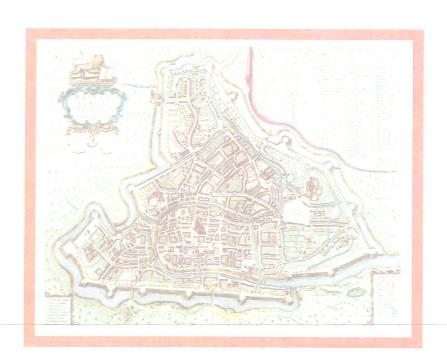
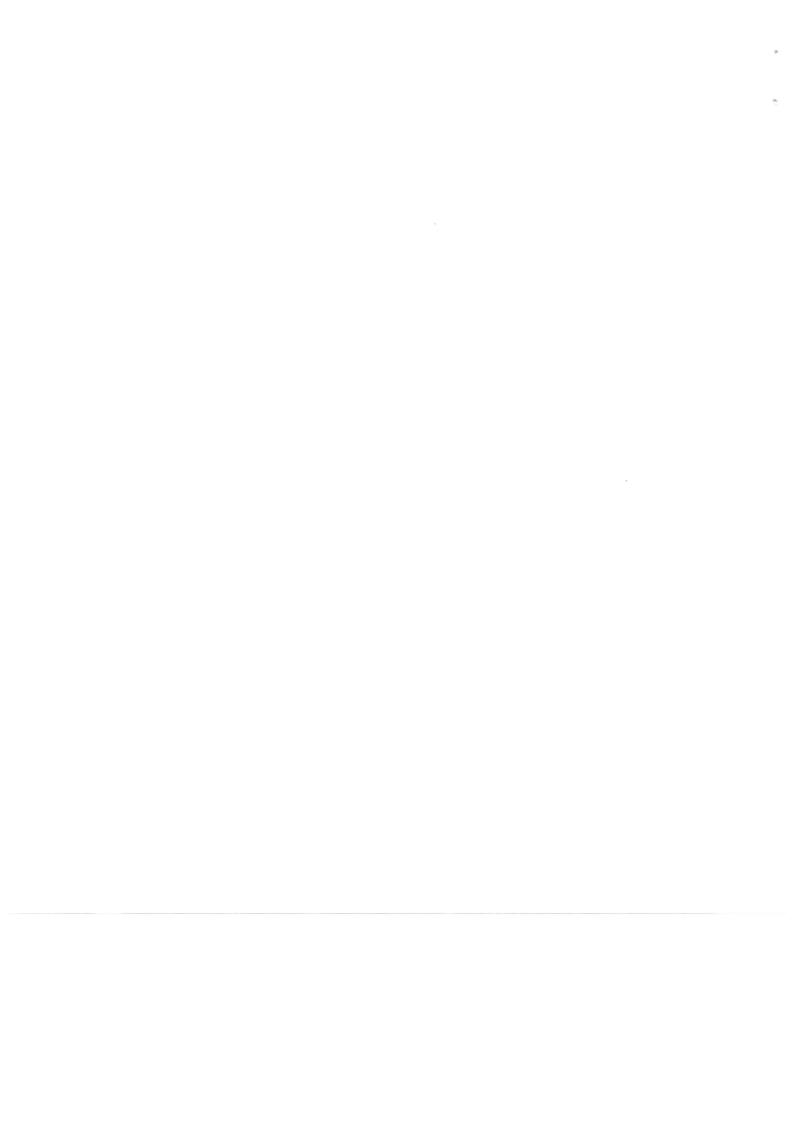


collegio dei tecnici della industrializzazione edilizia

# 12° Congresso C.T.E.

Padova, 5-6-7 novembre 1998





# SUL RIPRISTINO DI ELEMENTI STRUTTURALI CON CALCESTRUZZI AD ALTE ED ALTISSIME RESISTENZE

MAURIZIO ACITO, Diplomato Scuola di Specializzazione in c.a. "F.Ili Pesenti" del Politecnico di Milano

#### SUMMARY

This work, using date concerning HSC plain and fibre reinforced, available in literature, shows better performance in structural elements repair, than NSC in terms of strength, durability and creep.

#### 1. INTRODUZIONE

Nel ripristino di elementi strutturali si impiegano molto spesso malte e calcestruzzi<sup>(\*)</sup> per ricostruire o adeguare le sezioni degli elementi costruttivi ai fini delle nuove esigenze statiche che si possono richiedere.

Ovviamente, tale impiego interessa soprattutto il ripristino di elementi strutturali in cemento armato e in muratura, ma anche per i solai in legno e in acciaio si ha spesso l'impiego di calcestruzzo per formare la nuova sezione dell'elemento strutturale.

Poiché la sicurezza di una struttura va misurata in termini di resistenza e altresì di durata, i nuovi elementi strutturali derivanti dal ripristino devono risultare sufficientemente sicuri, sia nei riguardi degli stati limiti di natura meccanica, ultimi e di servizio, sia nei riguardi dello stato limite di durabilità, per assicurare la durata di servizio richiesta. La garanzia del raggiungimento di tali obiettivi è legata alle caratteristiche delle malte e dei calcestruzzi utilizzati nel ripristino di strutture in cemento amato.

In particolare, per quanto riguarda gli obiettivi di durata è richiesta un'adeguata lavorabilità per poter procedere ad un accurato riempimento dei casseri e un'adeguata impermeabilità agli attacchi di tipo chimico.

Per gli aspetti meccanici, invece, è richiesta un'adeguata aderenza al materiale preesistente da parte del materiale di ripristino nonché un'adeguata resistenza meccanica.

(') L'impiego delle malte e dei calcestruzzi è legato all'entità dello spessore della camicia di ripristino (per spessore 4:5 cm conviene impiegare malte, per spessori maggiori i calcestruzzi).

Pertanto, al fine di assicurare un corretto funzionamento statico e adeguata garanzia di durata, soprattutto nel caso del ripristino di pilastri, risulta indispensabile che l'aderenza fra il materiale di ripristino e quello esistente sia garantita nel tempo e quindi, che il materiale di ripristino sia a stabilità volumetrica.

