

Capítol 4. Calibració del model: assajos de Torino

4.1. Introducció

El Laboratori del Departament d'Enginyeria Estructural del "Politecnico di Torino" ha realitzat campanyes experimentals per tal d'estudiar el comportament plàstic i no-elàstic de bigues amb secció en T sotmeses a una càrrega concentrada aplicada al centre de llum. El resultat experimental ha posat en evidència la influència de la deformació a tallant sobre el comportament no-elàstic i la interacció tallant – flexió. Per tal de calibrar el model numèric acoblat TINSA per al càlcul de bigues en seccions en T i doble T s'ha modelat una de les campanyes experimentals del laboratori, realitzada i documentada per Maurizio Taliano [23]. A continuació es descriu aquesta campanya.

4.2. Assajos de Torino: explicació de la campanya experimental

4.2.1. Descripció de l'assaig

Per tal de dur a terme l'estudi del comportament plàstic i no elàstic de bigues en secció en T, van decidir assajar amb una biga birecolzada, amb un cantell de 1.10 m, una ànima de 0.20 m. i una ala de 0.50 m. La distància entre recolzaments va ser de 8.30 m. La figura 4.1. recull les característiques geomètriques de la biga.

L'esquema d'armat, que es recull a la mateixa figura 4.1, va consistir en un armat inferior longitudinal, l'anomenada armadura de tracció, d'àrea 3516 mm² i un ganxo ϕ 10 cada 200 mm., d'armadura a tallant.

La biga es van construir el 1968. Les propietats dels materials, que es van determinar mitjançant assaigs de caracterització, són les següents:

- Resistència a tracció de l'acer: $f_{ym} = 458 \text{ N/mm}^2$
- Mòdul d'elasticitat de l'acer: $E_s = 228 \text{ kN/mm}^2$
- Resistència a compressió del formigó: $f_{cm} = 20 \text{ N/mm}^2$
- Mòdul d'elasticitat del formigó: $E_{cm} = 16 \text{ kN/mm}^2$

L'assaig va consistir en l'aplicació d'una càrrega al centre de la llum de la biga fins a ruptura. La magnitud de la càrrega era incrementada segons un control en desplaçaments, de 0.01 a 0.03 mm/s fins a la plastificació de les armadures i, posteriorment de 0.02 a 0.06 mm/s.

Per mesurar els moviments van instrumentar la biga de la següent manera:

- 5 transductors de desplaçament verticals (LVDT) disposats al centre de la llum, als quarts d'aquesta i als recolzaments.
- 15 galgues extensiomètriques horitzontals disposats a la fibra superior i a la fibra inferior. Aquests últims disposats a nivell de l'armadura inferior, aproximadament a 45 mm de la fibra inferior.

A més, a l'ànima de la biga, a una distància de 3 m. del recolzament esquerre es van aplicar extensòmetres formant un quadrat de 500 mm de costat per valorar la deformació a tallant.

La posició de tots els instruments de mesura es pot veure a la figura 4.1.

