

Prove sperimentali su travi in c.a. rinforzate con metodo CAM[®]: valutazione del comportamento a taglio

Mauro Cilia¹, Ines Cipolla², Piero Colajanni³, Roberto Marnetto⁴, Antonio Recupero⁵, Nino Spinella⁶ ■



Nome dell'opera/progetto:

Inserito nel contesto del Progetto di Ricerca "INnovazione del CAM Mediante Impiego di Nuove Opzioni di processo"

Tipo di progetto:

Prove sperimentali su travi in c.a. rinforzate con sistema CAM

Responsabile scientifico:

Ing. Roberto Marnetto

Organizzazioni coinvolte:

Università degli Studi di Messina

Università coinvolte:

Università degli Studi di Messina

Imprese coinvolte:

CHIMETEC S.a.s. (Ragusa), ABI S.r.l. (Ragusa)

1. Introduzione

Nel presente contributo sono descritti e valutati criticamente i risultati discendenti da un lavoro finalizzato allo studio del comportamento di travi in calcestruzzo armato (c.a.) rinforzate mediante il sistema CAM. Il lavoro è inserito nell'ambito del progetto di ricerca "In.CAM.M.I.N.O.", acronimo di "INnovazione del CAM Mediante Impiego di Nuove Opzioni di processo", che ha visto coinvolte l'Università degli Studi di Messina, CHIMETEC S.a.s. e ABI S.r.l. di Ragusa.

In particolare sono stati studiati il comportamento, l'evoluzione del danneggiamento ed i possibili meccanismi di rottura di quindici travi in c.a. in scala reale rinforzate mediante un sistema di nastri in acciaio di spessore 0.9 mm e larghezza 19 mm ed elementi in acciaio frapposti tra i manufatti e i nastri, come angolari e piastre imbutite (Figura 1).

È stato pianificato di studiare i meccanismi di rottura per flessione e misto taglio-flessione. In questo primo contributo verrà esaminato il secondo dei meccanismi indicati. Il meccanismo flessionale sarà invece descritto in un contributo successivo. È utile ricordare, in questa parte introduttiva, che nelle applicazioni sulle travi in c.a. i nastri

¹ Direttore Tecnico, Chimetec S.a.s., Ragusa

✉ info@chimetec.com

² Dipendente, Chimetec S.a.s., Ragusa

✉ info@chimetec.com

³ Professore Associato, Università di Palermo, Dip. di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale e dei Materiali (DICAM)

✉ piero.colajanni@unipa.it

⁴ Responsabile Ricerca e Sviluppo, EdiCAM Sistemi S.r.l., Roma

✉ r.marnetto@libero.it

⁵ Università di Messina - Dipartimento di Ingegneria

✉ antonino.recupero@unime.it

⁶ Università di Messina - Dipartimento di Ingegneria

✉ nino.spinella@unime.it

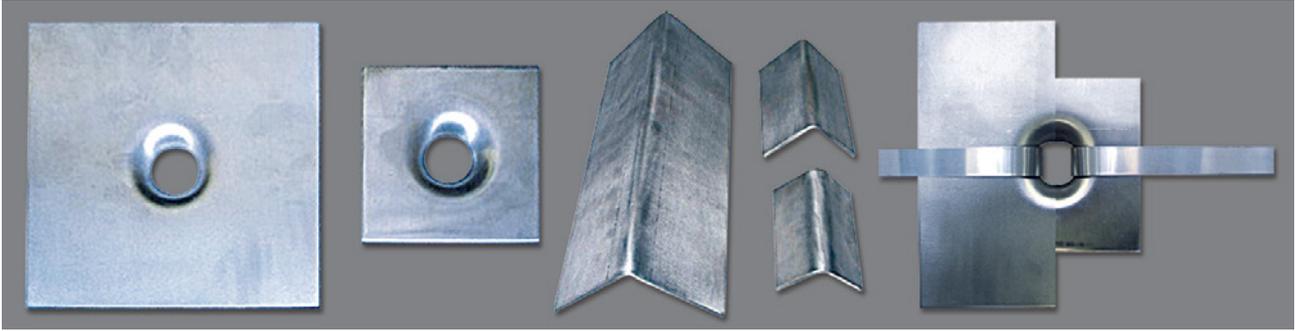


Figura 1
Elementi in acciaio del
sistema di rinforzo CAM:
a) piastre imbutite;
b) angolari;
c) nastri.

in acciaio, richiusi ad anello sopra o sotto solaio mediante una macchina capace di imprimere una pretensione regolabile, possono essere utilizzati sia come armatura aggiuntiva a taglio, sia come confinamento aggiuntivo indotto per incrementare la resistenza a compressione. Il sistema comprende altresì angolari in acciaio bugnati, disposti agli spigoli dell'intradosso della trave per mezzo di malta. Gli angolari continui, resi solidali attraverso la malta di collegamento e l'attrito generato dal pretensionamento dei nastri, consentono sia di aumentare la capacità flessionale della trave, sia di ridurre gli attriti durante la messa in tensione dei nastri.

2. Organizzazione del progetto

La sperimentazione ha avuto luogo presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Messina.

Il ruolo di gestione della strategia operativa nello sviluppo del progetto e di raccordo con altre aziende (ABI S.r.l.) è stato ricoperto da CHIMETEC S.a.s. L'Università di Messina ha partecipato alle scelte progettuali ed operative, alla valutazione dei risultati delle prove ed alle definizioni di processo.

A.B.I. S.r.l. ha condotto la parte più specificamente operativa, rivestendo di fatto il ruolo di componente applicativa del sistema, ed ha fornito il necessario supporto nelle fasi di allestimento e smantellamento delle prove presso il laboratorio sperimentale.

Il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Messina ha avuto altresì il compito di sviluppare, in concorso con il responsabile del progetto, i piani sperimentali, il progetto delle prove, la definizione delle attrezzature di complemento e delle apparecchiature necessarie. Ha curato l'allestimento e la conduzione delle prove, nonché l'acquisizione dei risultati.

I prototipi di prova sono stati realizzati dalla Prefabbricati Sgarito s.r.l. sulle indicazioni progettuali sviluppate dalla componente tecnica (CHIMETEC S.a.S. e Università di Messina). Il calcestruzzo è stato fornito da UNICAL S.p.a.

3. Descrizione della campagna sperimentale

I provini esaminati nella campagna sperimentale del progetto di ricerca descritto in queste pagine sono quindici, suddivisi in due gruppi principali. I manufatti del primo gruppo sono stati progettati per raggiungere il collasso mediante un meccanismo di taglio, quelli del secondo gruppo per essere caratterizzati da un meccanismo dominante a flessione. Di seguito sono descritte le principali caratteristiche:

- PROVE A TAGLIO:

- n. provini: 9;
- dimensioni geometriche: lunghezza $L = 145$ cm, sezione trasversale $B \times H = 15 \times 35$ cm;
- armatura: longitudinale (3 + 3) $\phi 18$, trasversale $\phi 6/5$ cm agli appoggi e $\phi 6/20$ cm in mezzeria;
- barre longitudinali e trasversali: acciaio B450;
- calcestruzzo: classe C12/15.

- PROVE A FLESSIONE:

- n. provini: 6
- dimensioni geometriche: lunghezza $L = 325$ cm, sezione trasversale $B \times H = 15 \times 25$ cm;
- armatura: longitudinale (2 + 2) $\phi 12$, trasversale $\phi 6/5$ cm agli appoggi e $\phi 6/10$ cm in mezzeria;
- barre longitudinali e trasversali: acciaio B450;
- calcestruzzo: classe C12/15.

Per valutare l'efficacia del rinforzo sui provini e fare un confronto su differenti tipologie di rinforzo, è stata fatta una suddivisione dei due gruppi sopra descritti nei due sottogruppi: "travi nude" e "travi rinforzate", come indicato di seguito.

- PROVE A TAGLIO:

- 3 travi nude di riferimento (TG NR);
- 3 travi con all'intradosso e all'estradosso angolari discontinui 40x40x4 mm, rinforzate a tutt'altezza con 3 nastri passo 20 cm (TG T 3N P20);
- 3 travi con all'intradosso angolari discontinui 40x40x4 mm, rinforzate "sotto solaio" con 3 nastri passo 20 cm (TG P 3N P20).

• PROVE A FLESSIONE:

- n. 2 travi nude di riferimento (**FX NR**);
- n. 2 travi rinforzate con all'intradosso angolari continui 40x40x4 mm, all'estradosso angolari discontinui, e n. 3 nastri passo 20 cm (**FX 3N P20**);
- n. 2 travi rinforzate con all'intradosso angolari continui 40x40x4 mm, all'estradosso angolari discontinui, e n. 3 nastri passo 10 cm (**FX 3N P10**).

La realizzazione dei provini ha comportato le fasi legate alla realizzazione delle gabbie metal-

liche in cantiere (Figura 2), al getto dei manufatti (Figura 3), al prelievo dei cubi e dei cilindri di calcestruzzo ed alle prove sui materiali (Figura 4), all'applicazione degli angolari e dei nastri in acciaio di rinforzo (Figure 5 e 6), al trasporto presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Messina.

I provini di calcestruzzo, gli spezzoni delle barre di acciaio e i nastri del sistema CAM sono stati successivamente sottoposti a specifiche prove di caratterizzazione presso lo stesso laboratorio dove sono state pianificate le prove sulle travi.



Figura 2
Gabbie metalliche delle travi sollecitate a taglio (immagine a sinistra).

