

GIORNATE AICAP, Ravenna, maggio 1981

TITOLO :

L'ESECUZIONE DELLA PLATEA DI FONDAZIONE DEL BACINO
DI CARENAGGIO SAN MARCO A TRIESTE MEDIANTE GETTO
SUBACQUEO DI CALCESTRUZZO REOPLASTICO

AUTORI :

MARIO COLLEPARDI
Università di Ancona

SILVIO GENNARI
RECCHI S.p.A. Costruzioni Generali, Torino

ALBERTO TRIANTAFILLIS
MAC Modern Advanced Concrete S.p.A., Treviso

SILVANO ZORZI
IN.CO. S.p.A., Milano

L'ESECUZIONE DELLA PLATEA DI FONDAZIONE DEL BACINO
DI CARENAGGIO SAN MARCO A TRIESTE MEDIANTE GETTO
SUBACQUEO DI CALCESTRUZZO REOPLASTICO

M.COLLEPARDI S.GENNARI A.TRIANTAFILLIS S.ZORZI

Sommario

Viene descritta l'esecuzione della platea di fondazione del bacino di carenaggio S. Marco a Trieste avente una superficie di circa 16.000 m² e richiedente circa 82.000 m³ di calcestruzzo. Una prima parte della platea, pari a 8.000 m² circa ed a 40.000 m³ di calcestruzzo, è stata realizzata mediante getto subacqueo di calcestruzzo ed essa costituisce, in particolare, l'oggetto della presente nota. Una seconda parte della platea è stata eseguita mediante getto di calcestruzzo a cielo aperto dopo aver provveduto allo svuotamento dell'acqua del mare.

Abstract

This is a description of the execution of the concrete foundation of S. Marco dry dock of Trieste : total surface about 16.000 m² and total volume of concrete about 82.000 m³. The first part of the foundation equivalent to about 8.000 m² and 40.000 m³ of concrete has been realized with concrete poured underwater and this is the main subject of this note. The second part of the foundation has been realized in the open air after the dewatering of the sea water.

1. INTRODUZIONE

La platea di fondazione del bacino di carenaggio S.Marco a Trieste (per navi da 140.000 dwt) presenta una superficie di circa 16.000 m² (lunghezza massima = 292 m), ed ha richiesto oltre 82.000 m³ di calcestruzzo. Una prima parte della platea, pari a 8.000 m² circa ed a 40.000 m³ di calcestruzzo è stata realizzata in gran parte mediante getto subacqueo di calcestruzzo. La seconda parte della platea è stata eseguita integralmente mediante getto di calcestruzzo a cielo aperto. La Fig. 1 mostra una veduta di assieme della platea finita : in secondo piano è la zona realizzata in gran parte mediante getto subacqueo. Questa ultima, che costituisce in particolare l'oggetto della presente nota, è stata eseguita in due stadi come è schematicamente mostrato in Fig. 2 : nel primo stadio si è realizzato un solettone spesso circa 4 m e costituito da un insieme di "pizze" di calcestruzzo (ciascuna avente diametro di circa 15 m e volume di circa 45 m³) gettate in subacqueo affiancate, sovrapposte e sfalsate per impedire la coincidenza nelle riprese di getto; nel secondo stadio, dopo aver provveduto allo svuotamento dell'acqua del mare, si è completato il suddetto solettone mediante getti di calcestruzzo a cielo aperto spessi circa 1 m e ripartiti in lastre di circa 600 m², finite in superficie dopo aver applicato uno spolvero antiusura.

Alla seconda parte della platea, integralmente realizzata a cielo aperto attraverso getti monolitici con conci da 1.000 + 1.900 m³ circa, verrà solo accennato nella presente memoria.

| | |
|--------------------|--|
| Committente | : Arsenale Triestino S.Marco S.p.A., Trieste |
| Progettisti | : Ingg. Silvano Zorzi, Lucio Lonardo e Franco Cortiana dello Studio IN.CO S.p.A., Milano |
| Direzione Lavori | : Ingg. Antonio Franco e Giuseppe Bagnera |
| Impresa Esecutrice | : RECCHI S.p.A. Costruzioni Generali, Torino |
| Direzione Cantiere | : Ing. Silvio Gennari |



Fig. 1 - Veduta generale della platea di fondazione : in primo piano quella gettata integralmente a cielo aperto, in secondo piano quella gettata integralmente in subacqueo e finita a cielo aperto.

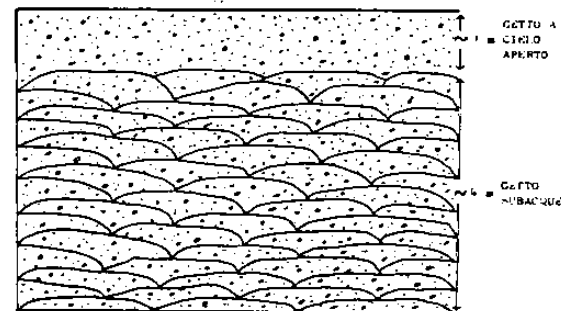


Fig. 2 - Schema del getto in subacqueo finito con il getto a cielo aperto.



Fig. 3 - Visione del cantiere durante il getto in subacqueo : il calcestruzzo viene pompato dall'autobetoniera alla tramoggia dalla quale si deposita sul fondo del mare mediante un tubogetto.

2. PROVE DI LABORATORIO E DI CAMPO

Sono stati studiati sostanzialmente due tipi di calcestruzzi: il primo per il getto subacqueo ed il secondo per il getto a cielo aperto. Quest'ultimo, dopo lo svuotamento del bacino, è stato impiegato sia per finire il getto subacqueo con un altro strato di calcestruzzo dello spessore medio di 1 m, sia per l'esecuzione dei getti monolitici (con spessore variabile da 2,7 a 4 m circa) nella parte della platea realizzata integralmente a cielo aperto. La ragione della duplice miscela è fondamentalmente basata sulle diverse tecniche esecutive. Nel getto subacqueo si richiedeva una maggiore fluidità e soprattutto una maggiore coesione per resistere al dilavamento dell'acqua del mare; queste caratteristiche, come si dirà meglio nel seguito, sono state realizzate impiegando un maggior dosaggio di cemento ed un minor diametro massimo dell'inerte.

2.1 Calcestruzzo per getto subacqueo

Prima di dare inizio alla esecuzione dei lavori si è proceduto ad una lunga ed accurata serie di prove, sia in laboratorio che sul campo, al fine di individuare la composizione del calcestruzzo più idonea dal punto di vista tecnico ed economico. A tal fine si è dovuto tener conto, da una parte, delle particolari tecniche esecutive per il getto subacqueo e, dall'altra, delle caratteristiche richieste dal progetto. Si è dovuto, in sostanza, conciliare le esigenze dell'impresa con quelle derivanti dal progetto. Come sarà meglio visto in seguito, tali esigenze sono risultate talvolta antitetiche e si è dovuto, pertanto, raggiungere un soddisfacente compromesso per entrambe.

