ALBERTO SCOTTI*

PROGETTAZIONE DELLE OPERE DI DIFESA DALLE ACQUE ALTE · II

PREMESSA

L'illustrazione del progetto è stata divisa in due parti.

Nella prima, pubblicata nel quaderno trimestrale n° 3 del 1993, è stato descritto il contenuto del progetto preliminare di massima ultimato nel 1989.

Il progetto, già approvato, comprende:

- lo studio dei problemi dell'ambiente fisico della laguna;
- lo studio delle azioni da intraprendere per fare fronte agli stessi secondo le prescrizioni della legge 798/84;
- l'esame di ogni soluzione possibile per la difesa dalle acque alte;
- la definizione degli interventi che hanno una reale efficacia per la difesa dalle acque alte e che consistono nella costruzione di difese locali dei centri abitati e nella costruzione di opere mobili alle bocche lagunari che intercettano le maree ogni volta che queste superano il livello di +1,00 m[1].

È stata inoltre messa in evidenza la differenza tra le dimensioni e le caratteristiche delle opere mobili progettate dal Consorzio Venezia Nuova e quelle previste nel progetto di fattibilità del 1981 ("Progettone"). Soprattutto veniva spiegato che tale differenza si era resa necessaria per evitare di compromettere l'ecosistema lagunare.

In questo numero dei "Quaderni Trimestrali" vengono descritti gli sviluppi progettuali che hanno fatto seguito al progetto preliminare e che sono contenuti nel progetto di massima approvato dal Magistrato alle Acque di Venezia nel mese di novembre del 1992.

Sono qui illustrate tutte le attività svolte per procedere alla scelta del tipo di opere mobili in grado di rispettare le prescrizioni stabilite nel 1982 dal Consiglio Superiore dei Lavori pubblici, e per dimostrarne la fattibilità.

Vengono infine analizzate le caratteristiche e le dimensioni delle opere mobili e dei sistemi adottati per eseguire la loro manutenzione; le caratteristiche e la funzionalità degli impianti che ne consentono il funzionamento; le caratteristiche, le dimensioni e i metodi costruttivi delle opere civili necessarie per l'installazione delle opere mobili.

* *Coordinatore e responsabile della progettazione per conto del Consorzio Venezia Nuova*

[1] *Tale quota è calcolata in base al mareografo di Punta della Salute che è a -23 cm rispetto allo zero di riferimento dell'Istituto geografico militare*

SCELTA DELLA TIPOLOGIA

Opere con funzioni analoghe a quelle necessarie per Venezia (pur con le diversità di contesto più avanti analizzate), sono già state realizzate sul delta

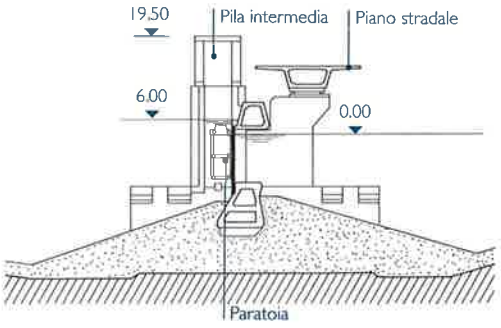
Figg. 1-2-3-4-5. Esempi di opere mobili. Essi illustrano le opere realizzate sul delta dello Schelda, sul Tamigi, sul Nagara e quelle che si stanno eseguendo per la baia della Neva e per il canale d'accesso al porto di Rotterdam. Mentre le paratoie ideate per Venezia non hanno bisogno di pile intermedie di sostegno, in tutti questi casi, invece, le strutture in vista sono di dimensioni assai rilevanti

del fiume Schelda, in Olanda; sul fiume Tamigi, in Inghilterra; sul fiume Nagara in Giappone (figg. 1-2-3).

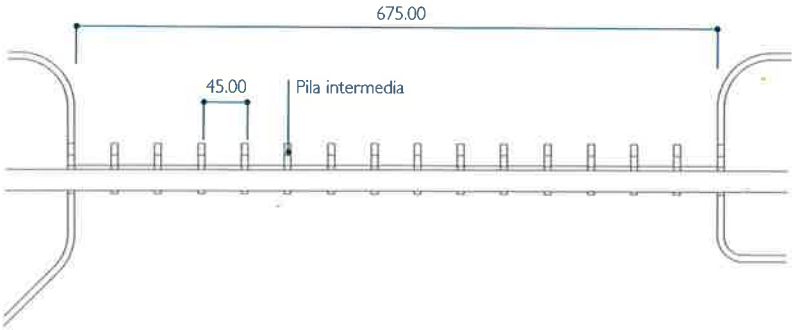
La barriera sullo Schelda deve proteggere dalle inondazioni un esteso territorio del sud dell'Olanda. Quella sul Tamigi difende la città di Londra. L'opera realizzata in Giappone difende una vasta regione che comprende la città di Nagoya.

Attualmente si stanno eseguendo altri due interventi per la difesa dagli allagamenti causati dalle maree eccezionali. Il primo a San Pietroburgo, in Russia, per la difesa della città, del porto e del delta del fiume Neva; il secondo a Rotterdam, sempre in Olanda, per la difesa della zona portuale e di un ampio territorio circostante (figg. 4-5).

Fiume Schelda
(paratoie mobili a scorrimento verticale) 1

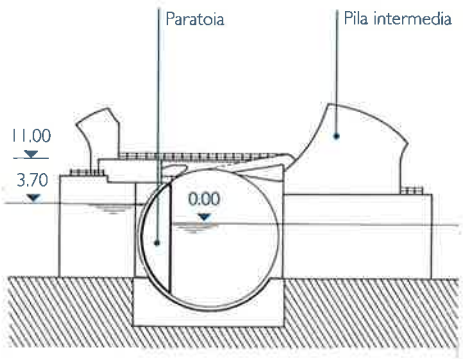


Sezione trasversale

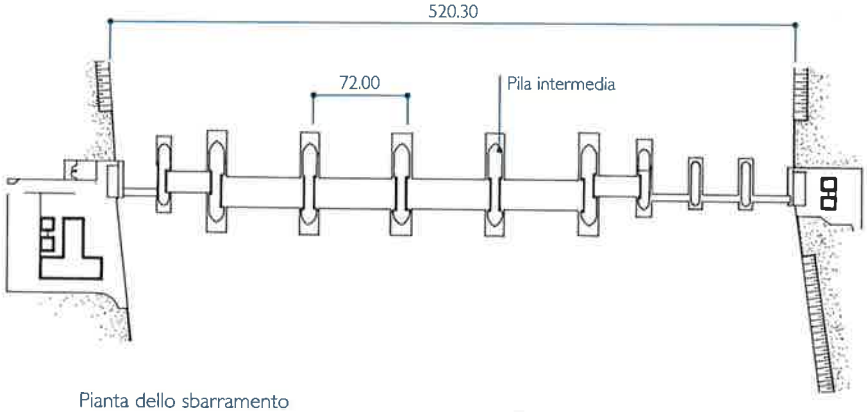


Pianta dello sbarramento

Fiume Tamigi
(paratoie a settore) 2



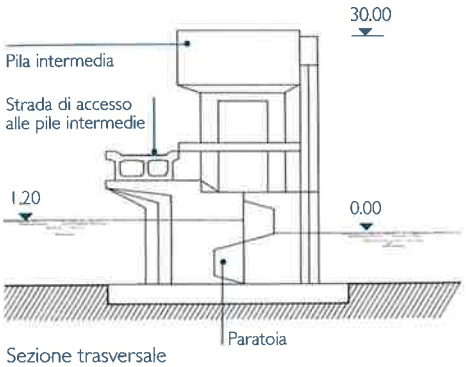
Sezione trasversale



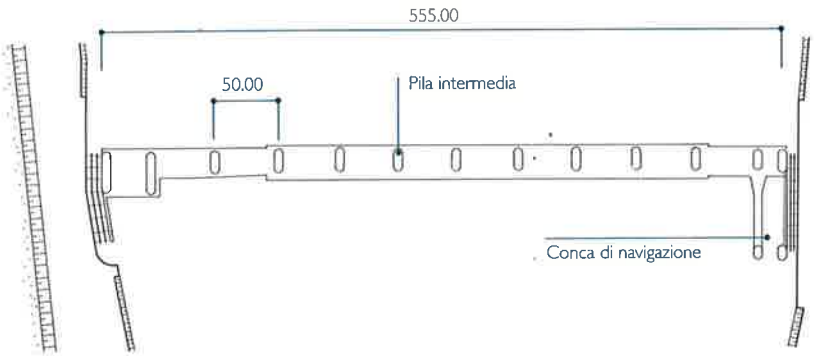
Pianta dello sbarramento

Fiume Nagara
(paratoie a scorrimento verticale)

3



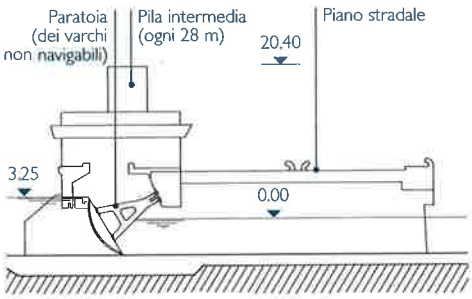
Sezione trasversale



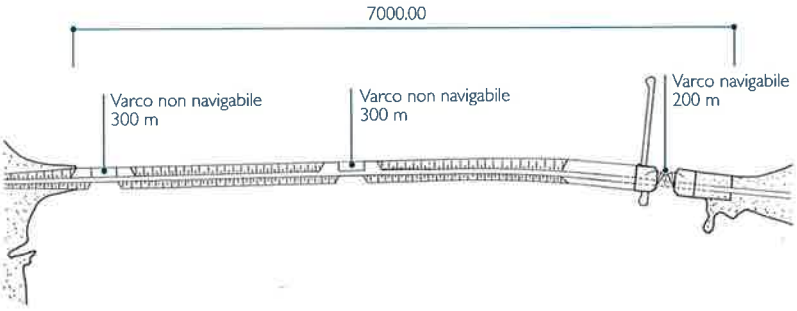
Pianta dello sbarramento

Fiume Neva
(paratoie a settore)

4



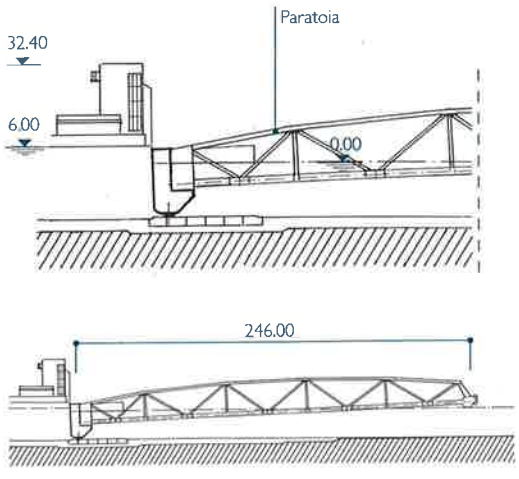
Sezione trasversale



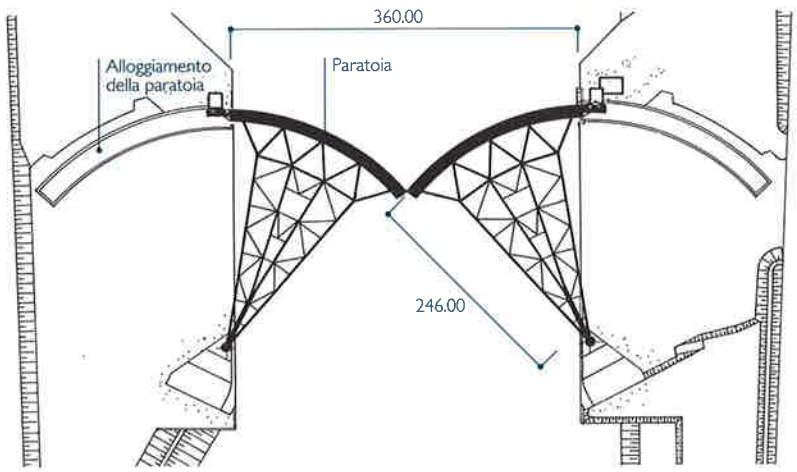
Pianta dello sbarramento

Canale d'accesso al porto di Rotterdam
(paratoie a settore con scorrimento orizzontale)

5



Sezione trasversale



Pianta dello sbarramento

Le cause che sono all'origine della decisione di realizzare le opere di difesa dagli allagamenti sono, almeno in parte, comuni a tutti gli esempi citati.

Il territorio in generale è infatti interessato dal fenomeno della subsidenza; negli ultimi secoli il livello del mare ha subìto un innalzamento che non sembra arrestarsi (eustatismo) e che potrebbe anzi aumentare ulteriormente a causa del cosiddetto "effetto serra"; da ultimo, il valore del territorio, delle strutture esistenti e delle attività che vi si svolgono ha registrato un notevole incremento.

Nei casi considerati sono invece molto diverse le condizioni in cui si è dovuto o si dovrà operare, i vincoli di cui bisogna tenere conto e soprattutto le condizioni di marea per cui è prevista la messa in esercizio delle opere mobili. Sono anche diversi i dislivelli massimi di marea e la frequenza del funzionamento delle paratoie: il dislivello massimo varia dai 2 metri di Venezia ai 6 metri sulla Schelda e a Rotterdam; la frequenza varia tra poche volte l'anno e una volta ogni 5-10 anni.