Figura 3
Fasi del getto di calcestruzzo dei provini (immagine a destra).



Figura 4
Prova di abbassamento al cono di calcestruzzo (Slum Test)(immagine a sinistra).

Figura 5
Travi di luce L=145 cm rinforzate con sistema CAM con nastri a tutta altezza (immagine a destra).



Figura 6
Trave di luce L=145 cm rinforzata con sistema CAM con nastri ad altezza parziale.

4. Prove preliminari sui materiali

4.1 Calcestruzzo

I provini di calcestruzzo (cubi e cilindri) sono stati sottoposti a prove di compressione assiale per la determinazione della resistenza, definita come $f_c = P/A_c$, dove P è il carico massimo di rottura e A_c l'area della sezione trasversale del provino.

Le prove sui cubi hanno fornito una resistenza media cubica pari a 11.64 N/mm² e una corrispondente resistenza media cilindrica di 9.66 N/mm².

Dalle prove su carote cilindriche, invece sono stati ricavati valori rispettivamente pari a 14.99 N/mm² e 12.44 N/mm².

Per i provini Ci2 e Ci3, il laboratorio ha fornito le curva tensioni-deformazioni dalle quali si è ricavato il valore della resistenza f_c (Figura 7).

Nelle elaborazioni successive, per il materiale calcestruzzo si sono utilizzati i seguenti parametri meccanici:

- Valore medio cilindrico della resistenza a compressione:
 $f_{cm} = 11.05 \text{ N/mm}^2$
- Valore medio cubico della resistenza a compressione:
 $R_{cm} = 13.31 \text{ N/mm}^2$

4.2 Barre di armatura in acciaio, nastri e pressopiegati

Le leggi costitutive degli elementi di armatura sono state determinate attraverso prove di trazione su 9 barre così suddivise:

- 3 barre di diametro 6 mm in acciaio per c.a. trafilato a freddo di tipo B450A;
- 3 barre di diametro 12 mm in acciaio per c.a. laminato a caldo di tipo B450C;
- 3 barre di diametro 18 mm in acciaio per c.a. laminato a caldo di tipo B450C.

I risultati ottenuti sono indicati in Figura 8 sotto forma di grafico sforzo assiale di trazione vs. deformazione assiale.

Le proprietà del sistema di rinforzo sono state determinate sottoponendo a prova di trazione sia nastri (Figura 9), sia elementi pressopiegati. I 6 nastri esaminati hanno sezione 19 x 0.9 mm², realizzati in acciaio inox C1000, la metà dei quali è provvista di sigillo di chiusura avente le stesse caratteristiche dei nastri in termini sia di sezione, sia di materiale.

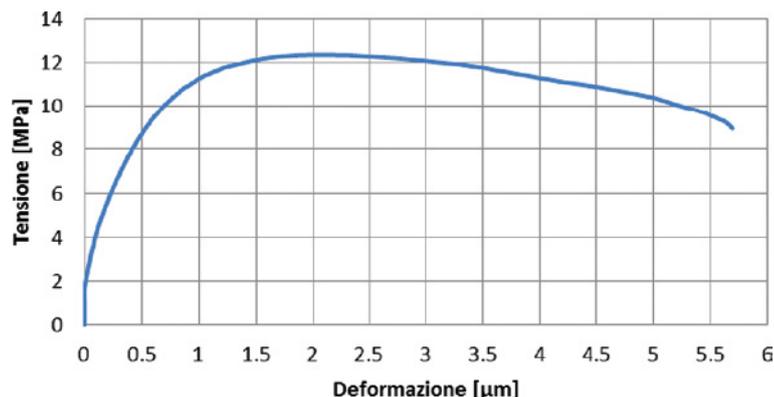
Se da un lato le proprietà dei nastri sono state dedotte solo dalle prove su elementi privi di sigillo (Figura 9), dall'altro lato l'impostazione adottata ha permesso di confrontare il differente comportamento con e senza la presenza dei sigilli (Figura 10). Dal confronto delle curve tensione-deformazione dei nastri con e senza sigillo (Figura 11) si nota come la presenza di quest'ultimo costituisca un elemento di debolezza, in quanto in grado di abbattere la resistenza a rottura del nastro semplice per indebolimento dovuto alla presenza della giunzione. Nella valutazione della resistenza di calcolo del nastro si tiene conto di ciò considerando una resistenza ultima ridotta del 30%.

Nelle successive elaborazioni si sono considerate le seguenti caratteristiche meccaniche:

- Valore caratteristico della resistenza a rottura:
 $f_{tk} = 1078 \text{ N/mm}^2$
- Valore caratteristico della resistenza a snervamento:
 $f_{yk} = 1018 \text{ N/mm}^2$
- Valore di calcolo della resistenza a snervamento:
 $f_{yd} = \min f_{yk}; 0.7 f_{tk} = 755 \text{ N/mm}^2$

Per quanto riguarda i pressopiegati, sono stati esaminati 3 provini ad osso sagomati dalle lamiere in acciaio S235 di spessore 4 mm, utilizzati come angolari del sistema di rinforzo. Le tensioni di snervamento e di rottura medie sono rispettivamente pari a 250 N/mm² e 320 N/mm². Dalle elaborazioni successive alle prove di caratterizzazione è stata dedotta una resistenza di calcolo a snervamento pari a $f_{yd} = 235 \text{ N/mm}^2$.

Figura 7
Esempio di curva sforzo di compressione vs. deformazione assiale di un provino cilindrico di calcestruzzo.



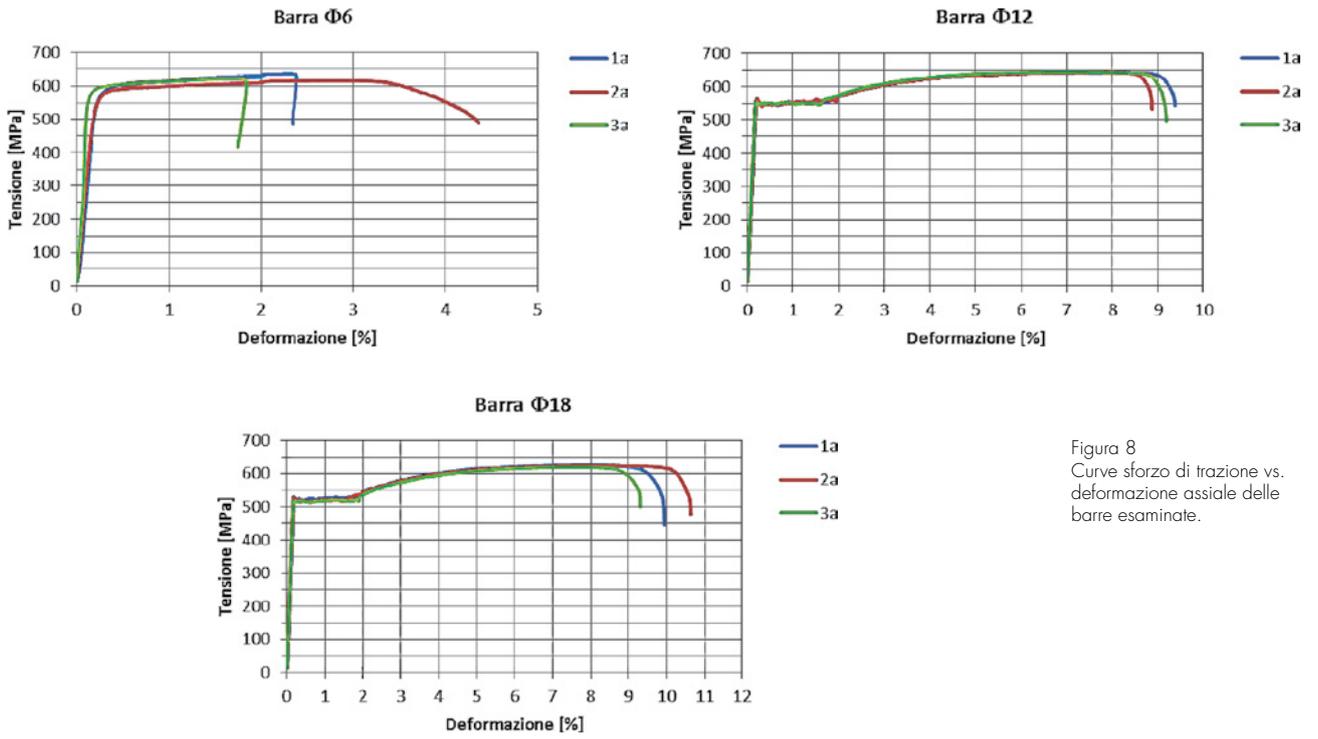


Figura 8
Curve sforzo di trazione vs. deformazione assiale delle barre esaminate.

