



Analisi agli elementi finiti per il controllo della fessurazione nei muri in c.a. soggetti a fenomeni di ritiro

A. Meda

Università di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Ingegneria Civile.

G. Plizzari, C. Zanotti

Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio e Ambiente (DICATA).

S. Cangiagno

CTG Italcementi Group, Bergamo

RIASSUNTO. Esperienze passate hanno evidenziato che alcune tipologie di opere sono particolarmente soggette al rischio di fessurazione, nei primi giorni o nei primi mesi successivi al getto del calcestruzzo, a causa dei fenomeni igrotermici (il ritiro, il calore prodotto dalle reazioni di idratazione, le variazioni di temperatura dell'ambiente circostante). Questo tipo di fessurazione è diventato più problematico con l'arrivo sul mercato di calcestruzzo ad alta resistenza, caratterizzati dalla presenza di un maggior quantitativo di pasta di cemento.

Il presente lavoro riguarda uno studio numerico sulla fessurazione di muri in c.a. soggetti a ritiro. Lo studio si propone di indagare gli effetti del grado di vincolo esercitato dalla fondazione, dell'armatura tradizionale (longitudinale e trasversale) e di un rinforzo fibroso diffuso nel muro. I risultati riguardano principalmente la massima apertura di fessura nella struttura al crescere delle variazioni di volume impresse dal ritiro.

PAROLE CHIAVE. Fessurazione; Elementi Finiti; Ritiro; Calcestruzzo; Calcestruzzo fibrorinforzato.

INTRODUZIONE

I fenomeni igrotermici del calcestruzzo, come il ritiro, il calore prodotto dalle reazioni di idratazione del cemento e le variazioni di temperatura dell'ambiente circostante, possono causare un'inattesa fessurazione che rischia di compromettere le prestazioni e la durabilità dell'opera. E' infatti ben noto che nella struttura si sviluppano regimi deformativi che possono indurre la nascita di coazioni e, conseguentemente, di fessure. Questo tipo di fessurazione interessa soprattutto alcune tipologie di opere: è il caso dei getti massivi, degli elementi molto sottili e delle strutture soggette a particolari condizioni di vincolo (dovute, per esempio, a elementi adiacenti preesistenti). Il problema è quanto mai attuale a causa alle continue innovazioni introdotte nel mix-design dei composti cementizi e, in particolare, alla messa a punto di calcestruzzi con elevate prestazioni meccaniche attraverso l'utilizzo di bassi rapporti acqua-cemento e di particolari additivi. Pertanto, il buon comportamento strutturale nei confronti dei fenomeni igrotermici sta diventando una nuova prestazione richiesta, con cui è necessario confrontarsi durante la progettazione dell'opera e dei materiali.

Il presente lavoro si colloca all'interno di un ampio studio riguardante gli effetti strutturali dei fenomeni igrotermici ed è finalizzato principalmente alla valutazione delle tecniche più appropriate per il controllo della fessurazione, sia attraverso la riduzione del rischio che nascano fessure sia con la limitazione dell'apertura di fessura [1]. La struttura considerata è una muratura in calcestruzzo soggetta a ritiro, armata con diverse percentuali di armatura longitudinale e con l'eventuale presenza di fibre d'acciaio.

Il ritiro consiste sostanzialmente in una riduzione di volume del calcestruzzo dovuta al movimento o alla perdita di acqua [2, 3]. Tra le forme di ritiro più comuni si possono annoverare il ritiro igrometrico e il ritiro autogeno; il primo è

dovuto all'evaporazione dell'acqua non legata, mentre il secondo è causato principalmente dall'auto-essiccamento del calcestruzzo quando il contenuto d'acqua non è sufficiente al completamento delle reazioni di idratazione. Di conseguenza, il contributo autogeno è particolarmente significativo nei calcestruzzi di nuova generazione, tipicamente caratterizzati da bassi rapporti acqua-cemento.

CASO DI STUDIO

In questo lavoro si fa riferimento al caso rappresentativo di un muro in calcestruzzo lungo 30 m, alto 5 m e spesso 0.5 m, gettato su una soletta di fondazione di dimensioni trasversali pari a 1.5 m x 0.5 m (Fig. 1), a sua volta appoggiata su un terreno incoerente (tipo sabbia).

E' stata assunta la condizione di muro libero (non controterra), su cui l'unico carico agente è il peso proprio. Inoltre, la struttura è soggetta alle variazioni di volume indotte dal ritiro del calcestruzzo. L'obiettivo principale delle analisi di seguito presentate è valutare gli effetti strutturali del ritiro e, in particolare, il processo fessurativo correlato.

Il ritiro può provocare la nascita di coazioni a causa della presenza di vincoli interni ed esterni (offerti per esempio dal terreno e dall'armatura) che si oppongono alle contrazioni degli elementi in calcestruzzo. Per questa tipologia strutturale ha una particolare influenza il ritiro differenziale tra il muro e la fondazione. Di fatto, il ritiro ha uno sviluppo marcatamente non lineare nel tempo; di conseguenza, poiché i due elementi vengono generalmente gettati in tempi diversi, la fondazione tende a contrastare le libere contrazioni del muro. Il ritiro differenziale risulta poi enfatizzato dalla diversa geometria dei due elementi, poiché la velocità di esaurimento del contributo igrometrico (dovuto all'evaporazione dell'acqua non legata) dipende dal grado di esposizione degli elementi di calcestruzzo all'ambiente circostante [2, 4].

Il calcestruzzo di riferimento è un comune C30/37 [4]. E' ormai consolidato che la risposta a trazione del calcestruzzo fessurato può essere notevolmente migliorata aggiungendo alla miscela un adeguato contenuto di fibre, che possono cucire efficacemente le microfessure limitandone l'apertura e incrementando l'energia di frattura del calcestruzzo [5-9]. Dunque, per valutare l'effetto delle fibre sul controllo della fessurazione da ritiro, si adotta, oltre al calcestruzzo ordinario, un calcestruzzo rinforzato con 30 kg/m³ di fibre d'acciaio uncinato (quantitativo corrispondente a una frazione volumetrica $V_f = 0.38\%$). Il diametro e la lunghezza delle fibre sono rispettivamente $d_f = 1$ mm e $l_f = 50$ mm, da cui risulta un rapporto d'aspetto $l_f/d_f = 50$.

