

## INTRODUZIONE

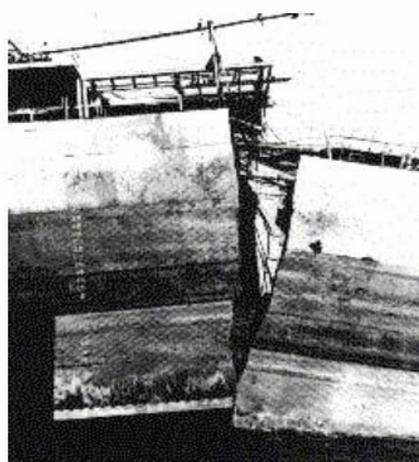
Lo sviluppo di tecniche sperimentali e di metodi d'ispezione non distruttivi ha consentito in passato di riconoscere che ogni struttura contiene fessure e/o difetti e che la loro presenza non significa che la struttura sia insicura e non dia affidamento ma che necessita di un monitoraggio. Sin dai tempi più antichi i materiali utilizzati nelle costruzioni quali, ad esempio, i blocchi di pietra usati negli edifici a carattere monumentale, presentavano difetti e/o fessure, dovuti a caratteristiche intrinseche del materiale stesso e/o ad una loro non corretta posa in opera, che originavano tensioni elevate causa, talora, della rottura dei blocchi stessi.

I materiali e le loro combinazioni hanno sempre contribuito a definire non solo le caratteristiche estetiche ma, principalmente, a garantire la resistenza e la durata nel tempo di tutte le strutture.

La presenza di questi difetti o fessure, unitamente all'applicazione dei carichi e ad alcuni processi fisici possono dar luogo a fenomeni di danneggiamento che portano a rottura. Ogni componente strutturale, infatti, nel momento in cui è posto in esercizio, possiede dei difetti considerati accettabili che durante il periodo di funzionamento possono accrescersi a causa di meccanismi di degradazione legati alle condizioni di carico o alle proprietà chimico-fisiche dell'ambiente di lavoro (fatica, *tearing*, tensocorrosione, ecc).

La presenza di fessure può modificare le tensioni locali fino a tal punto che le analisi delle tensioni elastiche fatte dal progettista sono insufficienti. Quando una fessura raggiunge una certa lunghezza critica, essa può propagarsi in modo catastrofico senza alcun avvertimento e con valori di tensione di gran lunga inferiori a quelli che in condizioni normali provocherebbero lo snervamento o la frattura di un campione soggetto a trazione. Vi sono alcuni casi in cui strutture anche di notevoli dimensioni possono cedere dividendosi in due parti per propagazione istantanea di una frattura preesistente.

Questo tipo di cedimento venne evidenziato intorno agli anni '20-'30 quando in campo navale si diffusero le costruzioni saldate. La figura seguente riporta la rottura della petroliera Schenechtady provocata da una frattura innescatasi in corrispondenza di una giunzione.



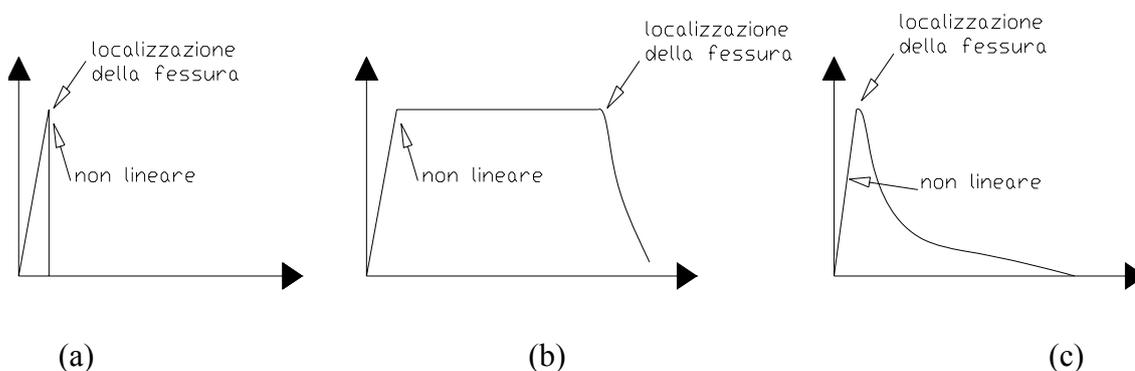
**Fig. 1** - Frattura di tipo fragile delle navi Liberty .