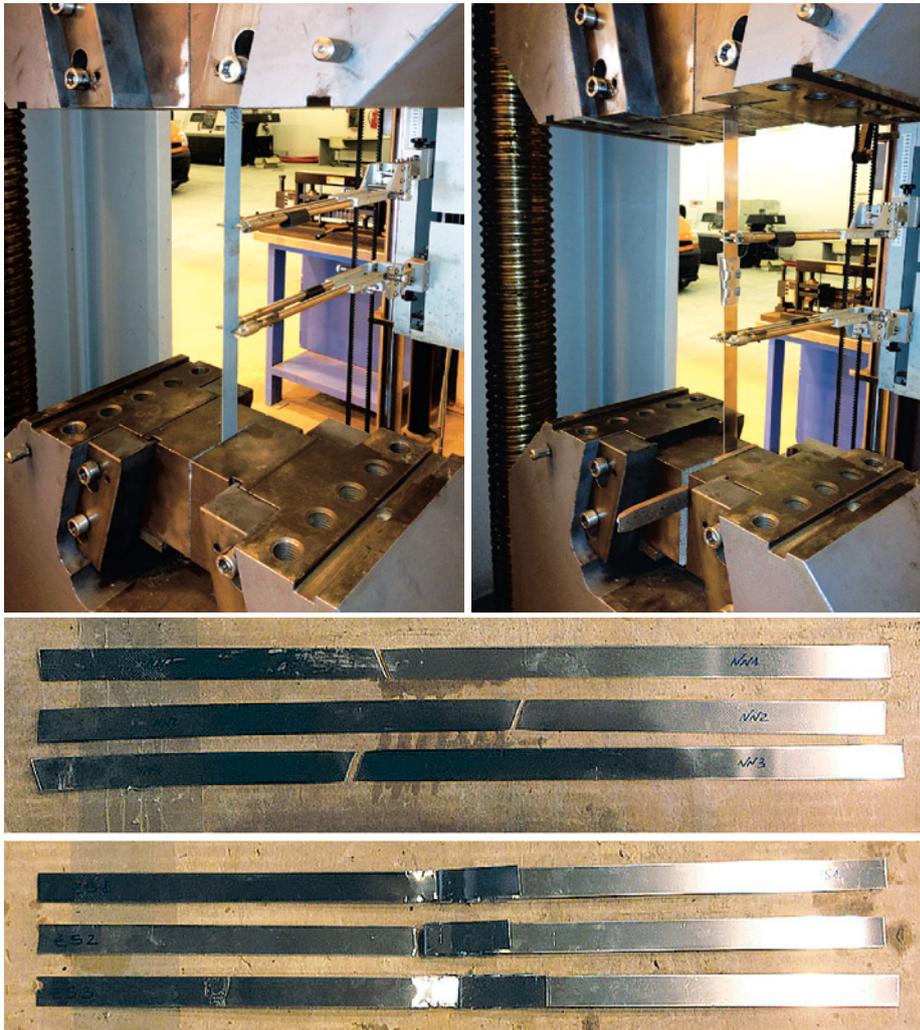


Figura 9
Prova di trazione dei nastri con e senza sigilli.

Figura 10
Rottura dei nastri in acciaio inox C1000 con sigillo in acciaio inox (sopra) e senza sigillo (sotto).

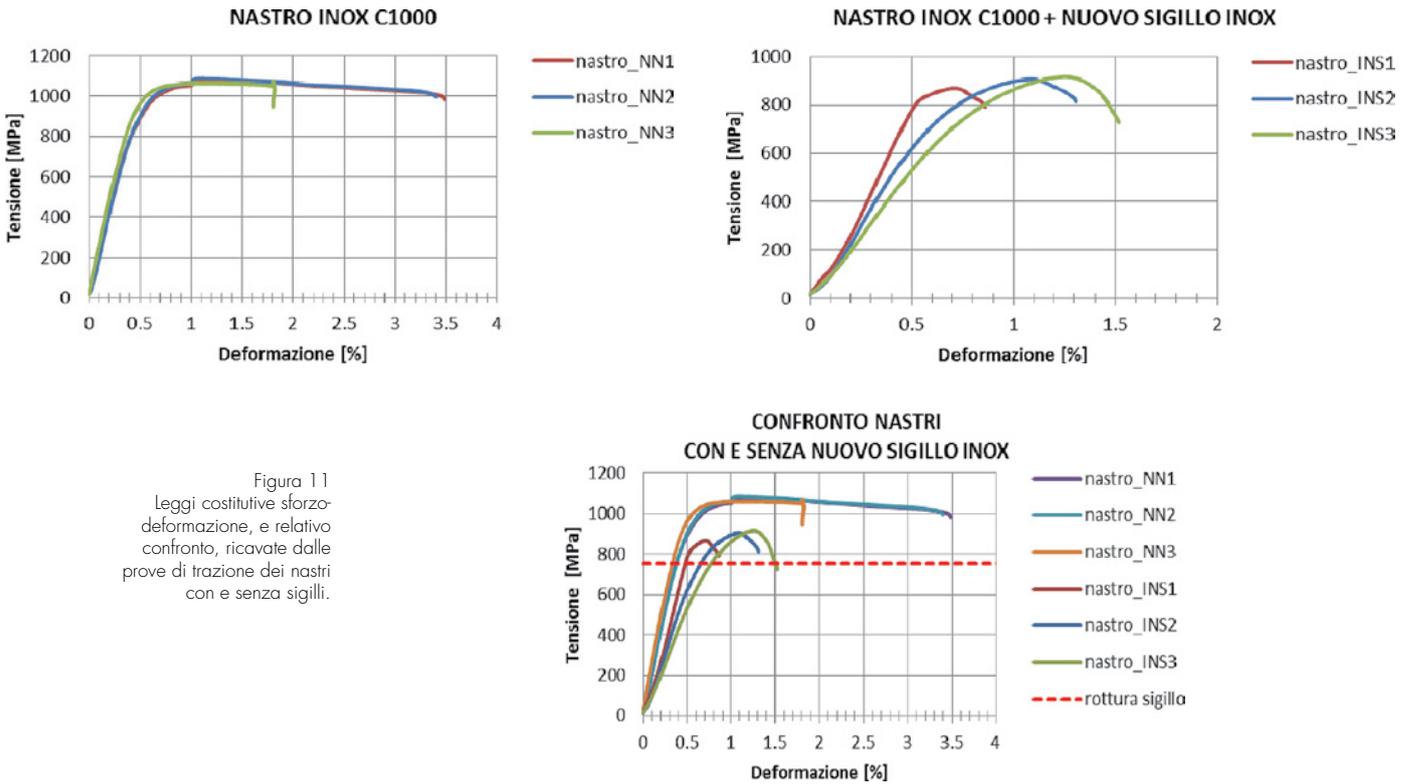


Figura 11
Leggi costitutive sforzo-deformazione, e relativo confronto, ricavate dalle prove di trazione dei nastri con e senza sigilli.

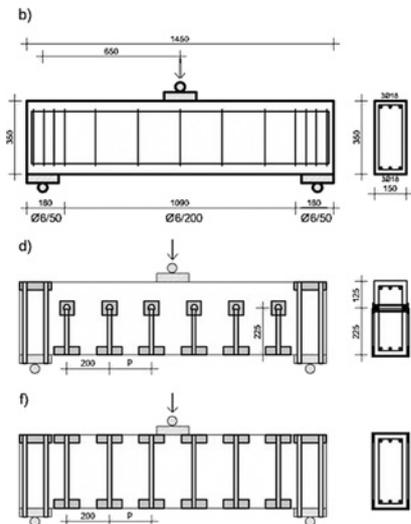
5. Prove sulle travi: valutazione dei meccanismi di taglio

I nove provini progettati per raggiungere il collasso mediante un meccanismo di taglio sono stati portati a rottura in tre punti utilizzando un banco di prova costituito da un telaio di contrasto in acciaio ancorato alla soletta del laboratorio e da una struttura di carpenteria per l'applicazione e la ripartizione del carico (Figura 12). Nel punto di mezzeria della trave è posizionata una piastra di acciaio con il compito di unifor-

mare e distribuire il carico. Gli appoggi, posti alla distanza di 1.30 m, sono realizzati mediante cilindri di acciaio. Tra questi ultimi e la trave sono posizionate ulteriori piastre di acciaio con il compito di ripartire il carico e realizzare un vincolo in semplice appoggio. Il carico è stato applicato mediante un martinetto idraulico collegato al telaio di contrasto. I principali parametri monitorati durante le prove sono:

- a) il carico applicato dall'attuatore idraulico;
- b) lo spostamento verticale mediante 2 trasdutto-

Figura 12
Setup di prova per i meccanismi di taglio (a sinistra) e schemi delle tre tipologie dei provini in c.a. (non rinforzato, rinforzo di intradosso, rinforzo a tutta altezza).



- ri di spostamento tipo LVDT posti in mezzeria;
- c) la rotazione della sezione agli appoggi;
- d) lo stato tensionale e deformativo, nelle travi rinforzate, dei nastri in acciaio tramite 8 strain gauges.

I dati di prova sono stati registrati con continuità mediante un sistema di acquisizione ed elaborazione dati gestito da un computer. Tutte le prove sono state effettuate nelle stesse condizioni, utilizzando una procedura di avanzamento in controllo di forza.

5.1 Effetto di confinamento

La cerchiatura delle travi con nastri in acciaio e angolari pressopiegati disposti agli spigoli della sezione induce, per effetto del confinamento, un aumento della capacità portante. La resistenza di un elemento soggetto alla pressione di confinamento può essere calcolata con la formulazione indicata dalla Circ. 617 del 02/02/2009, al paragrafo C8A.7.2.2:

$$f_{ccd} = f_{cd} \left[1 + 3.7 \left(\frac{0.5 \cdot \alpha_n \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot f_{yd}}{f_{cd}} \right)^{0.86} \right] \quad (1)$$

Dove:

$$\rho_s = 1 - \frac{2 A_s (b+h)}{b h_s}$$

è il rapporto volumetrico di armatura trasversale

$$\alpha_n = 1 - \frac{(b-2R)^2 + (h-2R)^2}{3bh}$$

è il fattore di efficienza del confinamento nella sezione

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s-h_s}{2b} \right) \left(1 - \frac{s-h_s}{2h} \right)$$

è il fattore di efficienza del confinamento lungo l'elemento

b e h sono le dimensioni della sezione;

R = min(L_{ang}; 5 t_{ang});

h_s è pari alla larghezza dei nastri;

s è il passo verticale dei nastri.

