

## Capitolo 5

### Sintesi dei risultati e conclusioni

Lo studio svolto ha analizzato il comportamento delle zone di ancoraggio di travi precomprese post-tese sulla base di una modellazione agli elementi finiti che tiene conto dell'effettiva geometria tridimensionale delle travi e della distribuzione di armatura. Il calcestruzzo è stato schematizzato con un modello plastico degradante. La modellazione è stata calibrata sulla base dei dati sperimentali dell'indagine sviluppata da Breen e Wollmann [9]. Con tale confronto si è evidenziato l'efficacia del modello numerico sia nella descrizione del meccanismo di rottura sia per la determinazione delle sollecitazioni e delle fessurazioni nel calcestruzzo e delle tensioni nelle armature al crescere del carico di precompressione. Sulla base di tale modellazione è stata sviluppata un'indagine numerica per il caso di precompressione con un singolo ancoraggio in posizione centrale. Si è tenuto conto dei seguenti parametri: rapporto tra la dimensione  $a$  della piastra di ancoraggio e le dimensioni  $b$  e  $h$  della sezione della trave, distribuzione dell'armatura predisposta ad assorbire le tensioni di fenditura in termini di passo ed estensione della zona rinforzata, presenza ed intensità della reazione d'appoggio.

I risultati ottenuti riguardano la distribuzione di sollecitazioni e deformazioni nel calcestruzzo, nelle armature, la formazione e la propagazione delle fessure. La modellazione non lineare tridimensionale ha consentito di cogliere alcuni aspetti e comportamenti significativi.

Nella fase iniziale il comportamento della struttura è elastico e la distribuzione di tensione nel calcestruzzo ritrova i risultati sviluppati da precedenti analisi tridimensionali numeriche. Il comportamento si modifica in modo significativo una volta raggiunto il carico di fessurazione corrispondente alla formazione di fessure diffuse di ampiezza superiore a 0.025mm. Nell'indagine sviluppata il carico di fessurazione, in assenza della reazione di appoggio, è risultato variabile tra il 70% e il 90% del carico ultimo. La rottura della trave si manifesta nel modello numerico con l'impossibilità di convergenza per la formazione di cinematismi di rottura corrispondenti allo schiacciamento del calcestruzzo nella zona retrostante la piastra di ancoraggio ed espulsione dello

strato di calcestruzzo esterno alla zona confinata dalla spirale. Il carico di precompressione in fase di tiro è stato fissato a circa il 70% del carico ultimo. Pertanto nella fase di esercizio iniziale i modelli esaminati risultano o non fessurati o caratterizzati da un quadro fessurativo di ampiezza limitata. Le sollecitazioni nelle staffe dovute alla forza di fenditura risultano analogamente contenute in fase di tiro e solo in alcuni casi raggiungono il valore di snervamento prima della rottura della trave.

Gli aspetti significativi evidenziati dalla ricerca sono i seguenti:

- La distribuzione e l'entità delle tensioni ottenute dal modello tridimensionale risulta per alcuni aspetti notevolmente diversa dalla distribuzione usualmente adottata per la determinazione delle tensioni di fenditura. Le tensioni di fenditura in fase elastica si sviluppano sia in direzione verticale  $\sigma_{zz}$  sia in direzione orizzontale  $\sigma_{yy}$  e risultano variabili tra il centro e il piano superficiale. Tali distribuzioni sono influenzate in maniera significativa dai rapporti  $a/h$  e  $a/b$ . Tutte le tensioni  $\sigma_{zz}$  sono risultate sempre superiori sui piani superficiali rispetto ai valori sul piano medio della sezione, in accordo con i risultati numerici di Yettram e Robbins. Le tensioni trasversali  $\sigma_{yy}$  raggiungono valori di picco elevati e anche superiori alla tensione di fenditura nel piano verticale. In ogni caso la risultante delle tensioni di fenditura nel piano verticale risulta maggiore dell'analogo effetto nel piano orizzontale. Le tensioni di spalling sono risultate trascurabili e molto inferiori ai valori previsti da precedenti analisi.
- In fase fessurata la diffusione delle tensioni di compressione nelle zone di ancoraggio risulta diversa rispetto alla distribuzione elastica. La presenza delle fessure di fenditura riduce la rigidità della struttura in direzione trasversale al piano di fessurazione. Ciò comporta una minore inclinazione delle isostatiche di compressione rispetto all'asse della trave. Le tensioni di trazione nel calcestruzzo assumono valori residui non nulli lungo la fessura e conservano valori elevati in corrispondenza dell'apice.
- L'ampiezza massima delle fessure di fenditura risulta significativa solo per valori del carico prossimi al carico di rottura. In condizioni di servizio corrispondenti al carico di tiro l'ampiezza delle fessure è sempre inferiore a 0.2mm. La fessurazione nei piani verticali dovute alle tensioni orizzontali  $\sigma_{yy}$  risulta di maggiore ampiezza rispetto alle fessure orizzontali in presenza di piastra di dimensioni ridotte ( $a/b = 0.4$ ) e si manifesta prevalentemente nei piani esterni alle zone di calcestruzzo confinato dalla spirale.
- Per valori elevati del rapporto di concentrazione  $a/h$ , ( $a/h = 0.4, a/b = 0.8$ ), le deformazioni nelle staffe crescono in maniera proporzionale all'aumentare del carico oltre il carico di fessurazione, mentre per valori ridotti di  $a/h$  ( $a/h = 0.2, a/b = 0.4$ ) le deformazioni nelle staffe si mantengono contenute al crescere del carico e solo in prossimità della

rottura raggiungono valori significativi. Ciò indica che la distribuzione delle deformazioni nelle staffe è influenzata non solo dal rapporto di concentrazione  $a/h$ , ma in maniera significativa anche dalla geometria locale dell'ancoraggio e in particolare dal rapporto  $a/b$  tra la dimensione della piastra di ancoraggio e la larghezza della sezione. Questo effetto enfatizza la natura tridimensionale del problema della zona di ancoraggio.

- Le tensioni di compressione indotte dalla reazione dell'appoggio riducono le tensioni di fenditura e conseguentemente le deformazioni nelle staffe e l'ampiezza delle fessure. E' conservativo quindi trascurare la reazione di appoggio in fase di progetto.
- La forza risultante di fenditura trasversale dovuta alle tensioni  $\sigma_{zz}$  nel calcestruzzo e alle tensioni nelle staffe risulta crescente con il carico fino al carico di fessurazione e successivamente decrescente fino al carico di rottura. Nella fase non fessurata il rapporto tra la forza di fenditura e il carico di precompressione risulta pari al valore predetto dal modello strut-and-tie usualmente adottato. In fase fessurata la distribuzione delle forze di fenditura risulta, invece, nettamente inferiore rispetto al valore predetto sulla base dell'analisi elastica. Per il modello C03/100, ad esempio, il rapporto  $P_{burst}/P$  si riduce di circa il 43% rispetto al modello strut-and-tie dell'analisi elastica. Quindi tale risultato evidenzia il carattere cautelativo dell'usuale determinazione delle forze di fenditura e del conseguente dimensionamento delle staffe.

In conclusione lo studio dell'indagine sviluppata ha evidenziato la possibilità di utilizzare la modellazione tridimensionale non lineare come strumento efficace, di ausilio e di integrazione delle prove sperimentali, per determinare l'effettivo comportamento delle zone di ancoraggio sia nella fase di esercizio sia nella fase ultima.