In base al progetto, per il calcestruzzo si richiedeva soprattutto:

1. Resistenza caratteristica di 25 N/mm².

2. Resistenza chimica del calcestruzzo nei confronti dei solfati contenuti nell'acqua del mare.
3. Protezione delle armature dalla corrosione innescata dai cloruri contenuti nell'acqua del mare.
4. Impermeabilità della platea (16 m sotto il livello del mare) in corrispondenza delle riprese di getto.

Per la resistenza caratteristica richiesta dal progetto (25 N/mm²), tenuto anche conto dell'impiego di un cemento Portland ordinario, sarebbe stato sufficiente un rapporto acqua/cemento di circa 0,62. D'altra parte, sulla base delle raccomandazioni europee FIP-CEB concernenti l'attacco dell'acqua di mare nei confronti del calcestruzzo (1), si è stabilito che solo con un calcestruzzo poco poroso ed avente un rapporto acqua/cemento non superiore a 0,55 si sarebbe potuto garantire la durabilità del calcestruzzo contro l'attacco dei sali solfatici*. Si è deciso, per le ragioni nel seguito discusse, di adottare un rapporto acqua/cemento compreso tra 0,46 e 0,50 ottenendo una resistenza caratteristica di oltre 35 N/mm² necessariamente, quindi, superiore a quella prevista dal progetto. Per quanto concerne il punto 4 sopra menzionato (impermeabilità nelle riprese di getto) solo attraverso prove sperimentali di campo, che verranno discusse successivamente, è stato possibile verificare il raggiungimento dell'obiettivo.

Passando ad esaminare le esigenze derivanti dalle particolari tecniche esecutive scelte per il getto occorre innanzitutto menzionare che il calcestruzzo, preparato in un impianto centrale di betonaggio, veniva trasportato a mezzo autobetoniera e quindi pompato verso una tramoggia come è mostrato in Fig. 3. Successivamente, il calcestruzzo scendeva attraverso un tubogetto sistema "Contractor" (come è mostrato schematicamente in

* Per strutture con copriferro inferiore a 25 mm è necessario abbassare il rapporto acqua/cemento a 0,40 per garantire la protezione dei ferri dall'attacco dei cloruri. Si veda il paragrafo 2.2.

Fig. 4) per autolivellarsi sul fondo (inizialmente a circa 16 m dal livello del mare) sul quale una squadra di sommozzatori controllava le operazioni del getto. Si richiedeva, pertanto, un calcestruzzo fresco molto fluido ma al tempo stesso coesivo e non segregabile per impedire o limitare al minimo il dilavamento da parte dell'acqua del mare. La grande fluidità del calcestruzzo risultava indispensabile anche per la presenza sul fondo di ostacoli orizzontali e verticali, costituiti dai pali di fondazione e dalle relative camicie in calcestruzzo per solidarizzare i pali con il solettone (Fig. 5), oltre che dalle armature formate da travi a traliccio in profilati metallici di notevoli dimensioni (Fig. 6). Inoltre, tali ostacoli per la loro elevata frequenza, condizionavano il posizionamento del tubo-getto e rendevano nel contempo difficoltosa l'ispezione da parte dei sommozzatori. Pertanto, un'elevata lavorabilità del calcestruzzo veniva richiesta anche perché esso fosse capace di fluire a sensibile distanza così da poter limitare gli spostamenti del tubo-getto.

Pertanto, in base alle esigenze sopra menzionate si richiedeva:

5. Elevata fluidità del calcestruzzo corrispondente all'autolivellamento (slump 25-27 cm).
6. Conservazione della lavorabilità per un tempo sufficiente al trasporto ed al getto.
7. Elevata coesione ed assenza di segregazione dell'impasto per impedire il bloccaggio della pompa ed il dilavamento da parte dell'acqua del mare.

Val la pena di precisare che le caratteristiche relative al punto 5, che portano ad un'elevata richiesta nell'acqua di impasto, sono contrastanti con quelle relative al punto 7 e con quelle riguardanti i punti 2 e 3 per i quali il rapporto acqua/cemento deve rimanere inferiore a 0,55. Per conciliare tali con-

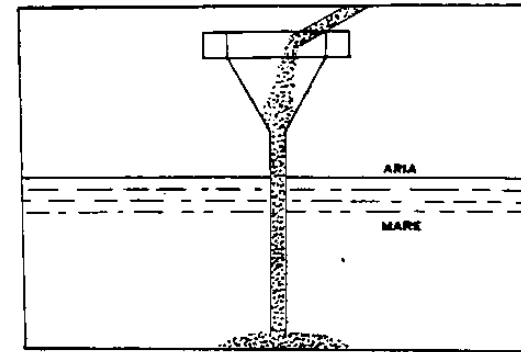


Fig. 4 - Schema del tubo-getto.

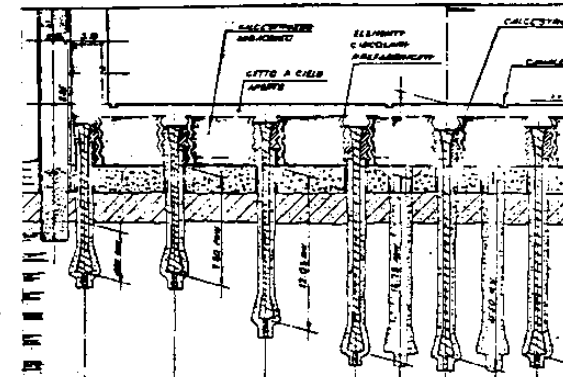


Fig. 5 - Schema della sezione della platea con i pali di fondazione.

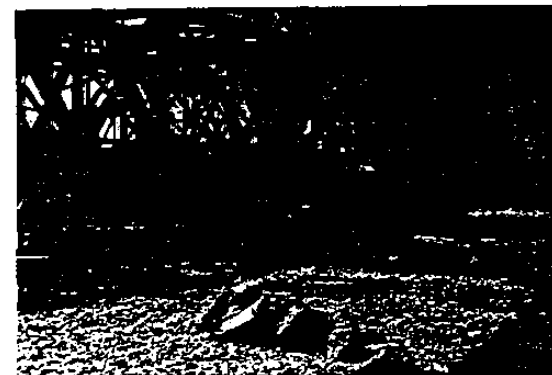


Fig. 6 - I tralicci in acciaio prima di essere calati sul fondo del mare per essere poi inglobati nel getto di calcestruzzo subacqueo.

trastanti esigenze si è deciso di impiegare un calcestruzzo con un rapporto acqua/cemento compreso tra 0,45 e 0,50 e di rendere reoplastico, cioè autolivellante e non segregabile l'impasto grazie all'impiego dell'additivo superfluidificante Rheobuild 561. Tenuto conto anche della distribuzione granulometrica degli inerti disponibili (Fig. 7 e 8) si è deciso di adottare la composizione media riportata in Tabella 1.

