

## **DIAFRAMMI A SBALZO PRECOMPRESSI IN OPERA MEDIANTE CAVI POST TESI**

Massimo De Virgiliis  
*Libero professionista*  
[madv@inwind.it](mailto:madv@inwind.it)

Antonello Di Sotto, Salvatore Miliziano  
*Sapienza Università di Roma*  
[Antonello.disotto@uniroma1.it](mailto:Antonello.disotto@uniroma1.it), [salvatore.miliziano@uniroma1.it](mailto:salvatore.miliziano@uniroma1.it)

Antonio Zechini  
*Roma Metropolitane*  
[a.zechini@romametropolitane.it](mailto:a.zechini@romametropolitane.it)

### **Sommario**

Nella nota si presentano alcuni risultati ottenuti nell'ambito di una ricerca relativa allo studio del comportamento statico di diaframmi precompressi in opera mediante cavi post tesi. La tecnologia della precompressione dei diaframmi geotecnici è stata impiegata negli anni 70: se ne riprende lo studio per indagarne i vantaggi alla luce delle migliorate capacità previsionali e dell'aumentata sensibilità nei riguardi della durabilità delle opere. Con riferimento ad un caso di studio, sono stati analizzati e posti a confronto i comportamenti di un diaframma a sbalzo in cemento armato ordinario (c.a.o.) e di uno in precompresso (c.a.p.) in termini di spostamenti e sollecitazioni. L'interazione terreno struttura è stata studiata mediante modellazione numerica 2D impiegando un codice di calcolo commerciale agli elementi finiti (plaxis 2D). In entrambi i casi l'elemento strutturale è stato modellato con elementi di continuo elastico. L'analisi dello stato tensionale conseguente all'interazione terreno-struttura indotto dallo scavo ha consentito di mettere in evidenza l'importante ruolo svolto dalla precompressione nel modificare in modo quantitativamente rilevante la risposta tensionale e deformativa del sistema. Particolarmente interessante nell'impiego della precompressione appare la possibilità di limitare il campo di spostamenti in esercizio e di migliorare la durabilità dell'opera controllando l'insorgere di fenomeni di fessurazione nel calcestruzzo.

### **Introduzione**

Sono sempre più frequenti le situazioni nelle quali l'uso delle tradizionali paratie tirantate non è perseguibile o quantomeno è problematico, come ad esempio in contesti di tipo urbano, per la presenza di opere interrato e sottoservizi, o in ambienti molto aggressivi ad elevato rischio di corrosione. I diaframmi si presentano come strutture in calcestruzzo armato a sviluppo lineare in pianta e presentano un comportamento prevalentemente di tipo flessionale: si tratta di condizioni favorevoli all'utilizzo della precompressione. L'impiego di uno stato di coazione, quale la precompressione, permette di migliorare il comportamento del diaframma in quanto l'elemento strutturale è messo in grado di sostenere il terreno con modeste deformazioni, anche nel caso di funzionamento a sbalzo in condizioni gravose per intensità delle spinte e altezze di scavo elevate. La protezione degli acciai da precompresso, particolarmente sensibili alla corrosione, è conseguita rispettando le prescrizioni di norma che richiedono, in particolare, la verifica allo stato limite di decompressione per le sezioni resistenti delle strutture, inflesse da carichi quasi permanenti, in condizioni ambientali aggressive, quali quelle che generalmente si hanno per le opere a contatto con il terreno; detta

