

# Cap. III

## La non omogeneità del calcestruzzo e suoi effetti sul degrado

Penso sia utile leggere e meditare questo «stato dell'arte» sull'argomento che consente di capire meglio tanti fenomeni che altrimenti sono di difficile spiegazione e che possono portare ad una (ingiusta!) sfiducia generalizzata nel nostro amato calcestruzzo.

tano dalla variazione di impatto e da cambi del contenuto d'acqua degli aggregati, da sedimentazione e segregazione del calcestruzzo, da effetti pariete e dalle migrazioni d'acqua dentro e fuori il calcestruzzo.

Per questo le condizioni, la struttura e le proprietà dei 50

di cemento»). Dopo questo si ha uno strato di circa 5 mm. di calcestruzzo con struttura di malta (è detto «pelle di malta») (Figura 1).

La *superficie* del calcestruzzo che si osserva è parte della pelle di cemento che si estende per circa 20 micron sul calcestruzzo e genera le differenze di colore, i buchetti (o bollicine), le striature di sabbia e crepine che si osservano in molti casi.

Vacuoli pieni d'aria o d'acqua possono disporsi sotto le armature o le particelle di aggregato grosso se il compattamento non è ben eseguito o non è adatto al rapporto acqua/cemento esistente o se si ha sedimentazione. Anche se non si producono vacuoli si possono avere strati indeboliti di circa 1 mm. di spessore. Inoltre si hanno di solito bolle d'aria distribuite irregolarmente in tutto il calcestruzzo.

L'effetto pelle porta a variazioni nel rapporto cemento-aggregati e nel contenuto d'acqua e nelle porosità degli strati di superficie e quindi influenza la durabilità.

Per questo la composizione e le proprietà della pelle del calcestruzzo sono importanti per la comprensione di processi come lo spalling di superficie, le microfessure, l'effetto chimico e in generale il deterioramento delle pelli che è importante specialmente perchè purtroppo le armature sono normalmente parte della pelle del calcestruzzo. Durante il processo d'indurimento i prodotti d'idratazione sono *diversi* nel nucleo del cal-

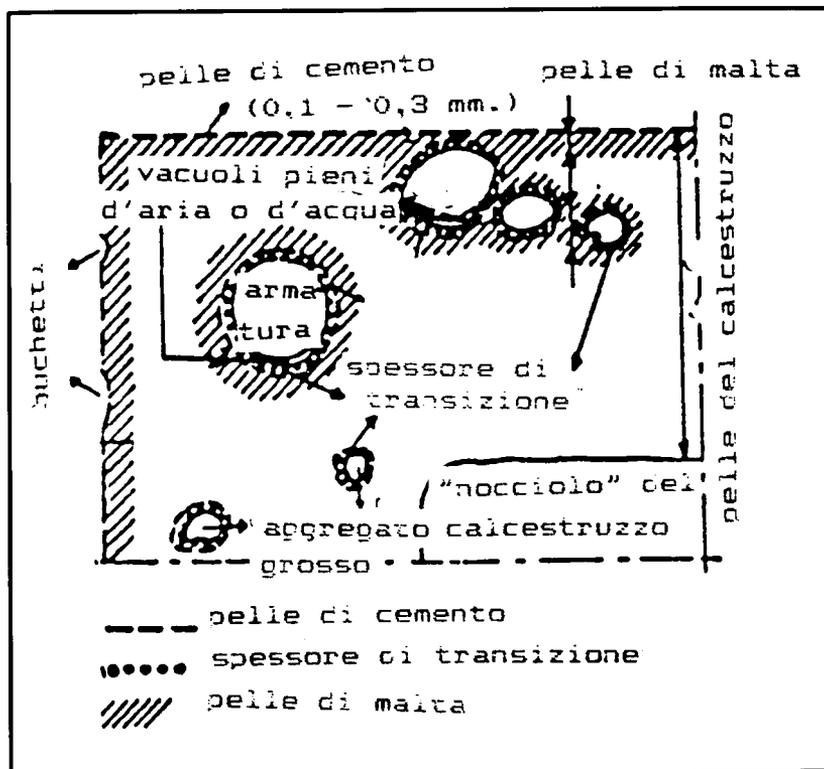


Fig. 1 - «Le pelli del calcestruzzo».

### LE "PELLI", DEL CALCESTRUZZO

Le disomogeneità del calcestruzzo sono importanti per la durabilità perchè possono avviare ed accelerare dei processi di degrado meccanico, fisico e chimico. Le disomogeneità possono essere sia macro che micro.

Le macro disomogeneità risul-

mm. disposti sull'esterno dei getti di calcestruzzo differiscono da quelli del nocciolo interno. Lo strato esterno è convenzionalmente chiamato la «pelle» del calcestruzzo. Lo strato più esterno del calcestruzzo e lo strato a contatto con le armature o con l'aggregato grosso è spesso 0,1 - 0,3 mm. ed è molto ricco di cemento (è detto «pelle

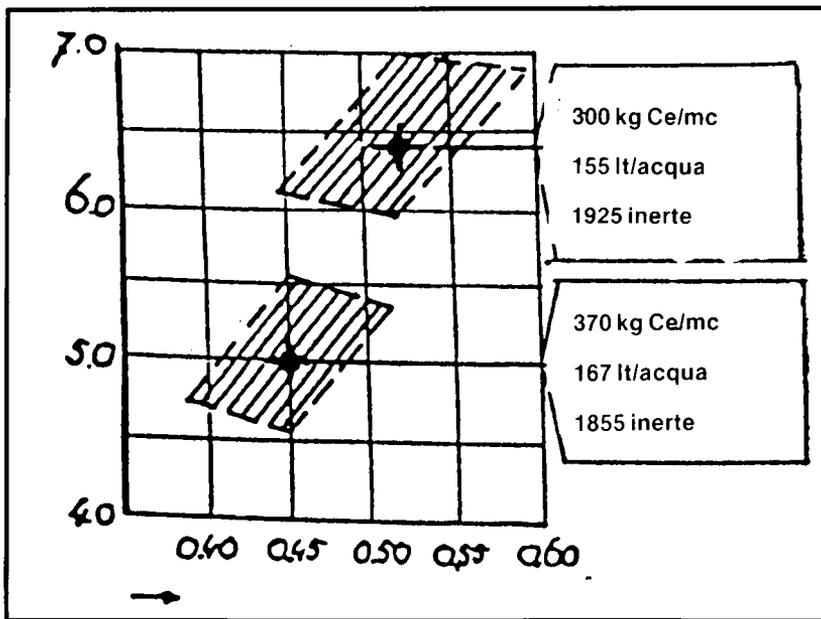


Fig. 2 - Variazioni del rapporto acqua/cemento ed inerte/cemento per due miscele.

cestruzzo e nelle pelli di cemento vicine ad armature ed aggregato grosso.

In quest'ultimo caso si sviluppano i cosiddetti spessori di transizione o doppi strati dello spessore di alcuni micron con rapporti acqua/cemento più alti all'interfaccia. Questo permette agli ioni di diffondersi più facilmente generando grandi cristalli ed una porosità finale più alta negli strati di interfaccia. La presenza sia di microfessure che di strati doppi aumenta la permeabilità

all'acqua ed alle soluzioni (vale a dire piogge acide, cloruri, ecc.) e permette anche ai gas come il  $CO_2$  e  $SO_2$  di diffondere più prontamente nella massa del calcestruzzo.