Le foci dello Schelda e del Nagara non sono interessate da un traffico navale commerciale o industriale. Nella zona del Tamigi dove sono state realizzate le opere mobili transitano solo bettoline di piccole dimensioni. A Rotterdam e a San Pietroburgo, come a Venezia, è invece previsto il transito di navi che devono raggiungere le banchine del porto commerciale.

In relazione alle diverse condizioni locali sono state studiate opere mobili con dimensioni differenti che devono adattarsi alle esigenze funzionali dei singoli casi.

In quasi tutti gli esempi considerati, le opere mobili sono composte da paratoie di tipo tradizionale, anche se di forma diversa (a scorrimento verticale, a tamburo, a settore circolare), le quali, a causa della larghezza massima che possono raggiungere, sono sorrette da strutture intermedie di calcestruzzo che emergono dal livello del mare di molti metri. Esse sono poste a distanze variabili tra 30 e 60 metri a seconda del tipo di paratoia usata.

Solo a Rotterdam e a San Pietroburgo, per i varchi navigabili, sono state adottate soluzioni con le quali è possibile ottenere opere mobili che si sviluppano fino a 300 metri senza necessità di strutture intermedie. Anche in questi casi tuttavia le opere in vista si presentano con forte rilievo e altrettanto forte impatto visivo.

A questo proposito va rilevato come l'intervento di Rotterdam preveda una paratoia (che rimane sempre in vista) dalle dimensioni paragonabili a quelle della torre Eiffel.

I criteri di cui si è dovuto tenere conto nella scelta della tipologia delle opere mobili per Venezia sono stati definiti dal Consiglio Superiore dei Lavori pubblici nei seguenti termini:

- non è ammessa alcuna riduzione della sezione dei canali di bocca dove le opere dovranno essere collocate. Ogni riduzione comporta infatti una diminuzione dei naturali ricambi d'acqua indotti dalle maree e quindi un peggioramento della qualità delle acque e dei sedimenti in laguna;

- non sono ammesse strutture intermedie di sostegno delle paratoie, né sovrastrutture aeree. Questa prescrizione è stata inizialmente dettata dall'esigenza di assicurare il transito in sicurezza delle navi dirette ai porti commerciali e industriali lagunari. Le strutture intermedie non sarebbero comunque ammesse per non ridurre le sezioni dei canali di bocca. La sezione occupata da tali strutture dovrebbe infatti essere compensata da un notevole approfondimento dei fondali, considerato inaccettabile per il costo e per le conseguenze sull'ambiente lagunare;
- l'impatto sul paesaggio deve essere ridotto al minimo, assicurando che, quando le opere mobili non sono in funzione, le strutture in vista siano di dimensioni ridotte e comunque abbiano caratteristiche e quote simili a quelle del territorio circostante;
- è indispensabile assicurare il transito attraverso le bocche, anche durante la loro chiusura, dei pescherecci, dei mezzi di soccorso e delle imbarcazioni da diporto;
- è indispensabile verificare se e in che misura le opere mobili interferiscano con il traffico navale commerciale e industriale così da introdurre ogni accorgimento per ridurre gli effetti negativi, purché nel rispetto dei criteri precedenti.

Per rispettare questi vincoli progettuali sono state studiate e messe a confronto numerosissime soluzioni alternative (fig. 6).

Come si è già detto, i tipi di paratoia tradizionali necessitano di strutture intermedie di sostegno e quindi non rispondono ai requisiti richiesti.

Quelle che consentono di rispettare i criteri di progetto fanno ricorso a elementi strutturali o impiantistici innovativi. Alcune sono innovative per i materiali (come, ad esempio, i teli gommati ad alta resistenza), altre per la messa in esercizio (a scorrimento su ruote per l'intera larghezza della bocca), altre ancora per il sistema di movimento (immissione di aria all'interno della paratoia e utilizzo della spinta di galleggiamento dell'acqua).

Nelle analisi svolte per giungere alla scelta del tipo di paratoia da adottare a Venezia si è tenuto anche conto del livello di esperienza disponibile sui metodi costruttivi e sui materiali. Per verificare la fattibilità delle soluzioni che rispettavano i criteri e i vincoli di progetto, si è stimato il grado di affidabilità di ciascun sistema; sono stati messi a confronto i metodi e i mezzi d'opera necessari per eseguire la manutenzione delle parti fisse e di quelle mobili di ciascuna soluzione; si è tenuto conto dei costi di costruzione, di gestione e di manutenzione; si è infine studiato il tipo di impatto sull'ambiente.

Al termine di queste analisi si è dimostrato che la soluzione con paratoie incernierate sul fondo dei canali delle bocche di porto, che si sollevano per raggiungere la posizione di esercizio utilizzando la spinta di galleggiamento, è l'unica che soddisfa in modo completo i criteri di progetto e inoltre, rispetto alle altre tipologie esaminate, è quella più affidabile e più economica.

Fig. 6. Tipologie di paratoie. Le paratoie progettate dal Consorzio Venezia Nuova sono state scelte dopo la ricerca e il confronto tra molte altre tipologie di opere mobili:

6 a
paratoia a ventola galleggiante diritta (fissa);

6 b
paratoia a ventola galleggiante diritta (oscillante);

6 c
paratoia a ventola galleggiante rovescia;

6 d
paratoia a tamburo;

6 e
paratoia a trappola d'orso;

6 f
paratoia a barca porta;

6 g
paratoia a farfalla;

6 h
paratoia a celata;

6 i
paratoia a settore;

6 l
paratoia a settore a scomparsa;

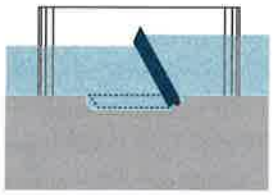
6 m
paratoia a cuscino;

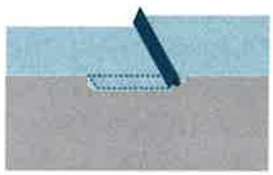
6 n
paratoia a galleggiante e vela;

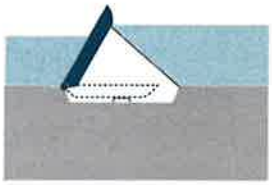
6 o
paratoia a soffietto;

6 p
paratoia a scorrimento orizzontale;

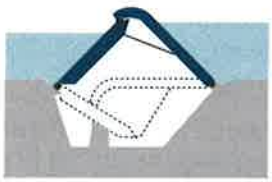
6 q
paratoia a cassone emergente

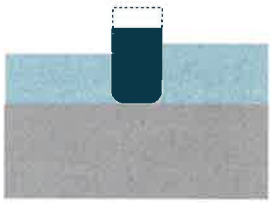

6 a

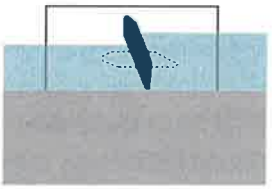

6 b

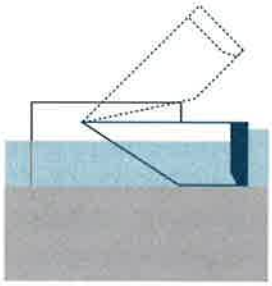

6 c

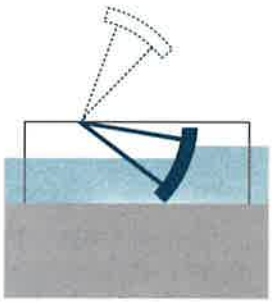
6 d

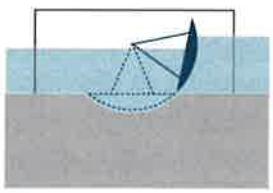

6 e

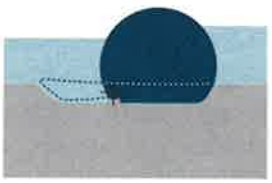

6 f

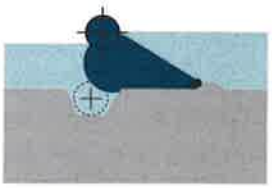

6 g


6 h

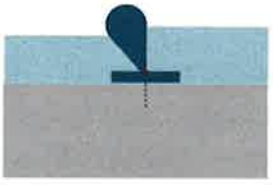

6 i

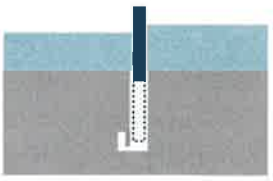

6 l


6 m


6 n

6 o


6 p


6 q

CARATTERISTICHE, DIMENSIONI E VERIFICHE DI STABILITÀ DELLE PARATOIE

La soluzione adottata è costituita da una serie modulare di paratoie a spinta di galleggiamento, accostate l'una all'altra, incernierate sul fondo e tra loro indipendenti.

Ciascuna paratoia è costituita da una struttura metallica scatolare che, se piena d'acqua, rimane adagiata in un apposito recesso ricavato sul fondale del canale di bocca. Quando l'acqua viene spiazzata, per immissione di aria compressa all'interno della paratoia, essa si solleva, ruotando attorno all'asse delle cerniere (2 per ogni paratoia), e assume la posizione di equilibrio che è funzione del peso della struttura, della quantità d'aria immessa e del dislivello che si vuole mantenere tra mare e laguna (fig. 7).

Le paratoie, pur oscillando liberamente per effetto del moto ondoso, devono sempre poter mantenere il dislivello di progetto e quindi devono avere oscillazioni reciproche contenute e tali da non permettere il passaggio dell'acqua dal mare verso la laguna.

La larghezza di ciascuna paratoia è di 20 metri. L'ampiezza dei varchi alle bocche di porto di Chioggia e Malamocco viene coperta rispettivamente da 18 e 20 paratoie. L'ampiezza della bocca di porto di Lido, doppia rispetto alle altre due, non poteva essere coperta da una sola schiera di paratoie. È stato perciò necessario prevedere un'isola artificiale intermedia che consentisse l'installazione di due schiere. Complessivamente, per le tre bocche di porto, verranno realizzate quattro schiere di paratoie: una schiera al varco di Lido-Treporti, una al varco di Lido-S. Nicolò, una al varco di Malamocco, una al varco di Chioggia.

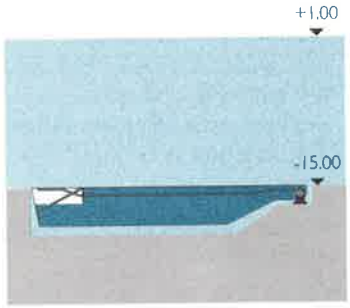
La lunghezza e lo spessore delle paratoie sono variabili in relazione alla profondità dei fondali in cui sono collocate: la lunghezza è compresa tra 20 e 30 metri, lo spessore tra 4 e 5 metri.

Nella figura 8 è illustrata una parte delle opere mobili in cui tre paratoie sono sollevate mentre la quarta è ancora in posizione di riposo. È anche rappresentata la struttura di alloggiamento interamente realizzata al di sotto del fondale e sagomata per poter fungere da recesso delle paratoie in condizioni di riposo.

La struttura di ciascuna paratoia, illustrata nella figura 9 a pagina 26, è estremamente semplice.

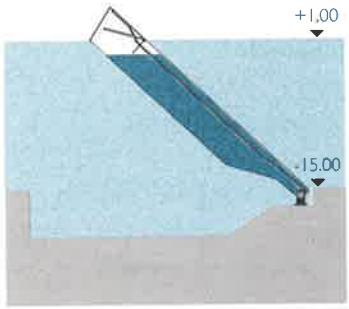
Anche il principio di funzionamento della paratoia e dello sbarramento nel suo complesso è molto semplice. Poiché una soluzione di questo tipo non è mai stata realizzata, è stato analizzato e studiato approfonditamente, con tutti gli strumenti della ricerca e della sperimentazione, il comportamento della struttura in presenza di dislivello, correnti e moto ondoso.