In proposito, limitandoci ai soli aspetti meccanici, è opportuno richiamare gli aspetti che si devono considerare nella progettazione di un materiale a stabilità volumetrica.

Come è noto, la riduzione di volume dei materiali cementizi è dovuta alla deformazione di ritiro.

Precisamente, nel caso di calcestruzzi ordinari si riconoscono, sostanzialmente, tre componenti di ritiro: ritiro per essudazione, ritiro plastico e ritiro per essiccamento.

Il ritiro per essiccamento costituisce la quota più importante e la sua evoluzione è essenzialmente dovuta al continuo allontanamento dell'acqua non legata, dal materiale indurito verso l'ambiente circostante, in modo tanto più esaltato quanto più l'ambiente circostante e secco (bassa umidità relativa).

La sua evoluzione si valuta in anni e rappresenta, quindi, un'azione geometrica di lunga durata applicata al materiale. Pertanto, qualora sussistano vincoli che in qualche modo contrastano la deformazione di ritiro (ad esempio le barre di armatura inglobate nel calcestruzzo), si genereranno nel calcestruzzo indurito, stati permanenti di trazione con conseguenze che in alcuni casi possono portare alla fessurazione.

Per limitare le tre componenti del fenomeno di ritiro, si opera mediante un opportuno confezionamento dei calcestruzzi e stagionatura iniziale

In particolare, dosando correttamente gli additivi fluidificanti e plastificanti si elimina pressoché totalmente la formazione di acqua di essudazione ed il corrispondente ritiro, mentre, avendo cura di bagnare abbondantemente la superficie del materiale dopo la posa in opera, si limita l'evaporazione superficiale dell'acqua e quindi il ritiro plastico.

Per l'eliminazione del ritiro per essiccamento, dato che la sua evoluzione si manifesta a lungo termine, non è ipotizzabile di sottoporre a cura il calcestruzzo per tutta la sua esistenza, cosicché l'unico modo per prevenirne gli effetti, e quindi ottenere una stabilità volumetrica, è che il materiale presenti una fase espansiva che sia tale da compensare staticamente gli effetti del ritiro per essiccamento in aria.

Peraltro, è evidente che perché l'espansione risulti efficace, occorre che essa avvenga allorché il materiale di ripristino sia indurito ed avvenga in condizione di contrasto in modo da poter indurre nel materiale degli stati di compressione in grado di far fronte a quelli di trazione dovuti al ritiro.

Pertanto, valutato il ritiro per essiccamento, si è in grado di progettare un materiale che presenti una espansione che contrasti gli effetti del ritiro.

Per una corretta progettazione della deformazione di espansione, occorre ricordare ancora, che essendo la deformazioni di espansione e di ritiro di tipo atensionale, lo stato di coazione che esse inducono, quando impediti, sono fortemente influenzati dalla viscosità del materiale cementizio che riduce nel tempo le tensioni di coazione.

In particolare, se la deformazione impressa è più lenta di quella viscosa, le tensioni da essa prodotte si riducono in maniera tanto più piccola, quanto più è lento l'evolversi della deformazione impressa.

Nel caso di calcestruzzi ad alte resistenze, invece, si riconoscono sostanzialmente due componenti di ritiro: ritiro autogeno e ritiro per essiccazione. Il ritiro autogeno si sviluppa durante il processo di idratazione e risulta elevato e con carattere di evoluzione rapida se il calcestruzzo non viene sottoposto ad una stagionatura umida durante tale fase.

Il ritiro per essiccamento, invece, risulta basso e con carattere di evoluzione lento in quanto, a differenza dei calcestruzzi ordinari, i pori capillari sono molto piccoli e non sono interconnessi.

Questa circostanza consente di affermare che nei calcestruzzi ad alte resistenze, qualora si proceda ad una stagionatura umida nella fase di idratazione della pasta, che annulli il ritiro autogeno, possa ritenersi un materiale con spiccato carattere di stabilità volumetrica (01).

In ogni caso, si può affermare che per essi gli effetti del ritiro contrastato, presentano riduzioni tensionali maggiori, rispetto ai calcestruzzi ordinari, in quanto caratterizzati da deformazione da ritiro con evoluzione più rapida nelle fasi iniziali per poi raggiungere valori finali più contenuti.

Chiaramente, le riduzioni tensionali, in un classico problema sezionale, prodotte dal rilassamento del materiale dipendono, inoltre, dalla deformabilità elastica dell'armatura e dal coefficiente finale di viscosità del materiale.

Pertanto, in ogni caso, dopo il ripristino, le nuove sezioni degli elementi strutturali, e più in generale l'intera struttura, risultano formate da materiali aventi caratteristiche meccaniche e fisiche diverse, cosicché si origina il classico problema di "accoppiamento" (02) che può estendersi all'intera vita di servizio della struttura, os-

sia riguardante sia la fase elastica che quella viscosa.

Chiaramente, la sicurezza nei confronti degli stati limiti di natura meccanica è più facilmente assicurata quanto migliori sono le caratteristiche meccaniche del materiale cementizio impiegato (malta o calcestruzzo), caratteristiche che entrano in gioco nel suddetto problema di accoppiamento (quindi, quanto più alti sono i moduli elastici e le resistenze, e quanto più contenute sono le deformazioni di natura reologica per viscosità e ritiro).

Invece, per lo stato limite di durabilità, tolta di mezzo la questione della compatibilità dell'accoppiamento tra i materiali strutturali originari e il materiale cementizio impiegato nel ripristino, il problema si concentra sulle potenzialità di durata nel tempo di questo materiale cementizio, anche nei riguardi della sua resistenza al fuoco.

Presentato il problema in questi termini generali, peraltro ben noti ed intuibili, si capisce che occorre scendere nel dettaglio delle caratteristiche meccaniche dei materiali cementizi impiegati nel ripristino, e in specie del calcestruzzo, mettendo a confronto le caratteristiche dei nuovi calcestruzzi ad alte ed altissime resistenze

(75≤ R<sub>ck</sub><100 MPa, R<sub>ck</sub>>100 MPa) con quelle dei calcestruzzi ordinari

(R<sub>ck</sub>≤55 MPa)

e con quelle dei calcestruzzi speciali (55<R<sub>ck</sub>≤75 MPa),

detti anche ad alte prestazioni in (03). E similmente, per la durabilità, il confronto delle caratteristiche dei calcestruzzi ad elevate prestazioni con quelle dei calcestruzzi ordinari e speciali (caratteristiche riassunte, ad esempio, nel valore della permeabilità) potrà fare capire la loro maggiore efficacia.