Le due superfici di frattura sono nette, di tipo fragile e senza traccia di grandi deformazioni né di strizione. Questa rottura improvvisa trae le sue origini da difetti di saldatura o dall'azione di carichi ripetuti e si presenta come una piccola lesione al cui apice il raggio di curvatura è piccolissimo.

La presenza di fessure nelle moderne strutture in calcestruzzo non è sempre indice di pericolo di collasso, anche se la fessurazione può limitare pesantemente la funzionalità dell'opera ; in alcuni casi può, però, verificarsi che, nel momento in cui il difetto raggiunge la dimensione critica, venga compromessa la capacità di sostenere i carichi e si possa avere la rottura catastrofica dell'elemento strutturale. Carichi ed ambienti aggressivi portano ad una crescita delle fessure presenti in un componente; fessure molto ampie, infatti, oltre a determinare un incremento della deformabilità, permettono all'acqua ed alle sostanze aggressive di penetrare e di corrodere gli elementi componenti, compromettendo l'integrità del manufatto e le sue prestazioni nel tempo. La resistenza di ogni materiale è strettamente legata ai difetti che sono sempre presenti. A tal proposito, infatti, è importante evidenziare che i materiali che costituiscono gli elementi strutturali spesso non forniscono delle resistenze adeguate ed, a volte, sono soggetti a rotture improvvise per sollecitazioni inferiori alla resistenza a rottura del materiale senza che si abbiano deformazioni macroscopiche apprezzabili. Tutto ciò è imputabile alle differenti proprietà (legame costitutivo tensione-deformazione  $\sigma$ - $\epsilon$ ) dei materiali impiegati, proprietà che consentono di suddividerli in tre categorie differenti : materiali fragili, materiali duttili, materiali quasi-fragili.

I primi hanno una limitata capacità di deformarsi plasticamente e pervengono a rottura in modo improvviso per deformazioni molto piccole quindi nella regione reversibile della curva  $\sigma$ - $\epsilon$ .; il valore della tensione, infatti, tende improvvisamente a zero non appena si manifesta la fessurazione. Inoltre essi possiedono, anche in corrispondenza di tensioni molto piccole, che si avvicinano allo zero, uno spiccato comportamento non lineare ed una sensibile differenza tra comportamento a trazione e comportamento a compressione; a tal proposito, il rapporto tra resistenza a trazione e resistenza a compressione è inferiore all'unità . Al contrario i materiali duttili sono quelli che presentano una fase di snervamento molto estesa ( $\epsilon_y$ - $\epsilon_s$ = 1%) ed, in particolare, sono caratterizzati da una prima fase elastica seguita, con il crescere delle intensità

delle azioni sollecitanti, da una fase elasto-plastica in cui il materiale pervenuto allo snervamento diventa sede di deformazioni plastiche. Per i materiali duttili il rapporto tra resistenza a trazione e resistenza a compressione è vicino all'unità.

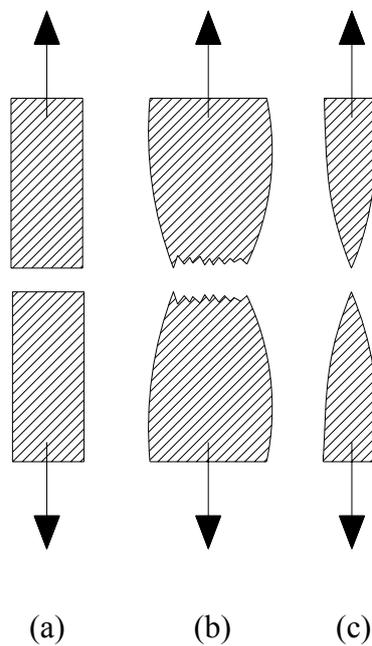


**Fig. 2** - Differenti tipi di risposta del materiale, tensione uniaassiale e deformazione. (a) materiale elasto-fragile; (b) materiale duttile a comportamento elasto-plastico; (c) materiale elastico quasi-fragile (tension-softening model).

