

Un approccio pratico al calcolo numerico del calcestruzzo fibrorinforzato

Paolo Segala, CEO CSPfea

Introduzione

Sebbene le principali Norme e Codici¹ relative al calcolo delle strutture in calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) propongano metodi analitici, approssimati o empirici per il progetto, quando le strutture si discostano dalle forme tradizionali (trave a sezione rettangolare) non resta che ricorrere all'Analisi ad Elementi Finiti (FEA). Come spesso accade, anche la valutazione degli Stati Limite di Servizio di un calcestruzzo fessurato risulta più laboriosa della valutazione di Stati Limite Ultimi e l'approccio FEA mediante una analisi non lineare diventa, di fatto, indispensabile. Gli strumenti di calcolo oggi disponibili permettono di affrontare questo problema in maniera agevole, ma questo non deve far dimenticare che si tratta di una analisi da affrontare con rigore e metodo. Per tale motivo, in accordo a Linee Guida accettate da associazioni di riferimento quali NAFEMS² e ASME³ (riprese di recente dall'Autore⁴) si seguiranno una serie di passi che guideranno alla corretta creazione e simulazione (Modeling & Simulation) di un modello di struttura in FRC, alla Verifica dei risultati e alla Validazione degli stessi (Verification & Validation).

I Softwares

La simulazione realistica di calcestruzzi FRC (così come quella dei calcestruzzi armati tradizionali) richiede software con specifiche caratteristiche: la capacità di generare e controllare mesh accurate del modello geometrico, modelli di materiale che considerino la meccanica non lineare della frattura, algoritmi di convergenza avanzati come l'Arc-Lenght. La letteratura mostra come tra i software più utilizzati, sia in ricerca che in applicazioni professionali, vi siano DIANA (TNO-DIANA), ABAQUS (Dassault-Simulia) e Athena (Cervenka). Una alternativa con un conveniente rapporto qualità prezzo è MIDAS/FEA (MIDAS IT).

Modeling: tipi di elementi finiti e mesh

In genere la geometria della struttura in calcestruzzo viene modellata mediante mesh di elementi finiti di volume (3D), a 8 nodi, con formulazione isoparametrica, basata su funzioni di forma lineari e integrazione su punti Gauss.

¹ RILEM TC 162-TDF (2003) "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete"; CEB/Fib "Model Code" 2010; CNR-DT 204/2006: "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato".

² NAFEMS, "What is Verification and Validation?", 2009

³ ASME V&V 10, "Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics", 2007

⁴ P. Segala, "La Validazione e la Verifica dei modelli di calcolo strutturale: gli standard internazionali e le procedure dei produttori software", Structural Modeling n°5, www.structural-modeling.it

Le geometrie delle barre di armatura possono essere modellate mediante elementi 1D (beam), mentre per le reti elettrosaldate è disponibile un apposito elemento 2D che richiede di specificare diametri e passi nelle due direzioni (Figg. 1 e 2).

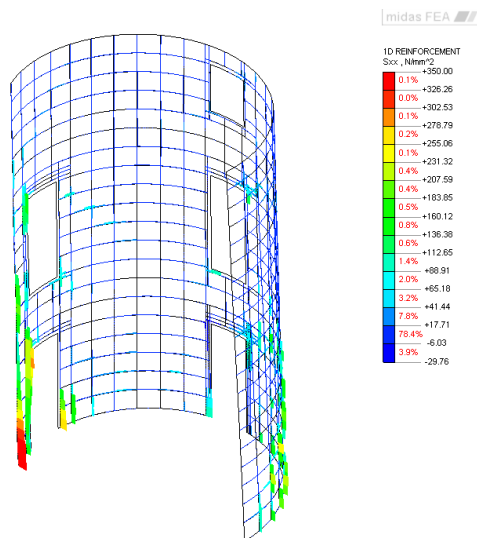


Figura 1: tensioni nelle armature di una parete armata con rete e barre aggiuntive attorno alle aperture