Pertanto, nel successivo paragrafo 2 vengono riportati i valori della caratteristiche dei materiali ad elevate prestazioni impiegati nel ripristino, mentre, nel successivo paragrafo 3, vengono mostrati i risultati che si possono ottenere. In particolare, si farà riferimento al caso di sollecitazioni sezionali rette, di tipo assiale, e a situazioni flessionali di travi rinforzate in modo coassiale. Esse corrispondono, ad esempio, al ripristino di pilastri e di travi in cemento armato.

Ovviamente, con i risultati ottenuti non si può pretendere di stabilire regole generali di convenienza, ma comunque essi servono a puntualizzare la superiorità dei calcestruzzi ad elevate prestazioni. Infine, nel paragrafo 4 vengono appunto puntualizzati i termini di superiorità.

# 2. CARATTERISTICHE DEI CALCESTRUZZI

Per la formazione di ragionevoli risultati, che possano essere presi come affidabili indicatori di quanto potrà accadere negli interventi di ripristino, si considerano cinque diversi materiali:

- il materiale calcestruzzo dell'elemento originario (R<sub>ck</sub>≤55 MPa), le cui grandezze e parametri vengono indicati con il pedice c (ad esempio, per il modulo elastico, si ha il simbolo E<sub>c</sub>);
- il materiale impiegato nel ripristino, di tipo ordinario, speciale, ad alte e ad altissime resistenze (R<sub>ck</sub>≤55 MPa, 55 MPa<R<sub>ck</sub>≤75 MPa, 75<R<sub>ck</sub>≤100 MPa, R<sub>ck</sub> >100 MPa), le cui grandezze e parametri vengono indicati con il pedice j (ad es., per il modulo si ha il simbolo E<sub>i</sub>).

Mentre per calcestruzzi ordinari e speciali il mix design prevede i soliti componenti, nei calcestruzzi ad alte ed altissime prestazioni risultano diverse ricette. Ad esempio, materiali ad altissime prestazioni sono quelli del tipo proposto per la prima volta da H. Bache (04), comunemente indicati con la sigla DSP (Densified Systems containing homogeneously arranged ultrafine Particles).

Si tratta, più che di calcestruzzi, di malte speciali ad elevata resistenza contenenti sabbia di quarzo e microsilice con eventuali microfibre di rinforzo in acciaio.

In particolare, una tipica ricetta per la preparazione di tali materiali utilizza:

- cemento CEM I 52.5 R, avente una finezza Blaine di 4590 cm²/g;
- microsilice in polvere non densificata, avente una superficie specifica (B.E.T.) di 20 m²/g;
- aggregato di quarzo di origine alluvionale di elevata purezza (99% SiO<sub>2</sub>), di dimensioni di 0-3.2 mm;
- superfluidificante acrilico, in soluzione acquosa (estratto secco=30% in massa);
- · eventuale presenza di fibre.

Le composizioni che spesso si utilizzano per tali materiali sono riportate nella Tabella 1.

rapp. microsilice/legante	0.20	0.20	0.20
rapporto superfluidifican-	0.02	0.02	0.02
te/legante			
rapp. aggregati/legante	2	2	2
rapp. acqua/legante	0.225	0.225	0.225
fibre (% in volume)	0	2	4
spandimento ASTM, mm	220	205	160

Tabella 1. Mix design

Le dimensioni dei grani della microsilice sono di due ordini di grandezza inferiori a quelli del cemento.

Queste caratteristiche, da un punto di vista meccanico, risultano estremamente importanti, in quanto i grani di microsilice, occupando i vuoti fra le particelle di maggiore dimensione, consentono di ottenere una struttura del materiale molto compatta. Inoltre, la microsilice, durante l'impasto, ha un effetto lubrificante e svolge un'ulteriore attività pozzolanica.

Come è noto, nel caso del calcestruzzo strutturale tutte le norme classificano il materiale attraverso la sua resistenza caratteristica a compressione (ad es. (05), (06), (07), (08), (09), (10) (11)). Questa resistenza a compressione determinata su cilindri ( $f_{ck}$ ), oppure su cubi ( $R_{ck}$ ), misurata convenzionalmente a 28 giorni di stagionatura, assume così il significato di parametro fondamentale per la caratterizzazione dei calcestruzzi

Pertanto, tutte le altre grandezze e parametri che entrano nel "gioco" della sicurezza (sia di resistenza che di durata) vengono correlati a tale caratteristica. In tal modo, risulta assai facile, con la sola determinazione della resistenza  $f_{ck}$  o  $R_{ck}$ , stabilire le proprietà del calcestruzzo con cui si ha a che fare.

Vi è da sottolineare inoltre, data l'importanza che riveste il modulo elastico dei materiali nei problemi di accoppiamento, che i risultati sperimentali reperibili in letteratura e le disposizioni di tutte le normative vigenti, riferiti sia ai calcestruzzi ordinari e speciali che a quelli ad elevate prestazioni, indicano chiaramente che anche il modulo elastico  $E_{\rm c}$  è correlato alla resistenza a compressione del materiale.

In figura 1 vengono riportati i grafici di alcune correlazioni (12) tra resistenza a compressione cilindrica ( $f_{ck}$ ) e modulo elastico  $E_j$  di calcestruzzi ad elevate prestazioni (additivati e non da fibre) proposte in letteratura e da alcune normative nazionali e internazionali. Dal grafico di figura 1 si evince una notevole differenza tra le diverse proposte di correlazione con la resistenza a compressione per il calcolo del modulo elastico.

