

6

# studio di una chiusura delle bocche di porto della laguna di venezia

T M T I T A L I A

GRUPPO DI PROGETTAZIONE



settembre 2004



**Certificato n° 10808/04/S**  
Secondo la Norma  
**ISO 9001:2000**  
Nella seguente Unità Operativa:  
Z.I. Castel Del Giudice (IS)

Registro Imprese di Venezia 02458170657 – C.C.I.A.A. di Venezia R.E.A. 315796 – Capitale Sociale € 206.400,00 i.v.

**TMT ITALIA S.p.A.**

Via Orsato, 3/D, 30175 - MARGHERA (VE)

Codice fiscale e Partita I.V.A. 02458170657

Tel. 041 – 93.74.25 - Fax 041 – 93.67.64

Web: [www.tmtitalia.com](http://www.tmtitalia.com) - E-mail: [info@tmtitalia.com](mailto:info@tmtitalia.com)

Stabilimento: Zona Industriale

CASTEL DEL GIUDICE (IS) E-mail: [production@tmtitalia.com](mailto:production@tmtitalia.com)

Tel. 0865/946242 – Fax 0865/946243



## PREMESSA

Scopo delle presenti note è illustrare brevemente il principio di funzionamento di un sistema di paratoie disposte in corrispondenza delle bocche di porto, atte a contrastare le maree eccezionali e di conseguenza contenere il fenomeno dell'acqua alta.

Ci si soffermerà nella illustrazione del funzionamento di una paratoia tipo in quanto il principio è estensibile al complesso nel suo insieme.

## PARATOIA TIPO

La paratoia tipo è un sistema costituito da due piloni connessi in corrispondenza del fondale da una struttura di collegamento. I piloni presentano sui fianchi una scanalatura subverticale per guidare e mettere in posizione, durante la fase di installazione, la struttura che in esercizio funziona da paratia.

La paratia tipo è illustrata in fig.1

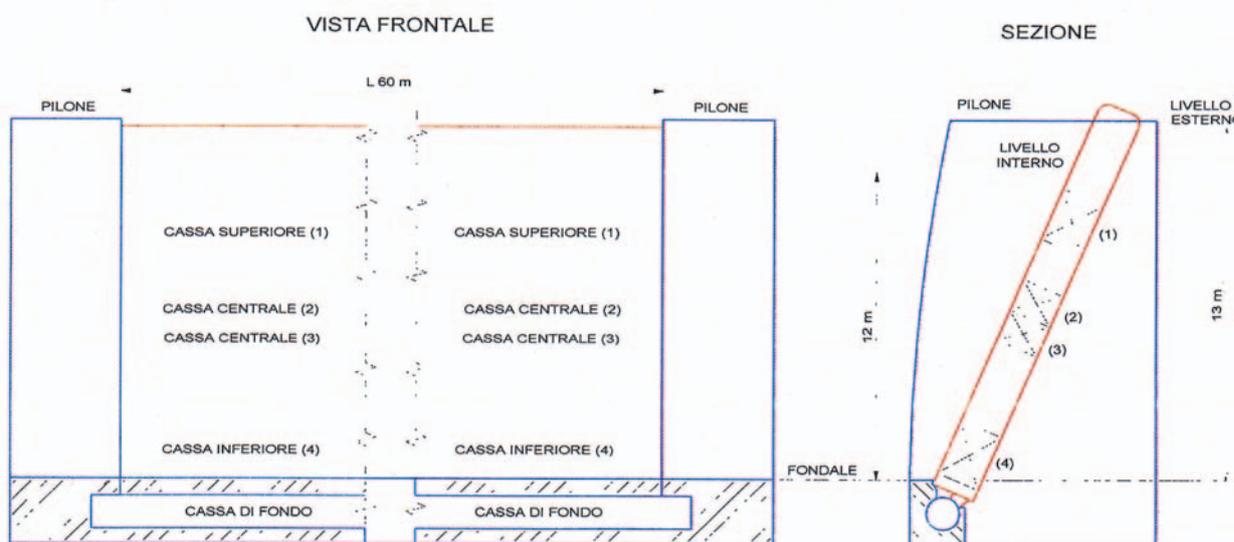


Figura 1

## PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

La struttura è costituita sostanzialmente da 4 cassoni stagni disposti longitudinalmente e collegati verticalmente mediante diaframmi. I cassoni di estremità, pressochè uguali, hanno un volume complessivo pari approssimativamente al peso totale della paratoia, analogamente i cassoni centrali, di pari volume, sono realizzati di capacità tale da poter far variare la differenza peso-spinta entro valori fissati.

Nel caso rappresentato nello schema i cassoni di estremità hanno ciascuno un volume pari a 300 m<sup>3</sup> per compensare parzialmente il peso totale della paratoia stimato in 800 t circa, mentre i cassoni centrali hanno un volume ciascuno di circa 200 m<sup>3</sup> al fine di poter variare la differenza peso-spinta



tra i valori limiti  $-200$  t e  $+200$  t è necessario evidenziare che il peso della struttura è un valore di prima approssimazione calcolato al fine di poter valutare i volumi necessari per quantificare le grandezze in gioco. E' altresì chiaro come si evincerà dal seguito, che una variazione di peso può essere assorbita senza conseguenze.

A chiarimento di quanto sopra si riporta il seguente schema illustrativo

CASSA 1 300 M <sup>3</sup>	a) 1,2,3,4 vuoti peso-spinta= $(800)-(2 \times 300+2 \times 200)=-200$ t
	b) 1,2,4 vuoti e 3 pieno peso-spinta= $(800+200)-(2 \times 300+2 \times 200)=0$ t
CASSA 2 200 M <sup>3</sup>	c) 1,4 vuoti 2,3 pieni peso-spinta= $(800+2 \times 200)-(2 \times 300+2 \times 200)=+200$ t
CASSA 3 200 M <sup>3</sup>	
CASSA 4 300 M <sup>3</sup>	

Pertanto vuotando o riempiendo completamente i cassoni centrali si ottiene una variazione di peso-spinta tra  $-200$  t e  $+200$  t.

In assenza di marea la paratia potrebbe essere mantenuta in equilibrio indifferente, adagiata in battuta sui piloni oppure sul fondo.

L'inclinazione subverticale attribuita al sistema consente in fase di esercizio, ossia in presenza di differenza di battente idrostatico, di compensare con un opportuno valore positivo di P-S l'azione della risultante delle spinte idrostatiche ottenendo il

vantaggio di scaricare la struttura della paratia, con conseguenti minori sollecitazioni, e maggior capacità di assorbimento di eventuali effetti dinamici.

Premesso quanto sopra, al verificarsi dell'alta marea, la chiusura della paratoia avviene creando un eccesso di spinta.