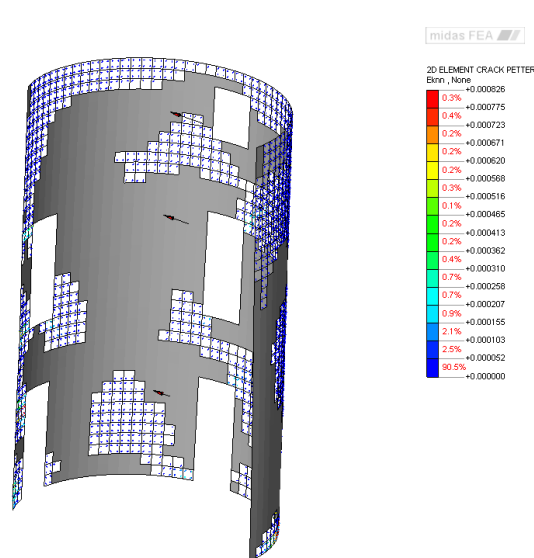


Figura 2: Stato fessurativo della parete in CA soggetta a un carico laterale

Il collegamento tra acciaio e calcestruzzo può avvenire con due approcci: “bond slip”, specificando una legge non lineare di attrito fino a rottura con sfilamento, o “embedded”, dove la connessione tra i due materiali non necessita di nodi coincidenti essendo realizzata da *rigid link* automaticamente generati. Il legame bond-slip viene proposto nel Model Code per calcestruzzi ordinari mentre per un FRC alcuni testi⁵ consigliano di scegliere ancora il legame del Model Code per un calcestruzzo con equivalente resistenza a compressione. Il secondo approccio, più semplice, permette comunque una buona stima delle capacità ultime della sezione.

Modeling: modelli costitutivi

Per modellare i fenomeni fessurativi è necessario un modello di meccanica non lineare della frattura al quale associare dei diagrammi $\sigma - \epsilon$ del calcestruzzo e dell'acciaio di armatura. Mentre la relazione $\sigma - \epsilon$ del calcestruzzo a compressione è ben nota, per il comportamento a trazione (sia di un calcestruzzo FRC che normale) è possibile riferirsi al Fib Model Code⁶ e alle CNR-DT 207⁷. Il comportamento a trazione e i fenomeni di fessurazione vengono desunti da prove sperimentali ottenendo un diagramma $\sigma - w$ che mette in relazione le tensioni di trazione σ con l'apertura delle fessure w : l'area di questo diagramma rappresenta la cosiddetta energia di frattura G_f che viene

⁵ A. Jansson, “Fibres in reinforced concrete structures - analysis, experiments and design” 2008, ISSN 1652-9146, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

⁶ Model Code 2010 Par. 5.1.5. “Tensile strength and fracture properties”, e Par. 5.6 “Fibres/fibre-reinforced concrete”

⁷ CNR-DT 204/2006 Par. 2.5.2.2. “Comportamento a trazione”

dissipata durante la fessurazione. Per un calcolo FEA sarà necessario convertire la w in deformazione ε . Consideriamo due casi.

Calcestruzzo ordinario. Assumendo il verificarsi di fenomeni di bond slip, e nota la curva $\sigma - w$ (della quale il software propone diversi modelli parametrici desunti da letteratura) per un determinato calcestruzzo, la ε si ottiene usualmente dividendo w per la larghezza media h di un elemento finito (poiché la fessura può essere ragionevolmente localizzata nell'ambito di un unico elemento finito). Il software, richiede G_f , h , la scelta la forma della curva (Fig. 3), calcolando il corrispondente diagramma $\sigma - \varepsilon$. In assenza di dati sperimentali, il Model Code 2010 propone $G_f = 73 f_{cm}^{0.18}$ [N/m], un diagramma classico è quello "Exponential" riportato in Fig.3, mentre la larghezza media di un elemento 3D è pari a $\sqrt[3]{V}$.