verifica risulta generalmente la più esigente e pertanto definisce il progetto dello stato di precompressione. Mentre le strutture di cemento armato normale sono sottoposte ad azioni costituite da forze applicate e da coazioni derivanti da cause naturali (ritiro del calcestruzzo, variazioni termiche, ecc.), le strutture di cemento armato precompresso sono caratterizzate dalla presenza permanente di coazioni impresse artificialmente che coesistono con le azioni precedentemente indicate. Lo scopo dell'applicazione di tali coazioni artificiali è quello di imprimere nella struttura uno stato tensionale di segno opposto a quello dovuto ai carichi applicati, cosicché le tensioni risultanti finali risultano molto minori di quelle che si avrebbero per effetto delle azioni derivanti dalla sola interazione terreno-struttura. Studi sugli effetti della precompressione in questo tipo di opere sono stati sviluppati negli anni 70 (Gysi et al., 1977); in quegli stessi anni si ritrovano alcune applicazioni pratiche (Foundation Publications Limited 1975, Zorzi, 1981). L'impiego della precompressione è stato quindi abbandonato per alcuni decenni; dallo studio della letteratura tecnica, infatti, non sono emersi né studi né descrizioni di opere nelle quali è stata applicata la precompressione. Solo recentemente (Molins & Ledesma 2006), sembra essere ripreso l'interesse per questo argomento. Con la presente ricerca ci si propone di indagare sulle ragioni dell'insuccesso della tecnologia e di verificare se tali ragioni oggi non siano più valide alla luce delle accresciute capacità previsionali ed ai più restrittivi vincoli normativi a riguardo dei requisiti di durabilità. Nel seguito dopo la descrizione del caso studiato e delle analisi numeriche sviluppate, sono illustrati e commentati i risultati ottenuti. Le principali conclusioni e gli spunti per lo sviluppo del lavoro sono riassunti nel capitolo conclusivo.

### **Modello geotecnico, geometrico, precompressione**

Per il terreno è stato assunto un semplice legame costitutivo elasto-plastico perfetto con criterio di resistenza di Mohr Coulomb con angolo di attrito  $35^\circ$ , coesione e dilatanza nulli e modulo di Young,  $E$ , crescente con la profondità da un valore iniziale a piano di campagna di 30 MPa con un gradiente di 1.5 MPa/m (Fig. 1). La paratia a sezione rettangolare ha una larghezza di 1.2 m ed una altezza complessiva di 25 m, a fronte di un'altezza di scavo pari a 10 m. La paratia è stata predimensionata soddisfacendo le verifiche allo stato limite ultimo di tipo geotecnico (stabilità del complesso opera-terreno) e imponendo uno spostamento massimo in testa dell'opera in cemento armato ordinario pari a 40 mm. La precompressione è stata imposta mediante la post tensione di due cavi rettilinei aventi un'eccentricità di 0.20 m, ancorati in testa alla paratia mediante due testate mobili poste a distanza tra loro di 1.20 m, a 0.65 m dai bordi del lato corto, a 0.40 m dal bordo del lato lungo a monte; in basso, i cavi sono ancorati al diaframma a partire da una distanza di 0.50 m dal piede (Fig. 2). Considerando le caratteristiche di sollecitazione derivanti dal modello di paratia ordinaria è stata dimensionata la precompressione. Il singolo cavo presenta un diametro esterno di 116 mm e risulta composto da 24 trefoli; ciascun trefolo ha diametro pari a 15.24 mm (uguale 0.6"), area  $139 \text{ mm}^2$ , realizzato da sette fili di cui uno centrale e sei avvolti ad elica; su ciascun cavo è applicato un tiro pari a 4590 kN.

### **Modellazione numerica**

Lo studio è basato sul confronto dei risultati di analisi numeriche 2D eseguite con il codice alle differenze finite PLAXIS v.8.2, tra il comportamento di una paratia ordinaria in c.a.o. e una precompressa, a parità di geometria del problema e di contesto geotecnico. Il reticolo di calcolo è ancora riportato nella Figura 1. E' stata impiegata una *mesh* molto fitta (*very fine*). Il terreno e gli elementi strutturali sono stati modellati impiegando elementi triangolari a 15 nodi. La densità della *mesh* adottata assieme al valore di 0.01 dell'errore tollerato è in grado di assicurare soluzioni numeriche molto accurate. Le condizioni di vincolo assegnate al

modello prevedono che i punti sui contorni verticali siano impediti di spostarsi orizzontalmente, mentre i punti sul contorno inferiore non possano spostarsi in nessuna direzione. Le dimensioni trasversali del reticolo di discretizzazione sono state scelte in modo da minimizzare gli effetti di bordo. In entrambi i casi l'elemento strutturale è stato modellato come continuo elastico avente le caratteristiche meccaniche di rigidità del calcestruzzo ( $E_{cm}=32000 \text{ N/mm}^2$ ). Gli elementi strutturali sono collegati al terreno mediante interfacce elasto-plastiche perfette con legge di resistenza puramente attritiva. Rispetto al terreno la resistenza dell'interfaccia è stata ridotta secondo un fattore  $R=0.7$ . Non sono state simulate le fasi costruttive (scavo, getto e maturazione del calcestruzzo).

