

C0	10/06/13	Emissione per approvazione	DV	DL	LM
REVISIONE	DESCRIZIONE			EL	CON. APP.

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI
MAGISTRATO ALLE ACQUE

**NUOVI INTERVENTI PER LA SALVAGUARDIA
DI VENEZIA**

LEGGE N. 798 DEL 29-11-1984
CONVENZIONE REP. N. 7191 DEL 04-10-1991
ATTO ATTUATIVO REP. 8602 DEL 08-02-2013

**INTERVENTI ALLE BOCCHE LAGUNARI PER
LA REGOLAZIONE DEI FLUSSI DI MAREA**
CUP: D51B02000050AC1

PROGETTO ESECUTIVO

WBS: LM.I1.48
WBE: LM.I1.48.PE.09


**BOCCA DI MALAMOCCO – PARATOIE E CONNETTORI
PARATOIE**

**ANALISI DELL’AFFONDAMENTO DELLA PARATOIA
RELAZIONE DI CALCOLO**

ELABORATO D. Varisco	CONTROLLATO D. Lesina	APPROVATO L. Mazza
N. ELABORAT MV080P-PE-MAR-2011-C0	CODICE FILE MV080P-PE-MAR-2011-C0.doc	DATA 10 Giugno 2013

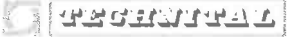
CONSORZIO “VENEZIA NUOVA”

COORDINAMENTO PROGETTAZIONE VERIFICATO: L. Carretta CONTROLLATO: M. Ardone  CONSORZIO VENEZIA NUOVA M. BRUNO	PROGETTAZIONE  DOTT. ING. ALBERTO SCOTTI IL RESPONSABILE: ING. ALBERTO SCOTTI a) civile e ambientale b) industriale c) dell'informazione PROGETTAZIONE SPECIALISTICA 782 TECCON MILANO
---	--

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 2
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

INDICE

1.	OGGETTO E SCOPO	4
2.	RIFERIMENTI	6
	2.1. Documenti di Progetto	6
	2.2. Studi	6
	2.3. Altri Documenti	7
	2.4. Normative e regolamenti	8
3.	INTRODUZIONE	9
4.	DESCRIZIONE DELLE PARATOIE E OPERE DI CHIUSURA	10
	4.1. Considerazioni Generali	10
	4.2. Paratoia	11
	4.3. Supporti elastici (Ammortizzatori)	12
	4.4. Linee aria compressa	13
	4.5. Strutture di Fondazione	14
5.	FUNZIONAMENTO DELLE PARATOIE	15
	5.1. Considerazioni Generali	15
	5.2. Sollevamento iniziale e chiusura della barriera	15
	5.3. Regolazione delle paratoie per i dislivelli di progetto	16
	5.4. Affondamento della paratoia	17
6.	ANALISI DEL MOTO DI AFFONDAMENTO - METODI	18
	6.1. Configurazione Geometrica e Nomenclatura	18
	6.2. Fasi del Moto di Affondamento e loro caratteristiche	20
	6.3. Posizione Iniziale di Equilibrio di Angolo Minimo	22
	6.4. Equazione del Moto e Parametri Correlati	25
	6.4.1. Definizione del Sistema e della Coordinata Descrittiva	25
	6.4.2. Equazione del moto	26
	6.4.3. Elementi Trascurati nell'Equazione del Moto	27
	6.4.4. Paratoia: Termine Cinetico	29
	6.4.5. Paratoia: Momento delle Forze Esterne	33
	6.4.6. Fluido Sotteso: Termine Cinetico	38
	6.4.7. Fluido Sotteso: Momento delle Forze Esterne	41

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 3
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

7.	ANALISI DEL MOTO DI AFFONDAMENTO - RISULTATI	43
7.1.	Considerazioni Generali	43
7.2.	Riepilogo dei Dati di Ingresso	44
7.3.	Calcolo della Velocità Angolare all’Impatto: Risultati	46
7.4.	Calcolo della Velocità Massima durante il Moto: Risultati	49
7.5.	Incidenza sui risultati dei dati parzialmente determinati	52
8.	ANALISI DEL MOTO AMMORTIZZATO	55
8.1.	Considerazioni Generali	55
8.2.	Equazione del Moto e Risultati	56
8.3.	Proprietà elastiche degli Ammortizzatori	60
9.	CONFRONTO CON I RISULTATI SPERIMENTALI	61
9.1.	Sperimentazione MOSE	61
9.2.	Sperimentazione su Modelli Fisici	68

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 4
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

1. OGGETTO E SCOPO

La presente relazione esamina il moto delle paratoie destinate alla chiusura della Bocca di Malamocco nella fase di affondamento.

Il moto viene studiato in due fasi contigue ma distinte: la fase di affondamento libero (indicata nel seguito semplicemente come “affondamento”) e la fase in cui la paratoia risente della compressione degli ammortizzatori, indicata nel seguito come “moto ammortizzato”.

In generale, l’analisi della velocità della paratoia durante la sua discesa è finalizzata alla individuazione dei parametri per la progettazione del sistema di ammortizzazione e per la verifica dei componenti strutturali della paratoia interessati.

Il moto di affondamento inizia a partire da una posizione di equilibrio che viene determinata, con tutti i parametri correlati (posizione angolare, pressione e volume aria contenuta, ecc.), per mezzo del programma PARAT3, già utilizzato nel corso del progetto per il calcolo delle posizioni di lavoro delle paratoie (ref. MV080P-PE-MAR-2000) e per il calcolo delle azioni di progetto per i connettori (ref. MV089P-PE-TMR-3051 “Bocca di Lido treporti – Paratoie e connettori – Connettori – Elemento femmina – Nota di chiarimento per la relazione “Carichi di progetto” in WBE LT.II.48.PE.03).

Il comportamento di una singola paratoia in fase di affondamento fino al contatto degli ammortizzatori è stato descritto per mezzo del programma di calcolo automatico “AFFONDAMENTO”, sviluppato *ad-hoc* in Visual Basic dal Progettista.


La procedura di calcolo, le equazioni applicate, i dati di ingresso e i risultati parziali e finali sono riportati con riferimento a tutte le fasi del moto, sia in tabelle sia in grafici.

A ulteriore chiarimento il documento:

- MV080P-PE-MAR-2017 Analisi del moto di affondamento della paratoia: metodo ed equazioni

contiene la definizione del metodo e delle equazioni implementati dal programma per l’analisi del moto di affondamento.

L’analisi svolta è di tipo lineare e il comportamento dei parabordi (simulati da vincoli elastici bilateri) è assunto lineare.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 5
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

L'analisi determina i parametri del moto della paratoia nelle diverse fasi di affondamento, tra i quali si selezionano quelli che definiscono le condizioni significative per l'analisi strutturale. Infatti il programma, in base ai parametri geometrici della paratoia, determina completamente il moto in discesa, e porta a calcolare fra l'altro:


- velocità angolare all'impatto degli ammortizzatori collocati sotto la paratoia;
- velocità lineare all'impatto in corrispondenza degli ammortizzatori;
- velocità massima della paratoia durante il moto;
- energia cinetica all'impatto;
- energia cinetica massima durante il moto;
- tempo di affondamento.

I parametri di interesse sono sostanzialmente le velocità, che determinano forze centrifughe, e le accelerazioni, che determinano forze inerziali rotazionali.

Con il programma di analisi strutturale si applica poi alle masse la velocità o l'accelerazione selezionate e si calcola lo stato di sforzo e deformazione dovuto a tali azioni.

La fase del moto ammortizzato viene invece descritta analiticamente, con una schematizzazione semplificata e conservativa.

Una validazione attraverso calcoli semplificati del programma utilizzato è in questo caso poco percorribile e la complessità delle equazioni in gioco comporterebbe comunque l'utilizzo di strumenti di calcolo. Per la validazione del programma sono stati effettuati un esame critico dei risultati parziali e generali e un confronto con i risultati dei modelli sperimentali (paratoia del MO.S.E. e modelli fisici in scala), riportato nel capitolo 9 do questa relazione.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 6
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

2. RIFERIMENTI

2.1. Documenti di Progetto

La presente relazione fa riferimento in particolare ai seguenti documenti di progetto:

Rif.	Doc.	Titolo / Descrizione
[P.1]	MV080P-PE-MAR-2000	BOCCA DI MALAMOCCO - PARATOIE E CONNETTORI - PARATOIE - RELAZIONE TECNICA GENERALE
[P.2]	MV080P-PE-MNS-2002	BOCCA DI MALAMOCCO - PARATOIE E CONNETTORI - PARATOIE - SPECIFICA TECNICA PARABORDI ED ELEMENTI IN GOMMA


2.2. Studi

Nell'ambito del progetto per la Salvaguardia della Laguna di Venezia dalle acque alte, oltre alle attività di progettazione vera e propria, sono stati svolti dal Consorzio Venezia Nuova, su incarico del Magistrato alle Acque di Venezia, una serie di studi teorici e sperimentali per verificare ed ottimizzare tutte le scelte progettuali.

In particolare, per studiare gli effetti sull'idrodinamica e l'efficienza delle opere in diverse condizioni di moto ondosso e di marea, sono state eseguite prove su modelli fisici, realizzati presso il laboratorio dell'Estramed a Pomezia, presso Delft Hydraulics ed infine al Centro sperimentale per modelli idraulici di Voltabarozzo.

L'elenco completo di tali studi è riportato in Rif. [P.1].

Si elencano nel seguito gli studi attinenti all'argomento della presente Relazione Tecnica:


	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 7
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

Studio N°	Descrizione	Esecutore
[B.6.4]	Modelli fisici delle paratoie a spinta di galleggiamento di Lido Treporti e Malamocco	Estramed
[B.6.5]	Modello fisico di una schiera di paratoie (Malamocco e Chioggia)	Delft Hydraulics
[B.6.8]	Studio mediante modelli fisici di alcuni componenti della paratoia: misura delle portate attraverso lo sbarramento e delle forze sulle cerniere	Delft Hydraulics
[B.6.14]	Esercizio del modulo sperimentale MOSE	CVN Cidonio

2.3. Altri Documenti

Per il confronto tra i risultati ottenuti nella presente relazione e quelli derivati dalle prove sperimentali svolte nell’ambito degli studi elencati al par. 2.2, si fa riferimento ai seguenti documenti:


Rif.	Titolo / Descrizione
[D.1]	Rapporto Conclusivo sulla Sperimentazione sul MO.S.E Consorzio Venezia Nuova
[D.2]	Relazione Finale Studio B.6.5 – Modello Fisico di una Schiera di Paratoie Delft Hydraulics

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 8
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

2.4. Normative e regolamenti

Le normative di riferimento sono:

- R.I.Na. (2013) Regolamento per la classificazione delle navi
- R.I.Na. (1992) Guida relativa ai criteri per la verifica mediante calcolo diretto della robustezza strutturale dello scafo delle navi
- PIANC (2002) Guidelines for the Design of Fender Systems, Report of Working Group 33 of the Maritime Navigation Commission, International Navigation Association
- UNI EN 1337-3:2005 Appoggi strutturali – Parte 3: Appoggi elastomerici.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 9
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

3. INTRODUZIONE

Il moto della paratoia durante l'affondamento è governato da una molteplicità di fattori di natura meccanica, fluidodinamica e termodinamica, che svolgono ruoli concomitanti.

Pertanto la definizione della equazione del moto, prima ancora che la sua soluzione, si presenta complessa e articolata su varie discipline.

L'analisi del problema è stata guidata, tra l'altro, dai dati sperimentali ottenuti con la Paratoia del MOSE (Rif. [D.1]), che hanno fornito indicazioni importanti sull'andamento del moto di affondamento, orientando quindi la ricerca e lo studio dei fenomeni fisici che ne erano alla base.


Ciò ha portato a riconoscere come "sistema" l'insieme della paratoia e del fluido da essa sotteso fino al fondo del cassone di alloggiamento; in tal modo, e con i metodi sviluppati in tal senso, la dinamica calcolata teoricamente della paratoia trova una corrispondenza molto soddisfacente con i risultati sperimentali citati.

L'equazione del moto è stata definita applicando il formalismo lagrangiano all'angolo di affondamento θ individuato come la coordinata che da sola è in grado di descrivere il moto.

Come già menzionato in precedenza l'analisi presente è finalizzata alla determinazione dei dati necessari alla progettazione del sistema di ammortizzazione; in ragione di ciò sono state adottate, ove opportuno, ipotesi conservative.

In particolare, essendo tutte le paratoie di una schiera indipendenti fra loro e singolarmente movimentabili, si è presa in esame la situazione di affondamento corrispondente a una sola paratoia in discesa con tutte le altre sollevate in posizione di lavoro; in queste condizioni la resistenza al moto offerta dal fluido risulta infatti minimizzata rispetto al caso in cui le paratoie adiacenti a quella in affondamento si trovino già alloggiate nel recesso in posizione di riposo ed ostacolano il deflusso.

Una volta che gli ammortizzatori della paratoia entrano in contatto con il cassone di fondazione, il conseguente moto ammortizzato dipende prevalentemente dalla rigidità dei parabordi e la sua descrizione si semplifica e consente un calcolo analitico conservativo.

 REGENTIA	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 10
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

4. DESCRIZIONE DELLE PARATOIE E OPERE DI CHIUSURA

4.1. Considerazioni Generali

La descrizione dettagliata delle Opere di Chiusura e delle Paratoie di Malamocco è riportata in Rif. [P.1]; se ne sintetizzano qui gli elementi essenziali.


Lo sbarramento di una Bocca di Porto è realizzato da una schiera di paratoie identiche ed indipendenti, e da una parte fissa, i cassoni di fondazione, interrati sul fondo del canale di bocca.

La paratoia è un cassone metallico stagno ad eccezione di aperture che permettono l'entrata/uscita dell'acqua di mare e di tubi per l'adduzione/sfiato di aria compressa.

La parte fissa è un manufatto in c.a. atto a ricevere la parte mobile, a scomparsa in un opportuno recesso; la parte fissa alloggia altresì tubazioni, impianti e servizi.

Ogni paratoia, realizzata in carpenteria metallica con struttura di tipo navale, è corredata di alcuni componenti speciali che ne assicurano il funzionamento:

- i gruppi cerniera-connettore, che vincolano le paratoie alle strutture di alloggiamento e ne consentono la rotazione dalla posizione orizzontale di riposo a quella sub-verticale di chiusura dello sbarramento e le oscillazioni sotto moto ondosio;
- gli strumenti per rilevare e controllare l'inclinazione assunta e le pressioni;
- gli ammortizzatori, che entrano in gioco quando la paratoia rientra nel proprio vano di alloggiamento;
- i tubi rigidi e flessibili che consentono l'immissione di aria compressa all'interno della paratoia e l'espulsione della stessa aria attraverso l'apposito cunicolo nei cassoni di fondazione e di spalla;
- gli elementi in elastomero che consentono la tenuta parziale fra paratoia e cassone di fondazione;
- le vernici e gli anodi sacrificali che proteggono la paratoia dalla corrosione.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 11
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

4.2. Paratoia

I parametri che caratterizzano la configurazione dello sbarramento alla bocca di Malamocco sono:

- Lunghezza della barriera 380 [m]
- Profondità (m l.m.m.) 14 [m]
- N° di paratoie 19 + 2 di rispetto

Le dimensioni e l’angolo di lavoro delle paratoie dello sbarramento di Malamocco sono (cfr. figura schematica):

- lunghezza totale 29.50 [m] (esclusa sporgenza)
- lunghezza da asse cerniere 28.85 [m] (esclusa sporgenza)
- larghezza 19.92 [m] (massima)
- altezza 4.50 [m]
- distanza asse cerniere da superficie superiore 0.80 [m]
- Angolo di lavoro 45.0 [°]

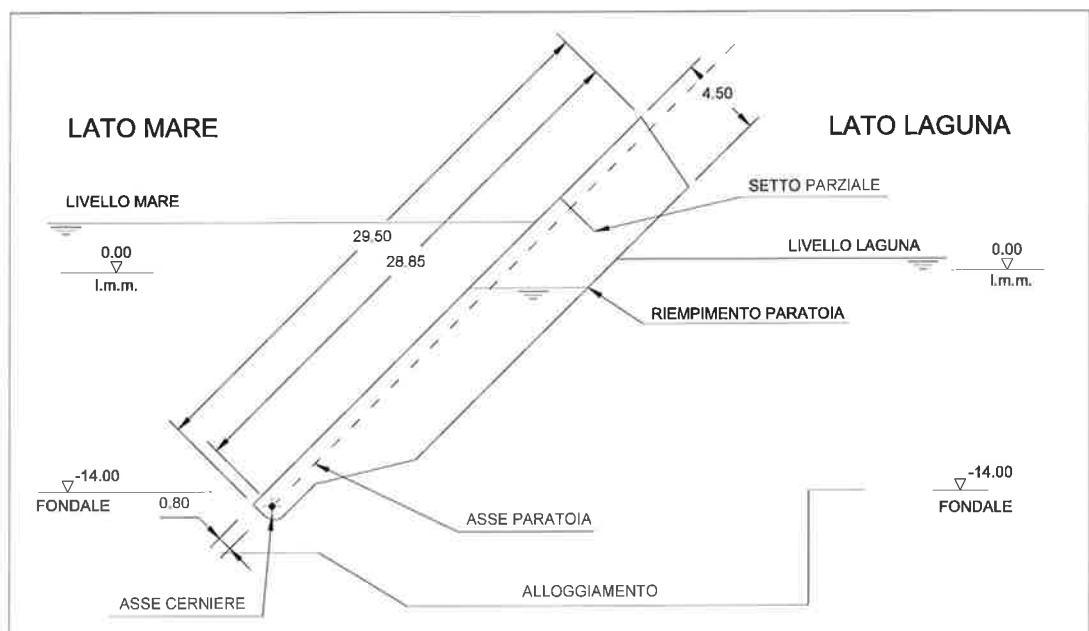
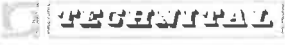


FIG. 4.1 – SCHEMA DELLA PARATOIA

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 12
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

4.3. Supporti elastici (Ammortizzatori)

Durante le manovre di apertura dello sbarramento, le paratoie vengono zavorrate aprendo le valvole di sfogo aria in modo da avviare la discesa della paratoia verso la struttura fissa ed il recesso di alloggiamento a riposo.