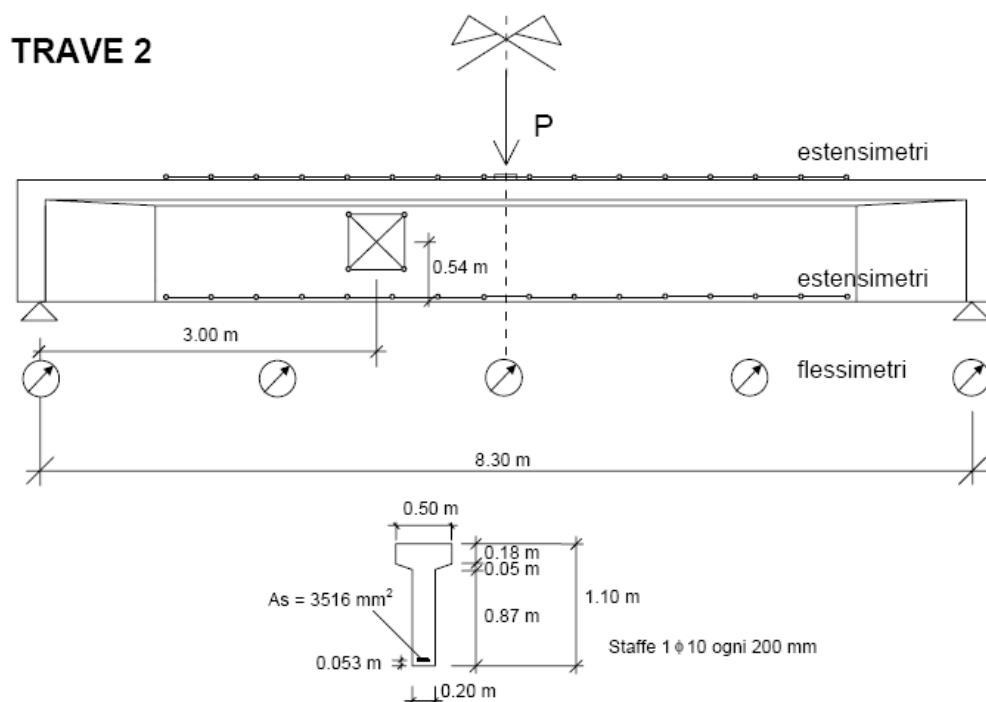


Figura 4.1. Geometria de la biga i posició dels instruments de mesura (Extreta de Taliano [23])

La valoració de la curvatura mitjana i de la deformació a tallant mitjana les van efectuar mitjançant una interpretació de les mesures extretes dels aparells extensiomètrics amb els que es van instrumentar les bigues. El resultat posa en evidència la influència de la deformació de tallant sobre el comportament no-elàstic i la interacció amb la sol·licitació a flexió.

4.2.2. Resultats experimentals

La gràfica que mostra els resultats càrrega - deformació a tallant i curvatura es mostra a continuació:

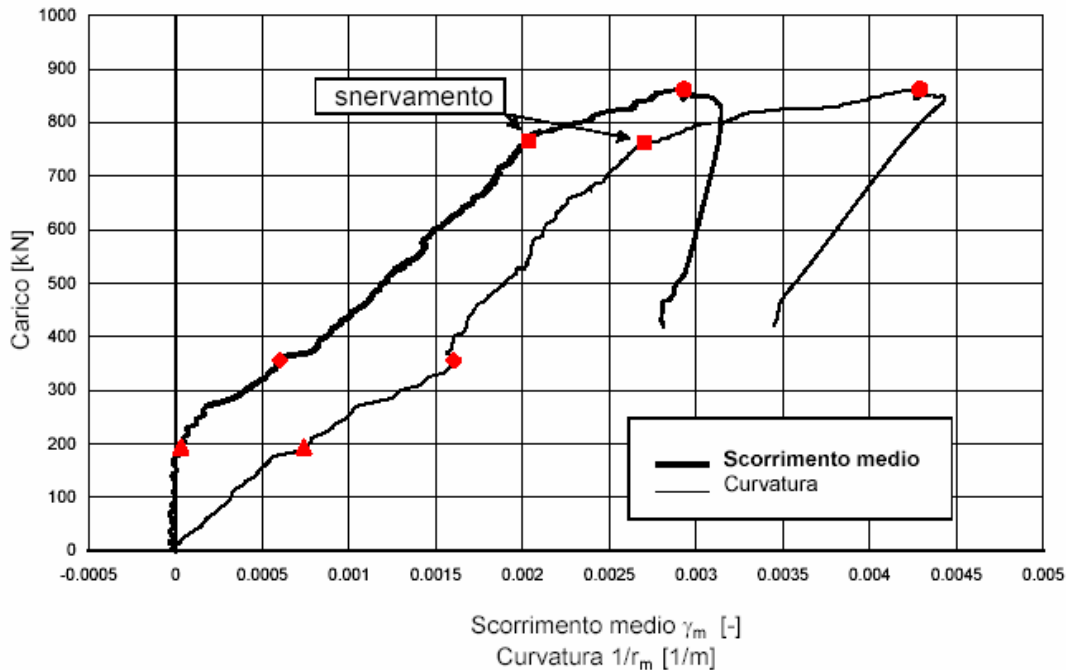


Figura 4.2. Curvatura $1/r_m$ i deformació a tallant γ_m en funció de la càrrega aplicada (Extreta de Taliano [23])