Tabella 1 Composizione media del calcestruzzo per il getto subacqueo.

| | | | |
|--|---|------|-------------------|
| - Cemento Portland ordinario | = | 400 | Kg/m ³ |
| - Acqua (inclusa umidità degli inerti) | = | 190 | l/m ³ |
| - Sabbia Po (satura a superficie asciutta) | = | 180 | Kg/m ³ |
| - Sabbia frantoio (satura a superficie asciutta) | = | 990 | Kg/m ³ |
| - Ghiaia 3-14 mm (satura a superficie asciutta) | = | 630 | Kg/m ³ |
| - Additivo superfluidificante Rheobuild | = | 6 | l/m ³ |
| - Slump | = | 26 | cm |
| - Acqua/cemento | = | 0,47 | |

L'impasto (Fig. 9) si presentava molto fluido (requisito n°5) ma al tempo stesso molto coesivo (requisito n°7) e conservava la lavorabilità in modo più che soddisfacente (requisito n°6) in modo che dopo circa 2 ore lo slump passava da 26 a 24 cm. Con prove di campo è stato possibile pompare questo calcestruzzo per oltre 250 m trasportandolo dall'autobetoniera alla tramoggia di alimentazione del tubo-getto con una portata pari a circa 45 m³/ora.

Sul calcestruzzo indurito sono state effettuate prove di resistenza meccanica a compressione, di resistenza chimica all'attacco solfatico, di protezione dei ferri d'armatura e di per

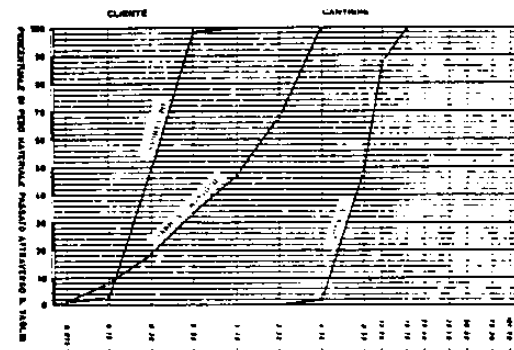


Fig. 7 - Curve granulometriche degli inerti impiegati.

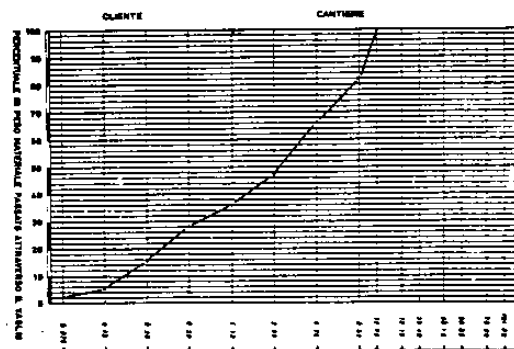


Fig. 8 - Curva granulometrica dell'inerte combinato.



Fig. 9 - Abbassamento al cono del calcestruzzo asciutto (senza additivo) e di quello reoplastico (con Rheobuild 561) con composizione della Tabella 1.

meabilità, al fine di verificare i requisiti n°1-4 sopra menzionati. Tutte queste prove sono state effettuate su calcestruzzo messo in opera senza alcuna vibrazione per simulare le reali condizioni di getto.

La resistenza meccanica media a compressione è stata di 42 N/mm² con una resistenza caratteristica di oltre 37 N/mm².

Per le prove di resistenza all'attacco solfatico alcuni provini di calcestruzzo stagionato per 24 ore nelle casseforme sono stati immersi sia in acqua potabile che in acqua del mare per valutare l'allungamento relativo dei provini. È noto che, a causa della reazione tra il solfato presente nell'acqua del mare ed i composti del cemento idratato, il calcestruzzo subisce una espansione eccessiva (causa di fessurazione e di distacchi) o comunque molto maggiore di quella che normalmente si registra per un conglomerato immerso in acqua priva di solfato. Le curve della Fig. 10 mostrano l'andamento dell'espansione in funzione del tempo per un periodo di 12 mesi. Si può osservare come l'andamento delle due curve sia sostanzialmente identico per l'acqua potabile e quella del mare evidenziando, così, per il calcestruzzo in esame, una eccellente resistenza all'aggressione solfatica: la ragione di questo comportamento è fondamentalmente da attribuire alla bassa porosità del conglomerato - derivante dal basso rapporto acqua/cemento - che impedisce l'ingresso dei sali solfatici all'interno del calcestruzzo.

Per le prove riguardanti la protezione dei ferri sono stati preparati dei provini cubici (10 cm) armati con una barra di acciaio (diametro 5 mm) ad aderenza migliorata. Le prove sono state effettuate sul calcestruzzo riportato in Tabella 1 con e senza additivo superfluidificante immergendo i provini armati (messi in opera entrambi senza vibrazione del calcestruzzo fresco) in acqua del mare per un periodo di 2,6 e 12 mesi dopo una stagionatura di un giorno in cassaforma. Alle scadenze previste

i provini sono stati in parte sottoposti a prove di sfilamento dei ferri (Tabella 2) ed in parte sezionati per valutare l'eventuale corrosione dell'acciaio (Fig. 11).

Tabella 2 Sfilamento (N/mm²) delle barre ad aderenza migliorata per calcestruzzi stagionati all'aria o immersi in acqua del mare.

| TEMPO | CALCESTRUZZO ASCIUTTO (slump = 3cm; senza additivo) | | CALCESTRUZZO REOPLASTICO (slump = 26cm; con additivo) | |
|---------|--|----------------|--|----------------|
| | aria | acqua del mare | aria | acqua del mare |
| 2 mesi | 0,3 | 0,7 | 18,0 | 18,3 |
| 6 mesi | 0,4 | 0,3 | 17,0 | 21,0 |
| 12 mesi | 1,4 | 0,3 | 16,8 | 22,6 |

I dati della Tabella 2 mostrano, innanzitutto, che in assenza di vibrazione, grazie alla grande fluidità del calcestruzzo reoplastico che avvolge e protegge i ferri d'armatura ed al basso rapporto acqua/cemento, l'aderenza tra ferro e calcestruzzo è significativamente maggiore di quella ottenibile con il calcestruzzo asciutto: in questo secondo caso, infatti, il contatto tra ferro e calcestruzzo è fortemente condizionato dalla scarsa lavorabilità del conglomerato e dall'assenza di vibrazione. Inoltre, la conservazione sott'acqua del mare invece che all'aria provoca - nel caso del calcestruzzo reoplastico - una migliore stagionatura; d'altra parte, l'impermeabilità del conglomerato, derivante da un basso rapporto acqua/cemento, non consente ai sali presenti nell'acqua del mare di aggredire il calcestruzzo e/o i ferri d'armatura.