L’impatto della paratoia sulla fondazione in calcestruzzo è ammortizzato da due serie di parabordi in gomma posizionati al di sotto della paratoia fra i fasciami laterali e le paratie longitudinali forate in corrispondenza delle cerniere.

Tali ammortizzatori costituiscono anche i punti di appoggio frontali della paratoia a riposo nel recesso.

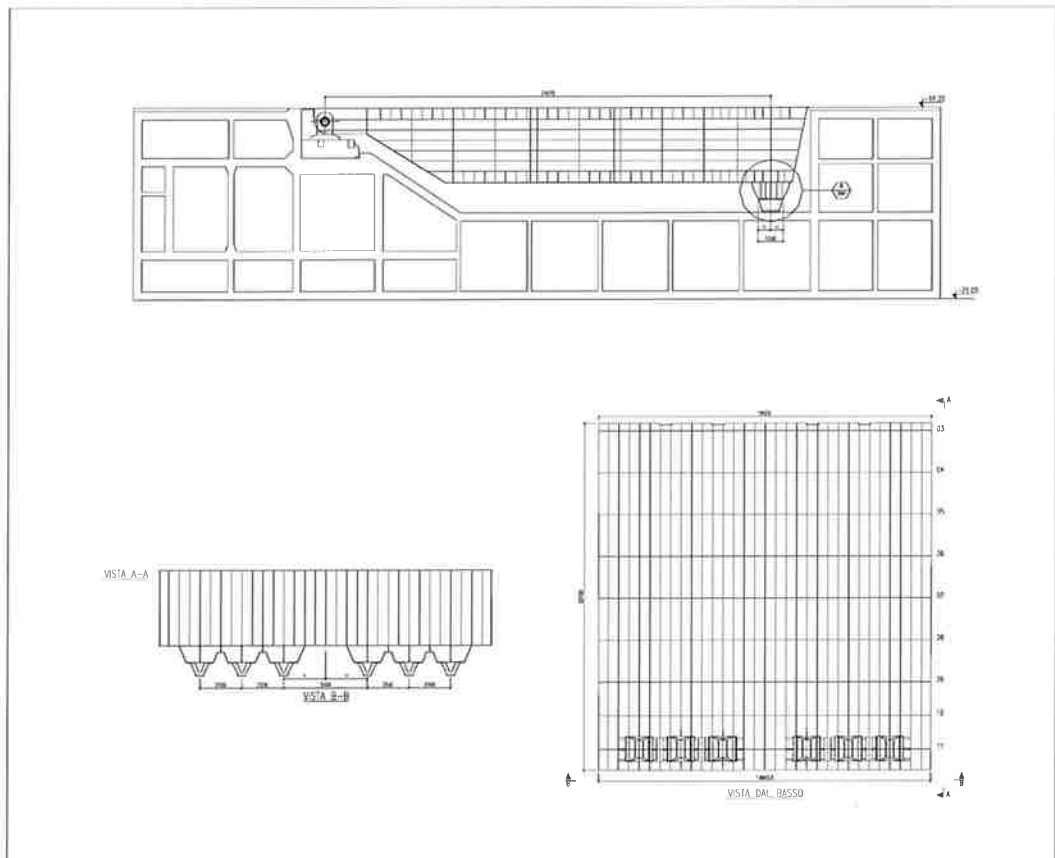



FIG. 4.2 – APOGGI ELASTICI (AMMORTIZZATORI)

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 13
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

4.4. Linee aria compressa

Le tubazioni di immissione ed esaurimento dell’aria sono disposte all’interno della paratoia (cfr. figura schematica).

Un’ulteriore gruppo di tubazioni rigide collega il volume situato dietro il setto parziale trasversale al volume frontale della paratoia in modo da garantire il completo esaurimento dell’aria durante l’affondamento, senza che rimangano intrappolate sacche d’aria.

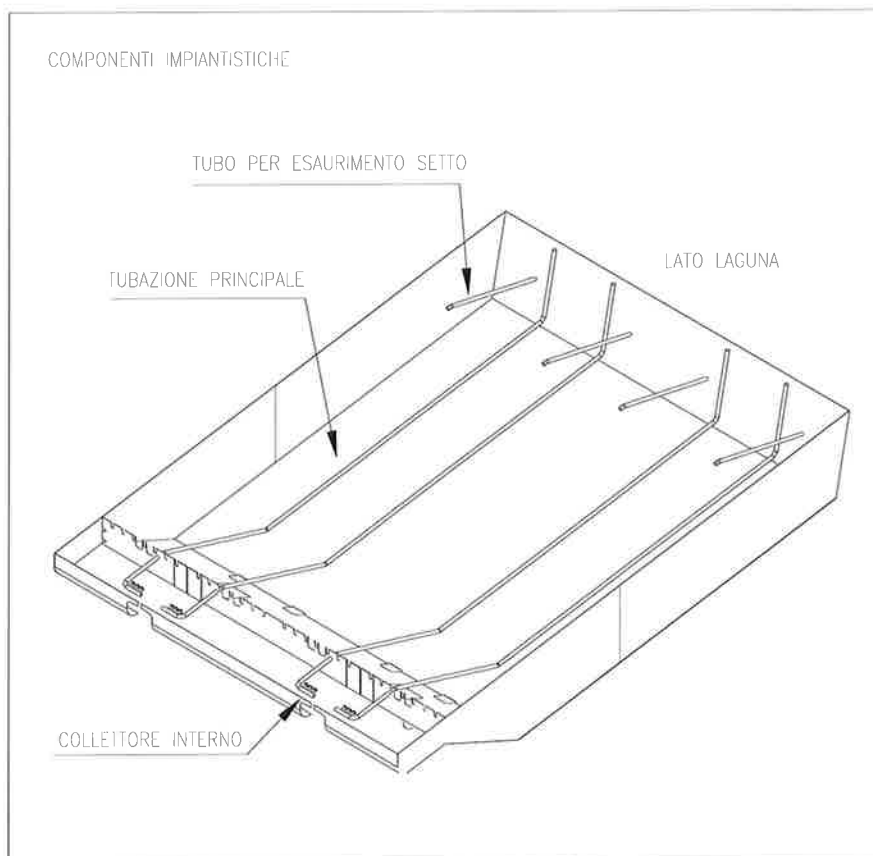



FIG. 4.3 – LINEE ARIA COMPRESSA

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 14
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

4.5. Strutture di Fondazione

Queste strutture, per funzioni e dimensioni, rappresentano nel loro insieme la componente principale di ogni sbarramento. Esse sono: le strutture per l'alloggiamento delle paratoie, quelle di spalla, quelle che accolgono gli impianti necessari per il funzionamento delle barriere, quelle che delimitano, con funzione di sostegno, dighe e terrapieni.

Si tratta, in generale, di manufatti costituiti da uno o più cassoni in cemento armato, prefabbricati in appositi bacini e rimorchiati in galleggiamento fino al sito in cui devono venire affondati.

Le paratoie e le loro strutture di alloggiamento sono collocate all'interno di uno scavo e quindi non sporgono mai al di sopra dei fondali.

Nella figura seguente è illustrata la sezione tipica del cassone di fondazione della barriera di Malamocco.

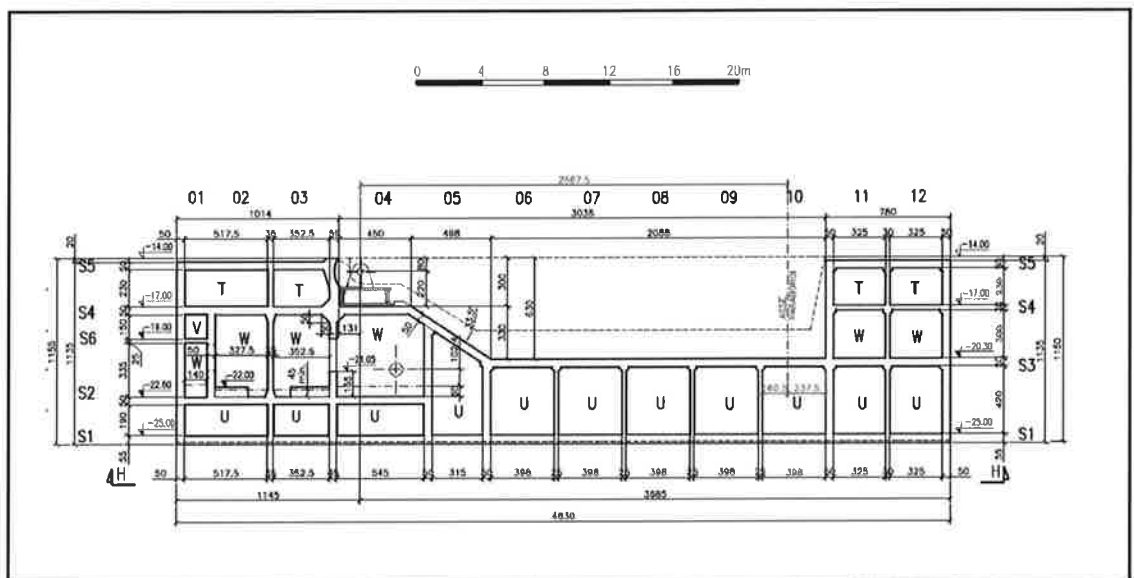
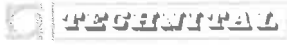


FIG. 4.4 – SEZIONE TIPICA DEL CASSONE DI SOGLIA DELLA BARRIERA DI MALAMOCCHO

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 15
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

5. FUNZIONAMENTO DELLE PARATOIE

5.1. Considerazioni Generali

Il funzionamento delle opere di sbarramento è descritto in dettaglio in Rif. [P.1]; se ne sintetizzano qui gli elementi essenziali.

La paratoia è incernierata sulla struttura fissa costituita dai cassoni di fondazione; l'unico grado di libertà non vincolato per la paratoia è la rotazione attorno all'asse passante per i centri delle due cerniere sferiche che fanno parte dei gruppi cerniere-connettori.

In condizioni di riposo, la paratoia è appoggiata in posizione orizzontale nell'apposito recesso realizzato nei cassoni di fondazione.

Per l'operazione di sollevamento la paratoia viene messa in movimento per rotazione immettendo aria compressa per espellere l'acqua all'interno.

Una volta raggiunto l'assetto di lavoro, la posizione viene monitorata dagli strumenti e regolata immettendo/sfiatando aria.


Per l'affondamento si procede analogamente sfiatando parzialmente l'aria contenuta e consentendo l'entrata dell'acqua; la discesa verso il recesso viene arrestata da ammortizzatori in gomma applicati alla paratoia stessa.

La struttura scatolare della paratoia risulta stagna all'ambiente esterno con l'eccezione di quattro aperture sulla superficie verticale (lato posteriore) più vicina alle cerniere che mettono il vano interno in comunicazione diretta con l'ambiente esterno e di un numero di tubi convergenti in due collettori che, passando nel corpo del connettore sono collegati alle tubazioni di adduzione dell'aria compressa ed a quelle di sfiato all'atmosfera dell'aria contenuta all'interno delle paratoie quando queste vengono affondate sul fondo della bocca.

5.2. Sollevamento iniziale e chiusura della barriera

L'azionamento delle paratoie per realizzare la chiusura del canale avviene mettendo in funzione i compressori nella centrale di compressione all'Isola di Lido e immettendo aria compressa all'interno delle paratoie.

La pressione dell'aria immessa è tale da espellere l'acqua dall'interno della

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 16
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

paratoia. L’acqua contenuta nella paratoia è in contatto con quella esterna in corrispondenza delle aperture situate sul fasciame inclinato del fondo in prossimità delle cerniere: la pressione necessaria dell’aria immessa è dunque determinata dal battente idrostatico esterno in corrispondenza di tali aperture e dal battente idrostatico interno dell’acqua nella paratoia. Quando la pressione dell’aria raggiunge il valore necessario, l’acqua interna viene spinta fuori dalla paratoia e sostituita da una bolla d’aria in pressione.

I volumi d’aria e le pressioni a cui questi devono essere immessi nelle paratoie sono stati calcolati per tutte le possibili condizioni operative in termini di livello di salvaguardia in laguna e sono riportati in Rif. [P.1].

Il calcolo del sollevamento iniziale è basato sulla spinta idrostatica necessaria a vincere il momento del peso della paratoia rispetto all’asse cerniere, con paratoia in posizione di riposo nel cassone di fondazione.


Per ottenere la spinta idrostatica desiderata è necessario rimpiazzare l’equivalente volume geometrico di acqua con aria alla pressione corrispondente al battente idrostatico che si viene a creare sulla superficie di separazione aria/acqua all’interno della paratoia.

Al fine di rendere più efficace lo svuotamento iniziale della paratoia questa è stata dotata di un setto parziale situato verso l’estremità della paratoia opposta alle cerniere che individua uno pseudo-compartimento (cfr. par. 4.2). I tubi di adduzione (cfr. par. 4.4) convogliano l’aria compressa all’interno di detto compartimento, che, essendo collocato alla massima distanza dalle cerniere, massimizza il momento della spinta idrostatica rispetto all’asse di rotazione della paratoia.

5.3. Regolazione delle paratoie per i dislivelli di progetto

Una volta iniziato il sollevamento il volume di aria immessa inizialmente aumenta in quanto il battente idrostatico diminuisce e quindi l’aria si espande.

La posizione di emersione della paratoia è quindi più innalzata rispetto a quella corrispondente al volume geometrico con cui si è sollevata, ma comunque inferiore all’angolo di lavoro della schiera che è stato stabilito di 45° per Malamocco.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 17
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

Quindi, dopo che l’intera schiera di paratoie di un canale di bocca è stato azionata ed ha quindi interrotto il flusso della marea entrante, tutte le paratoie della medesima schiera devono essere ulteriormente innalzate fino a raggiungere l’angolo teorico di lavoro e quindi ulteriormente svuotate d’acqua per aumentarne la spinta netta e quindi la capacità di contrastare il dislivello fra mare e laguna.

5.4. Affondamento della paratoia

Per la riapertura della barriera alla cessazione del fenomeno di marea, le paratoie vengono affondate in modo che scendano negli appositi alloggiamenti situati nei cassoni di fondazione.


Per l’affondamento si procede sfiatando parzialmente l’aria contenuta e consentendo l’entrata dell’acqua.

All’inizio di questa operazione il livello in laguna è uguale al livello in mare.

Il moto di affondamento, come si vedrà nel seguito, manifesta una fase di iniziale di accelerazione fino ad un valore massimo di velocità, ed una fase di decelerazione fino al raggiungimento del recesso con una velocità marcatamente inferiore.

La discesa verso il recesso viene arrestata da ammortizzatori in gomma applicati alla paratoia stessa.

La dinamica dell’affondamento è illustrata nei paragrafi successivi.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 18
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

6. ANALISI DEL MOTO DI AFFONDAMENTO - METODI

6.1. Configurazione Geometrica e Nomenclatura

La figura schematica seguente riporta i parametri geometrici fondamentali della Paratoia: viene rappresentata la configurazioni all’inizio dell’affondamento.

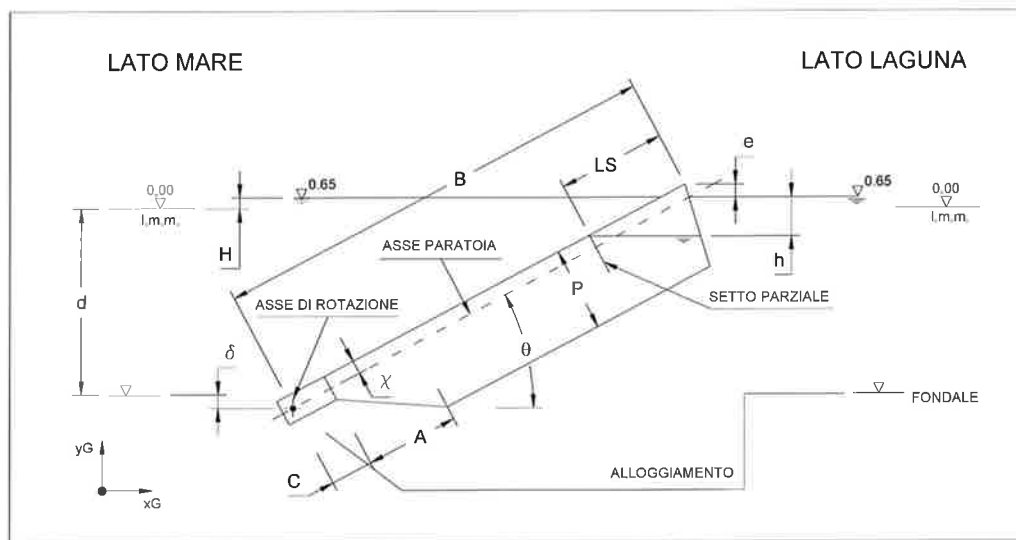
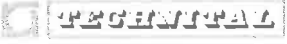



FIG. 6.1 – PARAMETRI GEOMETRICI E NOMENCLATURA

In figura è indicata la coordinata angolare θ della paratoia, definita in senso antiorario a partire dal piano fondale.