Il comportamento delle paratoie è stato studiato utilizzando metodi di calcolo tradizionali, modelli matematici e, soprattutto, eseguendo numerose prove con modelli fisici in scala ridotta e con un modello in scala reale,

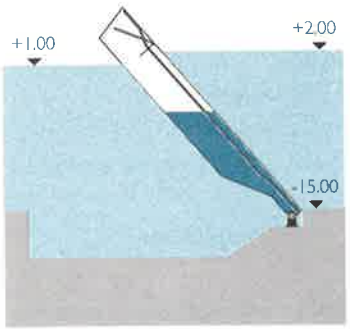


7 a

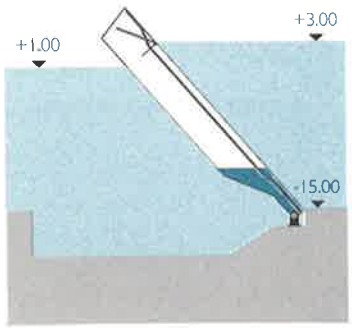
< laguna mare >



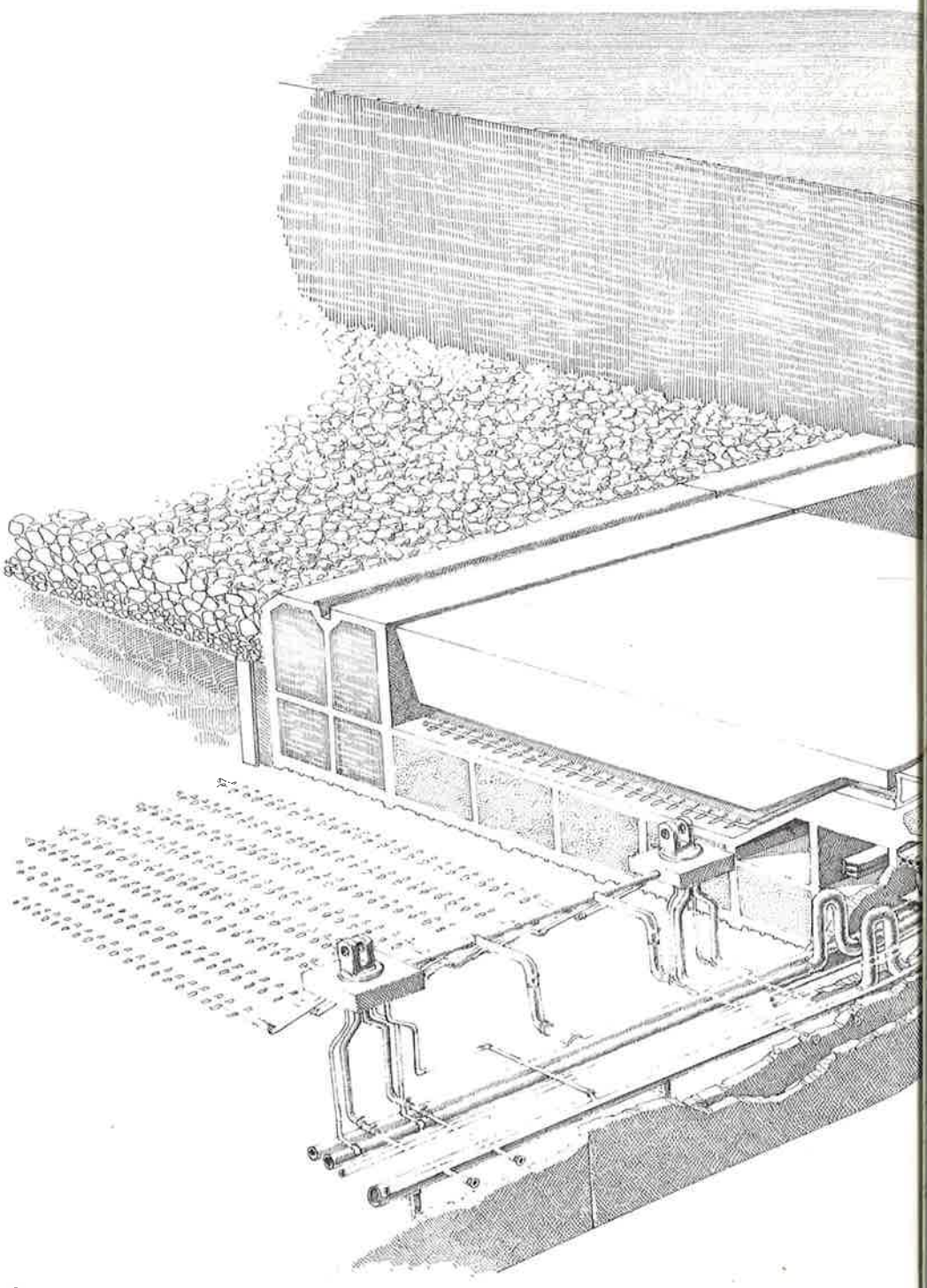
7 b



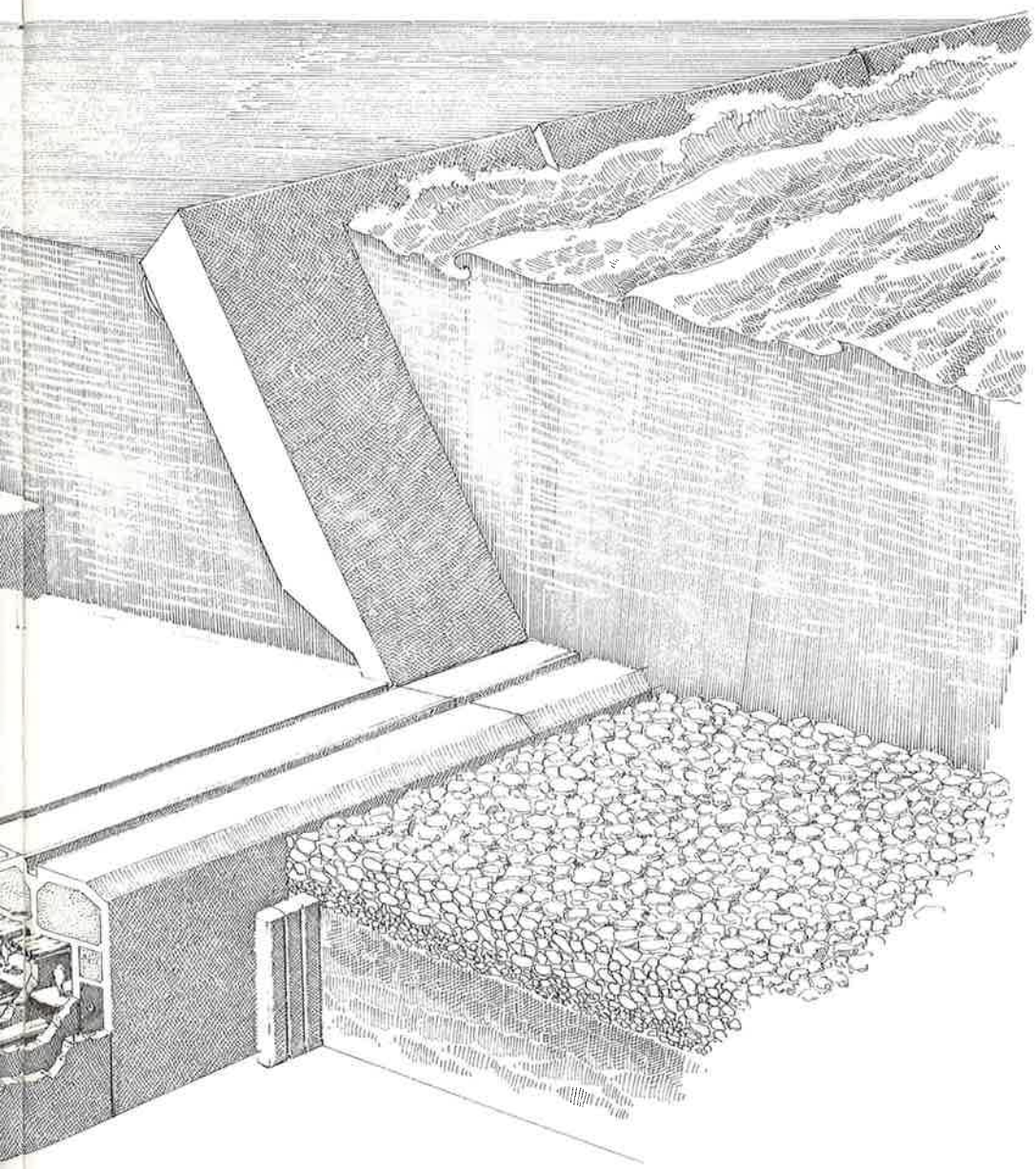
7 c

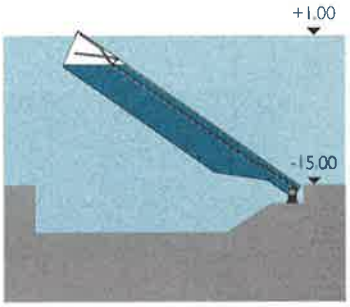


7 d



8



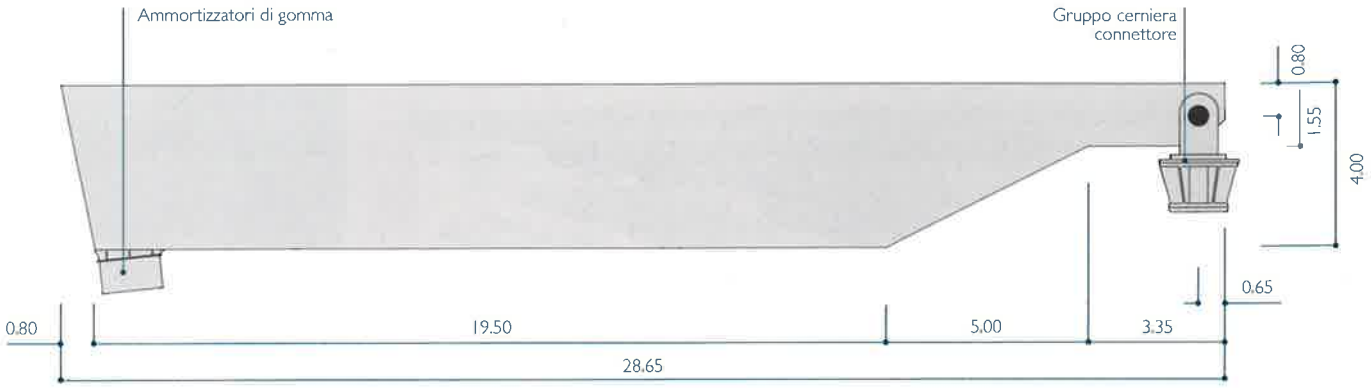


7 e

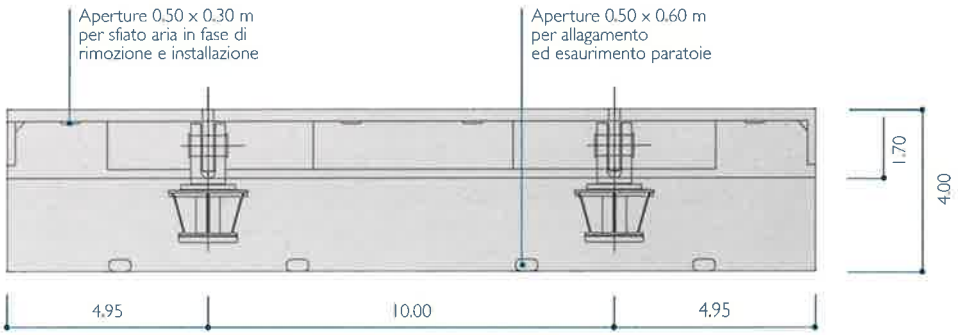
< laguna mare >

Fig. 7. Movimento della paratoia. Nella posizione di riposo la paratoia, piena d'acqua, è adagiata nel vano di alloggiamento (7a). Essa si solleva via via che l'acqua al suo interno viene spiazzata dall'immissione di aria compressa, fino a raggiungere la posizione di esercizio (7b). L'inclinazione della paratoia avviene regolando l'immissione di aria e viene determinata in relazione al dislivello di marea (7c e 7d). Terminata la sua funzione, la paratoia è nuovamente riempita d'acqua e comincia così la fase di abbassamento per tornare nella posizione iniziale (7e). La quota relativa alla profondità del fondale (-15,00 m) si riferisce alla bocca di porto di Malamocco

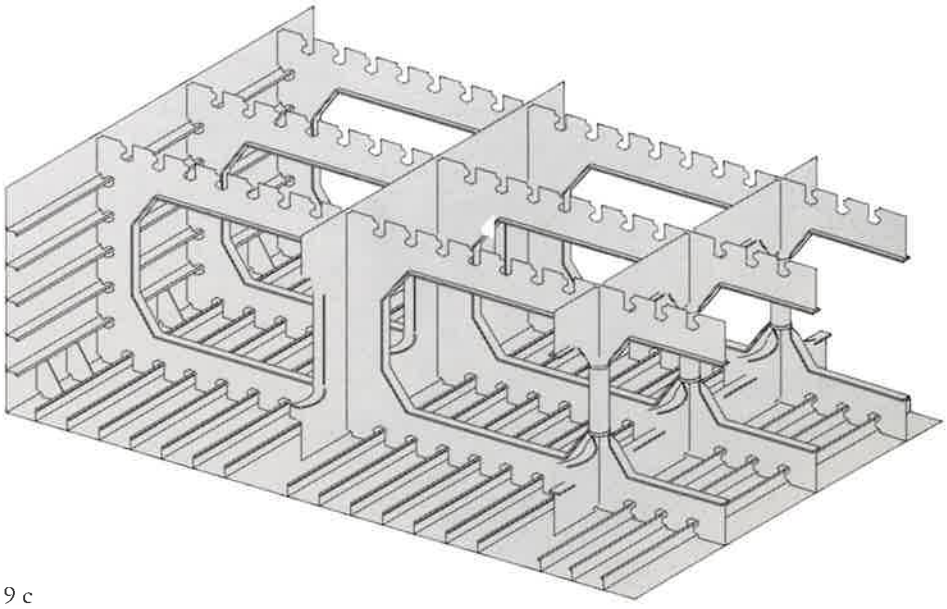
Fig. 8. Particolare di una schiera di paratoie. Il disegno raffigura una paratoia in posizione di riposo, nel vano di alloggiamento ricavato nel fondale del canale di bocca, e tre paratoie in esercizio. In primo piano, a sinistra, sono messi in evidenza i condotti degli impianti per il funzionamento delle opere mobili



9 a



9 b



9 c

Fig. 9. La paratoia. Dall'alto verso il basso sono raffigurati i prospetti laterale e posteriore della paratoia (9a e 9b) e l'assonometria della sua struttura interna (9c). La paratoia è realizzata in carpenteria metallica con orditure e rinforzi interni e ha un peso pari a 150 kg al m^3. Poiché proprio il peso contribuisce ad aumentare la stabilità delle paratoie non è stato necessario ottimizzare il dimensionamento della loro struttura per ridurre gli spessori delle carpenterie. Sia all'interno che all'esterno le paratoie vengono trattate con particolari vernici protettive. Le tecnologie e i materiali impiegati sono già stati sperimentati nelle costruzioni marittime e offshore e sono stati sottoposti a specifiche prove anche sul Modulo sperimentale elettromeccanico: il prototipo di paratoia realizzato in scala reale. Tutte le misure riportate nelle figure di questa pagina si riferiscono a una paratoia progettata per la bocca di porto di Malamocco

appositamente costruito (Modulo Sperimentale Elettromeccanico). Sono state inoltre eseguite prove di usura delle parti mobili e analisi sull'entità dell'aggressione subita dai materiali da parte dell'ambiente marino compresa quella della flora e della fauna che in esso vivono.

