



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA
Dipartimento di Strutture

Fabio Sorrenti

Studio teorico-sperimentale del comportamento meccanico delle travi
Prefabbricate Reticolari Miste (PREM)

Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture
sezione: Tecnica delle Costruzioni
Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche
Ciclo XXIV (2008-2011)
S.S.D. ICAR 09

Coordinatore:


prof. Renato S. Olivito

Tutor:

prof. Luciano Ombres


UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA
Dipartimento di Strutture

Fabio Sorrenti

**STUDIO TEORICO-SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO
MECCANICO DELLE TRAVI PREFABBRICATE RETICOLARI
MISTE (PREM)**

Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture
sezione: Tecnica delle Costruzioni

Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche
Ciclo XXIV (2008-2011)
S.S.D. ICAR 09

Coordinatore: prof. Renato S. Olivito

Tutor: prof. Luciano Ombres

INDICE

	INTRODUZIONE	1
Capitolo 1	CENNI STORICI, INQUADRAMENTO NORMATIVO E STATO DELL'ARTE SULLE TRAVI RETICOLARI MISTE	
	1.1 La trave PREM	3
	1.2 Cenni storici	6
	1.3 Inquadramento normativo	8
	1.4 Comportamento delle unioni saldate	10
	1.5 Stabilità in prima fase del traliccio metallico	11
	1.6 Connessione acciaio - calcestruzzo	14
Capitolo 2	PROVE SPERIMENTALI A FLESSIONE SULLE TRAVI PREM	
	2.1 Obiettivi della ricerca	17

2.2	Descrizione delle prove	19
2.3	Prove sui materiali	21
2.4	Risultati	23
2.5	Confronto numerico - sperimentale	29
Capitolo 3	IL TAGLIO NELLE TRAVI IN CALCESTRUZZO ARMATO E NELLE TRAVI PREM	
3.1	Introduzione	35
3.2	Travi senza armatura a taglio	37
3.3	Travi armate a taglio	39
3.4	Meccanismo di Ritter-Mörsch	40
3.5	Meccanismo a inclinazione variabile	43
3.6	Il taglio nelle travi PREM	46
3.7	Il modello a traliccio isostatico (Modello 1)	48
3.8	Il modello a traliccio composto (Modello 2)	48
3.9	Il modello dell'anima equivalente (Modello 3)	49
Capitolo 4	PROVE SPERIMENTALI A TAGLIO SULLE TRAVI PREM	
4.1	Descrizione delle prove	53
4.2	Prove sulle travi	59
4.3	Risultati	61
4.4	Confronto teorico - numerico - sperimentale	117
	CONCLUSIONI	157
	BIBLIOGRAFIA	161

INTRODUZIONE

Nel presente lavoro di dottorato si presentano i risultati di un'attività di ricerca che ha riguardato lo studio sperimentale di elementi tralicciati in acciaio conglobati nel getto di calcestruzzo collaborante denominati travi PREM, acronimo di Prefabbricata RETicolare Mista. PREM non è un marchio registrato ma indica semplicemente una tipologia strutturale e può dunque essere usato liberamente per indicare tutte le travi appartenenti a questa categoria.

L'attività di ricerca svolta ha riguardato sia il comportamento a flessione sia quello a taglio delle travi PREM. Essa si compone di diverse fasi, nella prima fase è stata eseguita un'analisi sperimentale del comportamento meccanico delle travi, nella seconda fase si è proceduti a un confronto teorico-sperimentale al fine di verificare l'efficacia dei tradizionali modelli di calcolo delle strutture in c.a. normale nel predire il comportamento in esercizio (Fessurazione, Deformazione) delle travi reticolari miste, infine, nella terza fase si è fatto un confronto numerico-sperimentale con l'ausilio di un codice agli elementi finiti LUSAS al fine di trovare una congruenza fra i risultati sperimentali e numerici e procedere con lo studio della risposta degli elementi alle diverse sollecitazioni.

La problematica legata al taglio nella seconda fase di vita della trave PREM è particolarmente bisognosa di studio ed approfondimenti.

In presenza di strutture fortemente armate a taglio, che nel caso specifico delle travi reticolari miste significa con un traliccio d'anima significativo (il che avviene nella maggior parte dei casi in presenza di autoportanza in prima fase), i problemi legati alla resistenza a taglio non sono da individuare a partire dai meccanismi legati alla resistenza del calcestruzzo per taglio-trazione (quelli dovuti alla resistenza della parte compressa di calcestruzzo, all'ingranamento degli inerti e all'effetto spinotto). In tali situazioni, diventa critico il problema del comportamento a taglio-compressione: l'elemento debole del traliccio resistente viene ad essere il puntone compresso, soprattutto se non associato ad alcun elemento metallico del traliccio (ovvero nella morfologia di puntone verticale). Questa è una peculiarità delle travi reticolari miste, soprattutto con forte autoportanza, per le quali il collasso a taglio è spesso legato al collasso del puntone compresso.

Tra gli scopi di questo lavoro è quello di valutare l'affidabilità dei modelli analitici a disposizione per la verifica di resistenza a taglio di queste travi.

CAPITOLO **1****CENNI STORICI, INQUADRAMENTO NORMATIVO E STATO
DELL'ARTE SULLE TRAVI RETICOLARI MISTE****1.1 La trave PREM**

Una Trave PREM è un elemento prevalentemente inflesso costituito da una trave metallica reticolare, con o senza un fondello prefabbricato, in calcestruzzo o in acciaio, inglobata in tutto o in parte in un getto di calcestruzzo in opera. La parte prefabbricata di una Trave PREM, prima del getto integrativo, è identificata anche come "traliccio" e ne costituisce il principale elemento caratterizzante (figura 1.1).

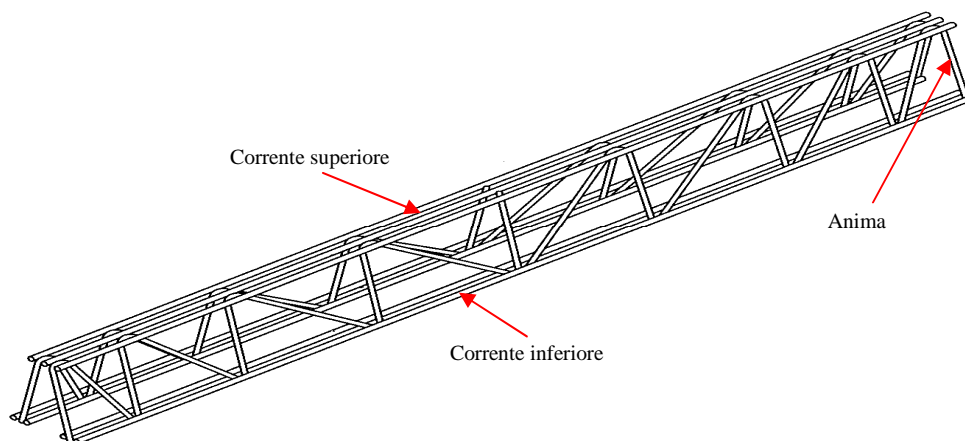


Figura 1.1: Traliccio multiplo di una trave PREM

Le parti principali che costituiscono il traliccio sono:

- il corrente inferiore;
- il corrente superiore;
- l'anima.

Il corrente inferiore può essere costituito da un piatto in acciaio, eventualmente accompagnato da barre longitudinali (figura 1.2), da un fondello in calcestruzzo armato (figura 1.3) oppure da sole barre in acciaio (figura 1.4). Il corrente superiore può essere costituito da barre tonde, quadre o angolari, saldate ai ferri di parete costituenti l'anima. L'anima (o staffatura o greca) è costituita da un traliccio semplice o multiplo di barre tonde, generalmente di uguale diametro.



Figura 1.2: Travi con piatto in acciaio

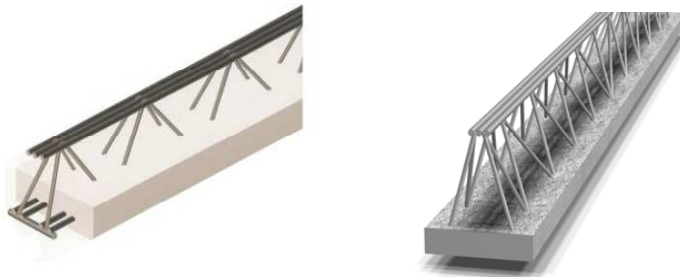


Figura 1.3: Travi con fondello in calcestruzzo

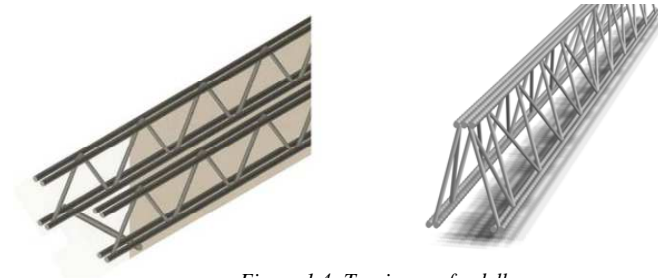


Figura 1.4: Travi senza fondello

I tralicci d'anima possono essere realizzati con passo concorde o sfalsato (figura 1.5).

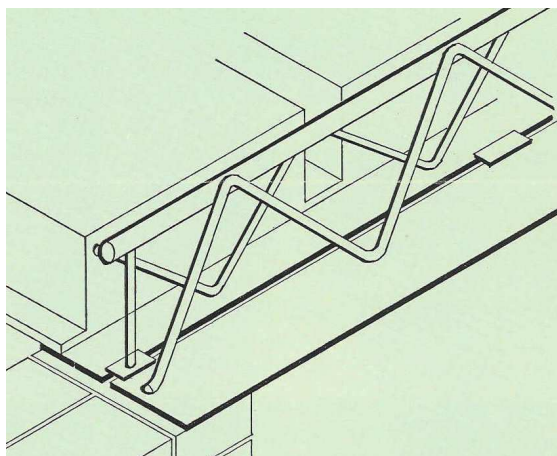
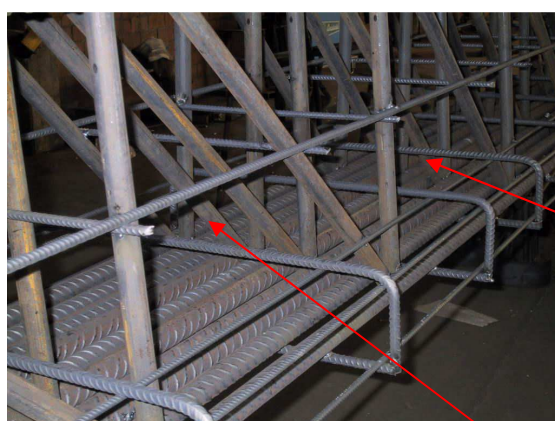


Figura 1.5: Travi con anime di passo sfalsato

Nel traliccio, oltre ai suddetti elementi principali, possono trovarsi anche altri elementi quali controventi d'anima e/o calastrelli longitudinali e trasversali (figura 1.6).



Controventi longitudinali

Controventi trasversali

Figura 1.6: Controventi d'anima longitudinali e trasversali

Spesso sono presenti gli apparecchi di appoggio delle travi, soprattutto nel caso di autoportanza in prima fase delle stesse. Essi sono costituiti generalmente da un piatto o tondo traverso, saldato a due o più spezzoni di ferro terminali, con lo scopo di stabilizzare la trave in fase di posa e di ancorare i terminali dopo

che il getto di calcestruzzo di completamento della trave abbia fatto presa (cioè in seconda fase).

Nel caso di utilizzo di travi ribassate, possono essere presenti anche gli apparecchi di appoggio per i solai prefabbricati e sono costituiti generalmente da angolari collegati alle anime mediante ferri di supporto.

La continuità strutturale delle travi PREM in seconda fase può essere realizzata mediante:

- barre integrative, superiori ed inferiori (monconi);
- tralicci metallici posizionati a cavallo del nodo;
- manicotti.

Per le costruzioni in zona sismica si utilizzano staffe di contenimento nelle zone critiche per come previsto dalle nuove norme tecniche.

1.2 Cenni storici

Le travi PREM possono ritenersi come una evoluzione e particolare applicazione delle più generali travi composte acciaio-calcestruzzo. Le prime applicazioni di tali tipologie di travi compaiono negli anni '60, anche se le radici di tale sistema costruttivo vanno ricercate nelle prime realizzazioni di travi miste acciaio-calcestruzzo effettuate nella prima metà del '900. Il sistema misto fu utilizzato nella realizzazione di impalcati da ponte in cui si affidava alla soletta il solo compito di trasferire le azioni alle travi metalliche. Ma ben presto apparvero evidenti le maggiori potenzialità delle travi miste aperte dallo sfruttamento della piena collaborazione tra profilo metallico e soletta.

Nel 1967 l'Ing. Salvatore Leone brevettò una "trave portante metallica per solai e per volte di copertura, destinata a fungere da elemento di appoggio e ad essere inglobata nella gettata di calcestruzzo" antesignana di quella che verrà in seguito definita la Trave REP[®] (1970), destinata alla civile abitazione. La produzione industriale di queste travi ebbe inizio circa un anno dopo, per merito di un prefabbricatore di Milano: la SEP, Strutture Edili Prefabbricate, che diede il proprio nome a queste travi per alcuni anni distribuendole in tutta Italia, anche se al centro - sud operavano le Fornaci Patricelli di Pescara.

In quegli anni iniziarono le prime realizzazioni estere in Svizzera, Arabia Saudita, Marocco, Francia, Spagna e Stati Uniti.

Negli anni immediatamente successivi al deposito del primo brevetto, oltre al parere positivo espresso ufficialmente dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici il 24.03.1969, viene pubblicato nel 1972 dall'Ing. Leone il "procedimento di calcolo per le Travi REP[®]" e altri due brevetti, grazie ai quali, fu possibile raddoppiare le anime conformate a triangolo e aumentare le barre costituenti il corrente superiore.

Nei decenni a seguire sono milioni i chili prodotti grazie ai vantaggi che questo sistema offre e che si possono così riassumere:

- economia; riduzione dei costi generali;
- riduzione dei tempi di messa in opera;
- autoportanza con conseguente eliminazione di cassature e puntelli a vantaggio di una maggiore pulizia e organizzazione del cantiere;
- sicurezza; annullati i rischi connessi alle lavorazioni in cantiere delle armature delle travi;
- riduzione delle deformazioni di lungo periodo grazie ad una elevata rigidità delle travi;
- riduzione delle sezioni (meno calcestruzzo più armatura);
- riduzione dei pesi che scaricano in fondazione;
- aumento dell'interasse fra i pilastri con conseguente aumento della luce delle travi;
- versatilità; le travi possono essere modellate sulla base di esigenze strutturali specifiche;
- continuità ai nodi grazie all'inserimento di opportuna monconatura;
- non necessità l'impiego di manodopera specializzata.

Alla fine degli anni '70, alla morfologia di base con piatto in acciaio si affiancò la morfologia con piatto in calcestruzzo, la Trave Lastra, introdotta dall'Ing. Livio Izzo, che ha avuto la sua grandissima diffusione solo dopo il ridimensionamento dell'efficacia delle vernici ignifughe. Nello stesso periodo venne proposta anche la Trave Solaio per risolvere gli impalcati da ponte con forte peso proprio di getto e luci importanti. Una novità rilevante in queste travi, anch'essa introdotta dall'Ing. Livio Izzo negli anni '70, fu la morfologia

d'anima a puntoni verticali, invece di quella a puntoni obliqui, con molteplici vantaggi di efficienza ed efficacia:

- puntone più corto e, quindi, meno snello;
- ambedue gli elementi d'anima tesi in seconda fase anziché uno teso ed uno compresso;
- precompressione del puntone verticale in prima fase e rilascio della "sovraresistenza" in seconda fase.

Anche l'ambiente universitario inizia a dimostrare il proprio interesse per questo nuovo tipo di travi miste dedicando loro una serie di studi e ricerche che continuano ancora oggi e che stanno culminando nella pubblicazione di normative tecniche ad hoc. [1]

1.3 Inquadramento normativo

Per oltre 40 anni si sono sviluppate le più svariate tipologie di travi tralicciate senza però che nessun organismo esterno ai produttori si preoccupasse di fornire indicazioni tecniche ed operative per la progettazione e l'esecuzione delle stesse.

Il D.M. 14/01/2008, con il § 4.6 ha segnato un punto di non ritorno per tutti gli operatori del settore. Esso recita, infatti, che *i materiali non tradizionali potranno essere utilizzati per la realizzazione di opere strutturali previa autorizzazione del Servizio Tecnico Centrale su parere del Consiglio Superiore dei LL.PP.* Le travi tralicciate in acciaio conglobate nel getto di calcestruzzo collaborante vengono menzionate esplicitamente dal legislatore. Si è creato, dunque, un vuoto normativo e per colmarlo è stata nominata una Commissione Ministeriale con il compito di produrre delle Linee Guida per le travi Reticolari Miste. Le Linee Guida dovranno stabilire i principi per la progettazione e l'esecuzione di tali tipologie di travi.

Conseguentemente a tale prescrizione si è sviluppata una intensa attività pre-normativa: il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ed il Servizio Tecnico Centrale con le emanande "Procedure per il rilascio dell'autorizzazione all'impiego di travi tralicciate conglobate nel getto di calcestruzzo collaborante"; il CNR, con il suo progetto di DOCUMENTO TECNICO.

Inoltre, sul piano dei contributi tecnici disponibili ci sono Assoprem con le "Raccomandazioni per la progettazione e l'esecuzione di travi prefabbricate reticolari miste", ed Acai, con il suo "Disciplinare di calcolo".

La Commissione istituita in applicazione del D.M. 14/01/2008, ha di recente pubblicato le *Linee guida per l'utilizzo di travi tralicciate in acciaio conglobate nel getto di calcestruzzo collaborante e procedure per il rilascio dell'autorizzazione all'impiego*. Tutte le strutture reticolari miste sono state classificate in tre categorie strutturali tipologiche:

- a) strutture composte acciaio - calcestruzzo;
- b) strutture in calcestruzzo armato normale o precompresso;
- c) strutture non riconducibili ai principi, alle definizioni, ai modelli di calcolo e ai materiali delle due categorie sopra elencate.

Delle tre categorie sopra indicate, le prime due non ricadono nell'ambito di applicazione del citato punto 4.6 delle NTC 2008, in quanto espressamente disciplinate, rispettivamente, dai paragrafi 4.3 e 4.1 delle Norme stesse. La terza categoria, invece, comprende quei tipi che, per principi, modelli di calcolo e materiali, non possono essere ricompresi nelle prime due.

Per tutte le predette categorie si individuano due fasi costruttive; una prima fase in cui è resistente la sola parte in acciaio e una seconda fase in cui anche il calcestruzzo di completamento è indurito.

Le peculiarità delle strutture composte sono:

- la presenza di connessioni a taglio in grado di impedire lo scorrimento e il distacco tra il calcestruzzo e l'acciaio;
- l'acciaio da carpenteria metallica (piatti, profilati, ecc.) per la parte alla quale è affidata la portanza in prima fase;
- la resistenza a taglio deve essere conseguita dalla sola parte in carpenteria (non è infatti ammesso l'uso di acciai da carpenteria nel modello taglio resistente del calcestruzzo).

Per l'appartenenza al gruppo b) di una trave reticolare occorre:

- la capacità portante in seconda fase deve essere garantita esclusivamente dal calcestruzzo e dall'acciaio da c.a. o da c.a.p., secondo i modelli previsti dalle NTC 2008;
- non è consentito prendere in conto nella seconda fase di funzionamento il contributo dell'acciaio da carpenteria;

- l'acciaio da carpenteria si mette in conto solo nella prima fase e dovrà essere adeguatamente protetto contro la corrosione.

Nelle travi non riconducibili ai precedenti due casi si deve avere:

- precisa identificazione dei materiali, della geometria, dello schema statico e delle modalità di impiego;
- per ogni tipologia adeguata sperimentazione su campioni e modelli sia relativamente alla prima fase sia relativamente alla seconda fase, per gli SLE e per gli SLU;
- definizione di attendibili modelli di calcolo giustificati dalla sperimentazione ed eventualmente integrata da adeguate analisi numeriche.

Il numero delle prove sperimentali deve essere tale da consentire l'elaborazione di un modello empirico, oppure la definizione di un modello fisico, ponendo particolare attenzione ai fenomeni di instabilità globale e locale, nonché all'unione dei diversi materiali. Il numero di prove dovrà essere significativo ai fini dell'elaborazione statistica dei modelli resistenti e dovranno essere effettuate in un Laboratorio Ufficiale di cui al comma 1, art. 59 del DPR 380/2001.

1.4 Comportamento delle unioni saldate

Con saldatura si indica l'operazione di collegamento di parti metalliche solide in modo da realizzare la continuità fisico - chimica fra le due parti unite. Con saldatura si indica anche il risultato dell'operazione stessa, cioè il giunto saldato. I collegamenti ottenuti fra i pezzi mediante saldatura non possono essere rimossi se non distruggendo la saldatura stessa.

La valutazione della resistenza delle saldature è di fondamentale importanza poiché esse sono gli elementi fondamentali nel comportamento sotto carico delle travi PREM, soprattutto nel caso di travi autoportanti.

In questa prima fase di autoportanza, la struttura in acciaio è la sola a portare tutti i carichi agenti che, oltre al proprio peso, sono la porzione di solaio che appoggia su di essa, in funzione del posizionamento dei puntelli rompitratta disposti in fase di montaggio del solaio, e quello del calcestruzzo gettato a

completamento della trave, oltre al carico variabile dovuto agli operai. Il carico complessivo risulta quindi "appeso" al piatto inferiore della trave, sollecitando direttamente le saldature presenti. Tali unioni saldate vengono in genere eseguiti in stabilimento e possono essere di due tipi: testa a testa o per cordoni laterali. La modalità di esecuzione delle saldature influenza sia il comportamento strutturale della trave che i tempi ed i costi di realizzazione della stessa. La saldatura testa a testa necessita di maglie triangolari costituite da spezzoni di armature unite fra di loro da saldature in ogni nodo comportando così maggiori oneri di produzione. Da prove sperimentali riportate in letteratura si è visto che le modalità di rottura manifestatesi su alcuni campioni sottoposti a prova di trazione sono state differenti: i provini realizzati con staffe tagliate e saldatura di testa sono giunti a rottura per cedimento all'attacco della saldatura o per piegatura del piatto di collegamento, mentre i provini con staffe piagate e saldatura laterale per rottura della piega del tondino all'attacco della saldatura.

1.5 Stabilità in prima fase del traliccio metallico

Uno dei grossi vantaggi nell'utilizzo delle travi PREM è quello dell'autoportanza in fase 1, cioè fino all'indurimento del getto di calcestruzzo. Questo vantaggio comporta, però, una maggiore attenzione in termini di verifiche, con particolare riguardo ai fenomeni di instabilità dell'equilibrio. In questa prima fase, infatti, la trave è a tutti gli effetti un manufatto reticolare in acciaio soggetto a significativi sforzi di compressione. Le principali modalità di instabilità che possono verificarsi sono tre:

- instabilità delle singole aste compresse (delle barre costituenti il corrente superiore o le diagonali del traliccio);
- instabilità di insieme del corrente superiore compresso;
- instabilità flesso - torsionale dell'intera trave.

Per il primo caso è definibile la lunghezza di libera inflessione l_0 in funzione dell'interasse dei ritegni trasversali del corrente, dunque, è possibile utilizzare i classici metodi di verifica per il calcolo del carico critico ed applicare le

formule riportate in normativa controllando che la resistenza all'instabilità $N_{b,Rd}$ sia superiore all'azione di compressione di calcolo N_{Ed} :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

dove, per le sezioni di classe 1,2 e 3 si ha:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$

con:

- A area lorda della sezione;
- f_{yk} valore caratteristico della resistenza a snervamento dell'acciaio;
- $\gamma_{M1} = 1,05$ coefficiente di sicurezza per la resistenza all'instabilità.

χ è un fattore riduttivo per la modalità di instabilità pertinente e dipende dal tipo di sezione e dal tipo di acciaio impiegato. Esso può essere valutato analiticamente in funzione della curva di stabilità da scegliere sulla base delle indicazioni di tabella 4.2.VI delle NTC e della snellezza adimensionalizzata definita come:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}}$$

La normativa riporta la seguente espressione per χ :

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

dove $\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$, α è il fattore di imperfezione, ricavato dalla tabella 4.2.VI delle NTC.

Nel caso di instabilità d'insieme del corrente superiore compresso non è semplice definire una lunghezza libera di inflessione. I ritegni trasversali non hanno, infatti, una rigidità sufficiente per impedire lo sbandamento dei nodi del corrente superiore e l'instabilità può coinvolgere più campi del traliccio con un fattore di lunghezza efficace β (definito come $\beta = l_0/l$) maggiore di 1.

Quando si verifica il terzo caso succede che l'instabilità flessione - torsionale coinvolge l'intera trave, con lunghezza d'onda pari alla lunghezza della trave stessa. Essa tipicamente può manifestarsi nel caso di travi alte e strette, molto

rigide nel piano di azione del carico ma deformabili torsionalmente. In questo caso, il carico critico è significativamente inferiore a quello euleriano delle singole aste. In letteratura si trovano simulazioni numeriche agli elementi finiti, condotte su diverse tipologie di travi, che hanno mostrato come il carico di instabilità dipenda significativamente dai seguenti fattori [2]:

- caratteristiche del corrente compresso;
- rigidità del fondello;
- disposizione e rigidità dei diagonali;
- deformabilità tagliante del traliccio.

Un'elevata rigidità del corrente compresso impedisce la rotazione dei nodi in cui confluiscono le aste diagonali e, dunque, si può valutare efficacemente il carico critico con la teoria di Eulero assumendo $\beta = 0,5$ corrispondente ai vincoli di incastro. Ad un aumento della rigidità del fondello corrisponde un aumento del carico critico. Un irrigidimento del corrente inferiore mediante due lamiere verticali comporta un notevole aumento della rigidità torsionale della trave, anche se possono comunque verificarsi sbandamenti laterali del corrente superiore a causa della deformazione del traliccio.

Adottando un traliccio spaziale, anziché piano, si può raggiungere un incremento ulteriore del carico critico garantendo maggiore stabilità all'intera trave. In questa configurazione, infatti, si sfrutta la rigidità assiale dei diagonali anziché affidarsi alla loro rigidità flessionale.

Per avere risultati più accurati occorre considerare anche la deformabilità a taglio della trave e la curvatura aggiuntiva provocata dalla variazione dello scorrimento angolare medio $\gamma(x)$ lungo l'asse longitudinale della trave:

$$v_T''(x) = \gamma'(x) = \chi_T \frac{T'(x)}{GA}$$

Essendo χ_T il fattore di taglio della sezione, in cui $v_T(x)$ rappresenta il contributo allo spostamento trasversale dato dall'azione tagliante.

Dalla somma delle due curvature, dovute alla flessione e al taglio, si ottiene:

$$v''(x) = v_F''(x) + v_T''(x) = -\frac{M(x)}{EI} + \chi_T \frac{T'(x)}{GA}$$

$$N_{cr,id} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \left[\frac{1}{1 + \frac{\chi_T}{GA} \pi^2 \frac{EI}{l^2}} \right]$$

1.6 Connessione acciaio - calcestruzzo

Un aspetto fondamentale del comportamento strutturale delle travi PREM è il meccanismo di trasmissione degli sforzi tra acciaio e calcestruzzo, sia in condizioni di esercizio sia in condizioni ultime. Infatti, la crisi del collegamento costituisce uno SLU per la trave PREM, compromettendo l'efficacia del sistema ibrido acciaio - calcestruzzo; d'altra parte, elevati scorrimenti della connessione influenzano in modo rilevante il comportamento in esercizio dell'elemento strutturale.

Allo scopo di pervenire a modelli di validità generale, sono state condotte indagini dall'Università del Salento coordinate dalla Prof.ssa M. A. Aiello.[3] Esse hanno indagato i numerosi fattori che influenzano il comportamento all'interfaccia acciaio - calcestruzzo, quali la tipologia del corrente inferiore, della sezione e del traliccio, i diametri e le proprietà dei materiali utilizzati.

Le prove sperimentali, del tipo Push - out, sono state effettuate su una tipologia di traliccio costituita da un piatto di acciaio di spessore 6 mm, tipo S355, da un corrente superiore di acciaio B450C, di diametro pari a 18 mm, e da un'anima a doppia staffa. Per quanto riguarda l'anima sono stati variati sia il diametro sia il tipo di acciaio; nello specifico sono stati utilizzati due tipi di acciaio, S355 e B450C, e diametri $\phi 12$ e $\phi 14$. La saldatura dell'anima al piatto di acciaio è stata realizzata con cordoni d'angolo, aventi altezza di gola pari a 6 mm.

Per tutti i campioni testati si è osservato un danneggiamento graduale del calcestruzzo, con fessurazione nella direzione trasversale e successivamente anche in quella longitudinale, senza mai verificarsi il completo distacco del piatto d'acciaio dall'elemento in calcestruzzo. Inoltre, l'analisi dei campioni dopo il test e preliminarmente svuotati del calcestruzzo, ha evidenziato la presenza di rilevanti deformazioni plastiche nel traliccio, soprattutto in prossimità delle saldature con il piatto d'anima. Solo in 2 casi la rottura è avvenuta con la crisi della saldatura, benché accompagnata anche in questo caso dalla fessurazione del calcestruzzo e dallo snervamento dell'acciaio. Infine per un solo campione si è registrata la rottura della barra d'anima; tale tipologia di crisi, è probabilmente dovuta alla presenza di danneggiamenti locali (saldatura, piegamento). L'analisi dei risultati ottenuti ha consentito di rilevare l'influenza della tipologia di acciaio sui valori di resistenza della

connessione; infatti, passando dall'acciaio liscio a quello ad aderenza migliorata si è registrato un aumento del carico pari a circa il 21%, nel caso di diametro $\phi 12$, e di circa il 39% nel caso di diametro $\phi 14$. Il diametro sembra avere, invece, un'influenza limitata sul valore del carico massimo, almeno in relazione ai diametri utilizzati. D'altro canto il valore dello scorrimento al carico massimo sembra maggiormente influenzato dal diametro delle barre più che dalla tipologia di acciaio; infatti, le differenze di scorrimento in corrispondenza del carico massimo, passando dal diametro $\phi 14$ al diametro $\phi 12$, risultano superiori del 50% e del 75% per l'acciaio liscio e nervato, rispettivamente.

Dall'analisi delle curve carico scorrimento, si è rilevato come in tutti i casi la crisi dell'elemento sia stata preceduta da un significativo danneggiamento, connesso a scorrimenti elevati e ad un abbattimento del carico limitato o anche nullo. Fa eccezione il campione con anime del traliccio di diametro pari a 14 mm, ad aderenza migliorata, che presenta un decadimento improvviso di capacità resistente nella fase post picco; ciò è giustificato dalla crisi prematura, causata dalla rottura di un'asta del traliccio, come già prima riportato.

L'indagine sperimentale eseguita, evidenzia in generale un comportamento duttile della connessione, qualora non si verificano rotture premature, e l'influenza dei parametri analizzati, diametro delle aste diagonali e tipologia di acciaio, sia sui valori di resistenza sia sui valori di scorrimento.

L'indagine sperimentale condotta consente di effettuare alcune considerazioni sul comportamento della connessione fra traliccio in acciaio e calcestruzzo nelle travi PREM:

- La prova di push-out, suggerita per le strutture miste acciaio - calcestruzzo di tipo tradizionale dall'EC4, appare adeguata a caratterizzare il sistema di connessione in termini di rigidità, resistenza e duttilità, al fine di condurre le necessarie verifiche sia allo SLU sia allo SLE.
- Il verificarsi di crisi premature della connessione, per rottura del nodo o delle aste in acciaio, compromette l'efficacia del sistema strutturale. Pertanto, si evidenzia la necessità di controlli accurati in fase di produzione sia in relazione ai procedimenti di piegatura che di saldatura.

In assenza di rotture premature, la connessione ha evidenziato un comportamento generalmente duttile.

- La tipologia di acciaio impiegato (liscio o nervato) ed il diametro delle aste diagonali influenza la risposta della connessione sia in termini di resistenza sia in termini di scorrimento. Il confronto con prove analoghe, condotte da altri ricercatori, evidenzia inoltre l'influenza della tipologia di calcestruzzo, soprattutto sulla duttilità della connessione.

CAPITOLO **2****PROVE SPERIMENTALI A FLESSIONE SULLE TRAVI PREM****2.1 Obiettivi della ricerca**

L'attività di ricerca svolta presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Dipartimento di Strutture dell'Università della Calabria ha riguardato l'indagine sperimentale finalizzata alla definizione degli aspetti ancora poco conosciuti sul comportamento strutturale delle travi PREM, in particolare nei riguardi dei vari Stati Limite (SLU, SLE). Essa ha come principale obiettivo l'analisi delle prestazioni meccaniche delle travi PREM al variare sia della forma del traliccio, sia del tipo e del quantitativo di armatura utilizzata, sia del tipo di fondello utilizzato e della percentuale meccanica di armatura.

L'attività si è articolata principalmente in due fasi operative:

1. sperimentazione su travi PREM mediante prove di flessione;
2. analisi dei metodi analitici classici adoperati per il calcolo del momento resistente, del momento di snervamento, del momento di prima fessurazione, dell'ampiezza delle fessure; confronto tra le previsioni dei modelli teorici, delle analisi numeriche e dei risultati sperimentali.

Per quanto riguarda l'analisi del comportamento flessionale ci si è avvalsi di dati sperimentali di precedenti sperimentazioni, effettuate presso il Laboratorio dell'UNICAL, integrate da ulteriori due prove sperimentali.[4]



Figura 2.1: Traliccio travi PREM sottoposte a prova

I tralici in acciaio, rappresentati nella figura 2.1, sono stati realizzati negli stabilimenti della Tubisider S.p.A., mentre il getto di calcestruzzo è stato eseguito presso la SUD SOLAI S.a.s. (figura 2.2), aziende specializzate nella fabbricazione di solai e travi.



Figura 2.2: Getto delle travi PREM e prelievo dei cilindri

Le due travi sono state gettate con una miscela omogenea di calcestruzzo e contestualmente si sono confezionati i due provini cilindrici per come documentato dalle immagini in figura 2.2.

2.2 Descrizione delle prove

Nella sperimentazione sono state confezionate n°2 travi PREM senza fondello aventi la seguente geometria: lunghezza 400 cm, altezza 25 cm e larghezza 48 cm. Le travi sono state sottoposte a prova di flessione secondo lo schema riportato nella figura 2.3. In figura si è indicata la posizione dei trasduttori utilizzati per la misura degli spostamenti verticali (T1 e T3 posizionati anteriormente; T2 e T4 posizionati posteriormente). Inoltre, per misurare le deformazioni, sono stati applicati degli estensimetri sul calcestruzzo compresso nella sezione di mezzeria (E1) e sul traliccio, 2 in mezzeria sulle barre inferiori (E3 ed E5) e 2 sulle staffe in corrispondenza dell'appoggio (E2 ed E4 vedi figura 2.5).

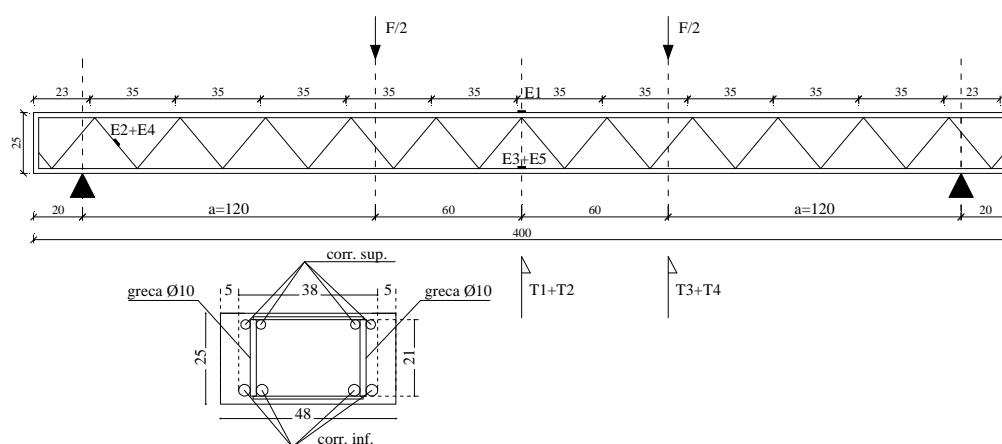


Figura 2.3: Trave oggetto di sperimentazione

Le 2 travi sono armate mediante una staffatura trasversale a traliccio (greca) costituita da spezzoni in acciaio B450C di diametro $\phi 10$, saldati ai correnti con passo pari a 35 cm, mentre i correnti superiori ed inferiori sono stati differenziati per come riportato nella tabella 2.1.

Trave	Correnti superiori	Correnti inferiori	Rapporto geometrico d'armatura
1	4 $\phi 26$	4 $\phi 32$	0,66
2	4 $\phi 16$	4 $\phi 22$	0,53

Tabella 2.1: Armatura dei correnti delle travi PREM sperimentate



Figura 2.4: Prova a flessione su trave PREM

Nella figura 2.4 è rappresentata l'apparecchiatura utilizzata per effettuare la prova di flessione che è costituita da un telaio di contrasto, da una centralina elettronica per la registrazione dei dati e dall'attrezzatura per la misura delle deformazioni (*Strain - Gauges*) e degli abbassamenti (*LVDT - Linear Variable Displacement Transducer*).



Figura 2.5: Estensimetro E2 applicato sulla greca

La forza esterna è stata applicata attraverso un martinetto con pompa idraulica manuale e sollecita la trave mediante due coltelli posti ad una distanza pari ad $a = 120\text{cm}$ ($1/3$ della luce totale l) dagli appoggi.

Sopra i coltelli poggia una trave in acciaio con sezione ad I di lunghezza pari a 150 cm (figura 2.6). La lettura del carico avviene mediante una cellaestensimetrica fissata al martinetto idraulico e contrastata dal telaio metallico.



Figura 2.6: Cella estensimetrica

2.3 Prove sui materiali

Le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati per il confezionamento delle travi sono state determinate mediante prove su provini cilindrici di calcestruzzo e su spezzoni di armatura dello stesso lotto dei tralicci (figura 2.7). Nella tabella 2.2 sono riportati i risultati ottenuti dalle prove di compressione sui provini cilindrici di calcestruzzo (diametro 150mm):

N	Altezza (mm)	Massa (kg)	f_c (N/mm ²)	F_{max} (kN)
1	330	13,30	33,70	594,92
2	330	13,34	37,40	661,63

Tabella 2.2: Prove di compressione sul calcestruzzo

La resistenza media a compressione cilindrica ottenuta è risultata pari a:

$$f_{cm} = 35,55 \text{ N/mm}^2.$$



Figura 2.7: Pressa oleodinamica e macchina per la prova a trazione delle barre di acciaio

I risultati ottenuti dalle prove di trazione sulle barre di acciaio sono riportati nella tabella 2.3.

N	Peso (kg)	Lunghezza (mm)	Diametro ϕ (mm)	f_y (N/mm ²)	Allung. (%)	Peso spec. (kg/m ³)	f_{ult} (N/mm ²)
1	0,37	605	10	540,9	22%	7850	634,2
2	0,37	602	10	531,4	22%	7850	625,9
3	0,37	603	10	535,4	24%	7850	629,0
4	0,94	604	16	488,8	28%	7850	585,2
5	0,94	605	16	489,6	29%	7850	585,0
6	0,94	605	16	493,1	28%	7850	581,2
7	1,78	605	22	535,3	25%	7850	663,2
8	1,78	604	22	531,3	23%	7850	663,1
9	1,78	602	22	531,1	24%	7850	659,0
10	2,52	607	26	509,4	25%	7850	630,7
11	2,52	604	26	485,3	26%	7850	618,1
12	2,52	604	26	488,3	25%	7850	621,9
13	3,37	580	32	461	21%	7850	596,8
14	3,37	590	32	498,6	24%	7850	641,0
15	3,37	580	32	461,8	21%	7850	597,3

Tabella 2.3: Prove di trazione sulle barre d'acciaio

Dalla tabella si ricavano le resistenze medie a snervamento e a rottura per le varie tipologie di barre.

Durante l'esecuzione delle prove si è rilevato il quadro fessurativo all'aumentare del carico esterno. Il carico di prima fessurazione sperimentale è

stato di circa 50kN per la trave n°01 e di 30kN per la trave n°02, cui corrispondono i momenti di prima fessurazione $M_{pf} = 30\text{kNm}$ e 18kNm . I valori teorici sono rispettivamente: $M_{pf,teo} = 40,58\text{ kNm}$ per la trave n°01; $M_{pf,teo} = 25,87\text{ kNm}$ per la trave n°02. I valori sperimentali risultano, dunque, inferiori rispetto ai valori calcolati con la teoria classica del cemento armato.