Al crescere della marea la pressione sulla paratoia si incrementa ma la sua azione viene compensata riempiendo i cassoni fino al valore di P-S voluto che nell'ipotesi analizzata di differenza di battente idrostatico di 0.75 m equivale a  $(931+1940)/2=1435$  t. quale valore di equilibrio, mentre con l'attuale configurazione di paratoia si potrebbe al massimo disporre di una differenza P-S pari a 800 t. ovvero un bilanciamento del 56% ( $800/1435=0.56$ ).

E' interessante evidenziare che poiché lo zavorramento è funzione del progressivo dislivello idrostatico che si crea, l'allagamento dei cassoni potrebbe avvenire naturalmente attraverso opportune griglie disposte verticalmente sulla parete e comunicanti con le casse. Al diminuire della marea il processo s'inverte la paratia per eccesso di peso tende ad aprirsi pertanto per porla nelle condizioni di equilibrio indifferente o nuovamente in posizione operativa è necessario scaricare progressivamente l'acqua.



Poiché le quantità di acqua di zavorra sono relativamente contenute ed i tempi operativi sufficientemente ampi, vari ed egualmente affidabili risultano i sistemi in grado di eseguire e controllare il processo ciclico.

## NOTA TECNICA

Si consideri una paratia di lunghezza ed altezza rispettivamente  $L$  ed  $H$ , inclinata di un angolo  $\alpha$  rispetto alla verticale ed incernierata alle due estremità inferiori.

Si ipotizza che tale paratia possa andare in battuta lungo i tre lati immersi su una struttura di sostegno costituita da due piloni collegati da uno zoccolo nella parte bassa.

In fig.1 è illustrato schematicamente il sistema paratoia.

Ipotizzando un differenziale battente idrostatico tra i due lati della paratoia si vogliono determinare le forze agenti sulla paratia nonché le reazioni vincolari.

## EQUAZIONI DI EQUILIBRIO

Con riferimento alla fig.2 sono schematizzate le forze agenti sul sistema ed i relativi punti di applicazione.

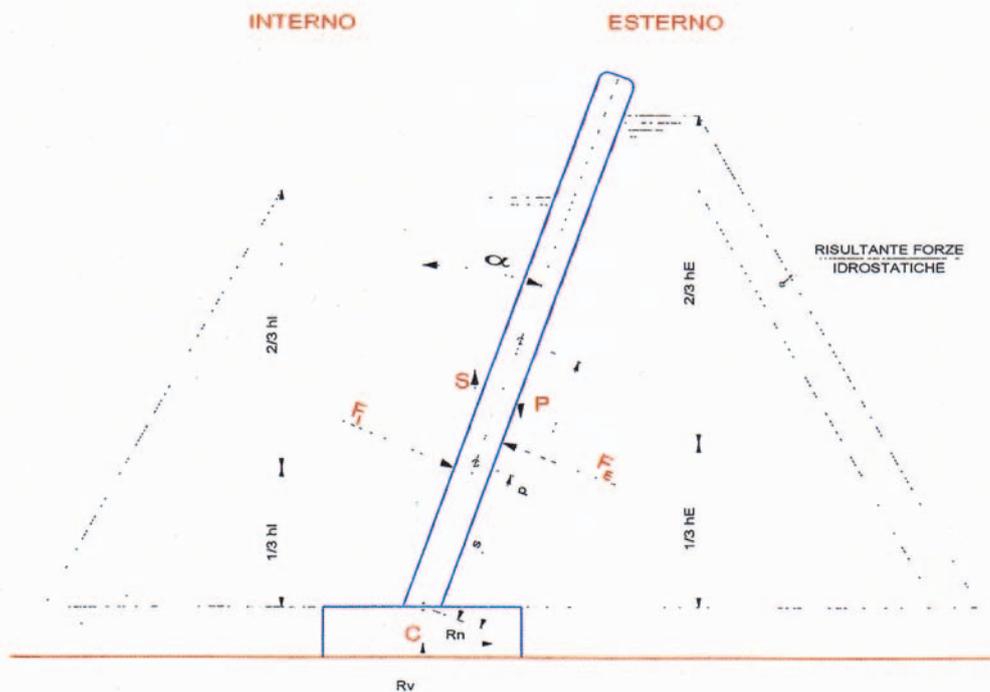


Figura 2

P	Peso paratia
S	Spinta archimedeica paratia
$F_E$	Forza idrostatica esterna
$F_I$	Forza idrostatica interna
$R_O$	Reazione orizzontale cerniera
$R_V$	Reazione verticale cerniera

Le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale nonché l'equilibrio alla rotazione rispetto a C consentono di scrivere:

$$1) P - S - F_E \cdot \text{sen} \alpha + F_I \cdot \text{sen} \alpha - R_V = 0$$

$$2) F_I \cdot \cos \alpha - F_E \cdot \cos \alpha + R_O = 0$$

$$3) p \cdot P \cdot \text{sen} \alpha - s \cdot S \cdot \text{sen} \alpha - \frac{1}{3} h_E \frac{F_E}{\cos \alpha} + \frac{1}{3} h_I \frac{F_I}{\cos \alpha} = 0$$

che consentono di essere riscritte nella forma

$$1) R_V = (P - S) - (F_E - F_I) \text{sen} \alpha$$

$$2) R_O = (F_E - F_I) \cos \alpha$$

$$3) (p \cdot P - s \cdot S) = \frac{(h_E F_E - h_I F_I)}{3 \text{sen} \alpha \cdot \cos \alpha}$$

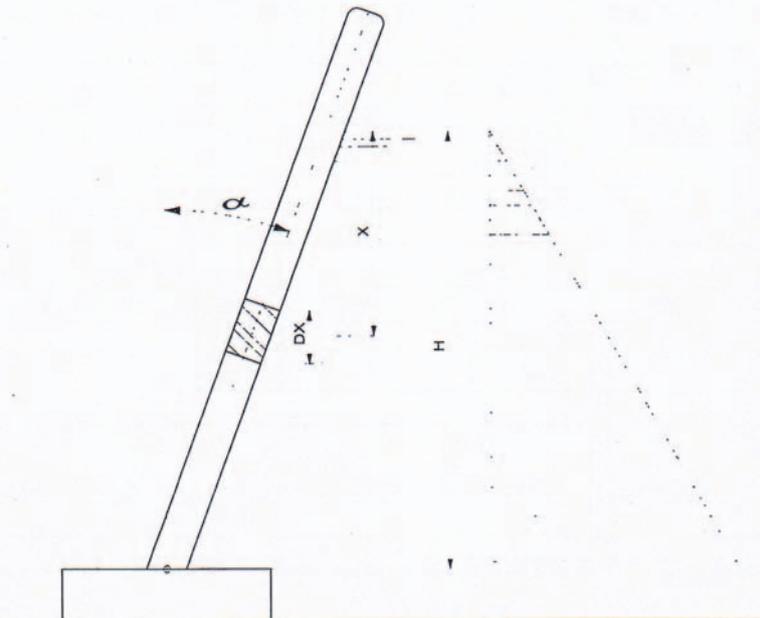


Figura 3



Con riferimento alla fig. 3 la forza normale elementare agente sulla paratia per effetto del battente  $h_1$  vale