Tra le prove su modelli fisici in scala ridotta, una prima serie, eseguita presso Estramed, Centro per modelli idraulici e marittimi che ha sede a Pomezia (Roma), è stata dedicata essenzialmente alla verifica di fattibilità del sistema. Sono state effettuate sia prove in vasca di una schiera di 18 paratoie, sia prove in canaletta di 3 paratoie affiancate investite da onde regolari e irregolari, (figg. 10a e 11a).

I risultati di queste prove hanno consentito di introdurre nella progettazione un primo livello di ottimizzazione delle dimensioni delle paratoie e di procedere all'esecuzione di una seconda serie di prove con strumenti simili ai precedenti (vasca e canaletta) ma più sofisticati e di maggiori dimensioni per poter riprodurre con un maggiore dettaglio le condizioni in cui si troveranno a operare le paratoie (figg. 10b e 11b). Queste ulteriori prove sono state effettuate in Olanda presso il Delft Hydraulics Institute.

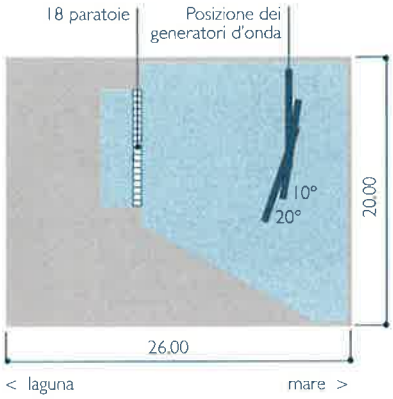
Sulla base dei risultati è stato elaborato il progetto di massima delle opere mobili per la regolazione dei flussi di marea in laguna e sono stati allestiti i modelli fisici necessari per le prove per il dimensionamento finale delle paratoie. In questo caso i modelli riproducono le bocche lagunari e le opere mobili nella collocazione prevista nel progetto di massima (fig. 12). Questa ulteriore serie di prove, attualmente in corso al Centro sperimentale per modelli idraulici di Voltabarozzo, vicino a Padova, fornirà informazioni per la progettazione esecutiva delle opere.

In parallelo alle prove su modello fisico sono stati sviluppati modelli matematici con l'obiettivo di studiare in dettaglio alcune situazioni particolari (per esempio la fase di abbassamento delle paratoie dopo un'alta marea) e di poter estrapolare i risultati dei modelli fisici in relazione a diverse possibili condizioni al contorno.

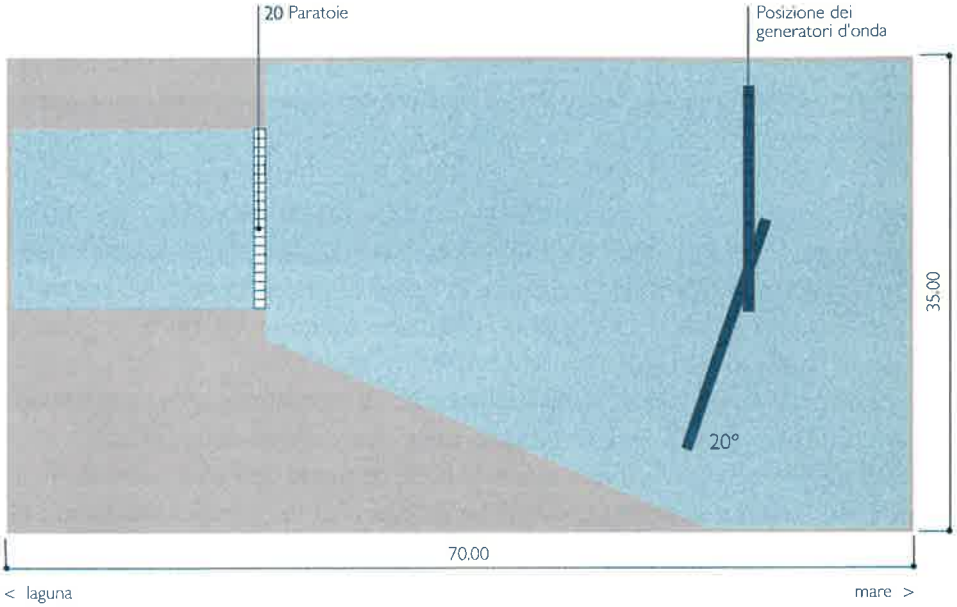
Come si è detto, prove e analisi sono state integrate da sperimentazioni in scala reale dei componenti che assicurano il funzionamento del sistema (fig. 13).

L'impianto sperimentale per poter effettuare queste analisi è stato chiamato MO.S.E. Esso riproduce in scala reale una paratoia, i sistemi cerniera-connettore, gli ammortizzatori, i sistemi per spiazzare l'acqua dalle paratoie mediante aria compressa, i sistemi per regolarne e per misurarne l'inclinazione in esercizio, le vernici protettive, i sistemi per rimuovere la sabbia che eventualmente si fosse depositata nel recesso che deve ospitare la paratoia in condizioni di riposo. Per ciascun componente sono state sperimentate numerose alternative e individuate, per ciascuno di essi, quelle più affidabili.

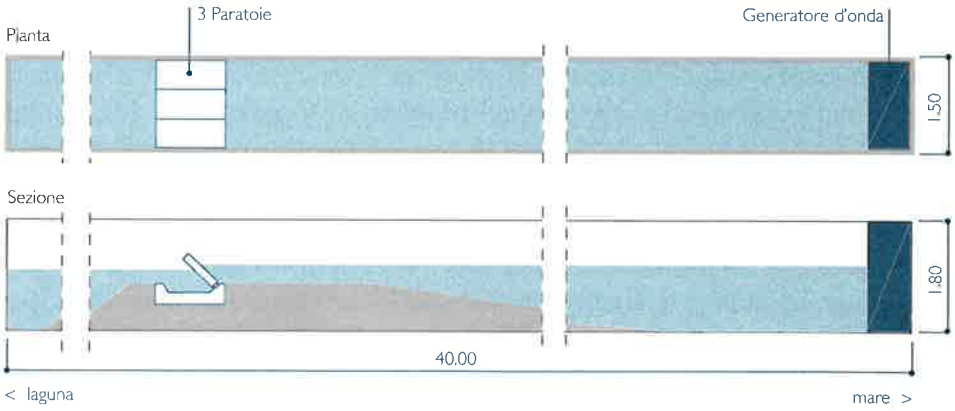
Il MO.S.E. è rimasto operativo per quattro anni, dal 1988 al 1992, nel canale di Treporti, alla bocca di porto di Lido.



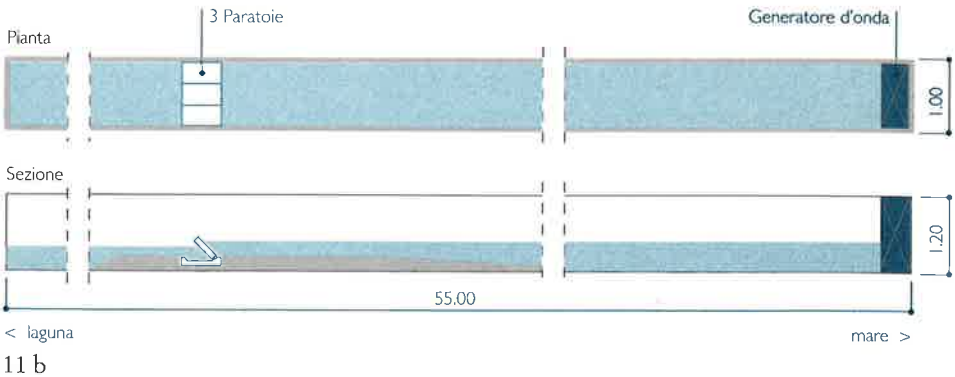
10 a



10 b

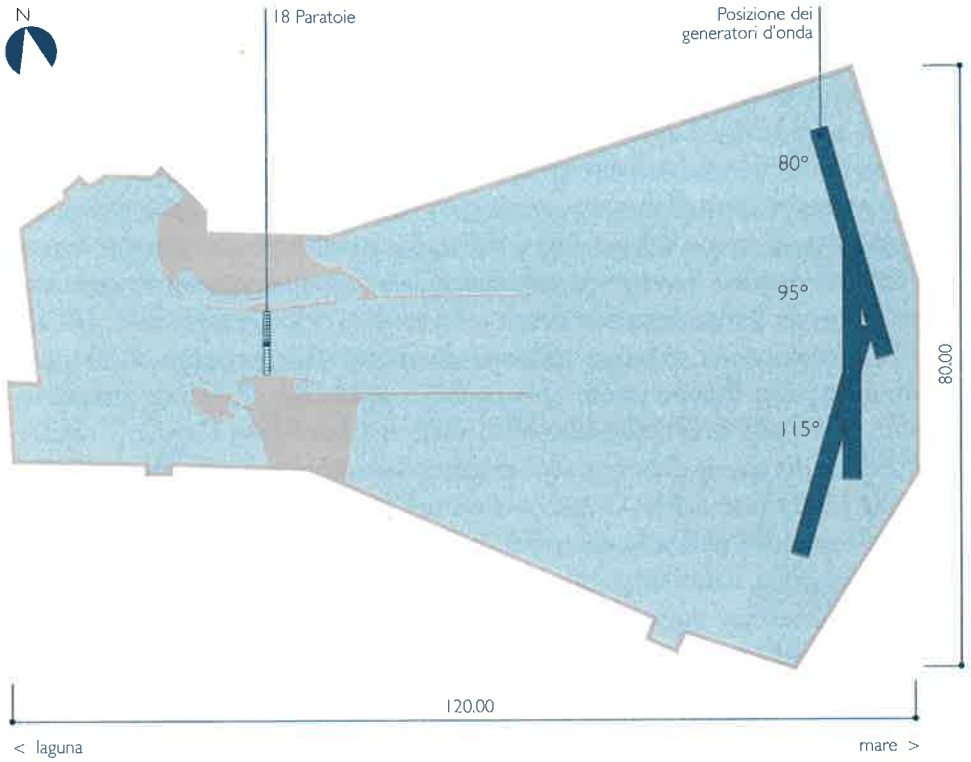


11 a



11 b

Figg. 10-11. Prove su modelli fisici. Nelle immagini 10 a e 11 a sono riportate, quotate, la vasca e la canaletta (entrambe in scala 1:40) utilizzate per la prima serie di studi eseguita per verificare il comportamento delle paratoie in funzione e per ottimizzare la configurazione complessiva delle opere alle bocche di porto. Le immagini 10 b e 11 b illustrano invece la vasca (in scala 1:30) e la canaletta (in scala 1:60) impiegate per una successiva serie di prove. Tutte le figure rappresentano esattamente, con le dimensioni indicate, la forma dei modelli utilizzati



12

Fig. 12. Modello fisico della bocca di Chioggia in scala 1:60. Questo modello è solo uno di quelli in opera presso il Centro sperimentale per modelli idraulici di Voltabarozzo (Padova) e utilizzati per ottimizzare le opere mobili. Gli altri sono: un modello in scala 1:64 della bocca di porto di Lido e due modelli, in scala 1:60 e 1:80, della bocca di porto di Malamocco

13 a

Fig. 13. Modulo sperimentale elettromeccanico (MO.S.E.). Si tratta del prototipo in scala reale di una paratoia ed è stato costruito allo scopo di effettuare specifiche sperimentazioni finalizzate alla messa a punto delle opere mobili alle bocche di porto. Per effettuare le prove su una sola paratoia (13a) è stato necessario inserirla in uno scafo che ne consente l'installazione e che comprende 4 torri perimetrali, 4 colonne d'angolo e una serie di ulteriori elementi strutturali di servizio, dove sono collocati, tra l'altro, gli impianti per il funzionamento della paratoia, la sala controllo, gli uffici (13b). Questi elementi in vista costituiscono la struttura perimetrale del MO.S.E. e non compariranno in alcun modo nel definitivo sistema di opere mobili per la difesa dalle acque alte che non avrà bisogno di alcuna struttura intermedia di sostegno

13 b

PRINCIPALI COMPONENTI FUNZIONALI

È noto che all'aumentare dei componenti inseriti in un sistema, con lo scopo di migliorarne l'affidabilità, si riduce la probabilità di mancati funzionamenti, ma aumenta il numero di interventi di manutenzione.