Tal i com es comenta a l'apartat següent, s'ha efectuat l'anàlisi numèric amb el programa TINSA en la secció que dista 3 metres del recolzament esquerre i a la secció centre de llum, per poder validar amb exactitud el model numèric.

4.3. Modelització de les bigues

Per tal de calibrar el model numèric acoblat TINSA per al càlcul de bigues en seccions en T i doble T s'ha modelat una de les campanyes experimentals del laboratori, realitzada i documentada per Maurizio Taliano [23]. A continuació es detalla la modelització de les bigues i assaigs i s'exposen i es comenten els resultats numèrics obtinguts.

4.3.1. Caracterització numèrica

El model numèric acoblat TINSA treballa a nivell seccional, amb una malla d'elements finits. Els elements finits utilitzats en la discretització són de tres tipus, tal i com s'ha explicat a l'apartat 3.2.3.

- Elements bidimensional, quadrilàter de 4 nodes per representar el formigó.
- Element unidimensional simple, lineal, per a representar les barres d'acer no perpendicular a la secció.
- Element puntual per a les barres d'acer perpendiculars a la secció.

La malla ha estat calculada amb el programa GiD 7.2. del CIMNE [8].

Les resistències dels materials s'han introduït d'acord amb els assajos de caracterització i la resta de propietats s'han pres d'acord amb els valors típics de cada material:

Formigó	
f_c	20 MPa
ε_{pic}	0.0022
E_0	$1.6 \cdot 10^4$ MPa
ν	0
$\varepsilon_{p,res}$	0
\bar{f}_t	0.1
\bar{f}_{bc}	1.8
(ξ_1, r_1)	(3.67, 1.59)
(ξ_2, r_2)	(3.67, 1.94)

Acer	
f_y	458 MPa
E_0	$2.28 \cdot 10^5$ MPa
E_1	$2 \cdot 10^3$ MPa
$\varepsilon_{p,res}$	0

El model acoblat TINSA segueix una estratègia incremental en passos de càrrega. En cada un d'aquests passos s'ha aplicat a la secció un patró de càrrega amb un moment i un tallant definits per la relació M/V.

S'ha aplicat una relació M/V igual a 3000 mm, ja que la deformació a tallant valorada en l'anàlisi experimental s'ha dut a terme a una secció que dista 3 m. del recolzament esquerre. També disposem de les dades per la comparació de la gràfica moment – curvatura en aquesta secció.

La valoració de la gràfica moment – curvatura també s'ha dut a terme al centre de llum. A tal efecte, s'ha avaluat el model suposant que el tallant és zero, ja que el valor del tallant en aquesta secció és justament aquest.

4.3.2. Resultats numèrics i comparació amb els experimentals

Les gràfiques que es mostren a continuació són les gràfiques Moment – Curvatura. En elles es mostra la corba experimental i teòrica de la secció que dista tres metres del recolzament esquerre així com les corresponents al centre de llum. Per la valoració i verificació de la secció del centre de llum també s'ha utilitzat el programa BCSEC (Bairán, [2]).