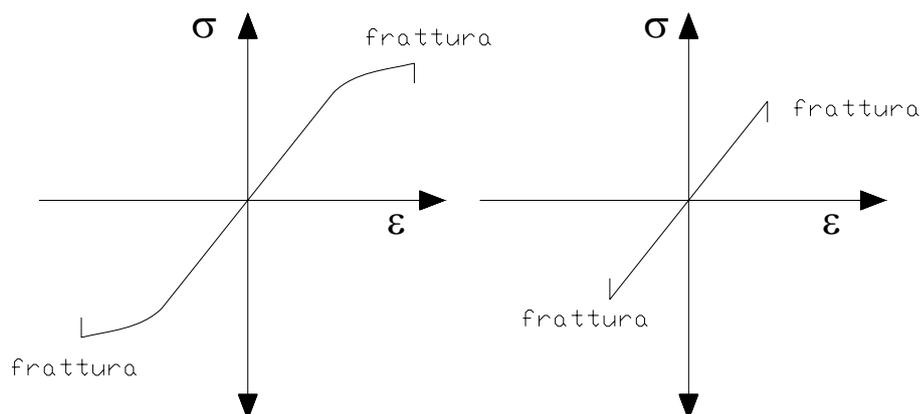
Un materiale quasi-fragile è, invece, caratterizzato da una graduale diminuzione della tensione dopo il raggiungimento del valore della tensione di picco (valore della tensione oltre il quale si ha la fessurazione). Le diversità nei comportamenti delle suddette categorie di materiali dipendono, pertanto, dai differenti meccanismi microscopici di danneggiamento che cambiano da categoria a categoria. In alcune tipologie di materiali la rottura o frattura del materiale, cioè la sua separazione in due o più parti sotto l'applicazione di uno sforzo, avviene più o meno rapidamente per la propagazione di cricche, discontinuità o microporosità, inclusioni di sostanze estranee, profondi graffi superficiali e dipende dalle loro dimensioni, dallo stato tensionale, dalle caratteristiche del materiale, dalla geometria dell'elemento posto nei pressi del difetto e dalla temperatura. I difetti o fessure presenti inizialmente continuano a crescere al crescere del carico esterno dando luogo a fessure più grandi.

Nella frattura fragile quando le cricche hanno raggiunto una determinata dimensione critica si estendono in modo rapidissimo (velocità dell'ordine della velocità del suono nel materiale) e spontaneo senza bisogno di aumentare lo sforzo applicato. Nei materiali duttili, invece, l'estensione della cricca è lenta ed accompagnata da considerevole deformazione plastica in prossimità della fenditura e

richiede spesso un aumento dello sforzo applicato per continuarne l'accrescimento. In generale la frattura di un materiale duttile, come ad esempio il rame (Cu), avviene in campo plastico, dopo che esso è stato permanentemente deformato; pertanto l'energia messa in gioco dal fenomeno plastico può costituire parte predominante dell'energia globale necessaria alla frattura. Si capisce perciò perché per le opere d'ingegneria si scelgano materiali che, nelle condizioni di esercizio previste, presentino una frattura di tipo duttile, essendo essa preceduta da un progressivo cedimento plastico del materiale che segnala l'imminente frattura e consente di adottare misure preventive.



**Fig. 3** - (a) Frattura fragile senza alcuna deformazione plastica; (b) frattura moderatamente duttile dopo una certa strizione; (c) Frattura altamente duttile in cui il provino striziona fino ad un punto .



**Fig. 4** - Curve in compressione e trazione per un materiale duttile (sinistra) e fragile (destra). Il materiale duttile può sopportare un ampio intervallo di deformazione plastica prima di arrivare alla rottura, mentre la frattura di un materiale fragile avviene senza deformazione plastica .

Per questo motivo, la prevenzione ed il controllo del quadro fessurativo sono stati considerati, fin dalla seconda metà del secolo scorso, esigenze di primaria importanza per la durabilità delle strutture. A tal proposito, infatti, si è resa necessaria una comprensione accurata dei fenomeni di inizio e propagazione della fessurazione allo scopo di prevenire la frattura delle strutture stesse.