## DISOMOGENEITA' POSSIBILI

### 1) Variazioni nelle composizioni del calcestruzzo fresco nel nucleo.

Con un coefficiente di variabilità del 3,5% nel contenuto di ce-

mento ed acqua la figura 2 mostra le variazioni del rapporto acqua/cemento ed inerte/cemento che si possono produrre per due miscele. Appare evidente che anche se i coefficienti di variazione siano del tutto ragionevoli, la variazione risultante reale risulta assai rilevante.

### 2) Sedimentazione, microfessure ed aderenza alle armature.

Il processo di sedimentazione ha le caratteristiche sistematiche mostrate nella figura 3.

Per un calcestruzzo con 300 Kg di  $Ce/m^3$  e rapporto  $A/Ce = 0,47$  il tempo di sedimentazione in minuti è  $0,265 H$  ove  $H$  è l'altezza in millimetri del calcestruzzo. Ne segue che la sedimentazione del calcestruzzo sopra le armature ed aggregato grosso cesserà prima che ai lati sotto.

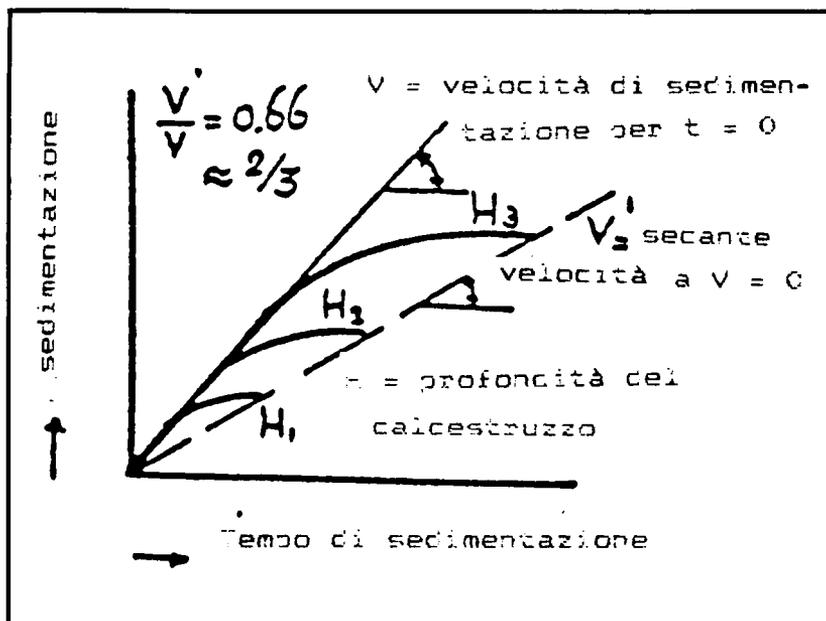
Questa sedimentazione differenziata porta a fessure visibili nel lato superiore del calcestruzzo (sopra le armature) ed a vuoti sotto le armature e le particelle di aggregato grosso. Ne segue che maggiore è la profondità del calcestruzzo sotto tali ostacoli tanto più grande è la serietà del problema.

Dal momento che tali vuoti ridurranno l'efficacia dell'aderenza calcestruzzo-armatura sembra saggio aumentare l'ancoraggio delle armature che sono disposte a più di 100 mm. sopra lo strato inferiore del calcestruzzo (la più parte delle norme lo richiede per armature a 200 mm. sopra il fondo).

### 3) Microfessure nel calcestruzzo

La deformabilità del calcestruzzo a velocità paragonabili con quelle di sedimentazione e di asciugatura (ritiro plastico) (fino a 5 mm./ora) varia con l'età e lo stadio critico si ha tra 3 e

Fig. 3 - Caratteristiche sistematiche del processo di sedimentazione.



24 ore dal getto. In questo periodo le deformazioni termiche ed il ritiro plastico sono critiche; (vedi figura 4 che mostra anche le cause probabili per le macrofessure) cioè se il rapporto copriferro/calcestruzzo è  $\leq 0,2$  e le fessure compaiono entro tre ore dal getto allora ne è causa la sedimentazione. Se le fessure compaiono dopo tre ore ne è causa il ritiro plastico e termico. Microfessure si formano anche sui confini tra calcestruzzo e barra di armatura ed aggregati (fessure di adesione). Circa il 10% della circonferenza di una particella di aggregato di dimensione  $\geq 1$  mm. è fessurata dopo 24 ore. Durante i cicli di carico si formano fessure nella malta che connettono le fessure di adesione.

Tali microfessure sono la causa delle forme della curva sforzi-spazi-deformazioni. (Vedi fig. 5)

#### 4) Porosità del calcestruzzo

A parte i micropori (1-3% dopo la miscela) la porosità è determinata dalla porosità della pasta di cemento e di quella degli aggregati. La porosità della pasta di cemento dipende dal rapporto acqua/cemento (figura 6) ed è correlata alla permeabilità (per pori  $\geq 750 \text{ \AA}$ ).

Maggiore è il rapporto A/Ce maggiore è la dimensione dei pori e maggiore è il numero totale dei pori.

Per  $A/Ce \geq 0,5$  c'è un forte incremento nella permeabilità. D'altra parte la porosità dell'aggregato è minore di quella della pasta di cemento. In figura 6 si riporta un assieme della distribuzione del diametro dei pori della pasta di cemento aggregato e di (micro) calcestruzzo.

#### 5) La pelle del calcestruzzo

Da prismi di calcestruzzo (=325 kg di Ce/mc; A/Ce 0,54 inerte/Ce=6,11,7 giorni in acqua e 21

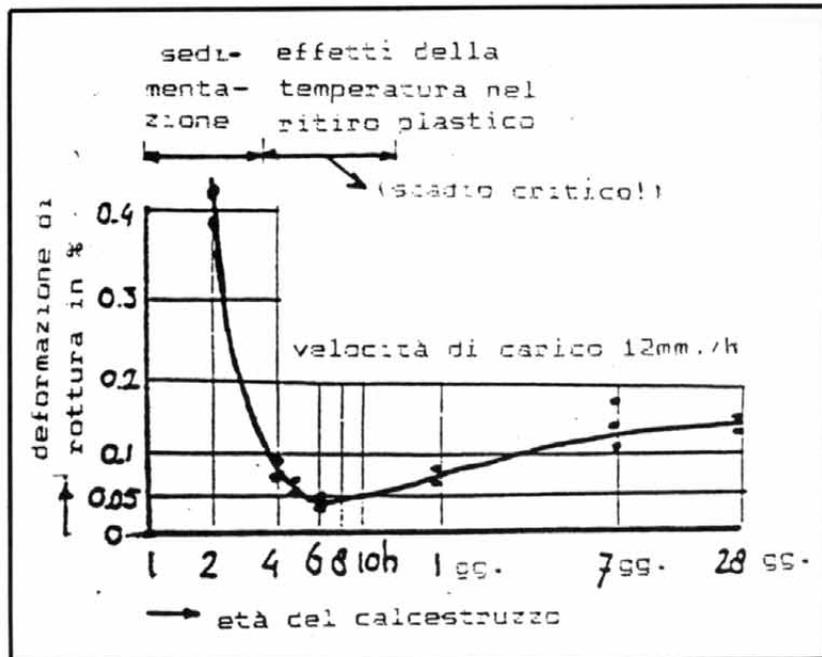


Fig. 4 - Deformabilità del calcestruzzo in funzione dell'età.