Il momento di snervamento teorico per le due travi vale: $M_{sy,teo} = 275,96\text{ kNm}$ per la trave n°01, $M_{sy,teo} = 149,71\text{ kNm}$ per la trave n°02; cui corrispondono i carichi teorici: $F_{sy,teo} = 459,93\text{ kN}$ per la trave n°01, $F_{sy,teo} = 249,52\text{ kN}$ per la trave n°02. I valori sperimentali sostanzialmente coincidono con quelli teorici.

Per quanto concerne il carico ultimo si sono ottenuti i seguenti valori sperimentali: $F_{u,exp} = 501,48\text{ kN}$ per la trave n°01, $F_{u,exp} = 266,82\text{ kN}$ per la trave n°02; cui corrispondono i seguenti valori del momento ultimo: $M_{u,exp} = 300,9\text{ kNm}$ per la trave n°01, $M_{u,exp} = 160,1\text{ kNm}$ per la trave n°02. I valori teorici del momento ultimo risultano: $M_{u,teo} = 283,62\text{ kNm}$ per la trave n°01, $M_{u,teo} = 154,26\text{ kNm}$ per la trave n°02. Si può notare un lieve incremento dei valori sperimentali rispetto a quelli teorici.

Il collasso nella trave n°01 è avvenuto per flessione a seguito della formazione di una estesa fessura diagonale; mentre nella trave n°02 il collasso è avvenuto per schiacciamento del calcestruzzo.

2.4 Risultati

I valori delle misure estrapolati durante la prova, vengono utilizzati per la costruzione dei diagrammi carico-abbassamento nella sezione di mezzeria ed in corrispondenza del punto di applicazione del carico. In particolare i diagrammi sono stati costruiti con riferimento alle medie aritmetiche dei valori misurati dai trasduttori posti sul lato anteriore e posteriore della trave (figure 2.8 e 2.9).

Per le due travi si sono ottenuti i diagrammi tensione - deformazione nella sezione di mezzeria riportati nella figura 2.10, relativi alle barre inferiori tese.

Si può notare che lo snervamento avviene per un valore corrispondente alla media aritmetica delle resistenze f_y ricavate dalle prove di trazione sulle barre d'acciaio.

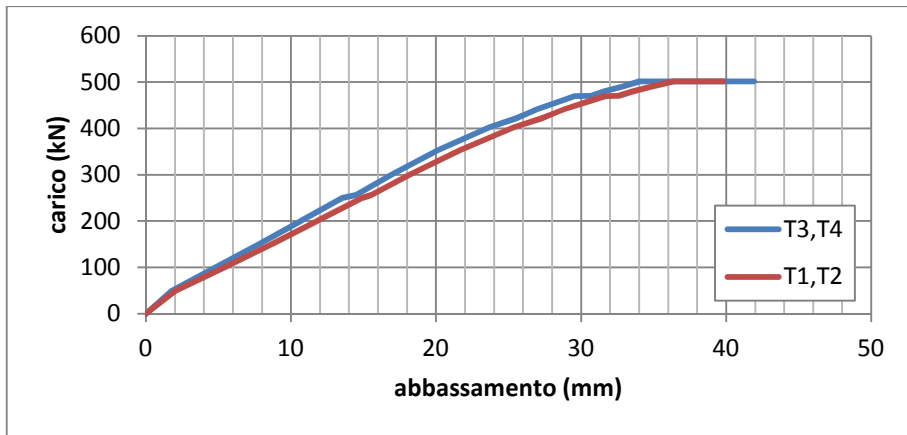


Figura 2.8: Diagrammi carico-abbassamento trave n°01

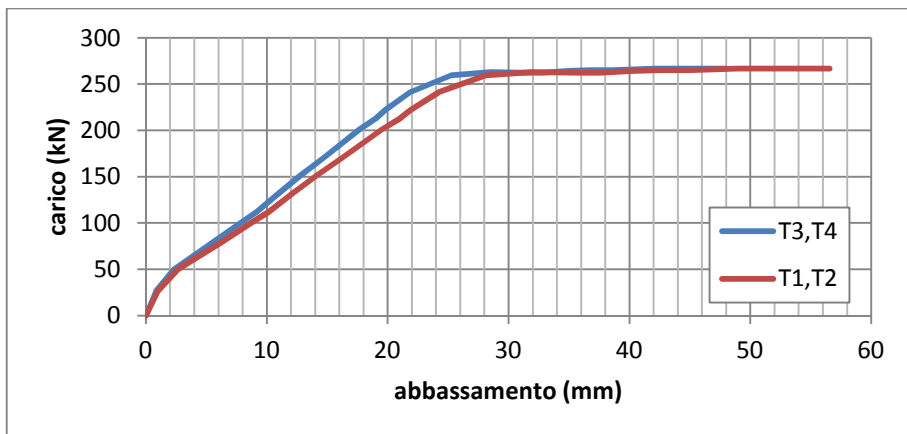


Figura 2.9: Diagrammi carico-abbassamento trave n°02

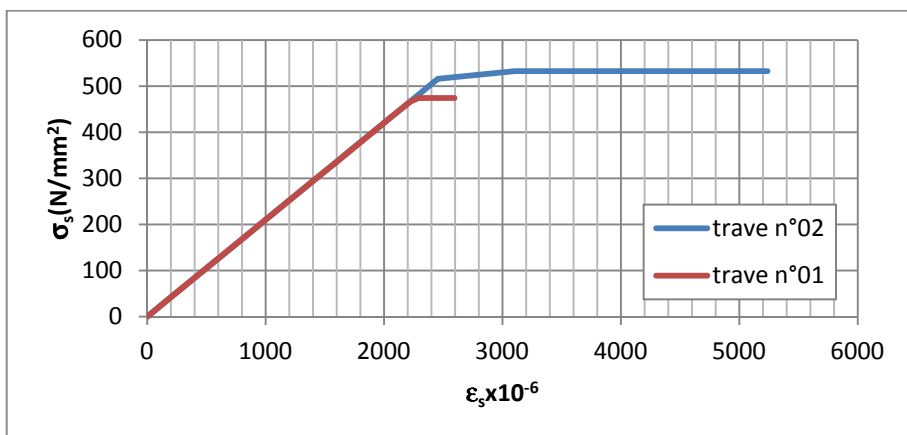


Figura 2.10: Diagrammi tensione-deformazione nella sezione di mezzeria (travi n°01 e n°02)

Per le barre inferiori del diametro $\phi 32$ si ha: $f_y = (461+498,6+461,8)/3 = 473,8N/mm^2$; mentre per le barre del diametro $\phi 22$ la resistenza a snervamento risulta: $f_y = (535,3+531,3+531,1)/3 = 532,6N/mm^2$. Dai diagrammi sopra riportati si nota che l'acciaio, a rottura avvenuta, è snervato.

Di seguito si riportano le curve tensione - deformazione del calcestruzzo compresso nella sezione di mezzeria per le due travi (figura 2.11).

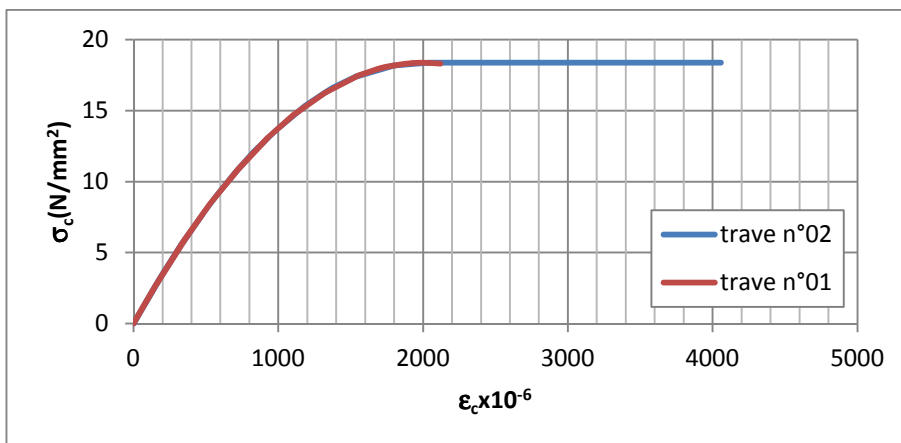


Figura 2.11: Diagrammi tensione-deformazione nel cls compresso (travi n°01 e n°02)

Si nota che il calcestruzzo ha un comportamento più fragile nel caso della trave n°01, tale fatto è da imputarsi all'elevata percentuale meccanica di armatura tesa: $q = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_c} = 0,357$.

Durante le prove è stato possibile ricavare i quadri fessurativi e registrare i valori delle ampiezza massime delle fessure (figure 2.12 - 2.13).

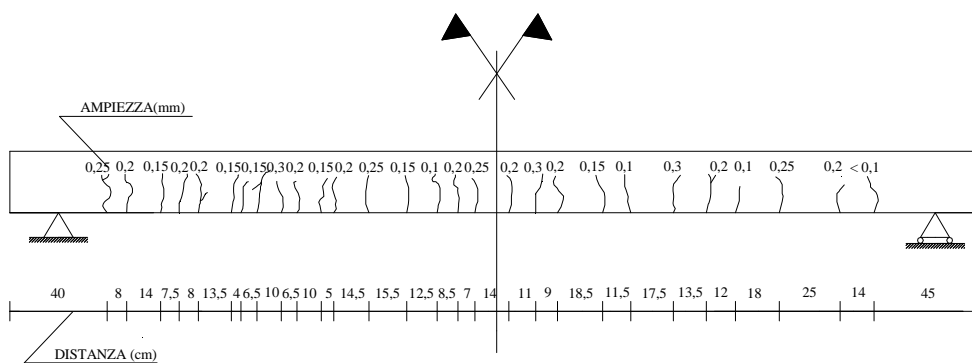


Figura 2.12: Quadro fessurativo trave n°01

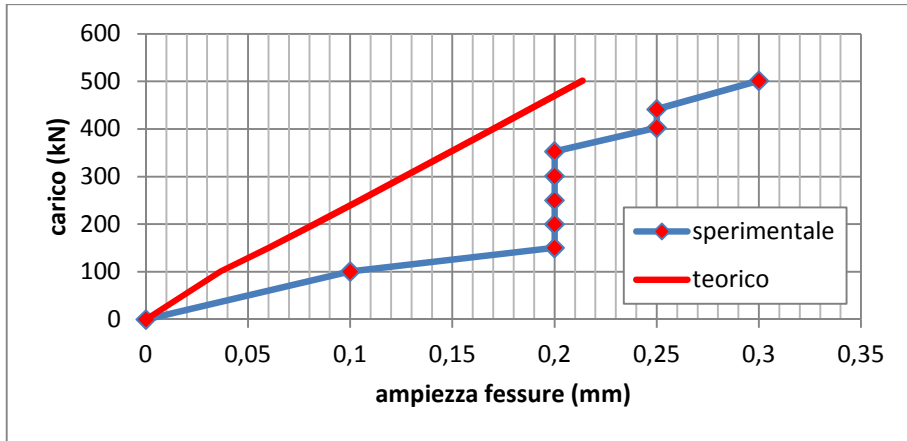


Figura 2.13: Diagramma carico - ampiezza fessure trave n°01

Le figure 2.14 e 2.15 mostrano il confronto tra i valori teorici dell'ampiezza delle fessure calcolate mediante le relazioni dell'EC2 ed i valori sperimentali. Il confronto evidenzia una sensibile differenza fra i due valori per qualsiasi valore del carico. Nella figura 2.16 è riportata la configurazione al collasso della trave n° 01 e il quadro fessurativo della trave n° 02.

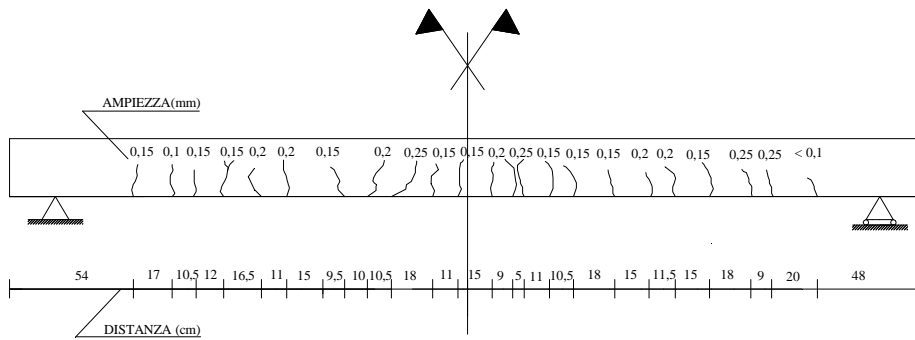


Figura 2.14: Quadro fessurativo trave n°02

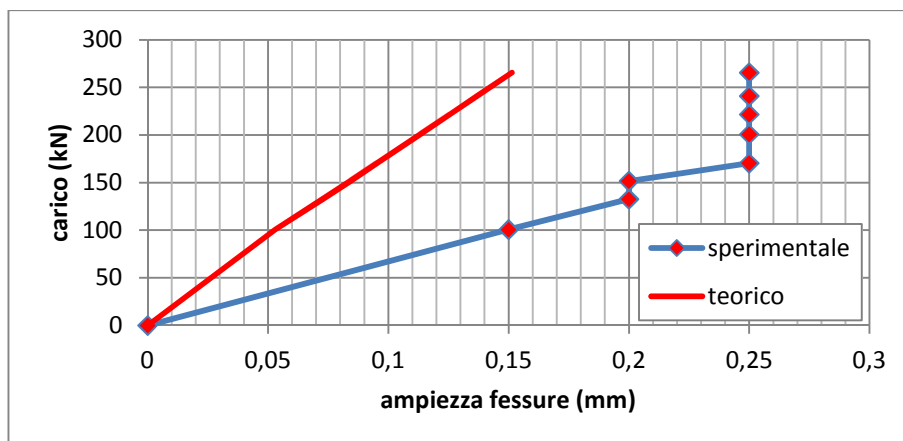


Figura 2.15: Diagramma carico - ampiezza fessure trave n°02



Figura 2.16: Foto modo di collasso trave n°01 e quadro fessurativo trave n°02

Nella tabella 2.4 sono riassunti i valori del carico di rottura ($F_{u,exp}$) e del momento ultimo ($M_{u,exp}$) per le due travi sperimentate. Si è riportato anche il valore del momento ultimo delle travi calcolato con la teoria classica del c.a. ($M_{u,teo}$) nel rispetto delle indicazioni riportate sul D.M. 14/01/2008.

Trave	$F_{u,exp}$ (kN)	$M_{u,exp}$ (kN·m)	$M_{u,teo}$ (kN·m)	Incremento (%)	w_y (mm)	$w_{y,teo}$ (mm)	Tipo di rottura
01	501,48	300,9	283,62	6,1	18,25	29,72	fessurazione a taglio
02	266,82	160,1	154,26	3,8	20,98	30,04	schiacc. del cls

Tabella 2.4: Valori sperimentali e teorici per le due travi sperimentate

I valori del momento ultimo teorico sono stati calcolati utilizzando un valore del copriferro baricentrico $\delta = 35 \text{ mm}$ e i valori di resistenza ricavati dalle prove sui materiali. Il confronto tra i valori teorici e quelli sperimentali

evidenzia come questi ultimi siano superiori a quelli teorici anche se la differenza non è rilevante.

L'abbassamento medio allo snervamento dell'acciaio teso (w_y) misurato dai due trasduttori è superiore nella trave n°02, tale fatto era prevedibile vista la minore rigidità rispetto alla trave n°01. Tale valore, paragonato con l'abbassamento teorico ($w_{y,teo}$), evidenzia come quest'ultimo risulti sovrastimato. Per poter eseguire il calcolo delle deformazioni è necessaria la conoscenza del legame momento - curvatura, ossia della rigidità flessionale. Tale legame è alquanto complesso da ricavare poiché costituito da rami di curva non definibili mediante un'unica funzione e pertanto non facilmente utilizzabile nelle correnti applicazioni numeriche. Il diagramma momento - curvatura può costruirsi, in alternativa al metodo incrementale, seguendo altri procedimenti approssimati aventi il vantaggio di essere di più rapida applicazione. In particolare, per una trave rinforzata con armature in acciaio, il legame momento - curvatura semplificato può ottenersi mediante una schematizzazione che ne prevede la linearizzazione a tratti. La linearizzazione più semplice è quella trilatera. Il valore dell'abbassamento massimo teorico ($w_{max,teo}$) è stato, dunque, calcolato facendo riferimento al legame momento - curvatura linearizzato con una trilatera. Per la definizione dei tre tratti occorre calcolare il momento di prima fessurazione (M_{pf}), il momento di snervamento delle armature tese (M_{sy}) ed il momento ultimo della sezione ($M_{u,teo}$), nonché le relative curvature:

- $\chi_{pf} = \frac{\varepsilon_{ct}}{H-x_{pf}}, \varepsilon_{ct} = \frac{\sigma_{ct}}{n_{ct} \cdot E_c}, E_c = \frac{f_{ck}}{\varepsilon_{c3}}, \varepsilon_{c3} = 0,00175, \sigma_{ct} = \frac{f_{ctm}}{1,2}, n_{ct} = 0,5,$
 $f_{ctm} = 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} (N/mm^2), f_{cm} = f_{ck} + 8 (N/mm^2), (EI)_I = \frac{M_{pf}}{\chi_{pf}};$
- $\chi_{sy} = \frac{\varepsilon_{sy}}{d-x_{sy}}, (EI)_{II} = \frac{M_{sy}-M_{pf}}{\chi_{sy}-\chi_{pf}};$
- $\chi_u = \frac{\varepsilon_u}{x_u}, (EI)_{III} = \frac{M_u-M_{sy}}{\chi_u-\chi_{sy}}.$

Nelle figure 2.17 e 2.18 sono diagrammati i due legami momento - curvatura di tipo incrementale e trilatero. Il primo è stato ricavato facendo incrementare la posizione dell'asse neutro e calcolando volta per volta il corrispondente momento resistente della sezione.

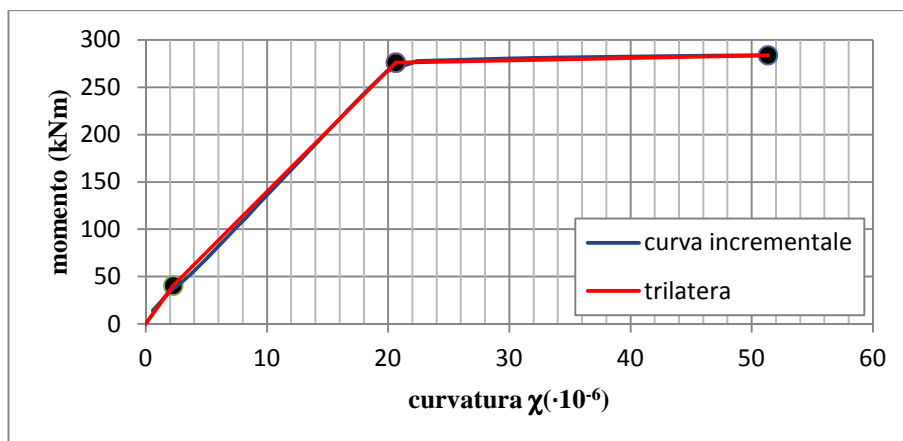


Figura 2.17: Diagramma momento - curvatura trave n°01

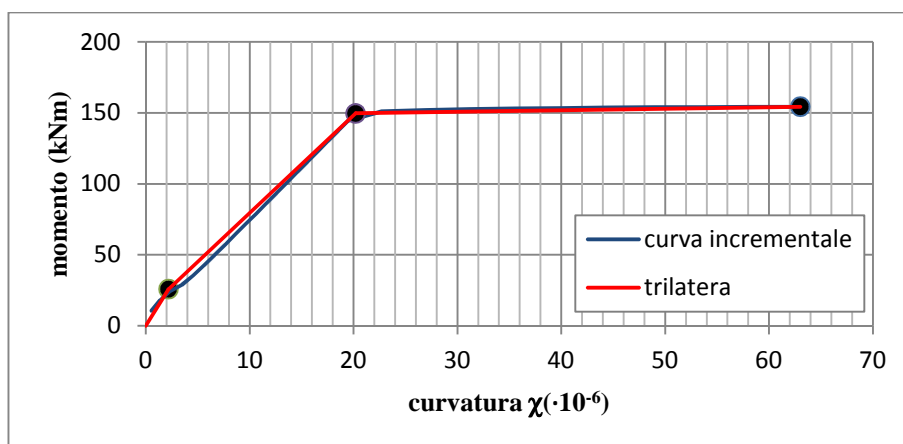


Figura 2.18: Diagramma momento - curvatura trave n°02

Come si evince dai grafici la semplificazione consistente nell'utilizzare la configurazione trilatera in luogo di quella incrementale fornisce un'ottima approssimazione del legame momento - curvatura, essendo le due curve praticamente coincidenti.

2.5 Confronto numerico - sperimentale

Le due travi PREM sono state modellate mediante un software agli elementi finiti (*Lusas release V.14.0-3*) grazie al quale si è potuta effettuare una analisi

non lineare che simulasse in modo accurato le prove realmente svolte in laboratorio. Durante la modellazione sono state fatte le seguenti ipotesi [5]:

- Ogni struttura è di per se solida e per questo richiederebbe un'analisi tridimensionale; risulta tuttavia più agevole, ed anche più significativo, fare riferimento ad un modello semplificato che, in forma sintetica, sia in grado di rappresentare la risposta della struttura. Per questo, durante la creazione del modello, il problema studiato è stato affrontato mediante un modello piano. Coerentemente alla geometria solida del problema, sono stati poi attribuiti agli elementi bidimensionali degli opportuni spessori. Per gli elementi che riproducono le barre d'acciaio, è stata assegnata una profondità tale da ottenere un'area equivalente a quella della sezione circolare.
- La scelta di una modellazione in due dimensioni è scaturita dalla necessità di ottenere analisi non troppo onerose dal punto di vista computazionale. Si ritiene comunque che, per le finalità di questo lavoro, la modellazione utilizzata sia rappresentativa della struttura reale.
- Fra le diverse tipologie di elementi bidimensionali si è scelto di utilizzare elementi di tipo *plane stress*. Con tale ipotesi si assume di avere stati di sforzo piano, trascurando di conseguenza le tensioni lungo la direzione perpendicolare al piano in cui si sta operando.
- Tenuto conto della simmetria longitudinale e trasversale nella geometria data, si è deciso, nel modello, di riprodurre solo una metà della trave. Per mettere in conto la simmetria longitudinale, sono stati inseriti nel modello, dei vincoli di simmetria.

Trattandosi di un problema bidimensionale sono stati utilizzati elementi *plane stress*. In prevalenza essi hanno forma rettangolare, o comunque sono caratterizzati da quattro lati e delimitati da 8 nodi. Sono basati sull'interpolazione quadratica e sull'integrazione numerica di Gauss, denominati con la sigla *QPM8* (figura 2.19), ed utilizzati per la modellazione del calcestruzzo. Per le barre d'acciaio sono stati utilizzati elementi di tipo *BAR3*. È stato utilizzato un modello non lineare per il legame costitutivo del calcestruzzo, mentre per le barre si è utilizzato un materiale plastico alla Von Mises.

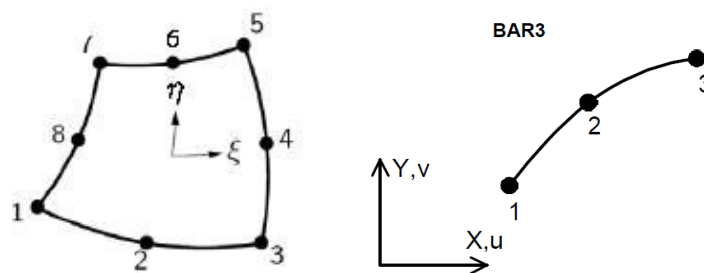


Figura 2.19: Elemento tipo QPM8 e BAR3

Le caratteristiche salienti della risposta non lineare, dovuta alla fessurazione del calcestruzzo, sono state riprodotte utilizzando il *Multi-Crack Concrete Model* (model 94, figura 2.20), sviluppato da Jefferson ed implementato in Lusas.

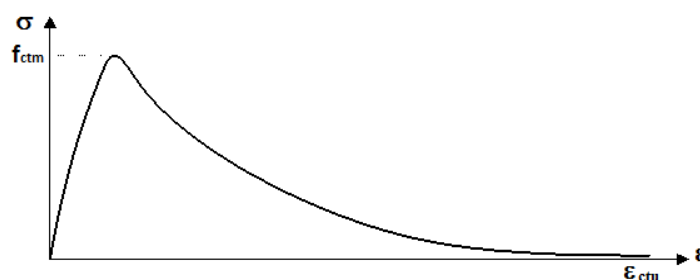


Figura 2.20: Legame costitutivo a trazione del calcestruzzo

Tale modello permette di tener conto della capacità del calcestruzzo fessurato di trasmettere tensioni di trazione (*tension stiffening* o *strain softening*) e sforzi di taglio. La categoria in cui rientra il modello è quella della "fessura diffusa". Quando si verifica la fessurazione il modello considera una resistenza residua del calcestruzzo teso variabile con legge esponenziale definita da due parametri:

- resistenza a trazione del calcestruzzo (*tensile strength*, f_{ctm}), che, in assenza di determinazione diretta, secondo le NTC'08, si calcola con la relazione $f_{ctm} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$ (N/mm^2);
- Deformazione ultima a trazione assunta per la curva di softening (*strain at the end of softening curve*, ϵ_{ctu}), il cui valore è legato al comportamento più o meno duttile dell'elemento.

Di seguito si riportano, per la trave n°01, la mesh e la deformata in condizioni ultime (figura 2.21), il diagramma carico - spostamento del nodo in corrispondenza dell'asse di simmetria della trave (figura 2.22), la distribuzione delle massime tensioni principali σ_x e l'andamento delle fessure per diversi incrementi del carico esterno (figura 2.23).

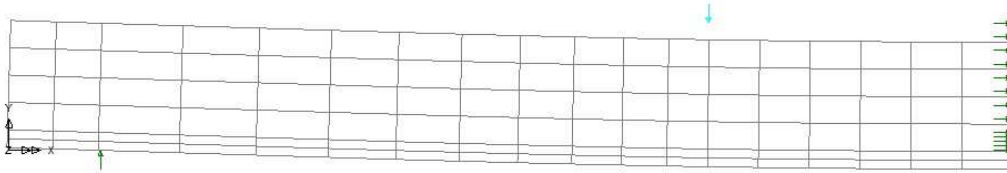


Figura 2.21: Mesh e deformata travi sperimentate a flessione

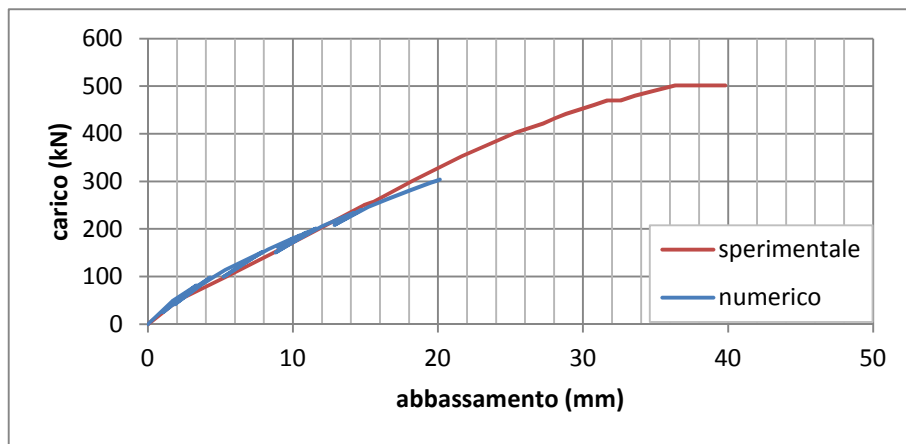


Figura 2.22: Diagramma carico-abbassamento trave n°01

Si nota come l'analisi numerica riesce ad approssimare la curva sperimentale anche se il valore ultimo non viene raggiunto.

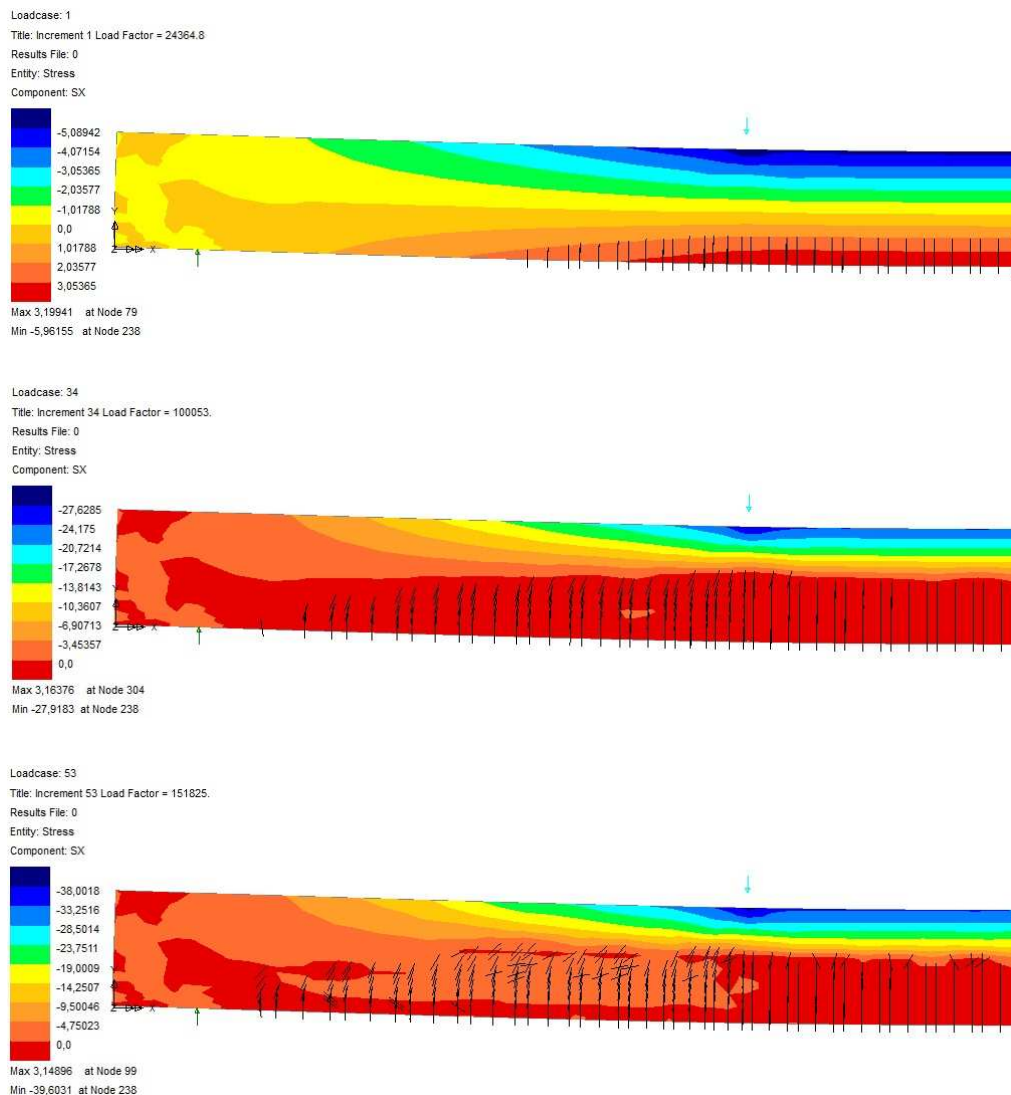


Figura 2.23: Tensioni σ_x e quadro fessurativo per tre livelli di carico, trave n°01

Di seguito si riportano i grafici, relativi alla trave n°02, che raffigurano il diagramma carico - spostamento del nodo in corrispondenza dell'asse di simmetria della trave (figura 2.24), la distribuzione delle massime tensioni principali in direzione x e il quadro fessurativo per diversi incrementi del carico esterno (figura 2.25). Si può notare come, in questo caso, l'analisi numerica riesca a riprodurre i risultati ottenuti sperimentalmente. Rispetto alla trave n°01 si ha un comportamento più duttile.

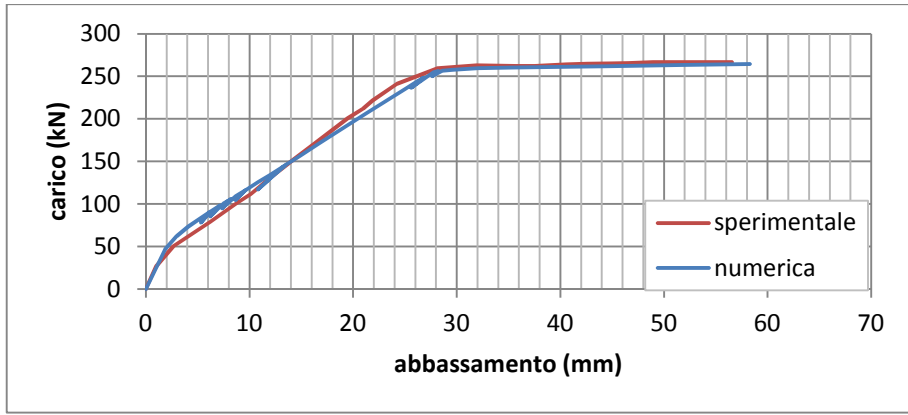


Figura 2.24: Diagramma carico-abbassamento trave n°02

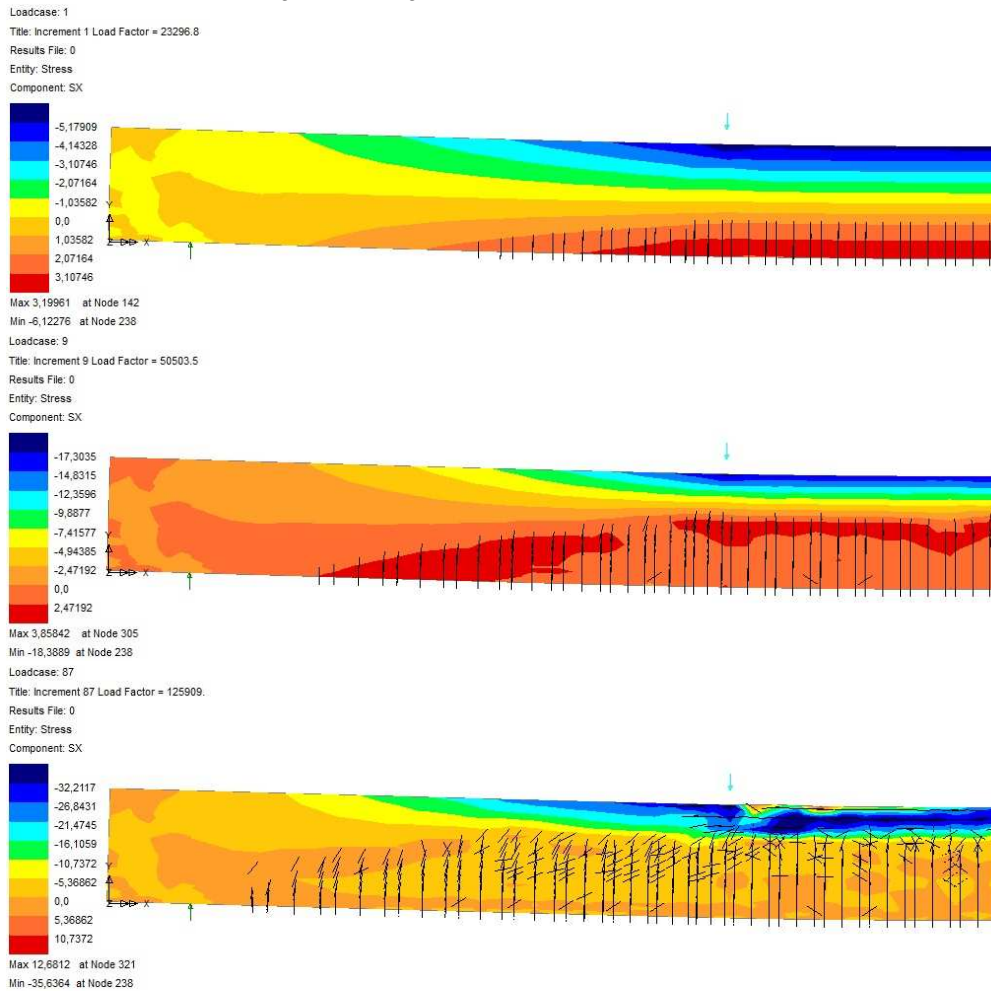


Figura 2.25: Tensioni σ_x e quadro fessurativo per tre livelli di carico, trave n°02

CAPITOLO **3**IL TAGLIO NELLE TRAVI IN CALCESTRUZZO ARMATO E
NELLE TRAVI PREM**3.1 Introduzione**

La presenza della sollecitazione di taglio è dovuta al fatto che ogni variazione lungo l'asse della trave del momento flettente richiede la presenza di una forza di taglio, come risulta dalla ben nota equazione di equilibrio: $V = dM/dz$, in cui V indica la sollecitazione di taglio, M è il momento e z l'ascissa misurata lungo l'asse della trave.

Dall'equazione precedente segue che il taglio è nullo solo quando M è costante. In pratica questa condizione si verifica di rado, quindi la sollecitazione di taglio accompagna quasi sempre quella di flessione. Inoltre, sempre dalla medesima equazione, risulta che il taglio non può esistere, se non in qualche sezione isolata, senza la contemporanea presenza di M , pertanto sarebbe più corretto parlare della sollecitazione combinata di flessione e taglio. La presenza di sollecitazioni di taglio in un elemento comporta la nascita di stati di tensione biassiali, con tensioni principali di trazione ortogonali a quelle di compressione. Tali tensioni principali di trazione variano in intensità e direzione da punto a punto, rendendo di difficile determinazione la condizione di passaggio dallo stato I (non fessurato) allo stato II (fessurato). Di conseguenza, la ricerca delle condizioni di apertura delle fessure e degli

effettivi stati tensionali nel calcestruzzo e nelle armature si complica rispetto al caso in cui si abbia soltanto tensione normale. Per esempio per un elemento infinitesimo posto in corrispondenza dell'asse neutro, o anche - nel caso di sezione parzializzata - elemento posto tra l'asse neutro e l'armatura tesa, il cerchio di Mohr mostra che la direzione principale di trazione σ_ξ è a 45° ed è uguale in valore alla τ_{xy} . Invece per un elemento posto al di sopra dell'asse neutro si ha che la presenza contemporanea di una tensione di compressione sulla faccia verticale, unita alla riduzione del valore delle τ_{xy} , aumenta l'inclinazione rispetto all'asse della trave e riduce il valore della tensione principale di trazione. Infine nel caso di calcestruzzo reagente a trazione la presenza di tensioni normali di trazione riduce l'inclinazione rispetto all'asse ed aumenta il valore della tensione principale di trazione negli elementi situati al di sotto dell'asse neutro.

Quando il taglio V ed il momento flettente M agiscono contemporaneamente non si può più esaminare la singola sezione trasversale (come per il caso di tensioni normali) ma si deve considerare la trave nel suo complesso, poiché la scrittura delle equazioni di equilibrio della trave, in condizioni prossime alla rottura, riguarda un tratto di asta di lunghezza finita.

Da un punto di vista teorico per la verifica di resistenza di una membratura allo stato limite ultimo di taglio si può pensare di costruire il campo di resistenza nel piano $M - V$, da confrontare con il campo delle azioni, in modo analogo a quello utilizzato per il caso $M - N$.

In pratica la costruzione dei campi resistenti $M - V$ non è una procedura praticabile poiché il comportamento della trave di c.a. a fessurazione avvenuta, cioè in stato II, è determinato da un numero molto elevato di parametri, tra loro correlati mediante relazioni complesse, che fanno sì che la conoscenza dei campi di resistenza $M - V$ possa essere solamente qualitativa.

Se si considera una trave realizzata con un materiale a comportamento elastico lineare e reagente a trazione, quale può considerarsi anche il calcestruzzo, per livelli di sollecitazione sufficientemente bassi, le tensioni tangenziali agenti sulle sezioni normali si possono calcolare con la nota relazione, derivata mediante la teoria approssimata di Jourawski:

$$\tau(y) = T S(y)/Ib(y),$$

in cui I è il momento di inerzia baricentrico della sezione, $S(y)$ è il momento statico, relativamente al baricentro, della parte di sezione al di sopra della fibra di ascissa y e $b(y)$ è la larghezza di detta fibra. Per una sezione rettangolare le tensioni variano con legge parabolica. Il valore massimo di τ è raggiunto nel baricentro, dove si ha: $\tau_{\max} = T / zb$, dove $z = I/S(0)$ indica il braccio delle forze interne.