Nel caso dei componenti che assicurano il sollevamento e l'abbassamento delle paratoie, la scelta del numero e delle caratteristiche è strettamente legata alla loro collocazione. Se vengono collocati sulla o nella paratoia, sono raggiungibili soltanto con sommozzatore o con il sollevamento della paratoia fuori dall'acqua. Se i componenti vengono collocati all'interno della struttura di alloggiamento delle paratoie sono invece ispezionabili e sostituibili all'asciutto attraverso gallerie di servizio facilmente accessibili dalle strutture fisse ("spalle") situate sulle sponde del canale di bocca, alle estremità della schiera di paratoie.

Nella prima fase del MO.S.E., conclusa nel 1989, è stata sperimentata una soluzione ottimale per la funzionalità della paratoia, ma che collocava all'interno della stessa alcuni impianti. L'analisi di affidabilità di questo sistema ha dimostrato che con questa soluzione la funzionalità poteva essere effettivamente ottenuta, ma con ben 79 interventi annui (calcolati per le quattro schiere) per la sostituzione dei componenti guasti.

Il sistema è stato successivamente ottimizzato riducendo al massimo il numero di componenti collocati all'interno delle paratoie e ottenendo così un livello di affidabilità uguale al precedente con circa 2 soli interventi annui per la sostituzione dei componenti guasti.

Questo sistema è stato provato con successo durante l'ultima fase di sperimentazione del MO.S.E.

I componenti speciali rimasti sulle paratoie, nel progetto di massima, sono: i gruppi cerniera-connettore, gli strumenti per rilevare e controllare l'inclinazione delle paratoie, gli ammortizzatori.

I componenti più importanti sono i gruppi cerniera-connettore che vincolano alle strutture di alloggiamento le paratoie, consentendone però la libera rotazione per effetto della spinta di galleggiamento. Inoltre il collegamento alle strutture di alloggiamento è tale da escludere la necessità di impiegare sommozzatori per sganciare la paratoia quando la si debba rimuovere per manutenzione. Ancora, il dispositivo per l'immissione di aria compressa per l'esecuzione delle manovre e la strumentazione per rilevare l'inclinazione delle paratoie passano attraverso i connettori, escludendo così la necessità di qualsiasi intervento subacqueo esterno.

La soluzione proposta nel progetto di massima è il risultato di un'ampia ricerca sui dispositivi adottati dall'industria di produzione petrolifera e già disponibili sul mercato. Essi sono utilizzati per il collegamento dei pozzi petroliferi su alti fondali e svolgono funzioni del tutto simili a quelle necessarie per le paratoie con la sola differenza che attraverso di essi transita petrolio

greggio anziché aria compressa. Il primo gruppo sperimentato sul MO.S.E. è prodotto negli Stati Uniti da una società che ha un'esperienza ventennale in questo specifico campo.

In base ai risultati di questa sperimentazione sono stati studiati altri due gruppi cerniera-connettore, entrambi di produzione italiana, con caratteristiche più specifiche per l'applicazione alle paratoie, migliorati rispetto ai precedenti riguardo alle tolleranze ammesse per eseguire la connessione con la struttura di alloggiamento, ai tempi per eseguire questa operazione e all'affidabilità della giunzione. La soluzione adottata nel progetto di massima (l'ultima sperimentata sul MO.S.E.) è illustrata nella figura 14.

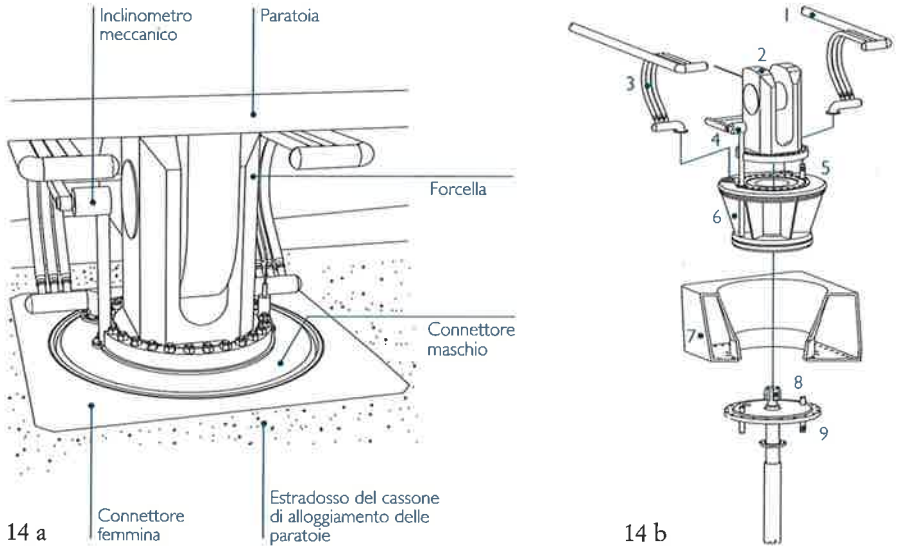


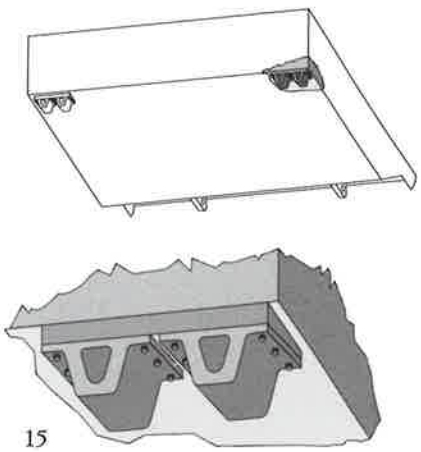
Fig. 14. Gruppo cerniera connettore. Il gruppo cerniera-connettore (14a) è composto da un elemento maschio, vincolato alla paratoia attraverso la cerniera, e da un elemento femmina vincolato invece alla struttura di alloggiamento. Il collegamento di forza tra i due elementi è ottenuto con un sistema a baionetta manovrato mediante pistone idraulico dall'interno della struttura di alloggiamento. All'interno del connettore l'aria compressa passa attraverso due tubi del diametro di 15 cm. Nel passaggio dal connettore alla paratoia ciascuno dei due tubi si scompone in sei tubi flessibili con diametro minore per poter assecondare i movimenti di rotazione della paratoia. Nell'immagine 14b il gruppo cerniera-connettore è scomposto nei suoi principali componenti funzionali: tubo per l'immissione dell'aria nella paratoia (1), forcella (2), tubi flessibili (3), inclinometro meccanico (4), inclinometro elettronico (5), connettore maschio mobile (6), connettore femmina fisso (7), innesto a baionetta (8), connettore elettrico per inclinometro elettronico (9)

Le sperimentazioni effettuate sul MO.S.E. hanno dimostrato che l'operazione di aggancio e di sgancio della connessione è rapida e può essere eseguita in ogni momento nella massima sicurezza.

Gli altri componenti che rimangono vincolati alla paratoia sono gli ammortizzatori, cioè quegli elementi che assorbono l'energia residua della paratoia quando questa, nella manovra di abbassamento, rientra nel vano di alloggiamento in posizione di riposo. Anche per questi componenti sono state sperimentate sul MO.S.E. diverse soluzioni alternative: sono stati provati ammortizzatori di tipo oleodinamico con funzionamento a gas inerte e ammortizzatori di tipo più corrente realizzati con polimeri variamente deformabili sotto carico.

In base ai risultati delle sperimentazioni, nel progetto di massima è stata adottata la soluzione costituita da due coppie di ammortizzatori di gomma del tipo normalmente utilizzato come smorzatore di urti delle navi durante le manovre di accosto alle banchine portuali (fig. 15).

Fig. 15. Ammortizzatori di gomma


15

SISTEMA PER LA MANUTENZIONE

Le paratoie necessitano di una periodica manutenzione, essenzialmente per la pulizia interna ed esterna, per il ripristino della verniciatura e della protezione catodica e per il controllo e la sostituzione dei componenti di cui si è detto nel paragrafo precedente. Queste operazioni non possono essere eseguite sul posto come avviene, almeno per gli interventi correnti, nel caso di barriere con paratoie, di tipo più tradizionale, con pile intermedie.

Nel caso di paratoie tradizionali, infatti, la manutenzione ordinaria può essere eseguita localmente, mentre è comunque indispensabile studiare sistemi che consentano la rimozione e l'invio in cantiere delle paratoie in occasione degli interventi più importanti.

Le paratoie a spinta di galleggiamento devono invece essere rimosse periodicamente e sostituite con elementi di riserva per rendere possibile la manutenzione ordinaria.

In relazione al tipo di struttura adottata e avendo eliminato qualsiasi impianto all'interno delle paratoie, si è stimato che in media dovrà essere possibile eseguire la sostituzione di ciascuna di esse, per manutenzione, ogni 10 anni; ciò significa sostituire mediamente 2 paratoie l'anno per ogni sbarramento.

Ai fini progettuali, per il dimensionamento prudenziale dei sistemi per la manutenzione, si è considerato di rimuovere per manutenzione ordinaria le paratoie ogni 5 anni e quindi di sostituirne 4 l'anno.

Considerando inoltre gli eventuali guasti ai componenti, il numero di sostituzioni complessive assunte in progetto è di 5 l'anno.

Le fasi più complesse di queste operazioni sono quelle per il sollevamento e per la rimozione delle paratoie dalla loro sede. È stato perciò necessario mettere a confronto numerose soluzioni alternative.

Si è studiato l'impiego di diversi mezzi per il sollevamento: un pontone attrezzato con gru di adeguata capacità, un catamarano munito di argani, un pontone con gambe retrattili sempre completo di gru, un carro-portico.

La soluzione adottata permette di eseguire la sostituzione di una paratoia in meno di 10 ore senza l'intervento di mezzi marittimi o di sommozzatori.

Questo risultato è stato ottenuto attrezzando ciascun varco di un carro-portico che si muove su rotaie poste sulla sommità delle strutture di alloggiamento delle paratoie e che, in condizioni di riposo, può essere ricoverato in una zona dove è possibile togliere l'acqua e dove è anche possibile eseguire la manutenzione della parte del carro-portico posta sotto al livello del mare.

La disponibilità di queste attrezzature direttamente sulle spalle consente di eseguire anche alcune ispezioni senza l'impiego di mezzi marittimi e, soprattutto, è garanzia di tempestività di intervento in caso di guasti riparabili solo sollevando la paratoia fuori dall'acqua.

Si è inoltre valutata l'opportunità di effettuare la manutenzione o local-

mente, attrezzando ciascun varco con un cantiere, oppure mediante la creazione di un centro di manutenzione unico per le paratoie di tutte le bocche.

Per ogni soluzione si sono studiati il ciclo di operazioni da eseguire periodicamente su ciascuna paratoia, le dimensioni dei cantieri (il dato è di interesse soprattutto per la manutenzione locale), il numero di addetti necessari per eseguire la manutenzione nei tempi desiderati e il grado di operatività dei cantieri in relazione al numero di paratoie da sistemare (5 l'anno utilizzando cantieri locali, 20 l'anno impiegando un unico cantiere centralizzato).

Per entrambe le soluzioni è previsto che la manutenzione sia affidata a un cantiere già esistente in laguna il quale in un caso potrà operare con le proprie strutture e nell'altro con quelle disponibili presso le spalle delle opere mobili.

Nel progetto di massima sono stati dimensionati gli elementi principali che compongono il sistema complessivo per la manutenzione: i carri-portico, i bacini di ricovero dei carri-portico, i mezzi per la movimentazione a terra delle paratoie, il pontone per il trasferimento delle paratoie al cantiere centralizzato. Si è verificato che esiste la possibilità di porre in opera le rotaie con le tolleranze richieste dai costruttori per la traslazione del carro-portico (1% di inclinazione sia sull'orizzontale che sulla verticale) ed è stato studiato un sistema che consente la sostituzione delle rotaie in caso di usura delle stesse.

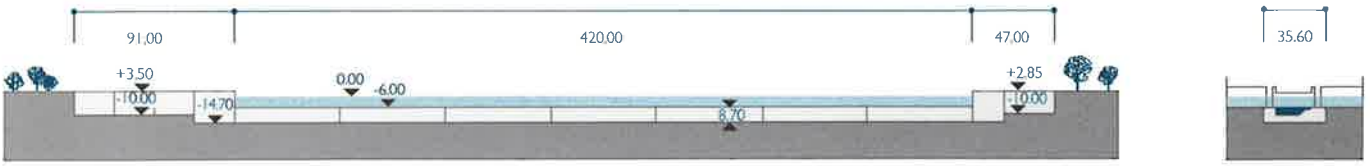
STRUTTURE PRINCIPALI DELLA SCHIERA DI PARATOIE

Le paratoie e i mezzi di manutenzione sono installati su strutture le cui dimensioni e le cui caratteristiche sono state studiate per assicurare la funzionalità dell'impianto, per distribuire nel modo più uniforme possibile i carichi sui terreni di fondazione e per limitare l'impatto dei cantieri di costruzione.

Queste strutture che, per funzioni e dimensioni, rappresentano la parte principale della schiera sono: le strutture per l'alloggiamento delle paratoie, quelle di spalla, quelle per il ricovero dei carri-portico (fig. 16).