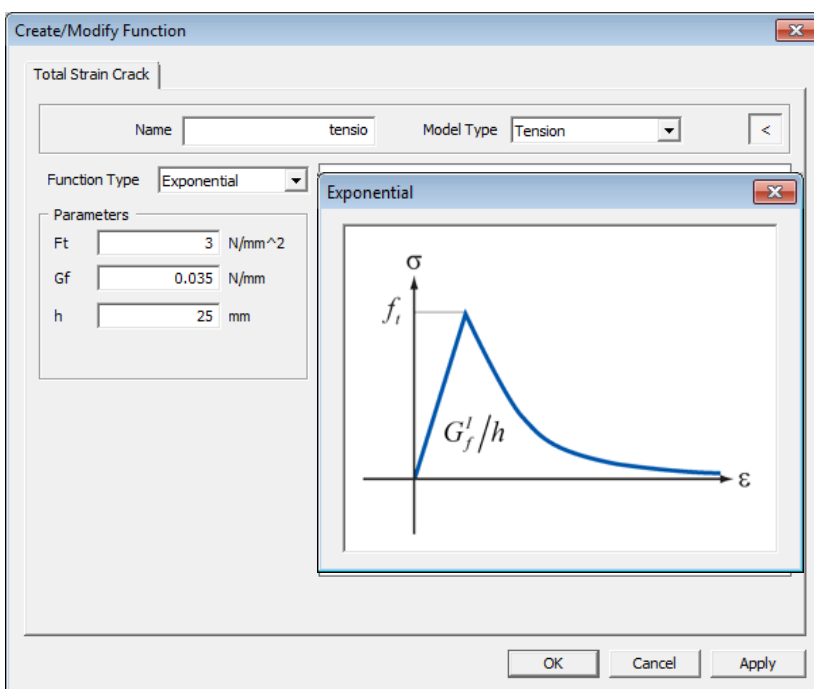


Figura 3: Diagramma Exponential

Calcestruzzo fibrorinforzato. Gli FRC possono avere curve σ - w degradanti fino a incrudenti in funzione di molti fattori. Va posta attenzione alla eccessiva semplificazione: curve σ - w idealizzate come quelle di Fig. 5, pur essendo ragionevoli per predire SLU, spesso non sono sufficienti a modellare lo sviluppo delle fessure e quindi gli SLE. È consigliabile utilizzare un diagramma "User Defined", definendo la curva per punti (Fig. 4), desunta da diagrammi σ - w ottenuti con prove. Va considerato inoltre che la presenza delle fibre comporta fessure meno localizzate ed elementi finiti adiacenti alla fessura soggetti a tensioni maggiori perché coinvolti dal lavoro di "cucitura" delle fibre. L'ipotesi di localizzazione di una fessura in un singolo elemento finito non è più ragionevole e per calcolare correttamente l'energia di frattura sarà necessario mediare su più elementi: la larghezza da assumere per convertire w in ϵ dovrà essere maggiore di h .

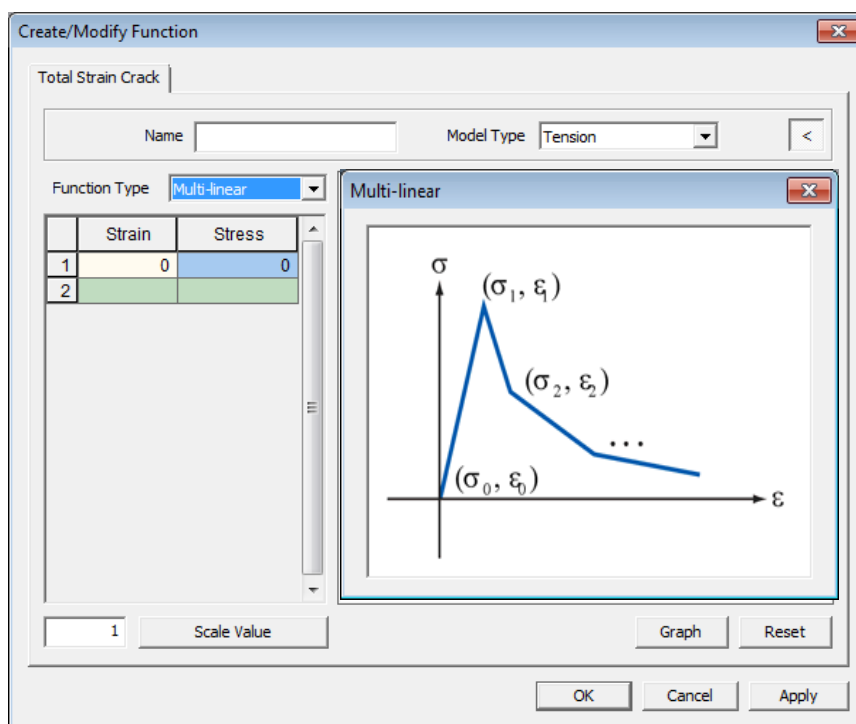


Figura 4: Diagramma "Multilinear"