La formazione di fessure è, indubbiamente, uno dei fenomeni non lineari più importanti che regola il comportamento delle strutture in calcestruzzo. L'esistenza di difetti o fessure non può essere impedita, però, è possibile, in tale direzione, fornire dei criteri per la conservazione delle strutture che si basano sull'utilizzo di margini di sicurezza minori. In un contesto di tale tipo la Meccanica della Frattura ha, pertanto, fornito per la prima volta la possibilità di riconoscere che tutte le strutture contengono difetti iniziali nella forma di fessure, vuoti o inclusioni che possono influenzare la capacità portante delle strutture e che possono determinare l'eventuale rottura delle strutture stesse. Questa disciplina costituisce la prima branca della meccanica dei solidi che si è occupata dello studio del comportamento meccanico di materiali soggetti ad un carico applicato; in particolare essa studia i processi irreversibili di rottura delle strutture dovuti alla formazione, manifestazione e crescita delle fessure e ne calcola la resistenza .

L'importanza di ridurre la fessurazione e di ottenere dei materiali da costruzione con prestazioni migliori assume, quindi, un ruolo determinante nella progettazione strutturale ed ha fatto in modo che venissero sviluppate numerose

ricerche rivolte alla produzione di tecnologie avanzate. Nel corso degli anni, infatti, sono state sperimentate soluzioni innovative a cominciare dall'aggiunta di barre d'acciaio fino ad arrivare ai compositi di ultimissima generazione come i calcestruzzi ad alte prestazioni, gli autocompattanti ed ancora i calcestruzzi rinforzati con fibre in acciaio o di altro materiale.

In particolare i calcestruzzi fibrorinforzati o fiber reinforced concrete (FRC) consentono di rinforzare il calcestruzzo mediante l'aggiunta, alla matrice di calcestruzzo di fibre corte o lunghe, distribuite omogeneamente, che costituiscano un ostacolo alla frattura del composito.

L'aggiunta di fibre aumenta in modo significativo la resistenza residua a trazione, detta anche tenacità in fase fessurata che dipende dal rapporto d'aspetto della fibra, dalla sua percentuale volumetrica e dalle sue caratteristiche fisico meccaniche, determinando negli elementi strutturali un comportamento di tipo duttile, in grado di conferire alle strutture un aumento del carico ultimo ed una migliore resistenza alla fatica. In sintesi le fibre forniscono al materiale composito risultante un aumento della resistenza alla frattura e, di conseguenza, della capacità portante e della duttilità degli elementi strutturali.

La fibra, infatti, svolge, in corrispondenza delle fessure presenti nel conglomerato, un'azione di richiusura delle stesse, rallentando il processo di fessurazione, ridistribuendo le tensioni e modificando in tal modo il meccanismo di formazione e di apertura delle fessure. L'uso del calcestruzzo fibrorinforzato è particolarmente indicato sia per aumentare la durabilità delle strutture in c.a., poiché riduce l'ampiezza delle fessure, che per eliminare la fragilità dei calcestruzzi ad alta resistenza.

La tecnica del calcestruzzo fibrorinforzato è stata usata a partire dagli anni '60 quando ancora la maggior parte dei ricercatori e degli ingegneri non aveva intuito il reale vantaggio che essa avrebbe potuto dare alla realizzazione delle strutture. In particolare agli inizi non ci si accorse dei miglioramenti che l'impiego di fibre unitamente alle applicazioni delle teorie della Meccanica della Frattura avrebbero fornito nel campo delle costruzioni ingegneristiche.

A tal proposito, infatti, i criteri della Meccanica della Frattura non lineare consentono di studiare, sulla base dei differenti approcci che essa prevede e che si

fondano su criteri di snervamento e di rottura, i percorsi di fessurazione ed i valori delle tensioni in corrispondenza delle fessure. Sulla base di questi studi e previsioni è possibile scegliere il tipo di fibra da utilizzare, le proprietà da attribuirgli e tutte le caratteristiche che meglio si addicono a risolvere il problema della fessurazione.

Gli approcci della NLFM consentono di valutare le dimensioni delle fessure, le loro direzioni preferenziali, i valori delle tensioni etc e sulla base di tutto ciò consentono al progettista di utilizzare fibre di rinforzo tali da ridurre i processi fessurativi e fornire al materiale caratteristiche di resistenza più elevata rispetto a quelle che avrebbero senza l'aggiunta del rinforzo fibroso.