Le Figg. 11 e 12 mostrano lo stato dei ferri d'armatura dopo 6 e 12 mesi di conservazione dei provini sott'acqua del mare. Si può osservare il grave stato di ossidazione dei ferri causa-

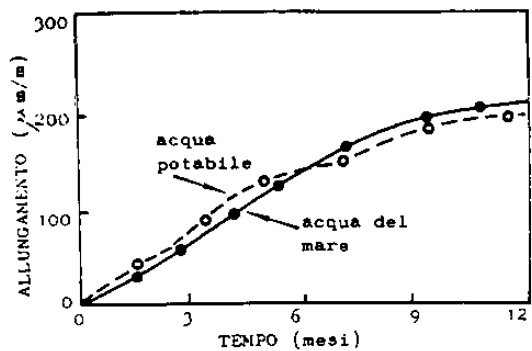
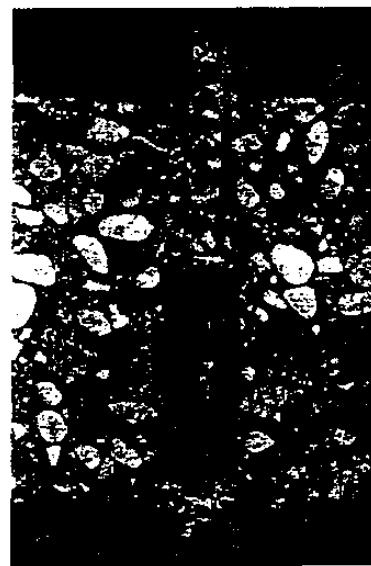
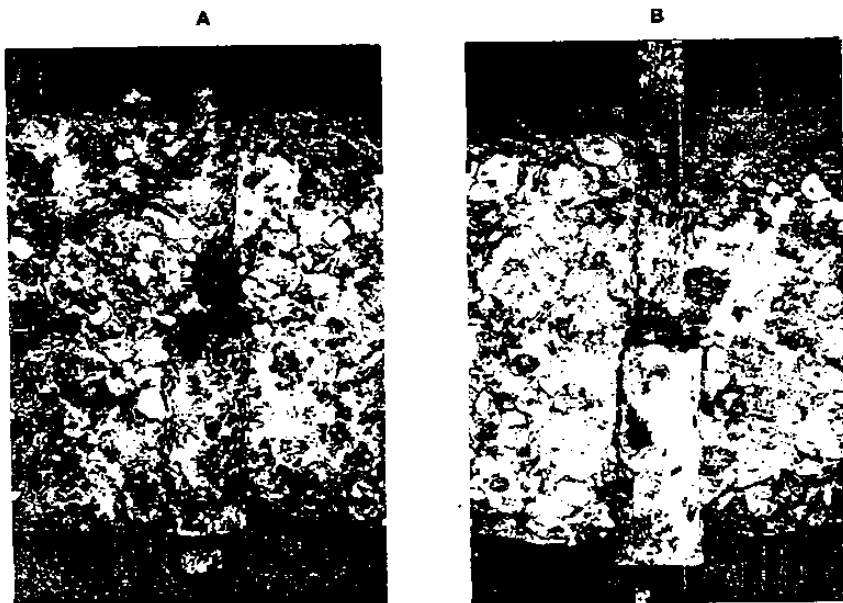


Fig. 10 - Allungamento di provini di calcestruzzo reoplastico immerso in acqua potabile o acqua del mare.

Fig. 11 - Sezione di un provino di calcestruzzo asciutto armato dopo 6 mesi (A) o 12 mesi (B) di immersione in acqua del mare.



A

Fig. 12 - Sezione di un provino di calcestruzzo reoplastico armato dopo 6 mesi (A) o 12 mesi (B) di immersione in acqua del mare.



B

to dall'ingresso del cloruro attraverso il calcestruzzo asciutto e la formazione di incrostazioni bianche dovute alla produzione di gesso ed ettringite (Fig. 11). Nei provini confezionati con calcestruzzo reoplastico, invece, i ferri risultano assolutamente protetti e privi di qualsiasi arruggimento, mentre all'interno del calcestruzzo non si formano né gesso né ettringite (Fig. 12).

Per la permeabilità sono state effettuate sia prove di laboratorio su provini cubici di calcestruzzo (10 cm) per misurare il coefficiente di Darcy ($5 \cdot 10^{-11}$ cm/sec), sia prove di campo per valutare la tenuta in corrispondenza delle riprese di getto. A tal fine sono stati gettati dei blocchi (8 x 4 x 1 m) di calcestruzzo reoplastico sia a cielo aperto - per valutare visivamente l'autolivellamento del calcestruzzo (Fig. 13) - sia sott'acqua del mare (4,6 x 2,50 x 2,35 m) in condizioni operative molto simili a quelle poi realizzate in cantiere (Fig. 14). Il calcestruzzo è stato gettato in più strati (Fig. 15-16) interponendo almeno 1 giorno tra il getto di uno strato e quello successivo, in modo da creare una situazione simile a quella poi realizzata in cantiere. Successivamente il blocco è stato estratto dall'acqua del mare per essere sottoposto alle prove di carotaggio e di permeabilità secondo il metodo Lugeon (Fig. 17). Nel foro di 145 mm, causato dal carotaggio, è stata iniettata acqua a pressione crescente fino a provocare la perdita d'acqua in corrispondenza di una ripresa di getto. Ciò è avvenuto alla pressione di 3,5 atm corrispondente ad una colonna d'acqua di 35 m decisamente superiore, quindi, al battente d'acqua nella parte più profonda del bacino (16 m). Questa prova, quindi, ha messo in evidenza la buona adesione del calcestruzzo reoplastico in corrispondenza dei giunti freddi.

Sulle carote estratte dai blocchi sono state eseguite misure di peso specifico e di modulo elastico dinamico in confronto

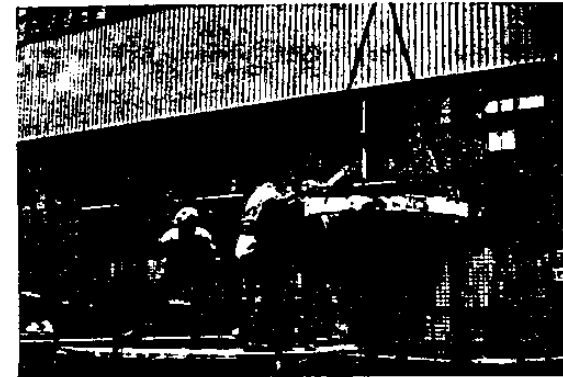
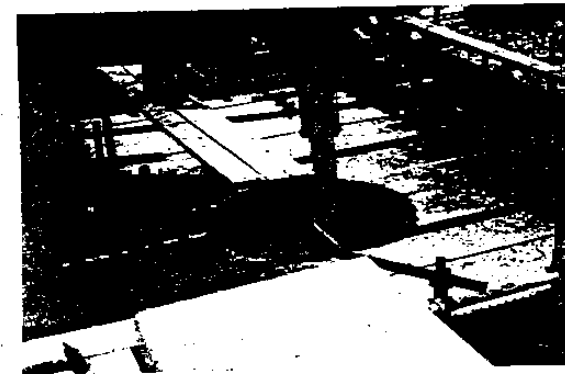
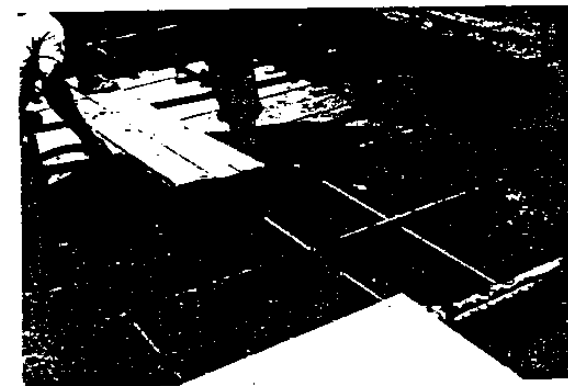


Fig. 13 - Prove di campo per il getto di calcestruzzo reoplastico : inizio del getto (A), autolivellamento del calcestruzzo (B e C).