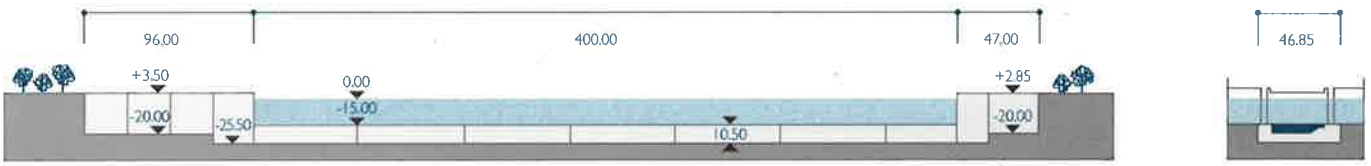
Le loro dimensioni sono connesse alla larghezza dei varchi di bocca, alle profondità dei fondali, all'entità dei carichi trasmessi dal moto ondoso, dal dislivello tra mare e laguna, dalle spinte delle terre, e alle dimensioni degli impianti da installare al loro interno. Non cambiano invece le funzioni cui tali strutture devono assolvere e quindi le loro caratteristiche tipologiche.

Si può osservare che le paratoie e le strutture di alloggiamento sono sempre collocate all'interno di uno scavo subacqueo e quindi non sporgono mai al di sopra dei fondali indicati, nel progetto preliminare di massima, come ottimali. Queste strutture sono comunque collocate nella parte più profonda dell'attuale canale di bocca e la loro altezza è confrontabile con la profondità degli scavi. Le strutture di spalla e di ricovero dei carri-portico sono collocate ai lati del canale di bocca in corrispondenza dei fondali più ridotti, dove

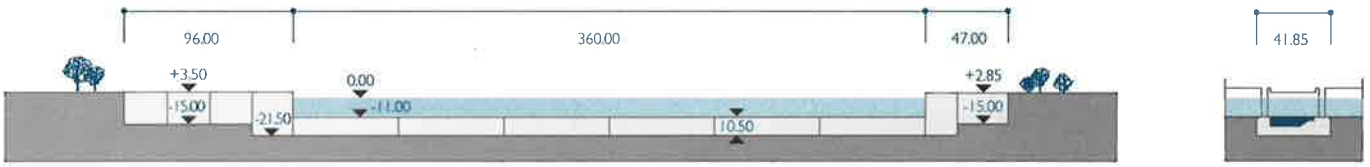


Sezione schematica di Lido-Treporti

Sezione schematica di Lido-S. Nicolò



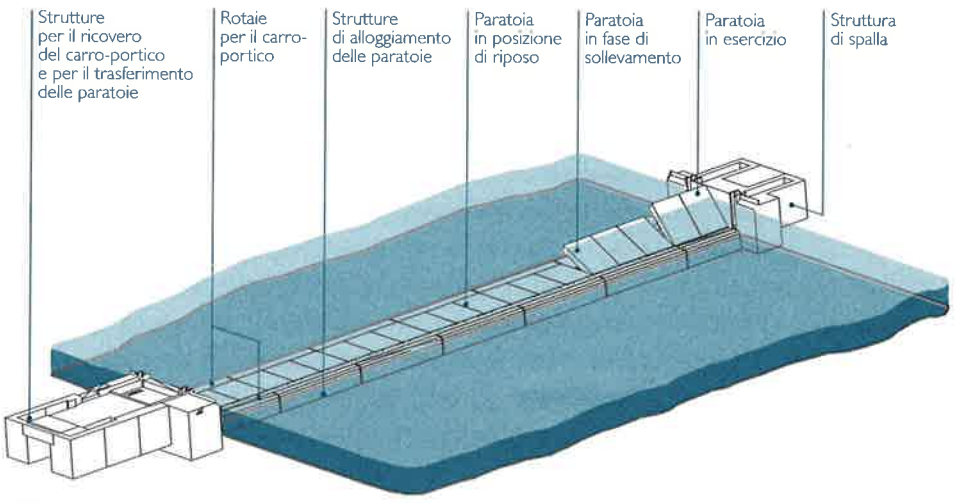
Sezione schematica di Malamocco



Sezione schematica di Chioggia

16 a

Fig. 16. Caratteristiche e dimensioni delle strutture principali necessarie al funzionamento delle opere mobili. Le sezioni longitudinali e trasversali (16 a) si riferiscono, dall'alto verso il basso, alle bocche di porto di Lido-Treporti, Lido-S. Nicolò, Malamocco, Chioggia. L'immagine 16 b è un'assonometria di una schiera di paratoie. Si può osservare come le strutture di alloggiamento e le paratoie in posizione di riposo non sporgano in alcun modo dal fondale dei canali di bocca



16 b

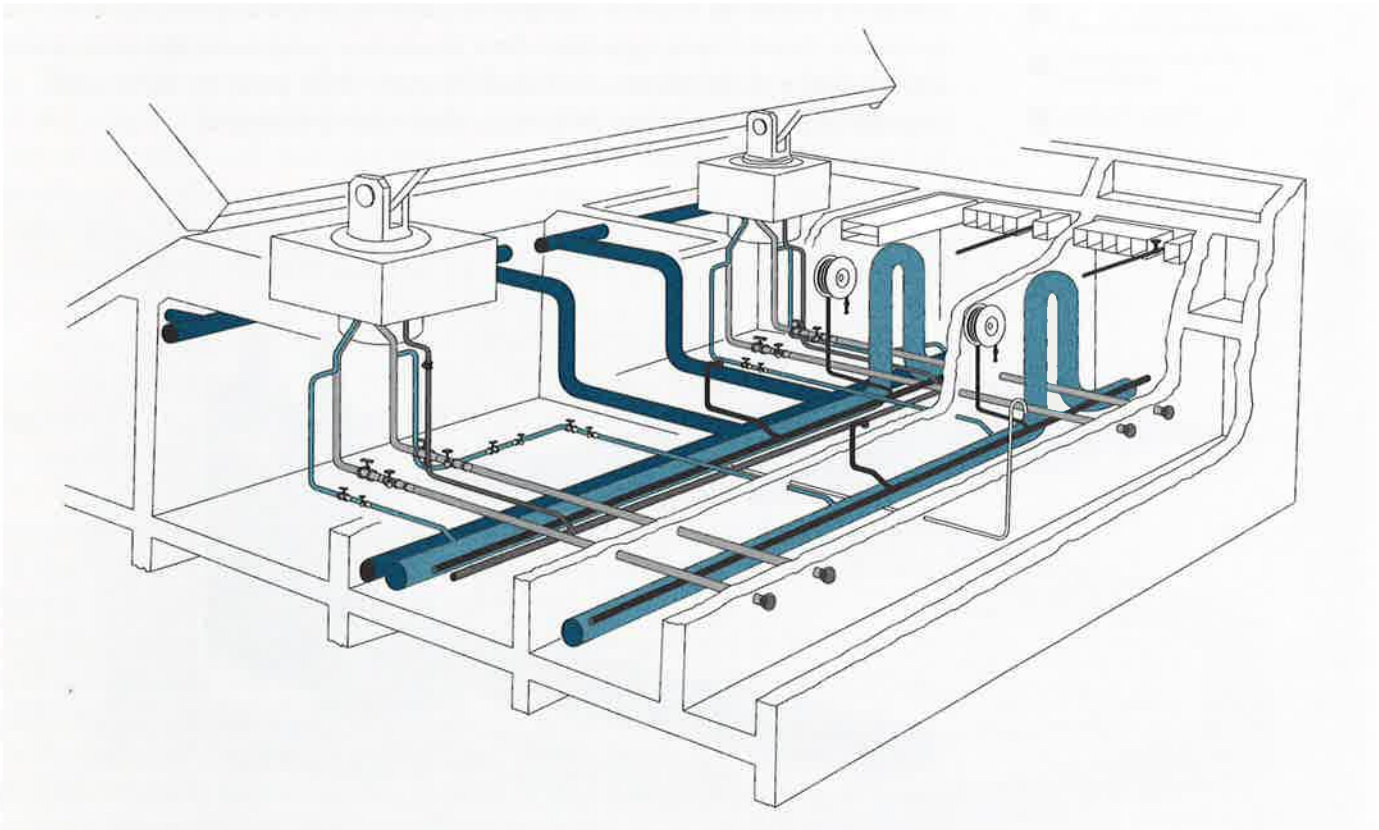
quindi, nonostante le loro dimensioni, contribuiscono alla modifica della sezione del canale di bocca in modo molto marginale.

All'interno delle strutture devono essere collocati gli impianti necessari al funzionamento del sistema che sono:

- gli impianti per l'immissione dell'aria nelle paratoie;
- gli impianti per lo scarico dell'aria dalle paratoie;
- gli impianti per la ventilazione di tutti i vani posti sotto al livello del mare per eliminare il rischio di ristagno di gas pericolosi;
- gli impianti ausiliari per il lavaggio dei recessi delle paratoie, gli impianti elettrici di controllo e gli impianti per l'antincendio.

La disposizione delle gallerie, e degli impianti al loro interno (fig. 17), mette in evidenza una caratteristica fondamentale del sistema che si ripete per tutto il suo sviluppo, fino agli impianti di compressione dell'aria e di produzione dell'energia: gli impianti sono collocati in due vani totalmente separati con lo scopo di evitare che un eventuale incidente possa trasmettere i suoi effetti ad altre parti dell'impianto. Ciascuno dei due vani è dimensionato per assicurare la piena efficienza delle paratoie.

Fig. 17. Gli impianti all'interno delle strutture di alloggiamento delle paratoie. Le gallerie che contengono gli impianti vengono anche utilizzate per la manutenzione e per raggiungere i locali da dove è possibile predisporre i connettori alle operazioni di attacco e di distacco delle paratoie



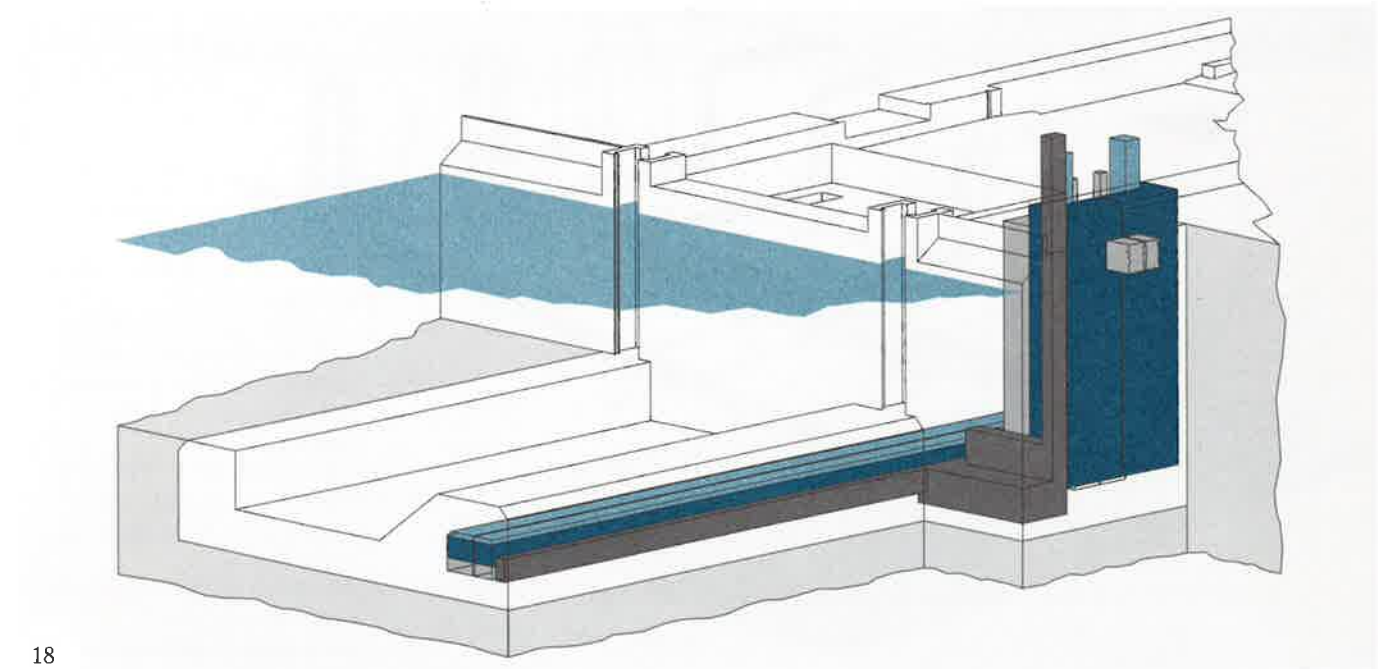
17

Tutti gli impianti collocati nelle strutture di alloggiamento delle paratoie corrono al loro interno fino a raggiungere le strutture di spalla poste alle due estremità. In particolare la mandata e lo scarico dell'aria e gli impianti ausiliari raggiungono una sola spalla, quella sulla quale vengono installati gli impianti per la produzione di aria compressa e di energia e la sala controllo. La ventilazione viene invece distribuita in modo simmetrico tra le due spalle in modo da ridurre le dimensioni e il numero dei canali da installare all'interno di ciascuna galleria.

Le dimensioni delle gallerie e le caratteristiche e la collocazione degli impianti rimangono inalterate per tutto lo sviluppo delle strutture di alloggiamento delle paratoie; in corrispondenza delle spalle le aree occupate dagli impianti si organizzano in modo diverso: da uno sviluppo in orizzontale delle gallerie si passa a uno sviluppo in verticale nelle strutture di spalla, con dimensioni più ampie delle precedenti in relazione ai raggi di curvatura minimi degli impianti e alle esigenze di manutenzione (fig. 18).