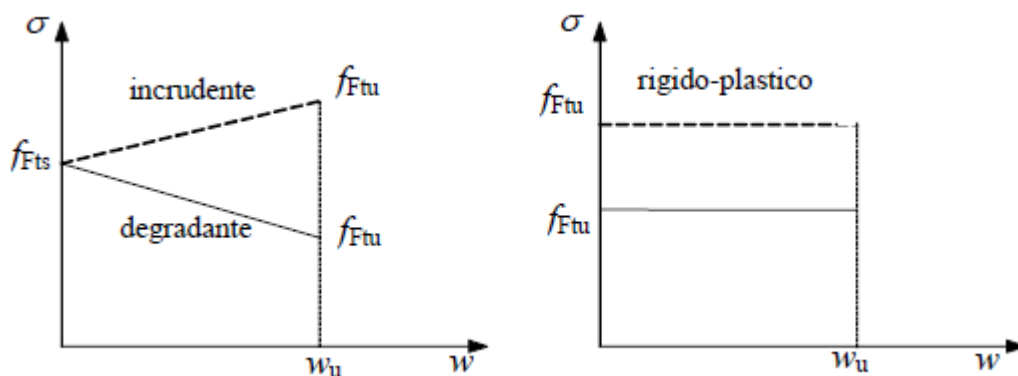


Figura 5: Legami costitutivi semplificati di FRC (CNR-DT 204)

I diagrammi $\sigma - \epsilon$ scelti per la trazione e la compressione sono associati ad un Modello di meccanica della frattura “smeared” Total Strain Crack (Fig. 6). *Total Strain* indica che non si distingue tra i tipi di deformazione Primaria e Secondaria, limitazione che si è dimostrata accettabile. La fessura potrà essere *rotating* (la faccia della fessura resta ortogonale alle direzioni principali) o *fixed*. La fessura viene numericamente “spalmata” (*smeared crack*) lungo gli elementi finiti, sebbene i punti Gauss restino gli indicatori puntuali di apertura della fessura nella mesh.