A



B



C



Fig. 14 - Prove di campo per il getto del calcestruzzo reo plastico in subacqueo.

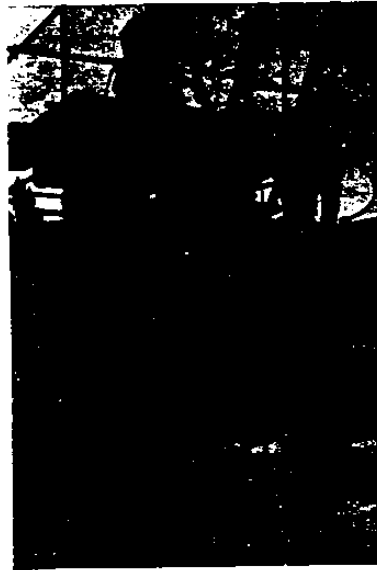


Fig. 15 - Blocco del calcestruzzo gettato in subacqueo e sollevato per le prove di permeabilità in corrispondenza delle riprese di getto.

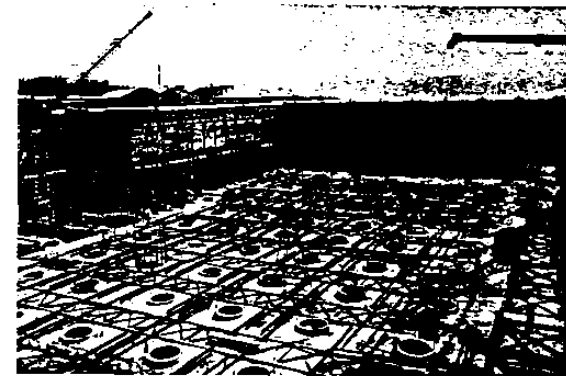


Fig. 16 - Particolare della Fig. 15 : si riconoscono tre strati di calcestruzzo gettati a tempi diversi.



Fig. 17 - Fuoriuscita dell'acqua in corrispondenza di una ripresa di getto alla pressione di 3,5 atm.

Fig 18 - Veduta della platea di fondazione gettata in subacqueo dopo lo svuotamento dell'acqua del mare.



con analoghe misure effettuate sui cubetti di laboratorio. I risultati hanno mostrato che sia il peso specifico (2.390 Kg/m^3) sia il modulo elastico (circa 40.000 N/mm^2 a 28 giorni) erano identici nelle carote e nei cubetti confermando, così, l'affidabilità del calcestruzzo reoplastico (2). In altre parole, la qualità del calcestruzzo reoplastico messo in opera all'interno di una struttura reale, è sostanzialmente coincidente con quella dei provini preparati in laboratorio.

2.2 Calcestruzzo per getto a cielo aperto

Le caratteristiche di questo calcestruzzo, soprattutto per ragioni connesse con le diverse modalità esecutive, sono state sensibilmente diverse da quelle prescelte per il conglomerato gettato in subacqueo. Innanzitutto non si richiedeva una resistenza al dilavamento da parte dell'acqua del mare né un autovellamento (slump = 25-27 cm) del calcestruzzo fresco. L'impiego di una staggia vibrante, infatti, consentiva di agevolmente rifinire in superficie il calcestruzzo. D'altra parte, l'esigenza di una rapida messa in opera, in presenza di una notevole percentuale di armatura, ha portato a scegliere una lavorabilità pari a 18-20 cm di slump.

Il diametro massimo dell'inerte è stato portato da 15 mm (per il getto subacqueo) a 25 mm. Utilizzando l'additivo superfluidificante Rheobuild l'acqua totale (inclusa l'umidità degli inerti) richiesta per una lavorabilità di 18-20 cm è stata di 165 l/m^3 . Poiché il rapporto acqua/cemento è stato fissato a 0,55 (per rimanere nei limiti imposti dalle raccomandazioni FIP-CEB) il dosaggio di cemento Portland ordinario è stato di $165/0,55 = 300 \text{ Kg/m}^3$. In Tabella 3 è riportata la composizione media del calcestruzzo per il getto a cielo aperto.

Tabella 3 Composizione media del calcestruzzo per il getto a cielo aperto.

| | | | |
|--|---|------|------------------|
| - Cemento Portland ordinario | = | 300 | kg/cm^2 |
| - Acqua (inclusa umidità degli inerti) | = | 165 | l/m^3 |
| - Sabbia Po (satura a superficie asciutta) | = | 210 | kg/m^3 |
| - Sabbia frantoio (satura a superficie asciutta) | = | 690 | kg/m^3 |
| - Ghiaia 25 mm (satura a superficie asciutta) | = | 1020 | kg/m^3 |
| - Additivo superfluidificante | = | 4,5 | l/m^3 |
| - Slump | = | 19 | cm |
| - Acqua/cemento | = | 0,55 | |
| - Resistenza caratteristica | = | 28 | N/mm^2 |

Le sostanziali differenze rispetto all'impasto per il getto subacqueo (Tabella 1) risiedono, oltre alla minore lavorabilità, in :

- a) minor dosaggio di cemento (da 400 a 300 kg/m^3);
- b) maggior rapporto acqua/cemento (da 0,47 a 0,55).

Il minor dosaggio di cemento - connesso d'altra parte con il maggior rapporto acqua/cemento oltre che con il maggior diametro dell'inerte - è stato scelto per ridurre il più possibile il ritiro del calcestruzzo (nelle condizioni d'esercizio la platea di fondazione sarà sottoposta a notevoli variazioni igrometriche). D'altra parte, un minor dosaggio di cemento comporta una riduzione nel calore di idratazione (-25% nel caso specifico) con conseguente riduzione nel rischio di fessurazione.

La riduzione del dosaggio di cemento ha comportato un aumento nel rapporto acqua/cemento. Questo è rimasto nei limiti delle raccomandazioni FIP-CEB per un calcestruzzo resistente all'attacco solfatico, ma ha lasciato aperto il problema della corrosione dei ferri d'armatura causata dai cloruri dell'acqua del mare. A questo proposito non esistono raccomandazioni o normati

ve specifiche. Tuttavia, il Comitato ACI 201 (3) segnala, sulla base di prove effettuate da Clear e Hay (4) su lastre di calcestruzzo mantenute a contatto con acqua di mare, che solo con un rapporto acqua/cemento di 0,40 è possibile garantire la protezione dei ferri con un copriferro di circa 38 mm : alternativa mente si raccomanda un copriferro di 50 mm per un rapporto acqua/cemento di 0,45.

Tenuto conto della presenza di una rete elettrosaldata con un copriferro di 25 mm e del rapporto acqua/cemento (0,55) impiegato per il calcestruzzo, si è deciso di applicare uno "spolvero" cementizio (Macron) che è stato incorporato sulla superficie del calcestruzzo fresco in misura di 5 kg/m². Poiché lo "spolvero" contiene circa il 50 % di cemento il rapporto acqua/cemento medio sui 2 cm superficiali di calcestruzzo è sceso da 0,55 a 0,39, creando così una migliore protezione da parte del copriferro nei confronti della rete elettrosaldata. D'altra parte la presenza di inerti silicei (quarzite), particolarmente duri e resistenti all'abrasione, nello "spolvero" ha avuto anche la funzione di migliorare la resistenza all'usura della su perficie in calcestruzzo.