La tabella seguente riporta i valori geometrici relativi alla Paratoia di Malamocco (vedasi anche par. 4.2):

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 19
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

Parametro	Descrizione	Valore	Origine	Osservazioni
B	Lunghezza Paratoia misurata dall'asse cerniera	28.85 m	Configurazione Geometrica Paratoia Cfr. Par. 4.2	Parametri Costanti
G	Larghezza Paratoia (Non mostrata in figura)	19.92 m		
L _S	Lunghezza del compartimento delimitato dal Setto Parziale	6.15 m		
P	Altezza Paratoia	4.50 m		
C	Coordinata inizio cassa misurata dall'asse cerniera	2.50 m		
A	Lunghezza Tratto inclinato	4.75 m		
χ	Distanza tra Asse di Rotazione e piano paratoia lato Mare	0.80 m		
δ	Distanza verticale tra Asse di Rotazione e piano Fondale	0.80 m		
d	Profondità acqua per Livello Medio Mare (LMM)	14.0 m	Dati di progetto	Parametri Costanti
H	Livello Mare rispetto a LMM	0.65 m		
h	Livello Acqua in Paratoia rispetto al livello in laguna	3.06 m	Risultati del calcolo di equilibrio minimo Cfr. Par. 6.3	Valori all'inizio dell'affondamento
e	Emersione della Paratoia	0.05 m		
θ_{EQ}	Posizione Angolare iniziale riferita al piano Fondale	30.9°		
Valori della Configurazione Geometrica e dell'equilibrio all'inizio dell'affondamento relativi alla paratoia di Malamocco.				

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 20
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

A proposito di quanto riportato sopra valgono le presenti considerazioni:

- Il livello in laguna si suppone uguale a quello in mare durante il moto;
- Si è adottata la y come asse verticale: ciò consente di considerare positivo l’angolo θ nelle analisi vettoriali; per contro la velocità angolare risulta negativa.

6.2. Fasi del Moto di Affondamento e loro caratteristiche

Per la riapertura della barriera alla cessazione del fenomeno di marea, le paratoie vengono affondate in modo che scendano negli appositi alloggiamenti situati nei cassoni di fondazione.

Per l’affondamento si procede sfiatando parzialmente l’aria contenuta e consentendo l’entrata dell’acqua.

All’inizio di questa operazione il livello in laguna è uguale al livello in mare.

Un volta iniziato l’affondamento, la paratoia scende sotto la posizione di lavoro: il suo moto si può distinguere in due fasi:


- **Fase di moto in equilibrio indifferente**

In una prima fase la paratoia attraversa una successione di posizioni intermedie di equilibrio corrispondenti al volume dell’aria non ancora esaurita. In tale fase la paratoia si trova in una condizione di equilibrio quasi-statico e può, in linea di principio e sfiatando gradualmente, muoversi con velocità trascurabile e, chiudendo gli sfiati, essere arrestata.

Per questa ragione ci riferiamo a questa fase del moto come “Fase di moto in equilibrio indifferente”.

- **Fase di Affondamento**

Quando l’aria contenuta nella paratoia scende al di sotto del riempimento minimo di equilibrio inizia la discesa irreversibile, nella quale il moto vario è governato, oltre che dal peso, dall’inerzia della paratoia e dalla resistenza dell’acqua. In tale fase la discesa della paratoia è irreversibile in quanto, anche chiudendo gli sfiati, l’aria residua presente nel cassone è insufficiente a sostenere la paratoia.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 21
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

Pertanto si fa riferimento a questa fase del moto come “Affondamento” vero e proprio.

La successione delle fasi del moto è visualizzata nella figura seguente:

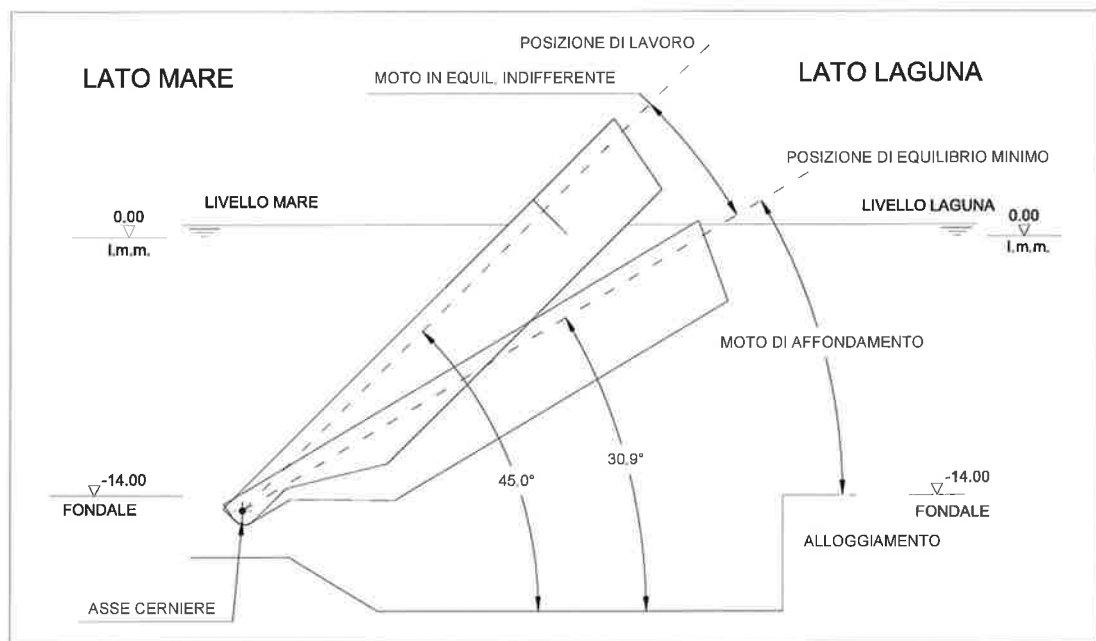



FIG. 6.2 – FASI DEL MOTO

Nella fase di Affondamento l’aria residua presente nella paratoia è soggetta a compressione dovuta al battente idrostatico che si incrementa al discendere della paratoia, riducendo quindi la spinta.

Contemporaneamente si incrementa la resistenza del fluido contenuto nel cassone di fondazione che la paratoia deve spostare per rientrare nel recesso.

Quindi il moto di affondamento, come si vedrà nel seguito, manifesta una fase di iniziale di accelerazione, fino ad un valore massimo di velocità, ed una fase di decelerazione, fino al raggiungimento del recesso con una velocità marcatamente inferiore.

Si osservi che la “Fase di moto in equilibrio indifferente” può, in linea di principio, protrarsi indefinitamente, mentre la “Fase di Affondamento” ha una durata finita e determinata dai parametri fisici del sistema.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 22
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

6.3. Posizione Iniziale di Equilibrio di Angolo Minimo

Secondo quanto discusso al par. 6.2, la condizione iniziale del moto di affondamento irreversibile corrisponde alla posizione angolare di equilibrio di angolo minimo.

Tale posizione viene sinteticamente indicata come “Posizione di equilibrio minimo”; essa è appunto determinata dal riempimento del cassone (e quindi da tutti i parametri correlati) cui corrisponde al minimo angolo θ_{EQ} per il quale è possibile l'equilibrio stesso.

Tale configurazione di equilibrio viene determinata mediante il programma di analisi statica PARAT3.

Il minimo angolo θ_{EQ} per il quale è possibile una posizione di equilibrio determina un valore corrispondente di h (Livello Acqua in Paratoia rispetto al livello in laguna, cfr. par. 6.1) e la conseguente pressione di equilibrio p_{EQ} dell'aria contenuta:

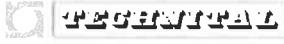
$$p_{EQ} = p_A + h \cdot \rho \cdot g$$

Dove:

$p_A = 1,01325 \text{ bar}$	$A = 101325 \text{ N/m}^2$	pressione atmosferica media
$g = 9.81 \text{ m/sec}^2$		accelerazione di gravità
$\rho = 1030 \text{ kg}_M/\text{m}^3$		densità di massa dell'acqua di mare

I risultati del calcolo sono riportati nel seguito, ove si riportano le caratteristiche di posizioni di equilibrio differenti.

I dati utilizzati nella presente analisi sono quelli che si hanno per angolo minimo, e sono evidenziati nel listato seguente:

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 23
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

P A R A T O I A : ANALISI DELL'EQUILIBRIO IDROSTATICO

Paratoia di Malamocco - Progetto esecutivo - Incrociata

Quota del fondale = 0.00 m
 Peso specifico dell'acqua = 1.030 t/m³
 Peso specifico acciaio paratoia = 7.850 t/m³
 Pressione atmosferica standard = 1.01325 barA

P A R A T O I A : ANALISI DELL'EQUILIBRIO IDROSTATICO

Paratoia di Malamocco - Progetto esecutivo - Incrociata

Peso totale = -366.000 t centro gra. = 16.04 -1.18 9.96 m
 Spinta totale = 2247.575 t centro spi. = 16.18 9.96 m
 Max zavorra = -2202.346 t centro gra. = 16.17 9.96 m


P A R A T O I A : ANALISI DELL'EQUILIBRIO IDROSTATICO

Paratoia di Malamocco - Progetto esecutivo - Incrociata

CURVE - DISLIVELLO da -0.8 a +2.8 m - ANGOLO da 34.5 a 70.5 gradi

mare	mare			disl.						Fh	Fv
m.m.	laguna	angolo	emers.	lag.	pres.	aria	aria	aria		kN	kN
m	m	gradi	m	m	barA	%	m ³	n.m ³			


0.65	0.00	30.90	0.05	-3.06	1.32	8.78	188.	245.	0.	-1249.
0.65	0.00	31.50	0.31	-2.83	1.30	8.84	189.	243.	0.	-1255.
0.65	0.00	32.00	0.52	-2.67	1.28	9.03	193.	245.	0.	-1247.

	Rev.	Data:	EI. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 24
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

Va osservato che:

- variando la pressione p dell'aria contenuta nella paratoia (e quindi "h" e l'emersione "e") si possono ottenere, con continuità, posizioni di equilibrio con angoli $\theta > \theta_{EQ}$;
- La pressione p_{EQ} è inferiore alla pressione p_s necessaria per sollevare la paratoia quando si trova nell'alloggiamento, in altre parole la quantità d'aria in normal metri cubi (Nm^3) necessaria per sollevare la paratoia è maggiore di quella contenuta nella paratoia in equilibrio in θ_{EQ} ; pertanto la pressione di sollevamento ed i successivi aggiustamenti (cfr. par. 5) portano la paratoia ad una posizione di lavoro $\theta_w > \theta_{EQ}$;
- La posizione θ_{EQ} dunque si raggiunge sfiatando aria dalla precedente posizione θ_w ;
- Per angoli inferiori a θ_{EQ} l'equilibrio statico non è possibile; quindi se in θ_{EQ} si sfiata ulteriormente aria ha inizio la discesa irreversibile.

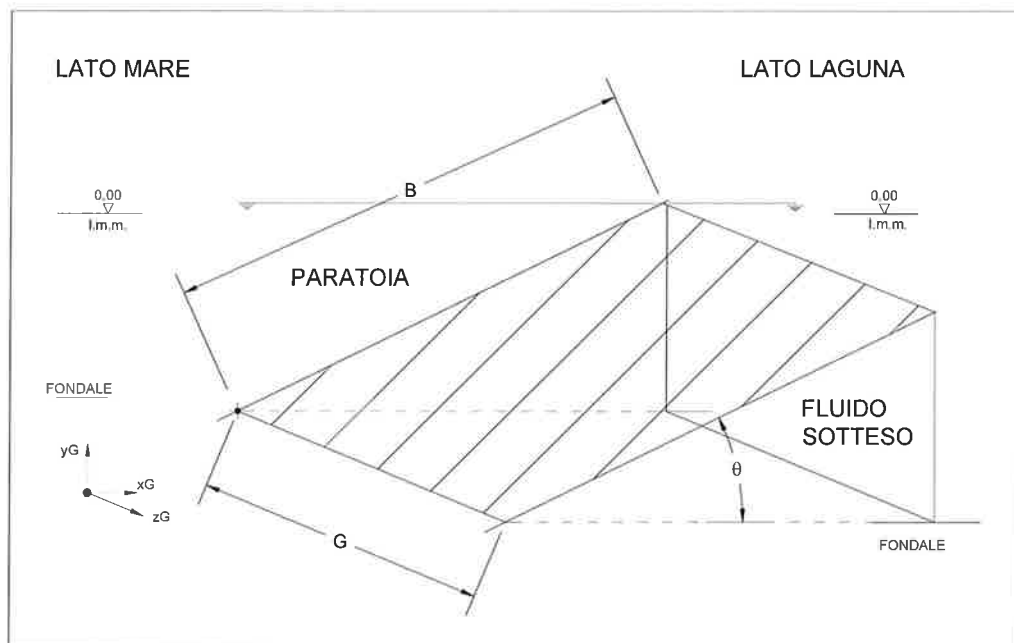
Conseguentemente lo studio del moto in affondamento avrà inizio esattamente dalla configurazione θ_{EQ} .

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 25
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

6.4. Equazione del Moto e Parametri Correlati

6.4.1. Definizione del Sistema e della Coordinata Descrittiva

Innanzitutto si definisce il “sistema” in considerazione ed i suoi limiti.



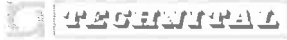
In base alla figura precedente consideriamo come sistema:

- la paratoia;
- il fluido sotteso dalla paratoia, cioè compreso tra essa ed il fondale.

Il moto discendente della paratoia tende ad espellere il fluido attraverso le superfici frontale e laterale riducendo progressivamente il volume di fluido sotteso.

Il fluido uscente dal volume sotteso viene incorporato nel fluido circostante; le proprietà idrodinamiche di entrambi ne saranno dunque modificate, in un processo considerato irreversibile.

Dunque il fluido uscente, una volta fuori dal sistema, si ritiene disconnesso dal sistema stesso e cioè non più in grado di interagire con esso e di restituirgli

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 26
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

(eventualmente) la sua energia; la sua energia cinetica sarà convertita in energia cinetica e potenziale del fluido circostante (per esempio accelerando le particelle e provocando onde di livello) ed il lavoro compiuto dalla pressione del fluido circostante influenzerà solo la energia cinetica del fluido uscente (rallentandolo).

Si considera che lo stato meccanico del sistema sia descritto completamente dalla coordinata angolare θ .

6.4.2. Equazione del moto

Il moto di un sistema attorno ad un centro di rotazione obbedisce alla equazione generale di Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} T \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} T = N(\theta)$$

Dove:

$\theta(t)$ angolo di rotazione

t tempo

T energia cinetica del sistema

N momento delle forze esterne agenti sul sistema


L’equazione di cui sopra, nella sola variabile θ , riflette l’ipotesi secondo la quale lo stato meccanico del sistema sia descritto completamente dalla coordinata angolare θ .

In par. 6.4.1 si è riconosciuto come “sistema” l’insieme della paratoia e del fluido sotteso; pertanto possiamo scrivere:

$$T = T_p + T_f$$

$$N = N_p + N_f$$

dove i pedici “P” ed “F” si riferiscono rispettivamente alle proprietà relative alla Paratoia e al Fluido sotteso.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 27
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

Pertanto l’equazione prende la forma:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} T_p \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} T_p + \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} T_f \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} T_f = N_p(\theta) + N_f(\theta)$$

L’equazione di cui sopra è completata dalle condizioni iniziali:

$$\begin{aligned} \theta(t=0) &= \theta_{EQ} \\ \left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{t=0} &= \dot{\theta}_0 = 0 \end{aligned}$$

Si osservi che, in accordo con quanto discusso al par. 6.3, il moto di affondamento inizia da una fase di moto in equilibrio quasi-statico, per cui la velocità angolare iniziale si può ritenere nulla con buona approssimazione.

Nell’equazione tutte le grandezze si considerano non dipendenti esplicitamente dal tempo: la loro dipendenza dal tempo è solo tramite θ .

La complessità formale delle espressioni che esprimono i termini che entrano alla equazione rende graficamente impraticabile la stesura completa della equazione di cui sopra.

Verranno pertanto indicati sinteticamente i criteri e le espressioni generali dei singoli termini dell’equazione, restando inteso che l’equazione finale è determinata dalla somma dei contributi individuali.


6.4.3. Elementi Trascurati nell’Equazione del Moto

Più in generale rispetto a quanto enunciato in par. 6.4.2, il moto del sistema obbedisce alla seguente equazione:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{dU}{dt} = \frac{dW}{dt} + \frac{dQ}{dt}$$

Dove:

T energia cinetica del sistema (considerata in par. 6.4.2)


	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 28
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

- W lavoro compiuto dalle forze esterne (considerato in par. 6.4.2 tramite il momento N)
- U energia interna del sistema (non considerata in par. 6.4.2)
- Q energia cinetica aggiunta al sistema (non considerata in par. 6.4.2)

Si noti infatti che durante il moto:

- Gli effetti termodinamici sull'aria contenuta nella paratoia producono un incremento dell'energia interna misurata dall'incremento della temperatura. Tale variazione di temperatura si può valutare elementarmente, ad esempio, nelle ipotesi di compressione adiabatica, adottando $\gamma \approx 1.4$ come rapporto tra Calore Specifico a pressione costante e Calore Specifico a volume costante dell'aria.

La maggior parte del lavoro necessario per la compressione è compiuto dalla pressione idrostatica esterna, ma parte anche dalla paratoia, attraverso la velocità radiale impressa dal moto rotatorio alle particelle fluide (si veda più oltre).
- al sistema si aggiunge massa dall'esterno (acqua di zavorra), che entra a velocità non nulla e stabilita dalla fluidodinamica delle bocche di entrata. Pertanto nel sistema (ed in particolare nella paratoia) entra, oltre alla massa (tenuta in conto dalla variazione di momento di inerzia di massa), anche energia cinetica; data però la posizione delle bocche di entrata (situate sul lato inferiore della paratoia) la quantità di moto introdotta è contraria a quella posseduta dalla paratoia in affondamento. Pertanto parte del lavoro compiuto dai momenti delle forze agenti sarà destinato a modificare il momento della quantità di moto introdotto.
- Si suppone che la massa fluida sia in equilibrio statico all'interno della paratoia, il che equivale ad ipotizzare che la pressione dell'aria intrappolata fornisca sempre la forza centripeta necessaria a impedire il moto radiale del fluido mantenendolo in moto esclusivamente rotatorio. D'altra parte l'acqua comprime l'aria, e dunque è in moto (lento) dall'asse di rotazione verso la periferia; parte (qualche per cento della velocità) di questo moto è provocato anche dalla rotazione della paratoia stessa.

	Rev.	Data:	EI. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 29
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

Gli effetti di cui sopra rivestono un ruolo secondario sul moto, e vengono trascurati.