La presenza delle tensioni tangenziali rende incoerente il semplice modello del calcestruzzo privo di resistenza a trazione, in quanto il trasferimento di queste tensioni dalla parte tesa della sezione (l'armatura) a quella compressa richiede la partecipazione del calcestruzzo presente nella zona tesa (trascurato nella teoria della flessione). La resistenza a trazione del calcestruzzo, anche se modesta, svolge un ruolo essenziale nel funzionamento delle travi sollecitate a flessione e taglio.

In molti casi gli effetti delle sollecitazioni di taglio risultano critici per la resistenza degli elementi in cemento armato. Essendo provocato dalla rottura del calcestruzzo teso, il collasso dovuto alle forze di taglio è di tipo fragile (improvviso, accompagnato da piccole deformazioni), quindi estremamente pericoloso: occorre dunque rendere la resistenza a taglio degli elementi maggiore di quella a flessione.

3.2 Travi senza armatura a taglio

La capacità tagliante di travi non armate trasversalmente può ricondursi principalmente a due meccanismi tra loro interagenti: il meccanismo a trave e il meccanismo ad arco. La trave si trova in uno stato fessurato essendo le tensioni principali superiori della resistenza a trazione del calcestruzzo. Tale fessurazione della trave divide la zona tesa in conci compresi fra due fessure consecutive. I singoli conci possono riguardarsi come mensole incastrate nella zona compressa della trave e collegate tra loro dall'armatura longitudinale tesa (effetto pettine). La singola mensola (o dente) è sollecitata da una forza di scorrimento indotta dalla variazione dello sforzo di trazione dell'armatura longitudinale tesa che, avendo momento massimo rispetto alla sezione di incastro, può indurre in essa la crisi per superamento della resistenza a trazione

del calcestruzzo. L'azione prodotta dalla forza di scorrimento è contrastata da una serie di meccanismi resistenti:

- resistenza offerta dalla sezione di incastro (effetto pettine);
- ingranamento degli inerti all'interfaccia della fessura;
- effetto spinotto esercitato dalle barre longitudinali in corrispondenza della fessura;
- tensioni tangenziali presenti nel calcestruzzo non fessurato della zona compressa.

I primi tre meccanismi resistenti a taglio si innescano solo in presenza di una fessura, mentre il quarto dipende dalla posizione dell'asse neutro. La resistenza dovuta all'ingranamento degli inerti si instaura solo se si verifica uno spostamento relativo lungo la fessura e dipende dall'area di contatto, dall'ampiezza della fessura, dalla presenza di tensioni normali nonché dalle caratteristiche degli inerti. L'effetto spinotto dipende principalmente dalla quantità dell'armatura longitudinale A_{sl} , aumentando all'aumentare della percentuale geometrica $\rho_l = A_{sl}/(bd)$, la quale porta ad una minore richiesta deformativa che comporta a una minore ampiezza della fessura incrementando i contributi ad essa connessa come l'ingranamento degli inerti. Tuttavia, il contributo dovuto all'effetto spinotto risulta in genere limitato dalla resistenza a trazione del calcestruzzo di copriferro (non "aiutato" dalle staffe).

Il meccanismo ad arco consente di trasferire una aliquota del taglio direttamente nella sezione di appoggio attraverso compressioni inclinate. Questo effetto dipende da parametri geometrici aumentando al diminuire del rapporto a/d , dove a è la luce di taglio, cioè la distanza tra l'appoggio e la sezione di taglio nullo mentre d è l'altezza utile della sezione. Tale fenomeno è trascurabile se $a/d > 2,5$.

Da numerosi esperimenti si sono potuti evidenziare i principali parametri che influenzano i meccanismi resistenti a taglio:

- resistenza del calcestruzzo;
- effetto scala;
- presenza di sforzo assiale.

La resistenza a taglio aumenta all'aumentare della resistenza a compressione del calcestruzzo; diminuisce all'aumentare dell'altezza della sezione, in quanto

l'effetto dovuto all'ingranamento degli inerti svanisce a causa dell'elevata ampiezza della fessura.

Nella attuale normativa tecnica per le costruzioni è riportata una formulazione semi - empirica per il valore di progetto del taglio resistente che contiene i su menzionati meccanismi resistenti:

$$V_{Rd} = \left\{ \frac{0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}}{\gamma_c} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b \cdot d$$

con un minimo pari a:

$$V_{Rd} \geq V_{Rd,min} = (v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b \cdot d$$

dove:

- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$;
- $v_{min} = 0,035k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$;
- d è l'altezza utile della sezione (in mm);
- b è la larghezza minima della sezione (in mm);
- $\rho_l = A_s/(bd) \leq 0,02$ è la percentuale geometrica di armatura longitudinale;
- $\sigma_{cp} = N_{sd}/A_c \leq 0,2f_{cd}$ è la tensione media di compressione della sezione;
- N_{sd} è lo sforzo assiale di progetto (in N);
- A_c è l'area della sezione di solo calcestruzzo (in mm²).

Il termine $f_{ck}^{1/3}$ è legato alla resistenza del calcestruzzo della sezione di incastro; k all'effetto scala ossia al contributo offerto dall'ingranamento degli inerti; ρ_l all'effetto spinotto e $0,15\sigma_{cp}$ alla presenza dello sforzo assiale che incrementa il contributo offerto dalle tensioni tangenziali nel calcestruzzo della zona compressa.

3.3 Travi armate a taglio

La presenza delle armature trasversali (staffe o ferri di parete) produce un incremento della capacità portante della trave aumentando i contributi resistenti del meccanismo a trave. L'armatura trasversale costituisce, infatti, un

collegamento tra i conci (denti), individuati tra due fessure consecutive portando a un incremento dell'effetto spinotto, mediante un'azione di vincolo sull'armatura longitudinale; limitando l'apertura delle fessure diagonali aumenta l'effetto dell'ingranamento degli inerti; producendo un'azione di confinamento sul calcestruzzo compresso migliorando la resistenza a compressione delle zone interessate dall'effetto arco.

La presenza di armatura trasversale consente soprattutto di incrementare ulteriormente la resistenza alla forza di scorrimento Q mediante un meccanismo denominato "a traliccio". La forza di scorrimento Q viene assorbita da un semplice meccanismo puntone e tirante (*strut and tie*), ossia con una risultante di trazione che insorge nelle armature trasversali e una azione di compressione inclinata di θ che agisce all'interno del dente individuato da due fessure consecutive (figura 3.1).

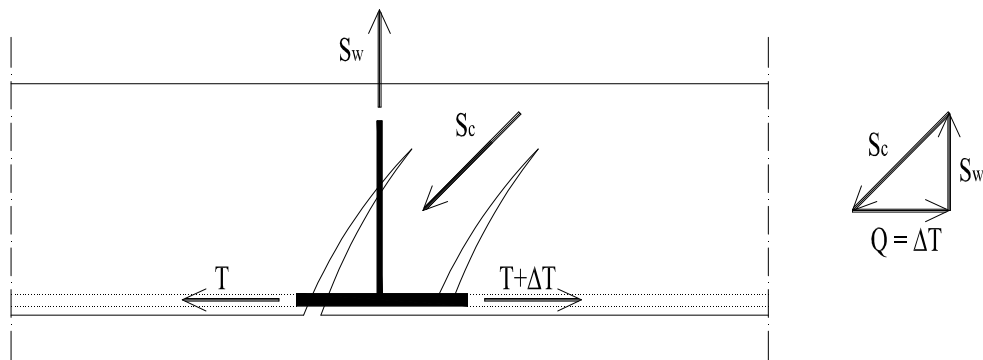


Figura 3.1: Meccanismo puntone-tirante dovuto alla presenza di armatura trasversale

Mediante i modelli a traliccio è possibile visualizzare il comportamento fisico reale del meccanismo resistente dovuto al taglio e alla flessione. Nel seguito si riporta una descrizione del primo modello a traliccio dovuto a Ritter - Mörsh e del traliccio a inclinazione variabile implementato dalle vigenti normative.[6]

3.4 Meccanismo di Ritter - Mörsh

Il traliccio di Ritter-Mörsh rappresenta un'accettabile schematizzazione del comportamento a taglio di travi in cemento armato, seppure con alcune

limitazioni. In tale modello, il traliccio è completamente isostatico in quanto i nodi sono schematizzati come cerniere.

La trave viene schematizzata come una trave reticolare ideale (figura 3.2), costituita da un corrente compresso superiore, un corrente teso inferiore e aste diagonali (biella compressa e armatura trasversale).

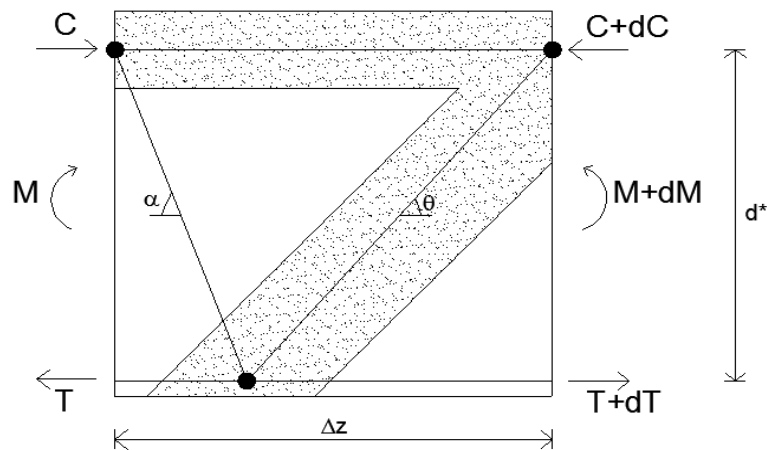


Figura 3.2: Concio ideale

Il corrente compresso altro non è che la porzione di trave posta al di sopra dell'asse neutro, cioè la zona di calcestruzzo non interessata dalle fessure; il corrente teso è rappresentato dall'armatura inferiore. Le aste diagonali sono le porzioni di calcestruzzo compresso delimitato dalle fessure e dalle armature trasversali, le quali completano la struttura reticolare resistente. Il corrente compresso di conglomerato e quello teso di acciaio, sono gli elementi che equilibrano il momento esterno, mentre le aste di parete compresse e tese trasmettono lo sforzo di scorrimento. Le bielle compresse hanno un'inclinazione θ pari a 45° , valore individuato dall'andamento delle isostatiche di compressione, che risulta compatibile con l'andamento delle isostatiche di compressione presenti in una trave in c.a. nell'ipotesi di calcestruzzo teso non reagente. Le armature sono, invece, inclinate di un angolo α .

Facendo riferimento sempre alla stessa maglia, caratterizzata da una lunghezza Δz , e indicando con d^* il braccio della coppia interna, lo sforzo che agisce sui due correnti è pari a:

$$Q = \Delta C = \Delta T = \frac{\Delta M}{d^*} = \frac{V \cdot \Delta z}{d^*}$$

Applicando il teorema dei seni è possibile ricavare gli sforzi presenti nella diagonale tesa e in quella compressa (figura 3.3), ottenendo così:

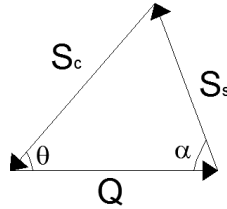


Figura 3.3: Poligono di equilibrio

$$S_c = Q \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \theta)} \quad S_s = Q \frac{\sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)}$$

Essendo, nel meccanismo a traliccio di Ritter-Mörsch $\theta=45^\circ$, le equazioni precedenti assumono la seguente forma:

$$S_c = \frac{\sqrt{2} \cdot Q}{1 + \cot \alpha} \quad S_s = \frac{Q}{\sin \alpha + \cos \alpha}$$

La teoria di Ritter-Mörsch prevede che il traliccio sia l'unico meccanismo, per mezzo del quale la trave fessurata è in grado di resistere. Questa ipotesi non consente di mettere in conto il contributo del calcestruzzo compresso, il contributo dovuto all'ingranamento degli inerti e l'effetto spinotto.

Mettendo in conto tali contributi, la resistenza a taglio è ottenuta sommando all'aliquota di taglio assorbita dalle armature un'ulteriore aliquota dovuta ai meccanismi resistenti offerti dal calcestruzzo.

Da considerazioni approfondite, si giunge alla conclusione, secondo la quale, la soluzione precedente non risulta corretta, in quanto lungo le direzioni principali di compressione possono svilupparsi solo tensioni normali e pertanto risulta errato tener conto di contributi tangenziali aggiuntivi prodotti da meccanismi resistenti del calcestruzzo. Quanto affermato, è anche sostenuto da considerazioni sperimentali, che mostrano che le isostatiche di compressione, usualmente assunte con un'inclinazione pari 45° , hanno un valore in realtà un valore inferiore. La diminuzione di tale angolo è dovuta all'insorgere dei meccanismi resistenti offerti dal calcestruzzo.

3.5 Meccanismo a inclinazione variabile

Il trascurare l'influenza dei contributi resistenti offerti dal calcestruzzo rappresenta un limite per la teoria di Ritter-Mörsch. Sulla base di queste considerazioni nasce il modello del traliccio ad inclinazione variabile. Come già affermato in precedenza, il meccanismo a inclinazione variabile del puntone compresso, ha l'obiettivo di tener conto dei contributi resistenti a taglio che si manifestano in fase fessurata a fianco della portanza dell'armatura trasversale.

Con riferimento ad una maglia elementare, l'inclinazione della biella compressa, rappresentata dall'angolo θ , è fortemente influenzata dal reale comportamento a rottura dell'elemento strutturale, che dipende dalle condizioni di carico e anche dai dettagli costruttivi, con cui si realizza l'elemento.

Si analizza, inizialmente, la resistenza degli elementi diagonali del traliccio.

La crisi della biella compressa si raggiunge quando:

$$S_{cd} = b \cdot t \cdot \alpha_c \cdot v \cdot \sigma_{cd} = b \cdot \Delta z \cdot \sin \theta \cdot \alpha_c \cdot v \cdot \sigma_{cd}$$

in cui il coefficiente v tiene conto dell'effettiva distribuzione delle tensioni lungo la biella e il coefficiente α_c degli effetti dovuti alla presenza di uno sforzo assiale di compressione.

Per poter ora ricavare il valore del taglio che provoca la crisi della biella compressa, si uguaglia l'espressione precedente, con la relazione che lega lo sforzo assorbito dalla biella compressa S_c con l'azione tagliante V , così da ottenere:

$$S_{cd} = b \cdot \Delta z \cdot \sin \theta \cdot \alpha_c \cdot v \cdot \sigma_{cd} = S_c = \frac{V_{Rcd} \cdot \Delta z}{d^*} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \theta)}$$

Ne segue che il taglio resistente (taglio-compressione) è:

$$V_{Rcd} = b \cdot d^* \cdot v \cdot \alpha_c \cdot \sigma_{cd} \cdot \frac{\cot \alpha + \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta}$$

Quando l'angolo θ assume un valore pari a 45° , la resistenza raggiunge il suo valore massimo, avendo ipotizzato staffe con un'inclinazione pari a 90° .

Analogamente può essere determinata la condizione di conseguimento della crisi nell'armatura trasversale, in seguito al raggiungimento della tensione di snervamento:

$$S_{sd} = \Omega_{s\omega} \cdot f_{yd}$$

dove $\Omega_{s\omega}$ rappresenta l'armatura trasversale disposta nel tratto Δz con passo s . Indicando con $A_{s\omega}$ l'area della singola armatura trasversale, $\Omega_{s\omega}$ assume la seguente espressione:

$$\Omega_{s\omega} = \frac{A_{s\omega} \cdot \Delta z}{s}$$

Ponendo, anche in questo caso, in relazione lo sforzo assorbito dall'armatura trasversale S_s con l'azione tagliante, e uguagliandola, successivamente, allo sforzo che provoca la crisi nell'armatura, si ottiene:

$$S_{sd} = \frac{A_{s\omega} \cdot \Delta z}{s} \cdot f_{yd} = S_s = \frac{V_{Rsd} \cdot \Delta z}{d^*} \cdot \frac{\sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)}$$

Da questa relazione si ricava il valore del taglio che determina la crisi delle armature (taglio-trazione):

$$V_{Rsd} = A_{s\omega} \cdot f_{yd} \cdot \frac{d^*}{s} \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \alpha + \cot \theta)$$

Se le staffe hanno un'inclinazione pari a 90° , la precedente equazione assume l'espressione:

$$V_{Rsd} = A_{s\omega} \cdot f_{yd} \cdot \frac{d^*}{s} \cdot \sin \alpha \cdot \cot \theta$$

Da tale espressione si deduce che il valore della resistenza decresce all'aumentare dell'inclinazione θ . Adimensionalizzando le espressioni del taglio, dividendo per $b \cdot d^* \cdot \sigma_{cd}$, si ottengono le seguenti relazioni:

- taglio sollecitante V_{sd}

$$t_{sd} = \frac{V_{sd}}{b \cdot d^* \cdot \sigma_{cd}}$$

- taglio-compressione V_{Rcd}

$$t_{Rcd} = v \cdot \alpha_c \cdot \frac{\cot \alpha + \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta}$$

- taglio-trazione V_{Rsd}

$$t_{Rcd} = \frac{A_{s\omega} \cdot f_{yd}}{b \cdot s \cdot \sigma_{cd}} \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) = \omega_{s\omega} \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \alpha + \cot \theta)$$

Ipotizzando una crisi contemporanea delle bielle di calcestruzzo a compressione e dell'armatura a taglio per trazione, si ha:

$$t_{Rcd} = t_{Rsd}$$

Uguagliando le due espressioni del taglio si può ricavare il valore della $\cot \theta$, in corrispondenza del quale si verifica la contemporanea crisi delle bielle di calcestruzzo e dell'armatura a taglio:

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{v \cdot \alpha_c}{\omega_{s\omega}} - 1}$$

In funzione di tale valore la crisi si potrà avere o nel calcestruzzo, o nelle armature oppure in entrambi gli elementi.

In generale, la resistenza a taglio di una trave dotata di armatura trasversale è fornita dal valore minore tra la resistenza a taglio-compressione e quella a taglio-trazione:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

Per poter soddisfare la verifica di resistenza a taglio, dovrà verificarsi la seguente condizione:

$$V_{Rd} \geq V_{Sd}$$

Secondo tale metodo, in fase di verifica di una trave in c.a., essendo note la geometria della sezione, l'area di armatura trasversale, nonché il passo e l'inclinazione, si procede con il calcolo della percentuale meccanica di armatura, ed uguagliando la resistenza adimensionalizzata a taglio-compressione con la resistenza adimensionalizzata a taglio-trazione è possibile determinare il valore dell'inclinazione delle bielle.

Per quel che concerne la fase di progetto, si impone la condizione di crisi per contemporaneo raggiungimento dello snervamento dell'armatura trasversale e di eccessiva compressione nelle bielle. Con tale ipotesi si ricava il valore della $\cot \theta$, necessario per la determinazione dell'area dell'armatura trasversale.

3.6 Il taglio nelle travi PREM

La comprensione del meccanismo di trasmissione degli sforzi tra gli elementi costituenti una trave reticolare mista è uno dei punti chiave per la corretta modellazione del comportamento e la valutazione della resistenza dell'elemento strutturale nelle sezioni soggette ad elevati sforzi di taglio. Per questa tipologia di trave, infatti, il meccanismo di trasmissione degli sforzi fra acciaio e calcestruzzo si attiva con modalità alquanto diverse rispetto a quelle proprie delle classiche travi in calcestruzzo armato.

In letteratura si possono trovare prove di scorrimento (push-out) che hanno evidenziato come il meccanismo di collasso a taglio possa essere attivato da differenti modalità di rottura dovute alla crisi di uno dei seguenti elementi costituenti il traliccio: aste di parete, calcestruzzo, saldature di unione fra asta di parete e piatto metallico.

Il comportamento meccanico delle travi prefabbricate reticolari miste presenta sensibili differenze sia rispetto alle usuali strutture in cemento armato ordinario, sia rispetto alle travi miste classiche. Tenuto conto del ruolo fondamentale offerto dal traliccio reticolare d'anima soprattutto nei confronti della resistenza a taglio, è opportuno evidenziarne il ruolo nella modellazione strutturale delle travi PREM.

La resistenza a taglio V_{Rd} della trave PREM deve essere valutata adottando un adeguato modello a traliccio. Gli elementi resistenti del traliccio sono: il corrente compresso di calcestruzzo, il fondello e/o le barre longitudinali, la struttura d'anima. In particolare, la struttura d'anima è per sua natura iperstatica, essendo costituita dagli elementi (tesi e compressi o ambedue tesi) di parete che formano il traliccio della trave PREM e dai puntoni d'anima di calcestruzzo inclinati di un angolo θ (figura 3.4).

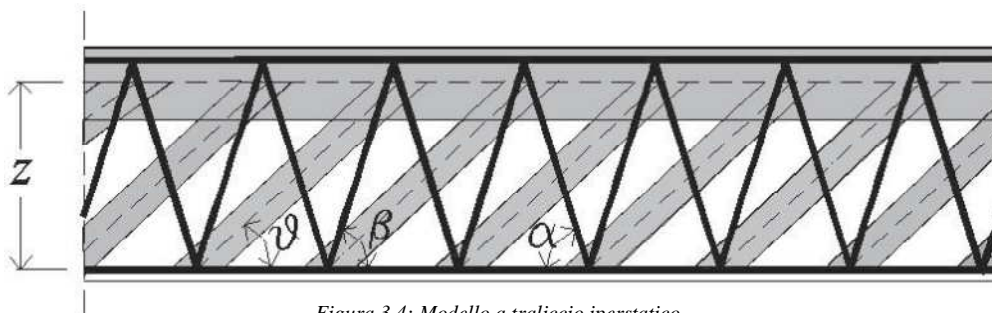


Figura 3.4: Modello a traliccio iperstatico

Tuttavia, si possono adottare modelli semplificati isostatici del tipo:

- struttura d'anima isostatica interamente metallica costituita dagli elementi di parete che formano il traliccio della trave PREM (figura 3.5);
- struttura d'anima isostatica non interamente metallica, costituita dagli elementi di parete tesi che formano il traliccio metallico e dai puntoni d'anima di calcestruzzo inclinati di un angolo θ (figura 3.6).

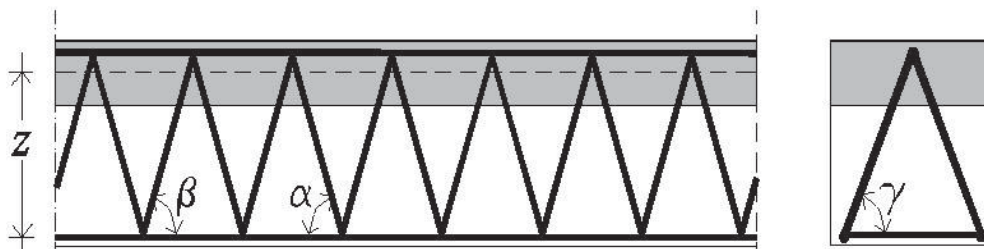


Figura 3.5: Modello a traliccio con struttura d'anima isostatica interamente metallica

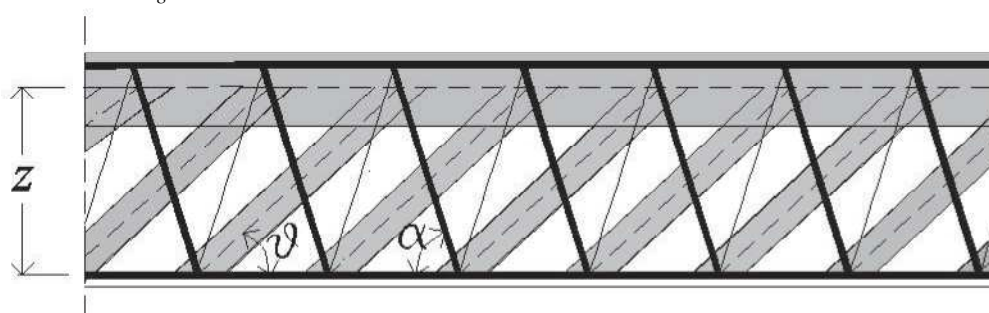


Figura 3.6: Modello a traliccio con struttura d'anima isostatica non interamente metallica

Nella figura 3.7 è mostrato il modello di traliccio utilizzato nei calcoli del taglio resistente per la classiche travi in calcestruzzo armato.

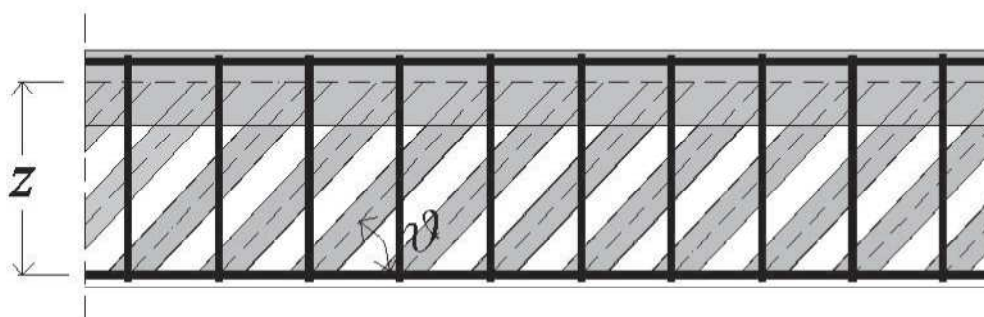


Figura 3.7: Modello a traliccio con struttura d'anima tradizionale

3.7 Il modello a traliccio isostatico (Modello 1)

Un primo modello resistente a taglio adottabile per la trave in seconda fase, proposto in figura 3.6, è quello del traliccio con struttura d'anima isostatica costituito da elementi di parete tesi in acciaio, con inclinazione α , e da puntoni di calcestruzzo inclinati di un angolo θ variabile, $1 \leq \cotg\theta \leq 2,5$.

Il taglio resistente si calcola utilizzando le formule riportate nel D.M. 14/01/2008 come minimo tra la resistenza lato calcestruzzo e lato acciaio:

- resistenza *taglio-trazione*

$$V_{Rsd} = \frac{0,9d \cdot A_{sw} \cdot f_{yd}}{s} (\cotg\theta + \cotg\alpha) \text{sen}\alpha$$

- resistenza *taglio-compressione*

$$V_{Rcd} = 0,9b_w \cdot \alpha_c \cdot d \cdot f'_{cd} \frac{\cotg\theta + \cotg\alpha}{1 + \cotg^2\theta}$$

Resistenza al taglio della trave:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rsd}; V_{Rcd}\}$$

3.8 Il modello a traliccio composto (Modello 2)

In questo secondo modello la trave è assimilata ad una trave composta da un traliccio metallico immerso in una matrice di calcestruzzo (figura 3.8).

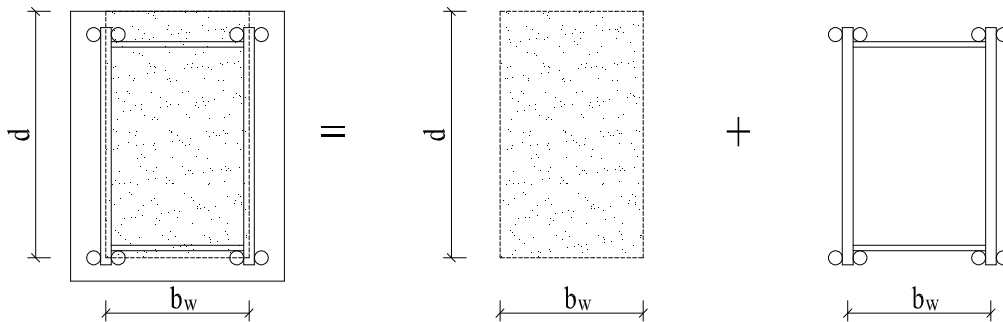


Figura 3.8: Modello a traliccio composto

Nella modellazione si trascura, a favore di sicurezza, la quota di taglio ripresa dai correnti e si adotta un modello resistente costituito dalla somma dell'aliquota di taglio dovuta al solo calcestruzzo "confinato" all'interno dei due tralicci piani, V_{Rcls} , e l'aliquota dovuta alla trave reticolare pensata isolata, V_{Rdiag} :

$$V_{Rd} = V_{Rcls} + V_{Rdiag}$$

dove:

$$V_{Rdiag} = A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot sen\alpha$$

è il taglio portato dalle aste di parete del traliccio metallico

$$V_{Rcls} = \left\{ \frac{0,18k(100\rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}}{\gamma_c} + 0,15\sigma_{cp} \right\} b_w \cdot d \geq (v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) b_w \cdot d$$

è la quota di taglio assorbita dal calcestruzzo attraverso l'effetto pettine, l'effetto spinotto, l'effetto dell'ingranamento degli inerti, il calcestruzzo compresso e l'effetto arco. I simboli hanno il significato riportato al paragrafo 3.2.

3.9 Il modello dell'anima equivalente (Modello 3)

Il modello dell'anima equivalente consente di trasformare la struttura metallica prefabbricata di forma reticolare in un "equivalente" profilato metallico ad anima piena immerso nel calcestruzzo. Si ipotizza, quindi, che la struttura metallica delle travi PREM possa essere schematizzata come un profilo metallico a doppio T, nel quale l'ala superiore ha un'area pari a quella delle armature costituenti il corrente superiore, l'ala inferiore coincide con il fondello. L'area equivalente dell'anima del profilo a doppio T viene determinata imponendo l'uguaglianza tra lo scorrimento angolare della struttura metallica e quello dell'anima ideale del profilo a doppio T, e la sua altezza è proprio pari all'altezza del traliccio metallico (figura 3.9).[7]

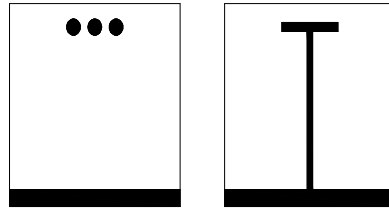


Figura 3.9: Sezione reale e sezione di calcolo

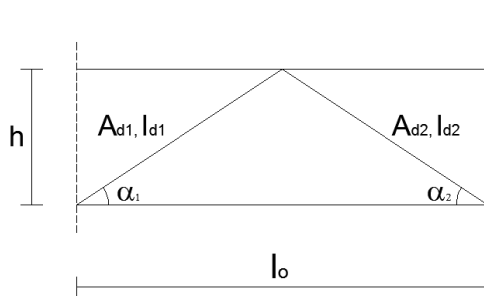


Figura 3.10: Concio di trave

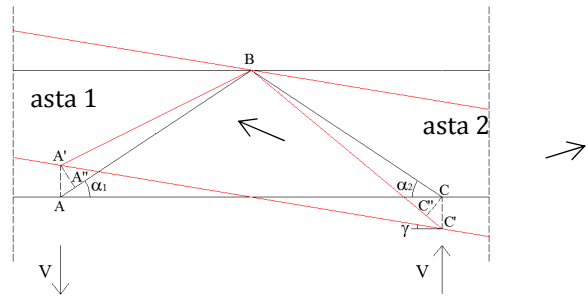


Figura 3.11: Modalità di deformazione

Considerato il concio di anima reticolare della trave, sopra riportato, si suppone che esso sia soggetto ad uno sforzo V , lo scorrimento γ è definito dalla seguente relazione:

$$\gamma = \frac{\overline{AA'} + \overline{CC'}}{l_0}$$

La grandezza $\overline{AA'}$, che descrive l'accorciamento dell'asta 1, è definito dalla seguente relazione:

$$\overline{AA'} = \frac{V}{h^2 \cdot E \cdot A_{d1}} \cdot l_{d1}^3$$

dove:

- $E = 210000 \text{ N/mm}^2$, e rappresenta il modulo elastico dell'acciaio;
- h è l'altezza del traliccio;
- A_{d1} è l'area dell'asta diagonale;
- l_{d1} è la lunghezza dell'asta diagonale.

Considerando l'equilibrio degli sforzi agenti nel nodo C , si ha (figura 3.12):

$$V = N_{BC} \cdot \text{sen} \alpha_2$$

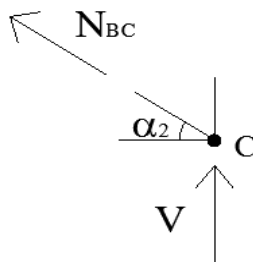


Figura 3.12: Equilibrio al nodo

Esprimendo il $\sin\alpha_2$ in funzione dell'altezza del concio e della lunghezza della seconda asta diagonale, e sostituendo nell'equazione precedente si ha la seguente relazione:

$$N_{BC} = \frac{V}{h} \cdot l_{d2}$$

Si ottiene così che l'allungamento della seconda asta diagonale è pari a:

$$\overline{CC'} = \frac{V}{h^2 \cdot E \cdot A_{d2}} \cdot l_{d2}^3$$

Lo scorrimento del concio reticolare è pari a:

$$\gamma = \frac{V}{E \cdot l_0 \cdot h^2} \cdot \left[\frac{l_{d1}^3}{A_{d1}} + \frac{l_{d2}^3}{A_{d2}} \right]$$

Lo scorrimento per una trave reticolare ad anima piena equivalente è:

$$\gamma = \frac{V}{G \cdot A_{eq}}$$

dove:

- $G = \frac{E}{[2(1+\nu)]} = 80769,23 N/mm^2$, rappresenta il modulo di elasticità trasversale, in cui ν è il coefficiente di Poisson ed è pari a 0,3;
- A_{eq} è l'area dell'anima equivalente della trave.

Uguagliando le due espressioni dello scorrimento sopra scritti si ricava l'espressione di A_{eq} :

$$A_{eq} = \frac{E}{G} h^2 l_0 \frac{1}{\left[\frac{l_{d1}^3}{A_{d1}} + \frac{l_{d2}^3}{A_{d2}} \right]}$$

Si può notare che nel caso in cui, le aste diagonali hanno la stessa lunghezza e la stessa area (come nelle PREM), $l_{d1} = l_{d2} = l_d$ e $A_{d1} = A_{d2} = A_d$, l'espressione precedente si semplifica:

$$A_{eq} = \frac{E}{G} h^2 l_0 \frac{A_d}{2l_d^3}$$

Una volta determinata l'area equivalente si procede con il calcolo del taglio resistente, così come segue:

$$V_{res} = \frac{A_{eq} \cdot f_y}{\sqrt{3}}$$

CAPITOLO 4

PROVE SPERIMENTALI A TAGLIO SULLE TRAVI PREM

4.1 Descrizione delle prove

L'obiettivo è quello di studiare il loro comportamento a taglio e per questo si è progettata la prova in modo che non avvenisse una prematura crisi per sollecitazione flessionale.

Il programma sperimentale è stato svolto attraverso le seguenti prove:

- caratterizzazione degli acciai utilizzati per il confezionamento dei tralicci mediante prove di trazione uniaassiale su spezzoni di barre e su provini di lamiera;
- caratterizzazione del calcestruzzo mediante prove di compressione su cilindri confezionati con la stessa miscela di calcestruzzo con è stato realizzato il getto di completamento delle travi;
- prove di carico eseguite su complessive 9 travi divise in 3 gruppi denominati *A*, *B* e *C* (figura 4.1).

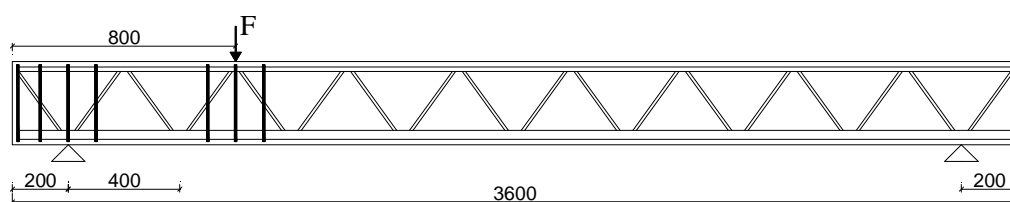


Figura 4.1: Schema di carico e sezione longitudinale travi sperimentate

Le travi dei tre gruppi sono caratterizzate dai seguenti elementi:

- gruppo A: 3 travi senza fondello (figura 4.2);
- gruppo B: 3 travi con fondello in acciaio S355 (figura 4.6);
- gruppo C: 3 travi con fondello in calcestruzzo armato (figura 4.7).

Nel seguito si è indicata con A'_s l'armatura superiore costituente il traliccio, con A_s l'armatura inferiore, con A_{st} l'armatura dei ferri di parete e con A_p l'area del piatto in acciaio.

Le tre travi di ogni gruppo si differenziano per la qualità dell'acciaio, ad aderenza migliorata B450C o liscio S355, impiegato per i vari elementi costituenti il traliccio (aste di parete e correnti). Per le prime travi di ogni gruppo si è utilizzato solo acciaio ad aderenza migliorata, per le seconde si è usato acciaio S355 per le aste di parete e, infine, per le terze travi solo acciaio liscio.

gruppo A: 3 travi senza fondello [$A'_s=4\phi 16$, $A_s=4\phi 32$, $A_{st}=2\phi 10/40''$].

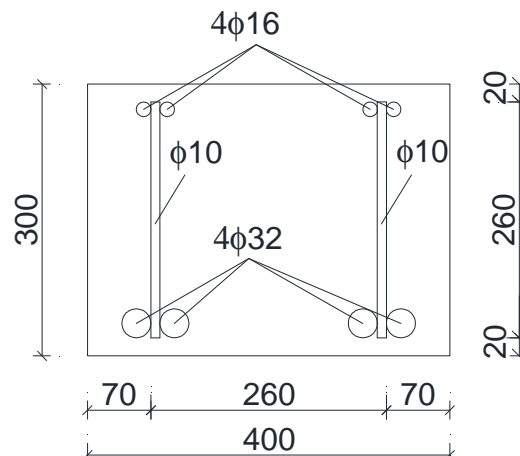


Figura 4.2: Sezione trasversale travi gruppo A

Trave	A'_s	A_s	A_{st}
A.01	4φ16 (B450C)	4φ32 (B450C)	2φ10/40" (B450C)
A.02	4φ16 (B450C)	4φ32 (B450C)	2φ10/40" (S355)
A.03	4φ16 (S355)	4φ32 (S355)	2φ10/40" (S355)

Tabella 4.1: Armatura per le travi tipo A



Figura 4.3: Foto trave A.01



Figura 4.4: Foto trave A.02



Figura 4.5: Foto trave A.03

gruppo B: 3 travi con fondello in acciaio [$A'_s=4\phi 16$, $A_s=4\phi 20$, $A_p=20\text{cm}^2$, $A_{st}=2\phi 10/40''$].

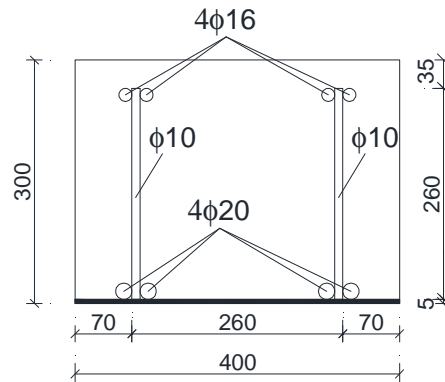


Figura 4.6: Sezione trasversale travi gruppo B

Trave	A's	A _s	A _{st}
B.01	4φ16 (B450C)	4φ20 (B450C)	2φ10/40" (B450C)
B.02	4φ16 (B450C)	4φ20 (B450C)	2φ10/40" (S355)
B.03	4φ16 (S355)	4φ20 (S355)	2φ10/40" (S355)

Tabella 4.2: Armatura per le travi tipo B

gruppo C: 3 travi con fondello in c.a. [$A'_s=4\phi 16$, $A_s=4\phi 32$, $A_{st}=2\phi 10/40''$].

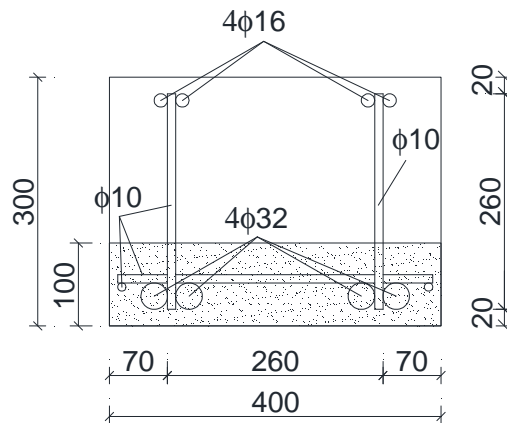


Figura 4.7: Sezione trasversale travi gruppo C

Trave	A's	A _s	A _{st}
C.01	4φ16 (B450C)	4φ32 (B450C)	2φ10/40" (B450C)
C.02	4φ16 (B450C)	4φ32 (B450C)	2φ10/40" (S355)
C.03	4φ16 (S355)	4φ32 (S355)	2φ10/40" (S355)

Tabella 4.3: Armatura per le travi tipo C



Figura 4.8: Foto trave B.01



Figura 4.9: Foto trave B.02



Figura 4.10: Foto trave B.03



Figura 4.11: Getto del fondello Travi C



Figura 4.12: Fase di getto Travi B



Figura 4.13: Preparazione dei provini di cls

4.2 Prove sulle travi

Sono state eseguite prove a flessione presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Dipartimento di Strutture dell'Università della Calabria e di seguito si riportano i risultati ottenuti per ogni singola prova. Per eseguire tali prove, viste le dimensioni delle travi, è stato scelto un opportuno telaio di contrasto in acciaio, che costituisce la macchina di prova insieme ad una centralina elettronica, impiegata per la registrazione ed il trasferimento dei dati ai computer.