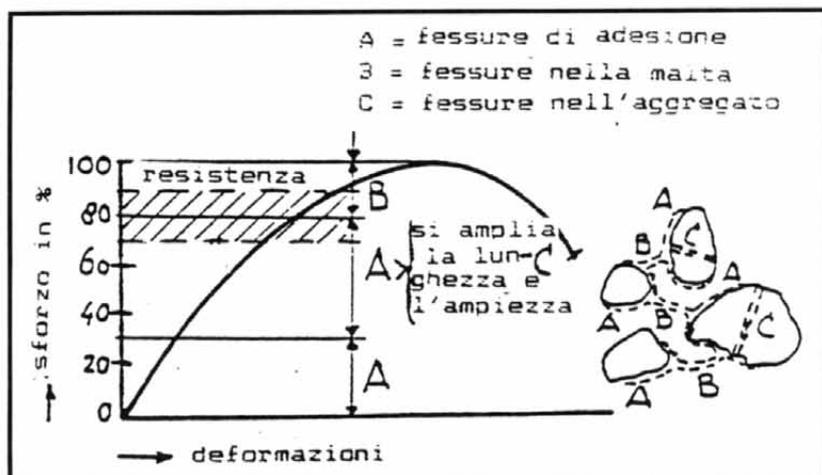


Fig. 5 - Diagramma sforzo-deformazioni del calcestruzzo.

in aria a  $20^\circ \text{C}$  e 65% UR) erano state tagliate fette da 2 mm. Prove d'assorbimento d'acqua furono condotte sulle fette da 2 mm. (figura 7). Si può notare che il coefficiente di assorbimento d'acqua aumenta fortemente con la porosità superando il 20%, un valore che può essere raggiunto negli strati esterni del calcestruzzo. Da misure stereologiche su microfotografie di sezioni sottili (30-50 micron) a varie profondità nel calcestruzzo ci si poté formare una migliore idea sul rapporto dei diametri degli aggregati presenti alle varie profondità (vedi figura 9). A profondità di 0,5

mm. sono presenti tre volte tante particelle di dimensione 0,033-0,070 (media 0,048 mm.) di quante siano presenti a 50 mm. di profondità. A 0,5 e 2,5 mm. sono presenti circa metà di particelle di dimensione 2-4 mm. (media 2-è8 mm.) di quante siano nel nocciolo del calcestruzzo.

Tramite misure di microrugosità è possibile avere informazioni sulle quantità di aria, pasta di cemento ed aggregati nel piano perchè sulla sezione lucidata la superficie della pasta di cemento è posta sotto la superficie delle particelle di aggregato mentre le bolle d'aria sprofondano

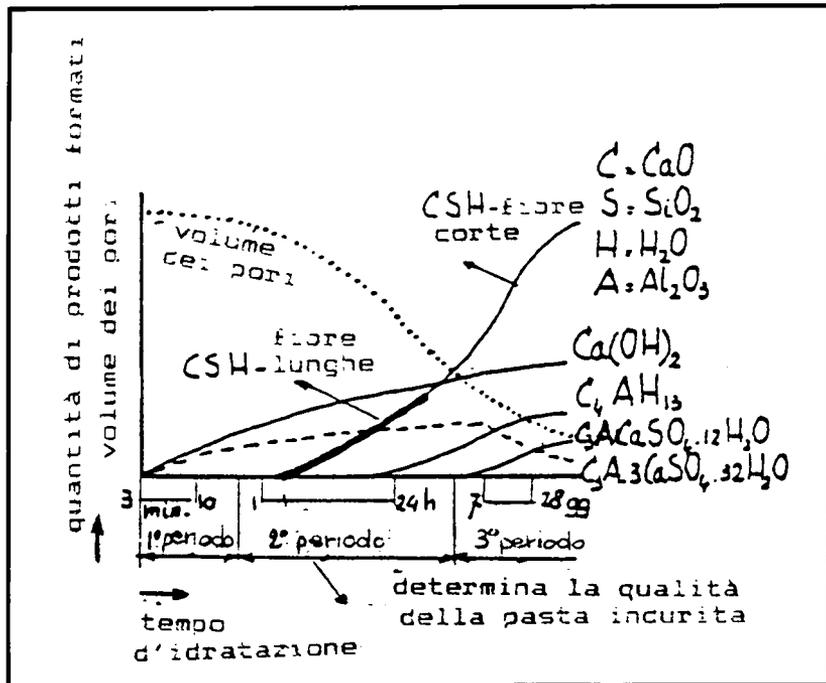


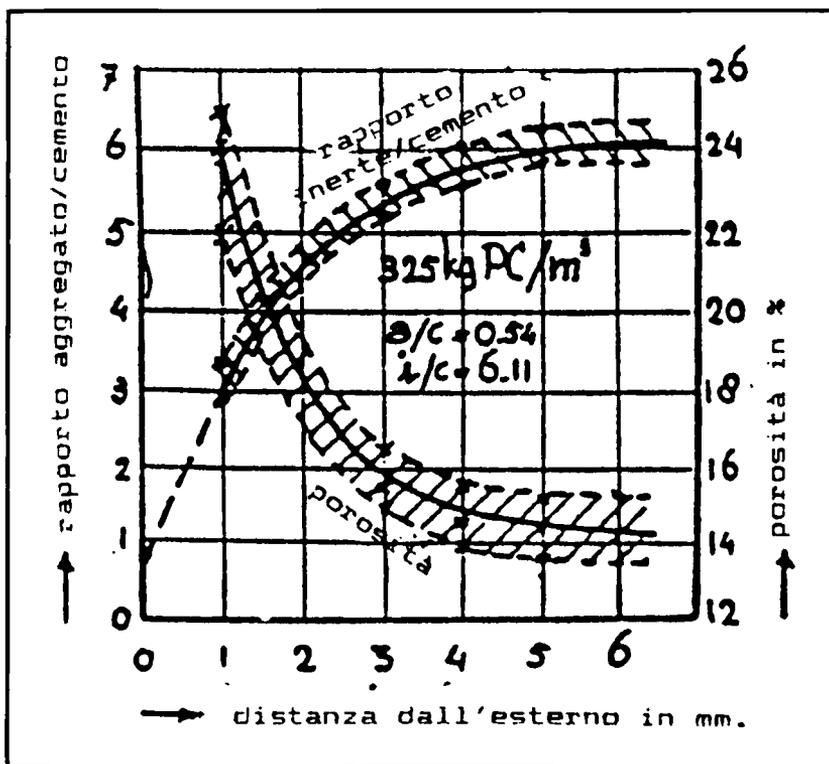
Fig. 6 - Distribuzione della dimensione dei pori di cemento, calcestruzzo, aggregati.

rapidamente (diverse durezza). Con questo metodo è possibile avere informazioni sugli strati esterni del calcestruzzo. In figura 10 si hanno i risultati su 3 calcestruzzi di composizione media.