Per studiare il ruolo dell'armatura tradizionale d'acciaio, si considerano tre diverse percentuali d'armatura corrente nel muro (ρ_s), corrispondenti a tre diversi valori del diametro dei ferri longitudinali, posizionati con un passo di 250 mm: (i) 2 ferri $\phi 6$ ($\rho_s = 0.048\%$), (ii) 2 ferri $\phi 8$ ($\rho_s = 0.13\%$) e (iii) 2 ferri $\phi 10$ ($\rho_s = 0.26\%$). Per l'armatura trasversale si adottano staffe $\phi 10$ a 2 bracci, sempre con passo di 25 cm. La fondazione è armata superiormente e inferiormente con 6 ferri $\phi 10$ in direzione longitudinale. L'acciaio delle armature è un comune B450C.

A seguito della ripresa di getto, lungo la superficie d'interfaccia tra la fondazione e il muro si forma una zona debole, sede di scorrimenti e distacchi locali (Fig. 1). Al variare delle caratteristiche di questo giunto naturale, varia il grado di vincolo tra il muro e la fondazione, che può influenzare la fessurazione da ritiro.

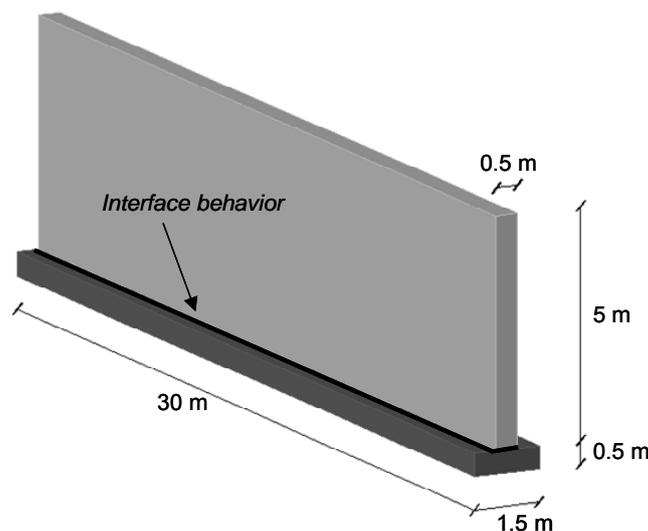


Figura 1: Caso di studio.

MODELLAZIONE E ANALISI

Le analisi sono state condotte con l'ausilio del programma agli elementi finiti DIANA (versione 9.1) [10]. La struttura è stata rappresentata con un modello tridimensionale, per metà lunghezza e metà sezione, sfruttando la doppia simmetria del problema. L'effetto del ritiro differenziale tra muro e fondazione è stato riprodotto imprimendo al muro un regime di deformazioni uniformemente distribuite crescenti nel tempo. Il terreno incoerente è stato modellato con un insieme discreto di molle no-tension. È stata adottata una rigidità alla Winkler $k_w = 90 \times 10^6 \text{ N/m}^3$, ripartita uniformemente fra le molle in relazione all'estensione della porzione di terreno di loro competenza. Uno studio preliminare ha evidenziato che il grado di vincolo offerto dall'attrito del terreno è trascurabile rispetto al ruolo della fondazione nel contrastare le contrazioni del muro [1], dunque l'attrito del terreno è stato trascurato.

Modellazione del calcestruzzo ordinario e fibrorinforzato

Le parti in calcestruzzo sono state modellate con elementi solidi isoparametrici a integrazione parabolica di forma cubica e lato pari a 125 mm. Per il modulo elastico e la resistenza a trazione del calcestruzzo si è fatto riferimento all'EC2 [4]. La fessurazione del calcestruzzo è stata modellata con un approccio alla fessura diffusa, combinato a un modello di fessura fissa multi-direzionale [11]. Per la risposta a trazione del calcestruzzo ordinario fessurato è stata adottata la legge di softening non lineare proposta da Cornelissen et al. [12] mostrata in Fig. 2, mentre l'energia di frattura è stata calcolata mediante la formulazione proposta dal MC1990 [13]. Il calcestruzzo fibrorinforzato è stato modellato come un materiale omogeneo, le cui caratteristiche meccaniche sono state definite a partire dai risultati sperimentali ottenuti da Cominoli et al. [14]; la risposta a trazione del FRC fessurato è stata modellata con una legge di softening bilineare (Fig. 2). Data la ridotta entità degli sforzi di compressione in gioco, è stato assunto un comportamento elastico lineare a compressione.

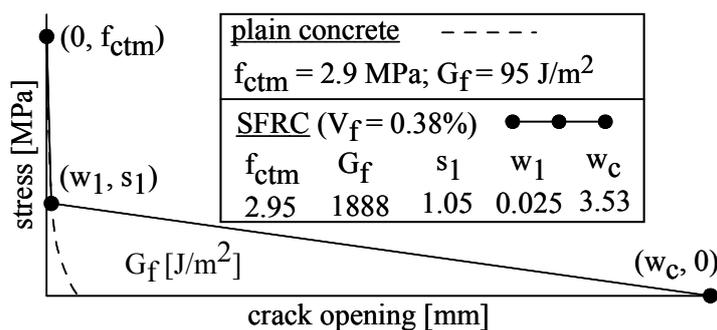


Figura 2: Risposta a trazione del calcestruzzo fessurato ordinario e fibrorinforzato [4, 12-15].

Modellazione delle armature

L'armatura d'acciaio, oltre a migliorare le prestazioni meccaniche delle strutture in calcestruzzo (in particolare: la resistenza, la rigidità e la duttilità), può avere effetti secondari negativi spesso non trascurabili. Per esempio, i muri in esame tendono, per effetto del ritiro, a deformarsi principalmente in direzione longitudinale; quindi l'armatura corrente, opponendosi a queste contrazioni, offre un vincolo interno che può favorire la fessurazione. Inoltre, le staffe, essendo disposte trasversalmente, non offrono benefici nei confronti della risposta alle deformazioni longitudinali ma, al contrario, costituiscono un indebolimento della sezione di calcestruzzo.

Le barre longitudinali del muro sono state modellate con elementi biella in grado di simulare sia gli effetti benefici sia il vincolo interno che si oppone alle libere contrazioni del calcestruzzo. Diversamente, l'armatura della fondazione (che ha il solo ruolo di inibire la fessurazione) è stata rappresentata con barre aderenti posizionate all'interno degli elementi di calcestruzzo. Per l'acciaio è stato adottato un comportamento elasto-plastico incoerente, simmetrico a trazione e compressione.

