggia aperta
Scenario 4	Ma3, Li5, Ch1
Scenario 6	Ma4a, Li5, Ch1

*Tabella 3 – Scenari indagati*

Gli effetti delle opere alle bocche sono stati studiati in relazione alla riduzione delle punte di marea, agli scambi mare-laguna e al lasso di tempo in cui una certa soglia di velocità massima è stata superata.

#### 3.2 Riduzioni delle punte di marea

Per i risultati sulle riduzioni delle punte di marea (ossia sull'attenuazione dei fenomeni di "acqua alta") dovute alle opere, si veda la Tabella 4 che riassume i risultati di calcolo relativi alle località di Burano, Chioggia e Punta della Salute.

La tabella indica, in centimetri, le riduzioni dei colmi di marea rispetto alla situazione attuale. Si tratta di valori medi ottenuti utilizzando tutte le maree superiori a 130 cm, ad esclusione dell'evento del 1966 (12 casi), da un campione di 18 eventi significativi già presi in considerazione nelle precedenti indagini svolte per conto di ANPA e Comune di Venezia.

Da quanto riportato in tabella si evince che le riduzioni variano dai 9 agli 11.5 cm per Punta Salute e Burano, con una media prossima ai 10 cm. e se si tengono in considerazione anche le fluttuazioni e le incertezze date dalla deviazione standard (2-3 cm), si può concludere che tutti gli scenari portano proprio ad una riduzione di circa 10 cm, senza significative differenze tra loro.

Casi	Burano	Chioggia	Punta Salute
	[cm]	[cm]	[cm]
Scenario 1	-11.14 ± 3.69	-4.00 ± 1.54	-11.57 ± 3.07
Scenario 2	-9.10 ± 3.30	-2.60 ± 0.99	-9.34 ± 2.65
Scenario 3	-9.19 ± 3.06	-3.69 ± 1.48	-9.70 ± 2.58
Scenario 4	-10.32 ± 3.23	-5.97 ± 2.31	-10.91 ± 2.75
Scenario 5	-10.91 ± 3.30	-6.59 ± 2.52	-11.57 ± 2.87
Scenario 6	-9.46 ± 3.12	-5.08 ± 2.03	-9.94 ± 2.61

*Tabella 4 - Riduzione delle punte di marea a Burano, Chioggia e Punta della Salute*

### 3.3 Riduzione degli scambi mare-laguna

La tabella 5 riassume i risultati delle simulazioni per la valutazione della riduzione degli scambi mare-laguna, conseguente alla realizzazione delle opere previste. Prendendo in considerazione una marea astronomica “tipica”, è stato valutato il volume d’acqua complessivamente scambiato con il mare, nel corso di un mese, attraverso ciascuna bocca. La tabella riporta, in termini percentuali, il rapporto tra il volume scambiato nell’ipotesi di progetto e quello nella situazione attuale.

Per quanto concerne la bocca di Chioggia, dalla tabella si evince che le configurazioni esaminate producono generalmente riduzioni modeste, quando non addirittura un piccolo aumento del volume nel caso in cui non vi si realizzi alcuna opera.

Le riduzioni a Malamocco si attestano invece tra il 6% ed il 20% e sono in ogni caso inferiori a quelle registrate al Lido, che sfiorano talvolta il 30 % ma sono comunque sempre al di sopra del 20%.

Le riduzioni per la laguna, nel suo complesso, si aggirano fra il 13% ed il 19 % mentre la media delle portate che passano è all’incirca dell’83 %.

Bocca	Chioggia	Malamocco	Lido	Totale
	[%]	[%]	[%]	[%]
Scenari del progetto 11 Punti				
Scenario 1	101.5	81.4	70.9	81.5
Scenario 2	100.2	94.1	70.3	86.3
Scenario 3	102.0	81.2	77.6	84.1
Scenario 4	95.3	85.2	75.2	83.5
Scenario 5	95.9	79.9	76.0	81.7
Scenario 6	95.1	87.9	74.8	84.4

*Tabella 5 - Scambi mare-laguna rispetto alla situazione attuale*

### 3.4 Velocità alle bocche di porto

Con le opere inserite nelle bocche, le velocità massime osservate si modificano. Esse generalmente aumentano in presenza di una minore sezione disponibile e tale aumento potrebbe costituire un problema per la navigazione qualora la velocità superasse il limite di sicurezza per un lungo lasso di tempo.

Sono stati studiati 2 anni interi (2000 e 2001) durante i quali è stata monitorata la velocità che si verifica nelle bocche. Dai risultati ottenuti, sono state estratte le percentuali del tempo in cui una certa velocità viene superata in tutte le bocche.

Le figure 29-31 riassumono i risultati ottenuti.

Scegliendo come velocità critica un valore di 2 m/s, si può vedere come nella situazione attuale questa velocità non sia mai superata in nessuna delle tre bocche.

Nella ipotetica situazione a interventi realizzati, a Chioggia (Fig. 29) la percentuale di superamento risulta sempre inferiore allo 0.4 % (34 ore/anno) e pertanto non rappresenta un problema. Differente è la situazione al Lido (Fig. 30), dove nella peggiore delle ipotesi (scenario 1 e 2) si verifica un superamento attorno al 25 % del tempo, che corrisponde a più di 2200 ore all'anno. Gli scenari 3-6 ovviano a questo problema con le nuove configurazioni Li3 e Li5, riducendo il tempo di superamento a valori più accettabili, attorno al 6 % (550 ore/anno).