Per cui:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dW}{dt}$$

dà luogo all’equazione descritta al par. 6.4.2.

6.4.4. Paratoia: Termine Cinetico

Il termine cinetico connesso col moto della paratoia è espresso da:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} T_P \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} T_P$$

L’energia cinetica della paratoia T_P è espressa da:

$$T_P = \frac{1}{2} J(\theta) \cdot \left(\dot{\theta} \right)^2$$


Il momento di inerzia di massa J tiene conto della massa complessiva associata alla paratoia.

Si deve osservare che nell’espressione di T_P il momento d’inerzia J non è costante, bensì è variabile con la coordinata angolare, alla quale è associato, istante per istante, un diverso riempimento della paratoia.

In realtà si tratta di una correzione piuttosto modesta, ma se ne tiene conto comunque.

Pertanto risulta:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} T_P \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} T_P = J(\theta) \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2$$

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 30
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

Allo scopo di semplificare i calcoli il momento di inerzia di massa è stato determinato considerando il momento d’inerzia (costante) della cassa completamente piena d’acqua e deducendone la quota (variabile) complementare della parte in realtà occupata dall’aria.

Pertanto il momento d’inerzia di massa complessivo del sistema J è composto come segue:

$$J = J_S + (J_Z - J_A) + J_{AGG}$$

Dove:

J_S momento d’inerzia della struttura in acciaio, indipendente da θ ;

J_Z momento d’inerzia della zavorra che riempie completamente la paratoia, indipendente da θ ;

J_A momento d’inerzia complementare del volume d’acqua pari a quello occupato dall’aria, dipendente da θ ;

J_{AGG} momento d’inerzia della massa aggiunta, indipendente da θ .

A sua volta ciascuna componente J_i ($i=S, Z, A, AGG$) è data da due contributi:

$$J_i = J_{C_i} + M_i \cdot R_i^2$$

J_{C_i} momento d’inerzia attorno all’asse parallelo all’asse di rotazione ma passante per il centro della massa

M_i massa totale

R_i distanza del centro di massa dall’asse di rotazione

Tenuto conto che solo J_A dipende dall’angolo θ si ha che:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} T_P \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} T_P = [J_S + J_Z - J_A + J_{AGG}] \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} - \frac{1}{2} \frac{\partial J_A}{\partial \theta} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2$$

Per quanto concerne le diverse componenti del momento di inerzia di massa valgono le considerazioni seguenti:

- **Momento d'inerzia di massa della struttura in acciaio**

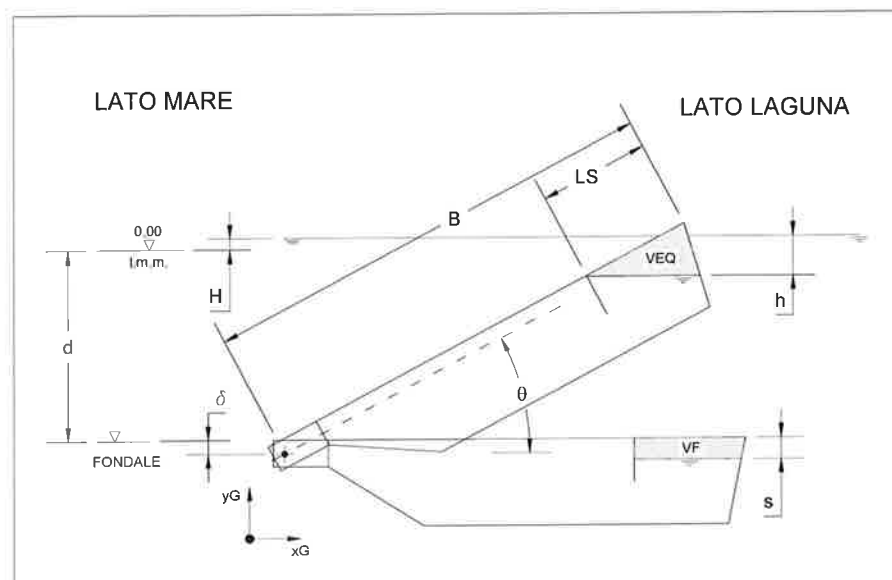
Per la struttura della paratoia tutte le proprietà di inerzia sono determinate dai dati di progetto e di configurazione geometrica; pertanto è noto complessivamente il momento di inerzia di massa rispetto all'asse di rotazione J_S .


- **Momento d'inerzia di massa della zavorra completa**

Per la zavorra (completa) tutte le proprietà di inerzia sono determinate dai dati di progetto e di configurazione geometrica; pertanto è noto complessivamente il momento di inerzia di massa rispetto all'asse di rotazione J_Z .

- **Momento d'inerzia di massa complementare (aria)**

Il momento d'inerzia di massa variabile J_A relativo al volume occupato dall'aria, come se fosse riempito d'acqua, viene calcolato a partire dalle condizioni iniziale e finale, considerando i volumi d'aria VEQ e VF ad inizio e fine affondamento, come schematicamente rappresentato in figura:



	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 32
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

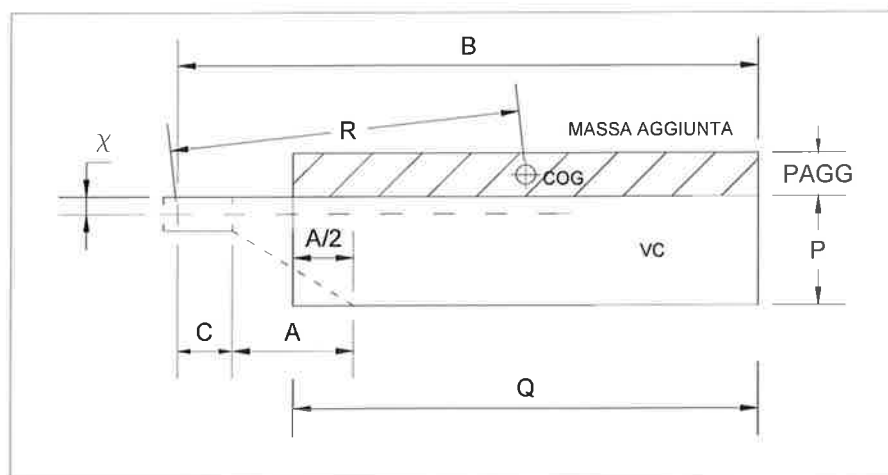
Il momento d’inerzia di massa J_A varia dalla posizione iniziale a quella finale. Per semplicità nel calcolo del moto si suppone che la variazione sia lineare con l’angolo, ossia:

$$J_A(\theta) = J_A(EQ) + \frac{J_A(F) - J_A(EQ)}{\theta_{EQ}} (\theta_{EQ} - \theta)$$

- **Momento d’inerzia di massa aggiunta**

La dinamica del fluido sotteso è trattata come parte del sistema in considerazione.

Il comportamento del fluido sovrastante la paratoia è schematizzato più semplicemente considerando un termine di massa aggiunta, per il calcolo si fa riferimento alla figura.




Si ipotizza che la massa aggiunta sia distribuita uniformemente sul lato superiore della cassa resa equivalente ad una sezione rettangolare il cui volume V_C è:

$$V_C = Q \cdot P$$

La massa aggiunta è in generale definita come:

$$M_{AGG}(\text{gen}) = C_{AGG} \cdot V_C \cdot \rho$$

ove il coefficiente di massa aggiunta C_{AGG} misura quanta parte del volume in

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 33
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

moto della cassa (VC) si debba considerare in moto nell’ambiente fluido che circonda la cassa stessa.

Se non si considerasse in dettaglio il comportamento fluidodinamico della parte inferiore (par. 6.4.4), potremmo ritenere che globalmente e conservativamente:

$$1 \leq C_{AGG} \leq 2$$

Pertanto dovendo considerare solo la parte sovrastante si pone:

$$M_{AGG} = \frac{1}{2} C_{AGG} \cdot V_C \cdot \rho$$

Nell’ipotesi di distribuzione di cui sopra risulta:

$$P_{AGG} = \frac{\frac{1}{2} C_{AGG} \cdot V_C}{Q \cdot G}$$

con immediato calcolo del momento di inerzia corrispondente.

6.4.5. Paratoia: Momento delle Forze Esterne

La massa d’acqua contenuta nella cassa della paratoia è variabile durante il moto, dunque varia anche il momento dovuto al suo peso.


In modo analogo la paratoia inizialmente ha una parte emersa, dunque la sua spinta idrostatica varia fino all’istante in cui la paratoia si immerge completamente.

Allo scopo di semplificare i calcoli si considera:

- il contributo di peso della cassa completamente piena d’acqua e deducendone la quota complementare della parte in realtà occupata dall’aria;
- il contributo di spinta della cassa completamente immersa e deducendone la quota complementare della parte emersa.

Il momento delle forze agenti complessivo sul sistema N si può considerare dunque composto come segue:

$$N(\theta) = N_S + [N_Z(\theta) + N_A(\theta)] + [N_B(\theta) + N_{BE}(\theta)]$$

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 34
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

Dove:

$N_S(\theta)$ momento dovuto al peso in aria della struttura in acciaio

$N_Z(\theta)$ momento dovuto al peso in aria della zavorra che riempie completamente la paratoia

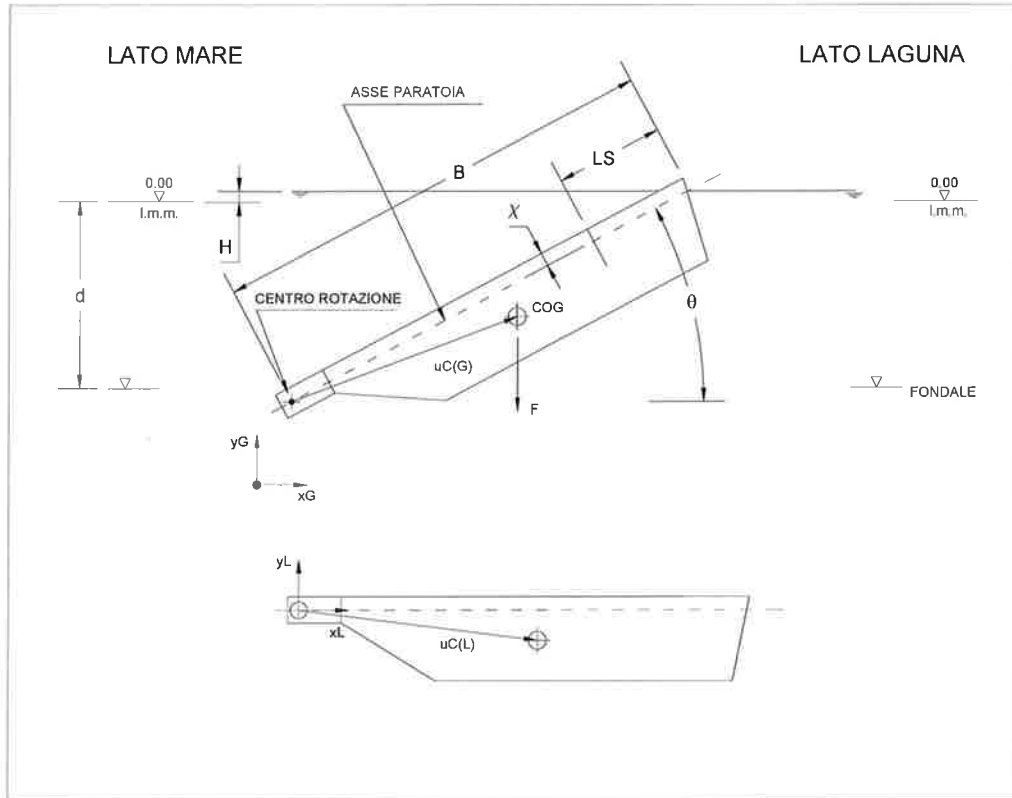
$N_A(\theta)$ momento complementare dovuto al peso in aria di un volume d'acqua pari a quello occupato dall'aria

$N_B(\theta)$ momento dovuto alla spinta idrostatica sulla paratoia completamente immersa

$N_{BE}(\theta)$ momento dovuto alla spinta idrostatica sulla parte emersa della paratoia

I momenti per una data coordinata angolare θ si ottengono tramite opportuna trasformazione di rotazione tra il sistema Locale (fisso rispetto alla paratoia) e quello Globale.

Lo Schema tipico per il calcolo dei momenti dovuti a pesi/spinte è rappresentato nella figura seguente, valida per il caso della forza peso agente sulla struttura della paratoia.



I momenti sono calcolati in senso algebrico, dotati quindi di un segno opportuno determinato dal verso della forza che li genera rispetto all'asse di rotazione.


All'equilibrio si ha che:

$$N_S(\theta_{EQ}) + [N_Z(\theta_{EQ}) + N_A(\theta_{EQ})] + [N_B(\theta_{EQ}) + N_{BE}(\theta_{EQ})] = 0$$

$$N_{BE}(\theta_{EQ}) = -[N_S(\theta_{EQ}) + N_Z(\theta_{EQ}) + N_A(\theta_{EQ}) + N_B(\theta_{EQ})]$$

Pertanto il momento di spinta complementare di emersione sarà determinato per differenza degli altri termini, in tal modo "rettificando" l'equilibrio rispetto alle inevitabili approssimazioni di calcolo.

Per quanto concerne le diverse componenti del momento di inerzia di massa valgono le seguenti considerazioni:

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 36
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

- **Momento dovuto al peso della struttura in acciaio**

Per la struttura della paratoia tutte le proprietà di peso sono determinate dai dati di progetto e di configurazione geometrica; pertanto è noto il peso e il baricentro, da cui discende il momento rispetto all'asse di rotazione N_S .

- **Momento dovuto al peso della zavorra completa**

Per la zavorra (completa) tutte le proprietà di peso sono determinate dai dati di progetto e di configurazione geometrica; pertanto è noto il peso e il baricentro, da cui discende il momento rispetto all'asse di rotazione N_Z .

- **Momento complementare di spinta dovuto all'aria residua nella cassa**

Analogamente a quanto descritto al par. 6.4.4, il momento di spinta dovuto alla all'aria inclusa nella cassa viene calcolato a partire dalle condizioni iniziale e finale, considerando i volumi d'aria VEQ e VF ad inizio e fine affondamento.

Il momento d'inerzia di massa N_A varia dalla posizione iniziale a quella finale. Per semplicità nel calcolo del moto si suppone che la variazione sia lineare con l'angolo, ossia:


$$N_A(\theta) = N_A(EQ) + \frac{N_A(F) - N_A(EQ)}{\theta_{EQ}} (\theta_{EQ} - \theta)$$

- **Momento della spinta idrostatica sulla cassa completamente immersa**

Per la struttura della paratoia tutte le proprietà sono determinate dai dati di progetto e di configurazione geometrica; pertanto è noto il volume totale della struttura e la posizione del Centro di Spinta, da cui discende il momento di spinta rispetto all'asse di rotazione N_B .

Si deve notare che, per come si è definito il sistema in par. 6.4.1, la spinta idrostatica è, per la parte relativa alla faccia inferiore della paratoia, dovuta in verità ad azioni interne tra paratoia e fluido sotteso.

Questa incongruenza, dettata dalla necessità di mantenere una continuità di concetti con l'analisi statica, sarà compensata dal modo in cui si calcoleranno le azioni esterne sulla massa fluida sottesa.

	Rev.	Data:	EI. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 37
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

- **Momento complementare di emersione**


L’emersione iniziale “e” contribuisce a determinare il volume immerso della paratoia e quindi la spinta idrostatica. Tale parametro si presenta piuttosto modesto rispetto alle dimensioni della paratoia, pertanto l’emersione “e” avrà un effetto altrettanto modesto sulla spinta globale e solo nelle primissime fasi del moto, in quanto ben presto la paratoia si immerge completamente.

Per questi motivi le approssimazioni con le quali l’emersione iniziale viene trattata avranno effetti trascurabili.

Il momento complementare della spinta N_{BE} è dovuto alla spinta idrostatica sulla parte emersa della paratoia. Esso però viene calcolato all’equilibrio per differenza rispetto alle altre forze agenti, e cioè come:

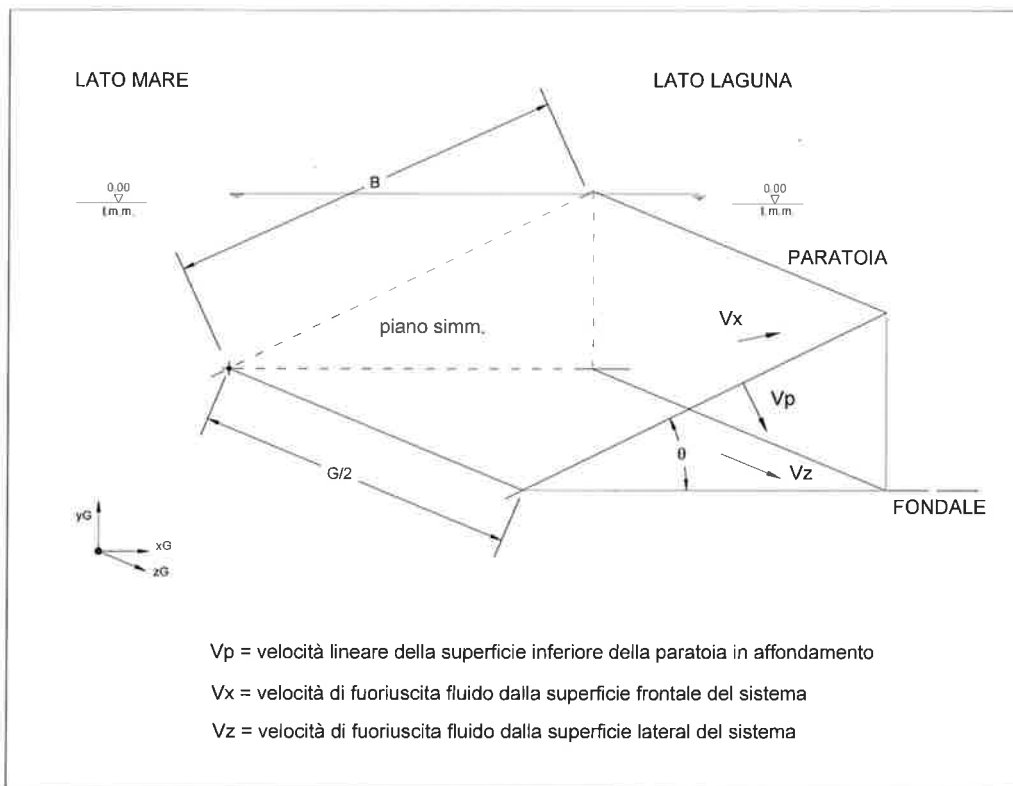
$$N_{BE} = -[N_S + (N_Z + N_A) - N_B]$$

Per il modo in cui è ricavato tale valore può non corrispondere esattamente al volume emerso; essenzialmente, tuttavia, N_{BE} deve avere segno opposto rispetto a N_B , ed in questo senso si applica un controllo.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 38
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

6.4.6. Fluido Sotteso: Termine Cinetico

Il moto della massa fluida sottesa dalla paratoia è stato determinato considerando il fluido (acqua marina) compreso tra la parete della paratoia ed il fondale.