5.2 Taglio resistente

Il taglio resistente delle travi senza rinforzo e con rinforzo è stato determinato analiticamente, facendo riferimento al metodo dell'inclinazione variabile del traliccio, nel quale la trave è schematizzata come un traliccio isostatico, generalizzazione di quello di Morsch, in cui il puntone compresso ha una generica inclinazione ϑ ; l'armatura a taglio può essere costituita da sagomati e staffe e quindi se ne indica l'inclinazione con α . Raggiunto lo snervamento dell'armatura, il taglio può ancora crescere grazie al progressivo inclinarsi del puntone, fino a quando questo

arriverà allo schiacciamento.

Si può allora pensare che nelle fasi iniziali del processo di carico le isostatiche di compressione siano a 45°. Quando, dopo aver raggiunto lo snervamento, si incrementano ulteriormente i carichi, iniziano a verificarsi grosse deformazioni e scorrimenti tra le fessure e le isostatiche di compressione si inclinano. In questo modo l'armatura può portare un taglio maggiore. Contemporaneamente si riduce la resistenza del puntone compresso ed il collasso sarà sempre dovuto allo schiacciamento di questo e sarà raggiunto per quel valore di ϑ per il quale V_{Rsd} e V_{Rcd} diventano uguali.

Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di calcolo a "taglio-trazione" vale in accordo con l'attuale normativa:

$$V_{Rsd} = 0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \sin\alpha \quad (2)$$

Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di calcolo a "taglio-compressione" è:

$$V_{Rcd} = 0.9 d b_w \alpha_c f'_{cd} \frac{(\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta)}{(1 + \text{ctg}^2\theta)} \quad (3)$$

In presenza di staffe, $\alpha = 90^\circ$, per cui:

$$V_{Rsd} = 0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} \text{ctg}\theta \quad (4)$$

$$V_{Rcd} = 0.9 d b_w \alpha_c f'_{cd} \frac{\text{ctg}\theta}{(1 + \text{ctg}^2\theta)} \quad (5)$$

Al variare di ϑ cambiano in modo inverso V_{Rcd} e V_{Rsd}, in particolare al diminuire di ϑ aumenta V_{Rsd} e diminuisce V_{Rcd} (Figura 13).

La resistenza ultima si ottiene per quel valore di ϑ che rende uguali la resistenza a taglio-trazione V_{Rsd} con quella a taglio-compressione V_{Rcd}:

$$\text{ctg}\theta_0 = \sqrt{\frac{b_w \alpha_c f'_{cd} - 1}{2 A_s f_{yd} / s}} \quad (6)$$

Poiché il risultato ottenuto con l'approccio sopracitato deve essere ammissibile, è opportuno imporre le condizioni per cui:

- se $\text{ctg}\vartheta < 1 \rightarrow \text{ctg}\vartheta = 1$
- se $\text{ctg}\vartheta > 2.5 \rightarrow \text{ctg}\vartheta = 2.5$
- se $1 \leq \text{ctg}\vartheta \leq 2.5 \rightarrow \text{ctg}\vartheta = \text{ctg}\vartheta_0$

Il rinforzo a taglio delle travi mediante sistema CAM consiste nell'applicazione di fasciature costituite da nastri pre-tesi, disposte in maniera discontinua lungo l'asse della trave con funzione di staffatura aggiuntiva. Il passo delle legature e il numero dei nastri sovrapposti sono dimensionati per raggiungere il valore di taglio resistente di progetto.

La rilegatura può avvenire per l'intera altezza della trave (andando a forare il solaio), oppure, nei casi in cui non sia possibile intervenire a livello di solaio, può avvenire anche su parziale altezza della trave (andando a forare la trave stessa). Per valutare l'incremento di resistenza a taglio offerto dall'intervento di rinforzo mediante CAM, si considera la formula che la normativa riporta per la valutazione della resistenza al taglio dovuta alla presenza di armatura trasversale e la si modifica introducendo il fattore moltiplicativo 0.5 per tener conto di quanto prescritto al paragrafo C8A.7.2.1 della Circ. 617 del 02/02/2009: "Il contributo della camicia alla resistenza a taglio può essere considerato aggiuntivo alla resistenza preesistente purché la camicia rimanga interamente in campo elastico. Tale condizione è necessaria affinché essa limiti l'ampiezza delle fessure e assicuri l'integrità del conglomerato, consentendo il funzionamento del meccanismo resistente dell'elemento preesistente. Se la tensione nella camicia è limitata al 50% del valore di snervamento l'espressione della resistenza a taglio aggiuntiva offerta dalla camicia vale ...". Si valuta quindi l'effetto dell'incamiciatura nel modo seguente:

$$\Delta V_{Rsd} = 0.5 \cdot 0.9 \cdot d_f \cdot \frac{2 \cdot t_{n,tot} \cdot b_n}{s_n} \cdot f_{yd,nastri} \cdot ctg\theta \quad (7)$$

Dove:

$f_{yd,nastri}$ = tensione di calcolo dei nastri;

$t_{n,tot}$ = spessore di un nastro moltiplicato per il numero di nastri eventualmente sovrapposti;

b_n = altezza dei nastri;

s_n = interasse dei nastri;

d = altezza utile della sezione;
 $d_f = d$ se i nastri cerchiano tutta l'altezza della trave;
 $d_f = d - h_{solaio}$ se i nastri cerchiano parzialmente l'altezza della trave (intervento sotto solaio).

La resistenza a "taglio-trazione" totale vale dunque (ponendo $\alpha = 90^\circ$, cioè staffe ortogonali all'asse dell'elemento):

$$V_{Rsd} + \Delta V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (ctg\alpha + ctg\theta)$$

$$\sin\alpha + 0.5 \cdot 0.9 \cdot d_f \cdot \frac{2 \cdot t_{n,tot} \cdot b_n}{s} \cdot f_{yd,nastri} \cdot ctg\theta$$

Anche in presenza di CAM la resistenza ultima si ottiene per quel valore di ϑ che rende uguali la resistenza a "taglio-trazione", $V_{Rsd} + \Delta V_{Rsd}$, con quella a "taglio-compressione", V_{Rcd} :

$$ctg\theta_0 = \sqrt{\frac{b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd}}{2A_s \cdot f_{yd} + \frac{d_f \cdot t_{n,tot} \cdot b_n \cdot f_{yd,nastri}}{d \cdot s_n}} - 1}$$

5.3 Risultati attesi

I valori analitici di carico e taglio resistente delle travi, previsti in fase progettuale sono stati calcolati in funzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali ottenute dalle prove di compressione del calcestruzzo e dalle prove di trazione sugli acciai.

La valutazione analitica del taglio resistente è stata effettuata considerando o meno:

- l'effetto del confinamento indotto dal cerchiaggio della sezione della trave con nastri a tutt'altezza o a parziale altezza;
- il contributo aggiuntivo dei nastri con un tasso di tensione ridotto, pari allo 0.50 f_{yd} ;
- il contributo aggiuntivo dei nastri con un tasso di tensione pari f_{yd} ;

5.4 Riassunto dei risultati delle prove sperimentali

In questo paragrafo, per motivi di spazio, sono riassunte per ogni provino le immagini del danneggiamento, la curva taglio-spostamento verticale ricavata dalla media dei dati registrati dalla strumentazione applicata e un confronto fra capacità resistente calcolata e sperimentale.

I provini privi di armatura rappresentano il ri-

Figura 13
Resistenza a taglio: relazione fra l'inclinazione del puntone compresso di calcestruzzo e le resistenze per taglio trazione e per taglio compressione.

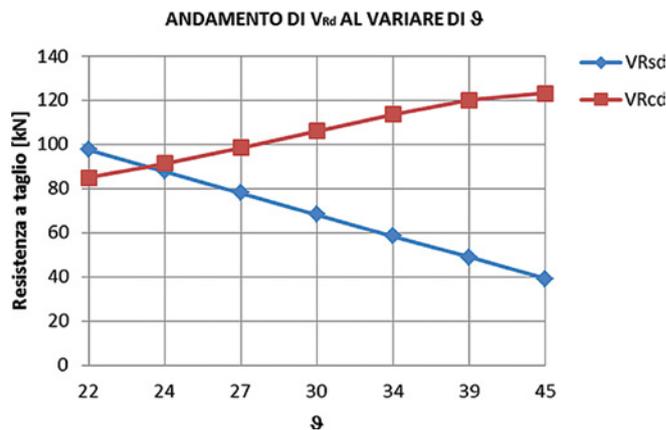


Tabella 1 - Riassunto delle predizioni in termini di capacità resistente dei provini a taglio

ID TRAVE	Predizione capacità resistente a taglio VRd,atteso [kN]			
	(confinamento: NO) (camicia elastica: SI)	(confinamento: NO) (camicia elastica: NO)	(confinamento: SI) (camicia elastica: SI)	(confinamento: SI) (camicia elastica: NO)
TG NR	90.00			
TG P 3N P20	112.08	121.78	123.99	137.59
TG T 3N P20	120.19	123.07	129.89	135.62

ferimento per valutare l'efficacia dei sistemi di rinforzo studiati. Nei casi specifici, i provini non armati (TG NR_1, TG NR_2, TG NR_3) sono caratterizzati da un meccanismo in cui si è potuta chiaramente osservare la formazione di un traliccio resistente e la rottura del corrente compresso.