A Malamocco (Fig. 31), le stime variano. Il tempo di superamento della velocità critica di 2 m/s oscilla tra il 2 % e il 22 % a seconda della configurazione utilizzata e le scelte si riducono in pratica agli scenari 4 e 6. Questi si distinguono solo attraverso la configurazione utilizzata a Malamocco, che è rispettivamente la configurazione Ma3 e Ma4a. Per le altre due bocche le configurazioni scelte sono la Ch1 e la Li6.

### 3.5 Conclusioni

Sono stati presentati alcuni scenari grazie ai quali può essere sperimentato l'abbattimento della marea alle bocche di porto. Tutte le soluzioni studiate indicano una riduzione della marea che si aggira intorno ai 10 cm ed una riduzione dei flussi dell'ordine del 15 %. La scelta delle soluzioni da utilizzare si riduce essenzialmente a due degli scenari studiati (rispettivamente il 4 e il 6), che si distinguono in modo particolare solo nelle velocità massime riscontrate alla bocca di Malamocco. Le velocità alle altre bocche, invece, rimangono identiche in entrambi i casi.

A Malamocco si dovrà scegliere fra una struttura più semplice (un'unica barriera) con delle velocità massime elevate (i 2 m/s sono superati per il 20 % del tempo) o una struttura più complessa (una doppia linea di barriere a distanza di circa 500 m) con delle velocità massime ridotte (la soglia di 2 m/s è superata per il 10 % del tempo).

Prof. Maurizio De Santis

Dr. Georg Umgieser

Ing. Bruno Matticchio

#### 4 Lista delle Figure

- Fig. 1 – Planimetria della Laguna di Venezia con ubicazione delle previste opere sperimentali alle bocche di Porto.*
- Fig. 2 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Cassoni cellulari.*
- Fig. 3 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Cassoni cellulari.*
- Fig. 4 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Porto Canale di Lido.*
- Fig. 5 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Porto Canale di Lido.*
- Fig. 6 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Porto Canale di Lido.*
- Fig. 7 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Porto Canale di Malamocco.*
- Fig. 8 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Porto Canale di Malamocco.*
- Fig. 9 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Porto Canale di Malamocco.*
- Fig. 10 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Porto Canale di Chioggia.*
- Fig. 11 - Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Porto Canale di Chioggia.*
- Fig. 12 – Opere di parzializzazione dei canali porto della laguna – Porto Canale di Chioggia.*
- Fig. 13 - Modello locale delle bocche. Schematizzazione delle configurazioni 1 e 2 proposte per la bocca di Lido.*
- Fig. 14 - Modello locale delle bocche. Schematizzazione delle configurazioni 3 e 4 proposte per la bocca di Lido.*
- Fig. 15 – Modello locale delle bocche. Schematizzazione della configurazione 5 proposta per la bocca di Lido e della configurazione 1 proposta per la bocca di Chioggia.*
- Fig. 16 - Modello locale delle bocche. Schematizzazione delle configurazioni 1 e 2 proposte per la bocca di Malamocco.*



- Fig. 17 - Modello locale delle bocche. Schematizzazione delle configurazioni 3 e 4 proposte per la bocca di Malamocco.*
- Fig. 18 – Modello locale delle bocche. Reticolo di calcolo del modello bidimensionale delle bocche di Lido e Chioggia.*
- Fig. 19 - Modello locale delle bocche. Reticolo di calcolo del modello bidimensionale della bocca di Malamocco.*
- Fig. 20 - Portate fluenti alla bocca di Lido al variare del dislivello tra mare e laguna per le configurazioni esaminate.*
- Fig. 21 – Portate fluenti alla bocca di Malamocco al variare del dislivello tra mare e laguna per le configurazioni esaminate.*
- Fig. 22 - Portate fluenti alla bocca di Chioggia al variare del dislivello tra mare e laguna per la configurazione esaminata.*
- Fig. 23 - Bocca di Lido. Campo di velocità calcolato per la configurazione 5 assegnando un dislivello mare-laguna di  $\pm 0.2$  m.*
- Fig. 24 - Bocca di Malamocco. Campo di velocità calcolato per la configurazione 4b assegnando un dislivello mare-laguna di  $\pm 0.2$  m.*
- Fig. 25 - Bocca di Chioggia. Campo di velocità calcolato per la configurazione 1 assegnando un dislivello mare-laguna di  $\pm 0.15$  m.*
- Fig. 26 - Velocità massima al variare della portata fluente calcolata alla bocca di Lido per le configurazioni esaminate.*
- Fig. 27 - Velocità massima al variare della portata fluente calcolata alla bocca di Malamocco per le configurazioni esaminate.*
- Fig. 28 - Velocità massima al variare della portata fluente calcolata alla bocca di Chioggia per le configurazioni esaminate.*
- Fig. 29 - Tempo di superamento delle velocità massime alla bocca di Chioggia durante il biennio 2000-2001 nella situazione attuale e nei sei scenari esaminati.*
- Fig. 30 - Tempo di superamento delle velocità massime alla bocca di Lido durante il biennio 2000-2001 nella situazione attuale e nei sei scenari esaminati.*
- Fig. 31 - Tempo di superamento delle velocità massime alla bocca di Malamocco durante il biennio 2000-2001 nella situazione attuale e nei sei scenari esaminati.*