3. ESECUZIONE DEL GETTO SUBACQUEO

Nei paragrafi che seguono sono descritte le attrezzature impiegate e le tecniche esecutive del getto.

3.1 Attrezzature

a) Impianto di dosaggio e carico dei componenti per il calcestruzzo

E' stato impiegato un impianto (Loro Parisini) di tipo oriz zontale con quattro tramogge per gli inerti corredato da tre silo per cemento e due cisterne per l'additivo.

b) Dosatore per additivi

Il dosatore di additivi era di tipo ad aria compressa con cilindro graduato trasparente per il controllo visivo dell'immissione dell'additivo (Rheobuild della MAC S.p.A.) nell'imposto.

c) Autobetoniere

Sono state utilizzate sei autobetoniere della capacità di 6 m³.

d) Pompa del calcestruzzo

E' stata impiegata una pompa tipo Elephant BRA 1046 Putzmeister, azionata da motore elettrico e con una capacità di pompaggio di 60 m³/ora.

e) Postazione della pompa

Era costituita da:

- piazzole sufficientemente ampie così da consentire l'accesso alla tramoggia della pompa e di due autobetoniere contemporaneamente, per assicurare un'alimentazione continua del calcestruzzo;
- tettoia di protezione della postazione per consentire le operazioni anche in caso di pioggia forte ed evitare apporti di acqua al calcestruzzo.

f) Braccio distributore

Tipo MT 29 della Scheele con un raggio di lavoro utile di 29 m. L'estremità di scarico era munita di una valvola speciale per impedire lo svuotamento del braccio discendente durante i cambiamenti di posizione del punto di getto.

g) Tubo getto

E' stato appositamente allestito in cantiere con le seguenti caratteristiche :

- tubo in acciaio con diametro interno di 177 mm e con uno spessore della parete di 9 mm;
- lunghezza del tubo (più elementi flangiati) di 20 m;
- tramoggia conica corredata di passerella circolare con balaustra al fine di consentire la presenza di un operatore per il controllo visivo del flusso del calcestruzzo.

h) Tubatura per il trasporto del calcestruzzo

La distanza dalla pompa al braccio distributore variava da 50 a 250 m. La tubatura veniva protetta con sacchi di sabbia tenuti umidi per evitare il riscaldamento solare in estate. Tra la pompa e la tubatura metallica veniva interposto un collegamento per evitare sollecitazioni ai giunti tra gli elementi della tubatura.

i) Base operativa

Per il supporto del braccio distributore e della gru, per il sostegno ed il posizionamento del tubo getto, è stato allestito un pontone (12 x 25 m).

l) Collegamento radio

Tra la postazione della pompa e la base operativa sul pontone funzionava un collegamento radio (ricetrasmittente) per regolare l'invio del calcestruzzo alla tramoggia del tubo getto.

m) Collegamento telefonico

Tra l'operatore subacqueo (per il controllo del posizionamento del tubo di getto e della fuoriuscita in subacqueo del

calcestruzzo) e la base operativa sul pontone esisteva un collegamento telefonico.

3.2 Tecnica del getto in subacqueo

La messa in opera in subacqueo del calcestruzzo per mezzo di un tubo getto non è una tecnica nuova ed è già nota con il nome di metodo "Tremie" (5). Tuttavia essa presenta notevoli difficoltà operative. Nel caso della messa in opera per il lavoro oggetto della presente memoria si è tentato di sfruttare le particolari caratteristiche del calcestruzzo reoplastico (Tabella 1) - in particolare l'elevata fluidità e la scarsa segregazione - per facilitare tutte le operazioni connesse con questa tecnica (per esempio : minimizzare il numero degli spostamenti del tubo getto), e per aumentare considerevolmente la velocità di getto arrivando a mettere in opera dai 600 ai 700 m³ di calcestruzzo per giorno.

Per quanto riguarda l'esecuzione del getto subacqueo si è proceduto come descritto nel seguito.

a) Il tubo getto veniva posizionato e fatto scendere verticalmente in acqua sino a contatto con il fondo. L'operazione veniva condotta con l'assistenza di un sommozzatore.

b) Dopo il posizionamento si procedeva all'innesco del tubo getto, come segue.

- Si faceva affluire il calcestruzzo attraverso la tramoggia entro il tubo getto sino a formare una colonna di calcestruzzo in grado di controbilanciare, con il suo peso, la pressione esistente sul fondo in conseguenza dell'altezza della colonna d'acqua; ciò impediva l'apertura della valvola terminale, la risalita dell'acqua nel tubo getto e quindi il dilavamento del calcestruzzo; tenuto conto della differenza nei pesi specifici occorreva una colonna di calcestruzzo di cir

ca 7 m per controbilanciare la pressione di una colonna d'acqua di 15 m; una colonna di calcestruzzo notevolmente più alta di quella necessaria a controbilanciare la pressione esistente sul fondo avrebbe prodotto, all'avviamento del getto (apertura della valvola terminale ed immissione di calcestruzzo in tramoggia), una spinta eccessiva al calcestruzzo in uscita, favorendo la separazione degli inerti dalla pasta cementizia e facendo formare, attorno alla valvola terminale, mucchi di ghiaia dilavata che, per la scarsa mobilità, avrebbero ostacolato il regolare fluire del calcestruzzo.

- Messa a punto la colonna di calcestruzzo atta a contrastare la pressione dell'acqua, si dava il via alla colata facendo affluire il calcestruzzo in tramoggia ed aprendo nel contempo la valvola terminale; questa era la fase più delicata dell'operazione, perché se la portata del calcestruzzo affluente in tramoggia era inferiore a quella che fuoriusciva sul fondo, si poteva avere risalita d'acqua nel tubo getto e dilavamento del calcestruzzo; in tal caso bisognava sospendere le operazioni di getto, estrarre il tubo getto dall'acqua, svuotarlo interamente e ripetere l'operazione di innesco.

c) Il calcestruzzo reoplastico in uscita si autolivellava attorno al tubo getto in forma più o meno circolare a seconda degli ostacoli (tralicci e pali) presenti nell'area investita dal getto; successivamente aumentava lo spessore parallelamente al diametro della "pizza". Quando la parte terminale del tubo getto risultava coperta dal calcestruzzo la propagazione dell'impasto cementizio risultava progressivamente più ostacolata dovendosi vincere la pressione della colonna d'acqua più quella determinata dalla presenza della massa già gettata. Poiché, quindi, la portata del calcestruzzo alimentato in tramoggia risultava momentaneamente superiore a quella del materiale che fuoriusciva dal tubo, l'altezza della co-

lonna di calcestruzzo all'interno del tubo getto aumentava. Pertanto, si ristabiliva automaticamente la spinta necessaria a vincere l'ostacolo finché non si fosse riempito il tubo getto per tutta l'altezza con conseguente diminuzione della portata all'uscita del tubo. Si provvedeva quindi, su segnalazione dei sommozzatori, a sollevare dolcemente il tubo getto per diminuire lo spessore di calcestruzzo nel quale era immerso il tubo getto. Ciò consentiva di aumentare nuovamente la portata del calcestruzzo che fuoriusciva dal tubo getto.