Il fluido si considera incomprimibile, irrotazionale e non viscoso; pertanto, il campo di velocità è definito dalla funzione potenziale $\phi(x,y,z)$ tale che:

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad ; \quad v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad ; \quad v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{eq. di Laplace}$$

L'imposizione delle opportune condizioni al contorno e di simmetria porta a determinare completamente il campo di velocità del fluido che risulta dipendere dalla coordinata angolare della paratoia e dalla sua velocità angolare.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 39
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

L'energia cinetica del fluido sotteso viene dunque calcolata e risulta data da:

$$T_F(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} (\dot{\theta})^2 \cdot \tau_F(\theta)$$

$$\tau_F(\theta) = \frac{1}{12} \rho \cdot B^4 \cdot G \cdot [\text{tg}(\theta) + \text{tg}^3(\theta)] \cdot \cos^6(\theta) + \frac{1}{24} \cdot \rho \cdot G^3 B^2 \cdot \left[\frac{1}{\text{tg}(\theta)} + \text{tg}(\theta) \right] \cdot [2 \cdot \cos(\theta) - 1]^2 \cdot \cos^2(\theta)$$

Tale espressione è utilizzata, in analogia a quanto già visto al par. 6.4.4, per il calcolo del termine cinetico del fluido sotteso:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} T_F \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} T_F$$

Ottenendo:


$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} T_F \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} T_F = \tau_F(\theta) \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_F(\theta)}{\partial \theta} \cdot \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2$$

Si osserva che:

- Il termine cinetico ha un addendo che dipende solo dalla velocità angolare (componente di trascinamento) ed uno che dipende solo dalla accelerazione angolare (componente inerziale).
Questi due addendi possono essere assimilati a effetti di drag e di massa aggiunta delle usuali trattazioni dei corpi in moto nei fluidi; per questa ragione la massa aggiunta esplicitamente considerata in par. 6.4.4 è stata calcolata senza considerare il fluido sotteso dalla paratoia;
- entrambi gli addendi che costituiscono il termine cinetico dipendono dalla posizione angolare.

Consideriamo nel termine cinetico di cui sopra il primo addendo, corrispondente alla componente inerziale.

Ricordiamo che il termine cinetico della massa aggiunta esaminato per la paratoia relativamente al fluido sovrastante (cfr. par. 6.4.4) risulta della forma:

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 40
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

$$J_{AGG} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

con:

$$J_{AGG} = 3.7 \cdot 10^8 \text{ kgM}\cdot\text{m}^2 \quad \text{per } C_M=1 \text{ nel caso della Paratoia di Malamocco}$$

Si ricorda che il calcolo di J_{AGG} è basato su concetti e metodi relativi all'analisi del moto di un corpo entro un fluido non limitato.

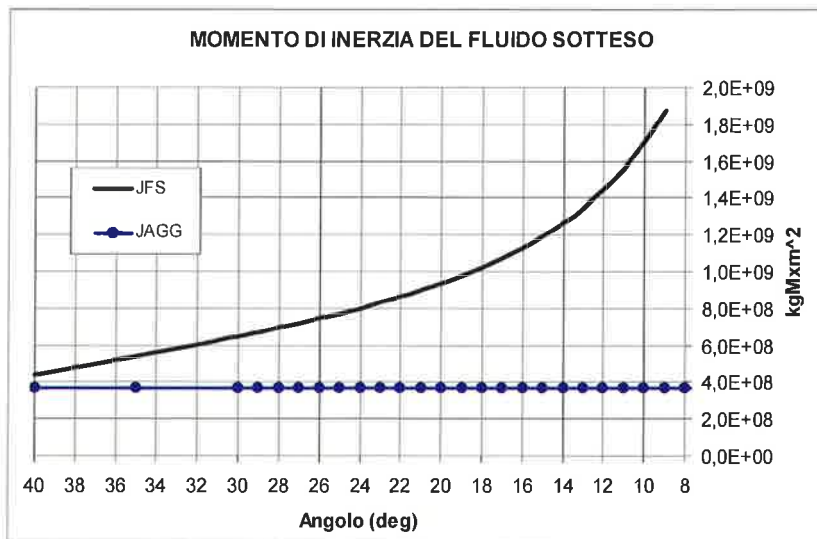
L'addendo analogo che compare nel termine cinetico per il fluido sotteso è:


$$\frac{d^2\theta}{dt^2} \tau_F(\theta)$$

Per cui si può considerare $\tau_F(\theta)$ alla stregua del momento di inerzia di massa del fluido sotteso, ossia indicando:

$$J_{FS}(\theta) = \tau_F(\theta)$$

Il diagramma di J_{FS} per la paratoia di Malamocco in funzione dell'angolo θ è dato nella figura seguente nella quale si riporta graficamente anche il valore di J_{AGG} :



	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 41
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

Il diagramma mostra come il valore di J_{FS} è, per quanto attiene l’ordine di grandezza, in ottimo accordo con il valore di J_{AGG} , che è calcolato per la parte del fluido sovrastante la paratoia e ponendo conservativamente $C_M=1$. Si ricordi che lo schema di calcolo di J_{AGG} adotta l’ipotesi di moto entro un fluido idealmente non limitato da pareti solide.

J_{FS} mostra inoltre un andamento convergente verso J_{AGG} per angolo crescente: ciò è in ottimo accordo con il fatto che per posizioni angolari crescenti l’interazione del fluido sotteso con il fondo del cassone di alloggiamento va progressivamente riducendosi e la paratoia si muove in condizioni sempre più vicine all’ipotesi di moto entro un fluido non limitato, adottate implicitamente per il calcolo di J_{AGG} .

Per angoli di affondamento inferiori o prossimi alla posizione di equilibrio statico, la limitazione al moto del fluido imposta dal fondo del cassone di alloggiamento sotteso risulta rilevante.

L’espressione di T_F per angolo $\theta \rightarrow 0$ viene limitata per mezzo di una trattazione semplificata dello strato limite viscoso (in condizioni di turbolenza).


La limitazione introdotta di fatto si attiva per angoli molto piccoli, quando ormai la paratoia è prossima all’arresto, dunque le approssimazioni introdotte hanno un effetto trascurabile sul risultato finale. Di fatto la considerazione del moto viscoso/turbolento è orientata principalmente ad evitare che, nel modello matematico di calcolo, si verifichino fenomeni di instabilità numerica.

6.4.7. Fluido Sotteso: Momento delle Forze Esterne

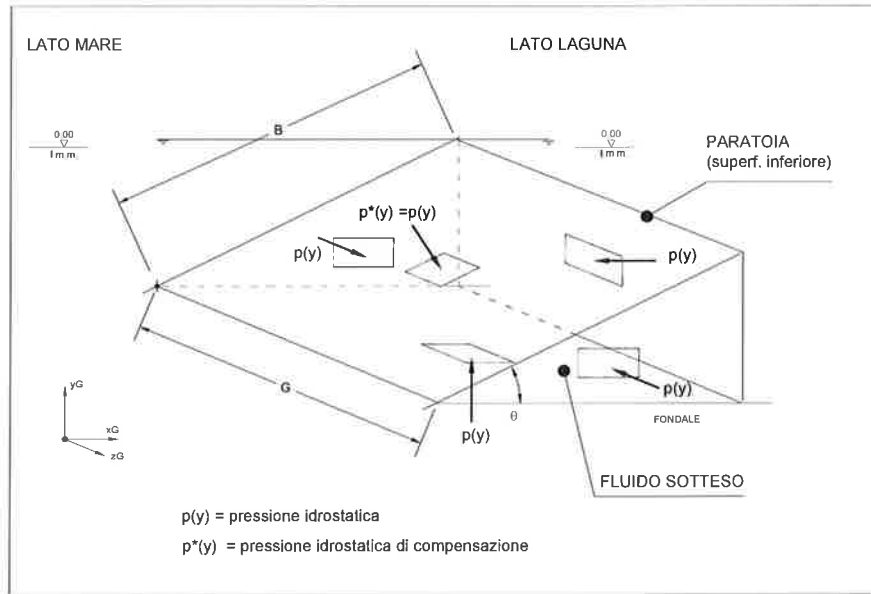
La massa d’acqua sottesa è soggetta alla forza di gravità ed alla pressione esterna.

Per come è stato definito il sistema (cfr. par. 6.4.1) la pressione esercitata dall’ambiente esterno sul sistema paratoia/fluido sotteso andrebbe calcolata considerando le superfici effettivamente di contorno del sistema.

In realtà in par. 6.4.5 è stata messa in conto la spinta idrostatica sull’intera paratoia, includendo quindi anche la superficie di confine con la massa sottesa, che in verità è un confine interno e non esterno.

	Rev.	Data:	EI. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 42
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

Pertanto, dovendo calcolare le azioni esterne sul fluido sotteso dobbiamo, per compensazione, aggiungere nel calcolo presente una forza pari ed opposta a quella già considerata in par. 6.4.5, come schematizzato in figura.




Il complesso delle pressioni applicate e rappresentate in figura rappresenta la pressione idrostatica globale sul fluido sotteso.

Si sa d'altronde che la risultante della pressione idrostatica su un volume è pari ed opposta al peso dell'acqua contenuta, dunque le due azioni gravità e pressione agenti sulla massa fluida si elidono.

Pertanto è corretto porre:

$$N_F(\theta) = 0$$

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 43
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

7. ANALISI DEL MOTO DI AFFONDAMENTO - RISULTATI

7.1. Considerazioni Generali

Il calcolo del moto di affondamento, basato sulla metodologia delineata al par. 6, è stato condotto per mezzo del programma di calcolo automatico dedicato AFFONDAMENTO, sviluppato in Visual Basic.

AFFONDAMENTO fa uso dei dati seguenti:

- Dati geometrici della paratoia (cfr. par. 6.1);
- Dati relativi all'equilibrio di angolo minimo (cfr. par. 6.3);
- Dati fisici generali (cfr. par. 6.3)

Come già discusso al par. 6.4.2 per il moto della paratoia si assumono le condizioni iniziali di equilibrio minimo con velocità angolare nulla; in tali condizioni la paratoia è ancora in equilibrio.

Per avviare lo sviluppo del moto viene simulato un ulteriore sfiato dell'aria contenuta della paratoia; tale sfiato, espresso matematicamente in termini percentuali rispetto al volume d'aria contenuta all'equilibrio minimo, determina lo squilibrio iniziale che avvia il movimento.


In tal modo viene simulato il processo di fuoriuscita dell'aria, che, si osservi, non è precisabile a priori in quanto dipende dall'effettivo svolgersi della specifica ed individuale operazione di affondamento.

Pertanto tale simulazione sarà oggetto dell'analisi di incidenza sui risultati di cui al par. 7.5.

L'analisi del moto conduce alla determinazione della velocità all'impatto (effettivo) e della velocità massima durante il moto.

Come si vede per es. in par. 7.3, il moto di affondamento manifesta una fase di iniziale di accelerazione, fino ad un valore massimo di velocità angolare, ed una fase di decelerazione, fino al raggiungimento del recesso con una velocità marcatamente inferiore.

Il calcolo della velocità angolare all'impatto determina in modo diretto i dati per

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 44
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

l'analisi strutturale della paratoia, in quanto fornisce l'energia cinetica della paratoia al momento dell'attivazione degli ammortizzatori.

Pertanto la determinazione della velocità angolare all'impatto è stata condotta sotto ipotesi largamente conservative.

D'altra parte la velocità massima e quindi l'energia massima durante il moto non incidono sulla dinamica degli ammortizzatori, in quanto vengono raggiunte precedentemente all'impatto.


Conseguentemente l'energia massima è considerata come un valore dimensionante estremo per la scelta degli ammortizzatori.

Per la determinazione di tale valore estremo il calcolo è stato condotto con procedimento di dettaglio differente rispetto al calcolo della velocità all'impatto.

7.2. Riepilogo dei Dati di Ingresso

I dati utilizzati dal programma per l'affondamento della generica Paratoia dello sbarramento di Malamocco sono raccolti nella tabella seguente:

DATI GEOMETRICI			
simbolo	Descrizione	unità	valore
d	Profondità acqua per Livello Medio Mare	m	14,00
H	Livello Mare Rispetto a LMM	m	0,65
B	Lunghezza Paratoia da Asse Cerniera	m	28,85
G	Larghezza Paratoia	m	19,92
L _S	Lunghezza Setto	m	6,15
χ	Distanza asse rotazione piano paratoia lato mare	m	0,80
δ	Distanza asse rotazione piano fondale	m	0,80
P	Altezza Paratoia (spessore)	m	4,50
C	Coordinata inizio cassa	m	2,50
A	Lunghezza Tratto inclinato	m	4,75
C _{AGG}	Coefficiente Massa Aggiunta	-	1,0
X _{IMP}	Coord PUNTO IMPATTO Paratoia risp. asse cern.	m	26,675
Y _{IMP}	Coord PUNTO IMPATTO Paratoia risp. asse cern.	m	-5,5

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 45
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	


DATI DI PESO , MASSA E SPINTA			
simbolo	Descrizione	unità	valore
M_S	Massa struttura Paratoia (senza connettori)	kN	3690
$X_S(L)$	Coord COG Paratoia Struttura rispetto asse cern.	m	15,883
$Y_S(L)$	Coord COG Paratoia Struttura rispetto asse cern.	m	-1,208
J_S	Momento di inerzia di massa struttura Paratoia	kNm^2	1212047
M_Z	Massa Totale zavorra	t_M	2202
$X_Z(L)$	Coord COG zavorra (totale) rispetto asse cern.	m	16,190
$Y_Z(L)$	Coord COG zavorra (totale) rispetto asse cern.	m	-1,355
F_B	Spinta Paratoia (completamente immersa)	t_F	2248
$X_B(L)$	Coord CS Paratoia rispetto asse cern.	m	16,178
$Y_B(L)$	Coord CS Paratoia rispetto asse cern.	m	-1,355

DATI EQUILIBRIO INIZIALE			
simbolo	Descrizione	unità	valore
$c(EQ)$	Angolo di equilibrio iniziale	deg	30,90
h	Livello acqua in Paratoia rispetto liv. Laguna	m	3,09
e	Emersione	m	0,05
p_{EQ}	Pressione aria equilibrio iniziale	barA	1,33
V_{EQ}	Volume aria equilibrio iniziale	m^3	192,00

Alcuni dei dati di cui sopra sono direttamente desunti da vari documenti di progetto, e riportati nelle unità di misura d'origine.

Pertanto:

- La Massa della struttura della Paratoia M_S è espressa in termini del peso corrispondente;
- Il momento di inerzia di Massa della struttura della Paratoia J_S è esposto in termini del peso corrispondente;
- La Massa Totale della zavorra M_Z è espressa in tonnellate-massa ($1 t_M = 1000 kg_M$);
- La Spinta della Paratoia è espressa in tonnellate-forza ($1 t_F = 9810 N$);
- L'angolo di equilibrio iniziale è espresso in gradi ($1^\circ = \pi/180 rad$);
- La Pressione è espressa in barA ($1 bar = 10^5 N/m^2$).

	Rev.	Data:	EI. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 46
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

7.3. Calcolo della Velocità Angolare all'Impatto: Risultati

Il calcolo della velocità angolare all'impatto determina direttamente i dati per l'analisi strutturale della paratoia, in quanto fornisce la velocità con la quale gli ammortizzatori iniziano ad interagire con la fondazione e la relativa energia cinetica che essi devono assorbire.

L'analisi è stata eseguita utilizzando un valore conservativo per il rapporto tra il volume d'aria presente nella paratoia all'impatto e il volume iniziale; tale valore di rapporto tra i due volumi è considerato pari a:


$$\frac{V}{V_{Eq}} = 0,60$$

Tale valore è stato ricavato considerando l'efflusso tipico ($\approx 4000 \text{ nm}^3/\text{h}$) da ciascuna delle valvole 4" dei tubi di sfiato al di sotto dei connettori e combinando questo dato con un tempo massimo di discesa della paratoia ($\sim 30 \text{ s}$). Considerato il volume all'equilibrio minimo (cfr. par. 7.2) e lo sfiato da 2 valvole, segue il valore di cui sopra.

Si osservi che il tempo massimo di discesa utilizzato nella valutazione precedente si ottiene, per contro, avendo sfiato una quantità d'aria minima, cosicché il dato utilizzato risulta largamente conservativo.

L'angolo di impatto in corrispondenza del quale viene calcolata la velocità in linea di principio è zero.