Nel caso dei provini dotati di sistema di rinforzo CAM, gli obiettivi delle prove consistono anche

nella valutazione di parametri aggiuntivi quali: il contributo a taglio dei nastri in acciaio, il livello di danneggiamento a collasso della trave e della camicia di rinforzo (quest'ultima deve rimanere sempre in campo elastico), l'effettivo contributo del rinforzo CAM nel confinamento indotto.

Negli schemi di Figura 14 sono riportate la disposizioni della strumentazione di prova per le diverse configurazioni di rinforzo studiate.

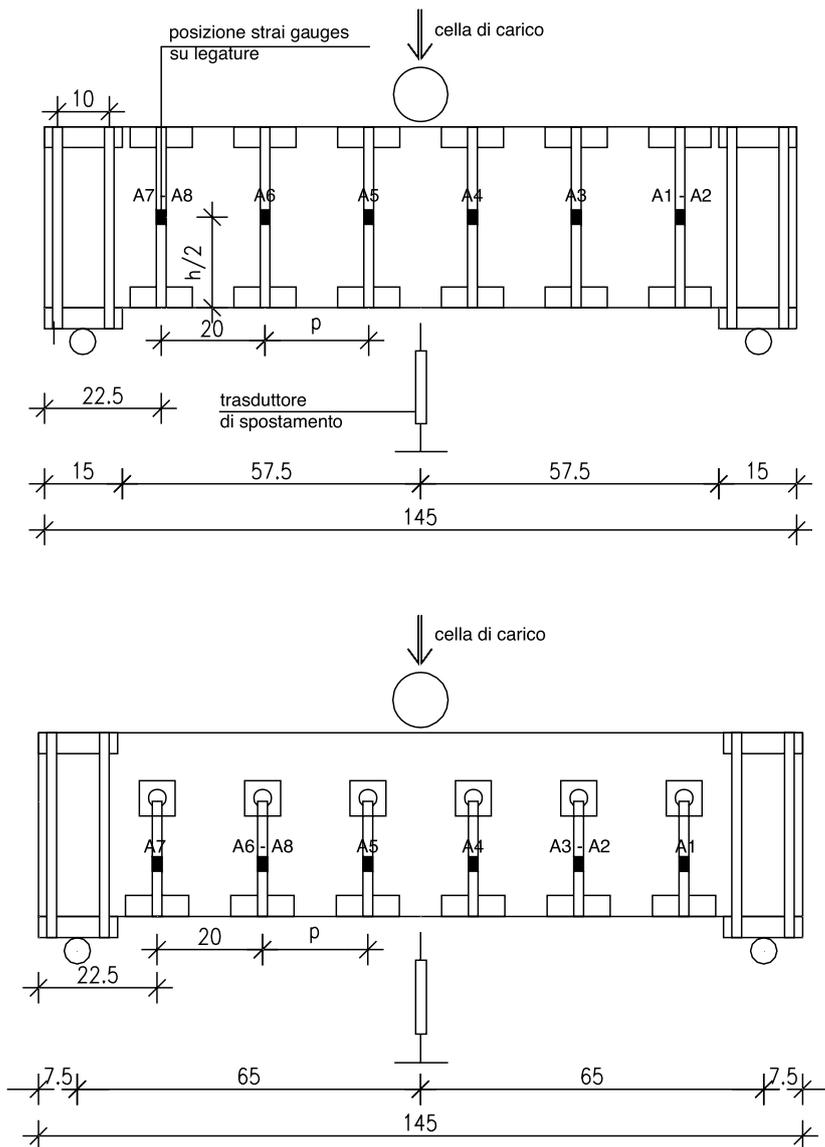
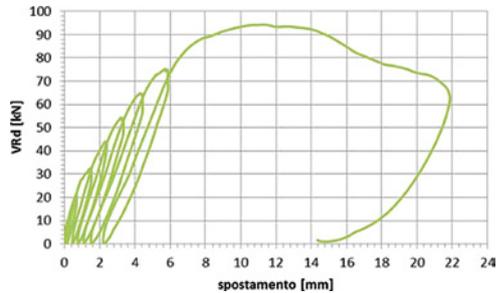
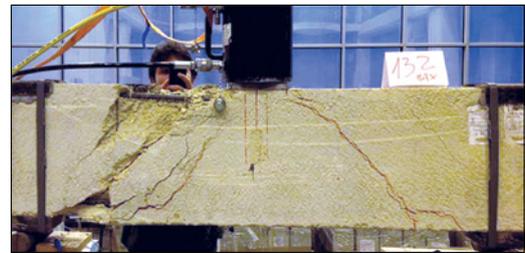
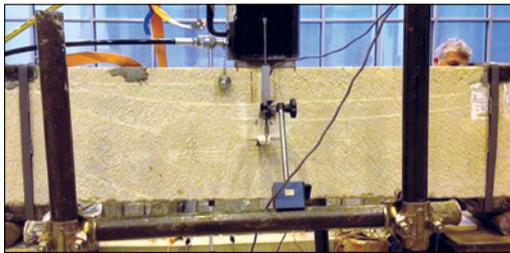


Figura 14
Configurazione di prova e disposizione strumenti per i due differenti sistemi di rinforzo studiati.

Figura 15
 Provino TG NR_1:
 configurazione di prova (in
 alto a sinistra), meccanismo
 di rottura riscontrato (in alto
 a destra), legge sperimentale
 taglio-spostamento (valori
 medi, in basso a sinistra),
 confronto fra capacità a
 taglio stimata e sperimentale
 (in basso a destra).

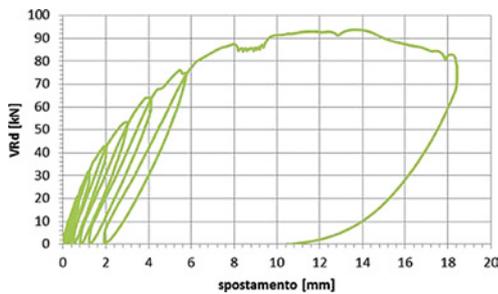
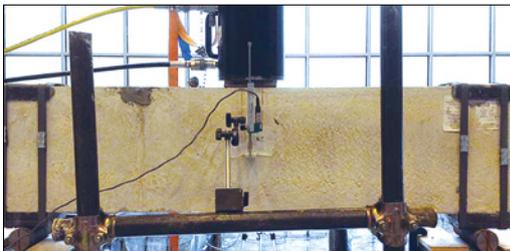
Provino TG NR_1 – Trave non rinforzata



Taglio Atteso $V_{Rd,atteso}$ [kN]	Taglio di Prova $V_{Rd,prova}$ [kN]	$\frac{V_{Rd,prova}}{V_{Rd,atteso}}$
90.0	94.3	1.05

Figura 16
 Provino TG NR_2:
 configurazione di prova (in
 alto a sinistra), meccanismo
 di rottura riscontrato (in alto
 a destra), legge sperimentale
 taglio-spostamento (valori
 medi, in basso a sinistra),
 confronto fra capacità a
 taglio stimata e sperimentale
 (in basso a destra).

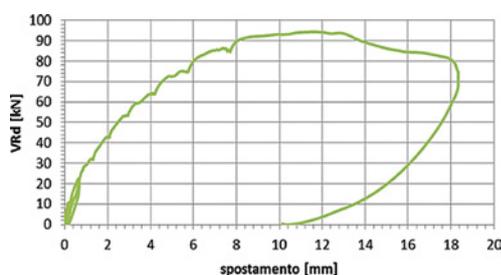
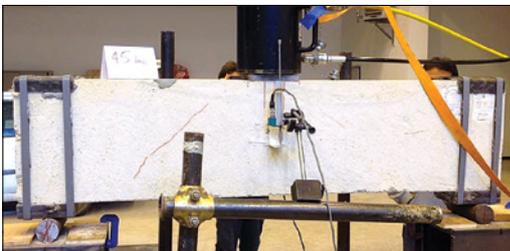
Provino TG NR_2 – Trave non rinforzata



Taglio Atteso $V_{Rd,atteso}$ [kN]	Taglio di Prova $V_{Rd,prova}$ [kN]	$\frac{V_{Rd,prova}}{V_{Rd,atteso}}$
90.0	93.8	1.04

Figura 17
 Provino TG NR_3:
 configurazione di prova (in
 alto a sinistra), meccanismo
 di rottura riscontrato (in alto
 a destra), legge sperimentale
 taglio-spostamento (valori
 medi, in basso a sinistra),
 confronto fra capacità a
 taglio stimata e sperimentale
 (in basso a destra).

Provino TG NR_3 – Trave non rinforzata

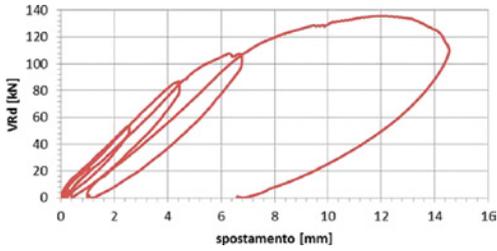


Taglio Atteso $V_{Rd,atteso}$ [kN]	Taglio di Prova $V_{Rd,prova}$ [kN]	$\frac{V_{Rd,prova}}{V_{Rd,atteso}}$
90.0	94.2	1.05

Provino TG T 3N P20_1 – Rinforzo a cerchiatura completa



Figura 18
Provino TG T 3N P20_1:
configurazione di prova (in alto a sinistra), meccanismo di rottura riscontrato (in alto a destra), legge sperimentale taglio-spostamento (valori medi, in basso a sinistra), confronto fra capacità a taglio stimata e sperimentale (in basso a destra).