Le nove travi sperimentate hanno la seguente geometria: lunghezza 360 cm, altezza 30 cm, larghezza 40 cm, armature per come descritto nel paragrafo precedente. Le travi sono state sottoposte a prova su tre punti secondo lo schema riportato nella figura 4.14. In figura si vede anche il posizionamento, in corrispondenza del carico applicato, dei trasduttori induttivi rettilinei utilizzati per la misura degli spostamenti verticali (T11 posizionato anteriormente e T12 posizionato posteriormente). Inoltre, per misurare le deformazioni, sono stati applicati degli estensimetri sia sul calcestruzzo compresso, vicino al carico applicato, sia sul traliccio (figura 4.15).

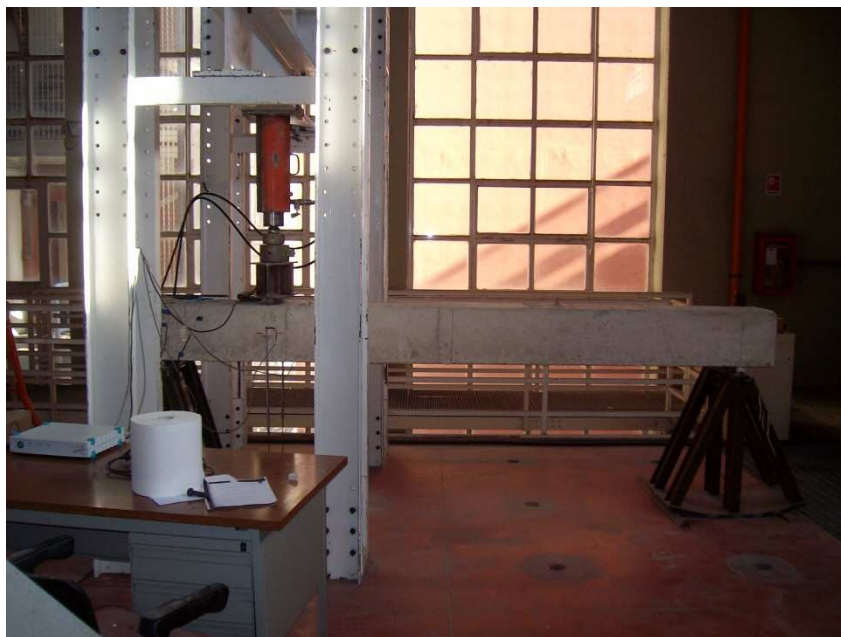


Figura 4.14: Prova di carico su tre punti

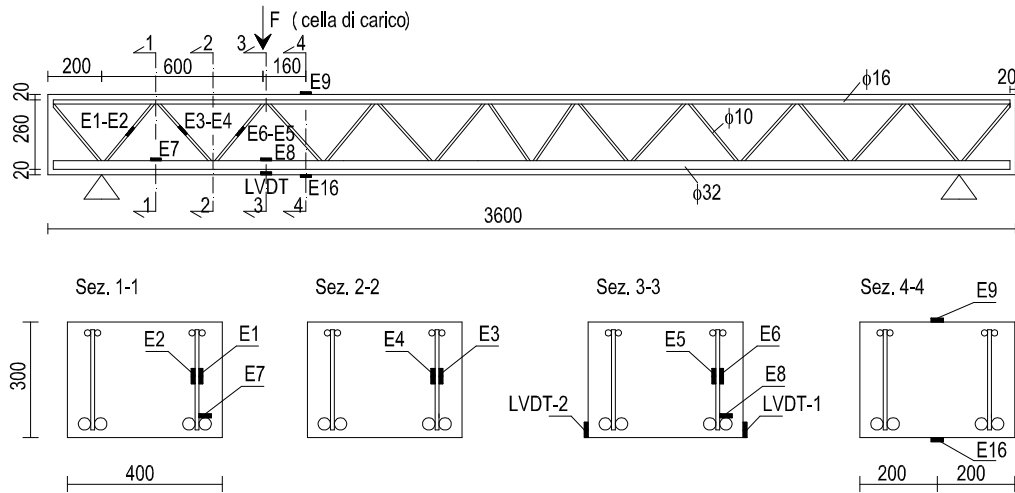


Figura 4.15: Posizione degli strumenti di misura

Le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati per il confezionamento delle travi sono state determinate mediante prove su provini cilindrici di calcestruzzo prelevati in fase di getto e su spezzoni di armatura dello stesso lotto dei tralicci.

Nella tabella seguente sono riportati i risultati ottenuti dalle prove di compressione sui provini cilindrici di calcestruzzo (diametro 150mm):

Provino	H (mm)	d (mm)	Peso (kg)	f_c (N/mm ²)	f_{cm} (N/mm ²)
A.01	315	155	13.70	40.93	38.78
A.02	320	155	14.20	37.40	
A.03	320	155	14.16	38.00	
B.01	317	155	14.00	35.21	35.57
B.02	320	155	14.24	32.40	
B.03	320	155	14.12	39.10	
Fondello C.01	318	155	13.72	35.68	36.09
Fondello C.02	310	155	13.50	36.43	
Fondello C.03	315	155	13.52	36.15	
C.01	317	155	14.20	49.82	45.61
C.02	315	155	14.10	37.70	
C.03	320	155	1438	49.30	

Tabella 4.4: Prove di compressione su cilindri in cls

I risultati ottenuti dalle prove di trazione sulle barre di acciaio sono riportati nella tabella sottostante.

Provino	ϕ_n (mm)	P/L (kg/m)	S_0 (mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	A_{gt} (%)
Barre lisce	10	0.70	88.97	303.1	428.4	18.2
		0.70	88.97	297.4	431.1	16.2
		0.70	88.97	295.0	424.1	20.7
Barre lisce	16	1.70	216.79	355.4	479.8	18.2
		1.70	216.79	348.1	476.0	20.2
		1.70	216.79	346.0	474.7	19.2
Barre lisce	20	2.82	359.77	426.9	592.8	21.8
		2.82	359.77	353.6	518.2	21.8
		2.82	359.77	352.6	518.6	22.8
Barre nervate	10	0.70	88.97	393.6	486.8	13.7
		0.70	88.97	383.3	483.2	14.2
		0.70	88.97	384.1	479.8	13.2
Barre nervate	16	1.70	216.79	463.9	538.1	11.8
		1.70	216.79	461.2	535.3	11.8
		1.70	216.79	479.9	569.1	9.3
Barre nervate	20	2.82	359.77	458.0	544.2	14.3
		2.82	359.77	460.0	553.8	13.8
		2.82	359.77	456.3	545.5	11.3
Barre nervate	32	6.39	814.29	535.5	637.1	13.3
		6.39	814.29	533.0	634.4	10.8
		6.39	814.29	537.5	644.4	10.8
Piatti 2,5x0,5 cm ²	12	1.00	126.97	491.4	561.0	14.3
		1.00	127.18	483.0	553.5	15.3
		1.00	127.18	484.5	555.4	15.8

Tabella 4.5: Prove di trazione su provini in acciaio

Dalla tabella 4.5 si ricavano le resistenze medie a snervamento e a rottura per le varie tipologie di barre e per i piatti. I valori delle misure estrapolati durante le prove sui materiali vengono utilizzati per svolgere le analisi numeriche.

4.3 Risultati

Si riportano di seguito i risultati più significativi delle prove di carico a flessione compiute sulle nove travi oggetto di indagine.

La **prima prova** è stata eseguita sulla **trave A.01**. Nella figura 4.16 si riporta la storia di carico da cui si evince che gli incrementi di carico sono stati apportati in modo quasi uniforme. Il massimo valore rilevato del carico di rottura è $F_u = 345,44$ kN, cui corrisponde uno sforzo di taglio massimo pari a $V_{u,max} = 285,47$ kN; in cui $V_{u,max} = \frac{F}{l}(l - a) + \frac{g \cdot l}{2}$.

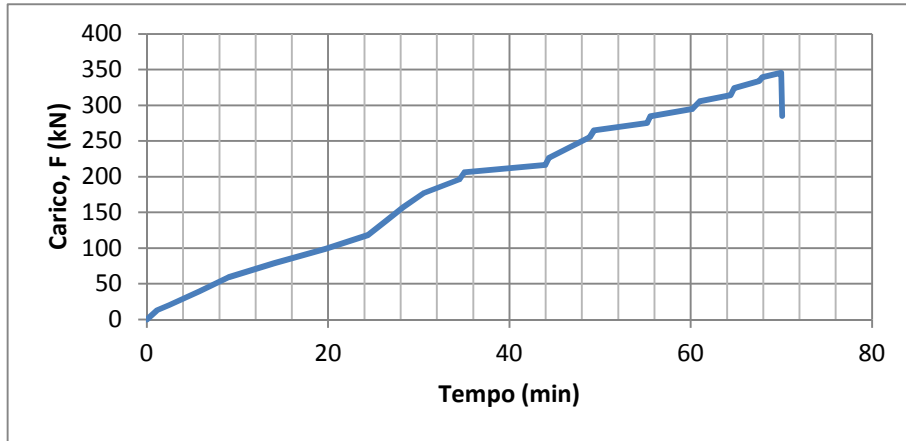


Figura 4.16: Diagramma carico-tempo trave A.01

Nella figura 4.17 si riporta il diagramma carico - abbassamento della sezione di carico. Tale abbassamento è stato calcolato come media aritmetica dei due valori misurati dai trasduttori *LVDT-1* ed *LVDT-2*. L'abbassamento medio a rottura misurato è $w_{max} = 6,5$ mm. All'aumentare del carico, la trave subisce un abbassamento pressoché uniforme fino al raggiungimento della crisi. Questo comportamento, di tipo fragile, è tipico per la modalità di rottura a taglio.

Nella figura 4.18 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E1 ed E2, in cui si ha $\varepsilon_{m(1-2)} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$. La deformazione media a snervamento per barre $\phi 10$ nervate risulta uguale a: $\varepsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 387/210000 = 1,84\%$, in cui $f_{ym} = (393,6+383,3+384,1)/3 = 387$ N/mm².

Dal diagramma si evince che l'andamento della deformazione media nel diagonale compresso è pressoché lineare fino ad un valore del taglio di 196kN, valore di poco superiore a quello di formazione delle fessure.

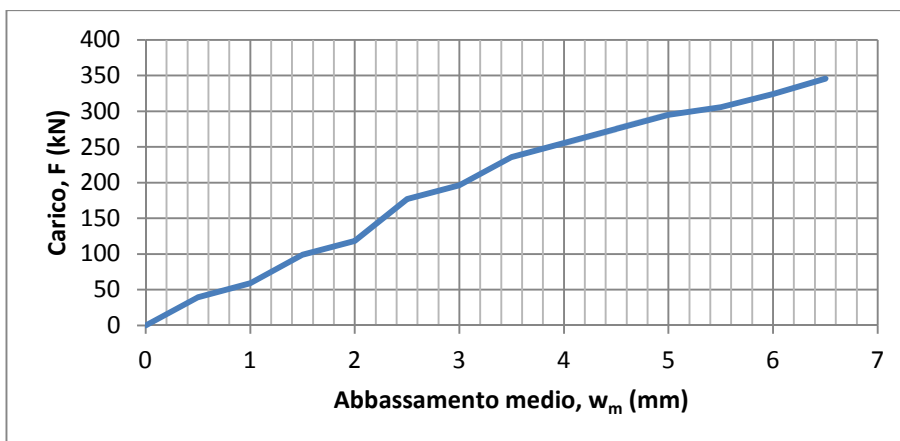


Figura 4.17: Diagramma carico-abbassamento trave A.01

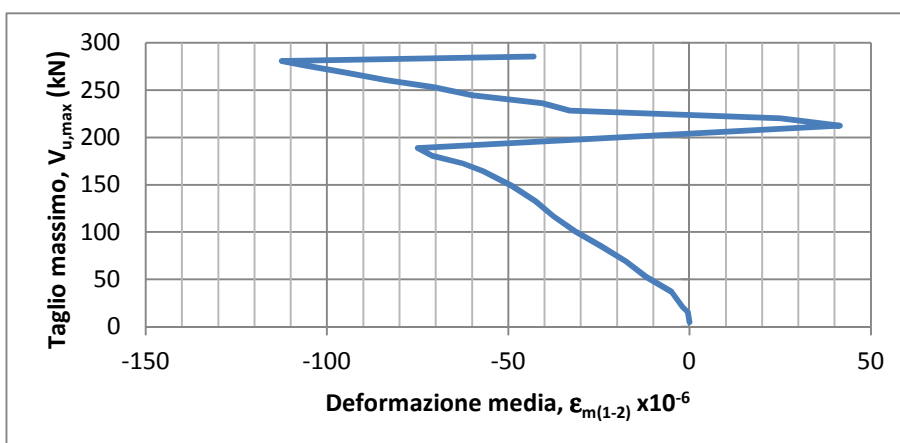


Figura 4.18: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, trave A.01

Il cambio di segno della $\epsilon_{m(1-2)}$ è da imputare ad una probabile inflessione del diagonale compresso a seguito della mancanza di confinamento offerto dal calcestruzzo a causa della apertura delle fessure. Tale inversione di segno nella deformazione si arresta allo stabilizzarsi della fessura e l'asta riesce a recuperare la sua deformazione di compressione garantendo comunque lo sviluppo dell'incremento di carico. Poco prima del raggiungimento del carico di rottura l'asta si instabilizza nuovamente.

Nella figura 4.19 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E3 ed E4, posti sulla prima asta diagonale tesa del traliccio. Nello stesso grafico è riportato il punto che corrisponde al valore del taglio per il quale si attinge lo snervamento nell'acciaio della stessa asta ($V_y = 207,58$ kN).

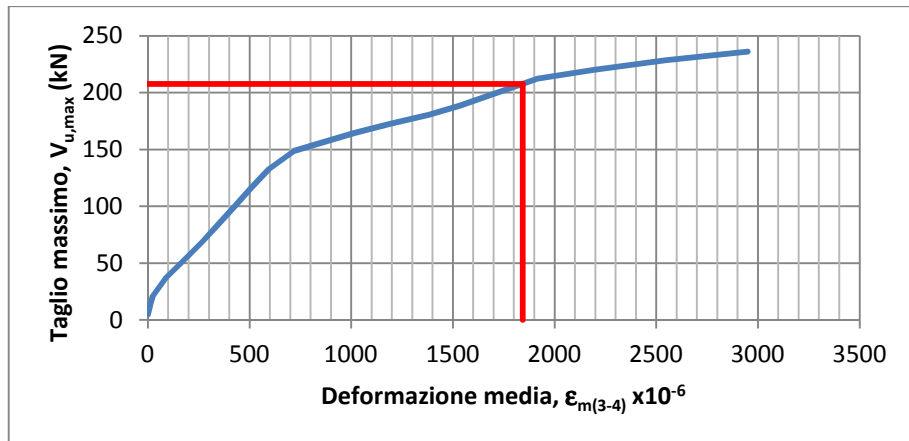


Figura 4.19: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, trave A.01

Gli estensimetri installati non hanno fornito misurazioni fino al carico di rottura ma sono "saltati" rispettivamente per valori del carico applicato di poco superiori ad $F_{E3} = 206$ kN ed $F_{E4} = 284$ kN, cui corrispondono i seguenti valori di taglio: $V_{E3} = 172$ kN e $V_{E4} = 236$ kN. Si può osservare un cambiamento nella pendenza della curva per un valore di deformazione intorno allo 0,72 ‰. Tale fatto è probabilmente da imputare ad una perdita dell'effetto di aderenza tra acciaio e calcestruzzo e/o dell'ingranamento degli inerti a causa dell'aumento dell'ampiezza delle fessure con conseguente aumento dello scorrimento dell'asta in esame.

Nella figura 4.20 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E6, in quanto l'E5 non ha fornito misurazioni, applicato sulla terza asta di parete del traliccio metallico. Le considerazioni che si possono trarre dall'andamento del grafico sono analoghe a quelle fatte per gli altri due estensimetri compressi, E1 ed E2. La probabile instabilità dell'asta si attinge approssimativamente per lo stesso valore del taglio di 196 kN. A rottura l'asta è tesa anziché compressa.

Nella figura 4.21 è diagrammata la deformazione dell'estensimetro E7, posto vicino all'appoggio sul corrente inferiore teso, in funzione del taglio massimo agente. La deformazione media a snervamento per barre $\phi 32$ nervate risulta uguale a:

$$\epsilon_{ym} = f_{ym} / E_s = 535,3 / 210000 = 2,55\%, \text{ in cui } f_{ym} = (535,5+533,0+537,5)/3 = 535,3 \text{ N/mm}^2.$$

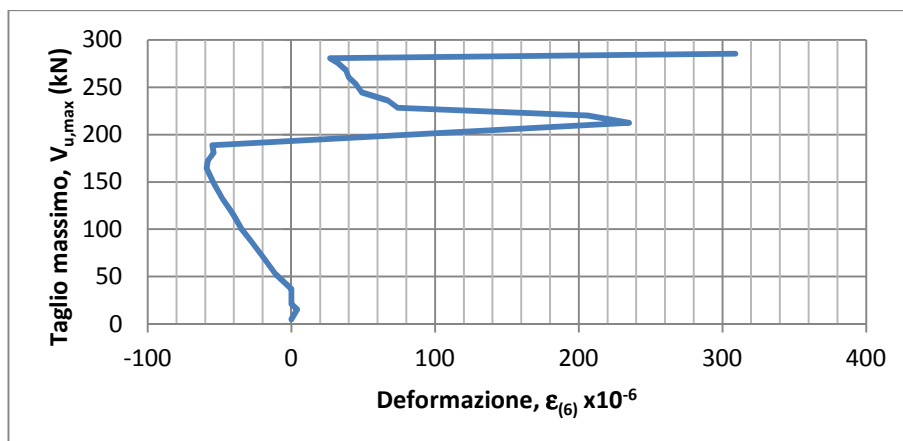


Figura 4.20: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E6, trave A.01

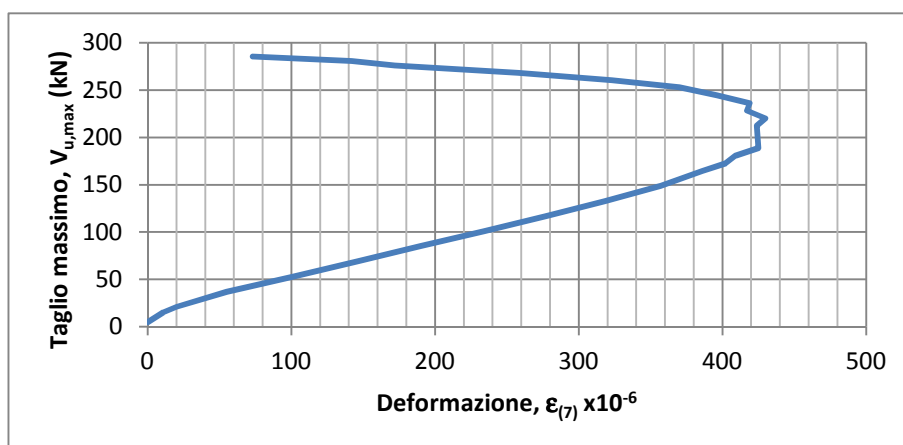


Figura 4.21: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E7, trave A.01

Si nota un comportamento elastico lineare del materiale fino al raggiungimento di uno sforzo di taglio di circa 190 kN, valore intorno al quale l'ampiezza delle fessure si incrementa notevolmente. A questo punto si nota una stabilizzazione della deformazione all'aumentare del carico esterno fino ad un valore del taglio di circa 230 kN. Successivamente inizia la fase di riduzione della deformazione di trazione causata dall'aumento dell'ampiezza delle fessure. Le deformazioni dell'estensimetro in questo punto denotano che l'acciaio non raggiunge ivi il suo limite di snervamento rimanendo il massimo valore registrato da E7 ben al di sotto di $\epsilon_{ym} = 2,55\%$.

Nella figura 4.22 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E8, installato sul corrente teso di acciaio in corrispondenza della

cella di carico. Dal grafico si evince un comportamento elastico lineare del materiale fino al raggiungimento del carico di rottura.

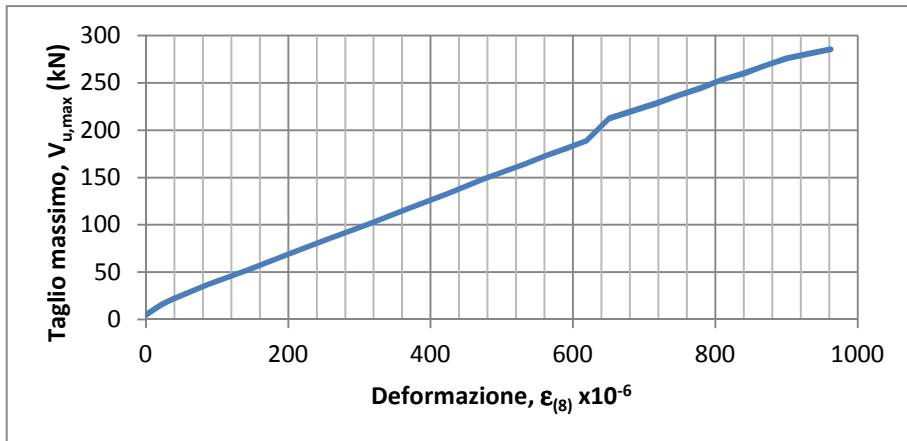


Figura 4.22: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E8, trave A.01

Nella figura 4.23, infine, si riporta il diagramma taglio - deformazione relativo all'estensimetro E9, applicato all'estradosso della trave ad una distanza di 16cm dal punto di carico.

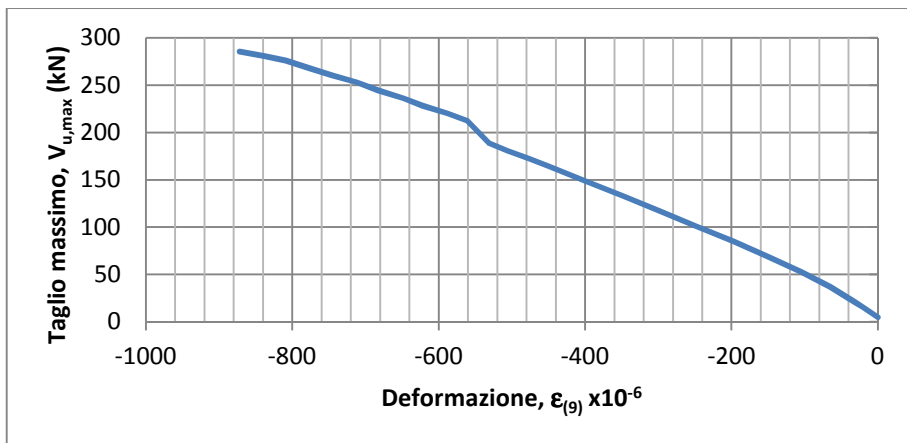


Figura 4.23: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E9, trave A.01

Dal grafico si può notare come il calcestruzzo abbia un comportamento elastico lineare fino a rottura. Tale fatto è coerente con i legami costitutivi del calcestruzzo riportati nel DM 14/01/2008 che prevedono i seguenti limiti elastici: $\epsilon_{c2} = 2\text{‰}$ (parabola - rettangolo), $\epsilon_{c3} = 1,75\text{‰}$ (triangolo - rettangolo); entrambi ben al di sopra della deformazione massima di compressione registrata dall'estensimetro E9, $\epsilon_{9,max} = 0,87\text{‰}$.

La **seconda prova** è stata eseguita sulla **trave A.02**. Nella figura 4.24 si riporta la storia di carico. La durata complessiva della prova è stata di circa un'ora e mezza raggiungendo il valore massimo del carico applicato pari a $F_u = 368,25$ kN, cui corrisponde uno sforzo di taglio massimo pari a $V_{u,max} = 304,00$ kN; in cui $V_{u,max} = \frac{F}{l}(l - a) + \frac{g \cdot l}{2}$.

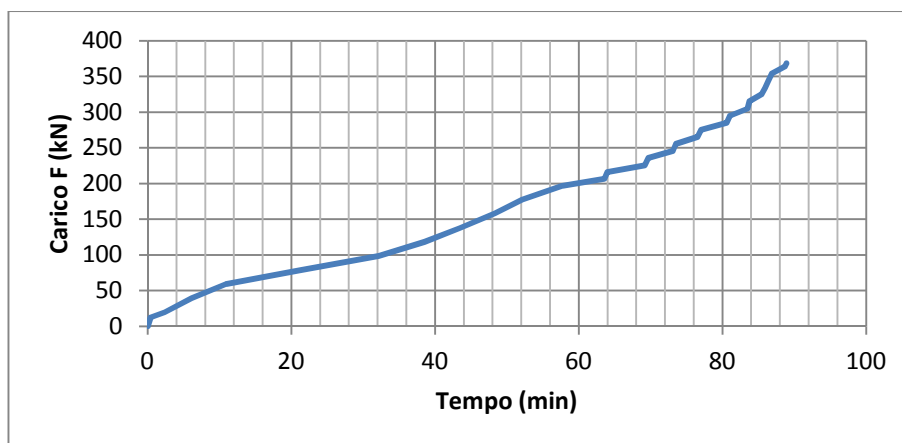


Figura 4.24: Diagramma carico-tempo trave A.02

Nella figura 4.25 si riporta il diagramma carico - abbassamento della sezione di carico. Tale abbassamento è stato calcolato come media aritmetica dei due valori misurati dai trasduttori *LVDT-1* ed *LVDT-2*. L'abbassamento medio a rottura misurato è $w_{max} = 7,5$ mm. All'aumentare del carico, la trave subisce un abbassamento pressoché uniforme fino al raggiungimento della crisi. Questo comportamento, di tipo fragile, è tipico per la modalità di rottura a taglio. La rigidezza complessiva della trave A.02 è praticamente identica a quella della trave A.01. Tale fatto è coerente considerando che le barre longitudinali sono uguali nelle due travi e che la differenza di rigidezza dovuta al diverso tipo di acciaio usato per i ferri di parete incide di poco rispetto alla rigidezza dovuta all'armatura longitudinale.

Nella figura 4.26 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E1 ed E2, in cui si ha $\varepsilon_{m(1-2)} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$. La deformazione media a snervamento per barre $\phi 10$ lisce risulta uguale a: $\varepsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 298,5/210000 = 1,42\%$, in cui $f_{ym} = (303,1+297,4+295,0)/3 = 298,5$ N/mm².

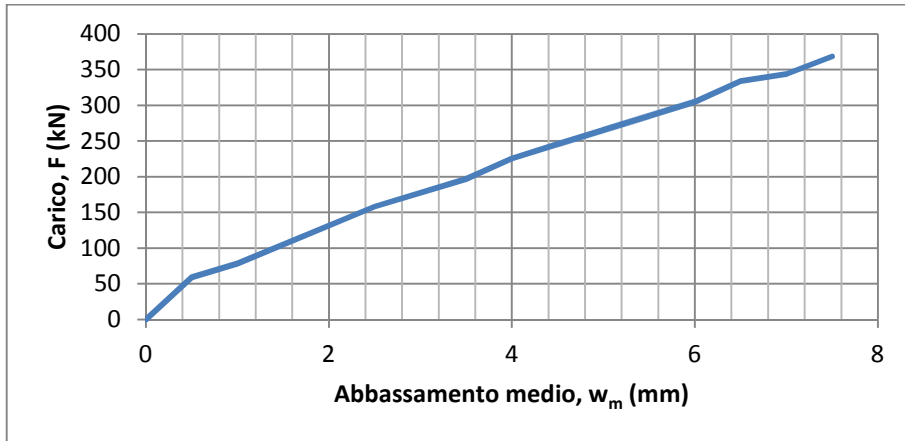


Figura 4.25: Diagramma carico-abbassamento trave A.02

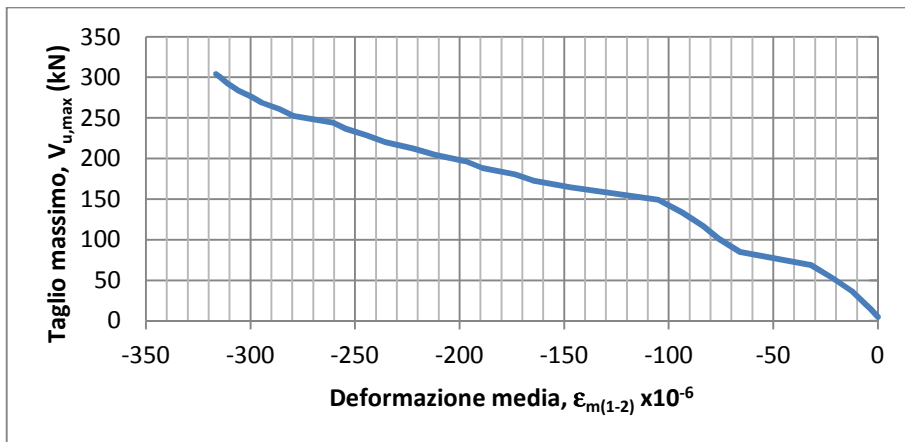


Figura 4.26: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, trave A.02

Dal diagramma si evince che l'andamento della deformazione media nel diagonale compresso è pressoché lineare fino al valore di rottura. Differenza sostanziale rispetto alla trave A.01 è che, in questo caso, l'asta compressa non si instabilizza, nonostante i valori di deformazione raggiunti siano più del triplo rispetto agli analoghi della prima trave. In questo caso, infatti, il ferro di parete ha avuto un aumento uniforme della deformazione di compressione mentre nel primo caso parte della deformazione era stata "recuperata" durante l'apertura della fessura nel punto di applicazione dell'estensimetro.

Nella figura 4.27 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E4, posto sulla prima asta diagonale tesa del traliccio.

L'estensimetro E3 non ha fornito misurazioni. L'estensimetro ha funzionato solo fino ad una deformazione pari a 0,285‰.

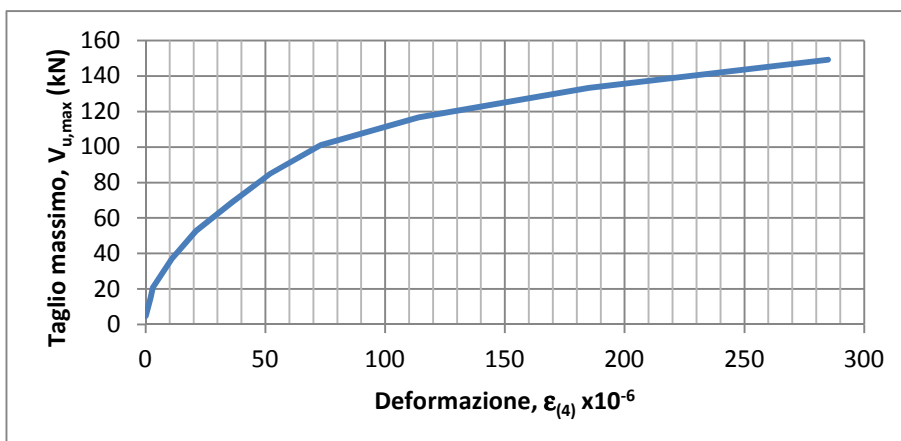


Figura 4.27: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E4, trave A.02

Nella figura 4.28 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E5 ed E6 applicati sulla terza asta di parete del traliccio metallico.

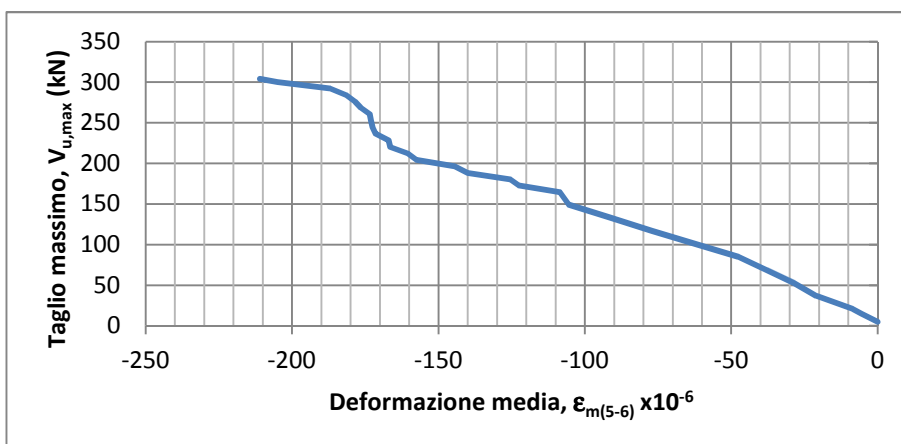


Figura 4.28: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, trave A.02

Le considerazioni che si possono trarre dall'andamento del grafico sono analoghe a quelle fatte per gli altri due estensimetri compressi, E1 ed E2. Anche in questo caso non si ha l'instabilità dell'asta grazie al confinamento offerto dal calcestruzzo. Se l'asta non fosse confinata si instabilizzerebbe per un valore del carico assiale pari a 16 kN (vedi paragrafo 2.2), in cui si è assunto $f_{yk} = 298,5 \text{ N/mm}^2$.

Nella figura 4.29 è diagrammata la deformazione dell'estensimetro E7, posto vicino all'appoggio sul corrente inferiore teso, in funzione del taglio massimo agente. Si nota un comportamento elastico lineare del materiale fino al raggiungimento di uno sforzo di taglio di circa 150 kN, valore intorno al quale l'ampiezza delle fessure si incrementa notevolmente. A questo punto si nota una stabilizzazione della deformazione all'aumentare del carico esterno fino ad un valore del taglio di circa 200 kN. Successivamente inizia la fase di riduzione della deformazione di trazione causata dall'aumento dell'ampiezza delle fessure. Le deformazioni dell'estensimetro in questo punto denotano che l'acciaio non raggiunge ivi il suo limite di snervamento rimanendo il massimo valore registrato da E7 ben al di sotto di $\epsilon_{ym} = 2,55\%$.

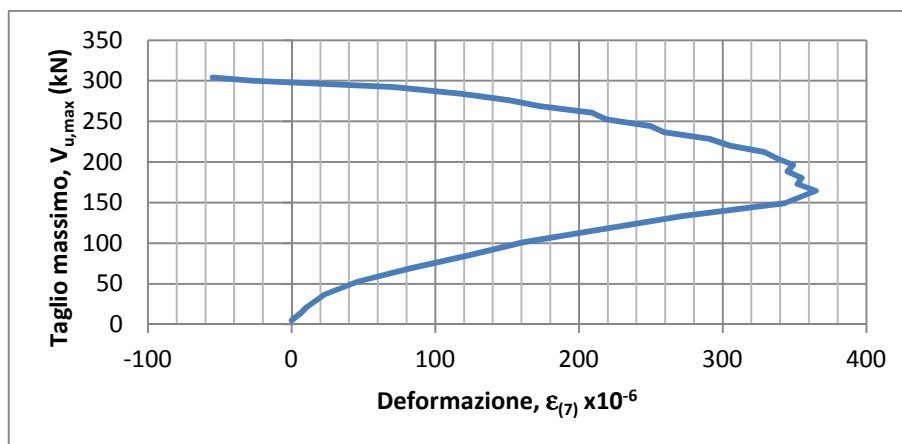


Figura 4.29: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E7, trave A.02

Nella figura 4.30 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E8, installato sul corrente teso di acciaio in corrispondenza della cella di carico. Dal grafico si evince un comportamento elastico lineare del materiale fino al raggiungimento del carico di rottura, infatti, la deformazione massima registrata risulta inferiore al valore della deformazione di snervamento ϵ_{ym} .

Nella figura 4.31, infine, si riporta il diagramma taglio - deformazione relativo all'estensimetro E9, applicato all'estradosso della trave ad una distanza di 16cm dal punto di carico.

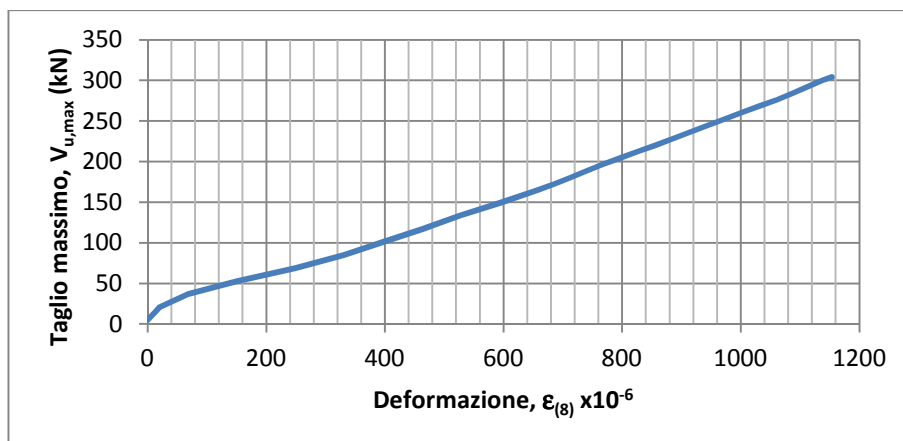


Figura 4.30: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E8, trave A.02

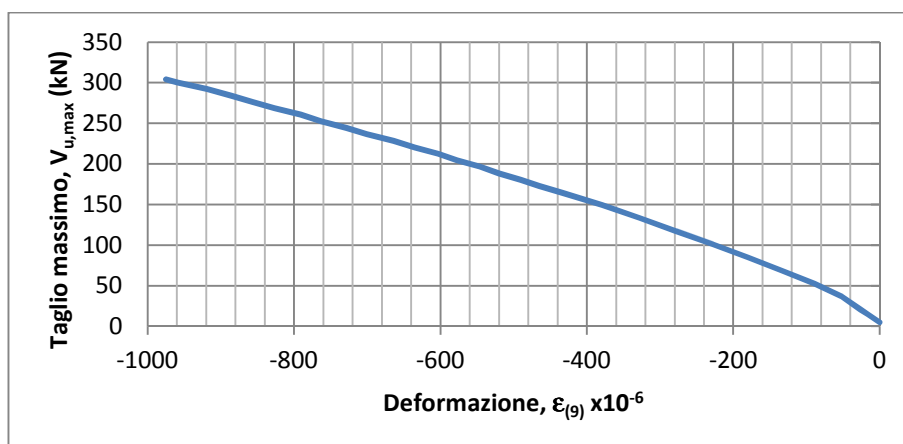


Figura 4.31: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E9, trave A.02

Dal grafico si può notare come il calcestruzzo abbia un comportamento elastico lineare fino a rottura. Tale fatto è coerente con i legami costitutivi del calcestruzzo riportati nel DM 14/01/2008 che prevedono i seguenti limiti elastici: $\epsilon_{c2} = 2\text{‰}$ (parabola - rettangolo), $\epsilon_{c3} = 1,75\text{‰}$ (triangolo - rettangolo); entrambi ben al di sopra della deformazione massima di compressione registrata dall'estensimetro E9, $\epsilon_{9,max} = 0,97\text{‰}$.

La **terza prova** è stata eseguita sulla **trave A.03**. Nella figura 4.32 si riporta la storia di carico. La rottura della trave è avvenuta per un valore del carico applicato pari a $F_u = 260,21$ kN, cui corrisponde uno sforzo di taglio massimo pari a $V_{u,max} = 216,22$ kN; in cui $V_{u,max} = \frac{F}{l}(l - a) + \frac{g \cdot l}{2}$.

