

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
“FEDERICO II”**



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA

PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

**DIPARTIMENTO DI STRUTTURE
PER L'INGEGNERIA E L'ARCHITETTURA**

TESI DI LAUREA

VERIFICA DI ELEMENTI IN C.A. AGLI STATI LIMITE DI

DEFORMABILITA' E APERTURA DELLE FESSURE

Relatore

Ch.mo Prof. Ing. Gerardo Mario Verderame

Correlatore

Ing. Maria Teresa De Risi

Candidato

Orrico Ilenia

Matr. N49/094

ANNO ACCADEMICO 2012/2013

ABSTRACT

Lo Stato Limite di Esercizio (SLE) viene definito come un qualunque stato, anche di danneggiamento locale al di là del quale non sono più soddisfatte le prestazioni necessarie per il corretto funzionamento in esercizio della struttura, anche in termini di durabilità della struttura o di estetica. Gli SLE più importanti sono *lo stato limite di fessurazione*, *lo stato limite di deformazione*, *lo stato limite di tensione*, *lo stato limite di vibrazione* e *lo stato limite per fatica*.

Nel lavoro di tesi, si è concentrata l'attenzione su due stati limite di esercizio particolarmente importanti per le opere in c.a., ovvero lo stato limite di apertura delle fessure e quello di deformabilità.

La fessurazione deve essere limitata ad un livello tale da non pregiudicare il corretto funzionamento della struttura e da renderne accettabile l'aspetto da un punto di vista estetico. Un aspetto molto importante che bisogna tener presente è che la fessurazione è quasi inevitabile in strutture di calcestruzzo armato soggette a flessione, taglio, torsione o a trazioni indotte da carichi diretti o da deformazioni impresse impedito. Gli stati fessurativi indotti da azioni strutturali si articolano in *stato limite di decompressione*, *stato limite di formazione delle fessure* e *stato limite di ampiezza delle fessure*. Per quanto riguarda la decompressione, in talune situazioni non è ammessa alcuna trazione nel manufatto; il calcolo si riconduce, dunque, a una usuale analisi elastica con calcestruzzo reagente a trazione quanto a compressione, verificando che non si manifestino tensioni di trazione. Analogamente per lo stato limite di formazione delle fessure si considera il calcestruzzo reagente a trazione, e quindi si procede con le stesse modalità di calcolo del caso precedente; la verifica consiste nel controllare che la trazione massima non superi quella ammissibile, eventualmente con un certo coefficiente di sicurezza. Nel caso di flessione, la fessurazione si manifesta quando il momento applicato raggiunge il valore del momento di fessurazione, calcolato assumendo la sezione tutta reagente e imponendo che al lembo teso la tensione nel calcestruzzo sia

pari alla sua resistenza a trazione. Per lo stato limite di ampiezza delle fessure è possibile effettuare un'analisi locale utilizzando i legami costitutivi dei materiali, ma questa risulta essere una procedura di tipo raffinato molto spesso troppo complessa. Introducendo le deformazioni medie in senso integrale dell'acciaio e del calcestruzzo teso tra due fessure l'ampiezza media delle fessure si può esprimere come prodotto tra la distanza media delle fessure e la differenza delle deformazioni medie dell'acciaio e del calcestruzzo :

$$w_k = s_{rm} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (1)$$

Le deformazioni degli elementi strutturali devono essere limitate perché, se troppo grandi, oltre a dar luogo ad effetti fortemente antiestetici possono seriamente compromettere la funzionalità della struttura. Per gli elementi in cemento armato la valutazione analitica delle deformazioni, presenta sensibili difficoltà a causa dell'insorgere della fessurazione nelle parti tese. La procedura più raffinata per il calcolo delle deformazioni si basa sulla definizione di una curvatura "media" delle sezioni. Esaminando un concio di trave fessurato si individua la situazione di sezione parzializzata (Stadio 2) nelle sezioni in cui è localizzata la fessura, mentre all'interno del concio tra due fessure per l'effetto irrigidente del calcestruzzo teso ancora reagente il comportamento tende a quello di una sezione interamente reagente (Stadio 1) (Figura 1).