Si può quindi assumere per un calcestruzzo con A/Ce 0,4-0,5

e inerti/Ce 4,5-5 la superficie è composta da 72+10% pasta di cemento, 23+10% aggregato, 6+5% aria. Cosicché sul confine il rapporto inerte/cemento sarà 0,6. Dal momento che molte proprietà del calcestruzzo sono riferibili ai rapporti di volume le sopraddette relazioni pos-

Fig. 7 - Porosità e rapporto aggregato/cemento delle pelli di malta.



sono essere usate per calcolare le proprietà in funzione della distanza dalla superficie al nocciolo. In figura 11 sono riportati i risultati. Si ricordi però che questi dati sono validi solo per pelli di malta e cemento *molto ben maturate*.

Per la formazione della pelle del calcestruzzo sono importanti la velocità di essiccazione e il ritiro termico come anche la profondità a cui questi fenomeni arrivano nel calcestruzzo.

Joisel ha calcolato la profondità di penetrazione (figura 12); come risulta dalla figura 12 le profondità a cui il calcestruzzo ha 1/2 del max ritiro è a circa  $X_s=0,16$  ( $X_s$  in cm.  $t$  in giorni). Quindi per lo stesso tempo di esposizione la profondità raggiunta dal ritiro termico è 125 volte più grande di quella del ritiro d'asciugatura.

Ancora: per una data profondità nel calcestruzzo il tempo perchè si manifesti il ritiro d'asciugatura è circa 1600 volte più grande che quello del ritiro termico.

I cambiamenti giornalieri nel nostro clima possono influenzare profondità di circa 30 cm. per ritiro termico e di circa 2 mm. per asciugatura? I cambiamenti stagionali possono arrivare a 6 mt. per ritiro termico e circa 40-60 mm. per ritiro d'asciugatura.

Quest'ultimo fatto è la base dell'affermazione che definisce lo spessore della pelle del calcestruzzo in/circa 50 mm. Durante i primi giorni dopo la messa in opera comunque il pericolo di fessurazione è maggiore a causa del raffreddamento del calcestruzzo e della bassa deformazione o rottura (0,05-0,10%).

### 6) Stati di transizione attorno agli inerti ed alle barre di armatura

Siccome la resistenza del vincolo cemento-aggregato è minore delle resistenze sia della pasta

Tabella I

A/Ce	0,30	0,40	0,50	0,60
Ce non idratato	10,3	0	0	0
Ce idratato	61,5	71,9	64,6	58,7
Aggregato fine	16,7	14,6	13,2	11,9
Carbonato di calcio	11,5	13,5	12,1	11,0
Aperture capillari	0	0	10,1	18,4
	100,0	100,0	100,0	100,0

che dell'aggregato questo è l'anello più debole nelle strutture del calcestruzzo. Pertanto non è sorprendente che la letteratura su questo punto si sia concentrata inizialmente sulle forme di legame tra pasta di cemento ed aggregato.

Successivamente ci si concentrò sulla struttura degli strati di transizione che si riassume nel seguito.

Lo strato di transizione è caratterizzato da un sottile film di  $Ca(OH)_2$  da cui sembrano crescere particelle di CSH. Oltre alle particelle di CSH grandi cristalli di  $Ca(OH)_2$  collegano la regione di interfaccia alla massa della pasta di cemento.

Come il grado d'idratazione aumenta più la massa della pasta diventa vincolata alle regioni d'interfaccia rendendo più difficile la caratterizzazione del film di contatto che appare ancora però come un doppio strato (zone duplex) come in figura 13.

Una bella illustrazione dell'influenza della natura dell'aggregato, data da misure di micro durezza, è riportata in figura 14 (da Lyubimov 1967). In conseguenza a quanto detto la resistenza del legame aggregato-pasta varia di un fattore 2 a seconda del tipo di aggregato. Per rocce estrusive la resistenza di legame è direttamente proporzionale al contenuto di silice degli aggregati.

L'effetto «strato-debole» e le fessure d'adesione sono le cause dell'incremento del rapporto resistenza a compressione/tra-

zione con l'incremento del rapporto aggregati/cemento.

Le armature sono normalmente arrugginite e nel calcestruzzo la ruggine reagisce con il  $Ca$

$(OH)_2$  prodotto dal cemento che idrata producendo ferrite di calcio che forma lo strato protettivo o passivo delle barre contro la corrosione.

Nella pasta di cemento c'è di nuovo una interconnessione tra il  $Ca(OH)_2$  e le strutture CSH del cemento che indurisce e che dà luogo ad uno strato di transizione.

V'è poca letteratura su questo strato dal momento che la più parte delle ricerche sono condotte per verificare la corrosione delle barre d'armatura o l'ef-

Fig. 8

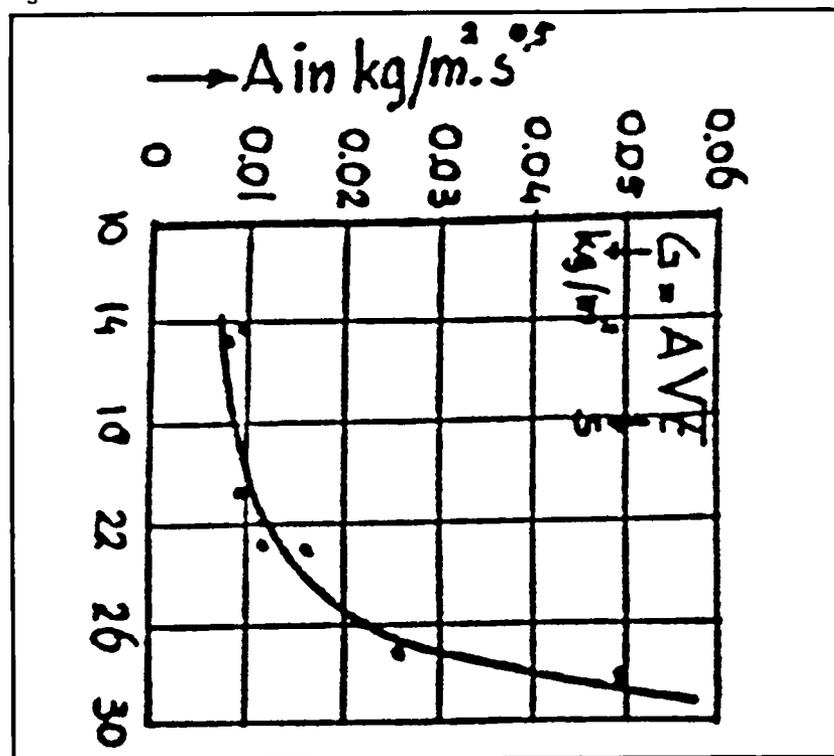
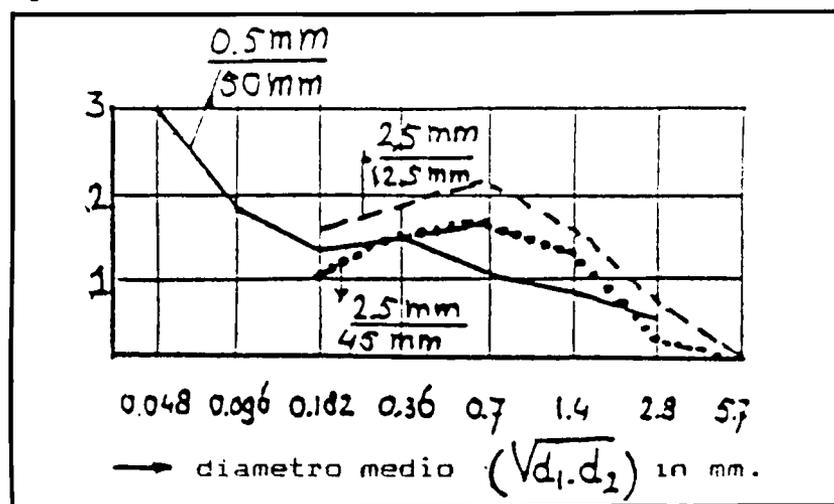
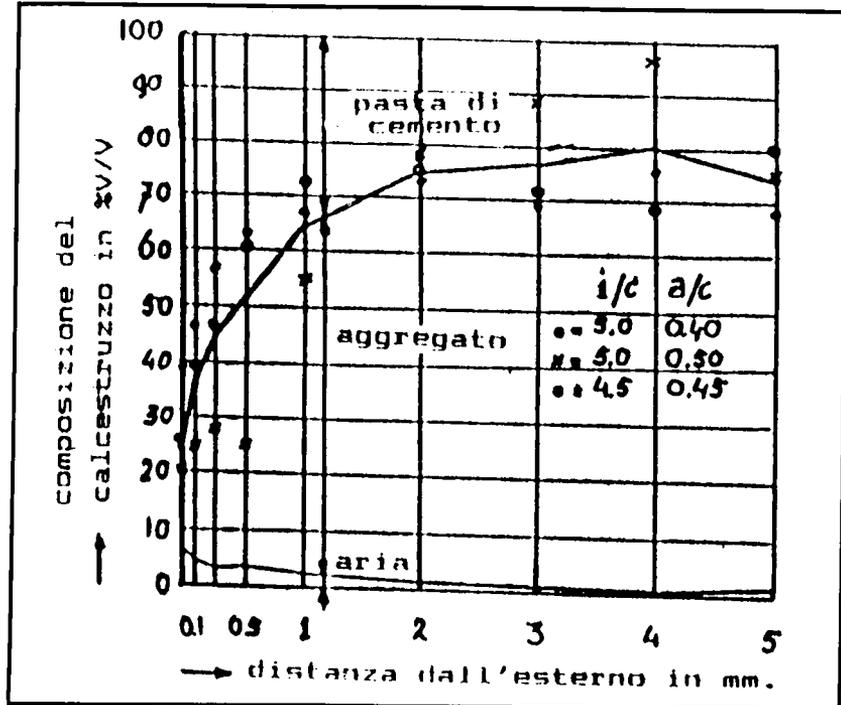