Per il modello del diaframma in c.a.p., la precompressione è stata introdotta modellando il cavo con l'elemento *node to node anchors*: una molla elastica che collega due punti interni al diaframma con rigidità normale costante pari a  $E_{sp}A_{sp}=650520 \text{ kN}$ , interasse  $1.20 \text{ m}$  ed eccentricità  $0.20 \text{ m}$ , al quale è stato applicato un pretensionamento che, tenendo conto dell'interasse tra i tiranti, è pari a  $N_p^{tiro}=3825 \text{ kN/m}$ . Per i cavi di acciaio è stato assunto un modulo di elasticità longitudinale pari a  $E_{sp}=195000 \text{ N/mm}^2$ .

Lo studio della paratia in c.a.p. è stato svolto per fasi: la fase di tiro e quella di esercizio. La fase di tiro corrisponde al momento in cui viene applicata la precompressione alla struttura completamente immersa nel terreno prima che avvenga lo scavo. La fase di esercizio è quella corrispondente al raggiungimento del fondo dello scavo. L'accuratezza dei risultati ottenuti con il modello *plaxis* è stata preliminarmente controllata verificando la sostanziale coincidenza della risposta tensionale e deformativa con quella ottenuta impiegando *SAP2000 v.12* (codice di calcolo strutturale ben collaudato ed efficiente per lo studio della precompressione), in un semplice caso di precompressione di un elemento shell con le medesime condizioni di vincolo. Maggiori dettagli sulle analisi numeriche sviluppate sono riportati in De Virgiliis (2011).

I momenti flettenti sono stati calcolati integrando le tensioni normali agenti sulla generica sezione dell'elemento strutturale; la correttezza dei valori del momento flettente è stata verificata eseguendo il calcolo anche a partire dalle tensioni normali e tangenziali agenti sul contorno dell'elemento strutturale.

### **Illustrazione e commento dei risultati**

In figure 3 e 4 sono riportati gli andamenti lungo la paratia del momento flettente e dello sforzo normale ottenuti nelle analisi numeriche svolte, rispettivamente. Al tiro, contrariamente a quanto avviene per le strutture in assenza di confinamento, il momento flettente non è costante ma presenta un andamento curvilineo con valori massimi alle estremità (circa  $1830 \text{ kNm}$  sul singolo pannello) e valore minimo pari a circa  $236 \text{ kNm}$  sul singolo pannello, a metà altezza. Si tratta di un effetto conseguente al confinamento esercitato dal terreno circostante l'elemento strutturale; al tiro, infatti, l'interazione terreno-struttura produce una modifica della distribuzione delle tensioni normali e l'insorgere di tensioni tangenziali all'interfaccia struttura-terreno. In particolare, congruentemente con la deformata della paratia (Fig. 6), rispetto alla distribuzione litostatica si verifica un aumento delle tensioni orizzontali in prossimità delle estremità dell'elemento strutturale lato fibre maggiormente compresse (monte) ed una riduzione sul lato opposto (Fig. 7). Tale effetto è apprezzabile sino a distanze massime di 2-3 m dalle estremità della paratia, mentre a maggiori distanze è pressoché nullo. Le tensioni tangenziali sono mostrate in figura 8. Sia le variazioni di tensione normale sia quelle di tensione tangenziale tendono ad opporsi al modo di deformarsi della struttura per effetto del tiro, generando momenti flettenti di segno opposto che producono gli andamenti osservati. L'effetto predominante tuttavia è associato alla variazione di tensioni normali. In termini di sforzo normale (Fig. 4), la presenza del tiro iniziale produce

essenzialmente una traslazione dello sforzo normale derivante dal peso proprio, risultando gli effetti delle tensioni tangenziali modesti sia per l'entità delle stesse sia per il segno che a monte e a valle, alle varie profondità, risulta opposto. L'eccentricità è pari al valore imposto di 0.2 m alle estremità della paratia, mentre si riduce sino a zero (figura 5) in corrispondenza della sezione in cui il momento flettente assume il valore minimo.