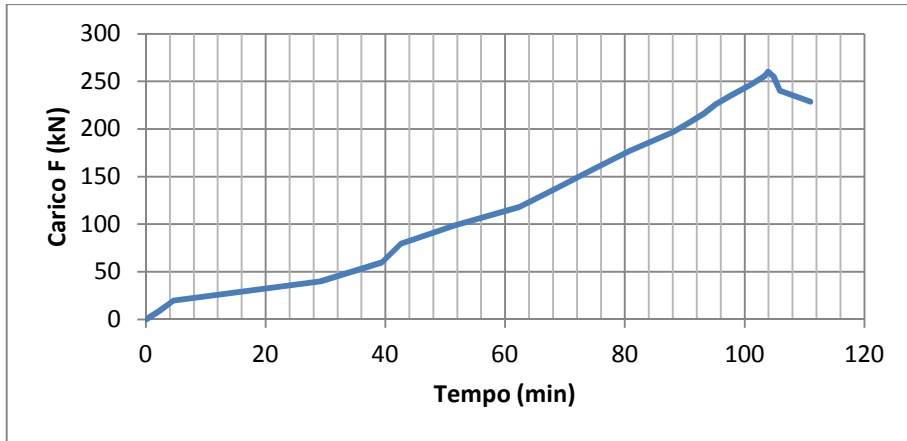


Figura 4.32: Diagramma carico-tempo trave A.03

Come ci si poteva aspettare il valore del carico di rottura risulta inferiore rispetto alle due travi precedenti in quanto l'acciaio liscio S355, di cui è costituito il traliccio della trave in esame, è meno resistente dell'acciaio nervato B450C, di cui è costituita l'armatura principale delle travi A.01 ed A.02.

Nella figura 4.33 si riporta il diagramma carico - abbassamento della sezione di carico. L'abbassamento medio a rottura misurato è $w_{\max} = 6,0\text{mm}$. All'aumentare del carico, la trave subisce un abbassamento pressoché uniforme fino al raggiungimento della crisi. Questo comportamento, di tipo fragile, è tipico per la modalità di rottura a taglio.

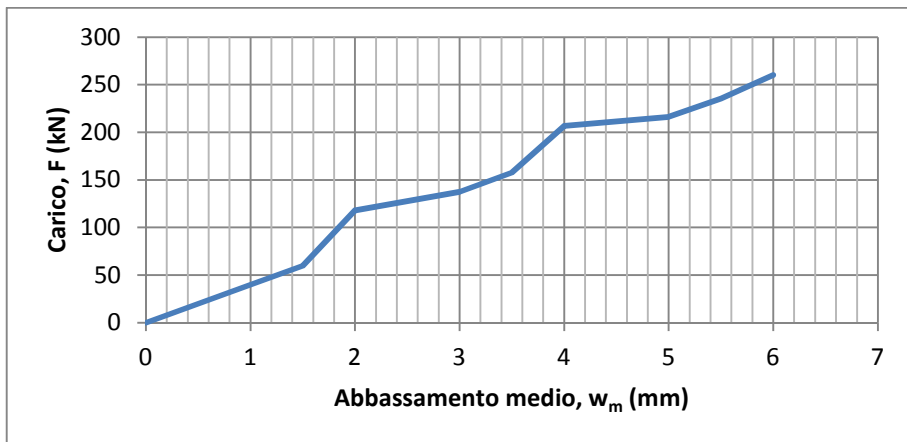


Figura 4.33: Diagramma carico-abbassamento trave A.03

Nella figura 4.34 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E1 ed E2, in cui si ha $\varepsilon_{m(1-2)} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$.

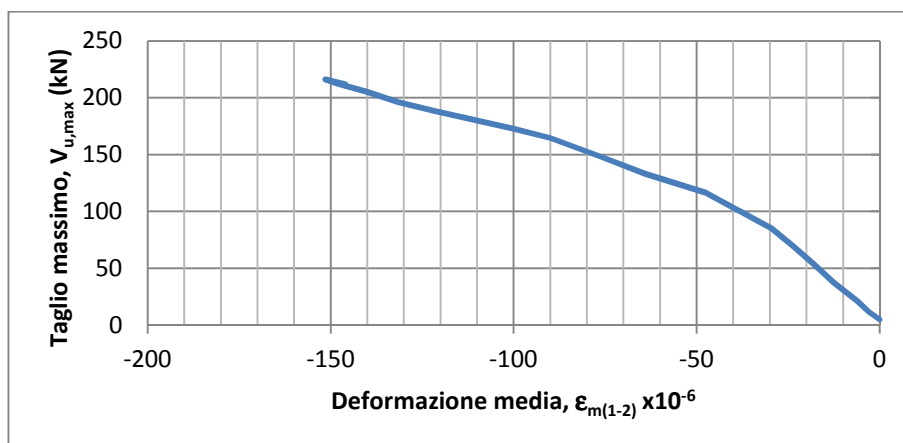


Figura 4.34: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, trave A.03

Dal diagramma si evince che l'andamento della deformazione media nel diagonale compresso è pressoché lineare fino al valore di rottura.

Nella figura 4.35 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia A.

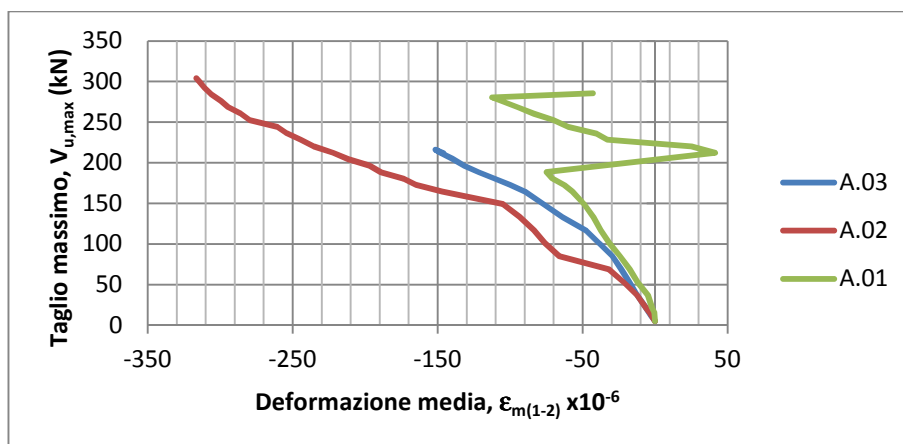


Figura 4.35: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, travi A

Si può notare un comportamento più rigido per la trave A.01 la cui asta è costituita da acciaio ad aderenza migliorata, mentre per le altre due travi non si sono manifestati probabili fenomeni di instabilità.

Nella figura 4.36 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E3 ed E4, posti sulla prima asta diagonale tesa del traliccio.

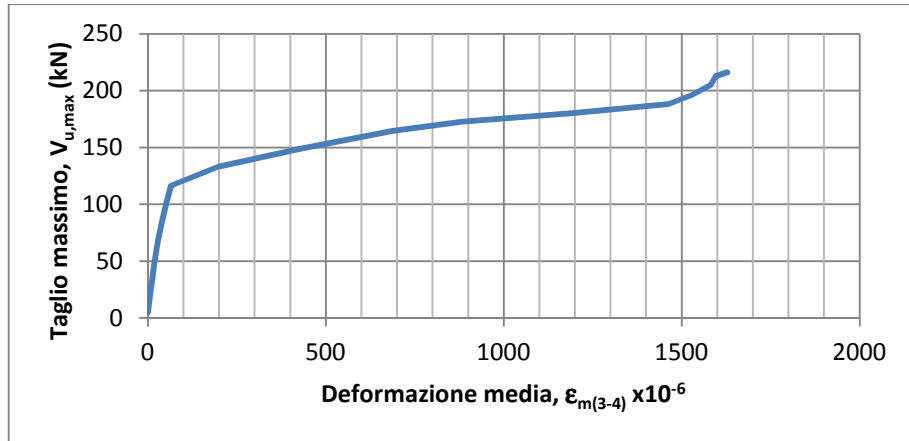


Figura 4.36: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, trave A.03

La deformazione di snervamento ricavata a partire dalle prove di laboratorio è: $\epsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 298,5/210000 = 1,42\%$, in cui $f_{ym} = (303,1+297,4+295,0)/3 = 298,5 \text{ N/mm}^2$. Dal grafico si evince che questo valore è stato superato di poco prima del raggiungimento del carico di rottura, avvenuto per un valore della deformazione pari a: $\epsilon_{yu} = 1,63\%$.

Nella figura 4.37 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi taglio-deformazione media estensimetri E3 ed E4 ricavati per le tre travi della tipologia A.

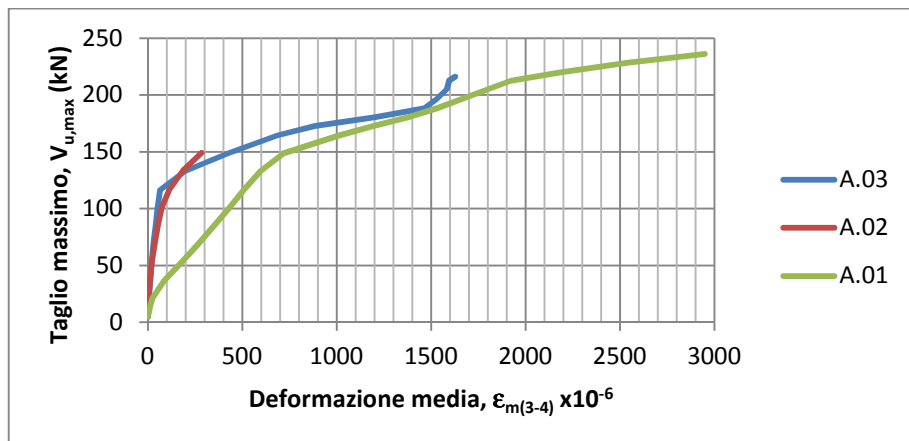


Figura 4.37: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, travi A

La prima asta di parete tesa della trave A.01, a differenza del caso precedente, ha un comportamento meno rigido delle rispettive aste delle travi A.02 ed A.03. Per le tre tipologie le aste risultano snervate in corrispondenza del carico

di rottura, fatto questo che per la trave A.02 è solo un'ipotesi visto che gli estensimetri sono andati fuori uso ben prima del raggiungimento della rottura. Nella figura 4.38 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E5 ed E6 applicati sulla terza asta di parete del traliccio metallico. In questo caso gli estensimetri registrano una deformazione di trazione fino al valore del taglio di circa 90 kN. La fase di compressione dura fino ad una deformazione di $-0,069\%$. A questo punto le deformazioni si invertono nuovamente e mantengono il loro verso fino a rottura, dove si registra una deformazione di trazione massima pari a $0,035\%$. Questo comportamento è dovuto probabilmente al manifestarsi ed all'evolversi delle fessure nella zona di applicazione dell'estensimetro.

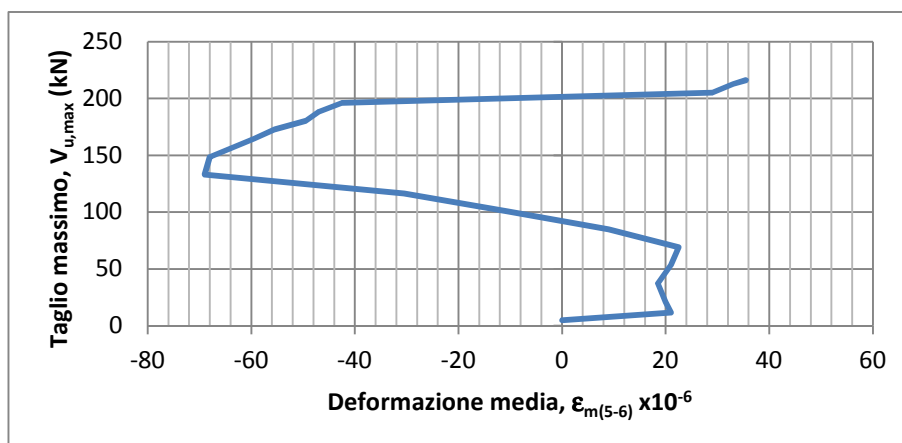


Figura 4.38: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, trave A.03

Nella figura 4.39 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia A. Solo nel caso della trave A.02 non si sono registrati inversioni di segno nella lettura dei valori di deformazione degli estensimetri. Questo fatto esclude che il fenomeno dipenda dalla natura dell'acciaio impiegato e si può manifestare sia in presenza di acciaio ad adherenza migliorata, come nel caso della trave A.01, sia in presenza di acciaio liscio da carpenteria, come nel caso della trave A.02.

Nella figura 4.40 è diagrammata la deformazione dell'estensimetro E7, posto vicino all'appoggio sul corrente inferiore teso, in funzione del taglio massimo agente. La deformazione media a snervamento per barre $\phi 32$ lisce risulta uguale a: $\epsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 355/210000 = 1,69\%$, in cui si è assunto $f_{ym} = 355 \text{ N/mm}^2$, non essendo disponibili prove di laboratorio.

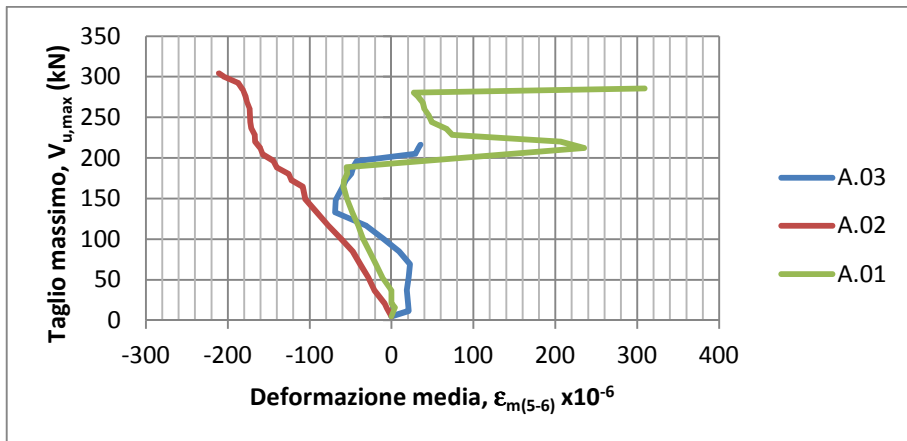


Figura 4.39: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, travi A

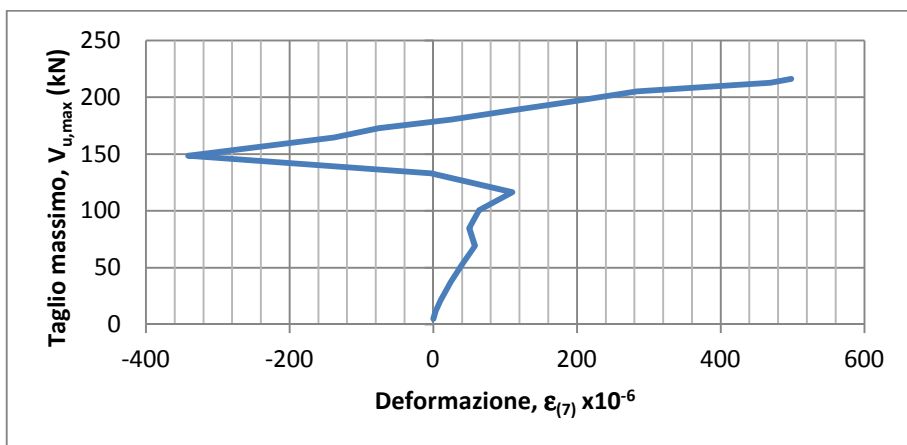


Figura 4.40: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E7, trave A.03

Le considerazioni che si possono fare sono analoghe a quelle fatte per le travi A.01 ed A.02.

Nella figura 4.41 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia A. Dall'esame del grafico si desume un comportamento fortemente irregolare. Le improvvise inversioni di segno della deformazione sono da imputarsi ad uno scarico tensionale a seguito del manifestarsi della fessurazione.

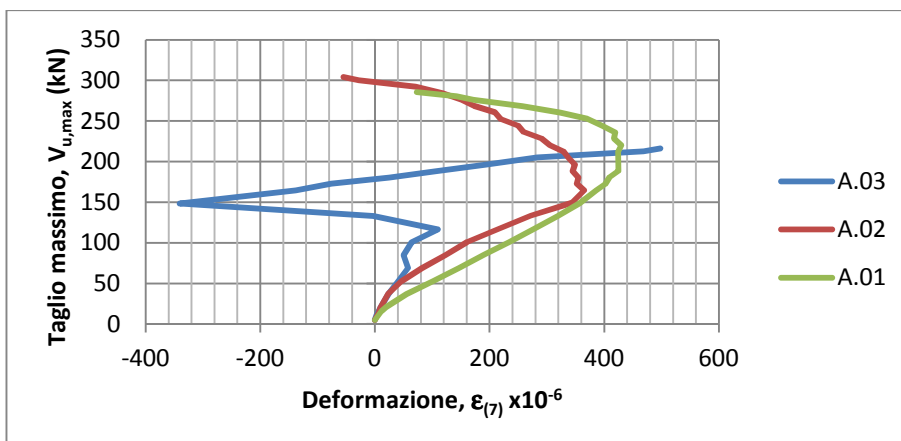


Figura 4.41: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E7, travi A

Nella figura 4.42 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E8, installato sul corrente teso di acciaio in corrispondenza della cella di carico.

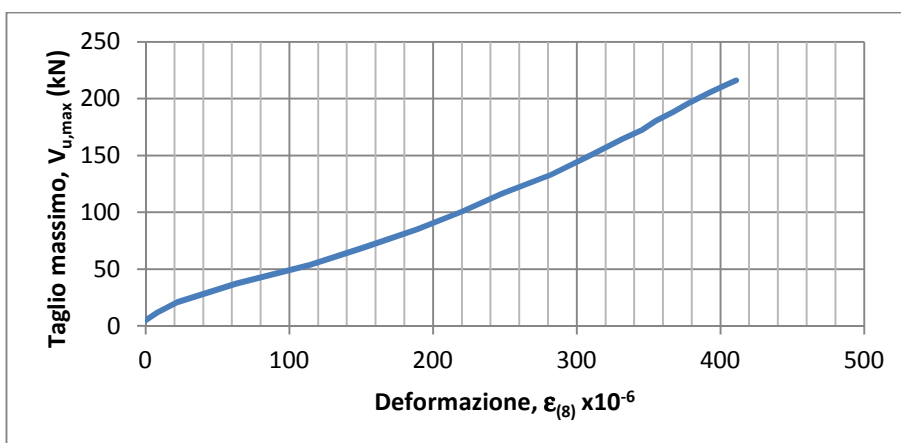


Figura 4.42: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E8, trave A.03

Dal grafico si evince un comportamento elastico lineare del materiale fino al raggiungimento del carico di rottura, infatti, la deformazione massima registrata risulta inferiore al valore della deformazione di snervamento ϵ_{ym} .

Nella figura 4.43 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia A. In nessun caso l'acciaio ha raggiunto il suo valore di snervamento, mantenendo un comportamento elastico lineare fino a rottura. Si nota una maggiore rigidezza della barra in esame nel caso della trave A.03, costituita da acciaio S355.

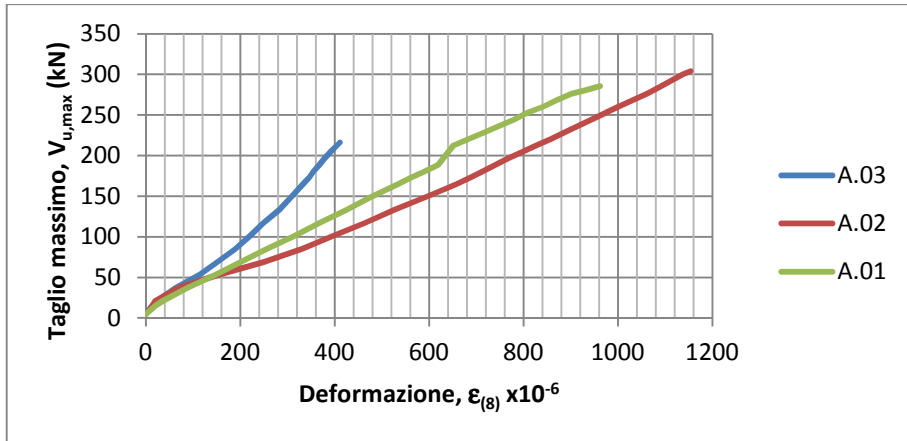


Figura 4.43: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E8, travi A

Nella figura 4.44 si riporta il diagramma taglio - deformazione relativo all'estensimetro E9, applicato all'estradosso della trave ad una distanza di 16cm dal punto di carico. Anche qui le considerazioni che si possono fare sono analoghe a quelle fatte per le travi A.01 ed A.02.

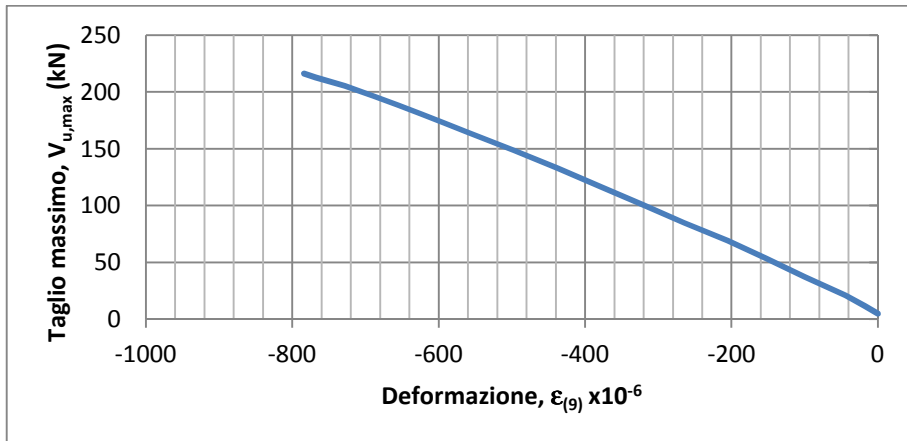


Figura 4.44: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E9, trave A.03

Nella figura 4.45, infine, si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia A. Si può notare un andamento elastico lineare per tutte e tre le travi con una minore rigidezza nel caso della trave A.03, costituita da un traliccio composto da solo acciaio da carpenteria S355.

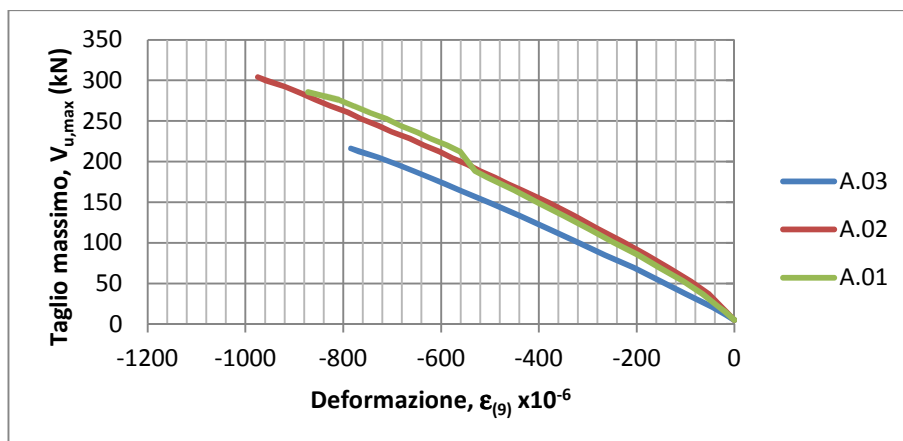


Figura 4.45: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E9, travi A

La **prima prova** della tipologia B è stata eseguita sulla **trave B.01**. Per questa tipologia di travi si è previsto un estensimetro in più (E16) rispetto alle altre, collocato sul fondello in acciaio all'intradosso della trave sulla stessa sezione in cui è applicato l'estensimetro E9. Nella figura 4.46 si riporta la storia di carico. Il massimo valore rilevato del carico di rottura è $F_u = 493,69$ kN, cui corrisponde uno sforzo di taglio massimo pari a $V_{u,max} = 405,92$ kN; in cui $V_{u,max} = \frac{F}{l}(l - a) + \frac{g \cdot l}{2}$.

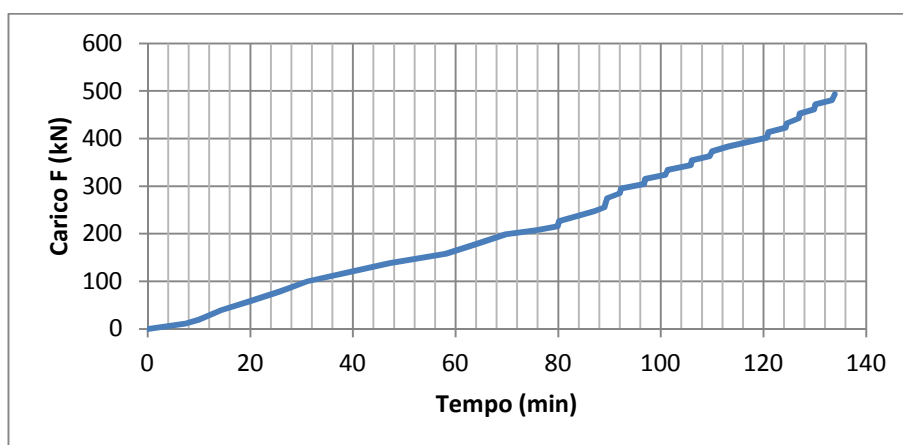


Figura 4.46: Diagramma carico-tempo trave B.01

Nella figura 4.47 si riporta il diagramma carico - abbassamento della sezione di carico. Tale abbassamento è stato calcolato come media aritmetica dei due valori misurati dai trasduttori *LVDT-1* ed *LVDT-2*. L'abbassamento medio a

rottura misurato è $w_{\max} = 10,0\text{mm}$. La trave ha un comportamento di tipo fragile tipico per la modalità di rottura a taglio.

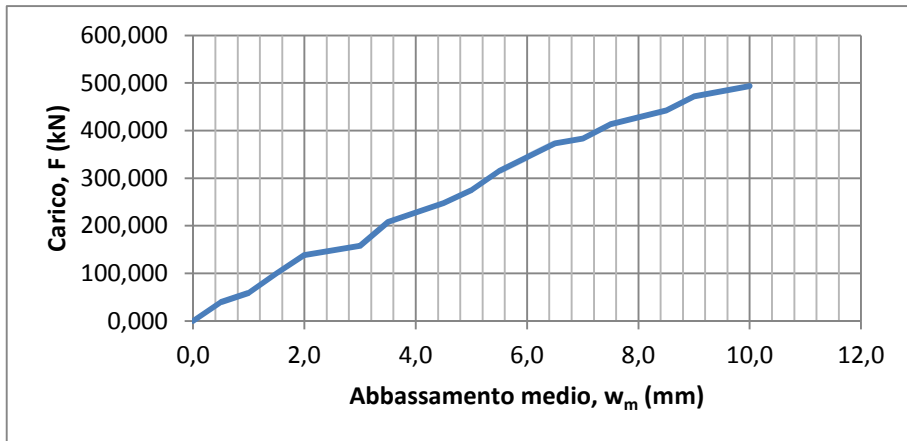


Figura 4.47: Diagramma carico-abbassamento trave B.01

Nella figura 4.48 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E1 ed E2, in cui si ha $\epsilon_{m(1-2)} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$.

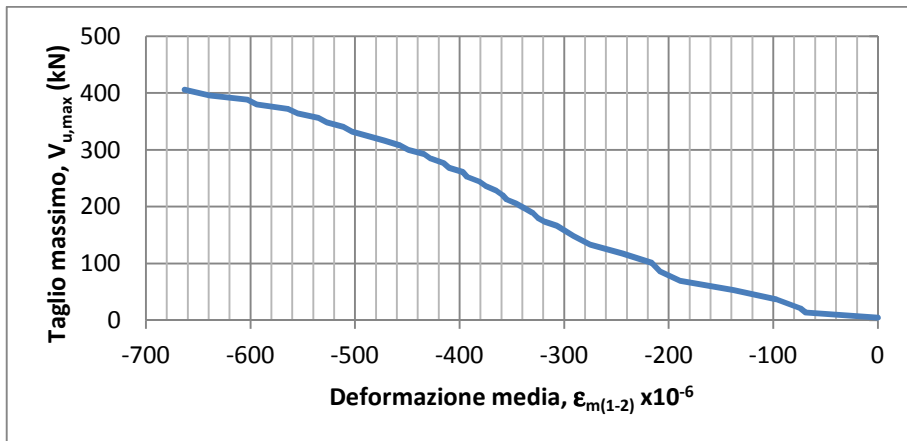


Figura 4.48: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, trave B.01

Si osserva che l'asta di parete in esame rimane in campo elastico, poiché la sua deformazione massima ($\epsilon_{\max} = 0,663\text{‰}$) non supera il valore di snervamento $\epsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 387/210000 = 1,84\text{‰}$, in cui $f_{ym} = (393,6+383,3+384,1)/3 = 387 \text{ N/mm}^2$.

Nella figura 4.49 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E3 ed E4, posti sulla prima asta diagonale tesa del traliccio.

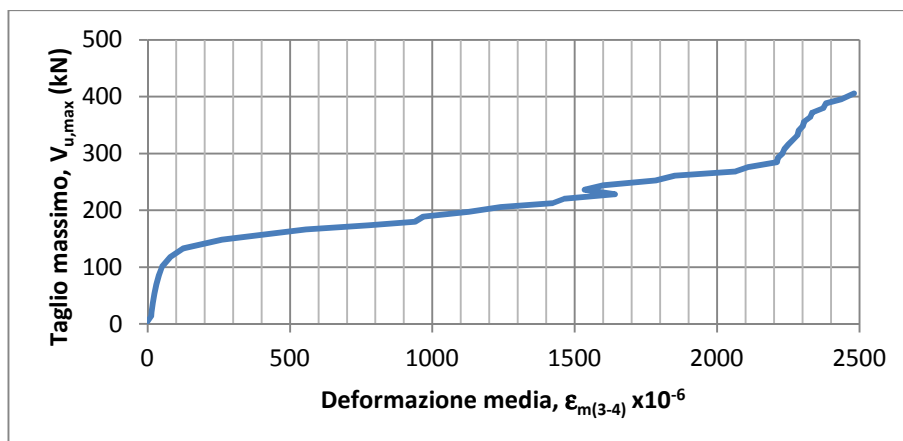


Figura 4.49: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, trave B.01

Il valore massimo della deformazione, $\epsilon_{\max} = 2,482\%$, è superiore alla deformazione di snervamento, $\epsilon_{\text{ym}} = 1,84\%$. Si può osservare un cambiamento nella pendenza della curva per un valore di deformazione intorno allo 0,10 ‰. Tale fatto è probabilmente da imputare ad una perdita dell'effetto di aderenza tra acciaio e calcestruzzo e/o dell'ingranamento degli inerti a causa dell'aumento dell'ampiezza delle fessure con conseguente aumento dello scorrimento dell'asta in esame.

Nella figura 4.50 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E5 ed E6, applicati sulla terza asta di parete del traliccio metallico. Gli estensimetri registrano una deformazione di compressione di $-0,187\%$ corrispondente al valore del taglio di circa 276 kN.

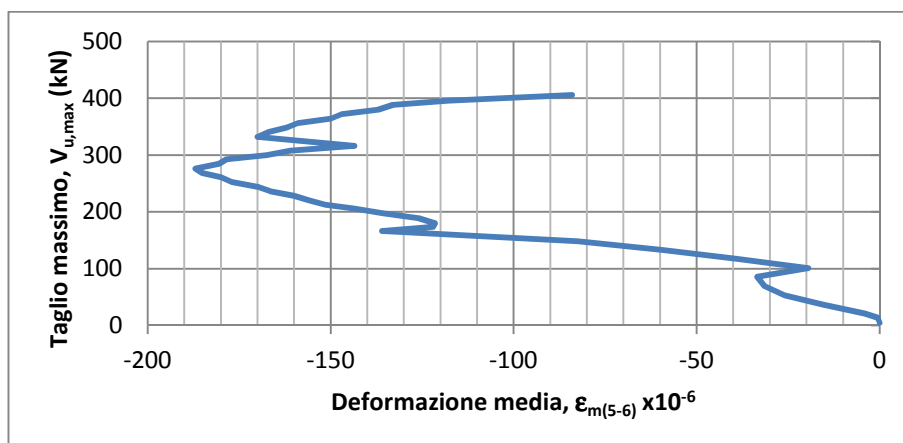


Figura 4.50: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, trave B.01

A questo punto le deformazioni si invertono e mantengono il loro verso fino a rottura, dove si registra una deformazione di compressione pari a $-0,084\%$. Questo comportamento è dovuto probabilmente al manifestarsi ed all'evolversi delle fessure nella zona di applicazione dell'estensimetro.

Nella figura 4.51 è diagrammata la deformazione dell'estensimetro E7, posto vicino all'appoggio sul corrente inferiore teso, in funzione del taglio massimo agente. La deformazione di snervamento ricavata a partire dalle prove di laboratorio è: $\epsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 458,1/210000 = 2,18\%$, in cui $f_{ym} = (458,0+460,0+456,3)/3 = 458,1 \text{ N/mm}^2$. La deformazione massima raggiunta è di $1,392\%$, inferiore ad ϵ_{ym} .

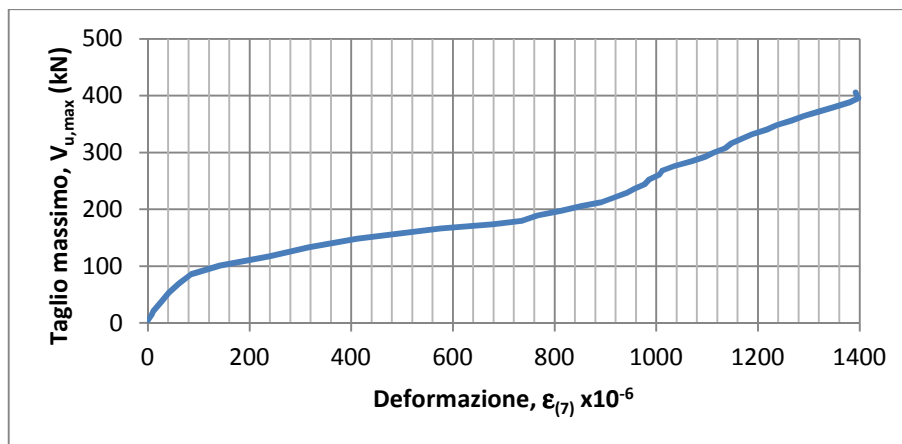


Figura 4.51: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E7, trave B.01

Nella figura 4.52 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E8, installato sul corrente teso di acciaio in corrispondenza della cella di carico. Il materiale ha avuto un comportamento elastico lineare fino a rottura, raggiungendo un valore massimo di deformazione pari a $1,234\%$.

Nella figura 4.53 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E16, installato sul piatto in acciaio all'intradosso della trave in corrispondenza della cella di carico. Anche in questo caso la massima deformazione registrata, pari a $1,699\%$, è inferiore al valore di snervamento, pari a: $f_{ym} = (491,4+483,0+484,5)/3 = 486,3 \text{ N/mm}^2$.

Nella figura 4.54, infine, si riporta il diagramma taglio - deformazione relativo all'estensimetro E9, applicato all'estradosso della trave sul calcestruzzo ad una distanza di 16cm dal punto di carico.

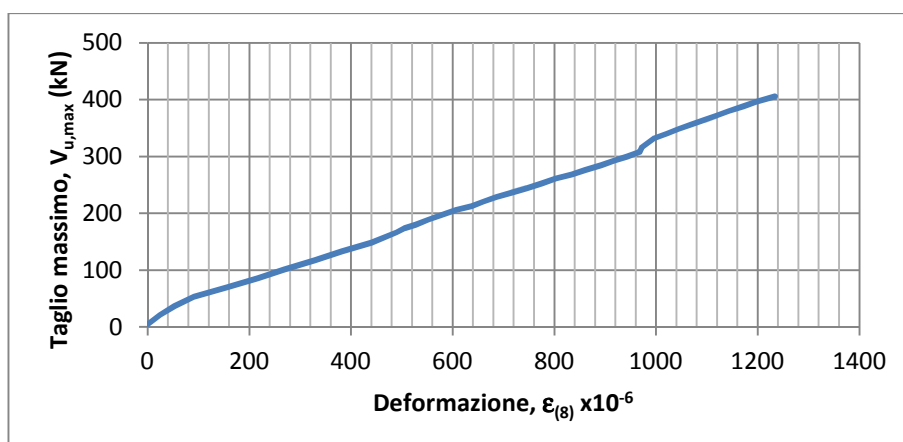


Figura 4.52: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E8, trave B.01

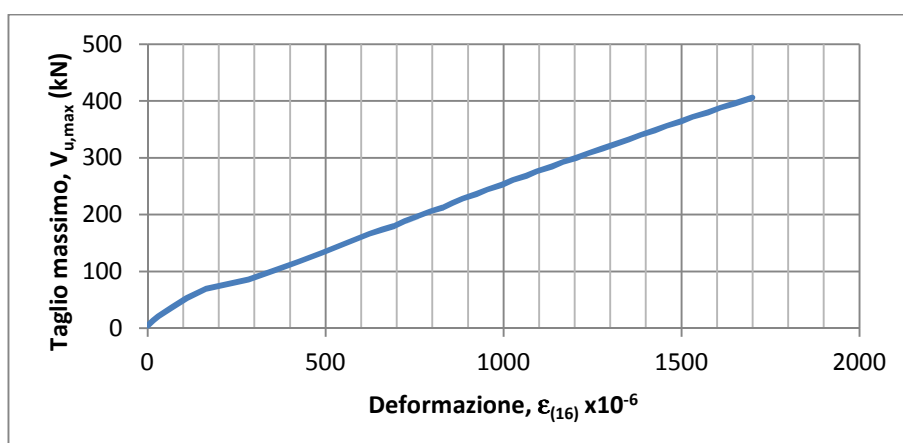


Figura 4.53: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E16, trave B.01

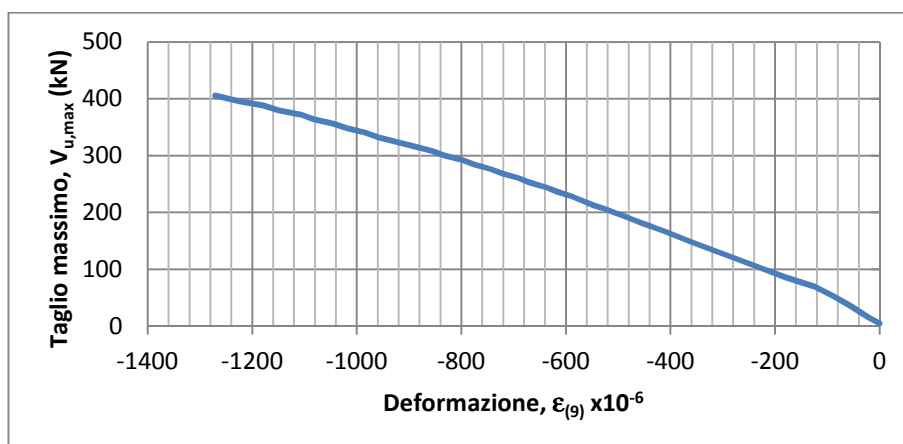


Figura 4.54: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E9, trave B.01

Dal grafico si può notare come il calcestruzzo abbia un comportamento elastico lineare fino a rottura. Tale fatto è coerente con i legami costitutivi del calcestruzzo riportati nel DM 14/01/2008 che prevedono i seguenti limiti elastici: $\epsilon_{c2} = 2\text{‰}$ (parabola - rettangolo), $\epsilon_{c3} = 1,75\text{‰}$ (triangolo - rettangolo); entrambi ben al di sopra della deformazione massima di compressione registrata dall'estensimetro E9, $\epsilon_{9,max} = 1,271\text{‰}$.

La **seconda prova** della tipologia B è relativa alla **trave B.02**. Nella figura 4.55 si riporta la storia di carico. Il massimo valore rilevato del carico di rottura è $F_u = 491,48 \text{ kN}$, cui corrisponde uno sforzo di taglio massimo pari a $V_{u,max} = 404,13 \text{ kN}$; in cui $V_{u,max} = \frac{F}{l}(l - a) + \frac{g \cdot l}{2}$. I valori di rottura sono quasi identici a quelli registrati per la trave B.01, evidenziando il fatto che il tipo di acciaio che costituisce la greca è praticamente ininfluenza ai fini della valutazione della resistenza ultima della trave.

