Capitolo 1

Introduzione

Un elemento significativo nell'evoluzione delle costruzioni civili nella seconda metà del ventesimo secolo è stato lo sviluppo e l'uso delle strutture in calcestruzzo precompresso. La precompressione consiste nell'applicare uno stato di presollecitazione, generalmente tramite barre d'acciaio poste in tensione, per conferire al calcestruzzo la capacità di resistere a sforzi di trazione senza fessurarsi, come inevitabilmente accade nel cemento armato ordinario. Le prime realizzazioni di strutture in c.a.p. si hanno nel 1928 e si devono all'ingegnere francese Eugène Freyssinet , considerato il padre della precompressione. La diffusione della tecnica della precompressione si ha però solo negli anni '50, favorita dalla necessità di ricostruire i ponti distrutti dalla guerra. Oggigiorno è largamente impiegata negli impalcati dei ponti, nelle pile, nei contenitori per reattori nucleari e in genere in tutte quelle strutture che richiedono una notevole capacità portante, con limitate deformazioni e fessurazioni in condizioni di esercizio.

La precompressione si realizza principalmente mediante due sistemi costruttivi, il sistema a cavi pre-tesi e quello a cavi post-tesi, che si differenziano per la modalità di trasmissione delle forze di precompressione. Nelle strutture pretese tale trasmissione avviene attraverso le tensioni di aderenza che si sviluppano all'estremità dei cavi, mentre nelle strutture post-tese le armature sono sistemate all'interno di guaine e la precompressione si trasmette per tesatura dei cavi, facendo contrasto sulla trave stessa.

Una delle regioni più critiche negli elementi post-tesi è la zona in cui la forza di precompressione, che agisce su piastre di ancoraggio relativamente piccole, si diffonde nel calcestruzzo fino ad assumere una distribuzione di tensione lineare sulla sezione trasversale, come illustrato in Fig 1.1. Tale zona, definita zona di ancoraggio, si estende per il

principio di Saint Venant, fino ad una distanza dalla piastra di carico pari all'altezza della sezione. Durante la diffusione, le tensioni di compressione deviano dalla direzione parallela alla forza e ciò induce elevate tensioni trasversali di compressione immediatamente dopo la piastra di ancoraggio e successivamente tensioni trasversali di trazione. Il flusso di forze è ben rappresentato dal modello strut-and-tie riportato in Fig.1.1.

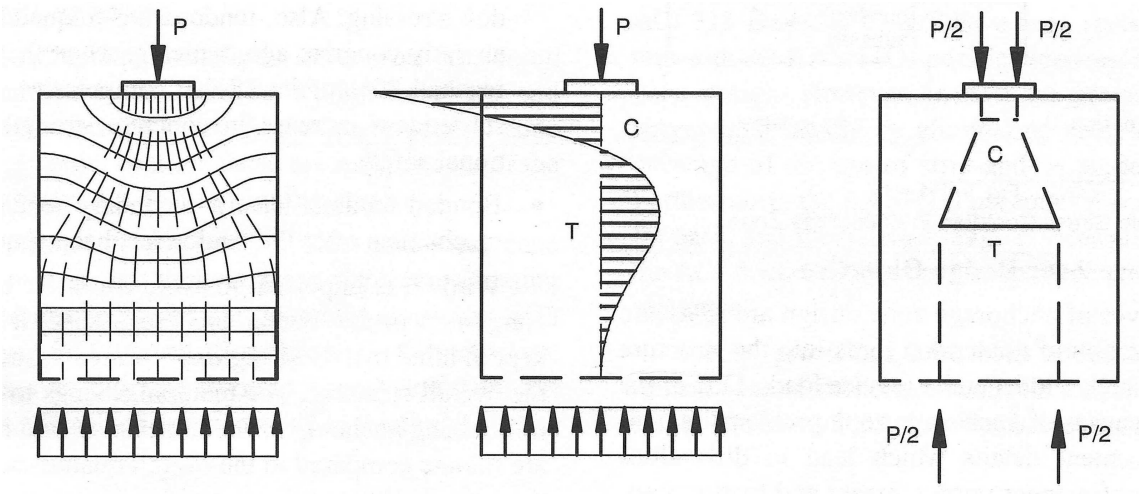


Figura 1.1: Flusso di forze nella zona di ancoraggio di una trave soggetta a precompressione centrata

1.1 Stato tensionale nelle zone di ancoraggio

La diffusione della forza di precompressione determina nella zona di ancoraggio un complesso stato di tensione tridimensionale, in cui si possono distinguere tre regioni critiche: la zona a contatto con la piastra di diffusione del carico trasmesso dal cavo, caratterizzata da elevate tensioni di compressione, la regione lungo l'asse del carico soggetta a tensioni di trazione di fenditura (bursting) e le regioni vicine alle superfici libere della trave soggette a tensioni di trazione di spalling. La Fig. 1.2 illustra i "contour plots" delle tensioni principali nel caso di una sezione rettangolare soggetta a precompressione centrata.