La modellazione degli ingombri geometrici delle staffe richiederebbe un onere computazionale eccessivo. Pertanto, l'effetto di indebolimento della sezione di calcestruzzo e di perturbazione del regime di sforzi è stato considerato riducendo opportunamente le caratteristiche meccaniche degli elementi di calcestruzzo contenenti le staffe (sulla base dei risultati ottenuti simulando prove di trazione locali in direzione ortogonale alle staffe, modellate con la loro effettiva dimensione [1]).



Modellazione del comportamento all'interfaccia tra il muro e la fondazione

La superficie all'interfaccia tra la fondazione e il muro è stata modellata con elementi a integrazione parabolica, costituiti da due superfici di otto nodi ciascuna (lato pari a 125 mm), a distanza infinitesima l'una dall'altra (elementi di spessore nullo).

Le caratteristiche del materiale sono definite attraverso il legame tra gli spostamenti relativi lungo l'elemento e gli sforzi normali e tangenziali [10]. Partendo da questa definizione, la rigidezza elastica in direzione normale, D_{11} , è stata calcolata secondo l'Eq. 1:

$$D_{11} = \frac{t_n}{\Delta u_n} = \frac{t_n}{\varepsilon \cdot l_n} = \frac{E}{l_n} \approx \frac{E}{10^{-4} l_t} \approx \frac{E}{10^{-5} m} = 3.3 \cdot 10^{15} \frac{N}{m^3} \quad (1)$$

Dove t_n e Δu_n sono rispettivamente lo sforzo e lo spostamento in direzione normale, E è il modulo elastico del calcestruzzo (assunto pari a 3.3 GPa per la classe di riferimento C30/37 [4]), l_n è lo spessore infinitesimo, ipotizzato di quattro ordini di grandezza inferiore alla dimensione tangenziale l_t (pari a 125 mm).

L'espressione della rigidezza elastica tangenziale, D_{22} , è stata ricavata applicando le Eq. 2, 3 (nell'ipotesi che gli spostamenti e le deformazioni in campo elastico siano piccoli):

$$G = \frac{t_t}{\gamma} = t_t \frac{l_n}{\Delta u_t} \quad (2)$$

$$D_{22} = \frac{t_t}{\Delta u_t} = \frac{G}{l_n} = \frac{E}{2(1+\nu) \cdot l_n} = \frac{D_{11}}{2(1+\nu)} = 1.375 \cdot 10^{15} \frac{N}{m^3} \quad (3)$$

Dove t_t e Δu_t sono rispettivamente lo sforzo e lo spostamento in direzione tangenziale, γ è lo scorrimento angolare, G è il modulo di elasticità tangenziale e ν è il coefficiente di Poisson (che può essere assunto pari a 0.2 per il calcestruzzo). La correttezza dei parametri così determinati è stata validata mediante simulazione di prove locali [1].

Per modellare la resistenza a taglio della superficie d'interfaccia tra calcestruzzi gettati in tempi diversi è stata adottata la legge d'attrito di Mohr-Coulomb. Sono stati adottati i parametri suggeriti dall'EC2 [4] per le riprese di getto, con riferimento a due diverse tipologie di superficie: molto liscia e scabra (Tab. 1). Secondo l'EC2 [4], in assenza di informazioni più dettagliate, le superfici possono essere classificate come molto lisce, lisce, scabre o dentate. Esempi di superfici molto lisce sono quelle gettate su cassero d'acciaio, plastica o legno preparato allo scopo, mentre sono definite scabre le superfici con scabrezza di almeno 3 mm e passo di circa 40 mm, ottenute con graffiatura, esposizione agli aggregati o altri metodi che danno comportamento equivalente. Il caso di superficie molto liscia è stato scelto perché rappresentativo della situazione in cui il grado di vincolo tra muro e fondazione è minimo, mentre la superficie scabra rappresenta il caso in cui il grado di vincolo è elevato, pur discostandosi dalla situazione limite di perfetta aderenza. Per il calcolo della coesione c e dell'angolo d'attrito Φ , che caratterizzano la legge di Mohr-Coulomb, a partire dalle formulazioni suggerite dall' EC2 [4], sono state adottate le Eq. 4, 5:

$$c = c' \cdot f_{ct} \quad (4)$$

$$\phi = \arctan \mu \quad (5)$$

| Superficie | c [MPa] | Φ | $f_{t,interface}$ [MPa] |
|--------------|-----------|--------|-------------------------|
| Molto liscia | 1.305 | 26.5° | 1.45 |
| Scabra | 1.725 | 35° | 1.86 |

Tabella 1: Coesione c , angolo d'attrito Φ e resistenza a trazione $f_{t,interface}$ per due diversi tipi di superficie d'interfaccia tra muro e fondazione, nel caso di calcestruzzo C30/37 [4].

Dove, secondo l'EC2 [4], c' è pari a 0.25 per superfici molto lisce e 0.45 per superfici scabre, f_{ct} è la resistenza a trazione del calcestruzzo (il cui valore medio, per la classe C30/37 considerata, è 2.9 MPa) e μ è pari a 0.5 e 0.7 per superfici rispettivamente molto lisce o scabre. L'EC2 [4] impone, inoltre, che la resistenza a taglio non superi, in ogni caso, un valore limite pari alla metà del prodotto della resistenza a compressione del calcestruzzo per il coefficiente di Poisson; questa condizione è stata garantita monitorando i massimi sforzi tangenziali lungo l'interfaccia.



Infine, per quanto riguarda il comportamento in direzione normale, la resistenza a trazione $f_{t,interface}$ è stata calcolata applicando l'Eq. 6:

$$f_{t,interface} = c/\tan \phi \quad (6)$$

Si assume, pertanto, che quando le tensioni normali all'interfaccia eguagliano la resistenza a trazione, la resistenza tangenziale è nulla e quindi si verifica scorrimento. La resistenza a trazione post-fessurativa è stata invece trascurata. L'angolo di dilatanza è stato assunto pari all'angolo d'attrito: questa condizione (plasticità associata, con matrice di rigidità simmetrica) è la più favorevole per garantire una buona convergenza dei risultati.

ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Distribuzione elastica delle tensioni

In Fig. 3 è possibile osservare la distribuzione elastica qualitativa degli sforzi principali massimi σ_1 lungo la struttura non armata, nel caso di perfetta aderenza tra il muro e la fondazione. I bordi sono interessati da una perturbazione del regime di sforzi che interessa una zona di estensione pari a due volte l'altezza. Analisi effettuate su muri di lunghezze diverse confermano che l'estensione della zona perturbata dipende solo dall'altezza del muro [1]. I diagrammi delle Fig. 4 e 5 mostrano l'andamento degli sforzi lungo la sezione longitudinale e la sezione verticale, al momento del raggiungimento della tensione di prima fessurazione dello sforzo principale. Il punto critico, in corrispondenza del quale sono raggiunti i massimi sforzi di trazione, è collocato vicino ai bordi, nella zona di attacco del muro alla fondazione (dove è massimo il grado di vincolo), ad una quota pari a metà spessore. E' possibile osservare che, come atteso, il contributo maggiormente significativo è offerto dagli sforzi longitudinali. A causa dell'altezza elevata del muro, gli sforzi hanno una distribuzione marcatamente non lineare [16] e il contributo longitudinale si inverte ad una quota compresa tra 2.5 m e 3 m dalla base del muro (variabile lungo l'asse longitudinale), dando origine a compressioni in sommità [17].

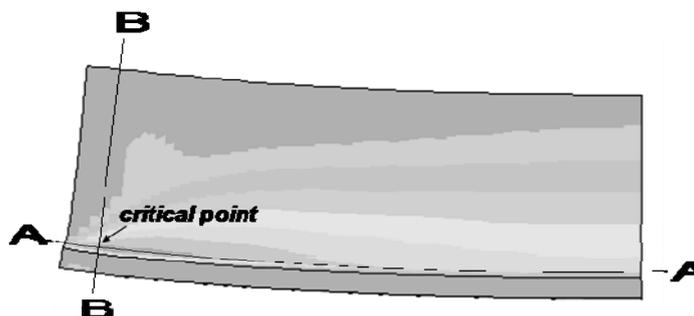


Figura 3: Distribuzione qualitativa degli sforzi principali massimi in campo elastico.

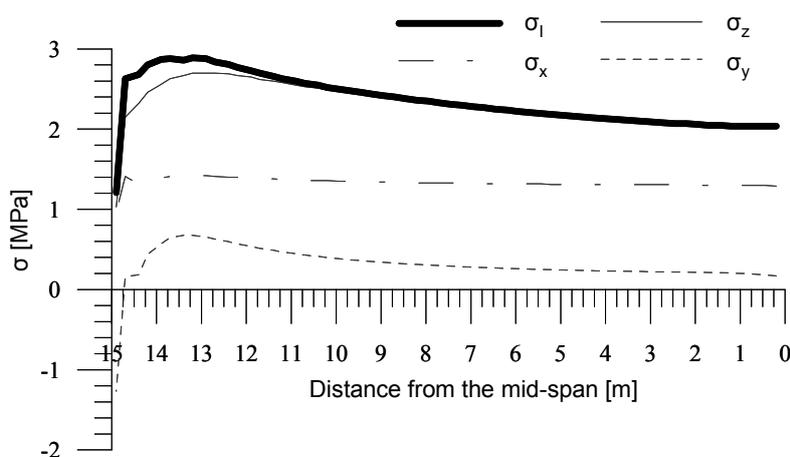


Figura 4: Distribuzione elastica degli sforzi principali massimi (σ_1), longitudinali (σ_2), verticali (σ_y) e trasversali (σ_x) lungo la sezione A-A indicata in Figura 3, in corrispondenza del raggiungimento della resistenza a trazione del calcestruzzo ($\sigma_1 = 2.9$ MPa).

Analisi dei quadri fessurativi di murature in calcestruzzo ordinario, al variare dell'armatura e del grado di vincolo con la fondazione

In Fig. 6 è possibile confrontare i quadri fessurativi dei muri in calcestruzzo non armato al variare del grado di vincolo con la fondazione. Indipendentemente dalle caratteristiche della superficie d'interfaccia muro-fondazione, la fessurazione inizia quando le variazioni di volume impresse al muro raggiungono un valore pari a 125×10^{-6} . Al diminuire dell'attrito tra i due elementi, il muro è maggiormente libero di deformarsi, assecondando le variazioni di volume indotte dal ritiro: ne consegue un minore danneggiamento. La scabrezza del giunto all'interfaccia influenza soprattutto la micro-fessurazione locale che risulta particolarmente significativa nella situazione limite di perfetta aderenza (Fig. 6a), mentre nel caso di interfaccia liscia (Fig. 6c) è limitata solo ai bordi e risulta di minore entità. Come atteso, a causa dell'assenza di armatura ordinaria o di fibre, da subito le deformazioni tendono a concentrarsi principalmente in corrispondenza di due sole fessure verticali.

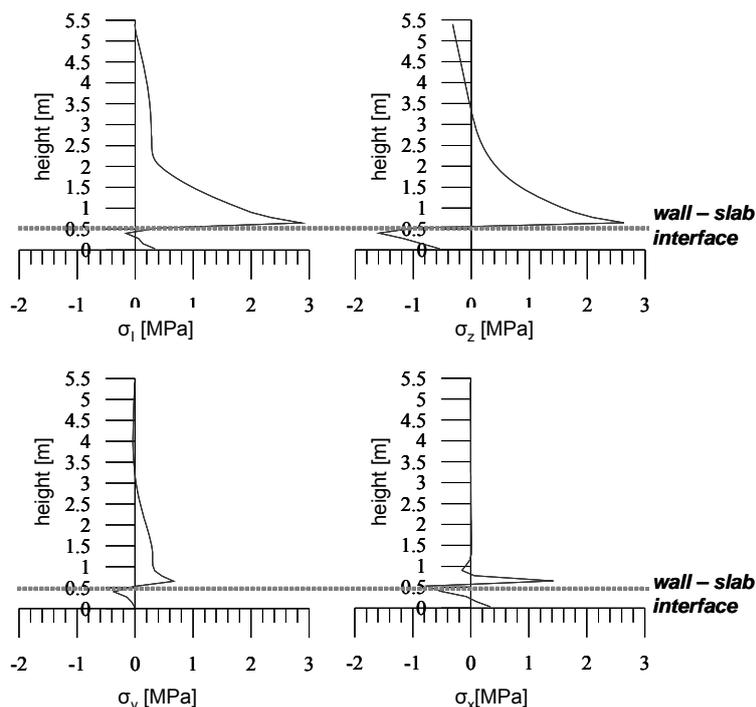


Figura 5: Distribuzione elastica degli sforzi principali massimi (σ_1), longitudinali (σ_2), verticali (σ_y) e trasversali (σ_x) lungo la sezione B-B indicata in Fig. 3, in corrispondenza del raggiungimento della resistenza a trazione del calcestruzzo ($\sigma_1 = 2.9$ MPa).