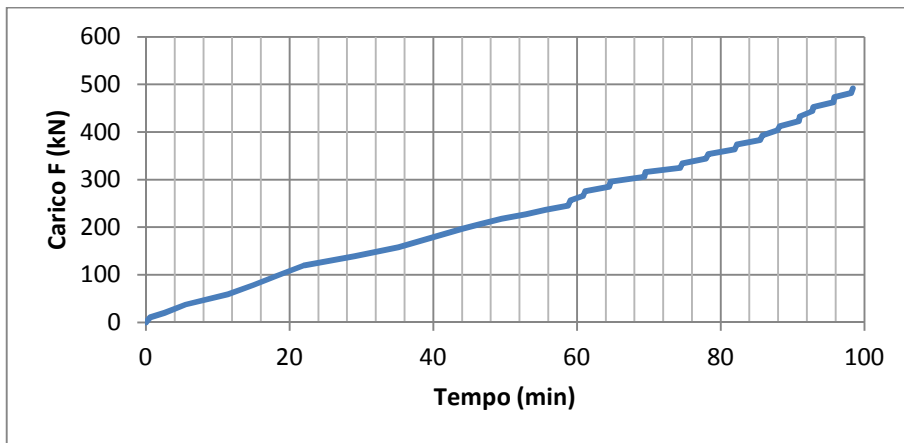


Figura 4.55: Diagramma carico-tempo trave B.02

Nella figura 4.56 si riporta il diagramma carico - abbassamento della sezione di carico. Tale abbassamento è stato calcolato come media aritmetica dei due valori misurati dai trasduttori *LVDT-1* ed *LVDT-2*. L'abbassamento medio a rottura misurato è $w_{max} = 10,0\text{mm}$. La trave ha un comportamento di tipo fragile tipico per la modalità di rottura a taglio.

Nella figura 4.57 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E1 ed E2, in cui si ha $\epsilon_{m(1-2)} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$. Si osserva che l'asta di parete in esame non manifesta fenomeni di instabilità rimanendo in campo elastico. La sua deformazione massima ($\epsilon_{max} = 0,438\text{‰}$) non supera il valore di

snervamento $\epsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 298,5/210000 = 1,42\%$, in cui $f_{ym} = (303,1+297,4+295,0)/3 = 298,5 \text{ N/mm}^2$.

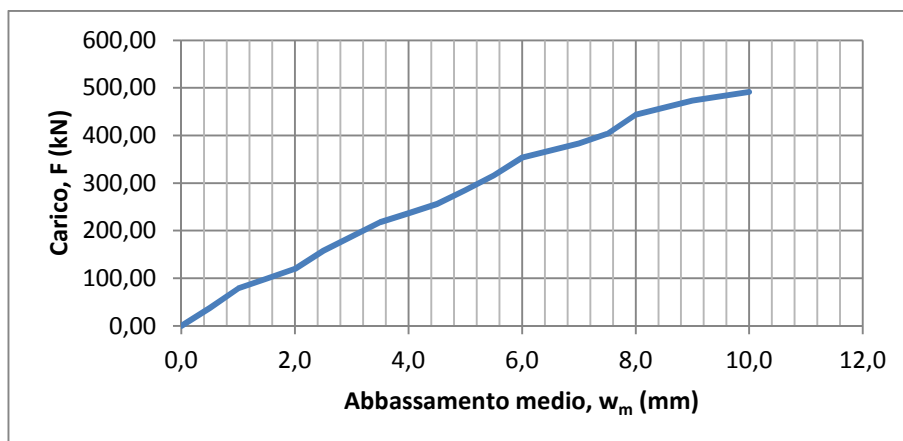


Figura 4.56: Diagramma carico-abbassamento trave B.02

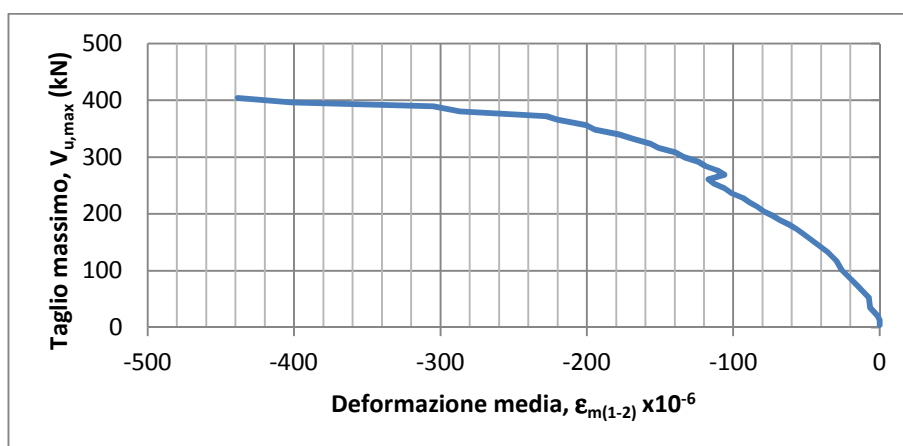


Figura 4.57: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, trave B.02

Nella figura 4.58 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E3 ed E4, posti sulla prima asta diagonale tesa del traliccio. Il valore massimo della deformazione, $\epsilon_{max} = 3,636\%$, registrato per un valore del taglio pari a 276,50kN, è superiore alla deformazione di snervamento, $\epsilon_{ym} = 1,42\%$. Si può osservare un cambiamento nella pendenza della curva per un valore di deformazione intorno allo 0,075%.

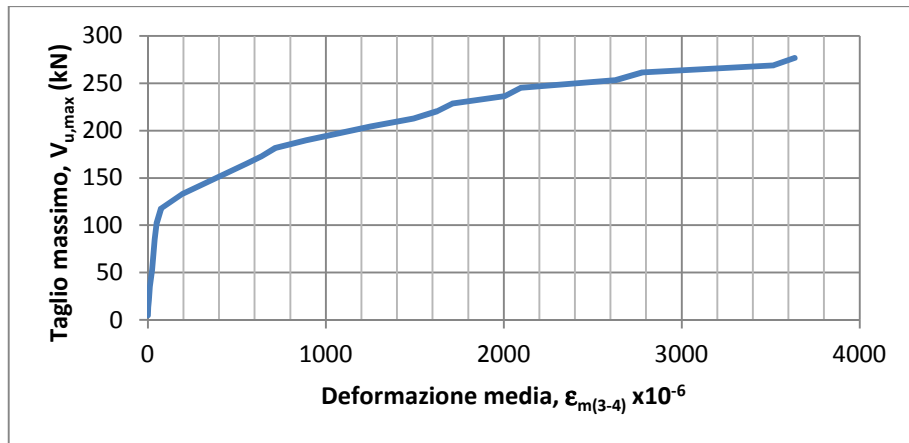


Figura 4.58: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, trave B.02

Nella figura 4.59 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E5 ed E6, applicati sulla terza asta di parete del traliccio metallico. In questo caso gli estensimetri registrano una deformazione di compressione massima di 0,245‰ per un valore del taglio, pari a 356,41 kN, inferiore al taglio di rottura.

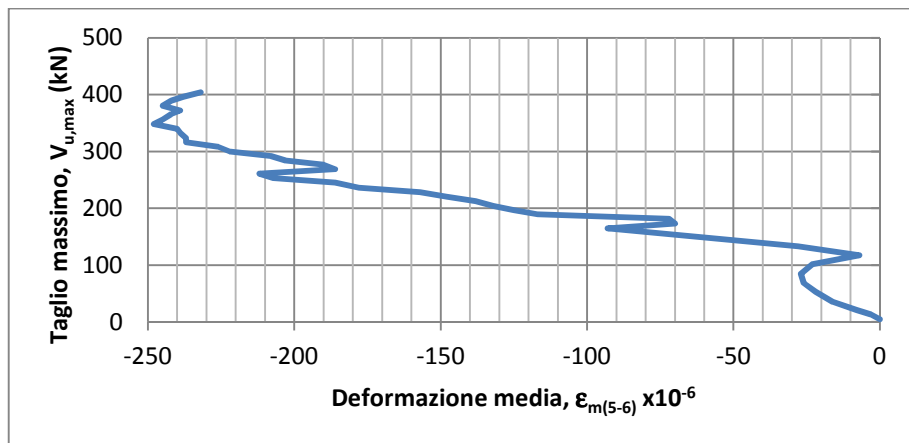


Figura 4.59: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, trave B.02

Nella figura 4.60 è diagrammata la deformazione dell'estensimetro E7, posto vicino all'appoggio sul corrente inferiore teso, in funzione del taglio massimo agente. La deformazione massima raggiunta è di 1,687‰, inferiore al valore di snervamento dell'acciaio, pari a 2,18‰. L'acciaio è dunque rimasto in campo elastico.

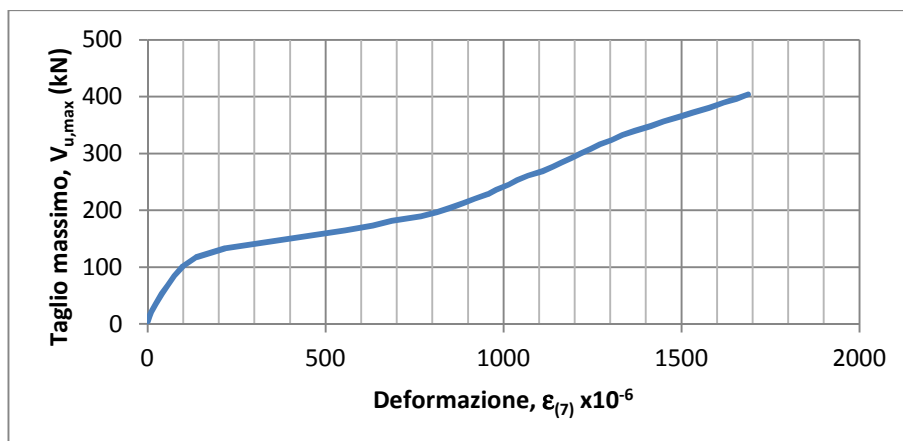


Figura 4.60: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E7, trave B.02

Nella figura 4.61 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E8, installato sul corrente teso di acciaio in corrispondenza della cella di carico. Anche in questo caso il materiale ha avuto un comportamento elastico lineare fino a rottura, raggiungendo un valore massimo di deformazione pari a 1,560‰.

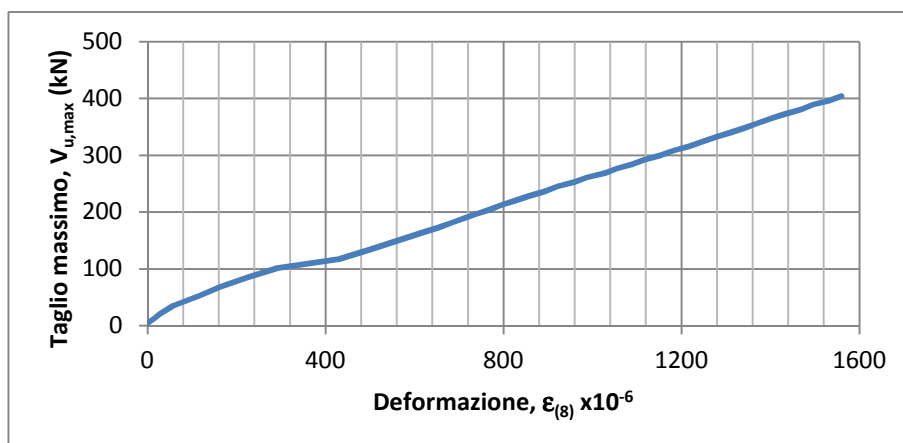


Figura 4.61: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E8, trave B.02

Nella figura 4.62 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E16, installato sul piatto in acciaio all'intradosso della trave in corrispondenza della cella di carico. La massima deformazione registrata, pari a 1,776‰, è inferiore al valore di snervamento pari a 2,32‰.

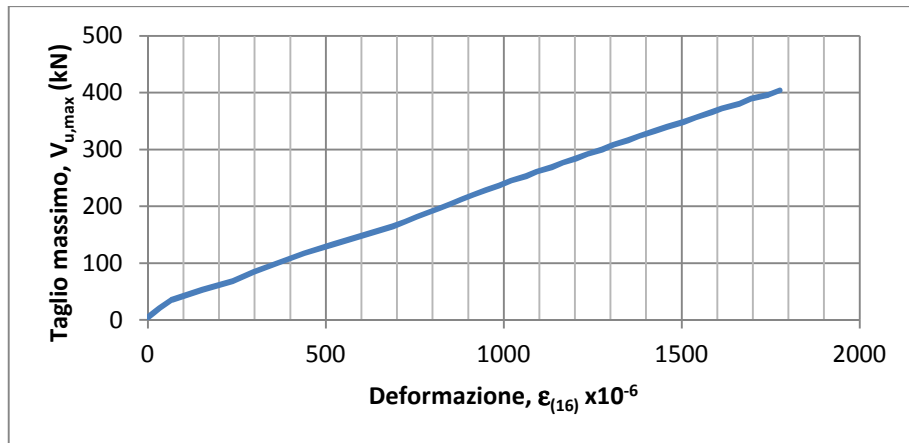


Figura 4.62: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E16, trave B.02

Nella figura 4.63, infine, si riporta il diagramma taglio - deformazione relativo all'estensimetro E9. Il comportamento del calcestruzzo è elastico fino a rottura, essendo $\epsilon_{9,max} = 0,908\%$.

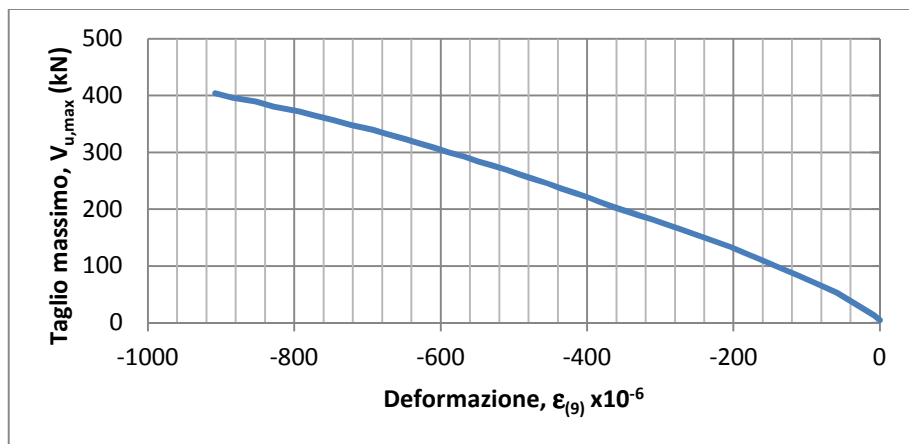


Figura 4.63: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E9, trave B.02

La **terza prova** della tipologia B è stata eseguita sulla **trave B.03**. Nella figura 4.64 si riporta la storia di carico. Il massimo valore rilevato del carico di rottura è $F_u = 432,26$ kN, cui corrisponde uno sforzo di taglio massimo pari a $V_{u,max} = 356,01$ kN; in cui $V_{u,max} = \frac{F}{l}(l - a) + \frac{g \cdot l}{2}$. I valori di rottura sono inferiori a quelli registrati per le travi B.01 e B.02, evidenziando il fatto che il tipo di acciaio che costituisce i correnti influenza la resistenza ultima della trave.

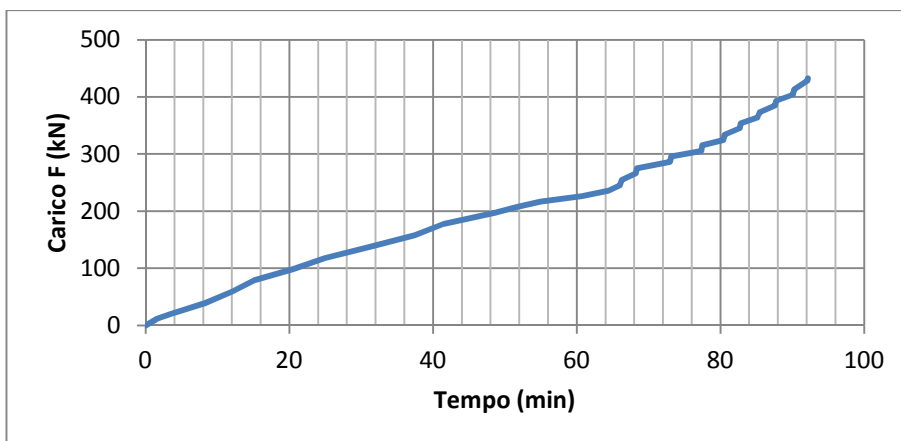


Figura 4.64: Diagramma carico-tempo trave B.03

Nella figura 4.65 si riporta il diagramma carico - abbassamento della sezione di carico. Tale abbassamento è stato calcolato come media aritmetica dei due valori misurati dai trasduttori *LVDT-1* ed *LVDT-2*. L'abbassamento medio a rottura misurato è $w_{\max} = 9,0\text{mm}$. La trave ha un comportamento di tipo fragile tipico per la modalità di rottura a taglio. La rigidezza della trave B.03 è praticamente uguale a quella delle altre due travi della tipologia B.

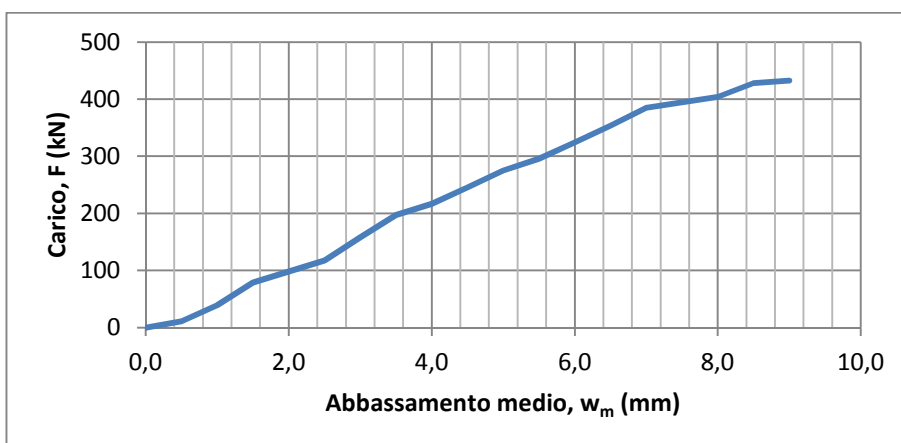


Figura 4.65: Diagramma carico-abbassamento trave B.03

Nella figura 4.66 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E1 ed E2, in cui si ha $\varepsilon_{m(1-2)} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$. La deformazione media a snervamento per barre $\phi 10$ lisce risulta uguale a: $\varepsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 298,5/210000 = 1,42\%$, in cui $f_{ym} = (303,1+297,4+295,0)/3 = 298,5 \text{ N/mm}^2$.

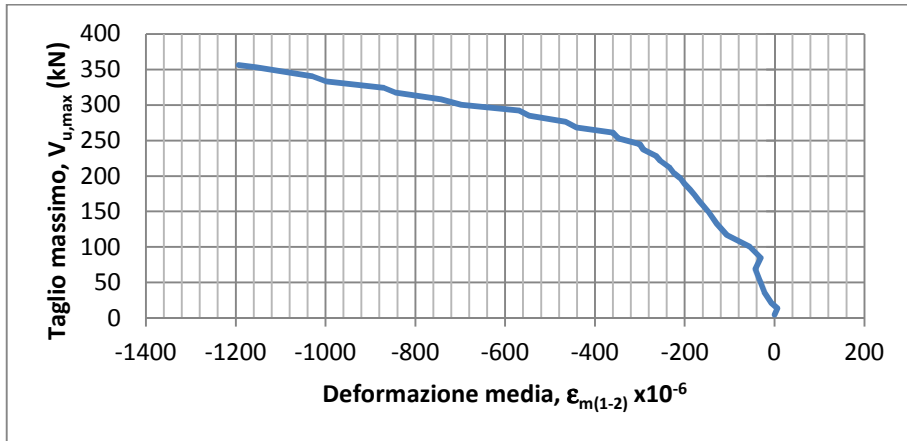


Figura 4.66: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, trave B.03

Si osserva che l'asta di parete in esame non manifesta fenomeni di instabilità rimanendo in campo elastico poiché la sua deformazione massima $\epsilon_{\max} = 1,193\%$ non supera il valore di snervamento ϵ_{ym} .

Nella figura 4.67 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia B.

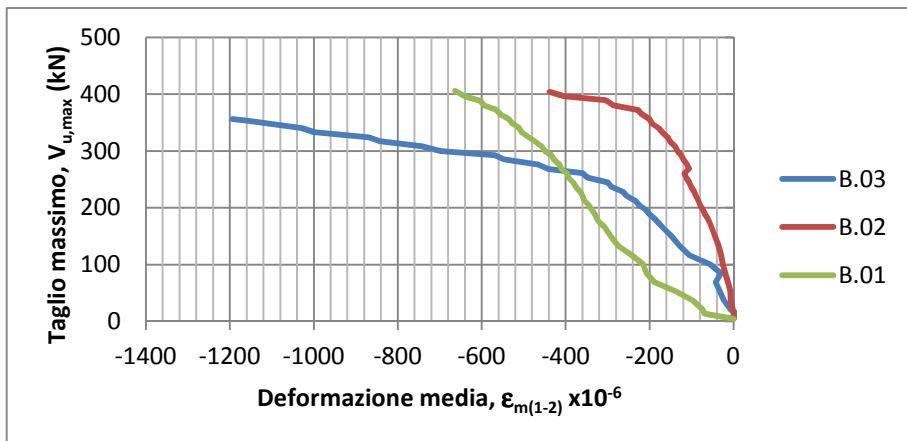


Figura 4.67: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, travi B

Si può notare un comportamento più rigido per la trave B.02. Il comportamento più duttile è quello della trave B.03. Non si sono manifestati fenomeni di instabilità.

Nella figura 4.68 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E3 ed E4, posti sulla prima asta diagonale tesa del traliccio.

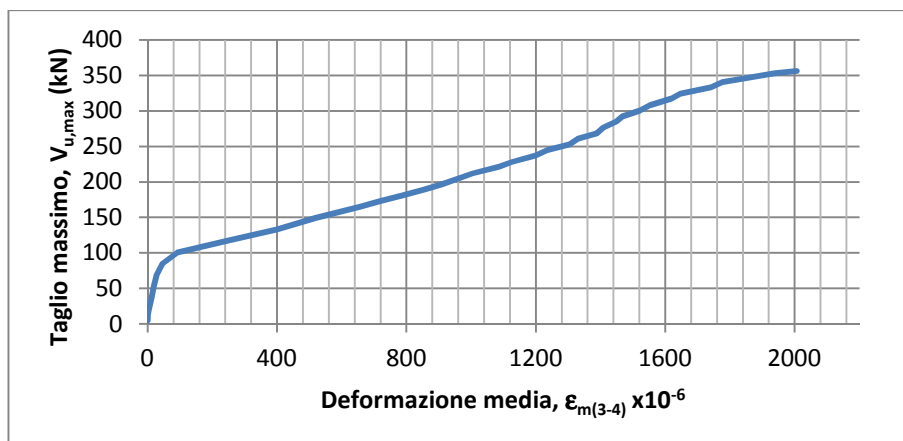


Figura 4.68: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, trave B.03

Il valore massimo della deformazione, $\epsilon_{\max} = 2,007\%$, è superiore alla deformazione di snervamento, $\epsilon_{ym} = 1,42\%$. Si può osservare un cambiamento nella pendenza della curva per un valore di deformazione intorno allo $0,08\%$. Nella figura 4.69 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia B.

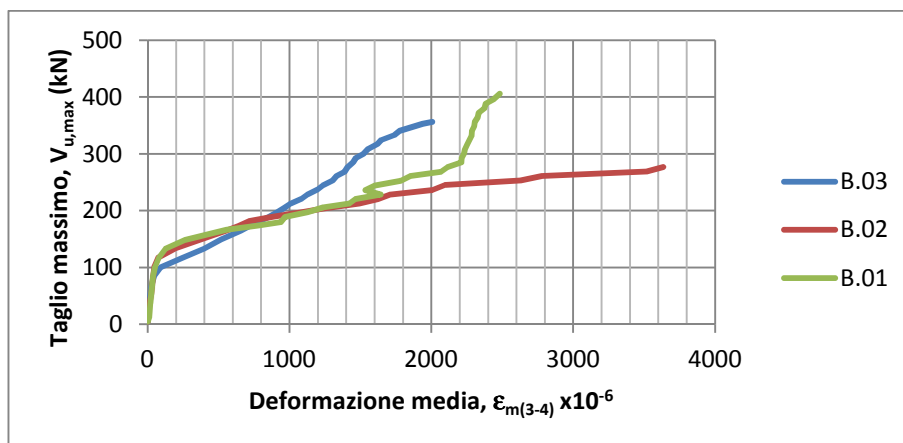


Figura 4.69: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, travi B

Si può notare come nel tratto iniziale prefessurato le tre travi si comportino in maniera analoga. In tutti i casi le aste risultano snervate in corrispondenza del carico di rottura. Il comportamento dell'asta, nei tre casi, è tipo elastoplastico con incrudimento.

Nella figura 4.70 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E5 ed E6. In questo caso gli estensimetri registrano una deformazione di compressione massima di 0,687‰.

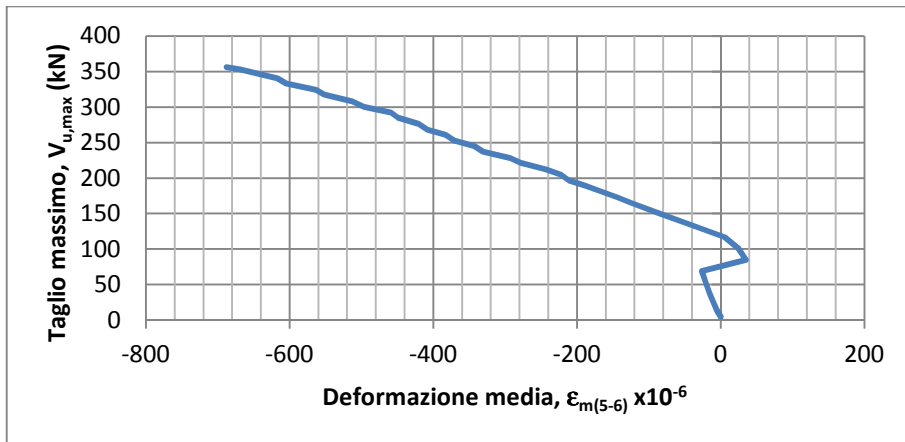


Figura 4.70: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, trave B.03

Nella figura 4.71 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia B. Si sono registrati dei lievi inversioni di segno nelle deformazioni nelle tipologie B.01 e B.02. Questo fatto è da imputare ai fenomeni legati alla fessurazione che avvengono nell'intorno di applicazione degli estensimetri in esame. Si può notare come nel tratto iniziale di prefessurazione si siano registrate deformazioni minime nelle tre travi.

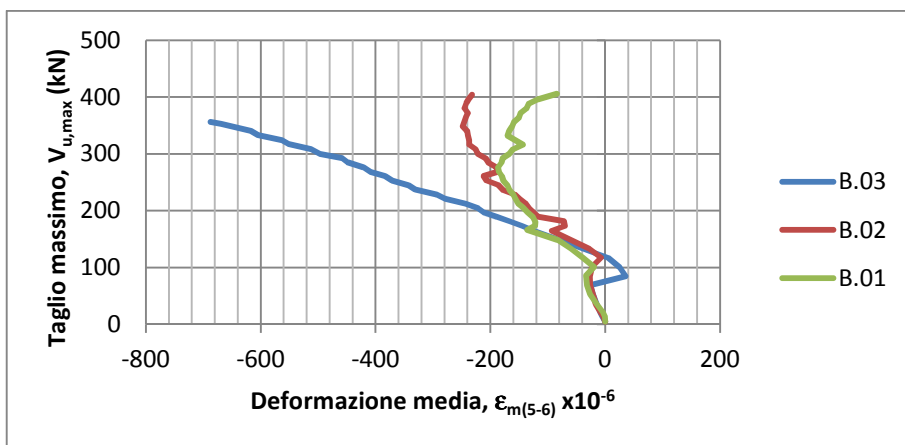


Figura 4.71: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, travi B

Nella figura 4.72 è diagrammata la deformazione dell'estensimetro E7, posto vicino all'appoggio sul corrente inferiore teso, in funzione del taglio massimo

agente. La deformazione massima raggiunta è di 1,989‰, registrata per un valore del taglio pari a 324,22kN, superiore al limite elastico. Per barre lisce $\phi 20$ risulta: $\epsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 377,7/210000 = 1,80\text{‰}$, in cui $f_{ym} = (426,9+353,6+352,6)/3 = 377,7 \text{ N/mm}^2$.

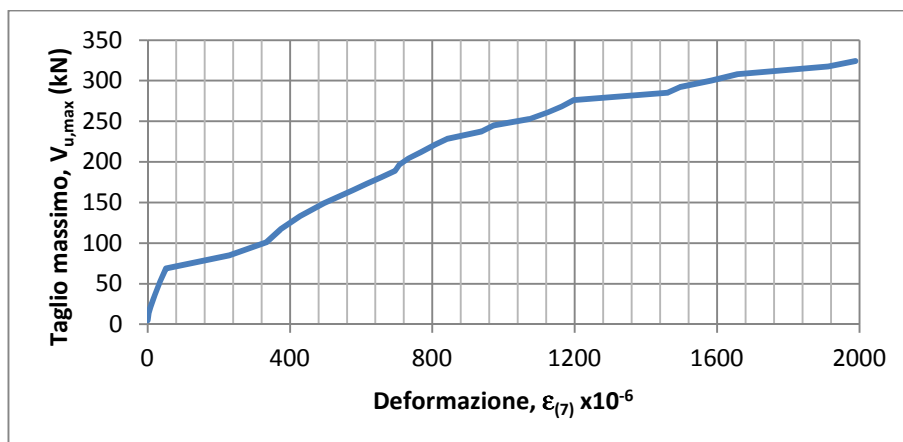


Figura 4.72: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E7, trave B.03

Nella figura 4.73 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia B.

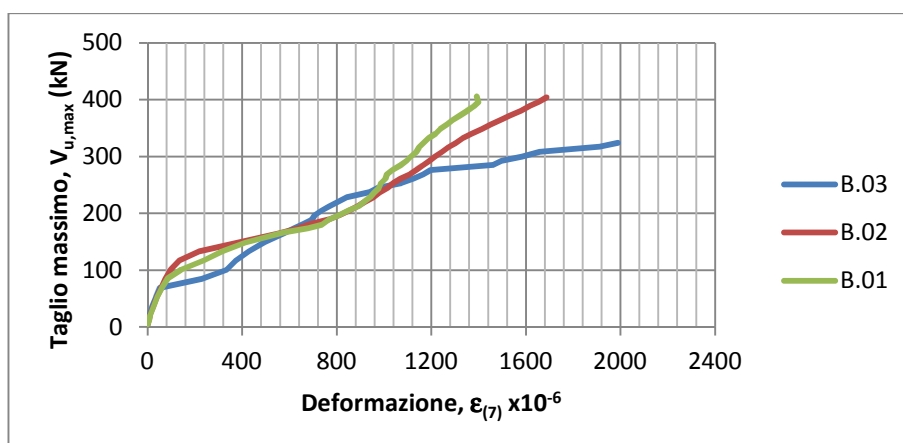


Figura 4.73: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E7, travi B

Dall'esame del grafico si desume un comportamento elastoplastico con incrudimento per le tre travi. Non si manifestano improvvisi cambi di segno nelle deformazioni per come avveniva, invece, nelle travi della tipologia A. Questo è dovuto all'effetto benefico di confinamento e stabilizzazione esercitato dal fondello in acciaio.

Nella figura 4.74 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E8, installato sul corrente teso di acciaio in corrispondenza della cella di carico. Il materiale ha avuto un comportamento elastico lineare fino a rottura, raggiungendo un valore massimo di deformazione pari a 0,775‰.

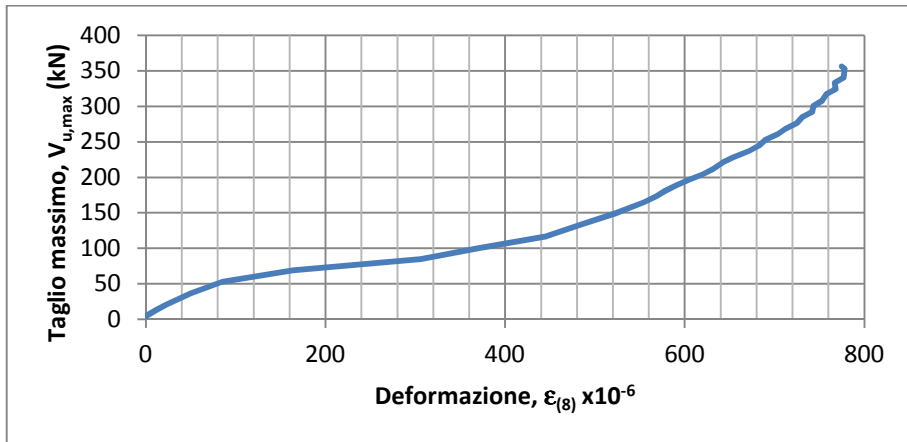


Figura 4.74: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E8, trave B.03

Nella figura 4.75 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia B. In nessun caso l'acciaio ha raggiunto il suo valore di snervamento, mantenendo un comportamento elastico fino a rottura. Si nota una maggiore rigidezza nel caso della trave B.03, costituita da acciaio S355.

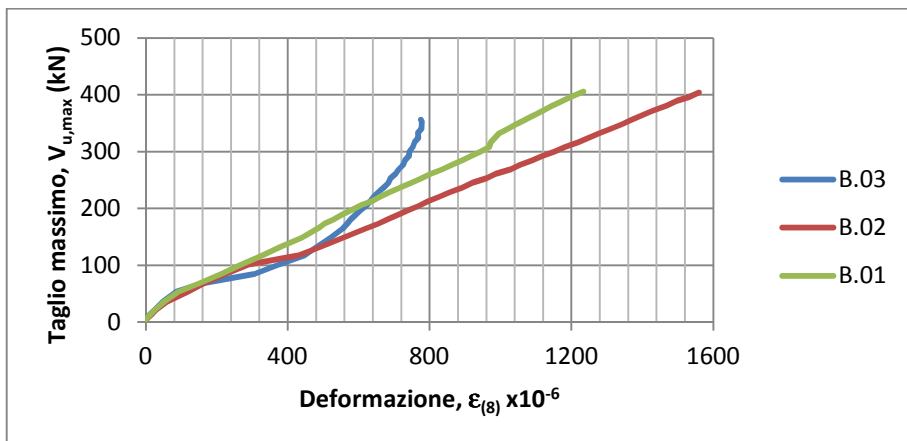


Figura 4.75: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E8, travi B

Nella figura 4.76 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E16. La massima deformazione registrata, pari a 1,317‰, è inferiore al valore di snervamento pari a 2,32‰.

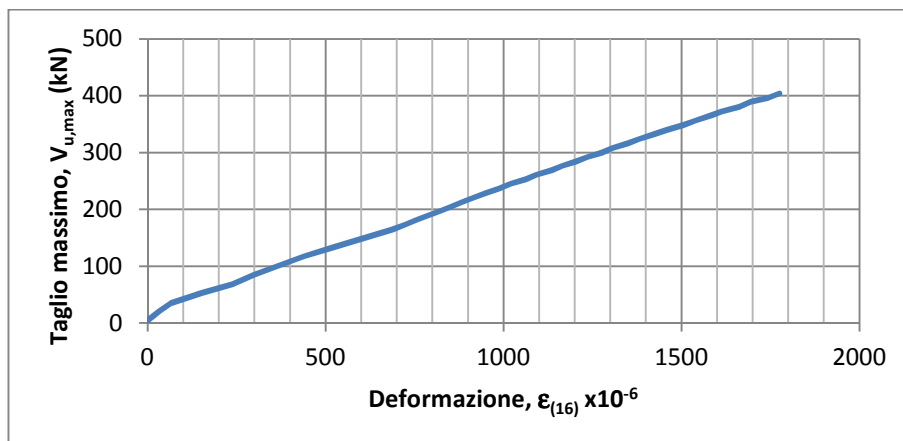


Figura 4.76: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E16, trave B.03

Nella figura 4.77 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia B.

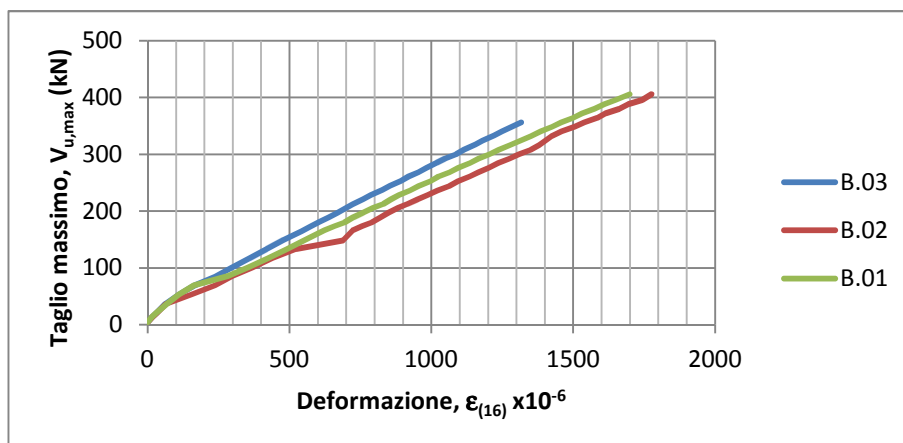


Figura 4.77: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E16, travi B

Si osserva un comportamento del fondello in acciaio del tipo elastico lineare. Nella figura 4.78 si riporta il diagramma taglio - deformazione relativo all'estensimetro E9. Il comportamento del calcestruzzo è elastico fino a rottura, essendo $\epsilon_{\theta,max} = 1,019\text{‰}$.

Nella figura 4.79, infine, si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia B. Si può notare un andamento elastico per tutte e tre le travi.

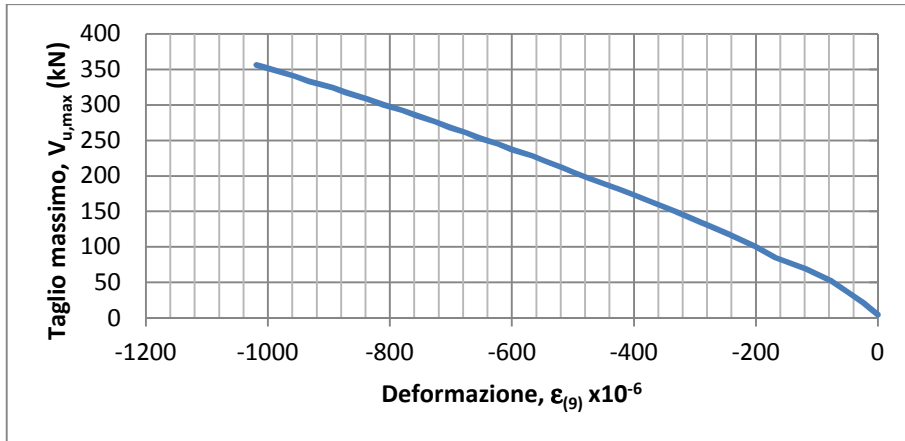


Figura 4.78: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E9, trave B.03

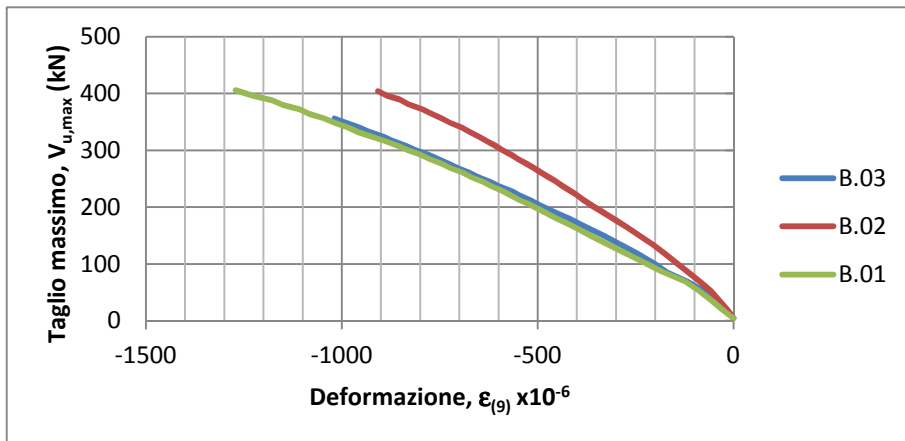


Figura 4.79: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E9, travi B

La **prima prova** della tipologia C è stata eseguita sulla **trave C.01**. Nella figura 4.80 si riporta la storia di carico. Il massimo valore rilevato del carico di rottura è $F_u = 516,99$ kN, cui corrisponde uno sforzo di taglio massimo pari a $V_{u,max} = 424,85$ kN; in cui $V_{u,max} = \frac{F}{l}(l - a) + \frac{g \cdot l}{2}$.

Nella figura 4.81 si riporta il diagramma carico - abbassamento della sezione di carico. Tale abbassamento è stato calcolato come media aritmetica dei due valori misurati dai trasduttori *LVDT-1* ed *LVDT-2*. L'abbassamento medio a rottura misurato è $w_{max} = 12,0$ mm. All'aumentare del carico, la trave subisce un abbassamento pressoché uniforme fino al raggiungimento della crisi. Questo comportamento, di tipo fragile, è tipico per la modalità di rottura a taglio.