$$dF = \frac{L \cdot x \cdot dx}{\cos \alpha} \quad \text{che integrata tra 0 ed h fornisce}$$

$$F = \int_0^h \frac{L \cdot x \cdot dx}{\cos \alpha} = \frac{L}{\cos \alpha} \int_0^h x \cdot dx = \frac{L}{\cos \alpha} \left[ \frac{x^2}{2} \right]_0^h = \frac{L \cdot h^2}{2 \cdot \cos \alpha}$$

sostituendo l'espressione trovata nelle precedenti si ha per  $\alpha \neq 0$

$$1) R_v = (P - S) - (F_e - F_i) \cdot \sin \alpha = (P - S) - \frac{L \tan \alpha}{2} (h_e^2 - h_i^2)$$

$$2) R_o = (F_e - F_i) \cdot \cos \alpha = \frac{L}{2} (h_e^2 - h_i^2)$$

$$3) (p \cdot P - s \cdot S) = \frac{(h_e F_e - h_i F_i)}{3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{L(h_e^3 - h_i^3)}{6 \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha}$$

### CALCOLO DELLE REAZIONI VINCOLARI

Dalle equazioni precedenti emerge che fissati  $h_e$ ,  $h_i$  e  $\alpha$  nonché posto  $p=s=k$  è possibile risalire la valore P-S che soddisfa le equazioni e conseguentemente pervenire alle reazioni vincolari.

Nelle tabelle successive sono riportati i risultati ottenuti variando  $\alpha$  ed il battente  $h_e$ .

	$\alpha=10$	$\alpha=20$	$\alpha=30$		
$10^{-2} R_v =$	3.015 L/K -0.013 L	1.681 L/K -0.026 L	1.354 L/K -0.041 L	$h_i =$	<b>14</b>
$10^{-2} R_o =$	0.071 L	0.071 L	0.071 L	$h_e =$	<b>14.5</b>
$10^{-2} (P-S)K =$	3.015 L	1.681 L	1.354 L		

	$\alpha=10$	$\alpha=20$	$\alpha=30$		
$10^{-2} R_v =$	6.245 L/K -0.026 L	3.482 L/K -0.053 L	2.804 L/K -0.084 L	$h_i =$	<b>14</b>
$10^{-2} R_o =$	0.145 L	0.145 L	0.145 L	$h_e =$	<b>15</b>
$10^{-2} (P-S)K =$	6.245 L	3.482 L	2.804 L		

	$\alpha=10$	$\alpha=20$	$\alpha=30$		
$10^{-2} R_v =$	2.223 L/K -0.018 L	1.242 L/K -0.022 L	1.00 L/K -0.035 L	$h_i =$	<b>12</b>
$10^{-2} R_o =$	0.061 L	0.061 L	0.061 L	$h_e =$	<b>12.5</b>
$10^{-2} (P-S)K =$	2.223 L	1.242 L	1.00 L		



	$\alpha=10$	$\alpha=20$	$\alpha=30$
$10^{-2} R_v=$	4.641 L/K -0.022 L	2.588 L/K -0.045 L	2.084 L/K -0.072 L
$10^{-2} R_o=$	0.125 L	0.125 L	0.125 L
$10^{-2} (P-S)K=$	4.641 L	2.588 L	2.084 L

hi=	12
he=	13

L'analisi delle tabelle precedenti consente di fare le seguenti considerazioni.

- a) La reazione orizzontale  $R_o$ :
  - è proporzionale alla lunghezza della paratoia
  - è proporzionale alla differenza dei quadrati dei battenti idrostatici
- b) La differenza tra il peso e la spinta P-S:
  - è proporzionale alla lunghezza della paratoia
  - è inversamente proporzionale alla distanza del loro punto di applicazione dalla cerniera
  - è proporzionale alla differenza dei cubi dei battenti idrostatici
  - si riduce all'aumentare dell'angolo di inclinazione
- c) La reazione verticale  $R_v$  segue sostanzialmente la stessa legge di variazione di P-S

### IPOTESI DI CONFIGURAZIONE

Premesso quanto sopra, nelle note che seguono, si analizzerà una configurazione geometrica sotto determinate ipotesi valutando i conseguenti risultati.

Le ipotesi sulle quali si basano le seguenti configurazioni sono:

Lunghezza paratoia	L	60 m
Battente idrostatico interno	$h_i$	12 m
Battente idrostatico esterno	$h_e$	0.5÷1.0 m
Angolo di inclinazione	$\alpha$	20°
	k	8 m

Sotto tali ipotesi dalle tabelle precedenti risulta

$$H_E = 12.5 \text{ m}$$

$$10^{-3} R_v = 1.242 \cdot \frac{L}{K} - 0.022 \cdot L = 1.242 \cdot \frac{60}{8} - 0.022 \cdot 60 = 7.995t \Rightarrow R_v = 799.5t$$

$$10^{-3} R_o = 0.061 \cdot L = 0.061 \cdot 60 = 3.66t \Rightarrow R_o = 366t$$

$$10^{-3} (P-S) = 1.242 \cdot \frac{L}{K} = 1.242 \cdot \frac{60}{8} = 9.31t \Rightarrow 931t$$



$$H_E = 13.0 \text{ m}$$

$$10^{-2} R_r = 2.588 \cdot \frac{L}{K} - 0.045 \cdot L = 2.588 \cdot \frac{60}{8} - 0.045 \cdot 60 = 16.71t \Rightarrow R_r = 1671t$$

$$10^{-2} R_o = 0.125 \cdot L = 0.125 \cdot 60 = 7.5t \Rightarrow R_o = 750t$$

$$10^{-2} (P - S) = 2.588 \cdot \frac{L}{K} = 2.588 \cdot \frac{60}{8} = 19.41t \Rightarrow P - S = 1940t$$

Dai risultati ottenuti quindi il sistema, in equilibrio sotto l'azione delle forze  $F_E$ ,  $F_I$  P-S, richiede per  $H_E - H_I = 0.50 \text{ m}$  una differenza peso spinta pari a 931 t producendo reazioni verticali ed orizzontali alle cerniere pari rispettivamente a 799.5 t e 366 t. Analogamente per  $H_E - H_I = 1.0 \text{ m}$  la differenza peso-spinta richiesta è di 1940 t, mentre le reazioni alle cerniere risultano 1671 t e 750 t.