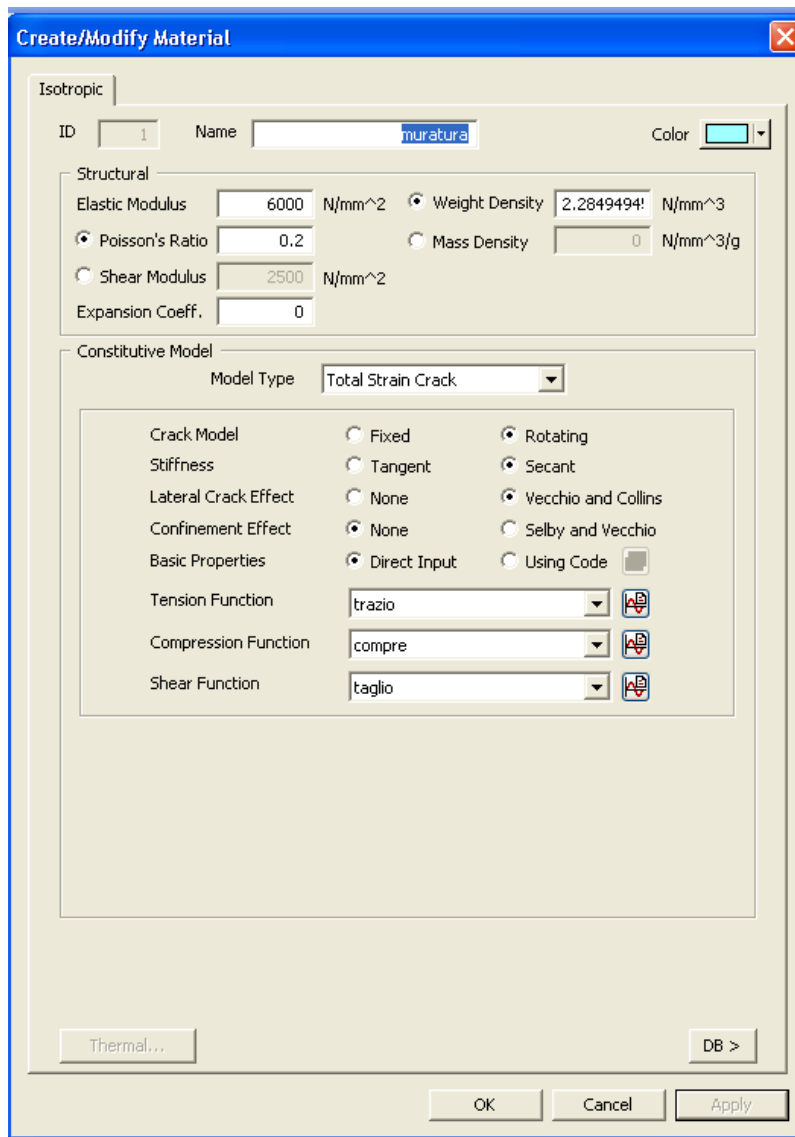
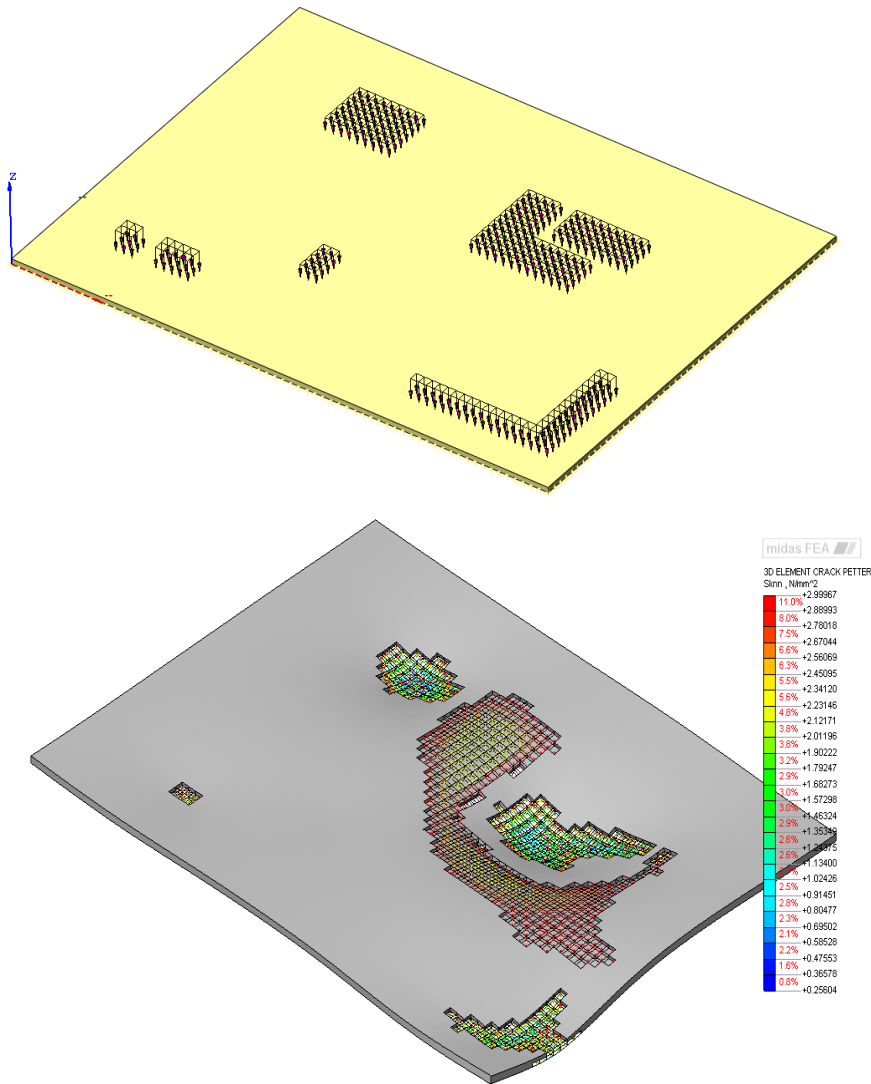