Nelle condizioni di esercizio gli effetti della precompressione danno luogo ad una distribuzione di momento flettente significativamente inferiore a quanto succede per la paratia ordinaria. La paratia precompressa rimane sempre completamente compressa con una eccentricità che nella mezzera della paratia cambia di segno (la zona di maggiore compressione passa da monte a valle, contrariamente alla paratia in c.a.o. che risulta essenzialmente inflessa essendo caratterizzata da un'eccentricità massima pari a circa 2.75 m (figura 5). La differenza sul comportamento globale osservato tra le due strutture risulta evidente quando si confrontano i campi di spostamento. La paratia precompressa evidenzia modeste deformazioni flessionali, subisce una prevalente traslazione orizzontale ed una modesta rotazione verso valle (7 mm di spostamento al piede e circa 14 mm in testa). Mentre la paratia ordinaria presenta una deformata flessionale accentuata; in termini di spostamenti si ha una sostanziale coincidenza tra le due opere nel tratto immerso, mentre fuori terra lo spostamento massimo della paratia ordinaria raggiunge i 41 mm risultando ben maggiore di quanto mostrato dall'opera precompressa (Fig. 6). La precompressione non modifica in modo apprezzabile le distribuzioni di tensioni normali e tangenziali trasmesse dal terreno alla paratia (figure 9 e 10); ciò è congruente con la sostanziale coincidenza degli spostamenti della struttura al di sotto del fondo scavo e con l'entità degli spostamenti al di sopra che, anche se molto diversi, sono di intensità tale da permettere la completa mobilitazione della spinta attiva a monte di entrambe le strutture. La sostanziale coincidenza delle azioni di interazioni comporta anche che il momento finale sulla paratia precompressa può essere approssimativamente ottenuto come semplice traslazione del diagramma dei momenti che sollecita la paratia ordinaria di una quantità pari al momento di precompressione applicato alla testa del pannello (1836 kNm, Fig. 3).

### **Conclusioni e sviluppi futuri**

Con riferimento al caso specifico esaminato, l'analisi dei risultati ottenuti ha consentito di evidenziare come il comportamento tensionale e deformativo del complesso opera-terreno risulta sensibilmente e favorevolmente modificato dalla precompressione. L'impiego della precompressione ha consentito di ottenere sezioni tutte compresse e valori di spostamento massimo pari a circa un terzo rispetto a quanto ottenuto per la paratia ordinaria di stessa geometria, a parità di tutte le altre condizioni. Per le paratie a sbalzo, pertanto, si può pensare di fare ricorso alla precompressione per limitare il campo di spostamenti in contesti nei quali l'uso di elementi di contrasto quali puntoni o tiranti non è perseguibile.

Quanto riportato in questa memoria raccoglie i primi risultati di una ricerca di più ampio respiro che prevede lo sviluppo di analisi parametriche finalizzate ad indagare gli effetti dei principali parametri da cui il fenomeno dipende (geometrie, contesti geotecnici); la ricerca si pone come obiettivo anche quello di operare dei confronti di tipo economico tra le paratie ordinarie e quelle precomprese, a valle di avere definito degli opportuni criteri di equivalenza di comportamento statico, per esempio basati sul campo di spostamenti indotto. La possibilità di impiego estensivo di questa tecnologia, infatti, passa anche attraverso un vantaggio economico apprezzabile che possa consentire di giustificare le maggiori difficoltà esecutive e l'esigenza di una più elevata specializzazione delle maestranze.

Modulo E

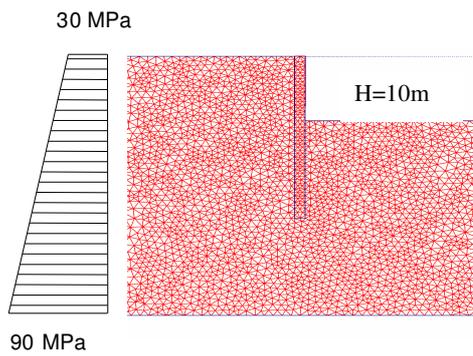


Figura 1. Geometria del problema e reticolo di calcolo.

$c = 0 \text{ KPa}$   
 $\varphi = 35^\circ$   
 $\gamma = 20$   
 $R = 0.7$

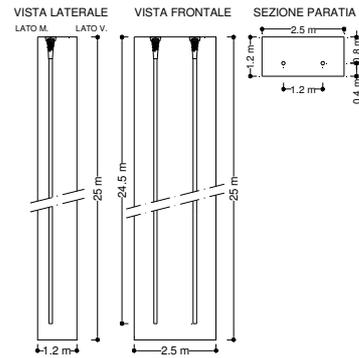


Figura 2. Vista schematica del profilo dei cavi.