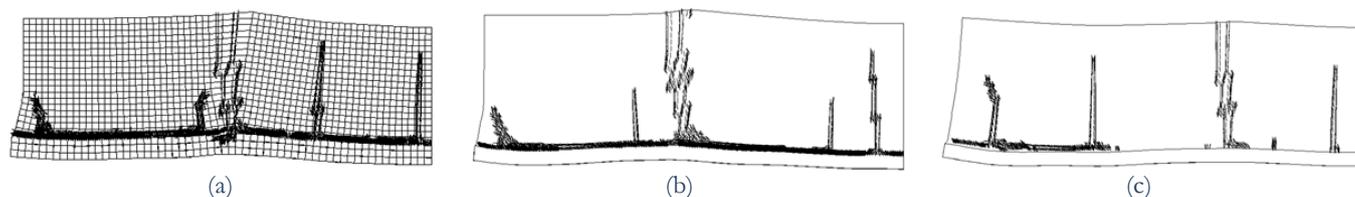


Figura 6: Quadri fessurativi del muro in calcestruzzo ordinario non armato, ottenuti nel caso di perfetta aderenza con la fondazione (a) e nel caso di superficie d'interfaccia scabra (b) o liscia (c).

In presenza di armatura (longitudinale e trasversale), la prima fessurazione si verifica quando le deformazioni impresse al muro raggiungono un valore pari a 48.7×10^{-6} , indipendentemente dalla scabrezza della superficie d'interfaccia e dalla percentuale di armatura longitudinale. Si può dunque concludere che né le caratteristiche del giunto naturale dovuto alla ripresa di getto né il contenuto di armatura longitudinale influenzano la prima fessurazione del muro. Rispetto al caso senza armatura, la fessurazione risulta notevolmente anticipata per effetto delle staffe.

Le immagini presentate in Fig. 7 mostrano le fasi più interessanti dell'evoluzione dei quadri fessurativi di un muro in c.a., per uno dei sei casi analizzati. Si può osservare che le fessure nascono e si sviluppano in corrispondenza delle parti di calcestruzzo indebolite dalla presenza delle staffe, che favoriscono il danneggiamento del muro alla base.

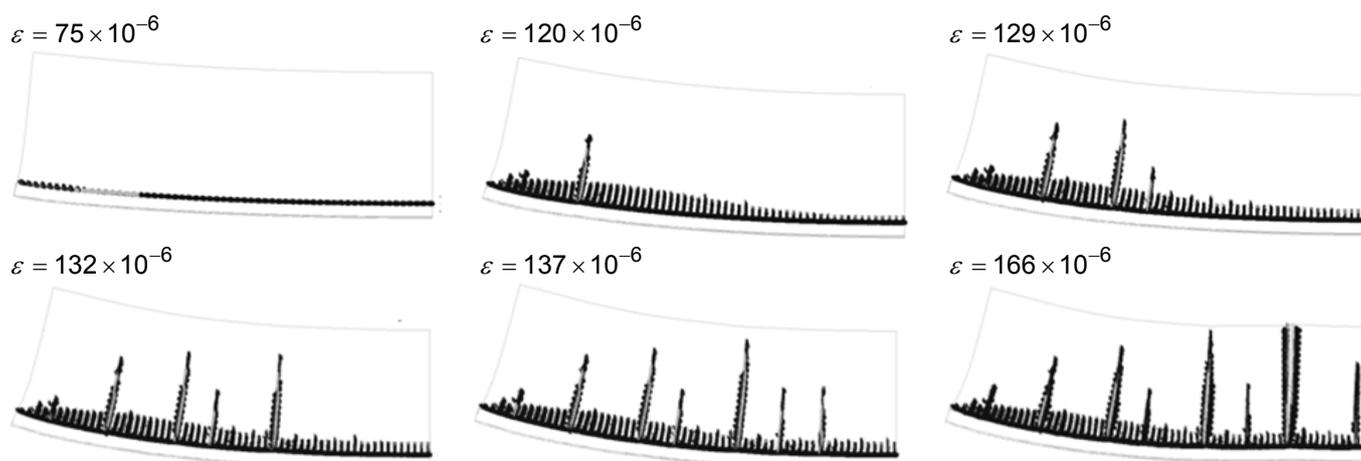


Figura 7: Progressione del quadro fessurativo al crescere delle deformazioni impresse (ϵ), per il muro avente una percentuale d'armatura longitudinale $\rho_s = 0.13\%$ e una superficie d'interfaccia con la fondazione scabra.

Lo sviluppo dei quadri fessurativi avviene nel seguente ordine:

- 1) le fessure nascono alla base del muro, in prossimità dei bordi, per effetto della perturbazione degli sforzi lungo queste zone;
- 2) al crescere delle deformazioni impresse, le fessure ai bordi progrediscono verso la mezzia;
- 3) la fessurazione diffusa alla base del muro tende poi a svilupparsi in altezza, concentrandosi in corrispondenza dell'armatura trasversale e mantenendosi comunque nella parte inferiore del muro;
- 4) si sviluppano delle fessure principali (prima vicino ai bordi e poi verso il centro).

In Fig. 8 è possibile confrontare le massime aperture di fessura raggiunte nel muro al crescere delle variazioni di volume impresse, per diverse percentuali di armatura, nel caso di interfaccia scabra tra muro e fondazione. Dal grafico risulta evidente l'effetto benefico dell'armatura corrente: al crescere del diametro dei ferri (e quindi della percentuale di armatura), cresce l'entità delle deformazioni impresse in corrispondenza delle quali si raggiunge un certo valore massimo di apertura.