Fig. 9





Composizione della pelle di malta.

fetto di cloruri che su questo processo e sui composti che si formano, anche se anche qui sono rilevati un incremento della dimensione dei pori ed una struttura più aperta. La forza d'adesione è determinata da questo strato ed il cedimento è confinato ad una profondità massima di parecchi micron dall'acciaio. Il cedimento appare fondamentalmente una rottura di adesione.

La forza di legame aumenta con l'età della pasta di cemento e del calcestruzzo.

È anche importante capire che il trasporto degli ioni  $ClO_2$  e  $H_2O$  è più rapido attraverso gli strati di transizione che attraverso le più dense paste di cemento.

La conclusione principale può essere che i legami di adesione di malta e calcestruzzo sono dati da  $Ca(OH)_2$  e CSH e probabilmente «l'anello debole» è il cristallo di  $Ca(OH)_2$ .

### 7) Aspetto del calcestruzzo

L'aspetto del calcestruzzo è dato unicamente dallo strato esterno spesso  $20\mu$  (20 micron).

È la composizione di questo strato che determinerà il colore del calcestruzzo.

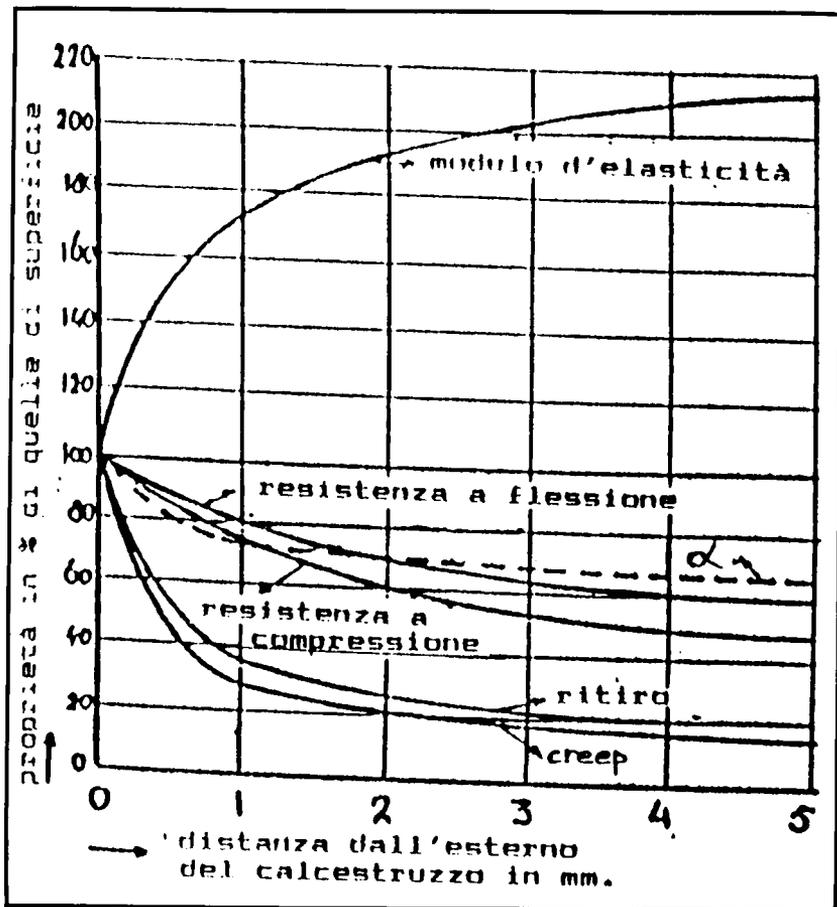
Dalla figura 10 si può vedere

che la composizione dipende dal rapporto A/Ce e per un calcestruzzo ben maturato con 300 Kg/mc di cemento questo è dato dalla tabella I.

Dal momento che il colore del calcestruzzo è attribuibile al colore delle particelle di cemento non idratate segue dalla tabella I che aumentando il rapporto acqua/cemento il colore diviene più chiaro. Così pure un incremento del contenuto in cemento porterà ad un colore più scuro a causa dell'aumento della quantità di cemento non idratato. E perciò è il cemento il fattore più importante per determinare il colore finale del calcestruzzo.

Segue per importanza il  $Ca(OH)_2$  che è formato durante l'idratazione, che cambierà, reagendo con il  $CO_2$  in aria (i primi 20 micron non reagiscono subito se non trattati) in  $CaCO_3$  (con un po' di bicarbonato) e gel di silice.

Fig. 11 - Stime delle proprietà delle pelli di malta.