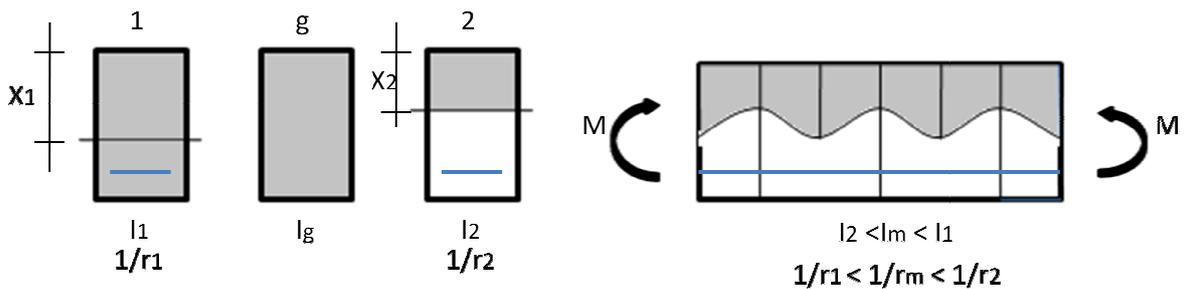


Figura 1

Mediando in tale tratto, i valori della curvatura valutati sezione per sezione, si ottiene il diagramma momento-curvatura media $1/r_m$ (figura 2), che è essenziale per il calcolo degli spostamenti.

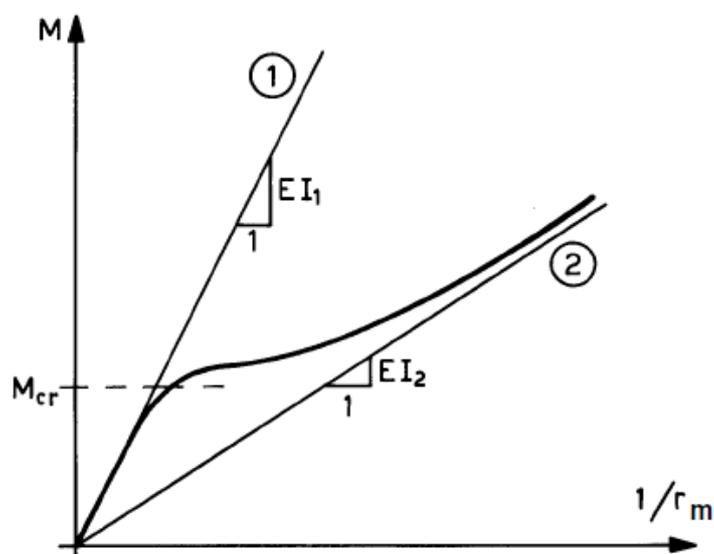


Figura 2

Secondo tale funzione risulta:

$$\frac{1}{r_m} = \frac{1}{r_1} \cdot \gamma + \frac{1}{r_2} \cdot (1 - \gamma) \quad (2)$$

con

$$\gamma = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_s} \right)^2 \quad (3)$$

La valutazione degli spostamenti, ed in particolare della freccia in mezzeria, viene effettuata mediante il Principio dei Lavori Virtuali.

I problemi degli stati limite di fessurazione e di deformazione sono entrambi strettamente legati al meccanismo con cui, dopo essersi verificata la fessurazione di alcune sezioni, il calcestruzzo teso, tramite l'aderenza con le barre di armatura, scambia sforzi con l'acciaio. Il contributo che il calcestruzzo continua a dare dopo la fessurazione, anche se limitatamente ai tratti compresi tra una fessura ed un'altra, fa sì che l'asta tesa risulti più rigida rispetto a quanto apparirebbe dal modello di comportamento di sezione fessurata. Questo contributo irrigidente del calcestruzzo teso è denominato *tension stiffening*.