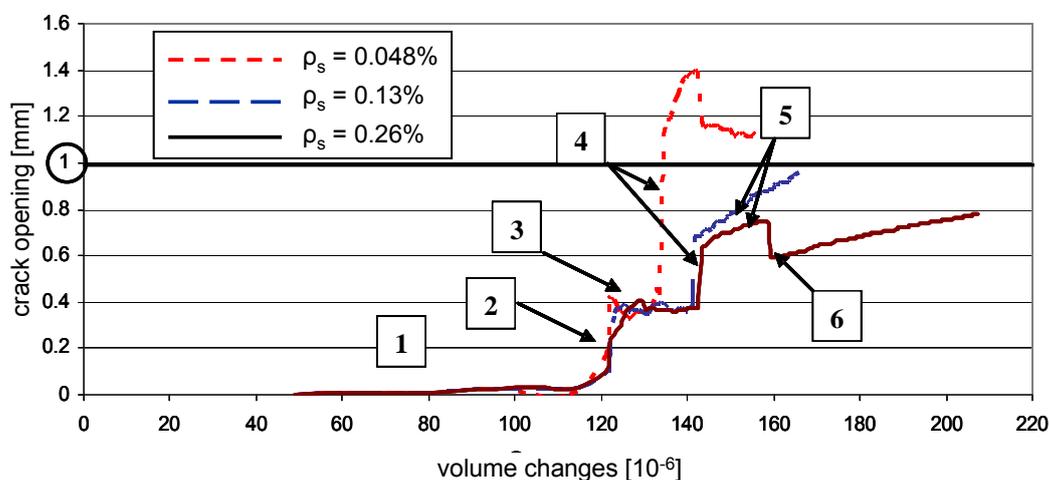


Figura 8: Crescita delle massime aperture di fessura al crescere del ritiro differenziale, per diverse percentuali di armatura longitudinale (ρ_s), nel caso di superficie d'interfaccia muro-fondazione scabra.

Per esempio, l'apertura di fessura di 0.5 mm viene raggiunta per deformazioni impresse intorno a 135×10^{-6} nel caso con minore armatura e intorno a 145×10^{-6} negli altri due casi. Man mano che la fessurazione progredisce questo effetto risulta amplificato; per esempio, l'apertura di fessura di 0.8 mm viene raggiunta per deformazioni impresse intorno a 135×10^{-6} nel caso con minore armatura, 150×10^{-6} nel caso intermedio e 210×10^{-6} nel caso con maggiore armatura. Si osservi infine che l'effetto negativo dell'armatura longitudinale, che si oppone alle libere contrazioni del calcestruzzo, risulta trascurabile rispetto agli effetti del vincolo offerto dalla fondazione a seguito del ritiro differenziale.

All'interno della struttura si possono distinguere tre ordini di fessure:

- I ORDINE: fessurazione diffusa alla base del muro, legata al grado di vincolo tra il muro e la fondazione e alla presenza delle staffe.
- II ORDINE: fessure verticali che non raggiungono la sommità.
- III ORDINE: fessure verticali che interessano tutta l'altezza.

Il processo fessurativo può essere schematicamente suddiviso nelle seguenti fasi, numerate progressivamente all'interno della Fig. 8:

- 1) Microfessurazione diffusa alla base (I ORDINE).
 - 2) Formazione della prima macrofessura verticale (II ORDINE, Fig. 9), con conseguente localizzazione delle deformazioni e subitaneo incremento di apertura.
 - 3) Formazione di altre fessure verticali (II ORDINE, Fig. 10): grazie alla presenza dell'armatura corrente, al crescere delle deformazioni impresse cresce il numero di fessure verticali ma rimane costante l'apertura massima.
 - 4) Su ognuno dei due lati, una fessura verticale raggiunge la sommità (III ORDINE, Fig. 11) dividendo il muro in tre parti sostanzialmente indipendenti (la localizzazione di queste fessure primarie può creare problemi instabilità numerica legati a fenomeni di biforcazione dell'equilibrio).
- Nel muro con il contenuto più basso di armatura, raggiunta questa fase, si possono considerare esaurite le risorse della struttura.
- 5) Sviluppo dell'apertura delle fessure primarie (III ORDINE). Nel muro con maggiore armatura, accanto alla fessura principale si sviluppa un'ulteriore fessura verticale (Fig. 11) e pertanto le massime aperture sono leggermente minori.
 - 6) Nel muro con la più alta percentuale di armatura si verifica una concentrazione di deformazioni in corrispondenza della fessura verticale secondaria di cui al punto 5. A questo rilascio di energia corrisponde una richiusura parziale della fessura principale e, di conseguenza, l'apertura massima torna ad essere pari a circa 0.6 mm. Grazie a questa ulteriore risorsa, prima di raggiungere aperture di fessura particolarmente dannose (pari a 0.8–1 mm), la struttura è in grado di incassare variazioni di volume molto maggiori che negli altri casi.

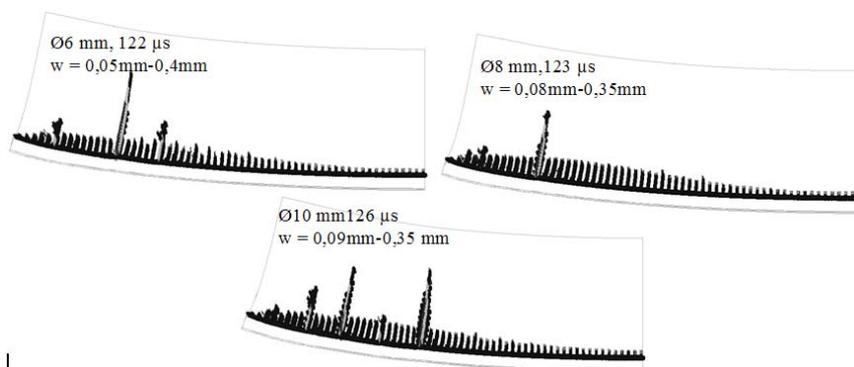


Figura 9: Quadro fessurativo nel caso di interfaccia muro-fondazione scabra, al variare del diametro e quindi del contenuto di armatura, per deformazioni impresse pari a 122-126 µs (punto 2 di Fig. 8).

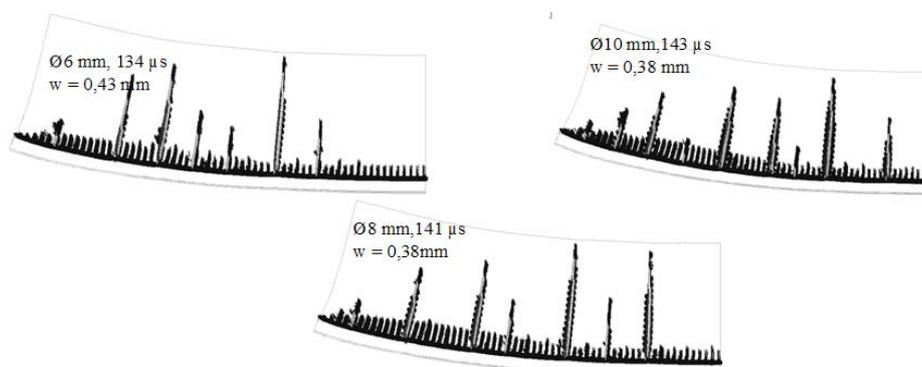


Figura 10: Quadro fessurativo nel caso di interfaccia muro-fondazione scabra, al variare del diametro e quindi del contenuto di armatura, per deformazioni impresse pari a 134-143 µs (punto 3 di Fig. 8).