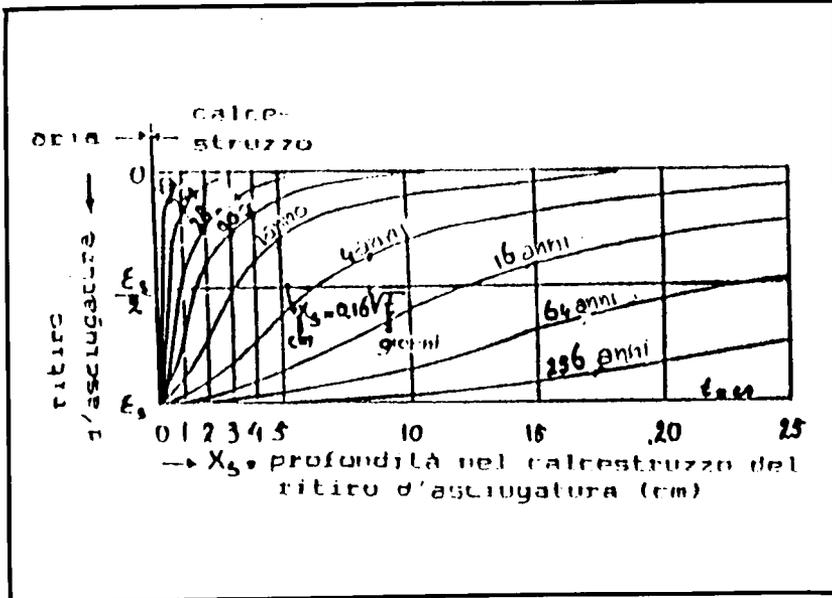


Fig. 12a - Velocità di penetrazione del ritiro d'asciugatura nel calcestruzzo.

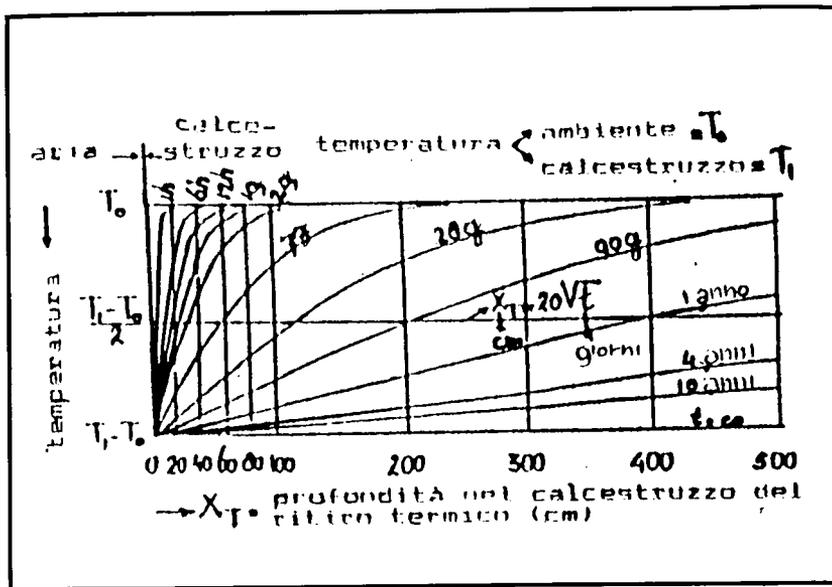


Fig. 12b - Velocità di penetrazione del ritiro termico nel calcestruzzo.

## 8) Spessore del copriferro

Come già detto l'armatura è una disomogeneità nel calcestruzzo ed è situata nella pelle del calcestruzzo.

Il coefficiente di *espansione lineare* nella pelle del calcestruzzo varia tra  $15 - 20 \times 10^{-6}$  e scende verso l'interno secondo la figura 14. Il coefficiente per l'acciaio è minore ( $10 - 12 \times 10^{-6}$ ). Una differenza ancor maggiore esiste tra la *conduttività* di calcestruzzo e acciaio (calcestruzzo  $1,5 - 3 \text{ w/m}^\circ\text{C}$ , acciaio  $50 \text{ w/m}^\circ\text{C}$ ).

Lo spessore del copriferro è anche importante per la diffusione

dei gas e la permeazione dell'acqua (soluzioni). Per quantificare la variabilità dei copriferri reali furono condotte 13.000 misure su 13 tipi di elementi

strutturali in 25 progetti costruiti in Olanda. In sintesi, sebbene i valori misurati erano *in media* maggiori del copriferro minimo imposto, a causa della variabilità dello stesso il 10-40% rimaneva sotto i valori di copriferro minimo. Non c'era apprezzabile differenza tra elementi prefabbricati ed elementi gettati in opere. Il risultato di questa ricerca ha condotto ad aumentare il copriferro negli standard olandesi per il calcestruzzo (vd. N.EM 3880).

## EFFETTO DELLE DISOMOGENEITÀ NEI PROCESSI DI DEGRADO

I processi di degrado possono essere meccanici, chimici, fisici e coinvolgere fattori ambientali come l'atmosfera, il terreno, le acque naturali, agenti biologici, sollecitazioni dovute alle incompatibilità dei materiali ed altri effetti conseguenti all'uso di materiali speciali (vedi tabella II).

Dal momento che gli effetti di tutti questi processi si sentono prima sulla pelle di cemento con tutte le sue disomogeneità e conseguenze sull'aspetto è importante discutere i processi di degrado dovuti principalmente all'atmosfera.

### 1) Cambio dell'aspetto del calcestruzzo

Ci sono molte cause che posso-

Tabella II - Processi di degrado fisico e chimico del cemento armato		
Materiale	Processo fisico	Processo chimico
Armature		-carbonatazione generante inizio corrosione -cloruri generanti inizio corrosione
Calcestruzzo	Diffusione di gas, adesione di particelle permeabilità all'acqua e soluzioni, evaporazione di umidità, gradienti termici, azione del gelo	Carbonatazione, effetto di depositi secchi, reazione con $\text{Cl}$ , $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_2$ , $\text{FeS}_2$ , acidi umici, reazione alcali/aggregati

regione di interfaccia

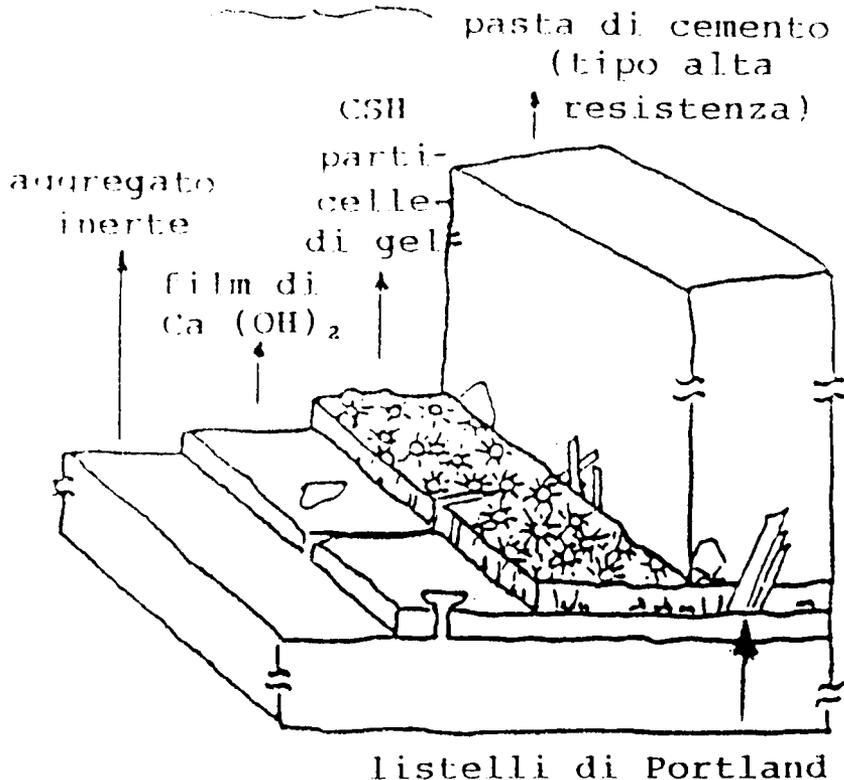


Fig. 13 - Composizione dello strato di transizione attorno agli aggregati.