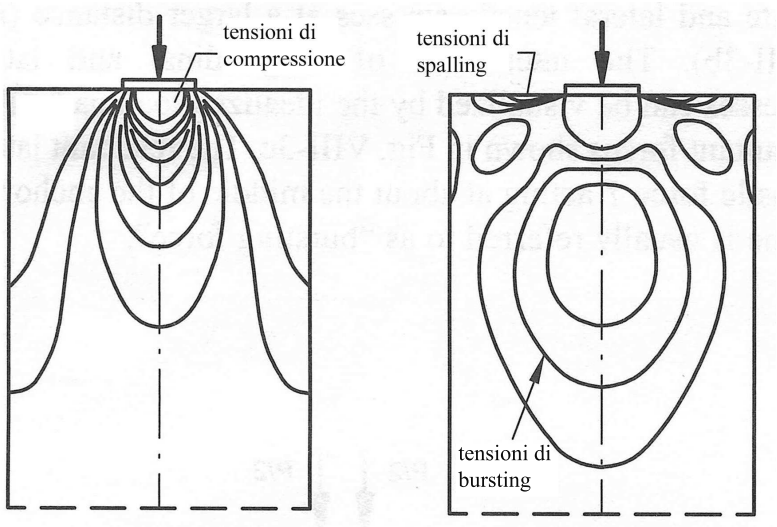


Figura 1.2: “Contour plots” delle tensioni principali

Tensioni di fenditura

La definizione delle tensioni di fenditura può essere così sintetizzata:

> “The principal effect of localized forces is the production of stresses in planes at right angles to the line of action of such forces and which tend to burst the element transversely to the force.”(Guyon [28])

Tale descrizione ha originato il termine “bursting stresses”. Le tensioni di fenditura sono causate dalla diffusione della forza concentrata e sono imputabili alla curvatura delle traiettorie delle tensioni di compressione. Tali tensioni agiscono normalmente all’asse del cavo e raggiungono il valore massimo a breve distanza dalla superficie caricata.

La loro distribuzione all’interno della zona di ancoraggio non può ovviamente essere analizzata tramite la classica teoria della trave. Può però essere spiegata considerando l’equilibrio del corpo libero ABMN rappresentato in Fig.1.3. Si nota che le tensioni trasversali f_x sono richieste per l’equilibrio a rotazione dell’elemento ABMN. D’ altra parte l’equilibrio verticale delle forze richiede che la risultante delle tensioni trasversali sia nulla. Infine l’equilibrio delle forze orizzontali richiede la presenza delle tensioni di taglio τ.

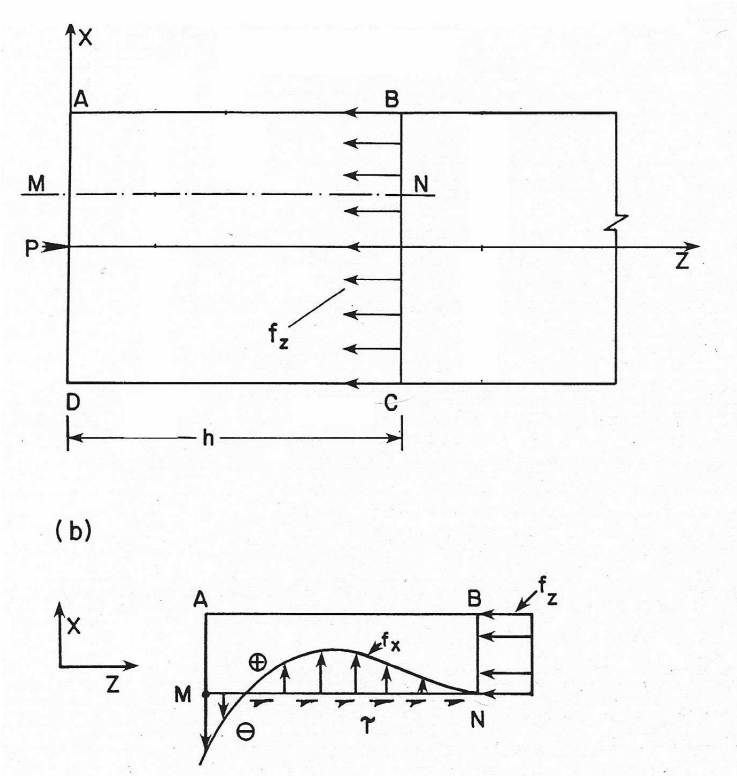


Figura 1.3: Condizioni di equilibrio nella zona di ancoraggio

Le tensioni di fenditura determinano la formazione di una fessura parallela alla direzione del cavo, che si può estendere lungo la trave fino a determinarne la rottura. Conseguentemente, il calcestruzzo deve essere adeguatamente rinforzato con armatura, definita armatura di *bursting* o di fenditura.