I grafici delle Fig. 12 e 13 mettono a confronto le risposte di muri contenenti la stessa quantità di armatura ma caratterizzati da un diverso grado di attrito lungo il giunto all'interfaccia. Grazie alla riduzione del grado di vincolo tra muro e fondazione (e quindi del grado di iperstaticità della struttura), passando da giunto d'interfaccia scabro a giunto d'interfaccia molto liscio [4] si ottiene complessivamente una migliore prestazione strutturale: a parità di deformazioni impresse, la massima apertura tende a essere minore. L'effetto dell'attrito all'interfaccia risulta più significativo nel caso con il minore contenuto di armatura (Fig. 12), mentre al crescere della percentuale di armatura longitudinale la scabrezza ha un effetto secondario grazie all'efficacia dell'armatura passante nel contenere comunque la fessurazione (Fig. 13).

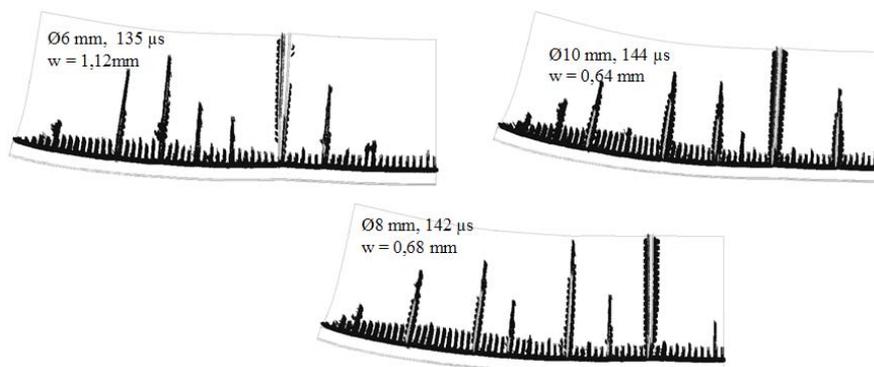


Figura 11: Quadro fessurativo nel caso di interfaccia muro-fondazione scabra, al variare del diametro e quindi del contenuto di armatura, per deformazioni impresse pari a 135-144 μs (punto 4 di Fig. 8).

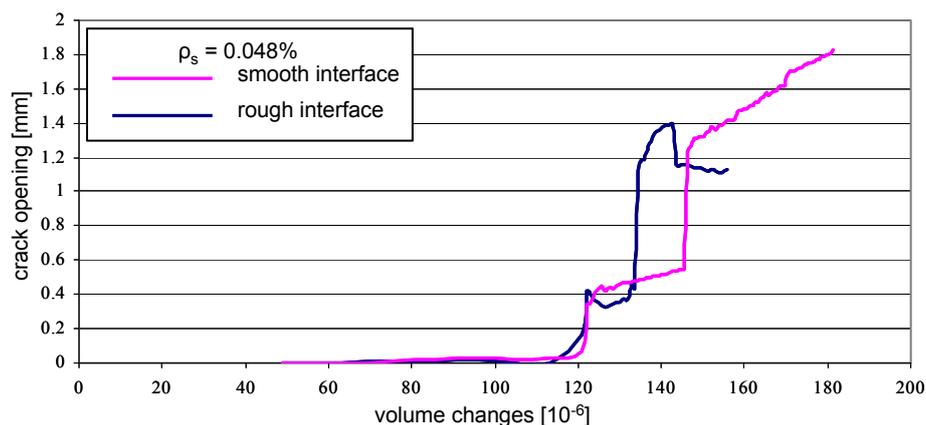


Figura 12: Relazione tra le deformazioni impresse al muro e la massima apertura di fessura, al variare del grado di vincolo con la fondazione, nel caso di percentuale di armatura corrente $\rho_s = 0.048\%$.

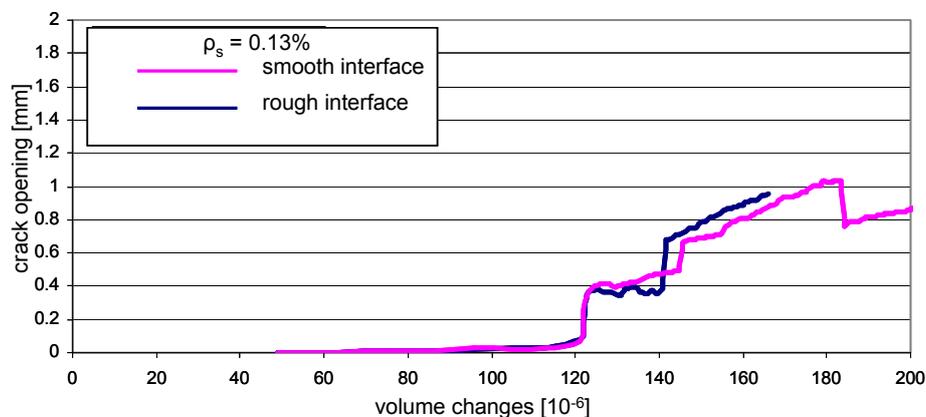


Figura 13: Relazione tra le deformazioni impresse al muro e la massima apertura di fessura, al variare del grado di vincolo con la fondazione, nel caso di percentuale di armatura corrente $\rho_s = 0.13\%$.

Impiego di calcestruzzi fibrorinforzati per il controllo della microfessurazione

Dai grafici di Fig. 9 risulta che, intervenendo sul contenuto di armatura longitudinale, si possono migliorare le prestazioni strutturali solo in corrispondenza di aperture di fessura superiori a 0.3 mm. Per intervenire efficacemente sulle microfessure, si può ricorrere all'inserimento di un rinforzo diffuso (fibre) nella miscela, che apporta un significativo miglioramento della resistenza a trazione del calcestruzzo fessurato (Fig. 2).