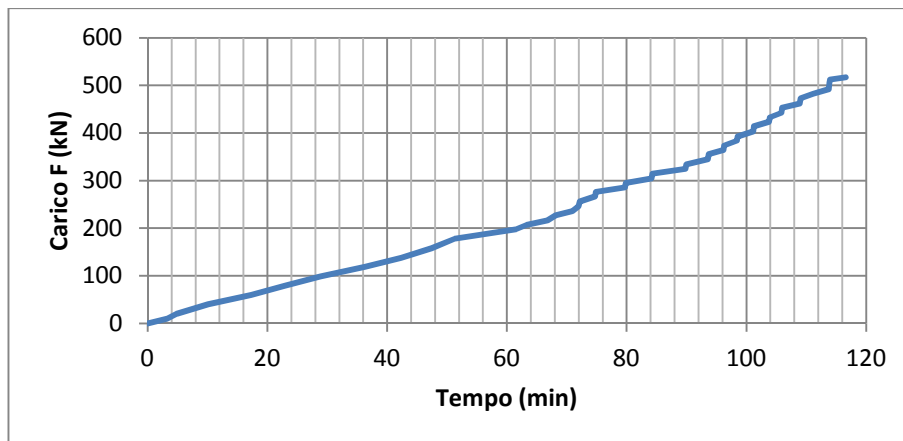


Figura 4.80: Diagramma carico-tempo trave C.01

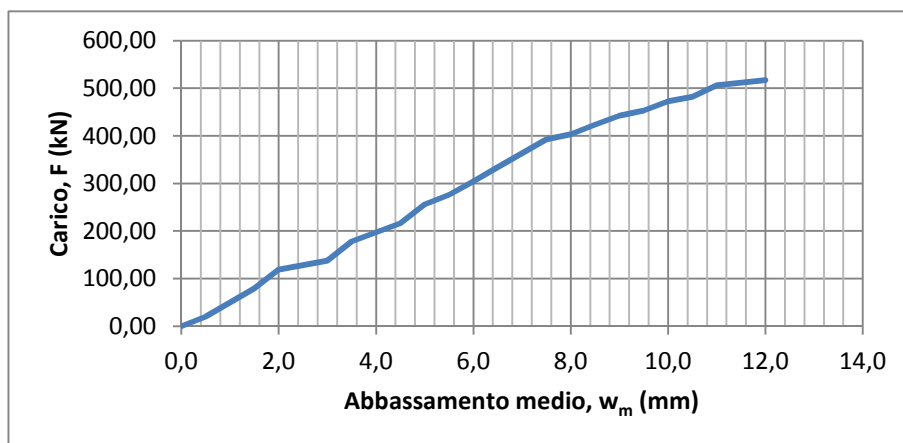


Figura 4.81: Diagramma carico-abbassamento trave C.01

Nella figura 4.82 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E1 ed E2, in cui si ha $\varepsilon_{m(1-2)} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$. La deformazione media a snervamento per barre $\phi 10$ nervate risulta uguale a: $\varepsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 387/210000 = 1,84\%$, in cui $f_{ym} = (393,6+383,3+384,1)/3 = 387 \text{ N/mm}^2$. Dal diagramma si evince che l'andamento della deformazione media nel diagonale compresso è pressoché lineare. Non si verificano fenomeni di instabilità e questo denota il benefico effetto di confinamento e di stabilizzazione che esercita il fondello in calcestruzzo.

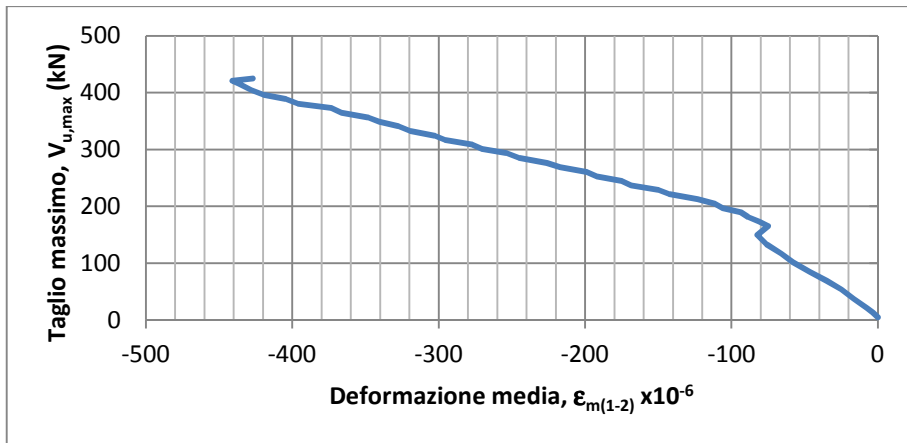


Figura 4.82: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, trave C.01

Nella figura 4.83 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E3 ed E4, posti sulla prima asta diagonale tesa del traliccio.

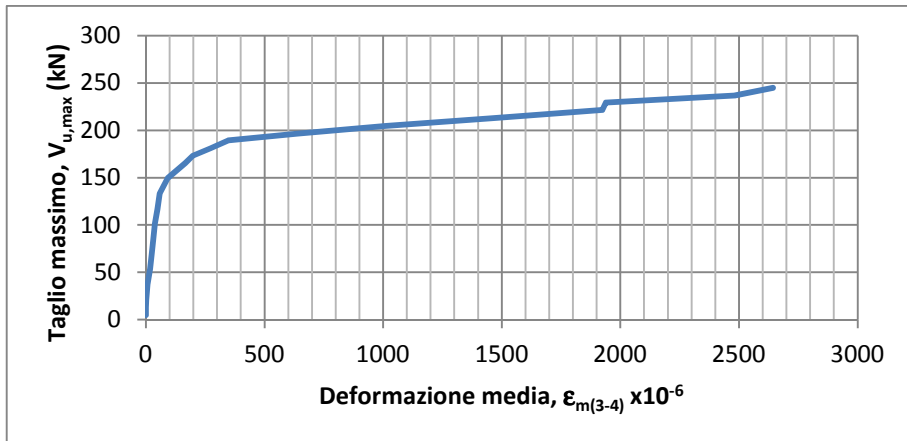


Figura 4.83: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, trave C.01

Gli estensimetri installati non hanno fornito misurazioni fino al carico di rottura, ma hanno comunque evidenziato un comportamento elastoplastico con incrudimento. L'ultimo valore rilevato è stato di una deformazione pari a 2,64‰ corrispondente ad un taglio di 244kN.

Nella figura 4.84 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E5 ed E6, applicati sulla terza asta di parete del traliccio metallico. Il legame è pressoché lineare fino al valore del taglio pari a 170kN. Dopo tale valore, lo sviluppo delle fessure impedisce ulteriori incrementi deformativi.

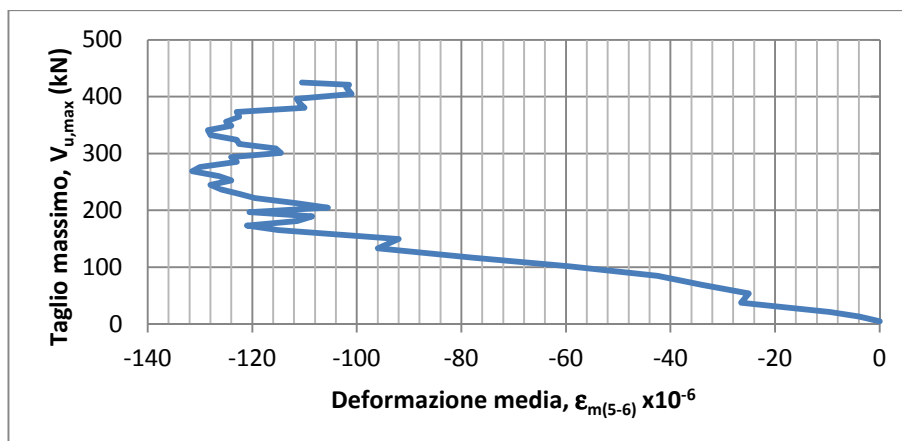


Figura 4.84: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, trave C.01

Nella figura 4.85 è diagrammata la deformazione dell'estensimetro E7, posto vicino all'appoggio sul corrente inferiore teso, in funzione del taglio massimo agente. Si nota un comportamento elastico quasi-lineare del materiale fino al raggiungimento di uno sforzo di taglio di circa 190 kN, valore intorno al quale le fessure si incrementano notevolmente. A questo punto si nota un incremento della rigidezza locale fino ad un valore del taglio di circa 350 kN. Successivamente si ha una riduzione della rigidezza in cui non si hanno significativi incrementi del carico all'aumentare della deformazione. L'acciaio non raggiunge il suo limite di snervamento rimanendo il massimo valore registrato da E7 ben al di sotto di $\epsilon_{ym} = 2,55\%$.

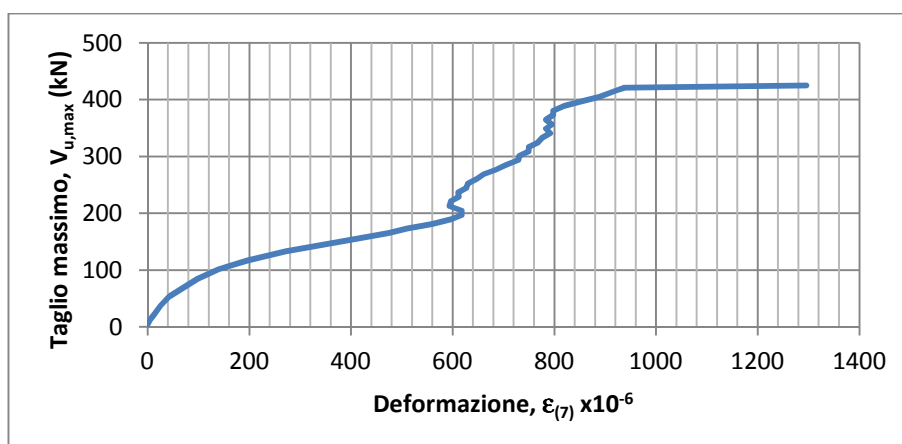


Figura 4.85: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E7, trave C.01

Nella figura 4.86 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E8, installato sul corrente teso di acciaio in corrispondenza della cella di carico. Dal grafico si evince un comportamento elastico lineare del materiale fino al raggiungimento del carico di rottura.

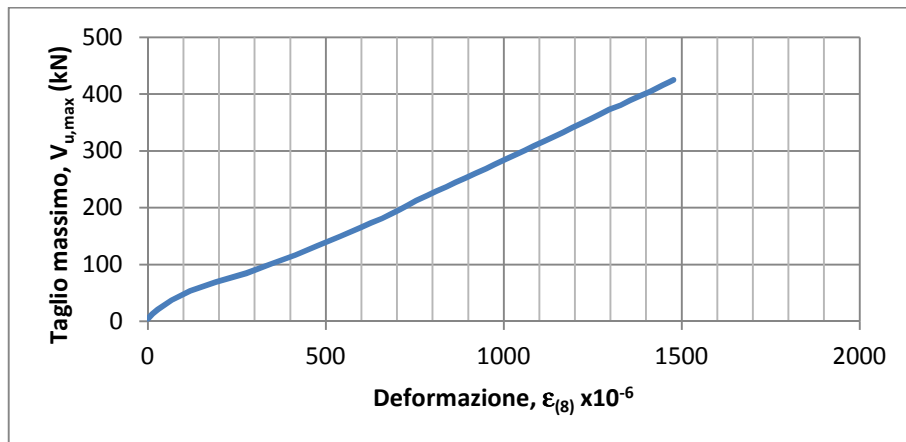


Figura 4.86: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E8, trave C.01

Nella figura 4.87, infine, si riporta il diagramma taglio - deformazione relativo all'estensimetro E9, applicato all'estradosso della trave ad una distanza di 16cm dal punto di carico.

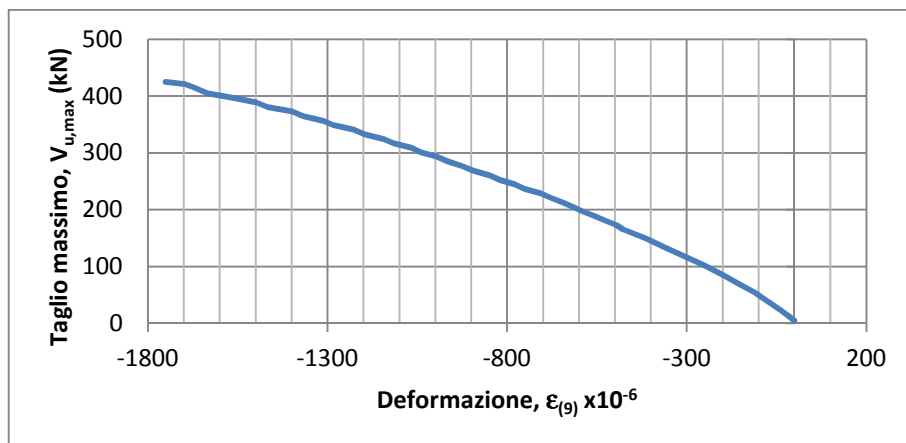


Figura 4.87: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E9, trave C.01

Dal grafico si può notare come il calcestruzzo abbia un comportamento elastico quasi-lineare fino a rottura. Tale fatto è coerente con i legami costitutivi del calcestruzzo riportati nel DM 14/01/2008 che prevedono i seguenti limiti elastici: $\epsilon_{c2} = 2\text{‰}$ (parabola - rettangolo), $\epsilon_{c3} = 1,75\text{‰}$ (triangolo - rettangolo);

entrambi non superiori della deformazione massima di compressione registrata dall'estensimetro E9, $\varepsilon_{9,max} = 1,75\%$.

La **seconda prova** è stata eseguita sulla **trave C.02**. Nella figura 4.88 si riporta la storia di carico. Il valore massimo raggiunto dal carico applicato è pari a $F_u = 342,00$ kN, cui corrisponde uno sforzo di taglio massimo pari a $V_{u,max} = 282,68$ kN; in cui $V_{u,max} = \frac{F}{l}(l - a) + \frac{g \cdot l}{2}$.

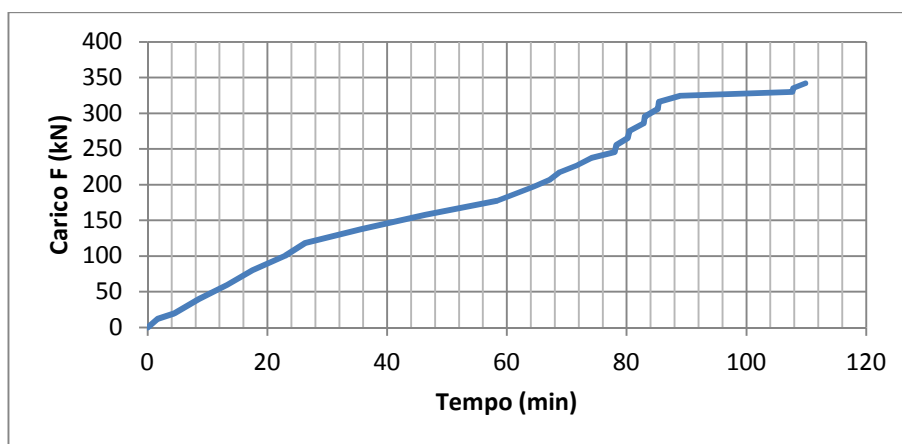


Figura 4.88: Diagramma carico-tempo trave C.02

Nella figura 4.89 si riporta il diagramma carico - abbassamento della sezione di carico. Tale abbassamento è stato calcolato come media aritmetica dei due valori misurati dai trasduttori *LVDT-1* ed *LVDT-2*. L'abbassamento medio a rottura misurato è $w_{max} = 13,5$ mm. Il valore di abbassamento registrato per questa trave mostra che essa è la meno rigida fra tutte quelle sperimentate. La perdita di rigidezza è avvenuta quasi interamente per un valore della deformazione pari a circa la metà del valore corrispondente alla rottura.

Nella figura 4.90 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E1 ed E2, in cui si ha $\varepsilon_{m(1-2)} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$. La deformazione media a snervamento per barre $\phi 10$ lisce risulta uguale a: $\varepsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 298,5/210000 = 1,42\%$, in cui $f_{ym} = (303,1+297,4+295,0)/3 = 298,5$ N/mm². Dal grafico si evince che si ha una perdita della rigidezza in corrispondenza di un valore del taglio di poco superiore a 260kN. Non si rilevano fenomeni di instabilità locale e l'acciaio rimane in campo elastico.

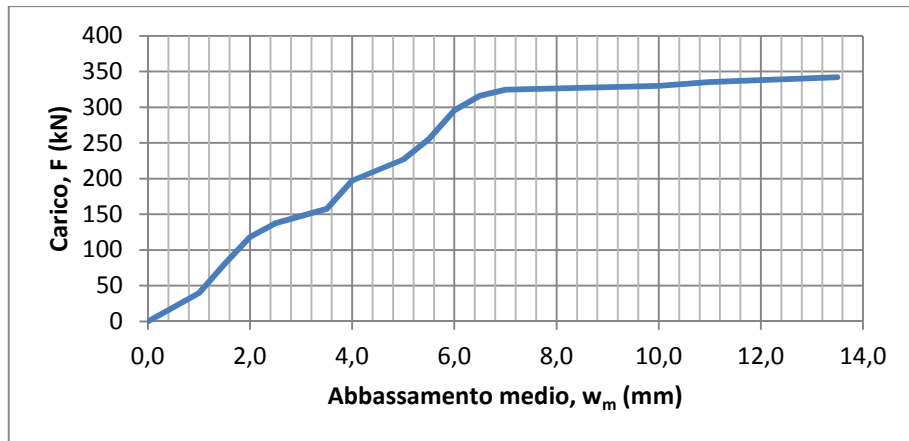


Figura 4.89: Diagramma carico-abbassamento trave C.02

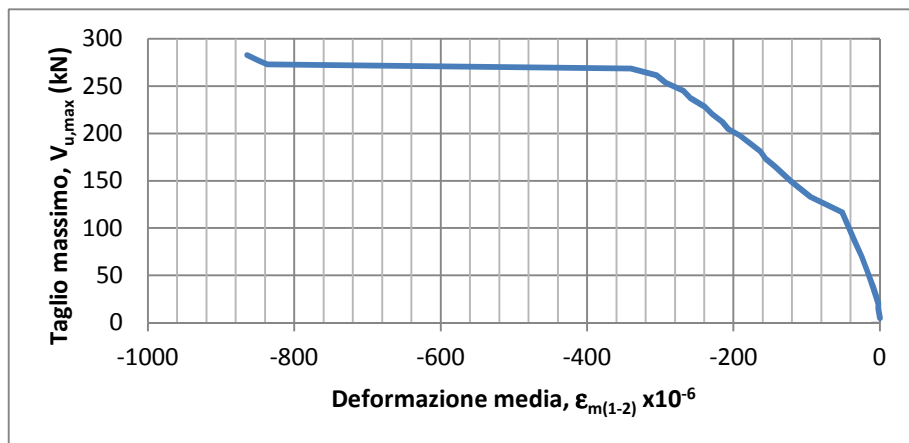


Figura 4.90: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, trave C.02

Nella figura 4.91 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E3 ed E4, posti sulla prima asta diagonale tesa del traliccio. Gli estensimetri non hanno fornito misurazioni fino al carico di rottura, rilevando misure di deformazione fino al carico di 157,81kN. L'andamento è del tipo elastoplastico.

Nella figura 4.92 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E5 ed E6 applicati sulla terza asta di parete del traliccio metallico. L'asta rimane in campo elastico e si nota una perdita di rigidezza locale dovuta ai fenomeni di apertura delle fessure. Nemmeno in questo caso si rilevano fenomeni di instabilità.

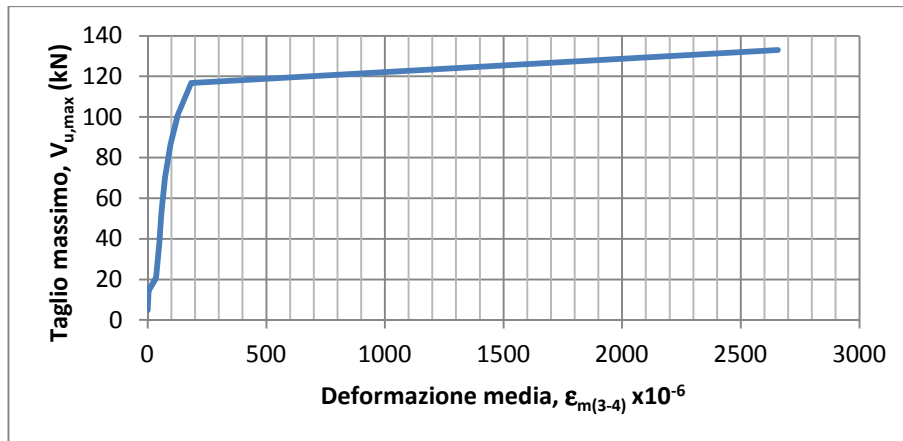


Figura 4.91: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, trave C.02

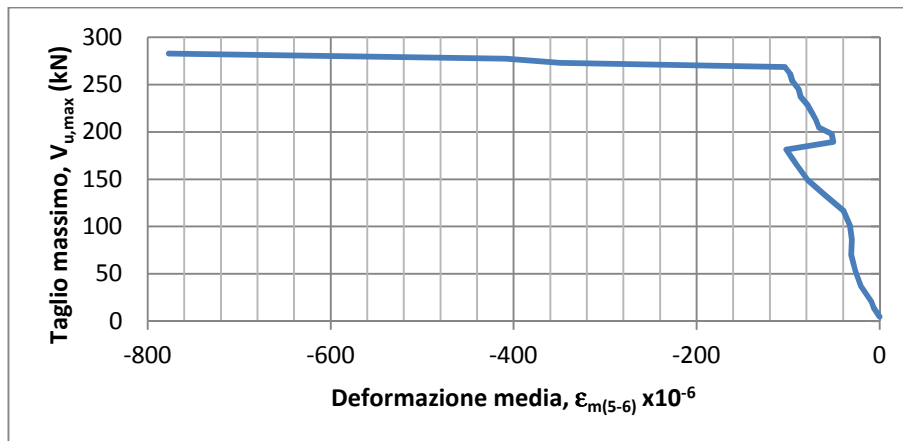


Figura 4.92: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, trave C.02

Nella figura 4.93 è diagrammata la deformazione dell'estensimetro E7, posto vicino all'appoggio sul corrente inferiore teso, in funzione del taglio massimo agente. Si nota un comportamento elastico del materiale. L'ultimo valore di deformazione registrato dall'estensimetro è 0,568‰ inferiore al limite di snervamento dell'acciaio.

Nella figura 4.94 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E8, installato sul corrente teso di acciaio in corrispondenza della cella di carico. Dal grafico si evince un comportamento elastico del materiale fino al raggiungimento del carico di rottura, infatti, la deformazione massima registrata risulta inferiore al valore della deformazione di snervamento ϵ_{ym} .

Nella figura 4.95, infine, si riporta il diagramma taglio - deformazione relativo all'estensimetro E9, posizionato come in tutte le altre travi.

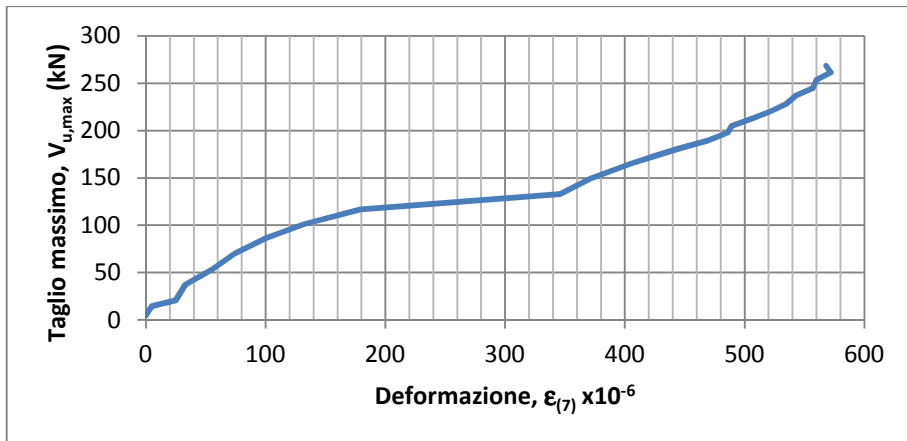


Figura 4.93: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E7, trave C.02

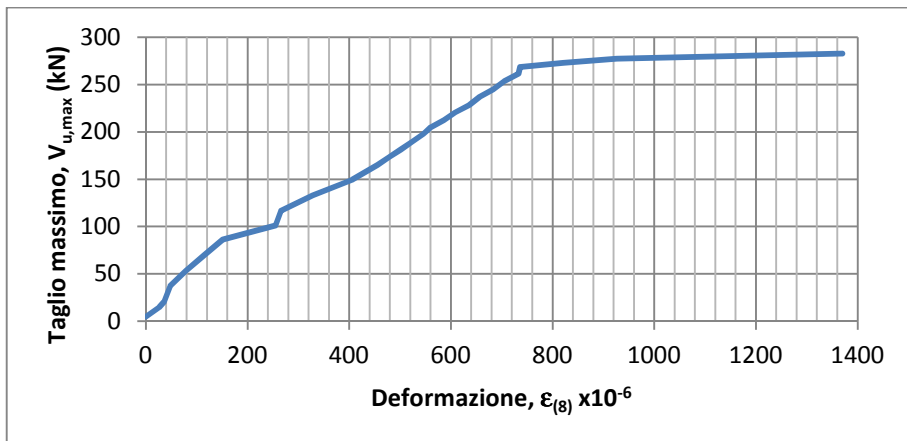


Figura 4.94: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E8, trave C.02

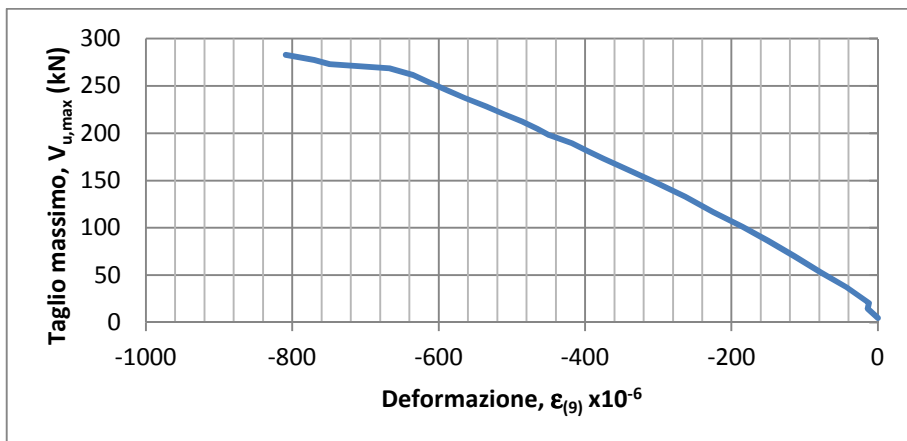


Figura 4.95: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E9, trave C.02

Dal grafico si può notare come il calcestruzzo abbia un comportamento elastico fino a rottura.

La **terza prova** è stata eseguita sulla **trave C.03**. Nella figura 4.96 si riporta la storia di carico. La rottura della trave è avvenuta per un valore del carico applicato pari a $F_u = 407,98$ kN, cui corrisponde uno sforzo di taglio massimo pari a $V_{u,max} = 336,28$ kN; in cui $V_{u,max} = \frac{F}{l}(l - a) + \frac{g \cdot l}{2}$.

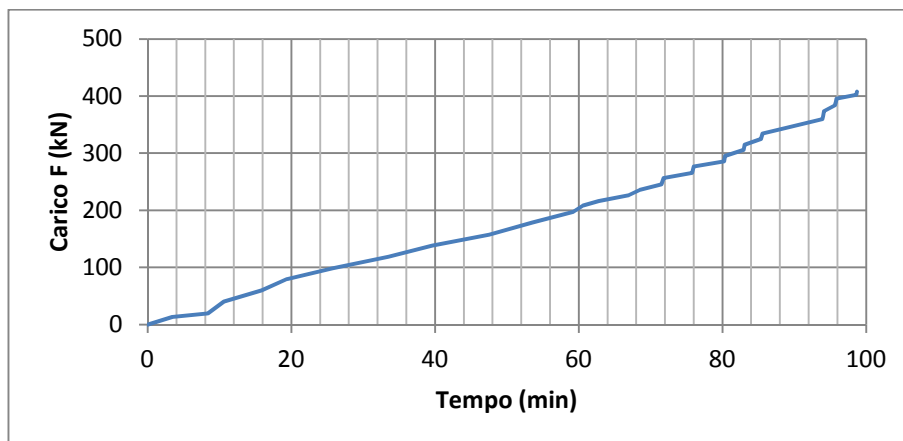


Figura 4.96: Diagramma carico-tempo trave C.03

Nella figura 4.97 si riporta il diagramma carico - abbassamento della sezione di carico. L'abbassamento medio a rottura, misurato dai trasduttori *LVDT-1* ed *LVDT-2*, $w_{max} = 8,5$ mm. All'aumentare del carico, la trave subisce un abbassamento pressoché uniforme fino al raggiungimento della crisi. Questo comportamento, di tipo fragile, è tipico per la modalità di rottura a taglio.

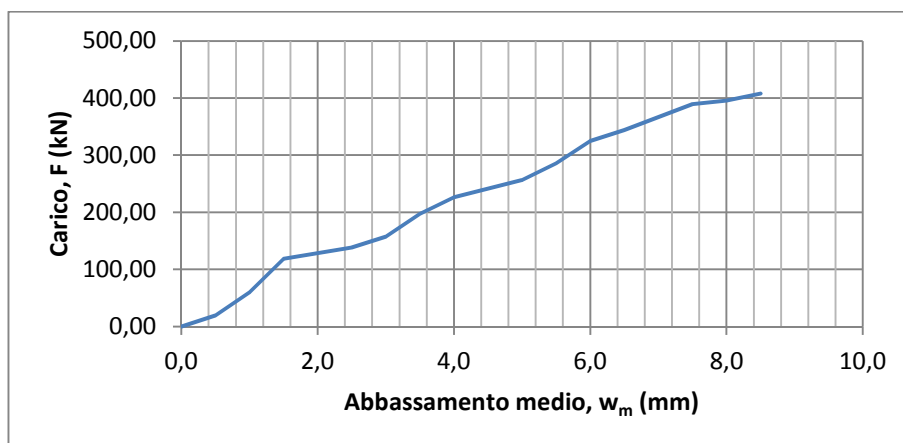


Figura 4.97: Diagramma carico-abbassamento trave C.03

Nella figura 4.98 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E1 ed E2, in cui si ha $\varepsilon_{m(1-2)} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$. La deformazione media a snervamento per barre $\phi 10$ lisce risulta uguale a: $\varepsilon_{ym} = f_{ym}/E_s = 298,5/210000 = 1,42\%$, in cui $f_{ym} = (303,1+297,4+295,0)/3 = 298,5 \text{ N/mm}^2$.

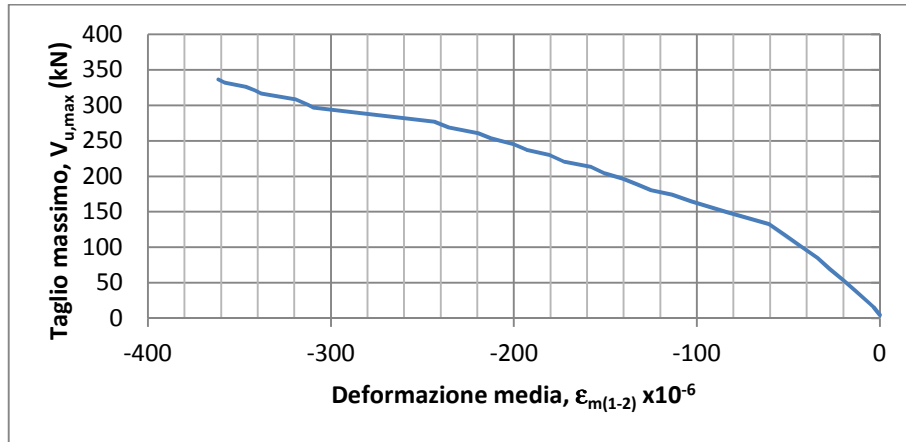


Figura 4.98: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, trave C.03

Dal diagramma si evince che l'andamento della deformazione media nel diagonale compresso è pressoché lineare e l'acciaio rimane elastico fino al carico di rottura.

Nella figura 4.99 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia C. La trave C.01 ha una rigidezza locale inferiore rispetto alle altre due le quali hanno un comportamento praticamente identico.

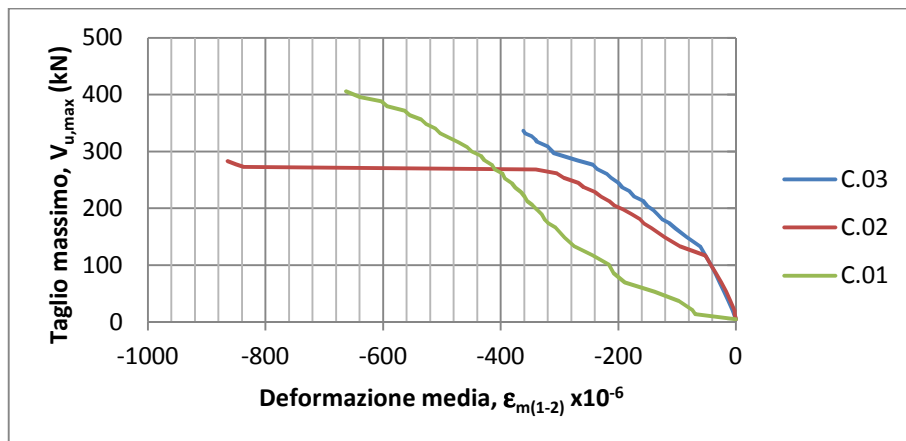


Figura 4.99: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetri E1 ed E2, travi C

Nella figura 4.100 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E3 ed E4, posti sulla prima asta diagonale tesa del traliccio.

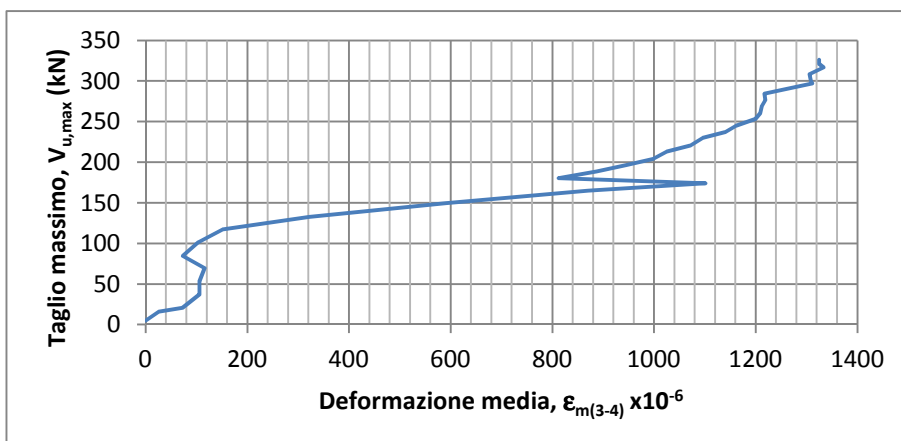


Figura 4.100: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, trave C.03

L'acciaio è rimasto in campo elastico, manifestando un decremento della rigidezza per un valore del taglio massimo pari a circa 100kN dovuto ai fenomeni di fessurazione.

Nella figura 4.101 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia C.

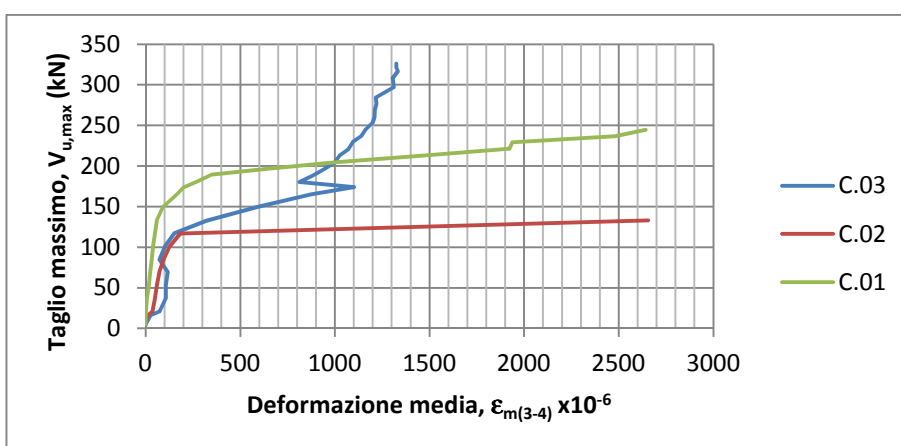


Figura 4.101: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetri E3 ed E4, travi C

Si può notare una resistenza maggiore offerta dall'acciaio della trave C.01, cosa che è coerente con il fatto che trattasi di acciaio nervato mentre negli altri due casi di acciaio liscio. I fenomeni fessurativi causano una perdita di rigidezza per una deformazione approssimativamente uguale nei tre casi dimostrando che

il tipo di acciaio non influisce su tale fenomeno. La duttilità è invece fortemente influenzata dal tipo di acciaio costituente le armature longitudinali, infatti nelle travi C.01 e C.02 è praticamente identica e superiore rispetto alla trave C.03 in cui le barre longitudinali sono costituite da acciaio liscio.

Nella figura 4.102 si riporta il diagramma taglio - deformazione per gli estensimetri E5 ed E6 applicati sulla terza asta di parete del traliccio metallico. Gli estensimetri registrano una deformazione media uguale a zero fino ad un valore del taglio massimo di poco inferiore ai 100kN, dopodiché l'asta si comprime fino al valore di rottura senza entrare in campo plastico e senza manifestare fenomeni di instabilità.

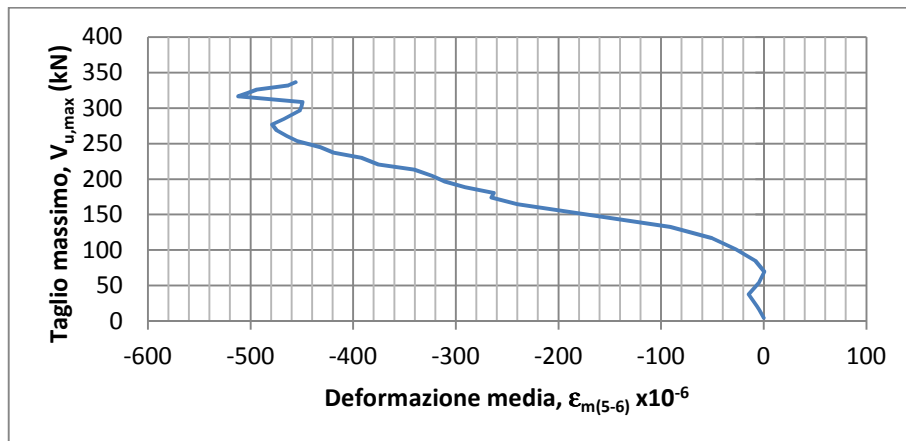


Figura 4.102: Diagramma taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, trave C.03

Nella figura 4.103 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia C.

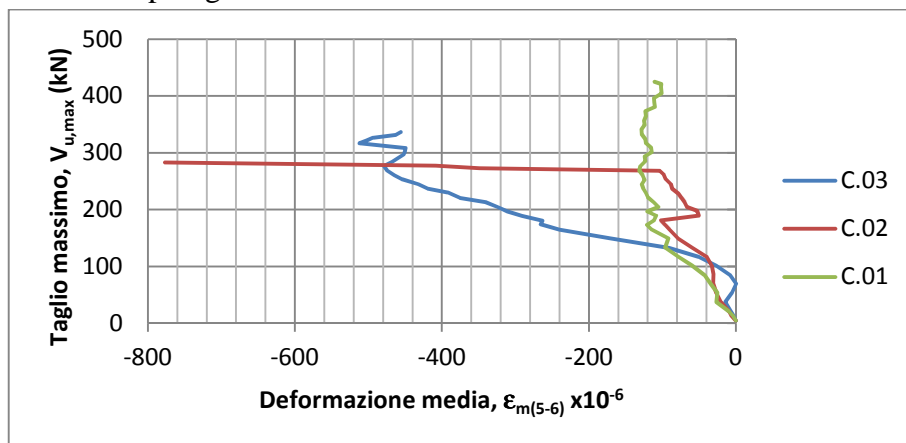


Figura 4.103: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetri E5 ed E6, travi C

La performance per le tre travi è molto diversa, fatto questo che dimostra l'imprevedibilità del comportamento delle aste compresse nella fase post-fessurata in cui può venir meno l'efficacia del confinamento offerto dal calcestruzzo.