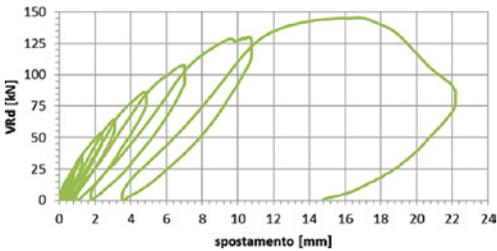


Descrizione Trave	Taglio Atteso $V_{Rd,atteso}$ [kN]	Taglio Di Prova $V_{Rd,prova}$ [kN]	$V_{Rd,prova}$ $V_{Rd,atteso}$
TG T 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: SI	120.19	135.8	1.13
TG T 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: NO	123.07		1.10
TG T 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: SI	129.89		1.05
TG T 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: NO	135.62		1.00

Provino TG T 3N P20_2 – rinforzo a cerchiatura completa



Figura 19
Provino TG T 3N P20_2:
configurazione di prova (in alto a sinistra), meccanismo di rottura riscontrato (in alto a destra), legge sperimentale taglio-spostamento (valori medi, in basso a sinistra), confronto fra capacità a taglio stimata e sperimentale (in basso a destra).



Descrizione Trave	Taglio Atteso $V_{Rd,atteso}$ [kN]	Taglio Di Prova $V_{Rd,prova}$ [kN]	$V_{Rd,prova}$ $V_{Rd,atteso}$
TG T 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: SI	120.19	145.4	1.21
TG T 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: NO	123.07		1.18
TG T 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: SI	129.89		1.12
TG T 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: NO	135.62		1.07

Provino TG T 3N P20_3 – rinforzo a cerchiatura completa

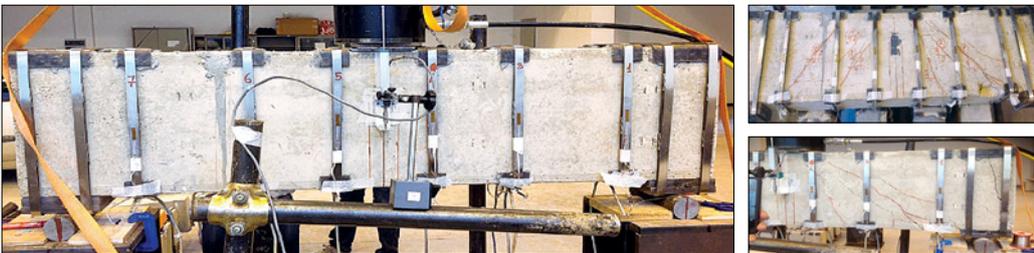
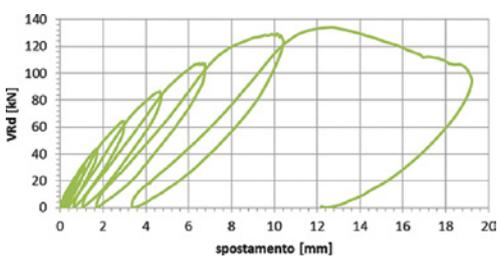


Figura 20
Provino TG T 3N P20_3:
configurazione di prova (in alto a sinistra), meccanismo di rottura riscontrato (in alto a destra), legge sperimentale taglio-spostamento (valori medi, in basso a sinistra), confronto fra capacità a taglio stimata e sperimentale (in basso a destra).

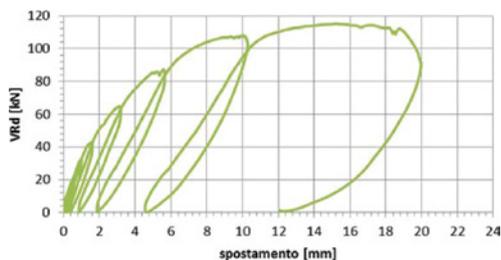


Descrizione Trave	Taglio Atteso $V_{Rd,atteso}$ [kN]	Taglio Di Prova $V_{Rd,prova}$ [kN]	$V_{Rd,prova}$ $V_{Rd,atteso}$
TG T 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: SI	120.19	134.2	1.12
TG T 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: NO	123.07		1.09
TG T 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: SI	129.89		1.03
TG T 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: NO	135.62		0.99

Figura 21

Provino TG P 3N P20_1: configurazione di prova (in alto a sinistra), meccanismo di rottura riscontrato (in alto a destra), legge sperimentale taglio-spostamento (valori medi, in basso a sinistra), confronto fra capacità a taglio stimata e sperimentale (in basso a destra).

Provino TG P 3N P20_1 – rinforzo a cerchiatura parziale

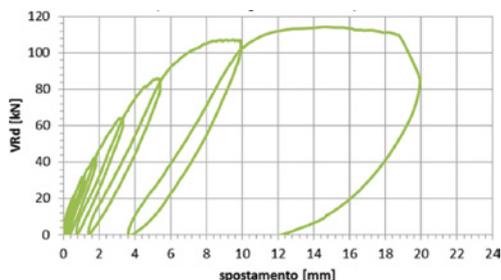
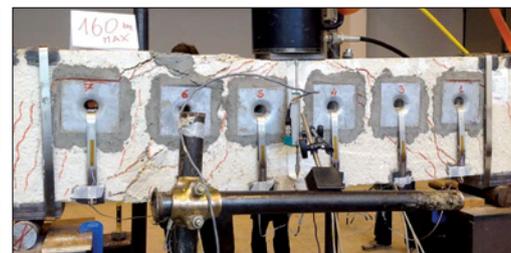
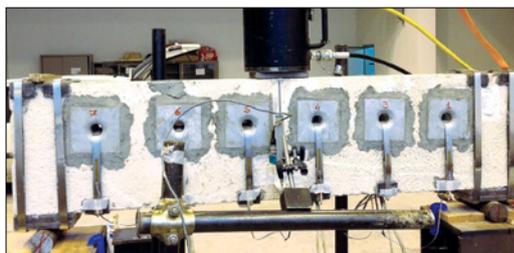


Descrizione Trave	Taglio Atteso $V_{Rd,atteso}$ [kN]	Taglio Di Prova $V_{Rd,prova}$ [kN]	$V_{Rd,prova}$ $V_{Rd,atteso}$
TG P 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: SI	112.08	115.1	1.03
TG P 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: NO	121.78		0.94
TG P 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: SI	123.99		0.93
TG P 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: NO	137.59		0.84

Figura 22

Provino TG P 3N P20_2: configurazione di prova (in alto a sinistra), meccanismo di rottura riscontrato (in alto a destra), legge sperimentale taglio-spostamento (valori medi, in basso a sinistra), confronto fra capacità a taglio stimata e sperimentale (in basso a destra).

Provino TG P 3N P20_2 – rinforzo a cerchiatura parziale

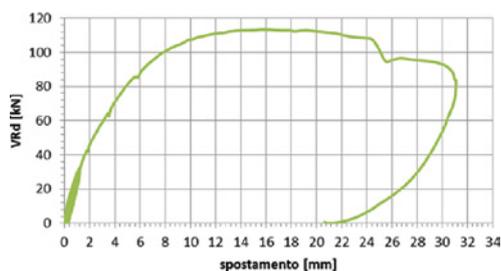


Descrizione Trave	Taglio Atteso $V_{Rd,atteso}$ [kN]	Taglio Di Prova $V_{Rd,prova}$ [kN]	$V_{Rd,prova}$ $V_{Rd,atteso}$
TG P 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: SI	112.08	114.4	1.02
TG P 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: NO	121.78		0.94
TG P 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: SI	123.99		0.92
TG P 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: NO	137.59		0.83

Figura 23

Provino TG P 3N P20_3: configurazione di prova (in alto a sinistra), meccanismo di rottura riscontrato (in alto a destra), legge sperimentale taglio-spostamento (valori medi, in basso a sinistra), confronto fra capacità a taglio stimata e sperimentale (in basso a destra).

Provino TG P 3N P20_3 – rinforzo a cerchiatura parziale



Descrizione Trave	Taglio Atteso $V_{Rd,atteso}$ [kN]	Taglio Di Prova $V_{Rd,prova}$ [kN]	$V_{Rd,prova}$ $V_{Rd,atteso}$
TG P 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: SI	112.08	113.4	1.01
TG P 3N P20: confinamento: NO camicia elastica: NO	121.78		0.93
TG P 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: SI	123.99		0.91
TG P 3N P20: confinamento: SI camicia elastica: NO	137.59		0.82

6. Analisi critica dei risultati

Il valore del taglio resistente ottenuto dalle prove è stato piuttosto stabile per ciascuna tipologia, come mostrano i grafici taglio-spostamento in mezzeria (Figura 24).

Le travi non rinforzate (serie TG NR) sono giunte a rottura con un analogo meccanismo, caratterizzato dalla formazione di un traliccio resistente e dalla rottura del corrente compresso.