Essendo il moto rallentato nella fase finale dall'interazione paratoia-fluido risulta a favore di sicurezza considerare come angolo di impatto effettivo un valore di angolo θ_{IMP} positivo non nullo.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 47
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

In tal modo si considera conservativamente che l'impatto abbia luogo 5 cm prima del contatto effettivo con gli ammortizzatori; pertanto l'angolo di impatto effettivo θ_{IMP} viene fissato pari a:

$$\theta_{IMP} = \arctan\left(\frac{0.05 \text{ m}}{D_{AMM}}\right) = 0.11^\circ$$

Ove:

$D_{AMM}=27.24 \text{ m}$ distanza centro ammortizzatori rispetto asse cerniere

I risultati ottenuti nelle ipotesi assunte sono raccolti nella tabella seguente:

ANALISI AFFONDAMENTO PARATOIA LIDO S. NICOLO'		
CALCOLO VELOCITA' ANGOLARE ALL'IMPATTO		
Grandezza	Risultato	Note
Durata affondamento	11.3 s	Moto irreversibile
Velocità angolare paratoia all'impatto	0.77 deg/s	Valori all'impatto, per $t=11.3 \text{ s}$ $\theta \approx 0 \text{ deg}$
Velocità lineare ammortizz. all'impatto	0.36 m/s	
Energia cinetica paratoia all'impatto	86.4 kJ	

Nella figura seguente viene rappresentata l'evoluzione della coordinata angolare e della velocità angolare della paratoia:

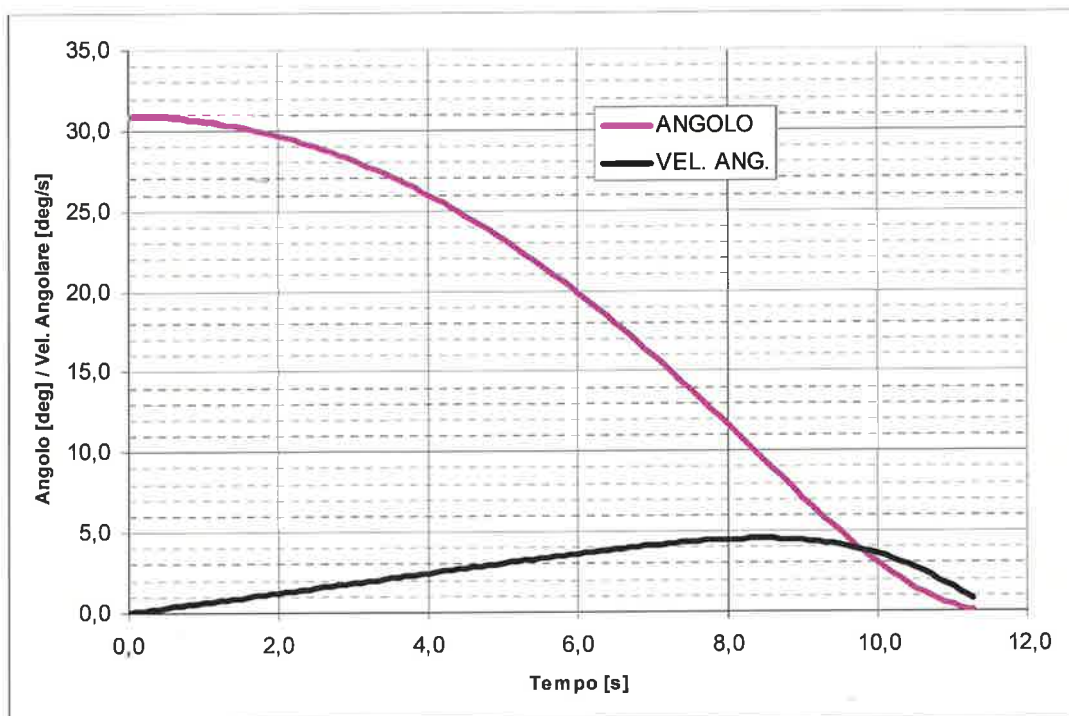



FIG. 7.1 – EVOLUZIONE DELLA COORDINATA ANGOLARE E DELLA VELOCITÀ ANGOLARE DELLA PARATOIA DURANTE L’AFFONDAMENTO

	Rev.	Data:	EI. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 49
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

7.4. Calcolo della Velocità Massima durante il Moto: Risultati

A differenza di quanto visto al par. 7.3, il calcolo della velocità massima durante il moto è stato eseguito considerando il rapporto V/V_{EQ} tra aria presente nella paratoia a fine corsa V e il volume iniziale V_{EQ} come effettivamente determinato dal tempo di discesa.

Il rapporto V/V_{EQ} viene determinato considerando uno sfiato per unità di tempo S costante pari all'efflusso tipico ($S \approx 4000 \text{ Nm}^3/\text{h}$) da ciascuna delle valvole 4" dei tubi di sfiato al di sotto dei connettori e combinando questo dato con il tempo effettivo di discesa della paratoia.

A favore di sicurezza, lo sfiato si considera avvenire simultaneamente da 2 valvole, benché la procedura preveda in realtà lo sfiato da una sola valvola.

Considerando che il volume all'equilibrio minimo V_{EQ} è dato (cfr. par. 7.2), segue che il moto derivante da un certo rapporto V/V_{EQ} è congruente quando la sua durata T risultante è tale che:


$$2 \cdot S \cdot T \left(\text{per } \frac{V}{V_{EQ}} \right) = V_{EQ} - V$$

La congruenza imposta così tra il volume d'aria effettivamente fuoriuscito nel tempo di discesa, e il volume d'aria residuo in paratoia sostituisce le ipotesi largamente conservative adottate in par. 7.3.

Il valore di V/V_{EQ} per cui il moto è congruente con i volumi in questione secondo i criteri di cui sopra, si ricava dai dati riportati in par. 7.5, Fig. 7.4, dai quali risulta che deve essere:

$$\frac{V}{V_{EQ}} = 0.89$$

I risultati ottenuti sono raccolti nella tabella seguente (i valori in corsivo sono introdotti solo per confronto con par. 7.3):

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 50
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

ANALISI AFFONDAMENTO PARATOIA LIDO S. NICOLO’		
CALCOLO VELOCITA’ MASSIMA DURANTE IL MOTO		
Grandezza	Risultato	Note
Durata affondamento	17.8 s	Moto irreversibile
<i>Velocità angolare paratoia all’impatto</i>	<i>0.60 deg/s</i>	<i>Valori all’impatto, per t=17,8 s θ≈0 deg</i>
<i>Velocità lineare ammortizz. all’impatto</i>	<i>0.28 m/s</i>	
<i>Energia cinetica paratoia all’impatto</i>	<i>52.3 kJ</i>	
Velocità angolare massima	3,30 deg/s	Valori massimi durante il moto, raggiunti per t=14,4 s θ=8.5 deg
Velocità lineare ammortizz. Massima	1.57 m/s	
Energia cinetica massima	1602.1 kJ	

Vista la generale complessità del fenomeno, per la scelta del tipo e delle caratteristiche dei parabordi si considera appropriato e conservativo assumere come **valore di progetto dell’energia cinetica della paratoia il valore massimo durante il moto:**

$$E_{MAX} = 1602.1 \text{ kJ per una paratoia}$$

Nelle figure seguenti viene rappresentata l’evoluzione della coordinata angolare e della velocità angolare della paratoia:

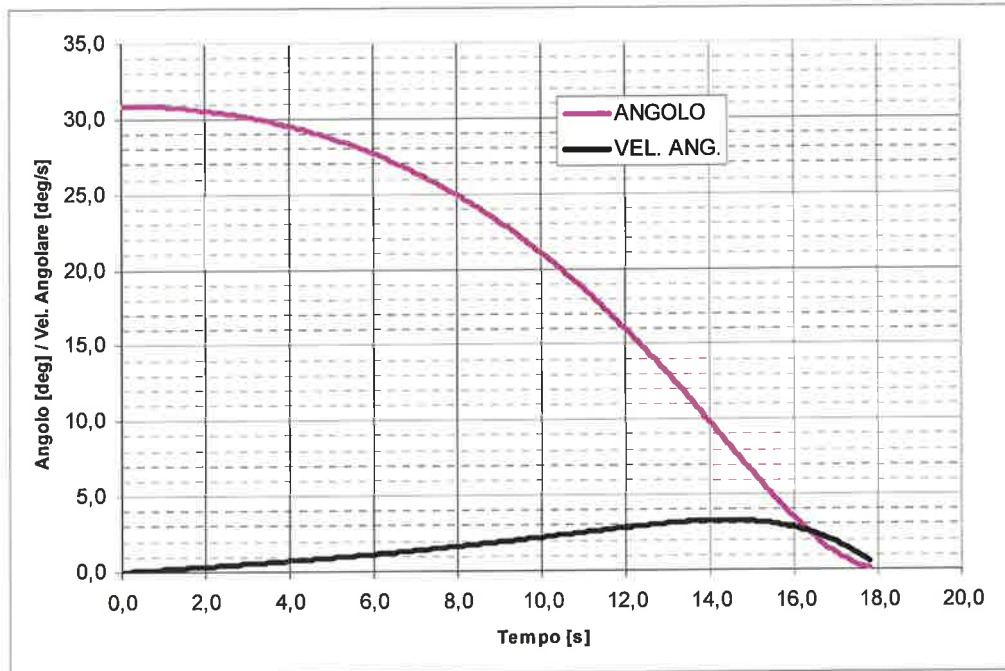


FIG. 7.2 – EVOLUZIONE DELLA COORDINATA ANGOLARE E DELLA VELOCITÀ ANGOLARE DELLA PARATOIA DURANTE L’AFFONDAMENTO

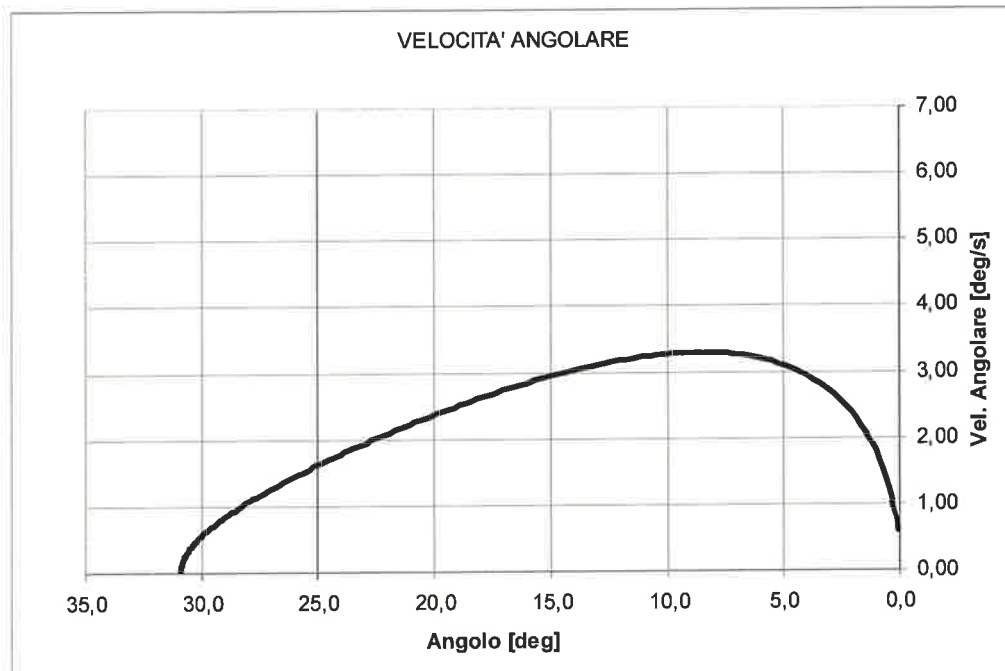



FIG. 7.3 – VELOCITÀ ANGOLARE IN FUNZIONE DELLA COORDINATA ANGOLARE

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 52
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

7.5. Incidenza sui risultati dei dati parzialmente determinati

Come già menzionato in precedenza i dati parzialmente determinati sono:

- le modalità di sfiato dell’aria contenuta nel cassone, che riflette le modalità dell’operazione di affondamento come operata specificamente;
- il coefficiente di massa aggiunta da attribuirsi al fluido sovrastante la paratoia.

Al fine di valutare l’incidenza della variazione di tali dati sui risultati finali, sono state effettuate diverse analisi del moto variando i parametri correlati.

In accordo con gli scopi della presente analisi, la velocità angolare all’impatto è stata considerata come il termine di confronto tra analisi differenti.

I risultati sono raccolti nei diagrammi seguenti, dai quali risulta che:

- la dipendenza dei risultati dal volume di aria residuo (Fig. 7.4) è sensibile, sia sulla velocità all’impatto che sul tempo di affondamento.
Dalla figura si evince con chiarezza che il valore di riempimento residuo considerato nel calcolo della velocità all’impatto ($V/V_{EQ}=0.60$) risulta conservativo, in quanto tale valore richiede tempi di sfiato molto più lunghi della durata del moto corrispondente;
- la dipendenza dei risultati dal Coefficiente di Massa Aggiunta (Fig. 7.5) è molto modesto sul tempo di affondamento e praticamente nullo sulla velocità all’impatto.
Pertanto il valore $C_{AGG} = 1$ utilizzato si può ritenere soddisfacente.

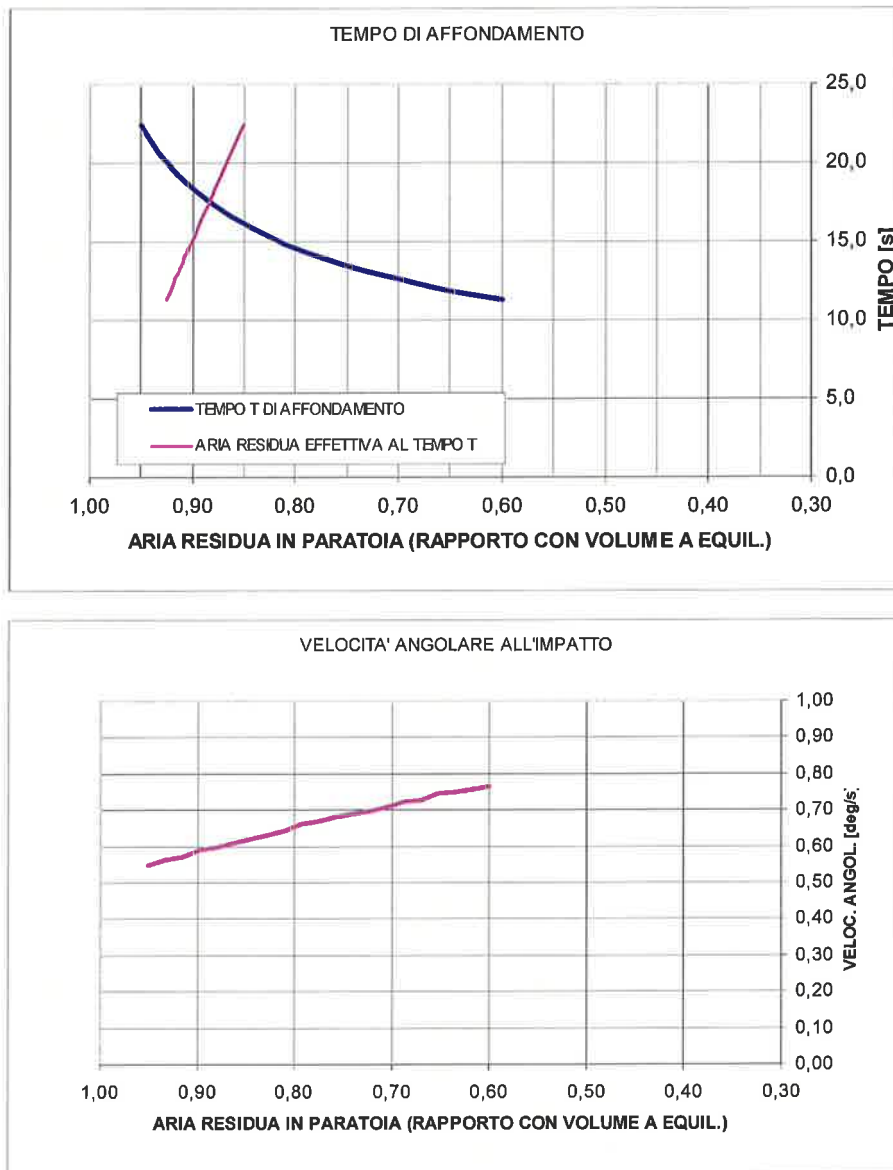


FIG. 7.4 – DIPENDENZA DEI RISULTATI DAI PARAMETRI - PARAMETRO VARIATO: VOLUME ARIA RESIDUA NELLA PARATOIA (RAPPORTO CON V_{EQ} , CFR. PARR. 7.3 E 7.4). ($C_{AGG}=1$)

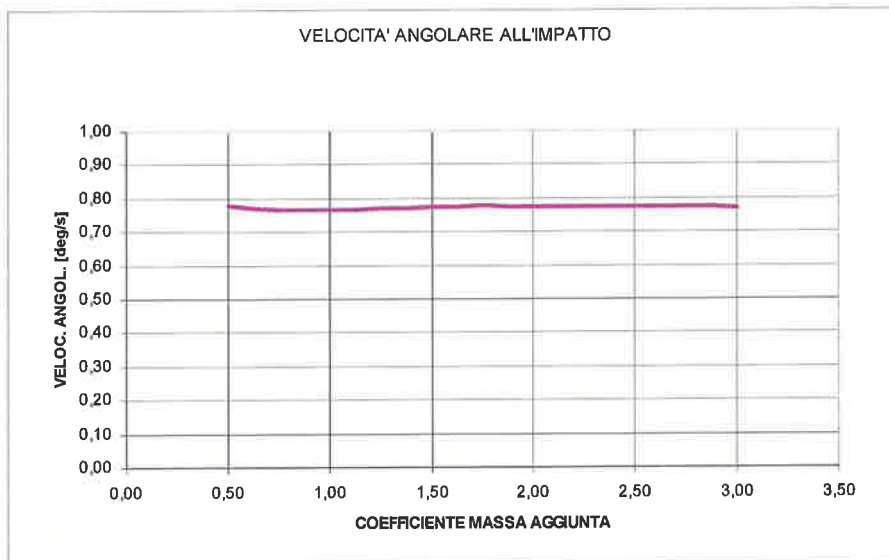
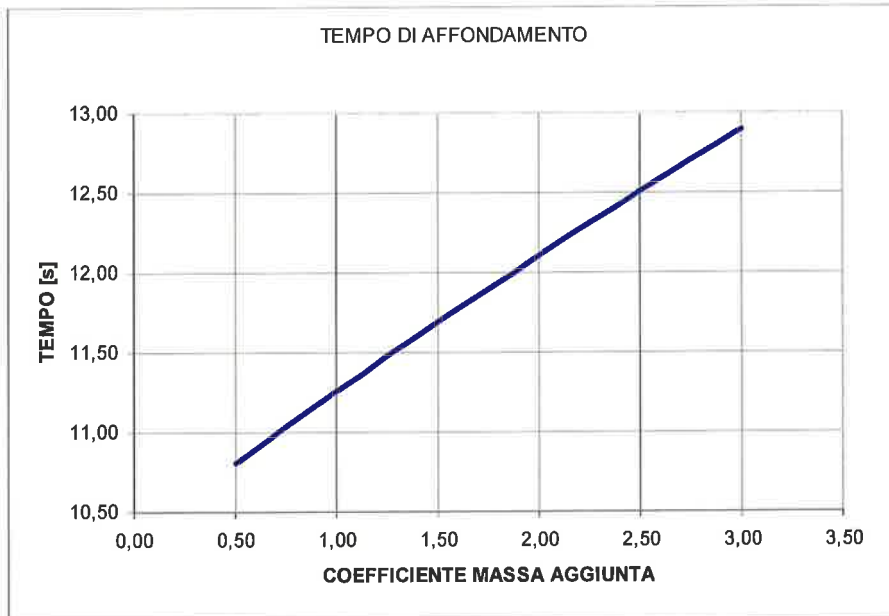



FIG. 7.5 – DIPENDENZA DEI RISULTATI DAI PARAMETRI - PARAMETRO VARIATO:
 COEFFICIENTE MASSA AGGIUNTA ($\frac{V}{V_{EQ}} = 0.60$)

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 55
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

8. ANALISI DEL MOTO AMMORTIZZATO

8.1. Considerazioni Generali

Il moto di cui ai paragrafi 6 e 7 porta la paratoia fino al punto in cui gli ammortizzatori vengono in contatto con la struttura di fondo dei cassoni di fondazione; la velocità angolare della paratoia in questo istante è determinata e riportata al par. 7.3.