In altri termini la paratoia, variando opportunamente la quantità di P-S, rimane in equilibrio con  $20^\circ$  di inclinazione sotto le forze agenti al variare del dislivello.

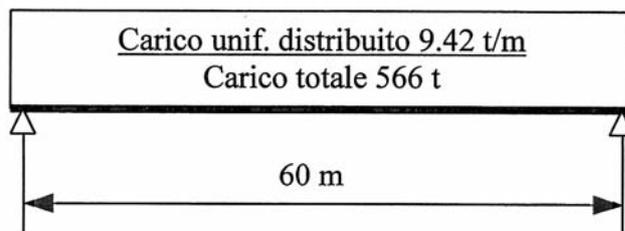
Se fosse presente lungo il contorno bagnato della paratoia una battuta con guarnizione questa entrerebbe in azione senza essere compressa eccessivamente impedendo ogni via al flusso dell'acqua.

Questa situazione, seppur teorica, è molto prossima alla realtà.

Si vuole comunque quantificare il modulo di resistenza e la deformazione conseguente che avrebbe la paratia nell'ipotesi che sopportasse tutto il carico idrostatico scontrando sui due lati verticali, tale valore per  $H_E - H_I = 0.75 \text{ m}$   $H_I = 12.0 \text{ m}$   $L = 60 \text{ m}$   $\alpha = 20^\circ$

$$\frac{L \cdot h_i \cdot (h_e - h_i)}{\cos \alpha} + \frac{L \cdot (h_e - h_i)^2}{2 \cdot \cos \alpha} = 566t$$

Lo schema conseguente è quello di una trave appoggiata all'estremità soggetta ad un carico uniformemente distribuito pari, nella peggiore condizione, a  $566 \text{ t}/60 \text{ m} = 9.42 \text{ t/m}$



Il momento flettente massimo (in mezzeria) e la freccia risultano espressi da:

$$1) \quad M = P \cdot \frac{L}{8} \quad [\text{Kg} \times \text{mm}]$$

$$2) \quad f = 0.013 \cdot P \cdot \frac{L^3}{E \cdot J} \quad [\text{mm}]$$



ove

$$\begin{aligned}
 P &= 566000 \quad \text{Kg} \\
 L &= 60000 \quad \text{mm} \\
 E &= 21000 \quad \text{Kg/mm}^2 \\
 J &= \text{inerzia} \quad \text{mm}^3
 \end{aligned}$$

Ipotizzando di voler contenere la freccia ad 1/1000 della campata dalla 2) risulta:

$$J = 0.013 \cdot P \cdot \frac{L^3}{E \cdot f} = 0.013 \cdot 566000 \cdot \frac{60000^3}{21000 \cdot 120} = 63.0 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

Supponendo di voler contenere la larghezza della paratoia a 2.0 m il modulo di resistenza risulterebbe pari a :

$$W = \frac{J}{1000} = \frac{63.0 \cdot 10^{10}}{10^3} = 63.0 \cdot 10^7 \quad \text{mm}^3$$

Un modulo di tale valore comporterebbe una sollecitazione di:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{566000 \cdot 60000}{8 \cdot 63.0 \cdot 10^7} = 6.7 \quad \text{Kg/mm}^2$$

Nei riguardi della configurazione strutturale da assumere risulta che tre travi scatolari orizzontali da 2000 x 2500 x 40 collegate verticalmente realizzano in modulo complessivo pari a:

$$3 \times 22.5 \times 10^7 \text{ mm}^3 = 67.5 \times 10^7 \text{ mm}^3.$$



Nelle fig. 4 e 5 si illustra una proposta di soluzione strutturale della paratia.

VISTA A  
scala 1:100

VISTA B  
scala 1:100

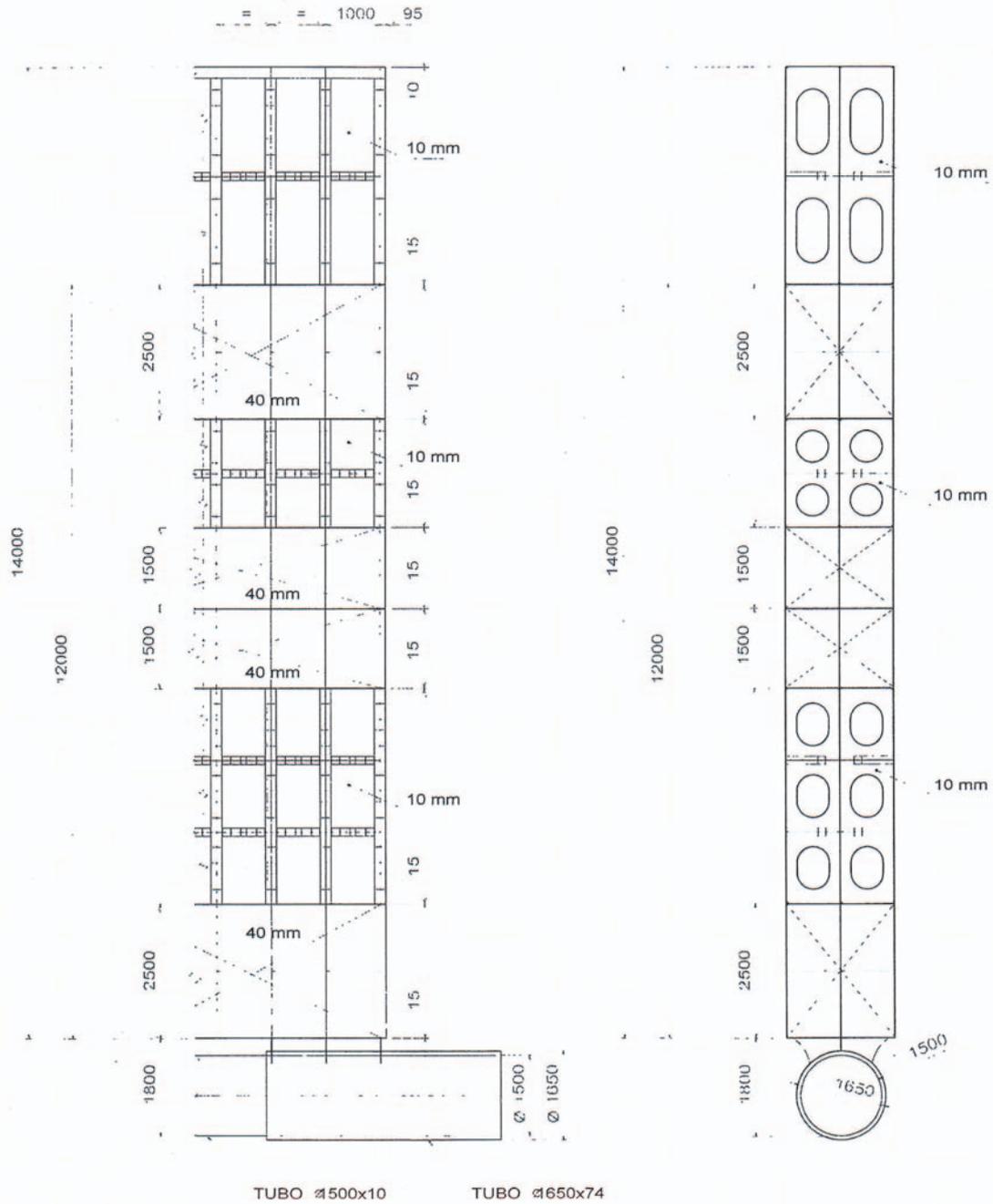
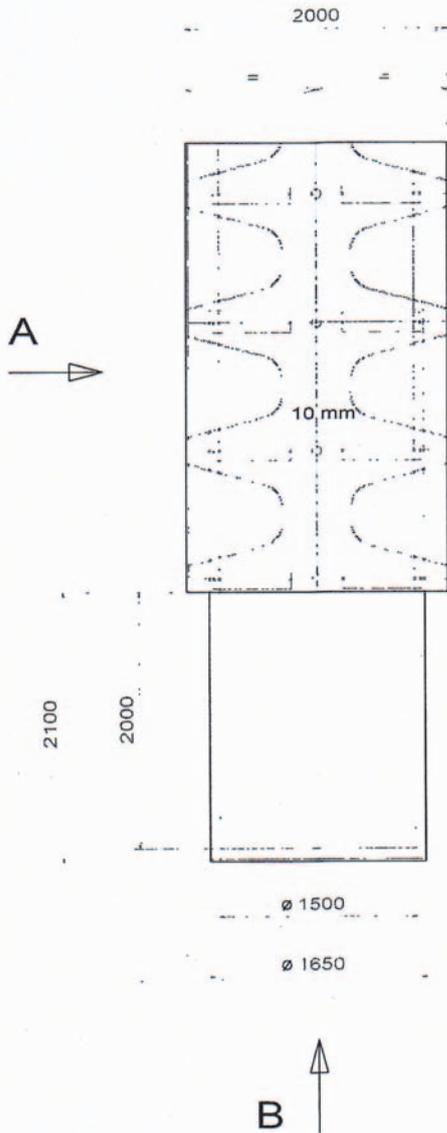