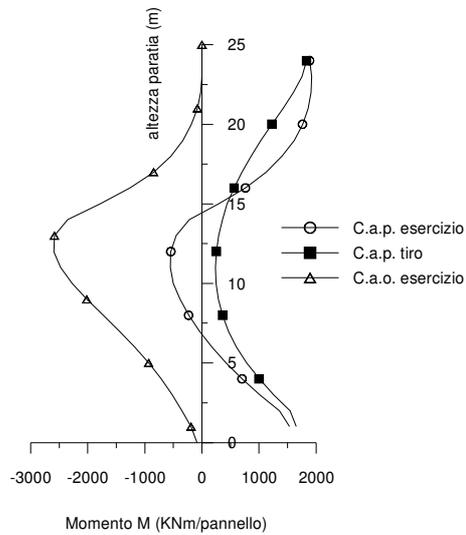


Figura 3. Momenti flettenti paratia in c.a.o. e c.a.p..

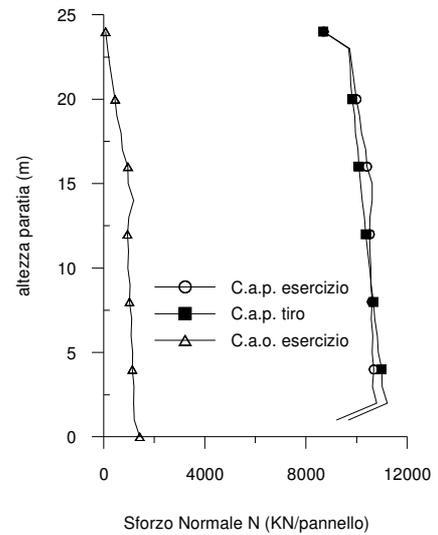


Figura 4. Sforzo normale paratia in c.a.o. e c.a.p..

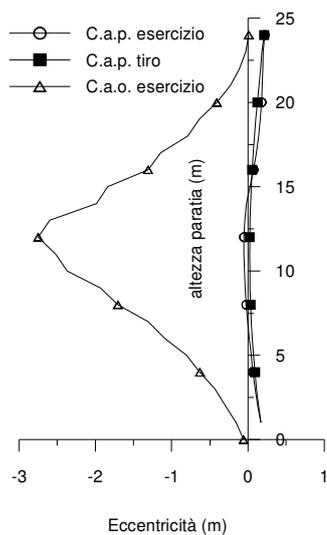


Figura 5. Andamento eccentricità paratie.

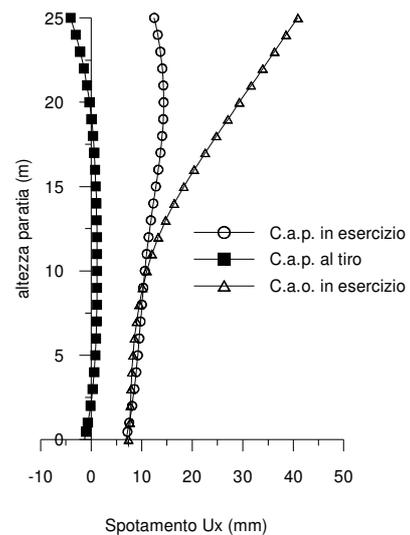


Figura 6. Spostamenti orizzontali paratie.

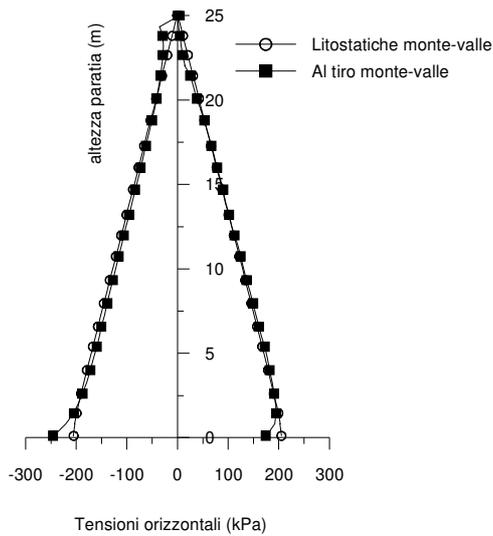


Figura 7. Tensioni orizzontali paratia in c.a.p. nella fase di tiro.