La reazione progressiva dovuta alla compressione degli ammortizzatori è tale da arrestare il moto della paratoia, e questa seconda fase del moto dipende dalle proprietà elastiche degli ammortizzatori stessi.


Lo scopo dell’analisi di questa fase del moto è determinare i parametri rilevanti per l’analisi strutturale e per il calcolo delle reazioni vincolari legate all’impatto.

Tale fase del moto viene condotta in modo semplificato e conservativo considerando:

- la paratoia in discesa ammortizzata è neutra in acqua e soggetta alle sole forze dovute agli ammortizzatori.

Ciò equivale a considerare pari a zero il bilancio tra la forza peso e la resistenza al moto dovuta al fluido sotteso; tale ipotesi è conservativa ed è giustificata dal fatto che, nella fase terminale del moto verso l’alloggiamento la velocità angolare della paratoia è in diminuzione (in valore assoluto, cfr. par. 7.3) e quindi il contributo di rallentamento dovuto al fluido è prevalente su quello gravitazionale di accelerazione. In questo contesto si colloca l’aver assunto come angolo di impatto effettivo nel quale rilevare la velocità angolare una posizione precedente a quella del contatto teorico (par. 7.3).

- gli ammortizzatori sono considerati come elementi elastici lineari, dotati esclusivamente di rigidità a schiacciamento e privi di effetti di smorzamento. La loro massa è già inclusa in quella della paratoia, e si ritengono trascurabili gli effetti in termini di massa dovuti alla loro deformazione.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 56
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

8.2. Equazione del Moto e Risultati

Nelle ipotesi delineate al par. 8.1 il moto della paratoia è governato dall'equazione:

$$J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + k_{ROT} \cdot \theta = 0$$

Si osservi che nell'equazione conservativamente si trascura l'energia dissipata dagli ammortizzatori e conseguentemente si massimizza l'ampiezza del moto.

Dove:

- $J = 9,679 \cdot 10^8 \text{ kg}_M \cdot \text{m}^2$ momento di inerzia di massa della paratoia
 $k_{ROT} = D_{AMM}^2 \cdot N \cdot k_{LIN}$ rigidezza rotazionale del sistema di ammortizzatori
 $D_{AMM} = 27.24 \text{ m}$ distanza degli ammortizzatori rispetto all'asse cerniere
 $N = 6$ numero di ammortizzatori
 k_{LIN} rigidezza a schiacciamento del singolo ammortizzatore

Per k_{LIN} si considera il valore (cfr. par. 8.3):


$$k_{LIN} = 5000 \text{ kN/m}$$

Si osservi che lo schiacciamento cui sono soggetti gli ammortizzatori è tale per cui la loro risposta si può considerare sostanzialmente lineare, quindi la schematizzazione con il solo parametro k_{LIN} è del tutto accurata.

Pertanto risulta:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{ROT}}{J}} = 4.80 \text{ rad/s}$$

Per le condizioni iniziali si considerano (cfr. par. 7.3):

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 57
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

$$\theta(t = 0) = 0$$

$$\frac{d\theta}{dt}(t = 0) = \dot{\theta}_0 = -0.77 \text{ deg/s} = -0.013 \text{ rad/s}$$

Il moto armonico descritto dalla equazione precedente e per le condizioni iniziali assunte è:

$$\theta(t) = \dot{\theta}_0 \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad \frac{d}{dt} \theta(t) = \dot{\theta}_0 \cdot \text{cos}(\omega \cdot t) \quad \frac{d^2}{dt^2} \theta(t) = -\omega \cdot \dot{\theta}_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

Tale descrizione è appropriata per posizioni angolari per cui gli ammortizzatori risultano compressi, e cioè per:

$$\theta(t) \leq 0 \quad \rightarrow \quad 0 \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}$$

D'altra parte si può ritenere ragionevolmente che il moto sia significativo fino a quando la velocità angolare della paratoia si annulla, e conseguentemente l'ammortizzatore ha assorbito elasticamente tutta l'energia cinetica della paratoia:


$$\frac{d}{dt} \theta(T) = 0 \quad \rightarrow \quad T = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\omega}$$

Ciò significa considerare che, se in fase discendente si è potuto conservativamente trascurare l'effetto combinato della resistenza del fluido e della gravità poiché hanno segni opposti, in una fase eventuale di risalita le due componenti hanno lo stesso segno e combinano additivamente il loro effetto frenante.

Pertanto, anche non considerando effetti di smorzamento e dissipazione da parte degli ammortizzatori, una volta che questi hanno assorbito per schiacciamento tutta l'energia cinetica della paratoia, e la restituiscono in fase di distensione, tale energia risulta sufficiente a produrre un moto opposto di ampiezza nettamente minore di quello precedente.

Conseguentemente, il tempo T durante il quale gli ammortizzatori sono attivi ed il moto risulta significativo e dimensionante ai fini strutturali è:


$$T \approx 0.33 \text{ s}$$

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 58
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

A tale tempo T corrispondono anche i massimi di angolo di discesa, accelerazione del sistema e reazione, che valgono rispettivamente:

$\theta(T) = \dot{\theta}_0 \cdot \frac{1}{\omega}$	Angolo massimo di discesa
$\left[\frac{d^2\theta}{dt^2} \right]_T = -\omega \cdot \dot{\theta}_0$	Accelerazione angolare Massima
$\Delta u = \theta(T) \cdot D_{AMM}$	Schiacciamento Massimo degli Ammortizzatori
$M_{MAX} = k_{ROT} \cdot \theta(T)$	Momento Massimo Totale
$F_{MAX} = \frac{1}{N} \frac{1}{D_{AMM}} k_{ROT} \cdot \theta(T) = D_{AMM} \cdot k_{LIN} \cdot \theta(T)$	Forza Massima sul singolo ammortizzatore

Pertanto, sostituendo i valori numerici dei parametri, i risultati dell’analisi del moto ammortizzato sono quelli riportati nella tabella seguente:

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 59
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

MOTO AMMORTIZZATO PARATOIA MALAMOCCO		
Grandezza	Risultato	Note
Durata moto ammortizzato (T)	0.33 s	Durata Fase significativa del moto
Posizione angolare iniziale	0 deg	Valori all'impatto
Schiacciamento iniziale Ammortizzatori	0 m	
Velocità angolare iniziale ($\dot{\theta}_0$)	0.77 deg/s	
Velocità lineare iniziale Ammortizzatori	0.37 m/s	
Accelerazione angolare all'impatto	0 deg/s ²	
Posizione angolare finale $\theta(T)$ (massimo)	-0.16 deg	Valori finali, raggiunti per T=0.33 s
Schiacciamento finale Ammortizzatori (Δu , massimo)	-0.08 m	
Velocità angolare finale	0 deg/s	
Velocità lineare finale Ammortizzatori	0 m/s	
Accelerazione angolare finale (massima)	3.69 deg/s ²	
Forza di Reazione finale di ciascun ammortizzatore (F_{MAX} , massima)	381.7 kN	

8.3. Proprietà elastiche degli Ammortizzatori

Le proprietà elastiche degli ammortizzatori sono determinate considerando un diagramma tipico dei parabordi in gomma sintetica con sezione ad arco, quale quello riportato nella figura seguente.

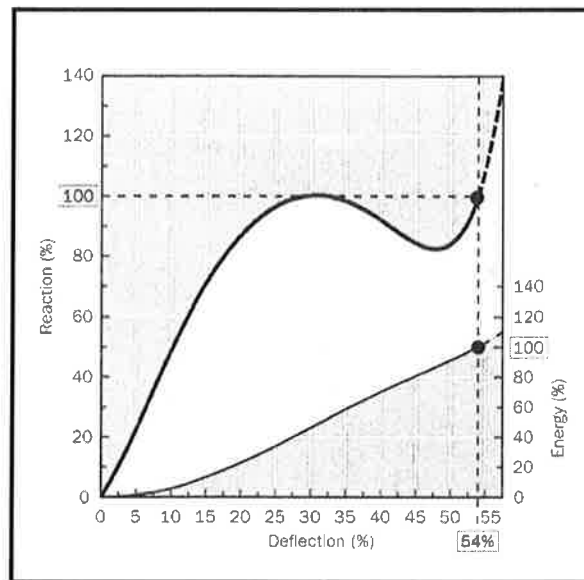


FIG. 8.1 – CURVA TIPICA DEFORMAZIONE-ENERGIA/REAZIONE PER PARABORDI

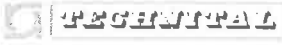
Su ogni paratoia si prevede siano montati 6 ammortizzatori per assorbire un'energia di progetto pari a 1602 kNm (l'energia cinetica massima durante il moto), pertanto si richiede che ogni parabordo fornisca $E(\text{rated}) \approx 267$ kNm.

In considerazione della bassa energia calcolata all'impatto, un ammortizzatore con $E(\text{rated}) \approx 267$ kNm lavora di fatto nel tratto iniziale, praticamente lineare, della curva della reazione (curva superiore nel diagramma).

Per tale tratto, si valuta un valore della rigidezza a schiacciamento nel tratto lineare iniziale pari a:

$$k_{\text{LIN}} = 5000 \text{ kN/m}$$

Si noti che la curva caratteristica di riferimento corrisponde a quella dei parabordi commerciali con maggiori rigidezza, perciò il valore assunto per k_{LIN} è sicuramente conservativo.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 61
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

9. CONFRONTO CON I RISULTATI SPERIMENTALI

9.1. Sperimentazione MOSE

I seguenti grafici (file 96261126, tipico) mostrano i risultati sperimentali ottenuti nelle prove di affondamento della paratoia del MOSE:

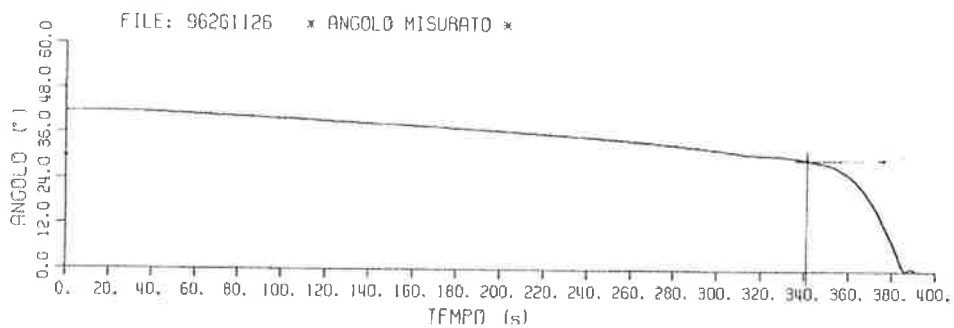


FIG. 9.1 – ANGOLO IN FUNZIONE DEL TEMPO

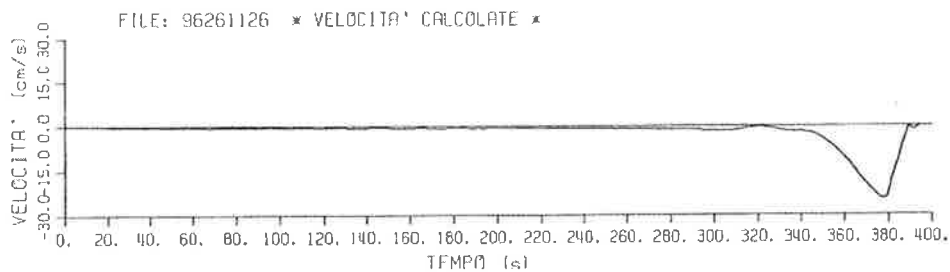


FIG. 9.2 – VELOCITÀ LINEARE AGLI AMMORTIZZATORI IN FUNZIONE DEL TEMPO

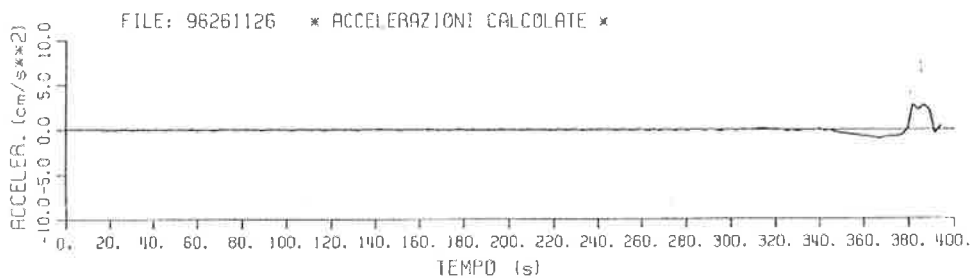


FIG. 9.3 – ACCELERAZIONE LINEARE AGLI AMMORTIZZATORI IN FUNZIONE DEL TEMPO

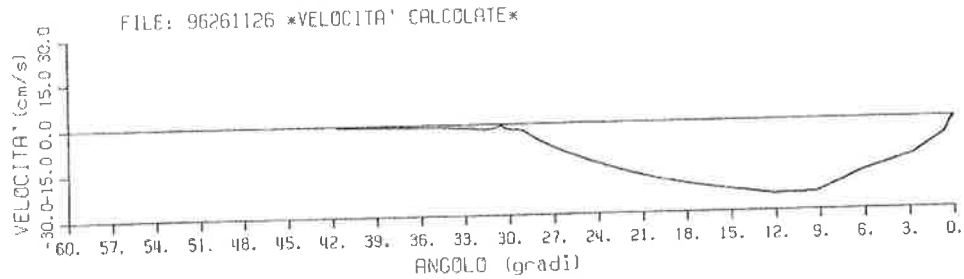



FIG. 9.4 – VELOCITÀ LINEARE AGLI AMMORTIZZATORI IN FUNZIONE DELL'ANGOLO

FILE	ANG. INIZ. (gradi)	TEMPO (s)	V MAX (cm/s)	ANG. V (gradi)	ACC MAX (cm/s**2)	ANG.ACC (gradi)	AMIS MAX (cm/s**2)	ANG AMIS (gradi)
96201131	45.0	572	13.4	5.7	1.8	0.2	33.8	0.1
96201447	45.0	481	23.0	10.6	2.6	0.5	61.6	0.3
96211415	52.6	1052	19.6	9.0	2.4	0.4	68.3	0.3
96261126	41.7	394	24.5	12.2	2.8	6.1	83.9	0.3
96261331	45.6	590	14.7	6.5	1.9	0.2	46.1	0.3
96270748	47.7	619	25.2	10.9	2.6	4.8	69.2	0.4
96281536	50.0	1151	13.1	5.0	1.8	0.3	59.6	0.2
96301304	50.3	995	26.3	11.3	2.9	0.5	81.2	0.4
97030932	50.5	854	13.6	6.3	1.4	3.0	55.9	0.2
97031456	50.5	669	28.3	13.4	3.3	6.3	78.9	0.4
97031657	49.9	651	29.5	11.9	3.3	0.5	42.4	0.4
97041056	45.0	780	16.6	7.1	2.1	0.2	44.3	0.3
97041633	50.4	2025	25.2	9.8	2.9	0.6	69.6	0.4
97051033	47.0	1760	15.7	6.1	2.0	0.4	40.7	0.3
97061042	47.8	1770	13.6	6.5	1.9	0.3	59.2	0.3
97071436	49.6	1763	19.0	7.7	2.1	0.3	83.1	0.3
97100939	53.4	857	24.4	11.6	2.7	0.5	88.4	0.4
97181134	49.7	1790	15.7	7.6	2.1	0.4	45.3	0.2
98041110	49.9	1780	13.6	5.5	1.7	0.3	88.8	0.0
98220944	47.2	1726	18.9	7.6	2.2	0.2	67.1	0.2
98221710	48.7	1740	28.1	12.0	3.3	0.6	70.8	0.4

TAB. 6 - ABBATTIMENTI DELLA PARATOIA: TABELLA RIASSUNTIVA DEI PARAMETRI PRINCIPALI
(la durata comprende anche la fase di assetto della paratoia)

FIG. 9.5 – TABELLA RIEPILOGATIVA RISULTATI

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 63
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL’AFFONDAMENTO	

L’andamento rappresentato nelle figure 9.1÷9.4 porta alle seguenti conclusioni generali:


- si conferma (Fig. 9.1) che l’affondamento presenta una prima fase ad evoluzione molto lenta, che corrisponde a quella indicata al par. 6.2 come “Fase di moto in equilibrio indifferente”; tale condizione del moto è sostanzialmente irrilevante ai fini del calcolo dei parametri dinamici dell’impatto;
- si conferma (Fig. 9.2 e Fig. 9.3) la caratteristica fondamentale del moto di affondamento che consiste in una fase di accelerazione seguita da una di decelerazione; tale caratteristica trova riscontro nella modellazione della resistenza del fluido;
- la parte finale del moto presenta un rimbalzo smorzato (appena accennato) che corrisponde all’evoluzione del “Moto Ammortizzato” descritto al par. 8 successivamente alla fase alla prima compressione considerata come rilevante.