Figura 4



PIANTA  
scala 1:50



VISTA ISOMETRIC  
scala 1:100

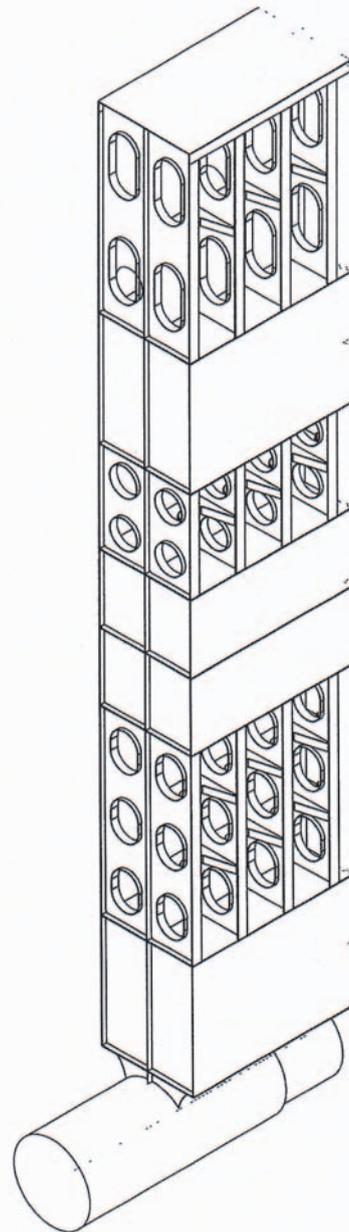
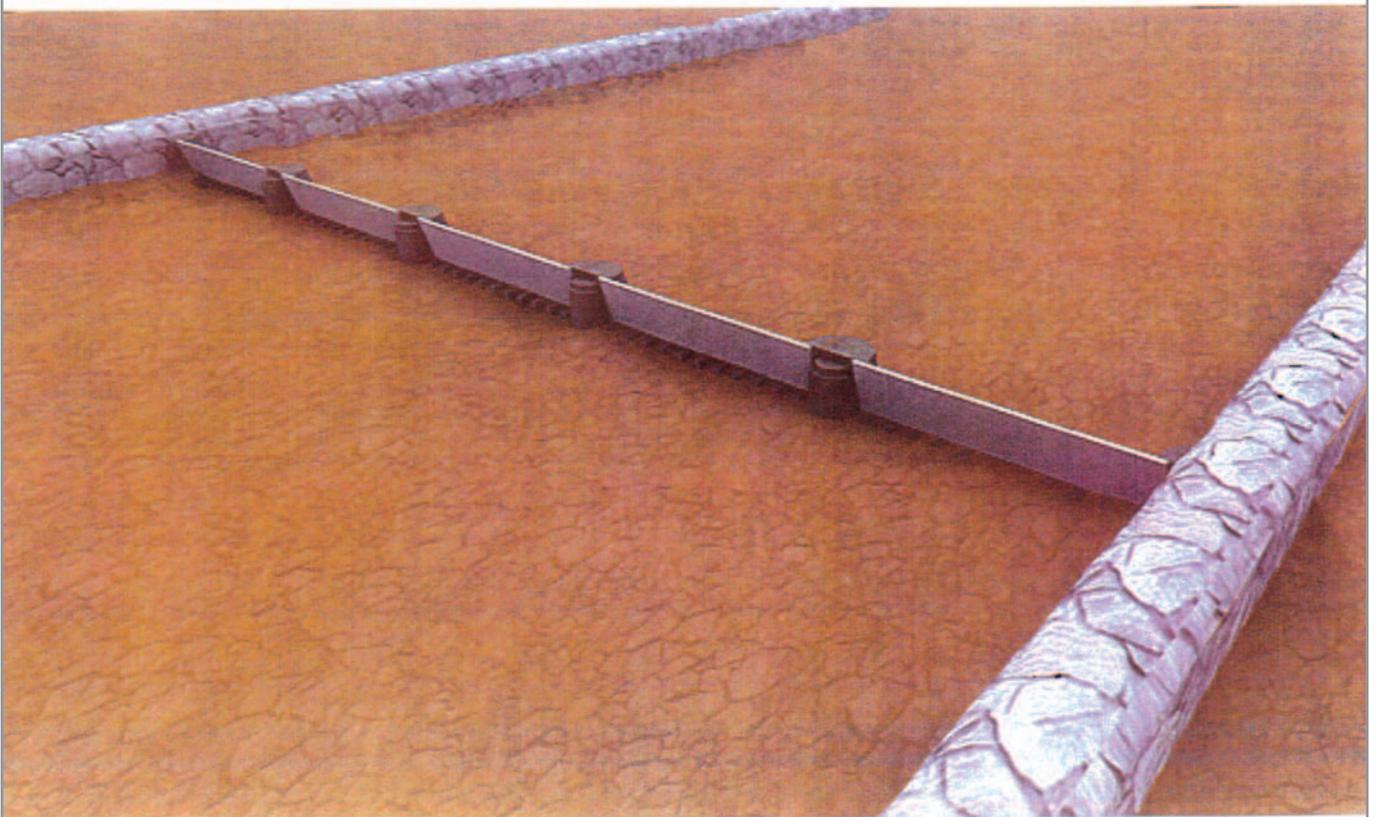