Con questa tecnica è stato possibile gettare con continuità delle "pizze" di calcestruzzo reoplastico aventi diametro di oltre 15 m e volume di circa 45 m³. Impiegando un calcestruzzo non additivato difficilmente si sarebbe potuto superare un diametro di 3,5 m, con conseguente enorme aumento del numero dei posizionamenti del tubo getto (operazione a) di questo paragrafo) ed intervento dei sommozzatori. Tenuto conto della grande fluidità del calcestruzzo reoplastico il getto di ogni "pizza" si completava in circa un'ora, limitando al minimo il lavoro dei sommozzatori che controllavano il regolare avanzamento del calcestruzzo e l'avvolgimento completo dei tralicci e dei pali. La lavorabilità del calcestruzzo reoplastico, tenuto conto delle particolari condizioni sul fondo del mare e della temperatura (15°C) si è mantenuta per circa quattro ore. Ciò ha consentito di gettare con sufficiente tranquillità e di far fronte agli inevitabili inconvenienti che, di volta in volta, potevano presentarsi sul cantiere per un'operazione così complessa.

L'indurimento del calcestruzzo iniziava, nelle reali condizioni di getto dopo circa 15 ore. A indurimento avvenuto, i sommozzatori procedevano - prima di iniziare il getto del successivo strato di calcestruzzo - alla rimozione del mate-

riale incoerente depositato sul calcestruzzo indurito.

d) Il getto del calcestruzzo in subacqueo è in generale un'operazione che richiede personale specializzato e un'adeguata organizzazione del cantiere. Per quanto l'impiego del calcestruzzo reoplastico abbia semplificato considerevolmente la messa in opera, il getto in subacqueo per una platea di così notevoli proporzioni ed in presenza di rilevanti ostacoli, quali tralicci e pali di fondazione, ha richiesto un coordinamento attento e preciso tra i diversi gruppi di lavoro. A solo titolo di esempio si pensi, da una parte, al lavoro dei sommozzatori che dovevano controllare l'avvio del getto ed il suo regolare avanzamento e, dall'altra, a tutta l'organizzazione per il mescolamento, per il trasporto, e per la posa in opera del calcestruzzo che doveva provvedere, con adeguato sincronismo e senza interruzioni, all'alimentazione della tramoggia per il tubo-getto.

3.3 Risultato conseguito

Le Fig. 18-22 mostrano la parte del solettone gettata in subacqueo dopo lo svuotamento dell'acqua del mare. Si può osservare come - pur in assenza di vibrazione - il calcestruzzo si sia autolivellato sufficientemente. La Fig. 19 mostra il solettone di calcestruzzo dal quale emergono le parti superiori dei tralicci e gli elementi anulari in calcestruzzo prefabbricato per solidarizzare i pali con la platea di fondazione. Per il completamento di questa - al fine di realizzare una migliore planarità - è stato successivamente gettato, a cielo aperto, uno strato di calcestruzzo liscio in superficie a regola d'arte (paragrafi 4.2 e 4.3). La Fig. 22 mostra lo spessore del getto realizzato in subacqueo.



Fig. 19 - Particolare della platea di fondazione gettata in subacqueo: si notino le estremità superiori dei tralicci emergenti dal getto.



Fig. 20 - Veduta della platea gettata in subacqueo: sullo sfondo lo sbarramento per l'acqua del mare.

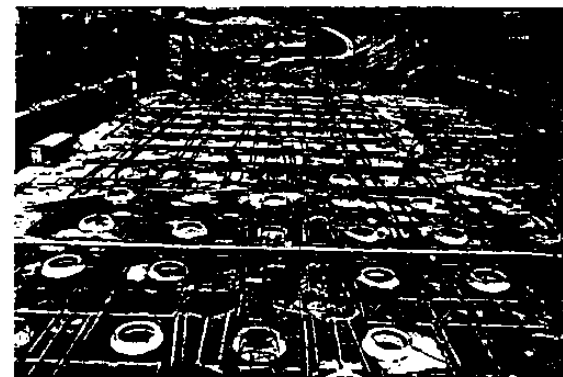
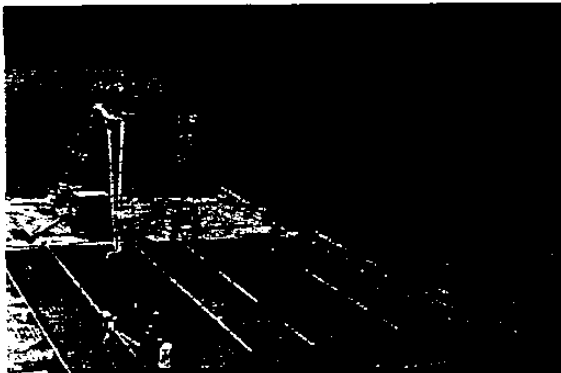


Fig. 21 - Veduta della platea gettata in subacqueo: sullo sfondo l'area dove il getto verrà proseguito a cielo aperto.



Fig. 22 - Particolare della platea gettata in subacqueo.

Fig. 23 - Getto a cielo aperto : in alto a destra l'autobetoniera e la pompa dalla quale il calcestruzzo reoplastico scende per essere distribuito attraverso una tubazione.



4. ESECUZIONE DELLA PLATEA A CIELO APERTO

Nei paragrafi che seguono sono descritte le attrezzature e le tecniche impiegate sia per il completamento del solettone precedentemente gettato in subacqueo, sia per l'esecuzione della restante platea integralmente gettata a cielo aperto e ripartita in conci monolitici da $1.000 \times 1.900 \text{ m}^3$

4.1 Attrezzature

Le attrezzature sono quelle già descritte nei punti da a) a f) del paragrafo 3.1. Non sono ovviamente incluse quelle relative al getto in subacqueo. La Fig. 23 mostra una veduta d'insieme dell'autobetoniera, della tubazione e del distributore, posizionato in zona adiacente al concio da gettare, che porta ad un'estremità un tubo flessibile in gomma.

4.2 Tecnica del getto a cielo aperto

Il calcestruzzo reoplastico (Tabella 3) è stato messo in opera dopo il posizionamento dei ferri di armatura sul precedente strato di calcestruzzo gettato in subacqueo (Fig. 24). La lavorabilità dell'impasto (Fig. 25) ha consentito una rapida messa in opera pur in presenza di una notevole percentuale di armatura (Fig. 26).