La Fig. 14 mette a confronto le prestazioni (intese come legame tra la massima apertura di fessura e il ritiro differenziale corrispondente) di un muro con una percentuale del 0.13% di armatura longitudinale (curva 1) con le prestazioni di un muro rinforzato con 30 kg/m³ (non coerente con la figura) di fibre d'acciaio uncinato (senza armatura corrente; curva 2). I risultati evidenziano l'efficacia delle fibre nel contenere la microfessurazione, a differenza dell'armatura ordinaria i cui effetti si manifestano solo in corrispondenza di deformazioni maggiori. Infine, nell'ottica di una progettazione ottimizzata, si è ipotizzato di realizzare un muro in calcestruzzo fibrorinforzato con l'aggiunta di barre d'acciaio nella parte superiore (dove le fessure primarie tendono ad aprirsi maggiormente). I risultati ottenuti mostrano che l'inserimento di armatura corrente (i cui effetti si attivano per aperture di circa 0.2 mm) comporta un ulteriore miglioramento delle prestazioni strutturali (Fig. 14; curva 3).

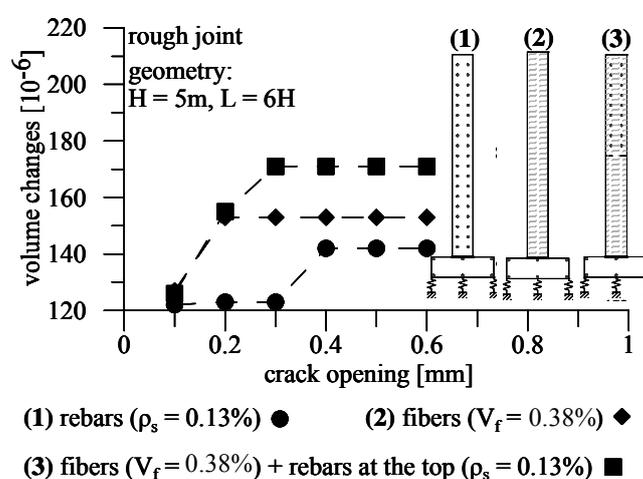


Figura 14: Prestazioni strutturali del muro rinforzato con armatura corrente (1), con fibre d'acciaio (2), oppure con fibre d'acciaio lungo tutto il muro e armatura longitudinale nella parte superiore (3), nel caso di giunto di ripresa di getto scabro [15].

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

È stato condotto uno studio numerico riguardante la fessurazione dei muri in c.a. soggetti a fenomeni di ritiro. Le principali conclusioni dedotte dai risultati discussi in questo articolo possono essere sintetizzate come segue:

- la causa principale delle coazioni che si sviluppano in un muro soggetto a fenomeni di ritiro è il vincolo offerto dalla fondazione e, in particolare, il ritiro differenziale tra i due elementi, combinato allo sviluppo non lineare del fenomeno nel tempo;
- la fessurazione ha inizio alla base del muro, in prossimità dei bordi, dove si verifica una perturbazione del regime di sforzi;
- il grado di vincolo tra il muro e la fondazione, ovvero la scabrezza della superficie all'interfaccia tra i due elementi, influenza sia l'entità della fessurazione localizzata alla base del muro sia l'apertura delle fessure primarie, soprattutto nei muri debolmente armati;
- l'armatura longitudinale ha un effetto benefico sulla struttura, poiché ne favorisce la fessurazione multipla limitando l'apertura delle fessure, mentre il vincolo interno prodotto dall'armatura corrente (che si oppone alle libere contrazioni del calcestruzzo) ha un effetto trascurabile rispetto a quello del vincolo esterno prodotto dalla fondazione;
- per il problema in esame, l'armatura trasversale costituisce un indebolimento della sezione di calcestruzzo, anticipando notevolmente la fessurazione e aumentando il danneggiamento diffuso alla base del muro;
- per il controllo di fessure con ampiezza inferiore a 0.3 mm, l'armatura tradizionale risulta essere poco efficace (poiché si attiva solo a seguito di deformazioni maggiori), mentre può avere effetti benefici l'inserimento di fibre d'acciaio;



- L'ottimizzazione del rinforzo si può ottenere utilizzando contemporaneamente fibre e armatura tradizionale.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano ringraziare il CTG Italcementi Group che ha finanziato la ricerca. Un ringraziamento particolare è rivolto al Dott. Enrico Borgarello, responsabile per la ricerca e lo sviluppo del CTG, per il sostegno alla ricerca.

Gli Autori ringraziano infine gli Ingegneri Alessandro Morbi e Alex Cappa per la collaborazione nello svolgimento della ricerca.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] G. Plizzari, A. Meda, C. Zanotti, Studio numerico sul rischio di prematura fessurazione delle opere in calcestruzzo. Technical Report, Università degli Studi di Brescia, Dipartimento DICATA (in corso di pubblicazione, 2009).
- [2] ACI 224.1R-05. Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete. American Concrete Institute.
- [3] Holt, E.E.. Early age autogenous shrinkage of concrete, Technical Research Centre of Finland, ESPOO 2001, VVT Publications 446 (2001).
- [4] EUROCODICE 2 . Progettazione delle strutture in calcestruzzo – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici. UNI – EN 1992-1-1 (2005).
- [5] J.P. Romualdi, G.B. Batson, J. of the American Institute, 60 (1963) 775.
- [6] S.P. Shah, B.V. Rangan, ACI Journal Proceedings, 68(2) (1971) 126.
- [7] M. di Prisco, R. Felicetti, G.A. Plizzari, Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concretes (FRC), Varenna (Italy), September 20-22, RILEM PRO 39, Bagnaux (France), (2004) 1514.
- [8] J.G.M. Van Mier, Proc. of the 6th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete (BEFIB 2004), Varenna, Lake Como, Italy, 20-22 September (2004).
- [9] R. Gettu, Proceedings of the Seventh Intl. RILEM Symp. on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications, BEFIB-2008, 17-19 September, (2008) 1154.
- [10] TNO DIANA BV. Diana-9 User's Manual. Delft, The Netherlands (2005).
- [11] J.C. Rots, Computational modeling of concrete fracture. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (1988).
- [12] H.A.W. Cornelissen, D.A. Hordijk, H.W. Reinhardt, Heron, 31 (1986) 2.
- [13] CEB-FIP MODEL CODE, Comité Euro-International du Béton (1990).
- [14] L. Cominoli, A. Meda, G. Plizzari, Proc. of the Third Int. Conf. on Construction Materials, Vancouver, Canada (2005).
- [15] C. Zanotti, S.Cangiano, A.Meda, G. Plizzari, Atti delle Giornate AICAP'09, Pisa, 14-16 Maggio (in corso di pubblicazione, 2009).
- [16] M. Nilsson, Restraint factors and partial coefficients for crack risk analyses of early age concrete structures. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, 19 (2003).
- [17] ACI 207.2R-95. Effect of restraint, volume change and reinforcement on cracking of mass concrete. American Concrete Institute.