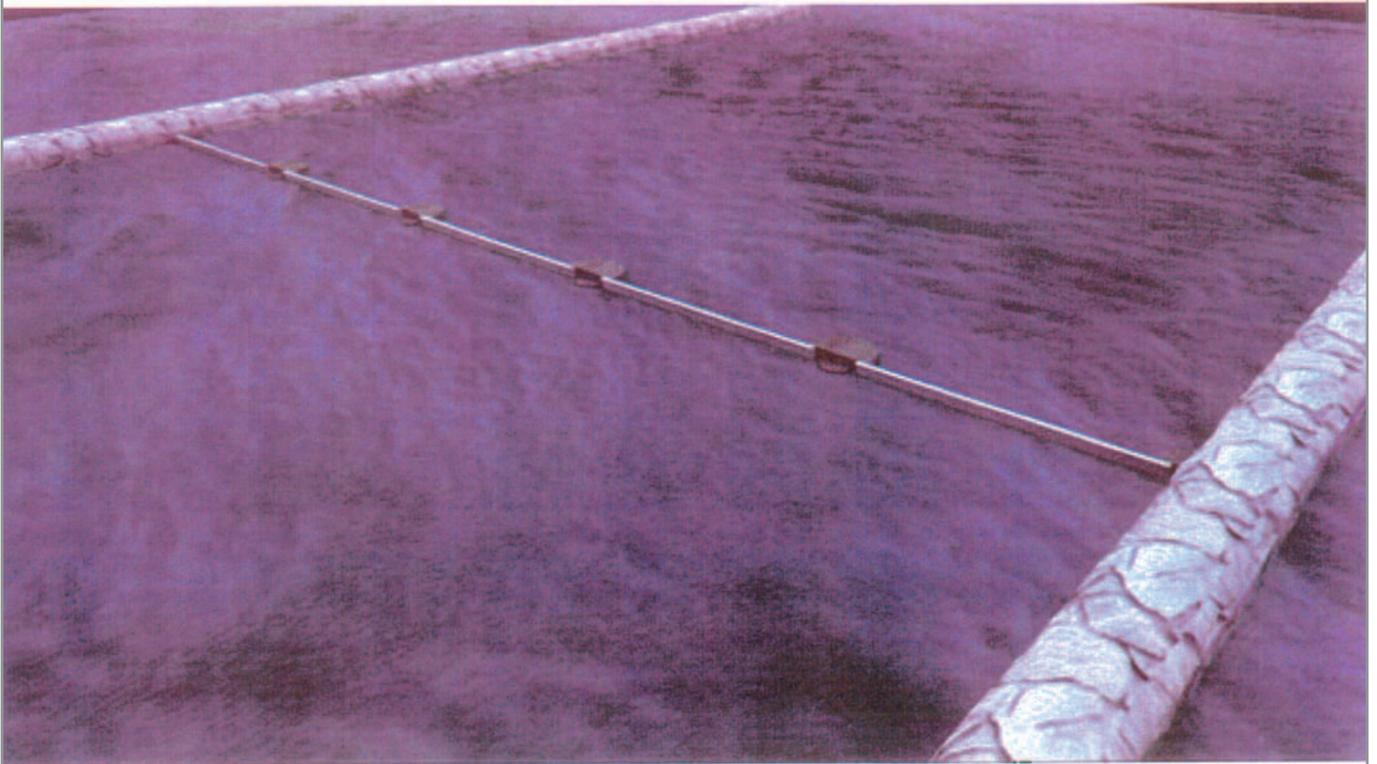
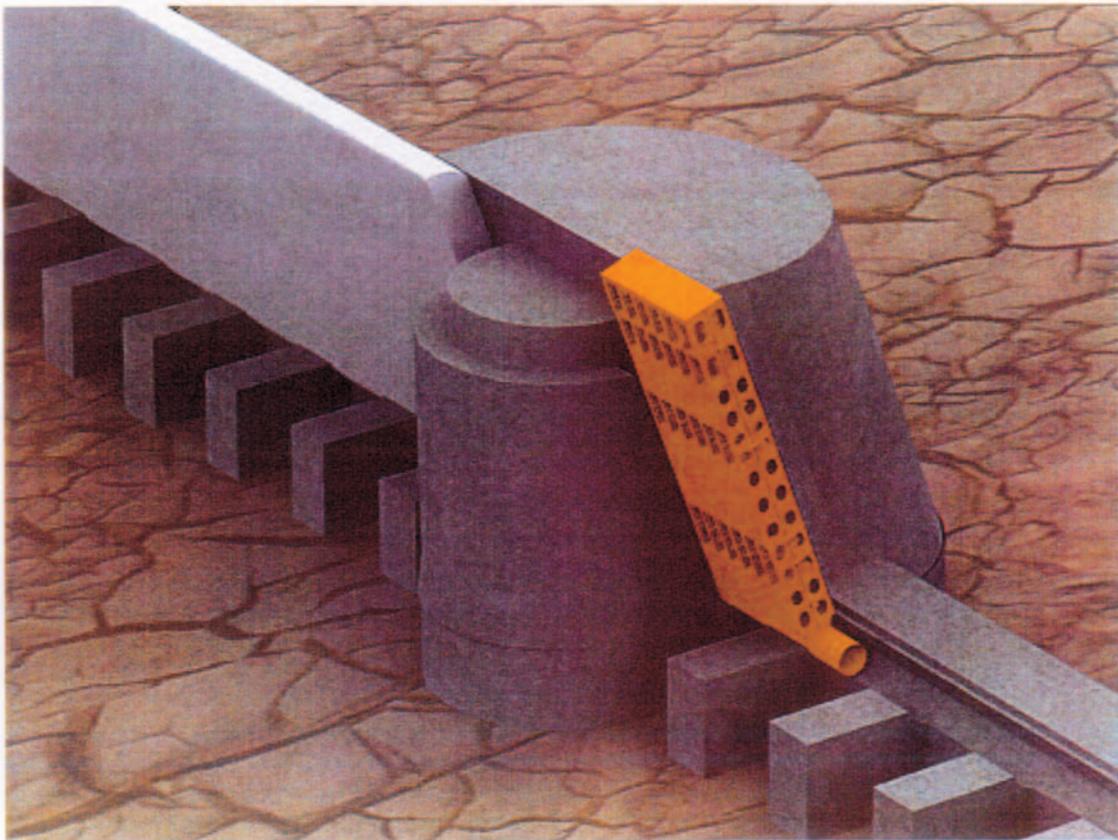
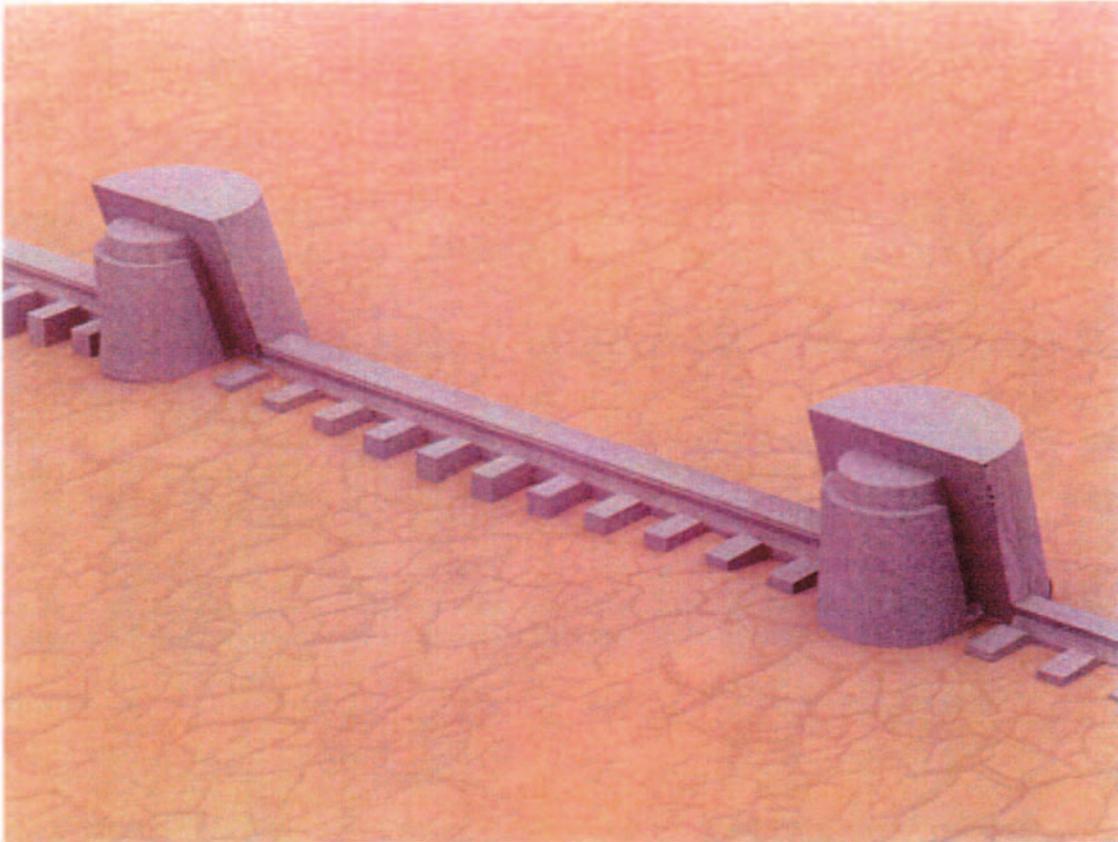