Nella progettazione delle strutture principali delle schiere si deve tenere conto delle ulteriori esigenze per la sostituzione e per il trasferimento delle paratoie al cantiere di manutenzione. In corrispondenza di ciascuna spalla è previsto il bacino di ricovero del carro-portico. Sulla spalla principale è inoltre necessario ricavare aree aggiuntive dove tenere una paratoia sempre pronta alla sostituzione e dove effettuare il trasferimento delle paratoie dalla spalla al pontone adibito al trasporto delle stesse al cantiere o viceversa.

Fig. 18. Strutture di spalla. Esse contengono gli impianti per la mandata dell'aria alle paratoie, quelli per lo scarico dell'aria dalle stesse, quelli per la ventilazione delle gallerie e quelli ausiliari. Le strutture utilizzate per l'accesso dei tecnici addetti all'ispezione e alla manutenzione sono dotate di scale e di ascensori che conducono dal piano campagna, situato a quota +3,5 m, al livello delle gallerie che sono poste, nelle diverse schiere, a quote variabili: -13 m a Lido-Treporti, -18 m a Lido-S. Nicolò e Chioggia, -22 m a Malamocco



18

QUESTIONE GEOTECNICA E FONDAZIONI

Il progetto di opere di questa importanza e di queste dimensioni deve essere accompagnato in ogni fase del suo sviluppo da adeguate campagne geotecniche. Indagini e analisi geotecniche sono state organizzate, in questa fase del lavoro, per fornire una visione d'insieme dei terreni di fondazione e delle loro caratteristiche piuttosto che per dare informazioni puntuali tipiche di una progettazione esecutiva. Esse non hanno esaurito quindi gli approfondimenti necessari per l'esecuzione delle opere, ma hanno fornito informazioni sufficienti per mettere a confronto tipologie alternative di fondazione e per prendere una decisione in proposito.

In sede di redazione del progetto esecutivo e in base alle decisioni che verranno prese, riguardo alla tipologia delle fondazioni, potrà essere completata la campagna di indagini attuando un programma di prove e di campionamenti specifici per il tipo di soluzione adottato e idonei per consentirne i dimensionamenti a livello esecutivo e l'ottimizzazione.

Le indagini eseguite per questa fase del progetto hanno messo in evidenza una situazione geotecnica caratterizzata da un'alternanza pressoché continua di straterelli, ora coesivi ora sabbiosi, di spessore variabile da alcuni millimetri ad alcuni metri.

Per fare fronte a una situazione così articolata, e tenuto conto degli obiettivi del progetto di massima, si è effettuata una ricostruzione delle caratteristiche di portanza e di deformabilità dei terreni di fondazione estremamente prudenziale, selezionando sempre valori prossimi a quelli più bassi ricavati dalle prove di laboratorio e adottando come stratigrafia di riferimento per ciascuna bocca quella più cautelativa e cioè quella con il maggior spessore di strati deformabili.

Anche per l'analisi dei cedimenti differenziali tra strutture adiacenti si è adottato un procedimento prudenziale. Si è infatti considerato che in uno spazio di 60 metri (la lunghezza dei cassoni di alloggiamento delle paratoie) possano coesistere la stratigrafia "più deformabile" tra quelle incontrate dai sondaggi e la stratigrafia "meno deformabile". Si è anche ipotizzato che, contemporaneamente, i parametri geotecnici possano essere del 30% più elevati di quelli già particolarmente prudenziali considerati come riferimento per i calcoli di stabilità e dei cedimenti assoluti.

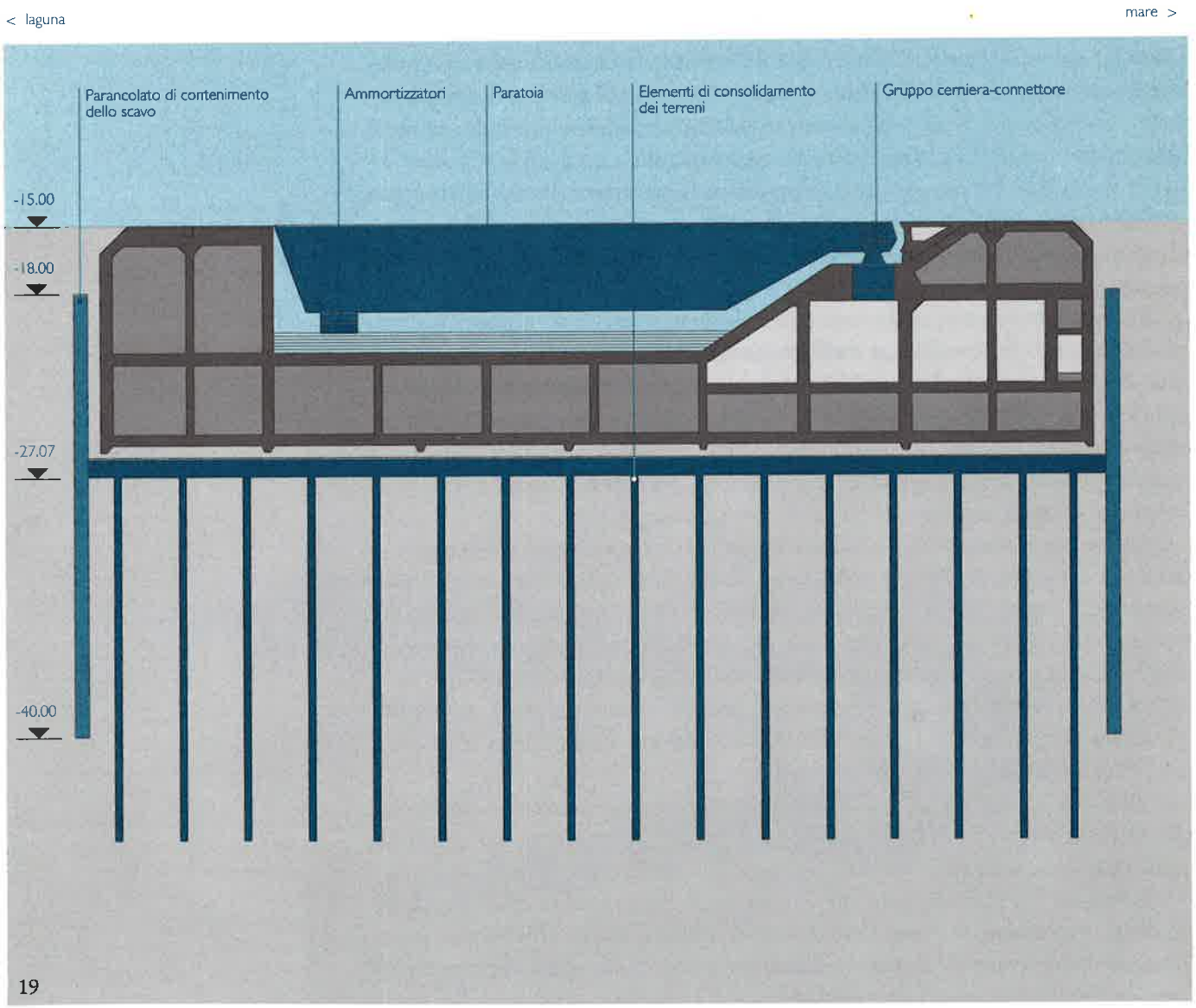
Sulla base di queste informazioni sono state messe a confronto tre tipologie di fondazioni che offrono un livello di sicurezza crescente nei confronti della stabilità e della riduzione dei cedimenti assoluti e differenziali.

Si sono in particolare esaminate: la soluzione che prevede l'appoggio diretto delle strutture sul terreno; la soluzione di appoggio delle strutture su terreno consolidato con pali di piccolo diametro o, ancora, la soluzione con pali di grande diametro vincolati alle strutture.

Per i tre casi sono state eseguite analisi della capacità portante dei terreni e delle fondazioni, sono state eseguite analisi sul comportamento dell'insieme terreno-struttura nei confronti dei carichi dinamici e sono stati infine calcolati i cedimenti assoluti e differenziali delle diverse parti delle nuove opere.

Le analisi svolte hanno dimostrato che la soluzione di appoggio diretto delle strutture sul terreno, consolidato con pali di piccolo diametro, è fattibile nelle condizioni geotecniche della zona dell'intervento e soddisfa pienamente le esigenze funzionali e di sicurezza richieste. Essa, inoltre, offre una notevole flessibilità di adattamento a condizioni geotecniche anche molto diverse da quelle considerate nel progetto di massima (fig. 19).

Fig. 19. Sezione trasversale tipo della struttura di fondazione delle paratoie



19

PROTEZIONE DEI FONDALI

La configurazione dei fondali alle bocche lagunari è il risultato dell'azione esercitata dalle onde e dalle correnti sui sedimenti del fondale, data l'attuale configurazione dei moli foranei e delle sponde dei canali di bocca.

È noto che ogni modifica a queste strutture può creare variazioni alle profondità dei fondali tanto più grandi quanto più importanti sono le modifiche alle strutture di sponda. Esempi di questa particolare sensibilità dei fondali alle bocche sono evidenti a Chioggia, dove la costruzione del forte di S. Felice ha prodotto una fossa profonda 32 metri, e a Malamocco dove il molo delle Ceppe ha provocato una fossa analoga, profonda 45 metri.

La configurazione delle nuove opere è stata studiata in modo da minimizzare le modifiche alle sponde, il restringimento delle sezioni dei canali di bocca e, più in generale, in modo da evitare l'instaurarsi di vortici permanenti e quindi di fenomeni che innescano erosioni concentrate.

In base a questi criteri le opere di spalla sono sempre raccordate alle sponde dei canali o sono collocate in zone dove i flussi principali delle correnti sono molto ridotti.

Le paratoie durante le manovre di sollevamento possono invece dare luogo a concentrazioni del flusso della corrente di notevole entità. È infatti previsto che la manovra di chiusura delle bocche venga eseguita sollevando 3-4 paratoie per volta in un campo di corrente che, nelle ultime fasi della chiusura, può raggiungere valori di velocità di circa 4,5 m/s pari a più di 3 volte il valore della velocità in assenza delle opere. Il dimensionamento della protezione dei fondali è stato effettuato considerando questa condizione, e non è ammesso alcun danno in relazione alla frequenza con cui essa si può verificare.

La protezione è costituita da strati di pietrame con dimensione crescente verso lo strato superiore. Gli strati inferiori hanno funzione di filtro ed evitano l'asportazione dei sedimenti fini di fondo. Lo strato superiore è invece dimensionato per resistere all'azione di trascinamento dovuto alle correnti.

Nel dimensionamento della protezione dei fondali si è anche prevista una condizione estrema di sbarramento in esercizio con una paratoia fuori servizio. Questo evento, che ha una probabilità di verificarsi molto bassa, può produrre velocità di corrente molto elevate che, in condizioni di marea eccezionale, raggiungono valori di 7 m/s. Per questa condizione sono stati accettati alcun danni, riparabili successivamente all'evento che li ha prodotti, che non comportano comunque alcun rischio per la funzionalità delle opere mobili. Va tenuto presente che le velocità delle correnti assumerebbero i valori considerati (7 m/s) solo dal lato verso la laguna; l'eventuale movimento del pietrame collocato sul fondale avverrebbe quindi a partire dalla schiera di paratoie. Dal lato verso il mare le velocità sarebbero molto più ridotte.

L'operazione di abbassamento delle paratoie non è risultata determinante

nel dimensionamento della protezione in quanto avviene in condizioni di equilivello o con un dislivello di marea negativo (più alto in laguna) limitato ad alcune decine di centimetri.

BACINI RIFUGIO E CONCHE DI NAVIGAZIONE

Per esigenze di sicurezza e per evitare di interrompere, durante la chiusura dei varchi in occasione di eventi di alta marea eccezionale, il transito di imbarcazioni da pesca e turistiche che costituiscono un elemento importante nell'attività economica della laguna, si è ritenuto indispensabile attrezzare ciascuna bocca con un bacino rifugio che comprende una conca di navigazione per il transito delle imbarcazioni minori.

I motivi di sicurezza sono legati sia alla necessità di offrire rifugio alle piccole imbarcazioni in difficoltà a causa delle condizioni meteomarine avverse che spesso accompagnano il fenomeno dell'acqua alta, sia alla necessità di permettere il transito dei mezzi di sorveglianza e di soccorso.

I bacini rifugio evitano i riflessi economici negativi creati dall'eventuale impedimento al transito durante la chiusura delle schiere di paratoie. Essi sarebbero sensibili sull'attività di pesca, in particolare per i pescherecci a ciclo giornaliero, e sull'attività turistica effettuata tramite le imbarcazioni veloci di tipo escursionistico (aliscafi e catamarani) per le quali i tempi di attesa durante la chiusura delle barriere sarebbero di un ordine di grandezza prossimo a quello di percorrenza dell'intero tragitto. Il dimensionamento dei bacini e delle conche di navigazione è stato effettuato in funzione:

- del tipo di imbarcazione che può utilizzare tale infrastruttura e quindi delle dimensioni e del pescaggio del natante;
- del numero di imbarcazioni che vi transitino o che vi rimangano ormeggiate;
- dell'altezza d'onda limite accettabile per il funzionamento delle conche;
- della possibilità di accedere al porto rifugio in sicurezza anche in caso di condizioni meteorologiche particolarmente sfavorevoli.

Poiché il tipo e il numero delle imbarcazioni che utilizzano i porti rifugio sono molto diversi nelle tre bocche, anche le dimensioni e le configurazioni di queste infrastrutture sono tra di loro alquanto diverse.