Tensioni di spalling

Le tensioni di spalling si manifestano in corrispondenza delle superfici libere delle zone di ancoraggio e sono causate dalle condizioni di compatibilità degli spostamenti (Fig.1.4) nel caso di precompressione centrata. Raggiungono il valore massimo in corrispondenza della superficie caricata per poi decrescere rapidamente. Poichè sono molte localizzate, la forza risultante di spalling risulta piccola. Queste tensioni tendono a causare lo sfaldamento (“*spall off*”) degli spigoli della trave, da cui il nome “spalling stresses”, ma in genere non compromettono la capacità portante della struttura. Con il termine “*spalling*” si indicano anche le tensioni di trazione presenti sulla superficie caricata indotte dalle condizioni

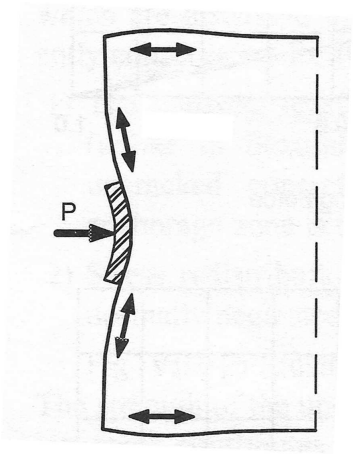


Figura 1.4: Tensioni di spalling indotte dalle condizioni di compatibilità

di equilibrio nel caso di precompressione eccentrica o in presenza di ancoraggi multipli molto distanziati.

Tensioni di contatto

Dietro la piastra di carico si raggiungono tensioni di compressione molto elevate. Per aumentare la resistenza del calcestruzzo si impiega generalmente una spirale che con la sua azione di confinamento consente di raggiungere tensioni massime di compressione pari a $3f'_c$, in cui f'_c è la resistenza cilindrica del calcestruzzo.

1.2 Classificazione delle zone di ancoraggio

Sulla base delle considerazioni presentate nel precedente paragrafo, la normativa americana, (ACI [3], AASHTO [2]), distingue due differenti regioni all'interno della zona di ancoraggio: la "local zone" e la "general zone". La "local zone" è il volume di calcestruzzo che circonda ed è immediatamente davanti al dispositivo di ancoraggio, come illustrato in Fig. 1.5. Il suo comportamento è influenzato dalle caratteristiche locali del dispositivo di ancoraggio e in particolare dalla tipologia, dalla tensione di compressione del calcestruzzo davanti la piastra di carico e dal grado di confinamento fornito dal calcestruzzo circostante o dall'armatura utilizzata, generalmente una spirale. La "general zone" è il volume di calcestruzzo in cui la forza di precompressione si diffonde fino ad

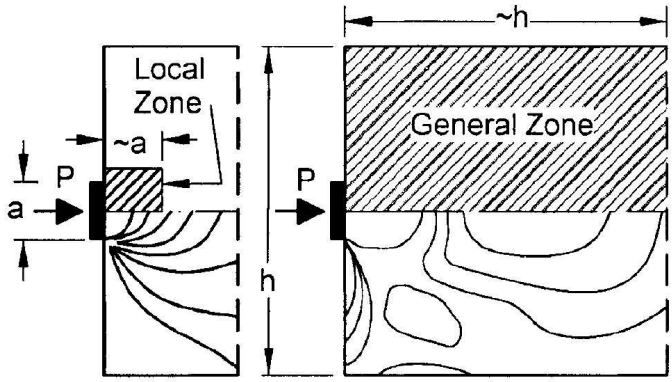


Figura 1.5: Definizione della “general zone” e della “local zone” secondo l’AASHTO [2]

assumere l’andamento lineare sulla sezione trasversale. La sua estensione longitudinale si può definire in base al principio di Saint Venant. Nell’AASHTO è assunta pari a $1 \div 1.5$ volte l’ altezza della sezione. Lo stato di tensione nella “general zone” non è molto influenzato dalla geometria del dispositivo di ancoraggio ed è caratterizzato principalmente dalle tensioni di trazione di fenditura e di spalling.

1.3 Problematiche nelle zone di ancoraggio

Gli obiettivi principali nel progetto delle zone di ancoraggio consistono nella verifica a rottura allo stato limite ultimo e nel verificare la fessurazione in condizioni di esercizio. La maggior parte dei problemi riscontrati nelle zone di ancoraggio e descritti successivamente è osservata nella fase di tiro, cioè all’atto dell’applicazione della forza di precompressione. In questa fase, infatti, la forza di precompressione è massima, non essendo avvenute le cadute di tensione e non essendo ancora pienamente sviluppata la resistenza del calcestruzzo.