Figura 5

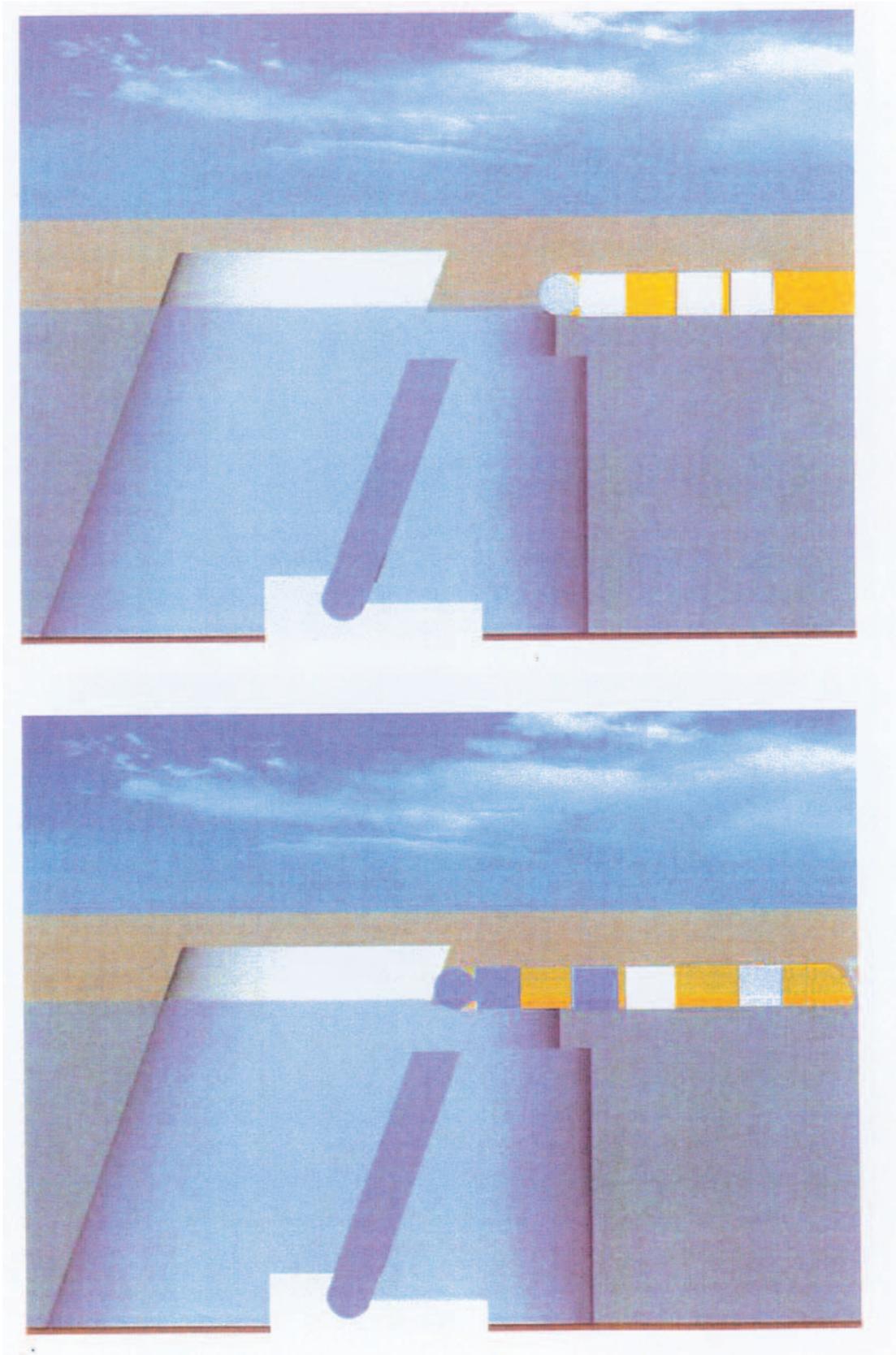
**TMT**  
ITALIA



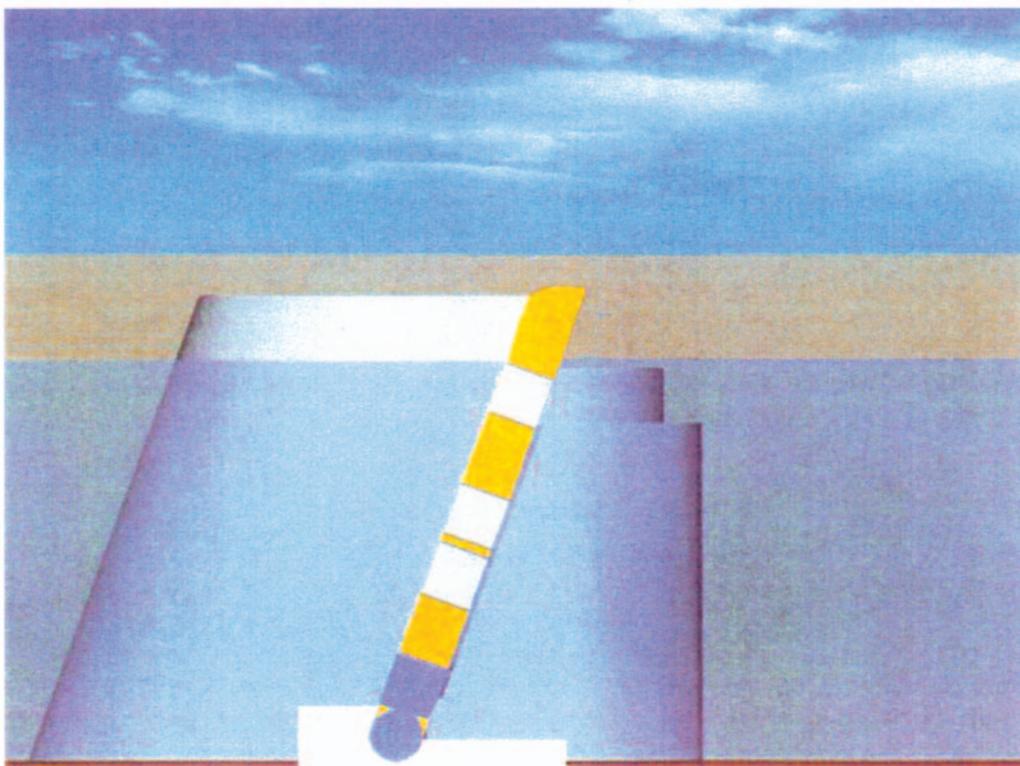