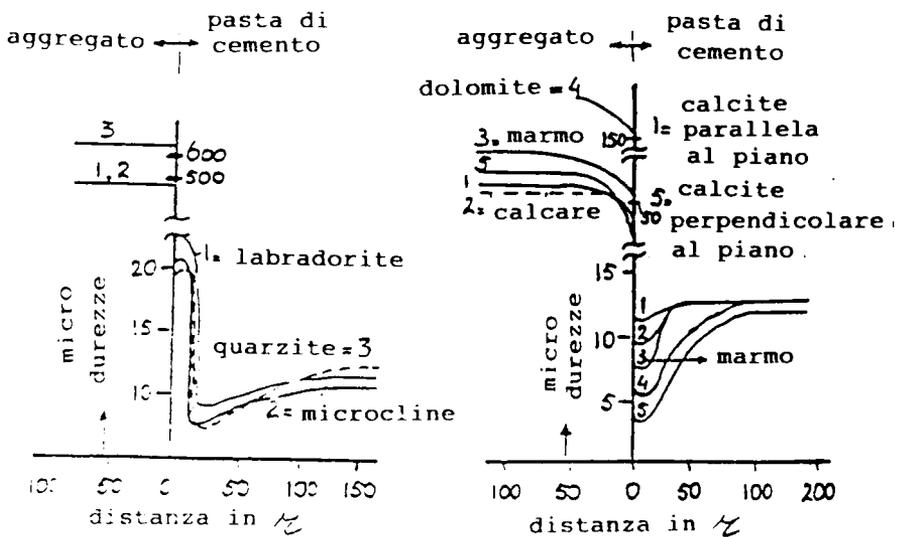
no portare a differenze di aspetto delle superfici in calcestruzzo, come differenze di colore, irregolarità (come strisciate di sabbia, piccole fessure, nidi di ghiaia, ecc.) ed irregolare distribuzione di bolle. Molti di questi difetti minori possono essere evitati nel calcestruzzo ad uso architettonico. Come specifiche per l'aspetto delle superfici

in calcestruzzo si possono assumere le RILEM Tentative Recommendations 1982.

Da quanto prima detto segue che il  $Ca(OH)_2$  prodotto durante l'idratazione è un fattore importante per il colore del calcestruzzo. Questo composto, reagendo con il  $CO_2$  dell'aria, si trasforma in  $CaCO_3$ ; ambedue i prodotti sono bianchi. Duran-

te l'idratazione di 100 g. di cemento Portland si generano 25 g. di  $Ca(OH)_2$ , e questo può essere trasportato per capillarità all'esterno del calcestruzzo. Questo significa che se il  $Ca(OH)_2$  viene in superficie il contenuto di  $CaCO_3$  dello spessore di 20 micron aumenta dal 12 al 60% (vedi tabella I con A/Ce = 0,50) e si manifesta così un co-

Fig. 14 - Micro durezza al confine cemento-aggregati



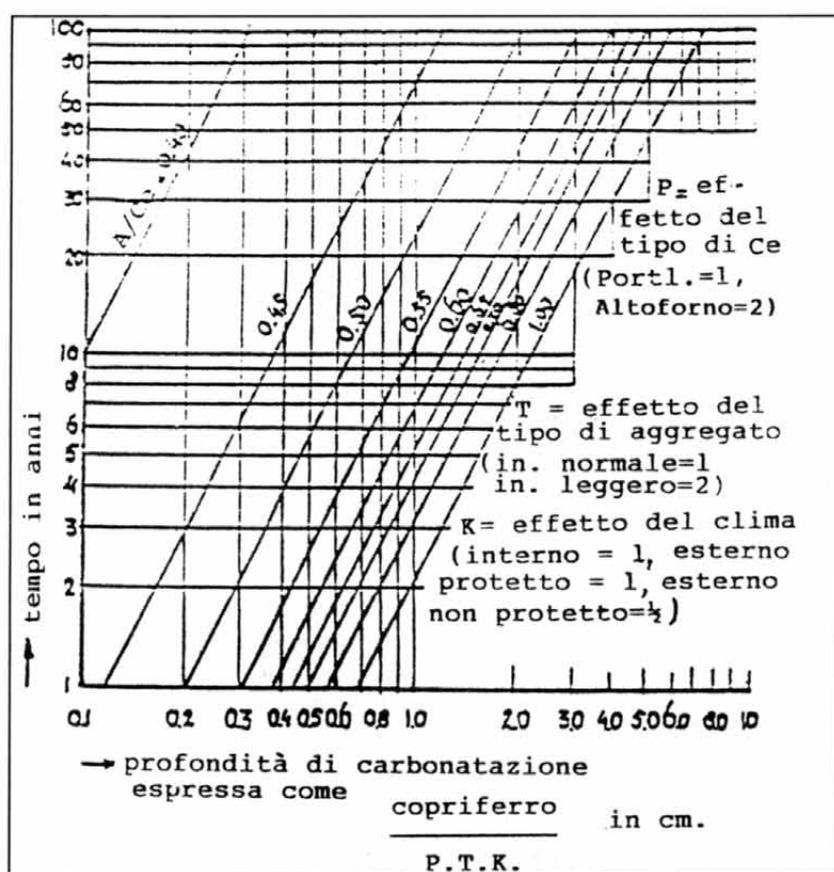


Fig. 15 - Valutazione del tempo di carbonatazione de copriferro.

lore molto più chiaro.

Le condizioni per il trasporto di  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sono varie e mal definite e sono probabilmente la causa delle differenze di colore di una superficie di calcestruzzo e del fatto che è difficile riprodurre (duplicare) una superficie di tal fattura.

La tabella III dà una sintesi delle influenze sul colore del calcestruzzo prima descritto. Per gli effetti su numerosi altri casi di differenze di colore ed imperfezioni della pelle di cemento si può far riferimento alla letteratura.

## 2) Carbonatazione

Il processo di carbonatazione ha quattro stadi:

- formazione di gel di silice CSH e Ca modificati;
- formazione di  $\text{CaCO}_3$  degli ioni residui  $\text{Ca}^+$ ;
- decomposizione del CSH e rilascio di ioni silicati;
- cambio del gel di silice modificato a gel di silice puro.

Una successiva azione del  $\text{CO}_2$

può formare bicarbonati che possono essere asportati dalle piogge assieme al gel di silice.

Dalla figura 15 si ricava la variazione dei tempi di carbonatazione in funzione del rapporto A/Ce.

I tempi risultanti possono essere assunti come indicativi per programmi di verifica di manutenzione: se non viene fatta alcuna riparazione la rottura o il distacco del copriferro sarà raggiunto tre anni dopo ed il collasso dell'armatura per la corrosione circa 12 anni dopo ancora.