Ad esempio, quando si considerano resistenze maggiori di 55 MPa, il modello C.E.B. fornisce i valori maggiori, mentre, la normativa norvegese quelli minori. Ma è facile comprendere come l'estensione della correlazione proposta dalla normativa italiana (09) ai calcestruzzi speciali comporti valori ancora superiori. Un ulteriore aspetto delle correlazioni esaminate è che sono espresse talvolta con riferimento alla resistenza cubica, talaltra alla resistenza cilindrica (sia media che caratteristica). Questo diverso riferimento introduce un ulteriore elemento di incertezza data la difficoltà di stimare il valore del rapporto

di correlazione tra la resistenza cilindrica e la resistenza cubica  $(k_{cc})$  (13), (14).

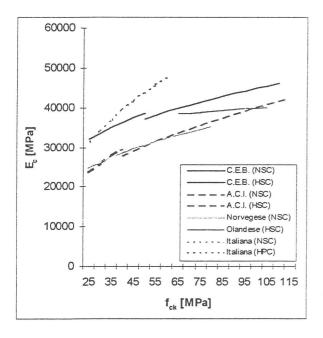


Figura 1. Correlazioni modulo elastico/resistenza

La difficoltà di determinare valide correlazioni è legata alla circostanza che il modulo elastico delle malte e dei calcestruzzi, per una data stagionatura, dipende, sostanzialmente, dal modulo elastico della pasta di cemento e degli aggregati, oltre che dalle proporzioni dei suoi componenti (15).

Ma, mentre il modulo elastico della pasta di cemento, dipende, essenzialmente dalla porosità, e quindi un ruolo fondamentale è giocato dal rapporto a/c (16), nonché dall'aggiunta di additivi di natura fisica (ad es. microsilice) (7) e dall'aggiunta di additivi di natura chimica, i quali conducono ad una riduzione del rapporto a/c e quindi ad un miglioramento contestuale del modulo elastico e della resistenza a compressione, l'influenza del modulo elastico degli aggregati risulta significativa per la determinazione del modulo elastico del calcestruzzo, senza però essere tale nei riguardi della resistenza a compressione. (\*\*) Pertanto, a rigore la correlazione tra il modulo elastico e la resistenza a compressione è puramente convenzionale se riferito a "mix" e a "range" di resistenza diversi. L'importanza degli aggregati è riconosciuta sia a livello di normativa (in A.C.I. 36392R (07) è chiaramente detto che la differenza fra il valore previsto dalla proposta di correlazione e il valore misurato per un dato materiale è fortemente legato alla natura, forma e pezzatura degli aggregati), sia a livello di proposte di letteratura (ad es. (15)).

Per quanto riguarda i materiali compositi i lavori svolti per la valutazione del modulo elastico del composito si fondano principalmente sul modello di Voight. Fissate le idee sul piano generale, in tabella 2 vengono riportati i valori dei parametri meccanici e reologici dei materiali (MAT2, MAT3, MAT4 e MAT5), che si suppone di impiegare per il ripristino di sezioni in c.a. interessate da tensioni normali, il cui nucleo di calcestruzzo, di tipo ordinario (MAT1), si suppone abbia ormai un comportamento puramente elastico. Nel paragrafo successivo si evidenzierà che questa ipotesi ha il duplice effetto di consentire sia l'utilizzo di algoritmi più semplice che di massimizzare le sollecitazioni sul nucleo di calcestruzzo esistente.

	MAT1 (nucleo)	MAT2 (camicia)	MAT3 (camicia)	MAT4 (camicia)	MAT5 (camicia)
R <sub>ck</sub> (MPa)	25	35	75	≅100	≅120
E <sub>c</sub> (MPa)	≅28000	≅30000	≅45000	≅50000	≅55000
so.	0,0	3,0	2,5	2,0	1,5

Tabella 2. Caratteristiche meccaniche

I valori dei moduli elastici relativi ai materiali ordinari e speciali (MAT1, MAT2 e MAT3) sono assunti con riferimento alle correlazioni proposte in (09), mentre, quelli relativi ai materiali ad alte e ad altissime resistenze (MAT4 e MAT5) sono tratti da dati sperimentali proposti in (12) e (17).

In particolare, sono stati considerati i dati relativi a provini di DPS confezionati presso i Laboratori Italcementi di Bergamo, il primo, con mix del tipo riportato in tabella 1, il secondo con un mix modificato nel rapporto microsilice/legante (da 0,20 a 0,10) e dall'essere additivato con microfibre di acciaio (2%). Per quanto riguarda il coefficiente di viscosità, è ben noto (06) che nei materiali ad elevate prestazioni anche il comportamento reologico migliora al punto da presentare effetti viscosi ridotti del 30% e più, rispetto a quelli dei materiali usuali.

<sup>(\*)</sup> In (16), però, viene evidenziato la sostanziale indipendenza dalla patura di questi fini di additivi

dalla natura di questi tipi di additivi.

(\*\*) In (15), ad esempio, si mostra come calcestruzzi con la stessa resistenza a compressione, confezionati con aggregati diversi, presentino moduli elastici notevolmente diversi.

<sup>(\*\*\*)</sup> Molto importanti sono i modelli proposti in letteratura per il modulo elastico dei materiali ad elevate prestazioni, modelli che considerano l'influenza del modulo elastico dell'aggregato e la presenza di fibre. In (15), ad esempio, viene presentato un esteso studio sperimentale che ha consentito agli autori di proporre correlazioni in cui è esplicita l'influenza del contributo che il modulo elastico dell'aggregato.

Il problema della durabilità di interventi di ripristino ottenuti con materiali ad alte ed altissime prestazioni costituisce un tema di precipuo interesse, proprio perché il fine degli interventi è quello di garantire la durata. Tale tema viene rimandato ad un secondo lavoro, tuttavia, già sin d'ora si può segnalare che i dati di sperimentazioni relativi a materiali ad elevate prestazioni disponibili in letteratura (18), indicano valori di permeabilità all'ossigeno e alla anidride carbonica di due ordini di grandezza inferiori a quelli dei calcestruzzi di tipo comune (da 10<sup>-16</sup> a 10<sup>-18</sup>). Inoltre, le sperimentazioni in corso presso i laboratori Italcementi di Bergamo forniscono indicazioni di assenza assoluta del fenomeno di carbonatazione. Se questi aspetti verranno confermati anche in termini quantitativi, si può ritenere che ali interventi di ripristino realizzati con materiali ad elevate prestazioni abbiano carattere definitivo, anche in relazione all'ottimo comportamento che questi materiali mostrano quando interessati da cicli di gelo e disgelo (17).