Nel caso dei conci gettati integralmente a cielo aperto (Fig. 27-28) il calcestruzzo veniva fatto avanzare da un'estremità dall'altra mettendo in opera, fresco su fresco, strati spessi circa 50 cm. Inizialmente, quando l'altezza del concio raggiungeva i 3-4 m, il tubo di gomma veniva inserito tra i ferri di armatura, e attraverso apposite finestre ricavate nella rete elettrosaldata, al fine di evitare che ci fosse un impatto troppo violento tra il calcestruzzo ed i ferri che avrebbe potuto provocare la separazione degli inerti. In vicinanza

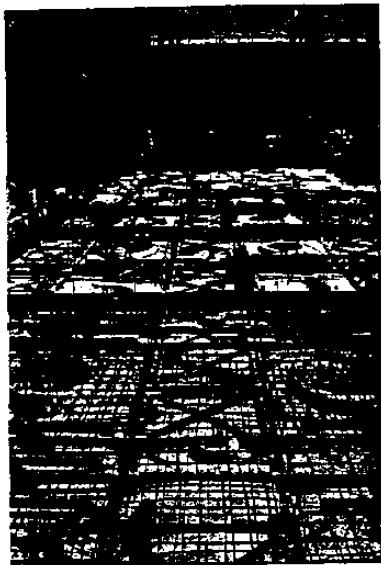


Fig. 24 - Posizionamento dei ferri di armatura sul calcestruzzo gettato in subacqueo prima del getto a cielo aperto.

Fig. 25 - Aspetto del calcestruzzo reoplastico pompato.

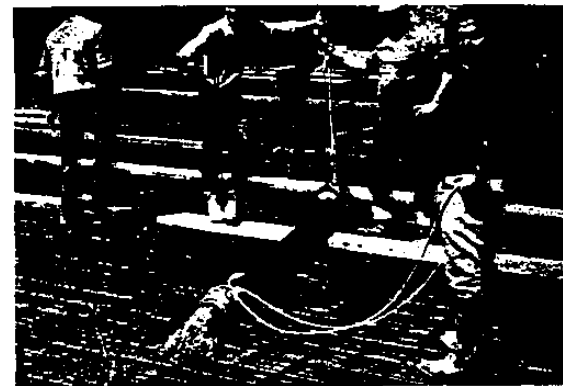
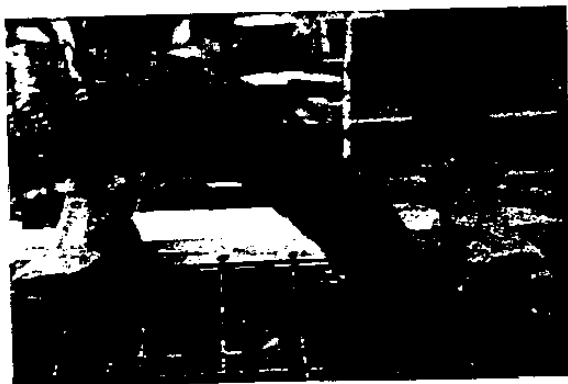


Fig. 26 - Messa in opera del calcestruzzo reoplastico pompato.



Fig. 27 - Veduta aerea della parte di platea integralmente gettata a cielo aperto. La platea è costituita da conci di $1000 \div 1900 \text{ m}^3$ di calcestruzzo.



Fig. 28 - Particolare del faccia vista di un coniglio gettato a cielo aperto. Il getto è stato eseguito a tutta parete evitando riprese di getto e giunti freddi.

dei casseri si provvedeva a vibrare il calcestruzzo.

4.3 Finitura e stagionatura

La superficie finale della platea di fondazione è stata ottenuta con l'ausilio di una staggia vibrante e scorrevole su pattini poggianti su rotaie precedentemente fissate a quota stabilita (Fig. 29). In questa fase, per ottimizzare la compattezza del calcestruzzo sono stati impiegati vibratori ad ago prima che sopraggiungesse la staggia vibrante.

Successivamente (Fig. 30) veniva incorporato uno "spolvero" indurente (Macron) a base di cemento, inerti silicei (quar_zite) ed additivi, avente il duplice scopo di migliorare la resistenza all'abrasione e di abbassare il rapporto acqua/cemento sullo strato più superficiale al fine di proteggere i ferri di armatura dalla corrosione causata dall'acqua del mare. Per incorporare lo "spolvero" indurente nel calcestruzzo non ancora indurito e per migliorare il grado di finitura superficiale si procedeva alla frattazzatura della pavimentazione mediante frattazzatrice meccanica (Fig. 31). In generale il getto del calcestruzzo fresco terminava nelle ore notturne, cosicché nelle prime ore del mattino successivo il calcestruzzo raggiungeva la consistenza ottimale per l'applicazione dello "spolvero".

Terminata la frattazzatura, la pavimentazione, eseguita in gran parte nel periodo estivo, veniva protetta con sacchi di juta mantenuti umidi per almeno 15 giorni. Rimossa la copertura, veniva applicata a spruzzo uno stagionante antievaporante (Mackure) per mantenere umido il calcestruzzo il più a lungo possibile e ridurre quindi al minimo le conseguenze del ritiro igrometrico.

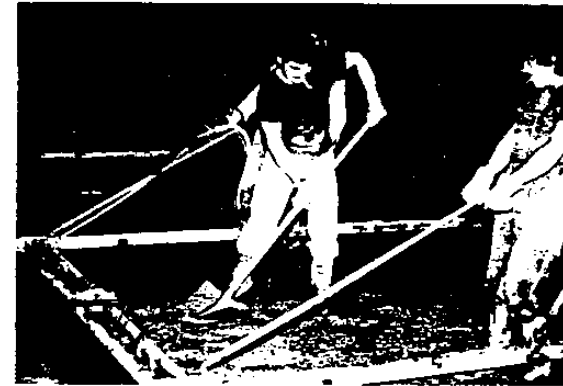


Fig. 29 - Livellamento finale del calcestruzzo mediante staggia vibrante.

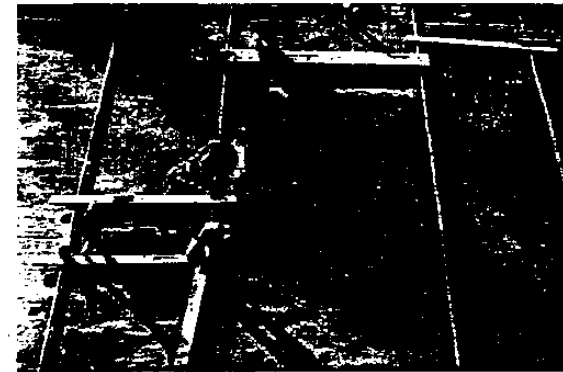


Fig. 30 - Applicazione dello spolvero antiusura sulla superficie del calcestruzzo.



Fig. 31 - Finitura della platea di fondazione mediante frattazzatrice meccanica.

5 BIBLIOGRAFIA

- (1) Codice-Modello per le strutture in cemento armato, CEB-FIP, pg. 159, Ed. AITEC, Roma, (1979).
- (2) M. Colleparidi e Mario Corradi "Superplasticizers in Concrete, pg. 315, Publication SP-62, American Concrete, Detroit, (1979).
- (3) ACI Committee 201 "Guide to Durable Concrete", ACI Manual of Concrete Practice 1979, Part I, pg. 201-1.
- (4) K.C. Clear e R.E. Hay "Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete in Concrete Slab, V.1 : Effect of Mix Design and Construction Parameters", Interim Report No. FHWA-RD-73-32, Federal Highway Administration, Apr. 1973.
- (5) ACI Committee 304 "Recommended Practice for Measuring, Mixing, Transporting and Placing Concrete", ACI Manual of Concrete Practice 1979, Part I, pg. 304-1.