La carbonatazione della pelle comunque porta ad una maggiore densità e costituisce una discreta barriera contro il dilavamento.

## 3) Influenza del vapore d'acqua

A causa della condensazione nei capillari il contenuto di umidità della pelle è fortemente influenzato dalle umidità relative e dalla temperatura dell'aria.

Siccome la pelle di cemento contiene il 70-80% di pasta di cemento, la porosità ed il contenuto di umidità è più alta di quella del calcestruzzo più interno. Per esempio ad U.R. 90% la pelle può contenere il 13% di umidità e con 75% di U.R. circa l'11% molto più alta di quella conseguente al contenuto di umidità in funzione delle U.R. dell'aria.

Dal momento che si ha condensazione quasi ogni notte c'è un ricambio del contenuto di umidità igroscopica.

Questo aumentato contenuto di umidità promuove e facilita il danno per gelo.

Il contenuto di umidità della pelle di cemento determina anche la velocità della reazione con gas come  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  e Cl ed anche la loro diffusione.

La velocità di carbonatazione diminuisce fortemente ad alti e bassi valori di U.R. con una velocità massima a 40-75% di U.R. Questo indica anche che la carbonatazione avviene in fase secca.

L'asciugatura del calcestruzzo o la diminuzione del suo contenuto d'umidità è uno dei fattori di base nei fenomeni di ritiro, formazione di fessure e crepe. Durante le condizioni di tempo umido può esistere un sottile e debole strato di gel di silice e di bicarbonato di calcio che può essere dilavato dalle piogge (*strato viscido!*).

## 4) Effetto dei gas e delle piogge acide

Il soiling è il risultato di quattro sorgenti di contaminati:

- della parte interna del calcestruzzo (efflorescenza)
- dei materiali di costruzione circostanti
- da inquinanti (gas reattivi)
- da microrganismi (batteri, alghe, funghi).

L'influsso esterno dell'atmosfera e dei depositi può essere diviso in *depositi secchi* (depositi

Tabella III - Influenze sul colore del calcestruzzo

Effetto	Colore	
	chiaro	scuro
rapporto A/Ce	alto	basso
contenuto di particelle fini	alto	basso
contenuto di cemento non idratato	basso	alto
contenuto di cemento idratato	alto	basso
contenuto di Ca(OH) <sub>2</sub> o CaCO <sub>3</sub>	alto	basso
bagnatura superficiale	asciutto	bagnato
rugosità superficiale	liscio	rugoso

senza l'intervento della pioggia) di gas reagenti (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>3</sub>, HCl, HNO<sub>3</sub>) e di sali e *deposito bagnato* di pioggia che può portare in soluzione il deposito secco.

Questo può attaccare la pelle e dare le condizioni d'umidità necessarie per la corrosione. Il rapporto tra l'effetto acidificante di deposito secco ed umido può essere stimato *in 1 a 2*. L'SO<sub>2</sub> può reagire con il Ca(OH)<sub>2</sub> e l'O<sub>2</sub> dell'aria per formare il CaSO<sub>4</sub> che può aderire al soot ed alle particelle di polvere.

Siccome H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> è un acido più forte di H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, l'SO<sub>2</sub> sposterà il CO<sub>2</sub> dalla pelle di cemento, così lo strato più esterno contiene gesso, bicarbonato e gel di silice. Il flusso di SO<sub>2</sub> è piccolo (circa 30 g/m<sup>2</sup> per anno) e se tutto il cemento è trasformato si distruggerà *0,1 mm./anno* dello strato superiore.

Dai dati della *pioggia acida* (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) si può calcolare che in un anno circa *0,05 mm.* della pelle di cemento può essere distrutta. Così in totale in un anno circa *metà* della pelle di cemento (0,1 - 0,3 mm.) potrà essere asportata dalle piogge acide e dai depositi secchi.

*Questo processo comunque continua giorno per giorno, anno per anno.*

Pertanto dopo circa 5 anni la più parte dei calcestruzzi risulta come con superfici con *striature di sabbia* ma, anche per azione del gelo, le particelle sono gradualmente liberate dalle reazioni chimiche (se ne vanno anche loro!).

Le imperfezioni della superficie accelerano questi effetti d'invecchiamento.

I cloruri reagiscono con il lime ed i calcio alluminati del cemento, e formano nuovi idrati che portano a *espansione* e *rottura*.

Il flusso di cloruri sulle spiagge è più di *100 volte maggiore che nell'entroterra*.

Il trasporto in direzione dell'armatura è possibile solo per diffusione in acqua.

Il trasporto sarà facilitato dagli strati di transizione. Se i cloruri raggiungono le armature parte un processo di corrosione accelerata; empiricamente si può dire che occorre raggiungere un 0,3 - 0,4% in peso del cemento prima che parta la corrosione. Se il calcestruzzo è carbonatato la diffusione dei cloruri si *incrementa moltissimo*.

Con un calcestruzzo di buona qualità di cemento Portland si sono misurati coefficienti di diffusione di 10 - 8/cm<sup>2</sup>/s. Questo vuol dire che si raggiunge una concentrazione critica di Cl per il calcestruzzo alla profondità di 5 mm. dopo 6 anni. Per qualità di calcestruzzo inferiore la profondità di 10 mm. può essere raggiunta dopo solo 2 anni. Il tipo di cemento è importante dal momento che un cemento AF ha un coefficiente di diffusione circa *10 volte* più basso di un Portland normale.

Se il sistema dei pori è discontinuo (rapporto A/Ce molto basso) il cloro non penetrerà ed i sali resteranno in superficie.

Questo può anche essere raggiunto se lo strato esterno di 3 mm. di calcestruzzo è stato reso idrofugo. Il degrado come sopra descritto è incrementato dai cambiamenti di temperatura, da un lato dai carichi ripetuti, dall'altro dall'azione del gelo. Quest'ultima può anche incrementare le porosità, come indicato da Pigeons, che trovò che specialmente per pasta di cemento PTL, il Ca(OH)<sub>2</sub> può essere spostato gradualmente lasciando vuoti d'aria, producendo un significativo incremento della porosità della pasta.

Dal momento che tutti gli agenti agiscono sulla pelle del calcestruzzo ogni imperfezione lì esistente accelera il degrado. Tali imperfezioni sono la diseguale distribuzione di cemento ed acqua, macro e micro fessure, effetti del bleeding, strati di transizione e vuoti sotto gli aggregati grossi e le barre di armatura.

## CONCLUSIONI

Le disomogeneità nel calcestruzzo possono essere classificate a seconda di dove si verificano; vale a dire nella «pelle di cemento» (0,1 - 0,3 mm. dalla superficie) nella «pelle di malta» (fino ad uno spessore di 5 mm.) e nella «pelle di calcestruzzo» (fino ad una profondità di 50 mm.) ed infine nello strato interno.

Ciascuna di queste ha le sue proprie imperfezioni e tutte hanno una grande influenza sulla durabilità del calcestruzzo. È consigliabile indagare sulla composizione della struttura e sulle proprietà delle suddette «pelli» riguardo alle loro influenze sulla durabilità (ricerca interdisciplinare). Con tale approccio si potrebbe raggiungere anche per il calcestruzzo un livello di conoscenza e comprensione paragonabile a quella raggiunta negli ultimi 5 anni per metalli, cementi, polimeri.