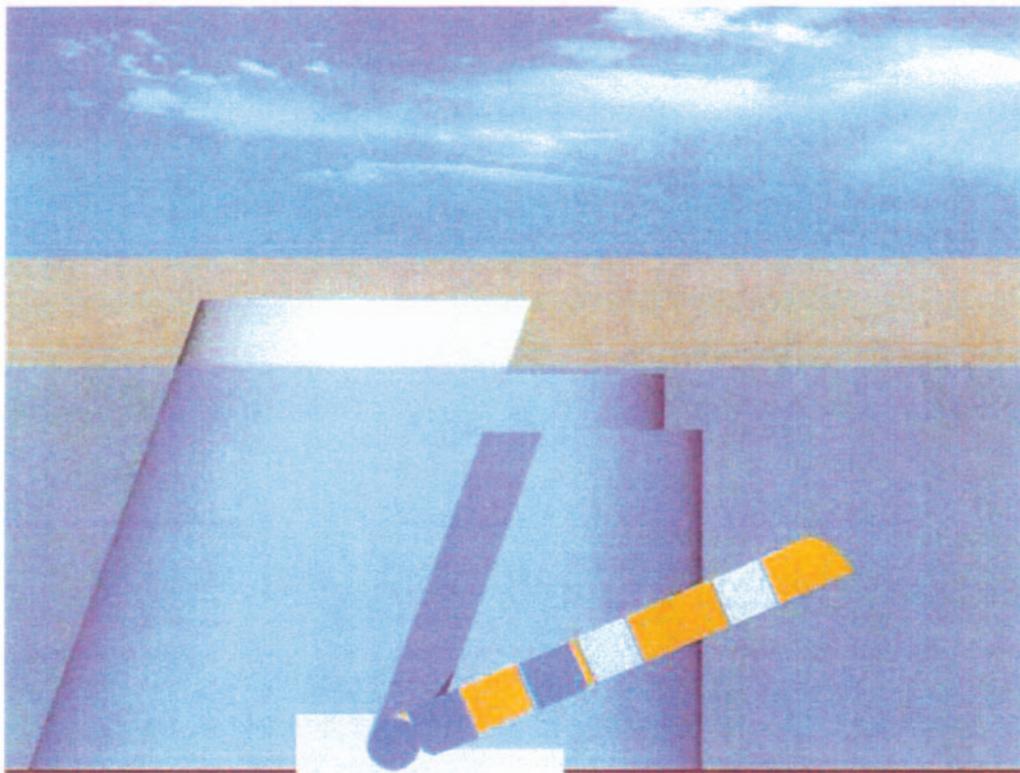
**TMT**  
ITALIA



**TMT**  
ITALIA



**TMT**  
ITALIA



**TMT**  
ITALIA