Nei confronti del moto ondoso, invece, il criterio da rispettare è comune a tutti e tre i bacini rifugio: infatti per poter accedere in sicurezza alla conca di navigazione è indispensabile che l'onda significativa nella zona più prossima ad essa non superi l'altezza di 0,5 m.

Anche il criterio per il dimensionamento della parte del bacino interessata all'ingresso delle imbarcazioni e alla loro manovra di arresto prima di giungere alle conche è analogo per le tre bocche di porto. Le imbarcazioni devono poter accedere ai bacini anche nelle condizioni meteomarine estreme, mante-

nendosi sempre a una distanza di sicurezza dai moli che, per i pescherecci e i rimorchiatori, è di circa 10-15 m.

RAPPRESENTAZIONE COMPLESSIVA DELLE OPERE

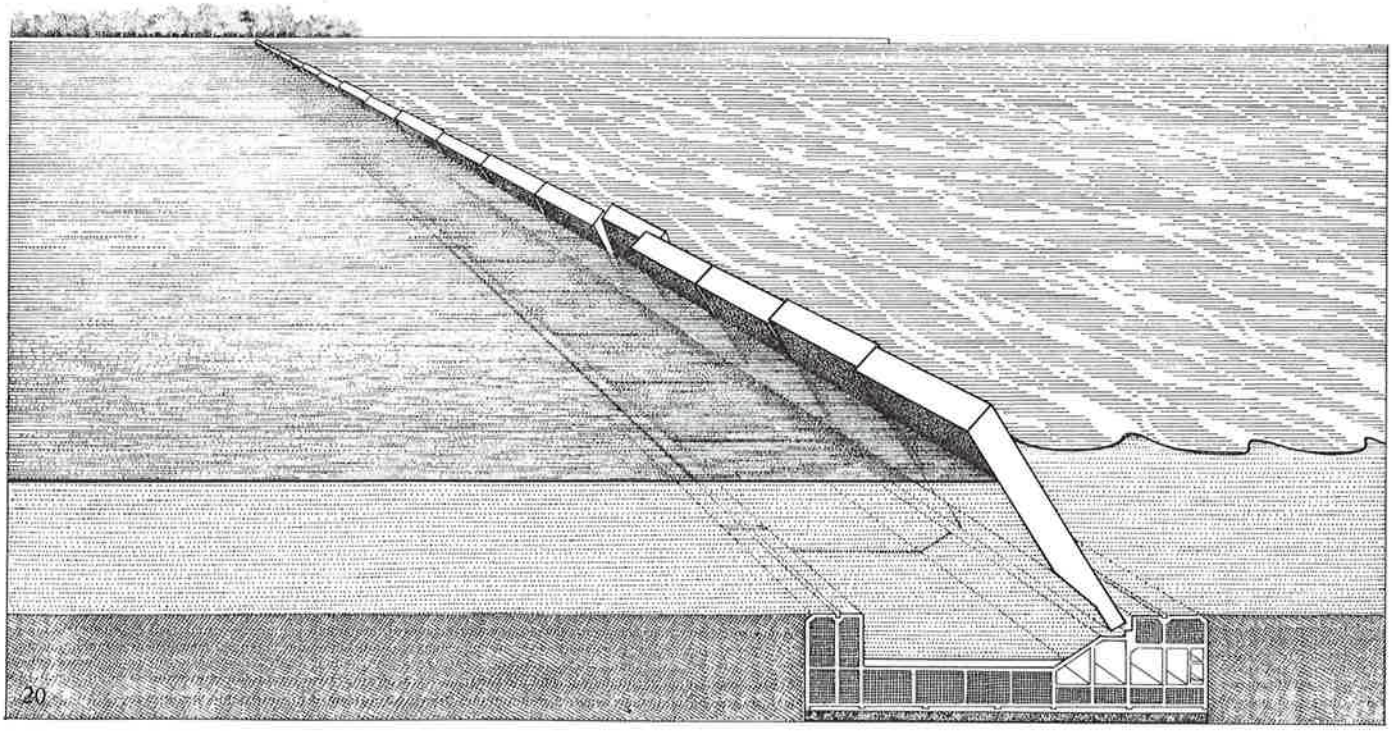
Le strutture e gli impianti assumono dimensioni e forme diverse in relazione alla profondità dei fondali, alla larghezza del varco e più in generale alla configurazione delle opere esistenti e alle caratteristiche del territorio e del paesaggio circostante.

Se si confrontano con le opere mobili già realizzate in altre parti del globo per risolvere problemi analoghi (illustrate all'inizio di questo articolo) è subito evidente l'importanza di aver imposto soluzioni senza pile intermedie.

Infatti, quando le opere mobili non sono in funzione i varchi lagunari restano completamente liberi da strutture e la corrente non subisce variazioni rispetto alla situazione attuale. Anche le strutture di spalla, indispensabili per realizzare un raccordo tra il territorio e le paratoie e per ospitare gli impianti e i bacini rifugio, sono state collocate in zone particolari dove le correnti sono ridotte. La parte emersa delle spalle è stata inoltre studiata per avere quote modeste e simili a quelle dei territori adiacenti. A varchi chiusi saranno visibili solo le parti emerse delle paratoie in funzione, affioranti dal mare (fig. 20).

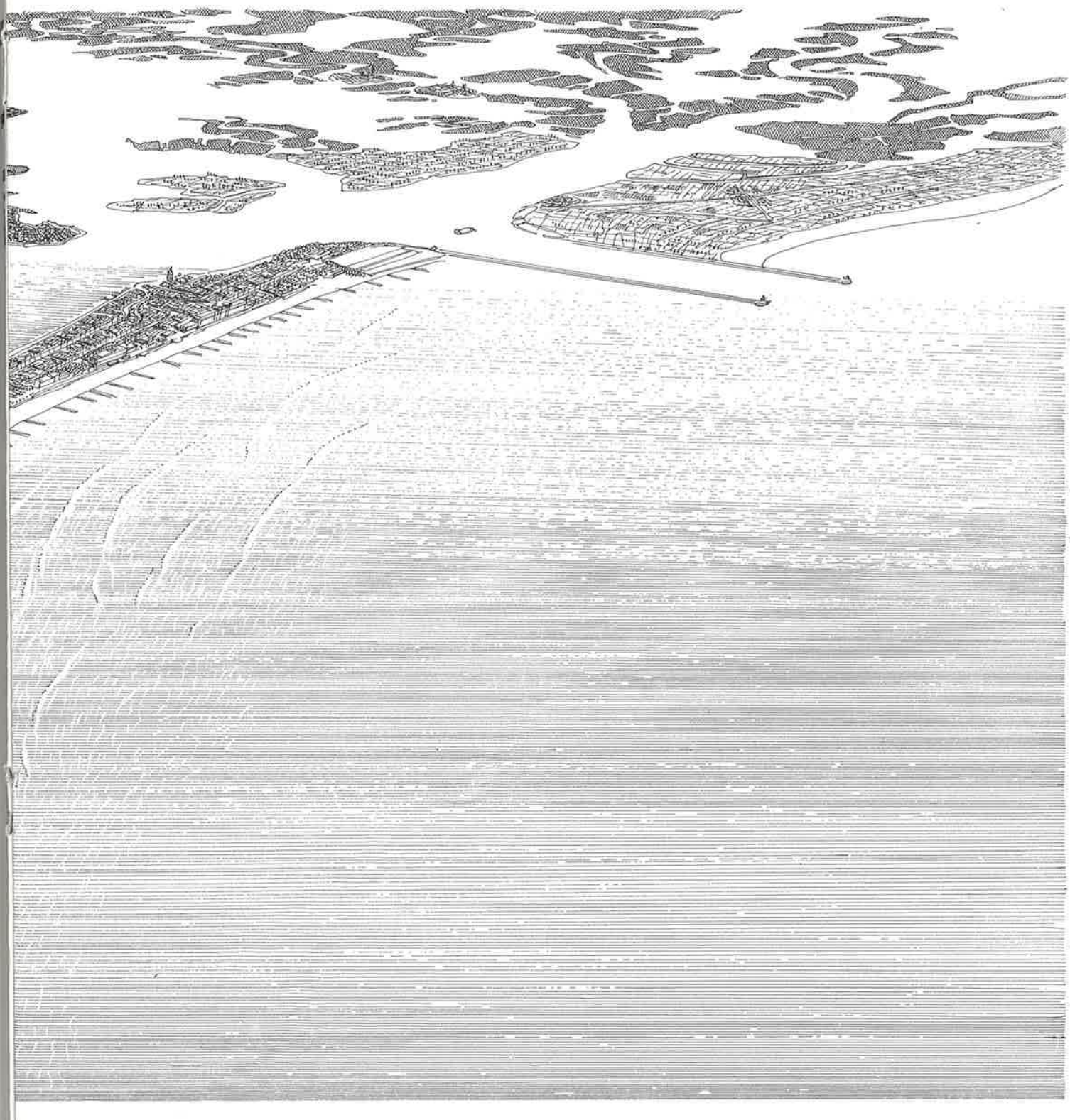
Fig. 20. Le paratoie in esercizio

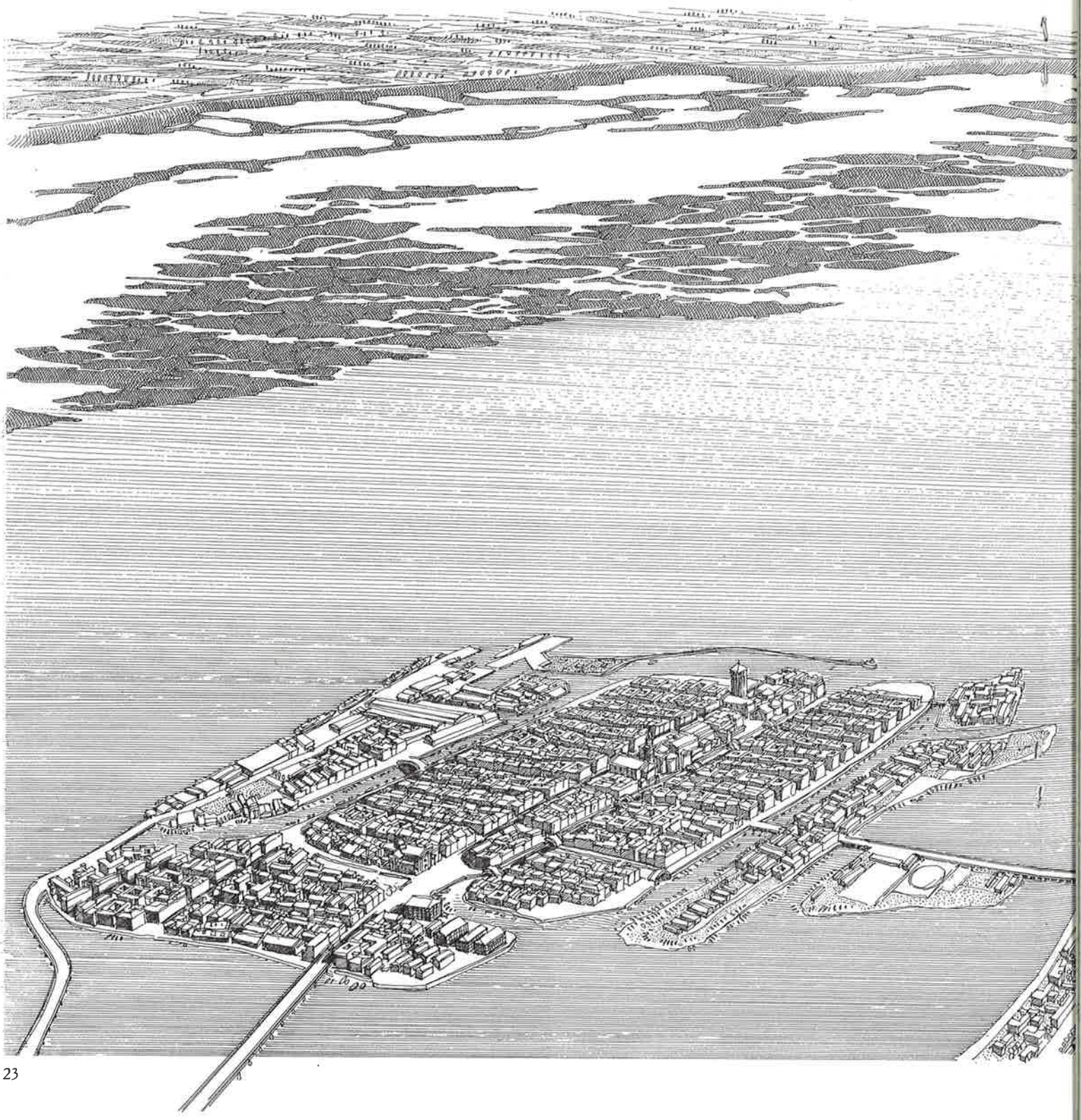
Figg. 21-22-23. Le bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia dopo la realizzazione degli interventi per la regolazione delle maree. Nei disegni delle pagine seguenti è rappresentato l'intero complesso di opere, comprese quelle previste per il rinforzo dei litorali, finalizzate alla difesa di Venezia e della sua laguna dall'aggressione del mare. Il varco alla bocca di Lido è ampio il doppio (circa 800 m) rispetto a quelli delle altre bocche



21

22





23