Le travi rinforzate con nastri ogni 20 cm e cerchiaggio parziale (serie TG P 3N P20) hanno raggiunto sostanzialmente lo stesso carico di rottura. La crisi si è manifestata con il medesimo meccanismo di collasso: dopo un primo danneggiamento caratterizzato dall'apertura delle fessure, le travi si sono lesionate con fessure inclinate generate a partire dai fori, e sono giunte alla condizione di collasso attraverso la rottura del corrente compresso.

In ultimo, le travi rinforzate con nastri ogni 20 cm e cerchiaggio a tutt'altezza (serie TG T 3N P20) hanno raggiunto la rottura con il medesimo meccanismo di collasso, nonostante la capacità resistente sperimentale a taglio del provino TG T 3N P20_2 sia risultata superiore rispetto agli altri due. Differentemente dalle travi a cerchiaggio parziale, la rottura è avvenuta con la formazione di fessure inclinate e collasso per compressione del puntone in prossimità degli appoggi.

Rispetto alle travi prive di rinforzo, il sistema CAM ha apportato un incremento di capacità a taglio del 20% e del 43% rispettivamente per i casi di cerchiaggio parziale e a tutta altezza.

Il confronto tra i dati teorici e i valori sperimentali ha evidenziato come per le travi a cerchiaggio a tutta altezza (TG T 3N P20) i risultati delle prove sperimentali sono più prossimi ai valori attesi ottenuti considerando sia il confinamento indotto dal cerchiaggio dei nastri sia una tensione dei nastri pari a f_{yd} . Effettivamente le registrazioni effettuate dagli strain gauges hanno mostrato come questi ultimi (nell'allineamento intermedio, a 35 cm dall'appoggio) raggiungano valori di sollecitazione ben più elevate di $0.50 f_{yd}$.

Dalle letture strumentali, ed in particolare dal grafico taglio-deformazione (Figura 25), si osserva che fin quando la trave è sollecitata da un'azione di taglio $V_{sd} \leq V_{Rsd,staffe}$, i nastri non subiscono deformazioni rilevanti; per valori di $V_{sd} > V_{Rsd,staffe}$, i nastri incominciano a deformarsi ed apportano il loro contributo alla resistenza a taglio.

Nello specifico, la trave TG T 3N P20_3, ha mostrato sperimentalmente una resistenza a taglio di $V_{Rd} = 134.16$ kN.

Se si applicano le formulazioni del metodo dell'inclinazione variabile del traliccio e se si considera per il calcestruzzo la resistenza a compressione confinata ($f_{ccd} = 12.18$ N/mm²) ammettendo che la camicia lavori ad una tensione pari a $f_{yd,nastri}$, uguagliando $V_{Rsd} + \Delta V_{Rsd} = V_{Rcd}$ si ottiene un valore di $ctg \vartheta = 0.87 < 1$. Per tali valori la trave va in crisi per rottura del calcestruzzo, come confermato da quanto osservato in fase sperimentale (Figura 26).

Imponendo $ctg \vartheta = 1$, si ottengono i seguenti

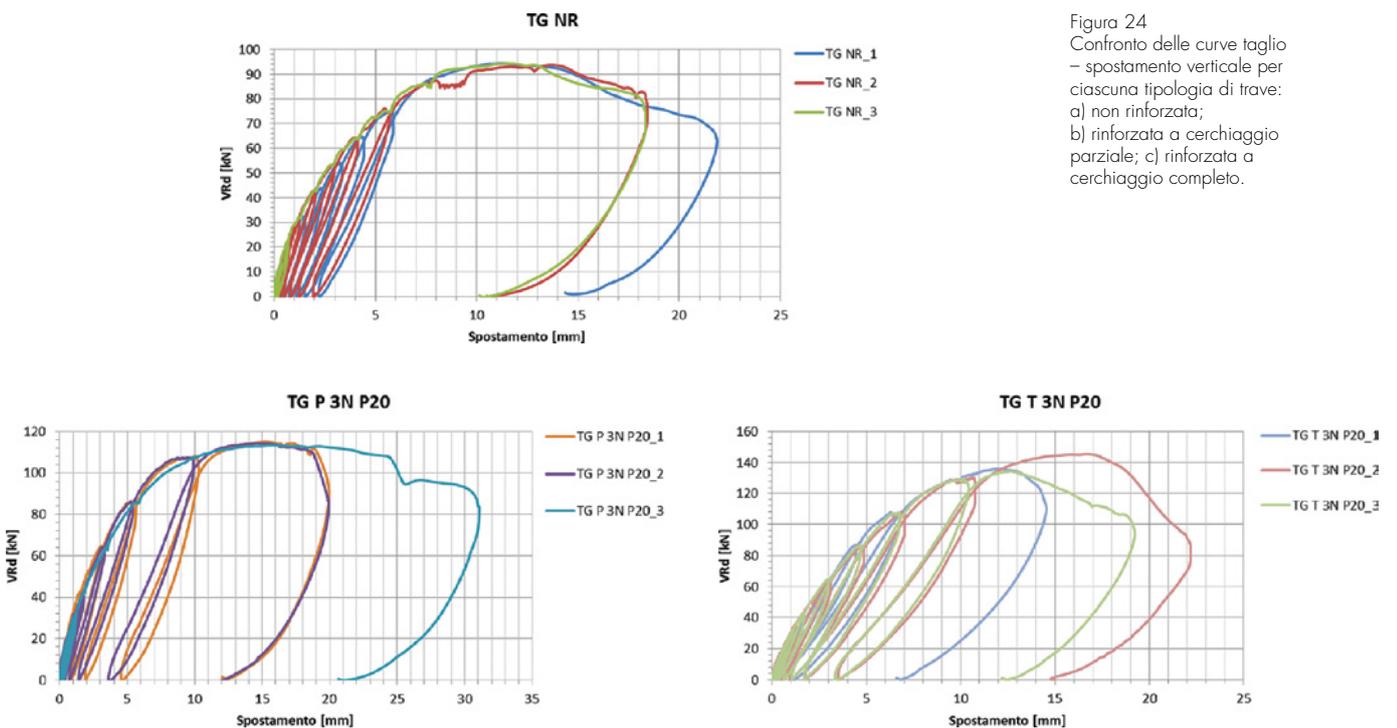


Figura 24
Confronto delle curve taglio – spostamento verticale per ciascuna tipologia di trave: a) non rinforzata; b) rinforzata a cerchiaggio parziale; c) rinforzata a cerchiaggio completo.

contributi:

- resistenza offerta dalle staffe:

$$V_{Rsd} = 0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} \operatorname{ctg}\theta = 39.13 \text{ kN} \quad (15)$$

- resistenza offerta dal CAM:

$$\Delta V_{Rsd} = V_{Rd} = V_{Rsd} = 134.16 - 39.13 = 95.03 \text{ kN} \quad (16)$$

- resistenza offerta dal cls:

$$V_{Rsd} = 0.9 d b_w \alpha_c f'_{cd} \frac{\operatorname{ctg}\theta}{(1 + \operatorname{ctg}^2\theta)} = 135.62 \text{ kN} \approx 134.16 \text{ kN} \quad (17)$$

- sollecitazione sui Nastri:

$$\sigma_{nastri} = \frac{\Delta V_{Rsd}}{0.9 d_f \frac{2 t_{n,tot} b_n \operatorname{ctg}\theta}{s_n}} = 633 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (18)$$

Anche questo risultato è confermato dalla sperimentazione (i nastri disposti a 35 cm dall'appoggio hanno raggiunto una tensione massima di 662 N/mm²).

Il confronto tra i dati teorici e i valori sperimentali per le travi TG P 3N P20 (cerchiaggio parziale) mostra che i risultati delle prove sperimentali sono più prossimi ai valori attesi ottenuti non considerando il contributo del confinamento e considerando la tensione dei nastri ridotta al 50% di f_{yd} . Le registrazioni effettuate dagli strain

gauges disposti sui nastri hanno effettivamente mostrato valori di tensioni inferiori a tale limite.

Anche in questo caso sul grafico taglio-deformazione si osserva che fin quando la trave è sollecitata da un'azione di taglio $V_{sd} \leq V_{Rsd,staffe}$, i nastri non subiscono deformazioni rilevanti; per valori di $V_{sd} > V_{Rsd,staffe}$, i nastri incominciano a deformarsi ed apportano il loro contributo alla resistenza a taglio.

Dalle prove effettuate sulle travi è possibile individuare sperimentalmente:

- resistenza a taglio, V_{Rd} ;
- contributo della resistenza a taglio offerta dalle staffe, V_{Rds} ;
- tensione agente sui nastri, $\sigma_{strain-gauges}$.

Elaborando le precedenti grandezze, è possibile determinare il reale valore della altezza d_f :

- inclinazione delle bielle:

$$\operatorname{ctg}\theta = \frac{V_{Rsd}}{0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd}} \quad (19)$$

- resistenza offerta dal sistema CAM:

$$\Delta V_{Rsd} = V_{Rd} - V_{Rsd} \quad (20)$$

- altezza d_f :

$$d_f = \frac{\Delta V_{Rsd}}{0.9 \sigma_{strain-gauges} \frac{2 t_{n,tot} b_n \operatorname{ctg}\theta}{s_n}} \quad (21)$$

Figura 25
Provino a cerchiaggio a tutta altezza (TG T 3N P20_3): curve sperimentali taglio - deformazione (a sinistra) e relazione tensione - tempo del nastro monitorato tramite strain gauges A2, posto a 35 cm dall'appoggio.