Nello studio di tali stati limite è stata eseguita una revisione normativa considerando sia la normativa italiana – NTC '08 (D.M. 2008) e la Circolare 617/2009 – che quella europea – Eurocodice 2 (EC2) – in merito. Tali norme tecniche definiscono i principi per il progetto,

l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità. Esse forniscono quindi i criteri generali di sicurezza, precisano le azioni che devono essere utilizzate nel progetto, definiscono le caratteristiche dei materiali e dei prodotti, forniscono, nel caso degli SLE, limitazioni inerenti la deformabilità e l'apertura delle fessure.

Con riferimento a tali normative, si sono condotte alcune applicazioni numeriche per due casi studio per il calcolo delle fessurazioni e per il calcolo della freccia.

Con riferimento ad una trave vincolata con semplici appoggi agli estremi per la sezione in mezzeria è stata controllata la fessurazione dapprima senza calcolo diretto. La norma europea (EC2) dice chiaramente che nel caso di fessurazione indotta da carichi occorre rispettare limiti per il diametro delle barre oppure per la loro spaziatura (non contemporaneamente per entrambi). Con riferimento alla stessa trave è stata determinata successivamente, con calcolo diretto, l'ampiezza delle fessure nella zona di mezzeria nella combinazione di carico quasi permanente ed è stata confrontata con i limiti di normativa.

Nel secondo caso studio di riferimento è stata presa in considerazione una trave a spessore continua di due campate (figura 3) ed è stato verificato se le inflessioni potevano ritenersi accettabili controllando dapprima il solo rapporto luce/altezza.

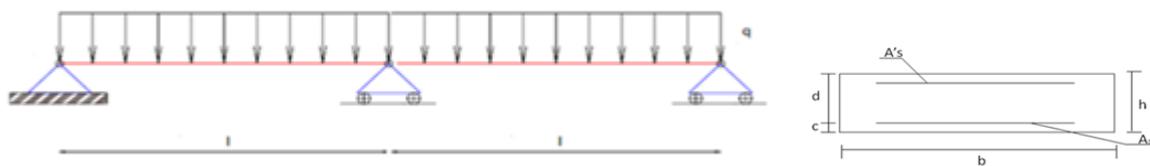


Figura 3

Con riferimento alla stessa trave è stata determinata poi la freccia mediante un calcolo diretto. Di norma tale calcolo viene effettuato se le indicazioni sul rapporto luce/altezza non sono rispettate, oppure se il committente richiede limiti di deformazione più stringenti.

Con riferimento a questi due casi studio, si sono fatti variare una variabile di input alla volta, tra i parametri geometrici e meccanici che governano il problema in analisi, mantenendo le altre

variabili costanti. I parametri presi in considerazione sono la base della sezione, l'altezza della sezione, l'area delle barre di acciaio, il copriferro, il diametro delle barre a parità di area ed infine la resistenza cilindrica caratteristica del calcestruzzo. Per ciascuno dei casi che si sono configurati è stata registrata una perturbazione dei dati rispetto ai due casi base. Tale indagine si configura come una sorta di "analisi di sensitività". Essa evidenzia i fattori il cui valore conviene meglio stimare, e quelli che risulta opportuno mantenere sotto stretto controllo in fase di esecuzione del progetto.

Al termine di tale indagine si è osservato che in fase di progettazione per limitare l'ampiezza delle fessure o il valore della freccia si può intervenire sui singoli parametri. Per ridurre l'ampiezza delle fessure occorre limitare il valore della base della sezione o del suo copriferro, aumentare la sua altezza, o ancora utilizzare un calcestruzzo che presenta un maggiore resistenza cilindrica caratteristica, o barre che presentano un diametro più piccolo (a parità di area di armatura longitudinale) oppure si può intervenire aumentando l'area delle barre di acciaio. Per limitare invece la freccia si può aumentare la base della sezione, o l'altezza della sezione, o ancora considerare un valore più piccolo del copriferro, o si può utilizzare un calcestruzzo che presenti una resistenza caratteristica più grande oppure aumentare l'area delle barre di acciaio.