Figura 6: Parametri del modello Total Strain Crack

Analisi (Simulation)

Una volta definiti mesh e materiali, vincoli e carichi, è possibile eseguire una analisi non lineare statica. Visto il carattere softening dei materiali sia a trazione che a compressione, è raccomandabile attivare l’algoritmo di convergenza “Arc-Lenght”.

La lettura dei risultati prevede spostamenti, deformazioni, tensioni, elementi finiti fessurati, stato delle fessure (parzialmente aperta, aperta, ri-chiusa) come mostrato in Fig. 7.



[UNIT] N , mm
[DATA] nonlineare(Structural Nonlinear) , nonlineare(0.7) , LO-SOLID,Voim-Sknn

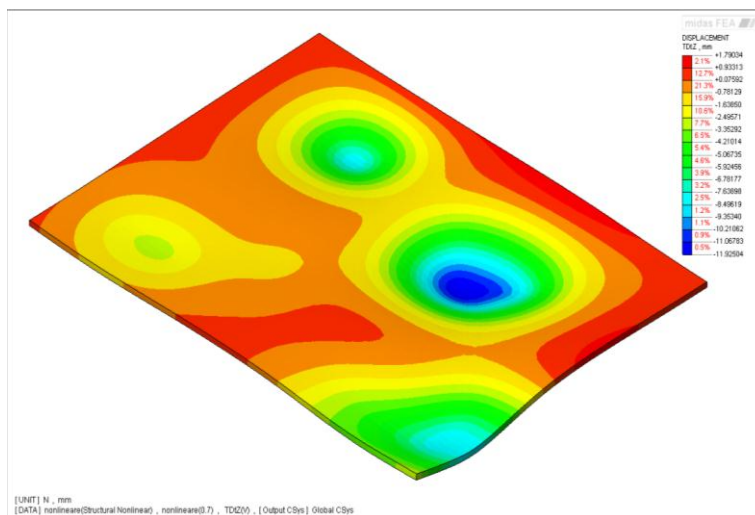


Figura 7: lettura dei risultati in termini di spostamenti, deformazioni, tensioni, elementi finiti fessurati, stato delle fessure (parzialmente aperta, aperta, ri-chiusa).

Verifiche (Calculation and Code Verification)

La Verifica di una applicazione dell'analisi FEA alla fessurazione di calcestruzzi può essere ottenuta con le formulazioni chiuse presenti nelle Norme già citate. Un buon esempio di verifica del calcolo della fessurazione di una trave in CA è consultabile sul numero 5 di Structural Modeling⁸. La Verifica del Codice di Calcolo (Code Verification) è invece effettuata con Casi Prova (Benchmarks) riportati nella documentazione del Software. Resta da sottolineare la necessità, per analisi FEA di meccanica della frattura, di studi di sensitività variando i parametri chiave (curve $\sigma - \epsilon$, energia di frattura G , larghezza di banda h), nonché il grado di infittimento della mesh.

Validation

La Validazione si effettua riproducendo prove sperimentali. E' raro poter avere una tale occasione in ambito professionale, tuttavia un buon esempio è il lavoro di preparazione di "Linee Guida per analisi non lineari di strutture in calcestruzzo: Travi (Parte 1) e Lastre (Parte 2)", svolto presso il TU Delft da P. Feenstra, B. Belletti e M. Hendriks⁹.

⁸ F. Giussani, F. Mola: "L'analisi di elementi di calcestruzzo armato in fase fessurata", Structural Modeling n°5/2011, www.structural-modeling.it

⁹ PhD. Ing. Beatrice Belletti, beatrice.belletti@unipr.it