Vi è bene da sperare per quanto attiene le possibilità di resistenza al fuoco ove si impieghino fibre additivate speciali. Infatti, in letteratura (ad es. (19)), viene evidenziato come la semplice presenza di fibre di polipropilene permetta ai vapori d'acqua di trovare vasi di espansione (volume occupato dalle fibre), senza determinare espulsione di materiale. Quest'ultima circostanza, prefigura la possibilità che interventi di ripristino con questi materiali possano assumere anche un carattere di miglioramento di resistenza al fuoco.

## 3. RISULTATI DI CONFRONTO

Una tecnica di rinforzo molto usata in elementi compressi (pilastri) è l'incamiciamento. In letteratura questa tecnica, è stata affrontata in molti lavori, ad esempio (20), (21), (22). In tutti questi lavori si ritrova che il meccanismo di trasmissione degli sforzi dipende dalle forze di confinamento che sono, quindi, determinanti per il funzionamento del meccanismo di trasmissione degli sforzi: può avvenire così una ripartizione, proporzionale alle rigidezze assiali degli elementi camicia  $(k_i)$  e nucleo  $(k_c)$ .

Similmente, sono sempre più frequenti i casi di utilizzo di tale tecnica d'incamiciamento per gli elementi strutturali inflessi. In questo caso, si è in presenza di un diverso meccanismo di trasmissione degli sforzi tra nucleo e camicia, legato alla condizione di congruenza delle deformate flessionali del nucleo e della camicia. Quando il ripristino avviene con camicia coassiale, anche in questo caso, la ripartizione della sollecitazione

flessionale avviene in modo proporzionale alle rigidezze flessionali di camicia e nucleo (23).

Il problema, considera una sezione di c.a. il cui ripristino prevede la rimozione del ricoprimento delle armature (2,0 cm), una ulteriore scarnitura di circa 1,5 cm, la realizzazione di una camicia che oltre a ricostituire lo spessore demolito prevede l'aggiunta di circa 2,5 cm.

In totale, le sezioni vengono interessate da un incamiciamento che tra la parte demolita e la parte aggiunta determina uno spessore della camicia di circa 6 cm (figura 2). Si ipotizza di considerare due serie di sezioni, la prima avente circa il 2,4% per il rapporto geometrico di armatura (riferito all'area di calcestruzzo originaria), la seconda avente il doppio delle armature.

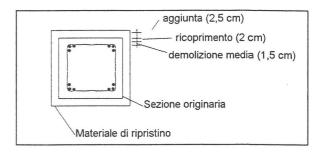


Figura 2 . Intervento di ripristino

In figura 3 sono riportate le caratteristiche geometriche delle sezioni di pilastri e di travi per le quali vengono simulati gli interventi di ripristino.

SEZIONE	
ORIGINARIA	b b
SEZIONE RECUPERATA	b+t

	b (cm)	b+t (cm)	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )
SEZ1A	25,0	30,0	(12\psi12)
SEZ2A	32,5	37,5	(12\psi16)
SEZ3A	40,0	45,0	(12\psi20)
SEZ4A	47,5	52,5	(12\psi24)
SEZ1B	25,0	30,0	2*(12\psi12)
SEZ2B	32,5	37,5	2*(12\psi16)
SEZ3B	40,0	45,0	2*(12\(\phi\)20)
SEZ4B	47,5	52,5	2*(12\(\phi\)24)

Figura 3. Sezioni considerate per la simulazione di ripristino

Per brevità, come si è già indicato, anche per le travi si considera che il ripristino sezionale avvenga in modo coassiale, anche se è pur vero che le esigenze statiche di una sezione inflessa richiederebbero che la camicia avesse il materiale soprattutto posizionato nelle zone superiore e inferiore della sezione originaria<sup>(\*)</sup>.

Pertanto, le sezioni ripristinate risultano quindi formate dal calcestruzzo del nucleo preesistente, dalle armature lente, tutti con comportamento elastico, e dal materiale di ripristino con comportamento elasto-viscoso. L'ipotizzare che le deformazioni viscose del calcestruzzo preesistente siano esaurite, mentre il materiale di ripristino è a comportamento viscoso, significa supporre la massima disomogeneità nel comportamento dei due materiali, col risultato di ottenere valori maggiori della sollecitazione che andranno nel tempo ad interessare il nucleo preesistente.

Infatti, supponendo esaurite le deformazioni viscose del materiale preesistente, si ottiene che per le azioni permanenti applicate prima della ripristino, non si possono aver nel tempo ridistribuzione di sollecitazione fra il materiale preesistente e quello di ripristino, ne consegue un aggravio delle sollecitazioni per il materiale preesistente.

Analogamente, per le azioni permanenti applicate dopo il ripristino, l'assenza di viscosità del materiale preesistente da luogo ad un maggiore riduzione del tempo dello stato di sollecitazione del materiale di ripristino e quindi ad una maggiore sollecitazione nel materiale preesistente.

Pertanto, l'ipotesi di considerare puramente elastico il materiale preesistente permette di individuare le situazioni di massimo impegno per materiale preesistente.

Inoltre, questa ipotesi, oltre ad essere in genere abbastanza vicino alla realtà, perché il nucleo preesistente è un materiale sufficientemente stagionato (e quindi, ormai senza viscosità), può ricondurre il problema visco-elastico alla risoluzione di sistemi di equazioni differenziali a coefficienti costanti di primo ordine, sistemi che grazie all'algoritmo delle funzioni di rilassamento ridotte (24) possono essere risolti in forma chiusa con approccio abbastanza semplice.