Il presente lavoro di tesi affronta le problematiche relative alla definizione del comportamento dei calcestruzzi fibrorinforzati cioè svolge degli studi approfonditi sull'uso delle fibre corte nel calcestruzzo strutturale, allo scopo di analizzare e confrontare le differenti proprietà del calcestruzzo senza fibre e di quello con fibre. In modo particolare il suo obiettivo fondamentale è quello di analizzare, da un punto di vista numerico cioè mediante modellazioni agli elementi finiti con il software commerciale Diana, il comportamento dei calcestruzzi fibrorinforzati sottoposti a sollecitazione di flessione semplice in condizioni di fessurazione diffusa (smeared crack) secondo le teorie della Meccanica della Frattura non lineare.

Nel Capitolo 1 vengono descritti i principi fondamentali che riguardano i differenti campi che compongono la Meccanica della Frattura e che sono necessari alla comprensione dei fenomeni di rottura che si manifestano nei materiali utilizzati nelle strutture in c.a. . In particolare nella prima parte del capitolo vengono descritti i principi della Meccanica della frattura lineare e nella seconda quelli della meccanica della frattura non lineare.

Il Capitolo 2 descrive ed analizza i modelli materiali che consentono di studiare le caratteristiche non lineari dei calcestruzzi semplici e fibrorinforzati con particolare attenzione ai modelli di fessurazione discreta (discrete crack models) e diffusa (smeared crack models) che consentono di superare i limiti posti dalla meccanica della frattura non lineare allo studio delle strutture e dei materiali quasi fragili come il calcestruzzo soggetti a fessurazione.

Nel Capitolo 3 vengono descritti, dopo aver fatto una breve introduzione sul metodo degli elementi finiti e sui vantaggi che esso offre rispetto ai precedenti metodi

di risoluzione delle strutture, i concetti di base che regolano il funzionamento del software utilizzato per le modellazioni, evidenziando le sue potenzialità ed i suoi campi d'applicazione.

Il Capitolo 4 vede la descrizione dei calcestruzzi fibrorinforzati con particolare attenzione verso le origini di questa tecnica, verso i differenti tipi di fibre disponibili in commercio con descrizione delle loro proprietà e soprattutto del notevole contributo che offrono alle miscele di calcestruzzo in termini di durabilità, duttilità, tenacità, resistenza all'abrasione, all'urto etc. L'uso delle fibre, risalente ai tempi degli antichi Egizi, infatti, migliora le prestazioni del calcestruzzo aumentando la sua resistenza e modificando il suo comportamento da fragile in duttile.

Nel Capitolo 5 vengono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche, effettuate con il software Diana. La prima parte è dedicata ai risultati relativi all'analisi del comportamento a flessione di provini, intagliati in mezzeria, di calcestruzzo semplice e rinforzati con fibre polimeriche; nella seconda parte sono, invece, riportati i risultati delle modellazioni sviluppate su travi in calcestruzzo armato con barre d'acciaio ad aderenza migliorata, realizzate con calcestruzzo semplice e travi armate in calcestruzzo rinforzate con fibre d'acciaio.

Gli scopi delle simulazioni hanno riguardato l'analisi del reale comportamento del calcestruzzo nella fase fessurativa e la valutazione del contributo offerto dalle fibre in termini di tenacità e di duttilità e l'efficacia della modellazione numerica basata sulla meccanica della frattura nel predire il comportamento strutturale di elementi in calcestruzzo fibrorinforzato.

Dall'analisi dei risultati delle modellazioni è emerso che l'aggiunta di fibre corte discrete migliora il comportamento post-fessurazione del calcestruzzo, aumentando in modo significativo la duttilità dell'FRC e la sua resistenza a trazione e lasciando pressochè invariata la sua resistenza a compressione.

Il contributo offerto dalla Meccanica della Frattura allo studio dei calcestruzzi fibrorinforzati è notevole; questa disciplina, infatti, consente di definire in modo accurato il comportamento fessurativo dei compositi analizzati evidenziando le differenze tra i valori del momento e del carico ultimi riscontrati nei calcestruzzi semplici e quelli riscontrati nei calcestruzzi rinforzati con fibre.