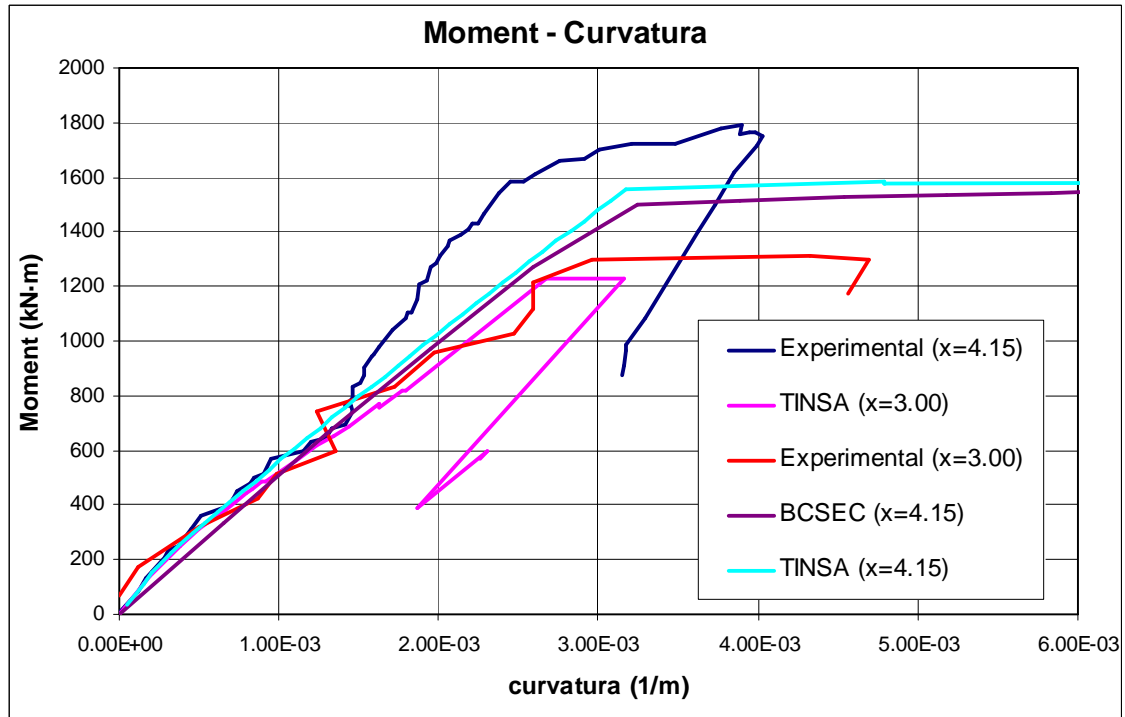


Figura 4.3. Corbes Moment - Curvatura, experimentals i teòriques de les seccions del centre de llum i a 3 metres del recolzament esquerre

Tal i com s'ha comentat anteriorment, també compararem les corbes Tallant – Deformació a tallant, experimental i teòrica. Aquesta gràfica, amb les corbes superposades, és la que s'adjunta seguidament:

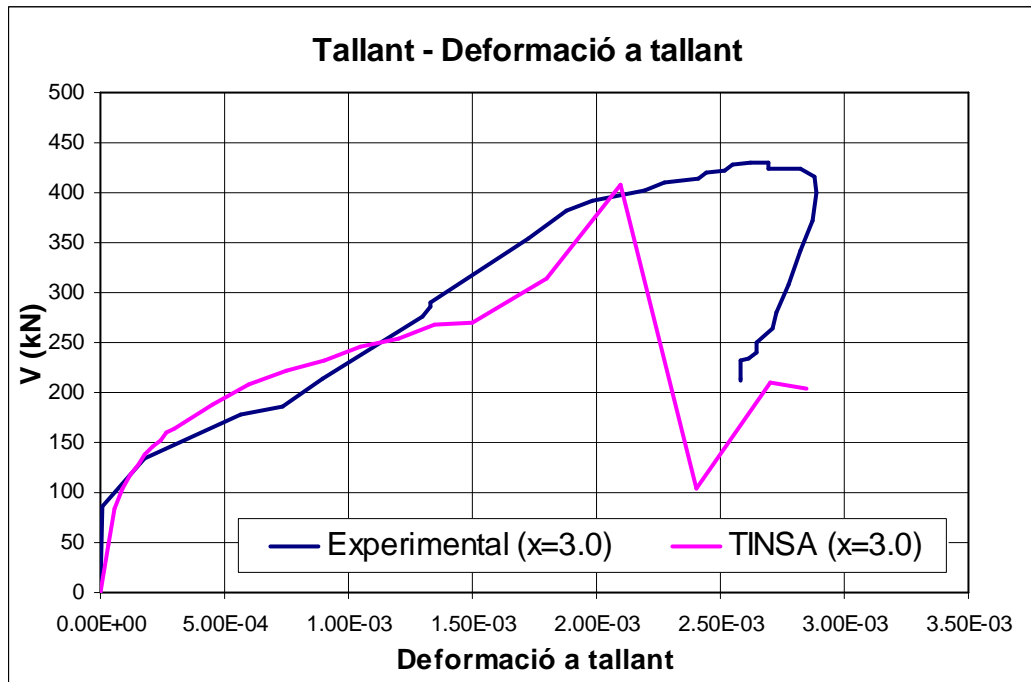


Figura 4.4. Corbes Tallant – Deformació a tallant, experimental i teòric de la secció que dista 3 metres del recolzament esquerre.

Es pot observar que la càrrega de ruptura s'estima, segons la corba calculada numèricament, lleugerament inferior a la de l'assaig. Tot i així, el mode de ruptura es prediu correctament, essent aquesta per tallant amb plastificació d'estreps, tal i com s'observa a les figures adjuntades seguidament.

En les dues gràfiques es pot observar com les corbes calculades numèricament s'ajusten satisfactòriament a les corbes mesurades al laboratori, sobretot en la zona de fissuració, que és el rang que ens interessa.

- **Tensions normals al formigó**

A continuació es mostra la distribució de tensions normals de la secció que dista 3 metres del recolzament esquerre. Correspon a un estat ja fissurat, on podem veure una distribució típica d'estats ja fissurats, amb una progressiva pujada de la fibra neutra.

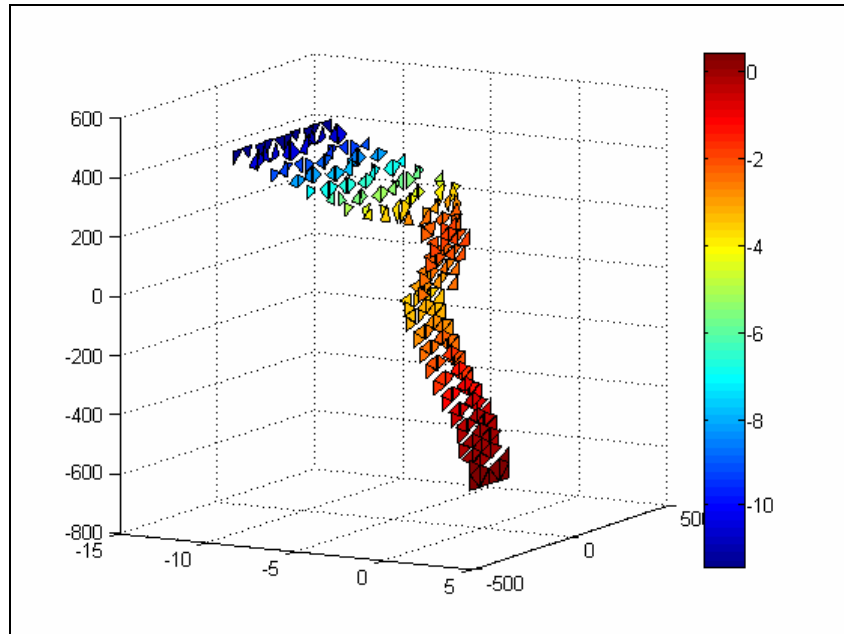


Figura 4.5. Distribució de tensions normals al formigó. Coordenades en mm; tensions (color) en N/mm^2 .