Rottura

Nelle zone di ancoraggio si possono manifestare tre modalità principali di rottura. La prima si manifesta nelle immediate vicinanze del dispositivo di ancoraggio, nella “local zone” secondo la terminologia introdotta nel paragrafo 1.2. La rottura è causata da un insufficiente resistenza a compressione del calcestruzzo e si manifesta con una superficie generalmente di forma conica o piramidale, come illustrato in Fig. 1.6.

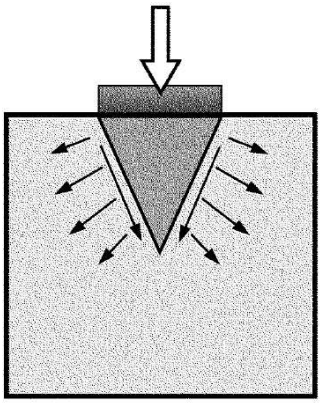


Figura 1.6: Rottura per compressione nella “local zone” con la formazione del caratteristico cono di calcestruzzo.

La seconda ha luogo nella “general zone” ed è caratterizzata dalla formazione di ampie fessure orizzontali che si estendono lungo il tracciato del cavo (Fig. 1.7). Questa modalità di rottura è dovuta all’incapacità dell’armatura trasversale di assorbire le tensioni di fenditura.

Infine, la terza modalità di rottura si manifesta all’interfaccia tra il calcestruzzo confinato e il calcestruzzo non confinato, quindi all’interfaccia tra la *local* e la *general zone* ed è causata da un eccessivo livello di compressione trasmesso dal calcestruzzo confinato della *local zone* al calcestruzzo non confinato della *general zone*. Poichè è una rottura per compressione, anche in questo caso si osserva una superficie di rottura conica (Fig.1.8). Come osservato in molti esperimenti riportati in letteratura, (Breen [9], Stone [72]) tutti i tre tipi di rottura esibiscono un comportamento fragile, anche se la rottura comporta lo snervamento dell’armatura.

Fessurazione eccessiva

La presenza della forza di precompressione produce tensioni di trazione di fenditura, necessarie per l’equilibrio dell’elemento, che possono provocare fessure parallele alla direzione del cavo. In genere, l’armatura di precompressione è molto sensibile ai danni per corrosione. Pertanto è importante che le fessure rimangono di ampiezza limitata, in particolare in presenza di ambienti corrosivi. A tal fine è necessario predisporre un’armatura idonea ad assorbire le sollecitazioni di trazione e a controllare l’ampiezza delle fessure.



Figura 1.7: Fessure lungo il cavo di precompressione



Figura 1.8: Rottura all'interfaccia tra "general zone" e la "local zone"

1.4 Obiettivi e contenuti della tesi

L' obiettivo di questa tesi è una modellazione e un'indagine numerica delle tensioni nelle zone di ancoraggio, tenendo conto del comportamento non lineare del materiale e dei fenomeni di fessurazione. L'indagine è stata sviluppata al crescere del carico fino al raggiungimento del carico ultimo di collasso in modo da analizzare il comportamento della zona di ancoraggio sia nella fase elastica sia nella fase fessurata. In particolare è stata analizzata la propagazione e l'ampiezza delle fessure sia in fase di tiro (condizioni di esercizio) sia in condizioni ultime. A tal fine è stato sviluppato un modello non-lineare tridimensionale agli elementi finiti che si è dimostrato adatto a cogliere gli aspetti fondamentali qualitativi e quantitativi che caratterizzano il comportamento delle zone di ancoraggio. Sono stati condotti studi parametrici per considerare l'influenza di vari parametri quali la geometria del dispositivo di ancoraggio, la distribuzione dell'armatura di fenditura e la presenza della reazione di appoggio.

L'organizzazione della tesi è la seguente: nel secondo capitolo viene riportata un'analisi della letteratura tecnica-scientifica, condotta per definire il quadro delle normative disponibili e per delineare le linee di ricerca attuali. Nel terzo capitolo vengono richiamate le caratteristiche salienti del metodo agli elementi finiti applicato alle strutture in cemento armato e in particolare vengono discusse la modalità con cui viene rappresentato il comportamento del calcestruzzo. Si passa quindi allo sviluppo di un modello numerico per l'analisi delle zone di ancoraggio. Nel quarto capitolo si utilizza il modello sviluppato per analizzare travi soggette a compressione centrata. Infine nel quinto capitolo viene presentata l'indagine numerica evidenziandone gli aspetti e i risultati significativi.