Il problema, posto in termini generali, consiste nell'analisi delle sezioni, interessate da un'azione assiale N e un momento flettente M derivanti da carichi permanenti, dagli effetti del ritiro e dagli effetti dell'eventuale espansione. Nel caso specifico, invece, per gli scopi che ci si prefigge, il problema considera l'analisi di sezioni interessate da un'azione assiale  $N_0$  e un mo-

$$\begin{split} \varepsilon(t) &= \underline{\rho}^{T} \underline{\Psi}(t) \\ &\underline{S}_{0} = \int_{A_{i}} \sigma_{i}(t) \underline{\rho} \, dA_{i} + \int_{A_{c}} \sigma_{c}(t) \underline{\rho} \, dA_{c} + \sum_{s} \sigma_{s}(t) \underline{\rho} \, A_{s}, \\ (\text{dove } \rho^{T} = |1 \cdot y|). \end{split}$$

Di tali equazioni, la prima esprime la linearità delle deformazioni longitudinali, la seconda, l'equilibrio della sezione con una sollecitazione espressa generalmente da  $S_0$  ( $N_0$ ,  $M_0$ ).

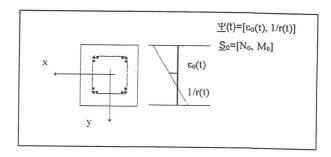


Figura 4 . Convenzioni e simbologia

Pertanto, il problema posto in questi termini costituisce un procedimento abbastanza semplice i cui risultati sono utilizzabili con affidabilità per le pratiche applicazioni in quanto differiscono poco da quelli che si potrebbero ottenere applicando analisi più veritiere ma notevolmente più laboriose e complesse.

Una semplificazione ulteriore si ha nel caso in cui le sezioni si considerino sollecitate in compressione semplice (pilastro) e in flessione semplice (trave).

In tal caso, ad esempio, in presenza di sollecitazione assiale, il metodo suddetto consente una semplice scrittura dell'equazione di congruenza nel generico tempo t, rendendo possibile determinare la ripartizione degli sforzi tra nucleo e camicia. In particolare, ha interesse conoscere la ripartizione degli sforzi al tempo t=t\_0 (soluzione elastica iniziale all'atto dell'applicazione del carico) e al tempo t= $\infty$ , cioè a fenomeno viscoso esaurito. L'equazione di congruenza, scritta al tempo t,  $\varepsilon_c(t)=\varepsilon_j(t)$ , e l'equazione d'equilibrio  $N_c(t)+N_j(t)=N(t)=N_0$  costante, consentono di determinare la ripartizione degli sforzi per ogni t e, quindi, in particolare per t= $\infty$ .

mento flettente  $M_0$  derivanti da carichi permanenti che intervengono successivamente all'intervento di ripristino. In tal caso, le equazioni, scritte con riferimento alla simbologia e alle convenzioni indicate in figura 4, che governano il problema sono le seguenti:

<sup>(\*)</sup> Nel caso delle sezioni tipo B si è supposto che l'armatura nelle zone superiori e inferiori delle travi corrispondesse a circa l'80% dell'area totale.

<sup>&</sup>lt;sup>(\*\*)</sup> La sollecitazione assiale che interessa la camicia, nel caso in cui il materiale preesistente (nucleo) possa ritenersi a comportamento puramente elastico ( $\Phi_c$ =0), assume l'espressione:

In modo equivalente si procede, nelle ipotesi semplificative fatte, per la sollecitazione flessionale, con la sola sostituzione della rigidezza flessionale a quelle assiali. Per le rigidezze flessionali è possibile tenere conto in forma approssimata del regime fessurato del nucleo e eventualmente della camicia ((28), (29)). La congruenza, in questo caso va posta con riferimento alle curvature.

Nel seguito vengono riportati gli andamenti delle sollecitazioni nella camicia in relazione alle diverse caratteristiche geometriche (SEZ1, SEZ2, SEZ3 e SEZ4) e meccaniche dei materiali (MAT2, MAT3, MAT4 e MAT5) impiegati per il ripristino.

Il confronto estende i risultati ottenuti in (30) dove, anziché ricorrere ai metodi di risoluzione del problema in fase elasto-viscosa sopra richiamati, le soluzioni del problema sono state ottenute mediante l'impiego di metodi semplificati come ad esempio il metodo AAEMM (Age-Adjusted Ef fective Modulus Method). (\*)

Prima di esaminare i risultanti relativi ai diversi materiali impiegati per il ripristino, si vuole evidenziare il ruolo predominante esercitato dal modulo elastico nella ripartizione delle sollecitazioni. In figura 5 e 6 sono riportati gli andamenti delle sollecitazioni al variare del modulo elastico del materiale che costituisce la camicia per determinati valori del coefficiente di viscosità. Tali andamenti mostrano, come era intuibile, che l'efficacia della camicia aumenta con l'aumentare del valore del modulo elastico e che la ridistribuzione per effetto viscoso che sovraccarica il nucleo preesistente, è tanto maggiore quanto maggiore è il coefficiente viscoso  $\Phi_i(t=\infty)$ .

Nelle figure 5 e 6, al solito,  $N_j(t_0)/N_0$  e  $N_j(t)/N_0$  sono la sollecitazione assiale che interessa la camicia al tempo  $t_0$  (soluzione elastica) e al tempo  $t=\infty$  (soluzione elasto-viscosa), rapportate alla sollecitazione assiale globale. Mentre,  $(N_j(t_0)-N_i(t))/N_0$  è, invece, la variazione percentuale per

$$S_{j}(t) = S \cdot \frac{k_{j} / k_{C}}{\left[ (1 + \chi_{j} \phi_{j}) + (k_{j} / k_{C}) \right]} \left\{ 1 - \left[ (1 - \chi_{j}) \phi_{j} + \frac{k_{j}}{k_{C}} \right] \right\} \frac{1}{1 + k_{j} / k_{C}}.$$

In essa Sj(t) è la sollecitazione assiale che a tempo infinito interessa la camicia, S è la sollecitazione assiale che interessa nucleo e camicia,  $k_j$  e  $k_c$  sono, rispettivamente la rigidezza assiale di camicia e nucleo.

(\*) Tale metodo risulta di semplice applicazione e i risultati ottenuti sono più che buoni nella gran parte delle applicazioni pratiche

Il metodo (AAEMM), come è noto, sostituisce la legge costitutiva del calcestruzzo di tipo integrale con una legge di tipo lineare, ovvero di tipo algebrico. In particolare, l'introduzione di un coefficiente di invecchiamento  $\chi(t,t_0)$  ((24), (25), (26), (27)) consente di rendere indipendente l'integrale dall'effettiva storia di carico.

effetto viscoso della sollecitazione assiale nella camicia.