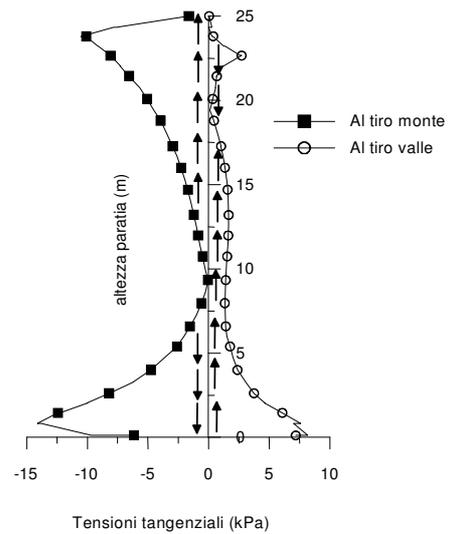


Figura 8. Tensioni tangenziali paratia in c.a.p. nella fase di tiro.

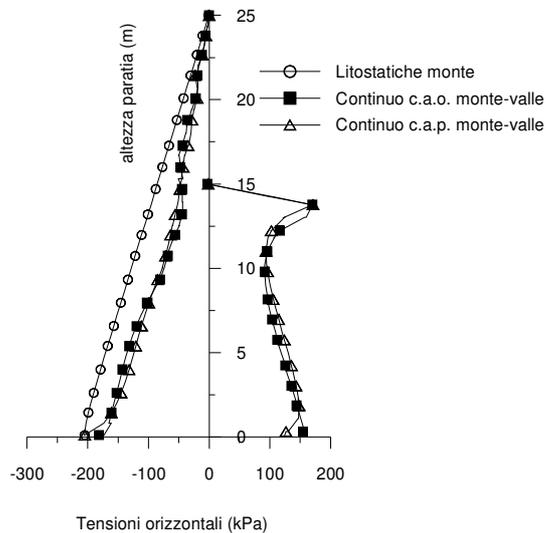


Figura 9. Tensioni orizzontali agenti sulle paratie in condizioni di esercizio.

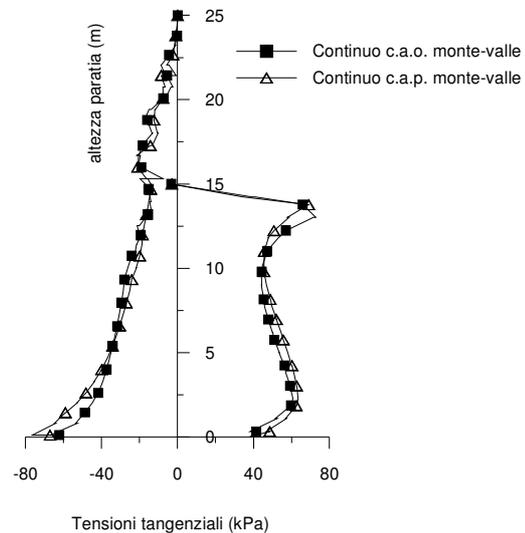


Figura 10. Tensioni tangenziali agenti sulle paratie in condizioni di esercizio.

## Bibliografia

- De Virgiliis M., (2011). "Studio sull'impiego di diaframmi geotecnici precompressi in opera mediante cavi post tesi". Tesi di Master universitario di II livello, Roma Tre Università di Roma.
- Foundation Publications Limited, (1975). "Britain's first Icos-Flex wall installed in London". Ground Engineering, Volume 8, Issue 2, pp. 26-28.
- Gysi H. J., Linder A. and Leoni R., (1977). "Behaviour of a prestressed diaphragm wall". Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japanese Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, vol. 2, pp. 83-90.
- Molins C., Ledesma A., (2006). "Building a deep isolating wall by an existing rail tunnel". Geotechnical Engineering 159, Issue GE3, pp. 219-226.
- Zorzi S., (1981), "Tema B: Strutture marittime: realizzazioni - Relazione generale". Atti delle Giornate A.I.C.A.P. 1981 - Ravenna.