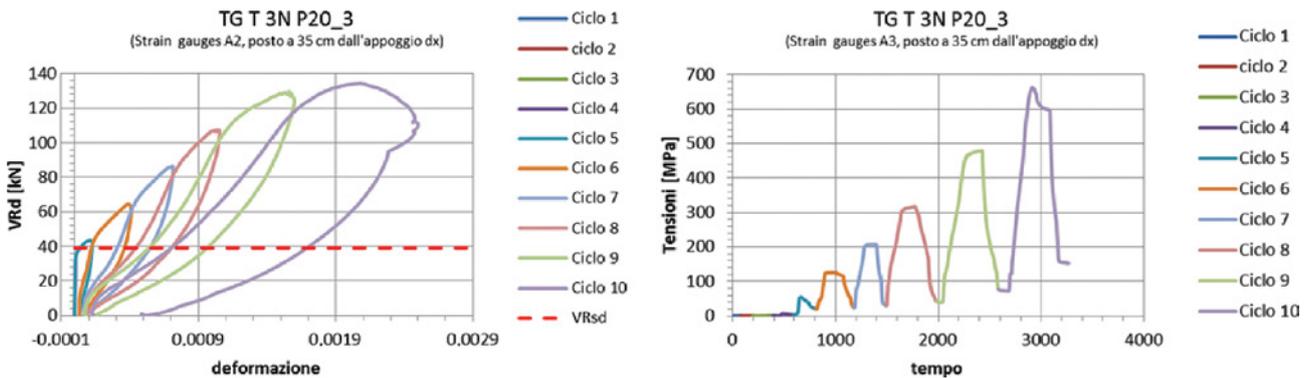
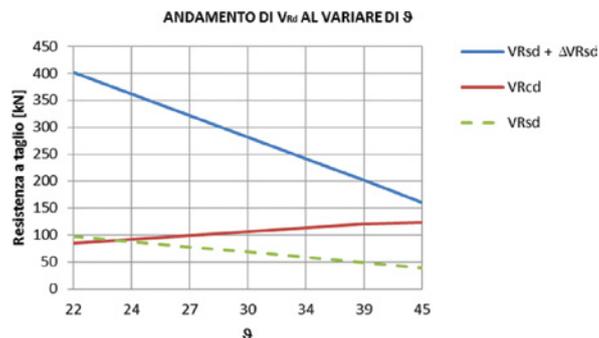


Figura 26
Provino a cerchiaggio a tutta altezza (TG T 3N P20_3): andamento delle componenti resistenti a taglio in funzione dell'inclinazione θ del puntone compresso.



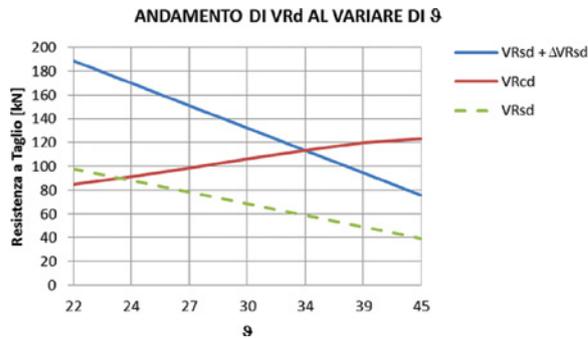
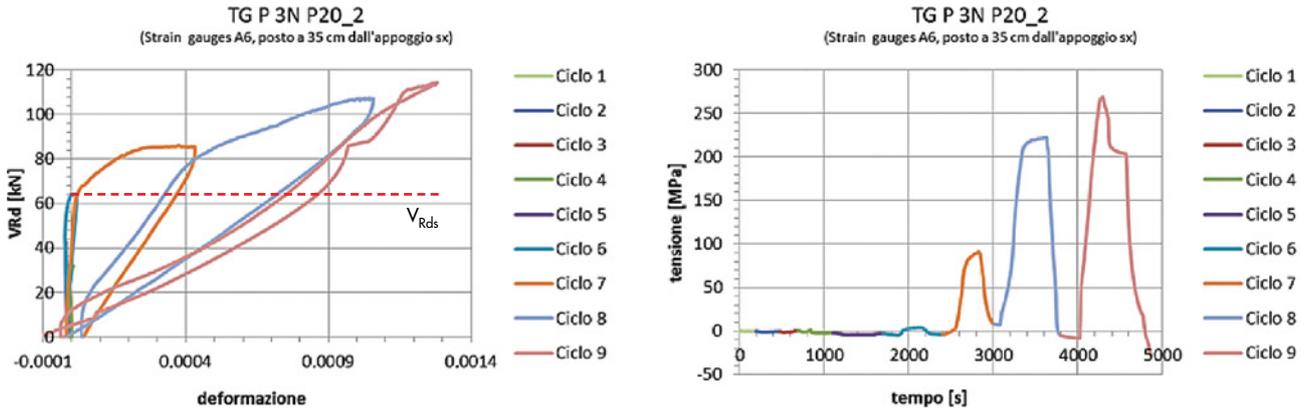


Figura 27
Provino a cerchiaggio parziale (TG P 3N P20_3): curve sperimentali taglio – deformazione (a sinistra) e relazione tensione – tempo del nastro monitorato tramite strain gauges A6, posto a 35 cm dall'appoggio.

Figura 28
Provino a cerchiaggio parziale (TG P 3N P20_3): andamento delle componenti resistenti a taglio in funzione dell'inclinazione θ del puntone compresso.

Si sottolinea che le letture effettuate dagli strain-gauges non tengono conto della pre-tensione iniziale dei nastri, la quale va quindi ad incrementare il loro reale tasso di lavoro.

7. Conclusioni

Una campagna sperimentale è stata condotta per valutare la resistenza a taglio e a flessione di travi in c.a. rinforzate mediante sistema CAM. In questo contributo è stato valutato il solo meccanismo di taglio confrontando tre provini non rinforzati con 3+3 provini provvisti di due differenti sistemi di rinforzo.

Sulla base dei risultati ottenuti, discussi nei paragrafi precedenti, è emerso quanto segue:

- Nel caso di rinforzo con cerchiaggio a tutt'altezza (rinforzo trave sopra solaio):
 - a) il cerchiaggio dei nastri in acciaio interviene come incremento di resistenza a compressione del calcestruzzo;
 - b) il tasso di lavoro dei nastri è prossimo a f_{yd} .
- Nel caso di rinforzo con cerchiaggio ad altezza parziale (rinforzo trave sotto solaio):
 - a) il cerchiaggio dei nastri in acciaio non interviene come incremento di resistenza a compressione del calcestruzzo;
 - b) il tasso di lavoro dei nastri è prossimo a $0.5 f_{yd}$.

Dalle suddette considerazioni scaturiscono le seguenti proposte di modifiche delle formulazioni

attualmente vigenti:

- Rinforzo con cerchiaggio a tutt'altezza:
 - resistenza di calcolo a "taglio-trazione":

$$V_{Rsd} + \Delta V_{Rsd} = 0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \sin\alpha + 0.9 d_f \frac{2t_{n,tot}b_n}{S_n} f_{yd,nastri} \text{ctg}\theta \quad (22)$$

- con $d_f = d = H - c$ altezza utile della sezione.

- resistenza di calcolo a "taglio-compressione":

$$V_{Rcd} = 0.9 d b_w \alpha_c f'_{ccd} \frac{(\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta)}{(1 + \text{ctg}^2\theta)} \quad (23)$$

in cui

$$f'_{ccd} = 0.5 f_{ccd}$$

f_{ccd} è la resistenza del conglomerato confinato

$$f_{ccd} = f_{cd} \left[1 + 3.7 \left(\frac{0.5 \cdot \alpha_n \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot f_{yd}}{f_{cd}} \right)^{0.86} \right] \quad (24)$$

- Rinforzo con cerchiaggio ad altezza parziale:
 - resistenza di calcolo a "taglio-trazione":

$$V_{Rsd} + \Delta V_{Rsd} = 0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \sin\alpha + 0.9 d_f \frac{2t_{n,tot}b_n}{S_n} 0.5 f_{yd,nastri} \text{ctg}\theta \quad (25)$$

con $d_f = d - h_{\text{solaio}} = H - c - h_{\text{solaio}}$
 - resistenza di calcolo a "taglio-compressione":

$$V_{Rcd} = 0.9 d b_w \alpha_c f'_{cd} \frac{(\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta)}{(1 + \text{ctg}^2\theta)} \quad (26)$$

in cui
 $f'_{cd} = 0.5 f_{cd} = 0.50 (0.85 f_{ck} / \gamma_c)$
 f_{cd} è la resistenza di calcolo a compressione

Per concludere, con riferimento allo stato tensionale dei nastri, è necessario sottolineare che analizzando i meccanismi di collasso nelle travi a cerchiaggio parziale, si è osservato che tutte le travi si sono danneggiate lesionandosi con fessure inclinate che si sono generate a partire dai fori. I

nastri, non essendo attraversati dalle lesioni, non sono stati soggetti a rilevanti deformazioni per cui hanno mantenuto un tasso di lavoro basso. Probabilmente, se la trave fosse stata più alta, le lesioni avrebbero intercettato i nastri, i quali si sarebbero deformati e avrebbero raggiunto tensioni più alte. Nelle travi con nastri a tutt'altezza, le lesioni invece hanno attraversato i nastri, che quindi sono stati soggetti a deformazioni rilevanti e a tassi di lavoro importanti.

Resta dunque aperta la sperimentazione volta all'indagine del comportamento dei nastri, in riferimento al fattore 0.50 proposto dalla normativa come coefficiente riduttivo della tensione della camicia.