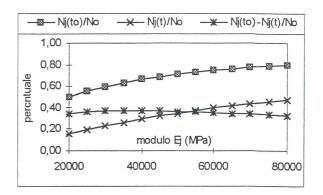


Figura 5. Sollecitazione assiale ( $\Phi_{\infty}$ =3) SEZ1A

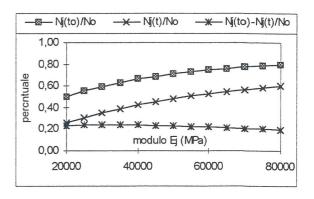


Figura 6. Sollecitazione assiale ( $\Phi_{\infty}$ =1,5) SEZ1A

In tabella 3, 4, 5 e 6, sono riportati i valori percentuali della sollecitazione che interessano la camicia delle diverse sezioni, ad effetti viscosi esauriti (ossia, per  $t=\infty$ ). In figura 7, 8, 9 e 10, per una migliore lettura, sono riportati i grafici relativi.

φ <sub>i</sub>	Ej	SEZ1A	SEZ2A	SEZ3A	SEZ4A
3,00	30000	0,26	0,19	0,14	0,11
2,50	45000	0,36	0,26	0,21	0,17
2,00	50000	0,43	0,33	0,26	0,22
1,50	55000	0,51	0,40	0,33	0,28

Tabella 3. Sollecitazione assiale (in %) camicia

1						
	φj	Ej	SEZ1A	SEZ2A	SEZ3A	SEZ4A
-	3,00	30000	0,46	0,32	0,24	0,18
	2,50	45000	0,61	0,46	0,37	0,30
	2,00	50000	0,67	0,54	0,44	0,37
	1,50	55000	0,73	0,61	0,52	0,44

Tabella 4. Sollecitazione di flessione (in %) camicia

φ <sub>i</sub>	E <sub>j</sub>	SEZ1B	SEZ2B	SEZ3B	SEZ4B
3,00	30000	0,26	0,16	0,12	0,09
2,50	45000	0,40	0,26	0,21	0,17
2,00	50000	0,47	0,33	0,26	0,22
1,50	55000	0,55	0.40	0.33	0.28

Tabella 5. Sollecitazione assiale (in %) camicia

фј	Ej	SEZ1B	SEZ2B	SEZ3B	SEZ4B
3,00	30000	0,51	0,38	0,30	0,24
2,50	45000	0,65	0,53	0,44	0,38
2,00	50000	0,71	0,60	0,51	0,45
1,50	55000	0,77	0,66	0,59	0,53

Tabella 6. Sollecitazione di flessione (in %) camicia

#### SOLLECITAZIONE ASSIALE CAMICIA

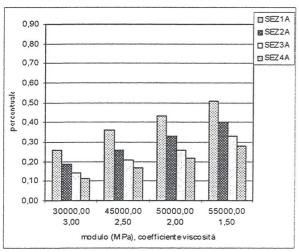


Figura 7. Sollecitazione residua a tempo infinito

#### SOLLECITAZIONE FLESSIONALE CAMICIA

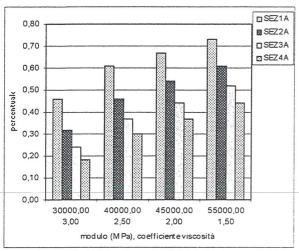


Figura 8. Sollecitazione residua a tempo infinito

### SOLLECITAZIONE ASSIALE CAMICIA

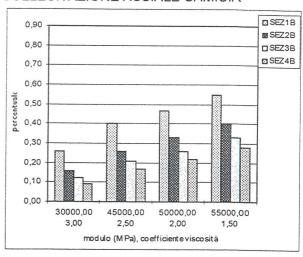


Figura 9. Sollecitazione residua a tempo infinito

#### SOLLECITAZIONE FLESSIONALE CAMICIA

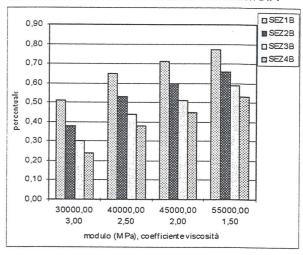


Figura 10. Sollecitazione residua a tempo infinito

I risultati ottenuti mostrano come l'impiego dei materiali di tipo ordinario (MAT2) risulti poco efficace, infatti, si passa da circa il 23% di sollecitazione assiale residua che interessa la camicia della sezione SEZ1A, a circa il 11% per la camicia della sezione SEZ4A. Mentre, nel caso di materiali di elevate prestazioni il ripristino appare notevolmente più efficace, infatti, si passa dal 51 % di sollecitazione assiale residua che interessa la camicia della sezione SEZ1A, allo 28% per la camicia della sezione SEZ4A (entrambe supposte realizzate con MAT5). Viene evidenziato, inoltre, di come lo stesso tipo di ripristino se realizzato su elementi inflessi risulti notevolmente più efficace (sia il nucleo che la camicia sono supposti non fessurati), infatti, nel caso di impiego di materiali ad elevate prestazioni si possono ottenere sollecitazioni flessionali sulla camicia, anche dell'ordine del 70% di quella globale (SEZ1A con MAT5).

Inoltre, il confronto con i risultati ottenuti per le sezioni tipo B (armatura doppia) evidenziano, come era da attendersi, che l'aumento dell'area di armatura non interviene in modo significativo nella ridistribuzione delle sollecitazioni interne.