- **Tensions tangencials verticals al formigó**

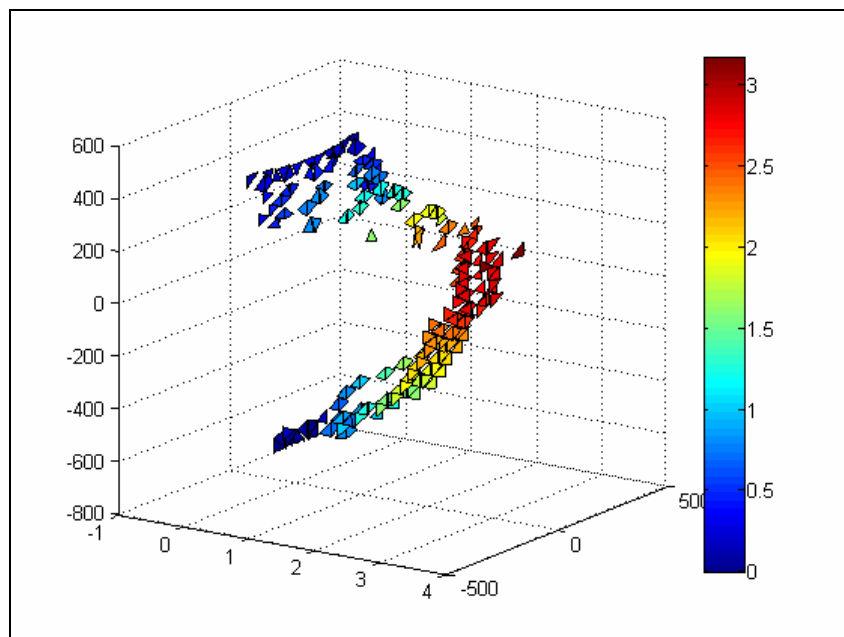


Figura 4.6. Distribució de tensions tangencials verticals al formigó. Coordenades en mm; tensions (color) en N/mm^2 .

La figura anterior mostra les distribucions de tensions tangencials verticals de la secció que dista 3 metres del recolzament esquerre. Correspon a un estat ja fissurat on s'observa la fibra neutra desplaçada i una clara redistribució de tensions.

- **Tensions als estreps**

Les tensions als estreps, amb la clara plastificació d'aquests, s'adjunta a continuació:

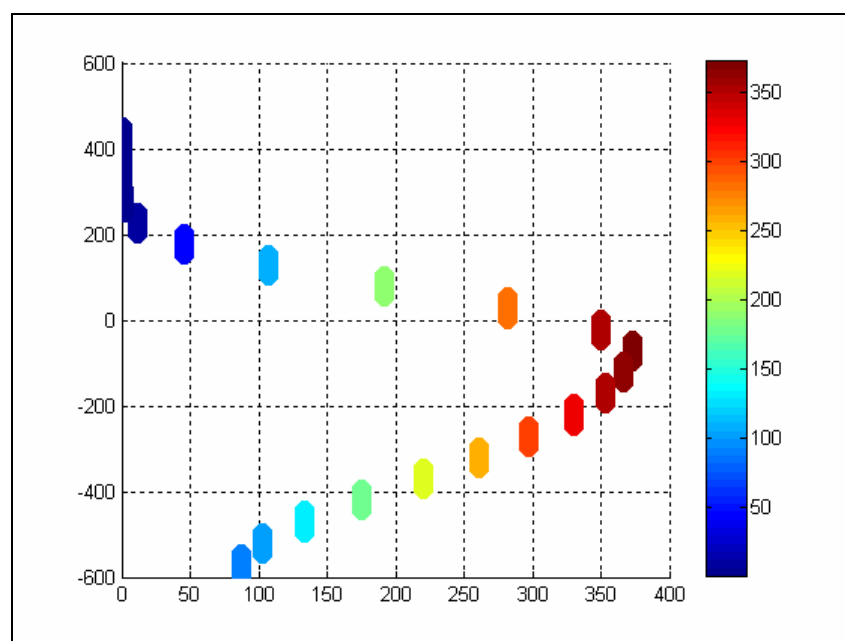


Figura 4.7. Distribució de tensions als estreps. Coordenades en mm; tensions (color) en N/mm².