I risultati principali che derivano dai diagrammi riportati si possono riassumere come segue:

Sintesi RISULTATI SPERIMENTALI File 96261126		
Quantità	Dato	Rif.
Intervallo di tempo non significativo	0-340 s	Fig. 9.1 e Fig. 9.2
Angolo all’inizio dell’affondamento	30 deg	Fig. 9.4
Tempo all’impatto	385 s	Fig. 9.1
Durata del moto di affondamento	45 s	
Velocità Lineare Massima (VLM)	24.5 cm/s=0.25m/s	Fig. 9.5
Angolo di rilevamento VLM	12.2 deg	Fig. 9.4 e Fig. 9.5

TAB. 9.1 – SINTESI RISULTATI SPERIMENTALI FILE 96261126

Le differenze tra la paratoia del MOSE e la paratoia di Malamocco per dimensioni e caratteristiche rendono possibile un confronto limitatamente agli aspetti qualitativi del fenomeno.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 64
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

Nel seguito si limita la considerazione al moto di affondamento, in quanto la fase di moto ammortizzato è poco apprezzabile nei dati disponibili e il sistema di ammortizzazione è diverso in MOSE.

Allo scopo di condurre un confronto più accurato, la simulazione numerica di affondamento è stata applicata alla paratoia del MOSE, adottando gli appropriati parametri geometrici come dati di input per il programma AFFONDAMENTO.


I dati utilizzati dal programma per l'affondamento della paratoia del MOSE sono raccolti nella tabella seguente:

MOSE

DATI GEOMETRICI			
simbolo	Descrizione	unità	valore
d	Profondità acqua per Livello Medio Mare	m	8,00
H	Livello Mare Rispetto a LMM	m	0,00
B	Lunghezza Paratoia da Asse Cerniera	m	16,50
G	Larghezza Paratoia	m	20,00
L _s	Lunghezza Setto	m	4,95
χ	Distanza asse rotazione piano paratoia lato mare	m	0,70
δ	Distanza asse rotazione piano fondale	m	0,70
P	Altezza Paratoia (spessore)	m	3,50
C	Coordinata inizio cassa	m	2,10
A	Lunghezza Tratto inclinato	m	5,40
C _{AGG}	Coefficiente Massa Aggiunta	-	1,0
X _{IMP}	Coord PUNTO IMPATTO Paratoia risp. asse cern.	m	15,3
Y _{IMP}	Coord PUNTO IMPATTO Paratoia risp. asse cern.	m	-4,0

DATI DI PESO , MASSA E SPINTA			
simbolo	Descrizione	unità	valore
M _s	Massa struttura Paratoia	kN	1717
X _s (L)	Coord COG Paratoia Struttura rispetto asse cern.	m	8,31
Y _s (L)	Coord COG Paratoia Struttura rispetto asse cern.	m	-0,741
J _s	Momento di inerzia di massa struttura Paratoia	kNm ²	160000
M _Z	Massa Totale zavorra	t	890
X _Z (L)	Coord CS Paratoia rispetto asse cern.	m	9,80
Y _Z (L)	Coord CS Paratoia rispetto asse cern.	m	-1,05
F _B	Spinta Paratoia (completamente immersa)	t	905
X _B (L)	Coord CS Paratoia rispetto asse cern.	m	9,8
Y _B (L)	Coord CS Paratoia rispetto asse cern.	m	-1,05

DATI EQUILIBRIO INIZIALE			
simbolo	Descrizione	unità	valore
θ (EQ)	Angolo di equilibrio iniziale	deg	30,00
h	Livello acqua in Paratoia rispetto liv. Laguna	m	1,93
e	Emersione	m	0,16
p _{EQ}	Pressione aria equilibrio iniziale	barA	1,21
V _{EQ}	Volume aria equilibrio iniziale	m ³	89,00

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 65
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

La simulazione numerica di affondamento è stata eseguita utilizzando un valore di V/V_{EQ} (rapporto tra il volume d'aria presente nella paratoia all'impatto e il volume iniziale, cfr. par. 7) tale da generare un tempo di affondamento paragonabile a quello sperimentalmente misurato; tale valore di rapporto tra i due volumi è considerato pari a:

$$\frac{V}{V_{EQ}} = 0.96$$

I risultati sono rappresentati nelle figure seguenti (angoli e velocità angolari sono riportati in valore assoluto, mentre nelle Figg. 9.1÷4 sono dotati di segno):

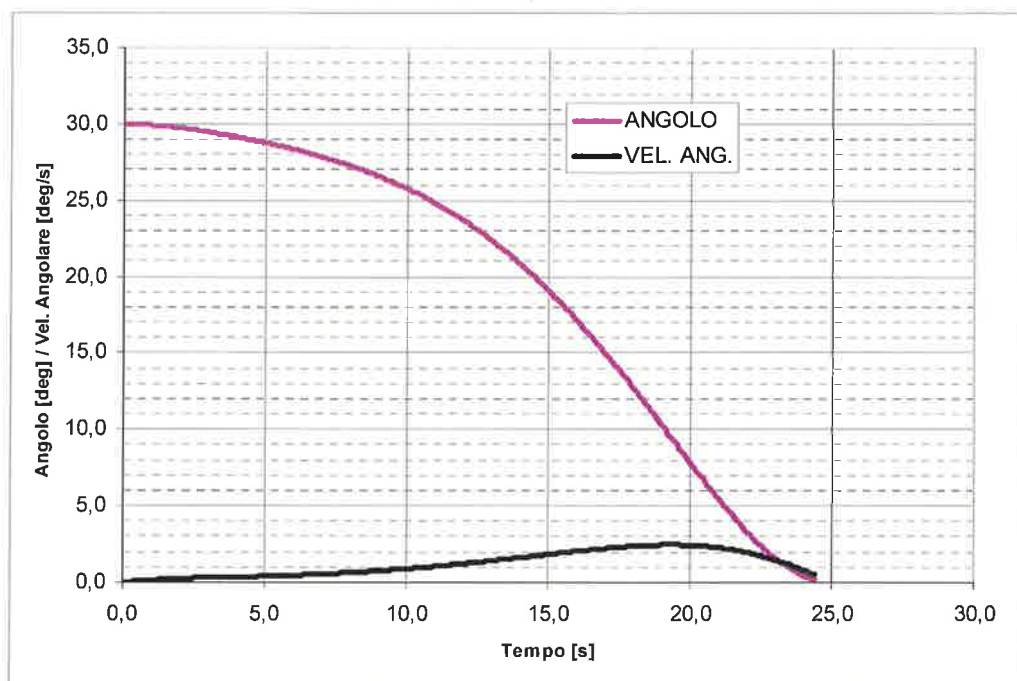


FIG. 9.6 – EVOLUZIONE DELLA COORDINATA ANGOLARE E DELLA VELOCITÀ ANGOLARE

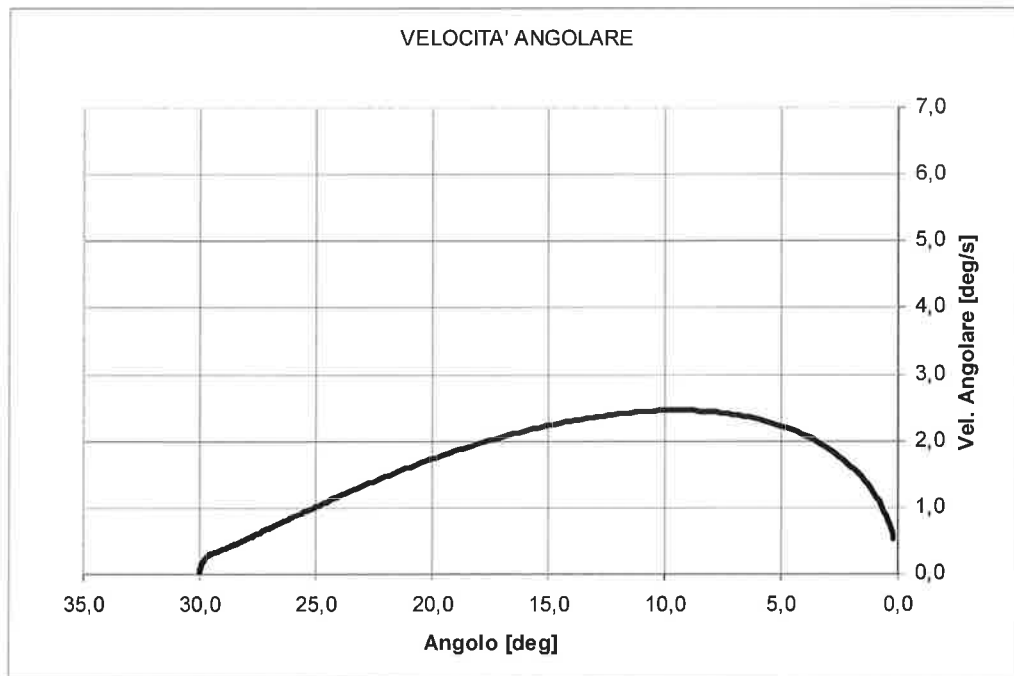


FIG. 9.7 – VELOCITÀ ANGOLARE IN FUNZIONE DELLA COORDINATA ANGOLARE

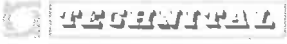
I risultati della simulazione numerica sono riportati nella seguente tabella:

Sintesi SIMULAZIONE NUMERICA affondamento (File 96261126)		
Quantità	Dato	Rif.
Angolo all'inizio dell'affondamento	30 deg	Fig. 9.7
Durata del moto di affondamento	25 s	Fig. 9.6
Velocità Angolare Massima	2.46 deg/s	Fig. 9.5
Velocità Lineare Massima (VLM)	0.68 m/s	
Angolo di in cui si ha VLM	9.5 deg	Fig. 9.7

TAB. 9.2 – SINTESI SIMULAZIONE NUMERICA AFFONDAMENTO (FILE 96261126)

Dal confronto dei risultati delle Tab. 9.1 e Tab. 9.2 si osserva:

- la durata dell'affondamento nella simulazione numerica è inferiore a quella misurata;
- la velocità massima nella simulazione numerica è maggiore a quella misurata;

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 67
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	


- c) nella simulazione numerica la posizione in cui è registrata la velocità massima è molto prossima a quella misurata; le parti accelerata e decelerata del moto risultano equilibrate fra loro in accordo con i risultati sperimentali.

Evidentemente le discrepanze rilevate ai punti a) e b) sono strettamente connesse e si possono considerare assieme. Per giustificare questi risultati va considerato che il MOSE era dotato di strutture laterali per l'intera altezza del recesso di alloggiamento della paratoia che introducevano un ulteriore contenimento al moto del fluido sotteso, rispetto a quello riscontrabile nelle paratoie reali, e conservativamente non modellato nel programma AFFONDAMENTO.

Tale contenimento generava una maggiore resistenza alla discesa della paratoia, che in buona parte giustifica tempi più lunghi e velocità inferiori di affondamento.

Si può dire che i risultati ottenuti sul MOSE sono rappresentativi dell'affondamento di una paratoia quando quelle adiacenti sono già in posizione di riposo; la simulazione elaborata invece prende conservativamente in esame la prima paratoia in affondamento tra quelle di una schiera.

La considerazione c) indica che le caratteristiche del moto sono comunque individuate correttamente nella simulazione numerica adottata; il che ulteriormente conferma l'origine individuata per le discrepanze.

	Rev.	Data:	El. MV080P-PE-MAR-2011-C0	Pag. n. 68
	Rev. C0	Data: 10/06/2013	ANALISI DELL'AFFONDAMENTO	

9.2. Sperimentazione su Modelli Fisici

Nell'ambito dello studio B.6.5 eseguito da Delft Hydraulics sono state considerate le paratoie delle schiere di Malamocco e Chioggia; è pertanto possibile un confronto diretto con i risultati della simulazione numerica effettuata per Malamocco.

Si riportano di seguito alcuni diagrammi relativi alle prove menzionate, dai quali si riscontra un generale accordo nell'andamento della posizione angolare con le analisi oggetto del presente documento.

Dai risultati illustrati appare che la durata della discesa è:

	Chioggia (R06, Fig. 9.8)	Malamocco (R09, Fig. 9.9)
Rotazione da da 30° a 0°	21 s	25 s
Rotazione da da 20° a 0°	14 s	13 s

I risultati sperimentali per Malamocco (rotazione da 30° a 0°, 25 s) indicano tempi di affondamento sempre superiori a quelli ottenuti per simulazione numerica: essendo la velocità e l'energia cinetica della paratoia decrescenti con l'aumentare del tempo di affondamento, si conferma dunque che la metodologia di calcolo adottata conduce a valutazioni conservative dei parametri del moto.

In particolare, il calcolo della velocità angolare massima all'impatto (cfr. par. 7.3) determina un tempo di affondamento di 11.3 sec, che risulta pari al 45% di quello determinato per via sperimentale, confermando il carattere largamente conservativo delle ipotesi adottate in questo caso.

Il calcolo della velocità angolare massima durante il moto (cfr. par. 7.4) determina invece un tempo di affondamento di 17.8 sec, pari al 71% di quello rilevato sperimentalmente: ne segue che la simulazione adottata in questo caso è più prossima alle condizioni reali, continuando comunque a fornire risultati di moto a favore di sicurezza.

I tempi di abbattimento riportati sopra risultano nettamente inferiori a quelli registrati sul MOSE, avvalorando per quest’ultimo l’ipotesi di resistenza incrementata dalle strutture laterali.

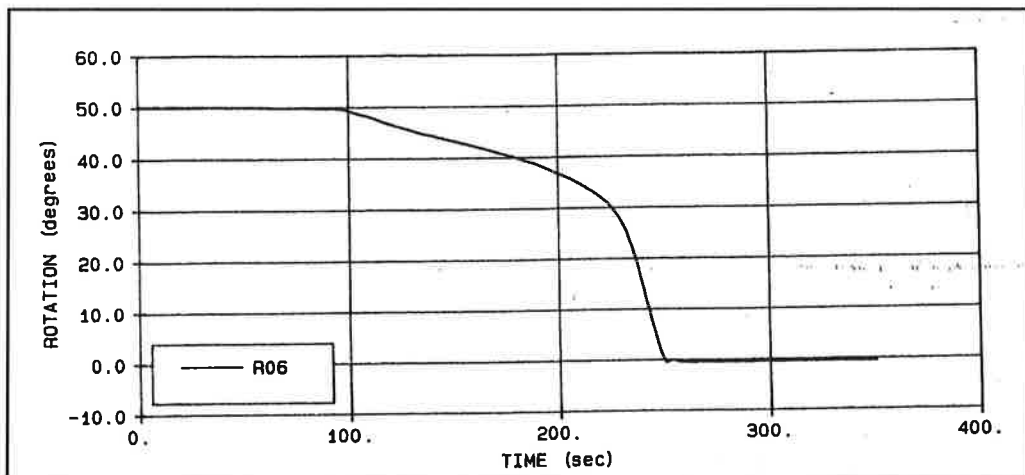


FIG. 9.8 – MODELLO FISICO PARATOIA DI CHIOGGIA – POSIZIONE ANGOLARE NEL TEMPO, REGISTRAZIONE R06

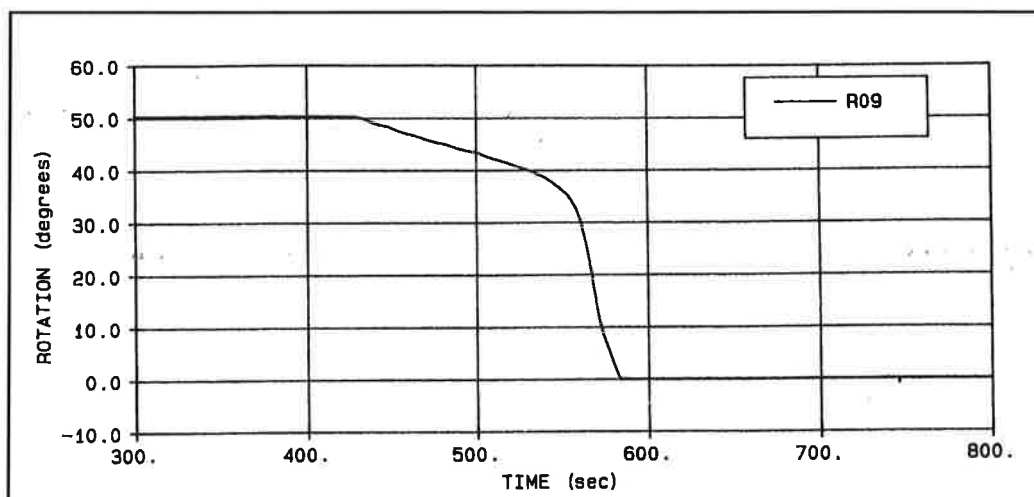


FIG. 9.9 – MODELLO FISICO PARATOIA DI MALAMOCCO – POSIZIONE ANGOLARE NEL TEMPO, REGISTRAZIONE R09