#### 4. CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti, nei limiti delle ipotesi fatte, si possono puntualizzare i termini di superiorità dei calcestruzzi ad elevate prestazioni, rispetto ai materiali ordinari e speciali, in quanto seque:

- l'efficacia della camicia aumenta con l'aumentare del valore del modulo elastico del materiale impiegato per il ripristino;
- la ridistribuzione, a scapito del nucleo originario, per effetto viscoso, è tanto maggiore quanto maggiore è il coefficiente viscoso Φ<sub>i</sub>(t=∞) del materiale di ripristino;
- l'impiego di materiali ordinari risulta scarsamente efficace sia in regime elastico che, soprattutto, in regime elasto-viscoso (per la SEZ4 l'impiego di MAT2 determina una sollecitazione assiale per la camicia di circa il 10% della totale);
- il valore elevato del modulo elastico e i ridotti effetti viscosi dei calcestruzzi ad elevate prestazioni consente di ottenere, da un punto di vista meccanico, efficaci e garantiti interventi di ripristino data la maggiore rigidezza dell'elemento camicia e i ridotti effetti viscosi;
- infine, la bassa permeabilità di questi materiali, unita alla bassissima, se non addirittura nulla velocità di carbonatazione, fanno si che gli interventi di ripristino eseguiti con essi sia tale da avere carattere di notevole durata.

#### **BIBLIOGRAFIA**

- (01) P. C. AITCIN "Arte e scienza del calcestruzzo ad alte prestazioni" L'Industria Italiana del Cemento n° 4/98.
- (02) A. MIGLIACCI-F. MOLA, "Progetto agli stati limite delle strutture in C. A.", seconda edizione, Masson S.p.A Milano.
- (03) M. MAURO "Linee guide sul calcestruzzo strutturale" L'Industria Italiana del Cemento n ° 5/97.

- (04) H. H. BACHE, "Densified Cement Ultra-fine Particle Based Materials", 2nd Int. Conf. on Superplasticizer in Concrete, 1981.
- (05) C.E.B., "High performance concrete, recommended extensions to the Model Code 90, research needs", C.E.B. Bulletin d'information n.228, July 1995.
- (06) C.E.B., "High strength concrete, State-Of-The-Art-Report", C.E.B. Bulletin d'information n.197, August 1990.
- (07) A.C.I. 363R-92, "State of the art report on high strength concrete", A.C.I. 363R-92.
- (08) C.E.B., "Application of high performance concrete, Examples-Projects-Regulations-Research", C.E.B. Bulletin d'information n. 222, November 1994.
- (09) D.M. 09/01/1196, "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche". (Gazzetta Ufficiale del 05/02/1996 n°29).
- (10) Integrazione a DIN 1045/07.88 per le classi da B65 a B115, Commissione Tedesca per il calcestruzzo armato DAfStb nell'Ist. Tedesco di unificazione delle norme Scharren Strasse 2-3, D-10178 Berlino centro.
- (11) E.C.-2-ENV 206, Progettazione delle strutture cementizie, parte 1: regole generali e regole per gli edifici.
- (12) M. ACITO, G. GUERRINI, "Correlazione fra il modulo elastico e la resistenza a compressione di calcestruzzi ad alta resistenza" A.I.C.A.P. "97, Roma.
- (13) M. ACITO ET ALTRI, "Effetti dimensionali in elementi di calcestruzzo ad altissima resistenza", 11° Congresso CTE 1996.
- (14) M. ACITO ET ALTRI, "Resistenza caratteristica di materiali cementizi ad alta e altissima resistenza, 11° Congresso CTE, Napoli 1996.
- (15) P. ALAEJOS GUTIERREZ, M. FERNAN-DEZ CANOVAS, "The modulus of elasticity of high performance concrete", Materials and structures, 28, pag. 559-568, 1995.
- (16) T. H. WEE ET ALTRI, "Stress-strain relationship of High-Strength Concrete in com-

- pression" Journal of Materials in Civil Engineering, May 1996.
- (17) G. GUERRINI, G. ROSATI, "Durabilità di materiali ad altissima resistenza", Giornate AICAP "97, Roma.
- (18) C. ANDRADE ET ALTRI, "Experimental study of durability of concreteS", Journal of materials in civil Engineering /February, 1996.
- (19) DIEDERICHS ET ALTRI, "Study on the properties of high strength concrete with polypropylene fibre for spalling", Concrete under sever conditions Vol II, E & FN SPON.
- (20) T.P TASSIOS, "Mechanics of load transfer along interfaces in reinforced concrete: Prediction of shear force vs. shear displacement curves", Studi e ricerche vol. 7, Corso di Perfezionamento per le Costruzioni in c.a., Politecnico di Milano, 1985.
- (21) T.P. TASSIOS, "The mechanics of coluMk repair with a reinforced concrete jacket", 7 E.C.E.E., Athens, 1982.
- (22) E. VINTZELEOU, T.P. TASSIOS, "Mechanics of load transfer along interfaces in reinforced concrete: Prediction of shear force vs. shear displacement curves", Discussione di Karakoc, C., Studi e ricerche vol. 8, Corso di Perfezionamento per le Costruzioni in c.a., Politecnico di Milano, 1986.

- (23) M. ACITO, S. TATTONI, "Sull'interazione camicia-nucleo nel ripristino di elementi in c.a. inflessi: ripartizione delle sollecitazioni in regime elasto-viscoso", stampa in proprio 1996.
- (24) F. MOLA, "Metodo delle funzioni di rilassamento ridotte nella risoluzione di strutture elasto-viscose non omogenee a modulo elastico variabile", Studi e Ricerche Vol. 3, 1981.
- (25) F. MOLA, "Metodi di analisi di strutture in c.a. e c.a.p. a comportamento elasto viscoso lineare, Studi e Ricerche, Vol. 3, Italcementi Bergamo, 1982.
- (26) Z. P. BAZANT, "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method", ACI Journal, April 1972.
- (27) H. TROST, "Auswirkungen des Superposition Prinzips auf Kriech und Relaxion Probleme bei Beton und Spann-beton, Beton und Stahlbetonbau, H. 10, 1967.
- (28) CEB, "Manual de Calcul Fissuration et Deformation", Bulletin d'Information n. 143, 1981.
- (29) F. MOLA, N. GATTESCO, "Il calcolo delle sezioni fessurate in cemento armato in fase elasto-viscosa lineare", Atti dell'istituto di meccanica Teorica ed applicata dell'Università di Udine, 21/11/1983.
- (30) M. ACITO, A. MIGLIACCI, "Impiego dei calcestruzzi ad alte prestazioni nel recupero di elementi strutturali", Convegno FAST, Milano 10-14 Novembre 1997.