Nella figura 4.104 è diagrammata la deformazione dell'estensimetro E7 in funzione del taglio massimo agente.

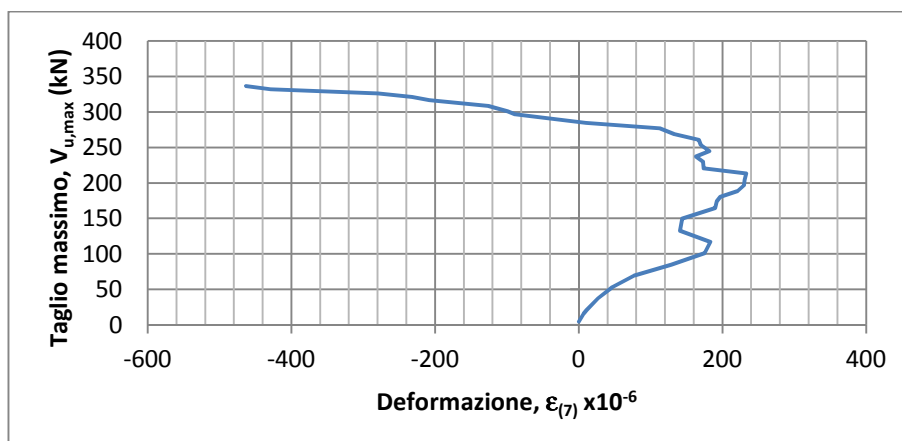


Figura 4.104: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E7, trave C.03

In questo caso si registra un comportamento apparentemente anomalo dell'estensimetro ma, se si osserva l'evoluzione della fessura, si nota che essa è diretta longitudinalmente e parallelamente all'asse del corrente inferiore su cui è applicato l'estensimetro. La presenza del fondello in calcestruzzo condiziona dunque il quadro fessurativo della trave.

Nella figura 4.105 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia C. Dall'esame del grafico si desume un comportamento fortemente irregolare nei tre casi. Solo nella fase prefessurata si può prevedere che le travi abbiano un comportamento analogo. Inoltre è possibile affermare che l'acciaio nervato, di cui è costituito il corrente inferiore delle travi C.01 e C.02, attenua gli effetti sul quadro fessurativo causato dalla presenza del fondello in calcestruzzo.

Nella figura 4.106 si riporta il diagramma taglio - deformazione per l'estensimetro E8, installato sul corrente teso di acciaio in corrispondenza della cella di carico.

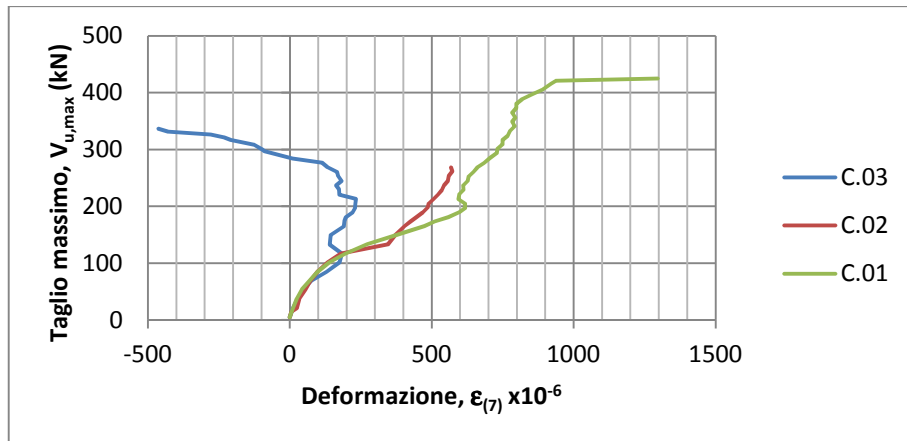


Figura 4.105: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E7, travi C

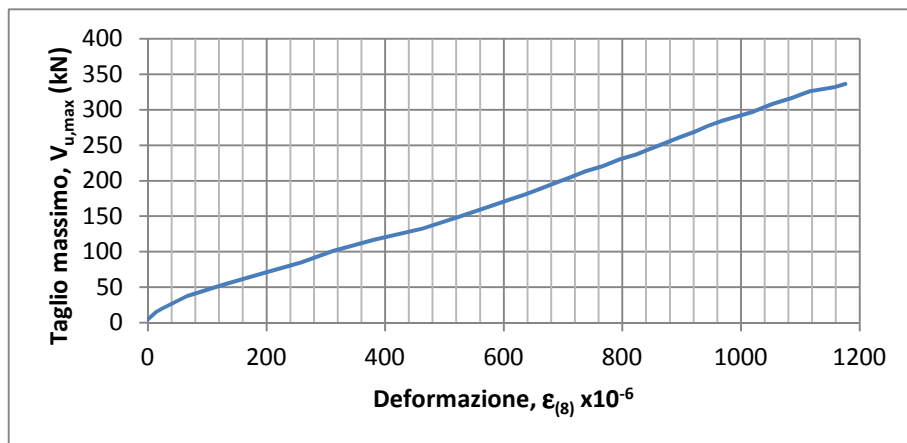


Figura 4.106: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E8, trave C.03

Dal grafico si evince un comportamento elastico lineare dell'acciaio fino al raggiungimento del carico di rottura, infatti, la deformazione massima registrata risulta inferiore al valore della deformazione di snervamento ϵ_{ym} .

Nella figura 4.107 si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia C. In nessun caso l'acciaio ha raggiunto il suo valore di snervamento, mantenendo un comportamento elastico fino a rottura.

Nella figura 4.108 si riporta il diagramma taglio - deformazione relativo all'estensimetro E9. Anche qui le considerazioni che si possono fare sono analoghe a quelle fatte per le travi C.01 e C.02. Nella figura 6.109, infine, si riporta la sovrapposizione dei diagrammi ricavati per le tre travi della tipologia C. Si può notare un andamento elastico quasi-lineare per tutte e tre le travi.

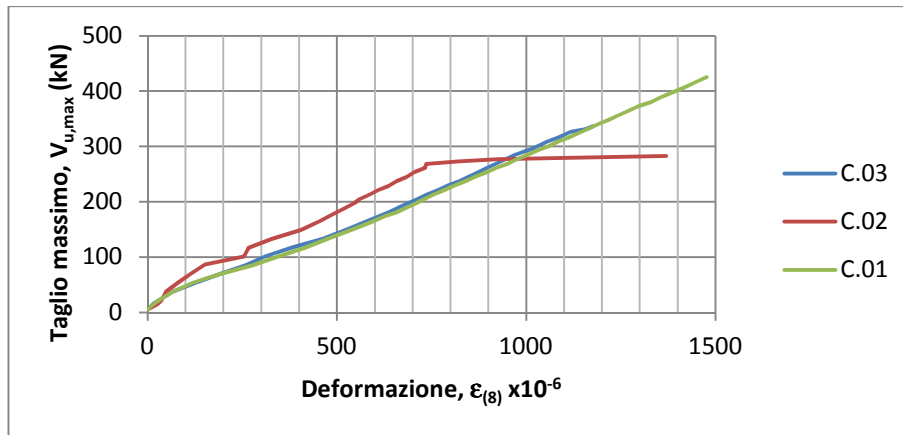


Figura 4.107: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E8, travi C

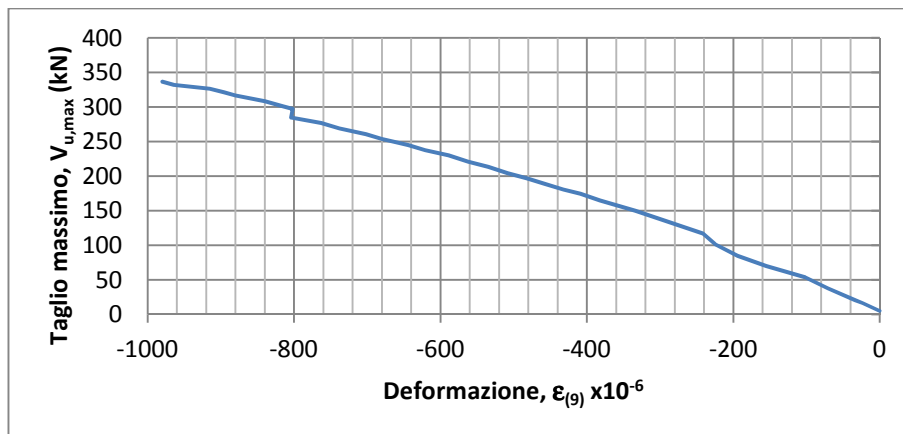


Figura 4.108: Diagramma taglio-deformazione estensimetro E9, trave C.03

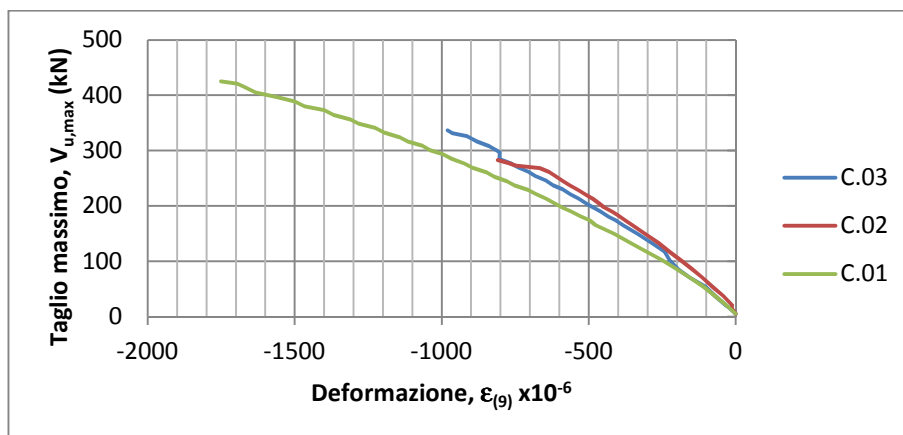


Figura 4.109: Sovrapposizione diagrammi taglio-deformazione estensimetro E9, travi C

Di seguito si riporta per ogni tipologia di trave una breve descrizione dello stato fessurativo e le figure che rappresentano la trave al momento del collasso (figure 4.110-4.118). L'aspetto fessurativo delle travi tipo A è caratterizzato dall'apertura di microfessure verticali nella zona centrale della trave, dovute alla flessione, per un carico di circa 60kN. Esse si sono mantenute sostanzialmente stabili fino al carico di rottura, aumentando solo in lunghezza ma non in ampiezza. Al crescere del carico sono scaturite delle fessure da taglio inclinati aventi un'ampiezza via via crescendo fino a rottura. Tali fessure si sono formate nella parte inferiore della trave a partire dall'appoggio e, all'aumentare del carico, sono aumentate fino a raggiungere la sommità della trave in corrispondenza del punto di applicazione del carico esterno. Il tipo di rottura evidenziato dalle travi tipo A è stato a taglio per il manifestarsi di una estesa fessura con andamento inclinato.

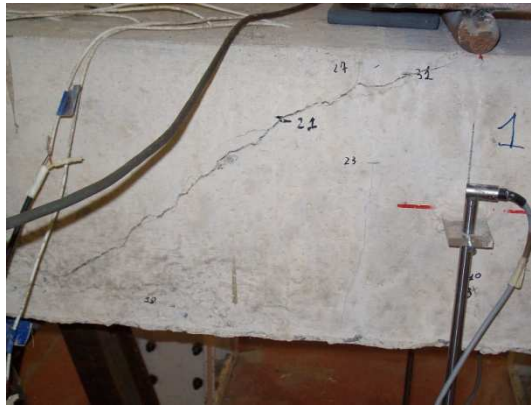


Figura 4.110: Trave A.01 a rottura



Figura 4.111: Trave A.02 a rottura

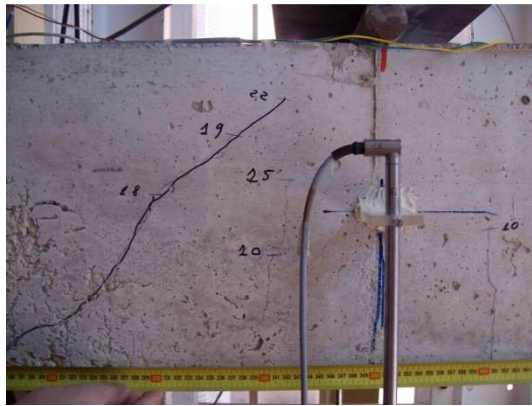


Figura 4.112: Trave A.03 a rottura

Le travi tipo B presentano un quadro fessurativo diverso dalle precedenti a causa della presenza del fondello in acciaio. All'aumentare del carico si presentano le prime fessure all'interfaccia fondello - calcestruzzo estendendosi fino a circa metà altezza della trave. Il carico di prima fessurazione è praticamente lo stesso delle travi tipo A. Anche per questa tipologia si sviluppano fessure inclinate dovute al taglio ma manifestano un primo tratto orizzontale che parte dall'appoggio per poi inclinarsi e raggiungere la sommità della trave in corrispondenza del punto di applicazione del carico esterno. L'ampiezza massima delle fessure da taglio è stata di circa 1mm.



Figura 4.113: Trave B.01 a rottura

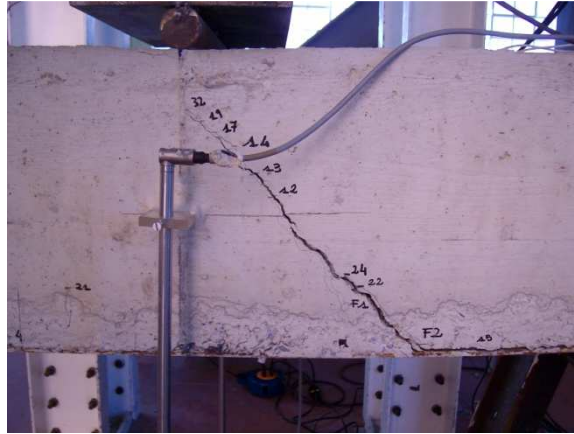


Figura 4.114: Trave B.02 a rottura

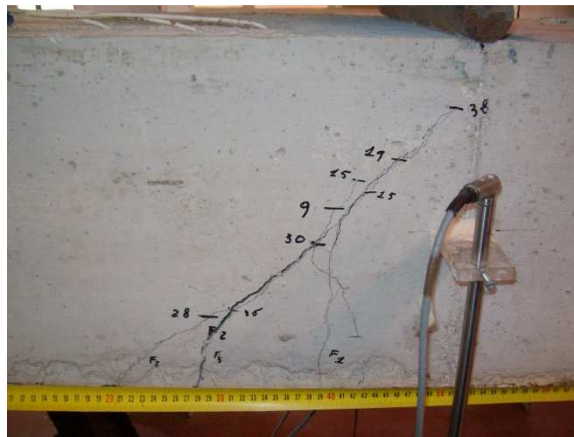


Figura 4.115: Trave B.03 a rottura

Anche le travi di tipo C risentono nel loro quadro fessurativo della presenza del fondello, in questo caso di calcestruzzo. L'evoluzione del quadro fessurativo non differisce di molto dalle tipologie precedenti. Le prime microfessure si sono formate per un carico di circa 40kN nella zona centrale della trave, al di sopra del fondello. All'aumentare del carico esterno, tali fessure si sono manifestate anche nel fondello in calcestruzzo congiungendosi ma mano con quelle soprastanti. Successivamente si sono formate le fessure inclinate da taglio che, come nei casi precedenti, hanno portato la trave a rottura evolvendo dall'appoggio fino in sommità in corrispondenza del punto di applicazione del carico. Per tutte le nove travi, dunque, la modalità di rottura è dovuta alla formazione di estese fessure diagonali da taglio.

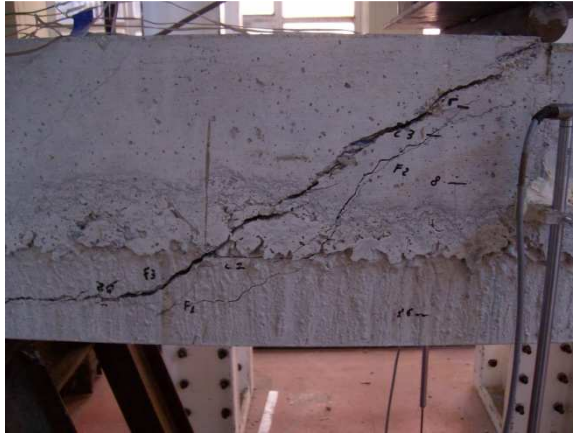


Figura 4.116: Trave C.01 a rottura



Figura 4.117: Trave C.02 a rottura

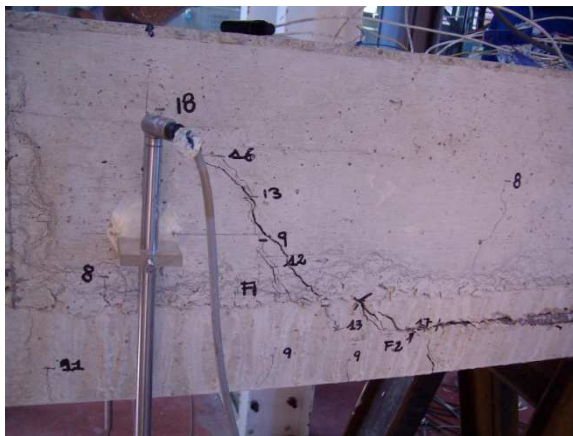


Figura 4.118: Trave C.03 a rottura

Nelle figure 4.119-4.121 si riportano le sovrapposizioni dei diagrammi carico - abbassamento medio della sezione di carico per le tre tipologie di travi con la stessa armatura fra loro. Dal loro confronto emerge che il comportamento è sostanzialmente identico per le tre tipologie di travi in termini di rigidità; cambia solo il valore del carico ultimo.

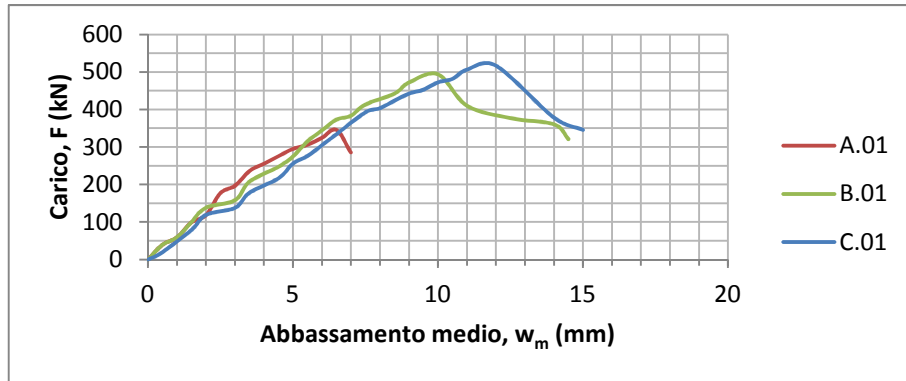


Figura 4.119: Confronto diagrammi carico-abbassamento per le travi A.01-B.01-C.01

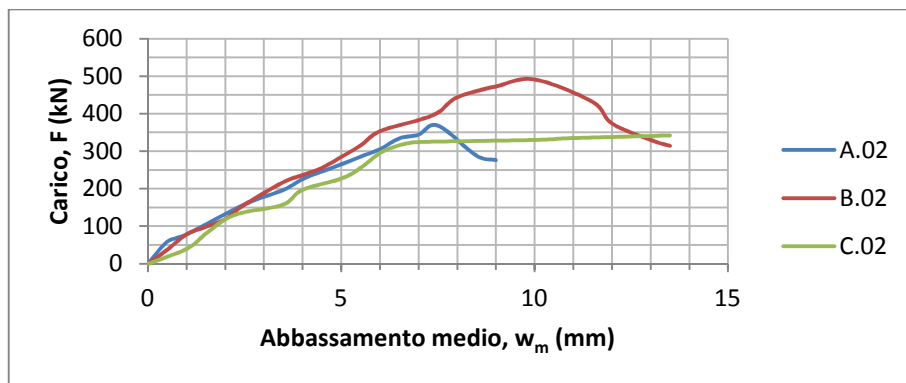


Figura 4.120: Confronto diagrammi carico-abbassamento per le travi A.02-B.02-C.02

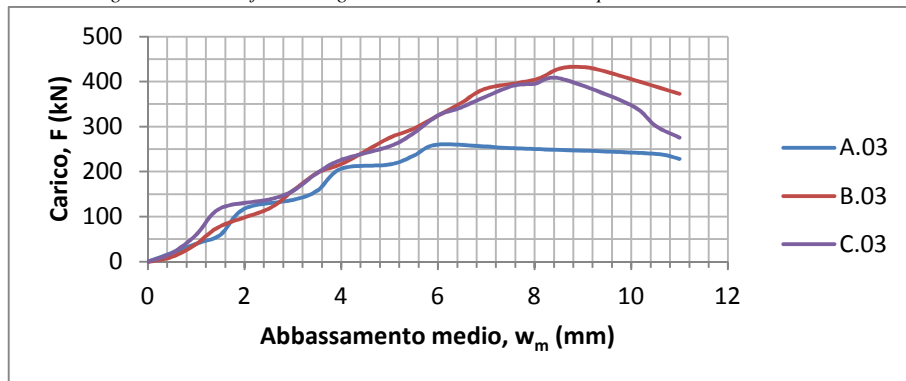


Figura 4.121: Confronto diagrammi carico-abbassamento per le travi A.03-B.03-C.03

4.4 Confronto teorico - numerico - sperimentale

Le nove travi sono state analizzate in campo non lineare mediante un programma agli elementi finiti (*Lusas Release v.14.0-3*). I tipi di elementi utilizzati e le caratteristiche della modellazione sono già stati descritti al paragrafo 2.5, con la differenza che adesso occorre considerare la trave nella sua interezza visto che non sussistono più le condizioni di simmetria dello schema e quattro punti (figura 4.122).

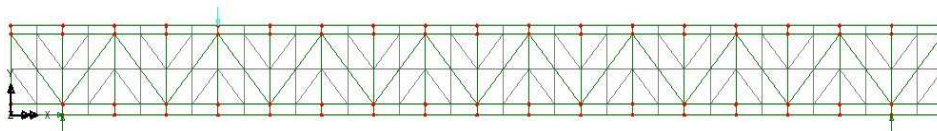


Figura 4.122: Modello agli elementi finiti in Lusas

L'elemento finito utilizzato per il calcestruzzo compreso nella gabbia metallica è denominato *TPM6*. Si tratta di un elemento *Plane stress* con interpolazione quadratica e regola di integrazione a 3 punti di Gauss (figura 4.123).

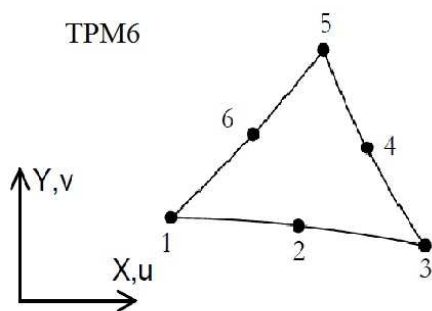


Figura 4.123: Elemento finito bidimensionale TPM6

Il legame costitutivo tensione - deformazione utilizzato per l'acciaio è il bilineare finito con incrudimento (figura 4.124), definito in base al valore della deformazione uniforme ultima ε_u , alla deformazione di snervamento ε_y , al valore della tensione di snervamento f_y e alla tensione di rottura f_u . A partire da questi valori è possibile calcolare il rapporto di rigidezza: $slope = \frac{f_u - f_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y}$.

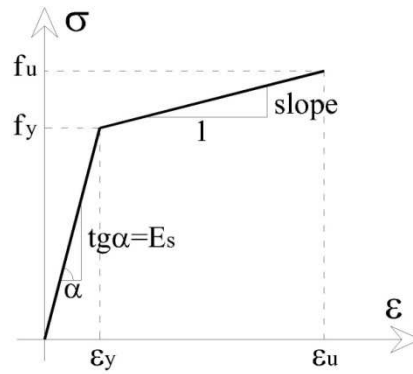


Figura 4.124: Legame costitutivo per l'acciaio

Nella tabella 4.6 sono riassunte le caratteristiche meccaniche medie degli acciai utilizzati per i vari componenti costituenti le travi sperimentate.

Provino	ϕ (mm)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	ϵ_y	ϵ_u	slope
barre lisce	10	298,5	427,9	0,001421	0,183667	710
barre lisce	16	349,8	476,8	0,001666	0,192000	667
barre lisce	20	377,7	543,2	0,001799	0,221333	754
barre nervate	10	387,0	483,3	0,001843	0,137000	712
barre nervate	16	468,3	547,5	0,002230	0,109667	737
barre nervate	20	458,1	547,8	0,002181	0,131333	695
barre nervate	32	535,3	638,6	0,002549	0,116333	908
piatti		486,3	556,6	0,002316	0,151333	472

Tabella 4.6: Caratteristiche meccaniche degli acciai

Nella tabella 4.7 sono riportate le caratteristiche meccaniche medie del calcestruzzo utilizzato per le tre tipologie di travi e per il fondello della tipologia C.

Provino	f_c (N/mm ²)	f_{ct} (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)	ν
Travi tipo A	38,78	3,44	33037	0,2
Travi tipo B	35,57	3,24	32192	0,2
Fondello travi tipo C	36,09	3,28	32332	0,2
Travi tipo C	45,61	3,83	34685	0,2

Tabella 4.7: Caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi

Di seguito si riportano delle *colormaps* per la **trave A.01**, tramite le quali è possibile visualizzare le tensioni nel calcestruzzo e l'evolversi del quadro fessurativo. Sono rappresentate le tensioni (N/mm^2) nel calcestruzzo in direzione X per tre livelli del carico applicato (figura 4.125).

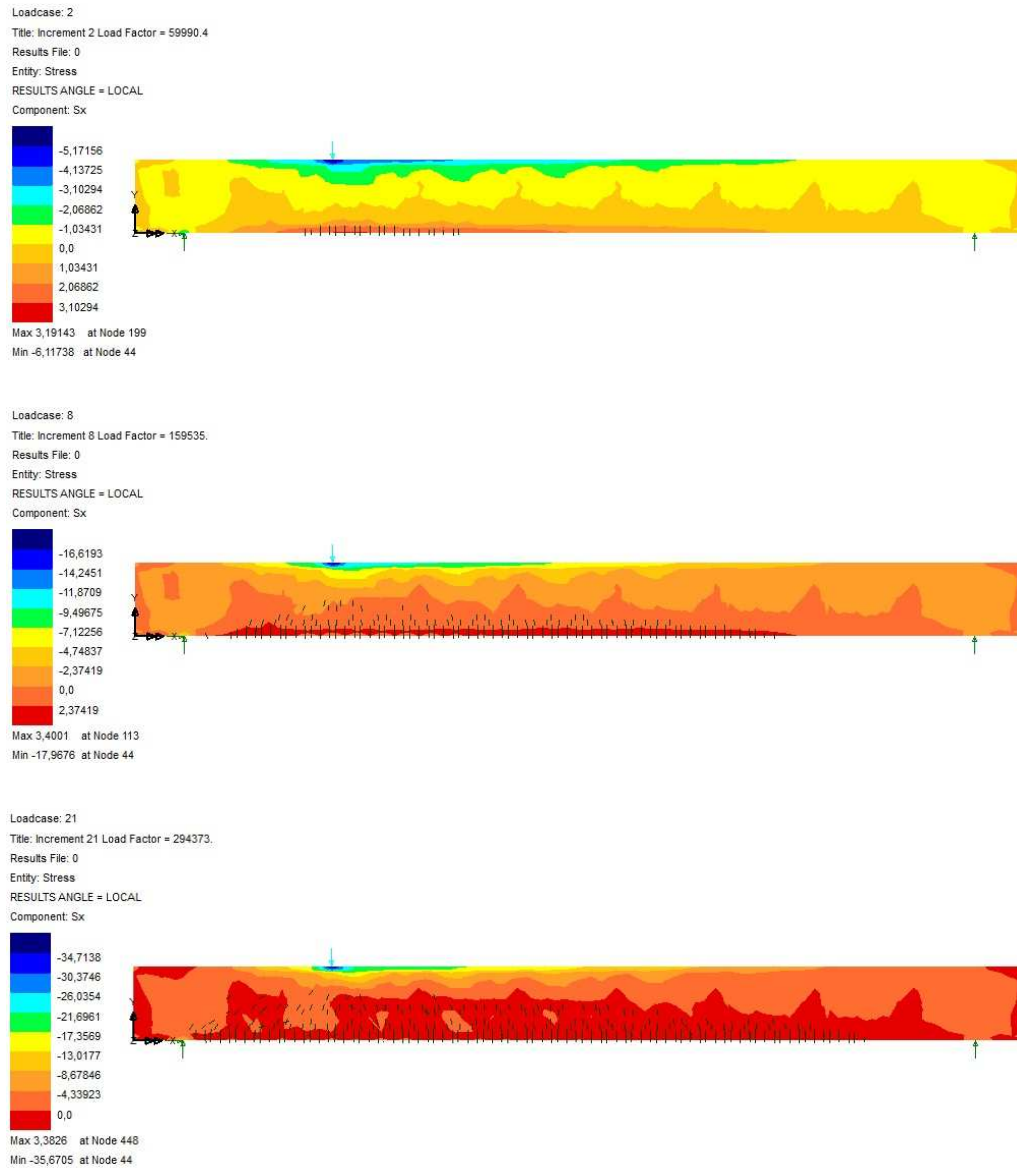


Figura 4.125: Tensioni σ_x per tre livelli di carico, trave A.01

Nella figura 4.126 è mostrata la deformata relativa alla trave A.01.

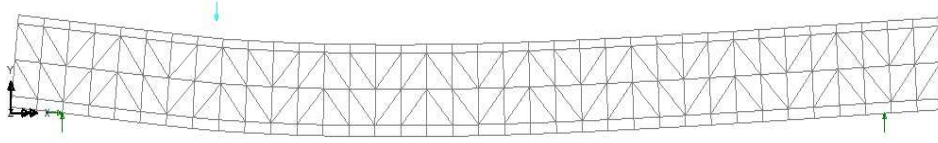


Figura 4.126: Deformata trave A.01

Nelle figure 4.127 - 4.131 si riportano i diagrammi taglio - deformazione corrispondenti ai punti di applicazione degli estensimetri in modo da paragonare le due curve sperimentale e numerica.

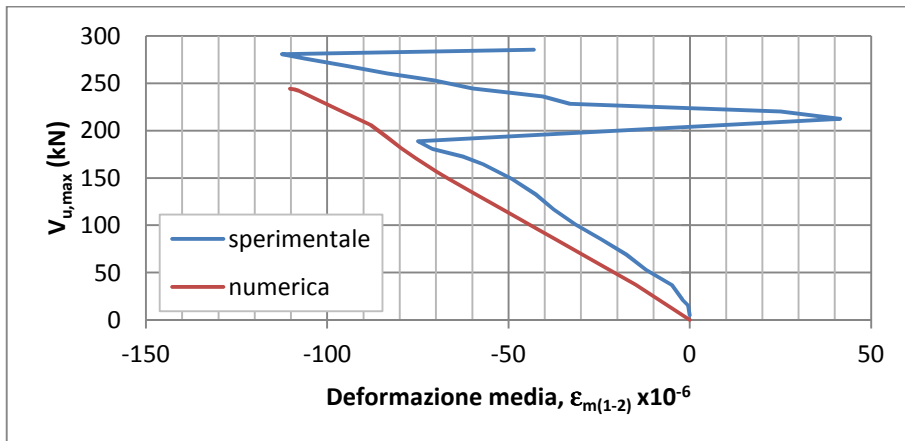


Figura 4.127: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E1/E2, trave A.01

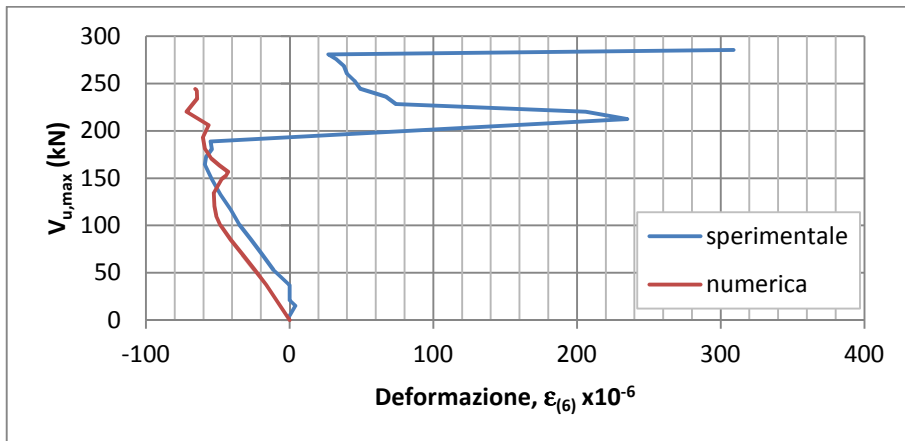


Figura 4.128: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E6, trave A.01

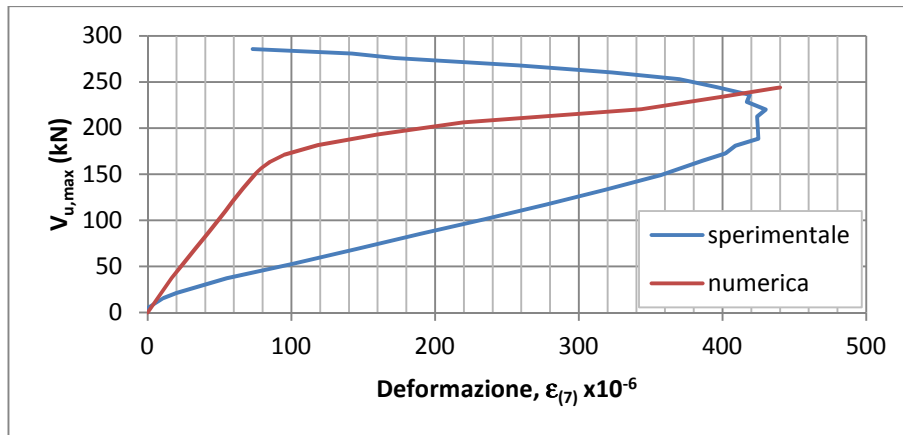


Figura 4.129: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E7, trave A.01

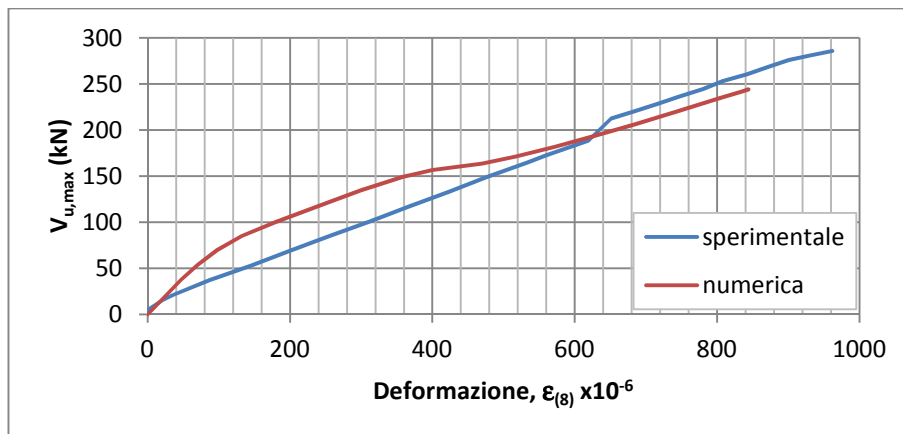


Figura 4.130: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E8, trave A.01

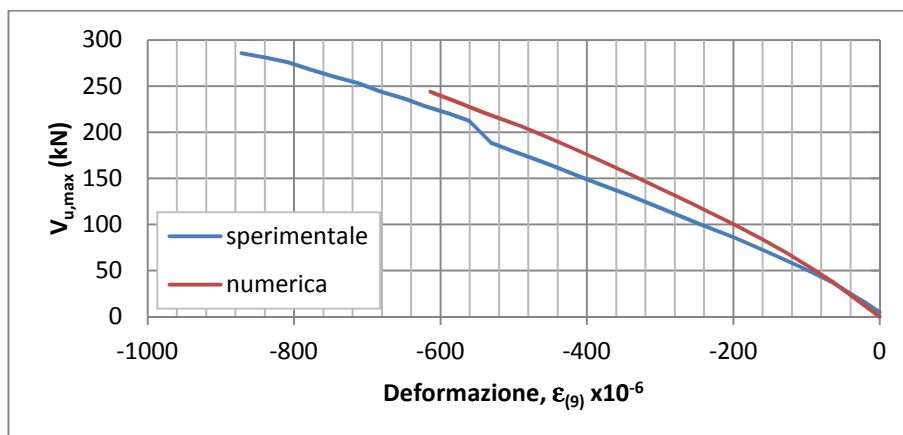


Figura 4.131: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E9, trave A.01

Nella figura 4.132 si riporta la sovrapposizione dei due diagrammi carico - abbassamento del punto sotto il carico ottenuti sperimentalmente e numericamente.

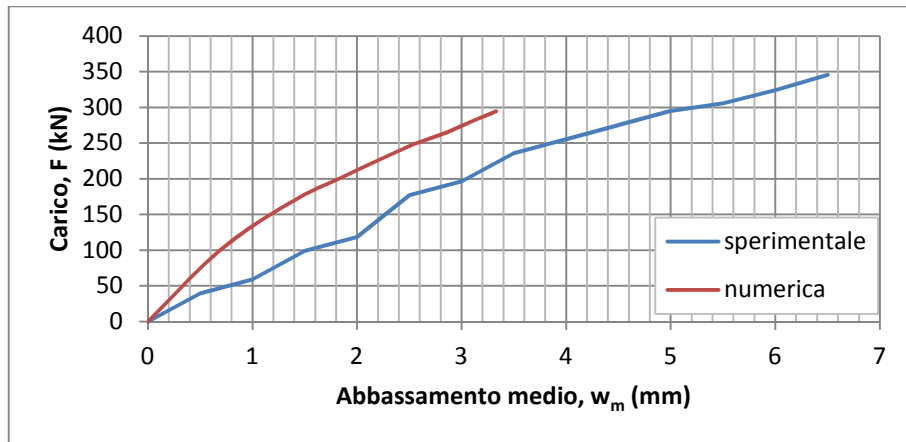


Figura 4.132: Sovrapposizione diagrammi carico - abbassamento, trave A.01

Nella tabella 4.8 si riassumono i risultati ottenuti mettendo a confronto i valori sperimentali, numerici e teorici.

Trave	Valori sperimentali (kN)		Valori numerici (kN)		Valori teorici (kN)		
	F_u	V_u	F_u	V_u	V_R modello 1	V_R modello 2	V_R modello 3
A.01	345,44	285,47	294,37	243,98	177,27	92,22	34,48

Tabella 4.8: Confronto sperimentale - numerico - teorico, trave A.01

Di seguito si riportano le *colormaps* per la **trave A.02**. Sono visualizzate le tensioni nel calcestruzzo (N/mm^2) in direzione X e l'evolversi del quadro fessurativo per tre livelli del carico applicato (figure 4.133a - 4.133b).

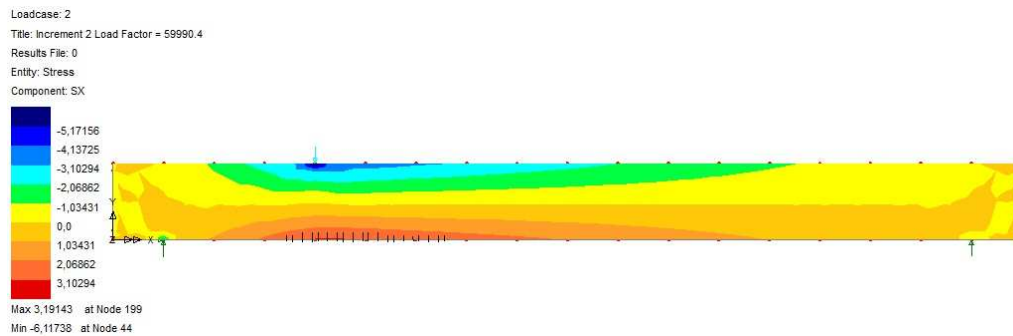


Figura 4.133a: Tensioni σ_x per bassi livello di carico, trave A.02

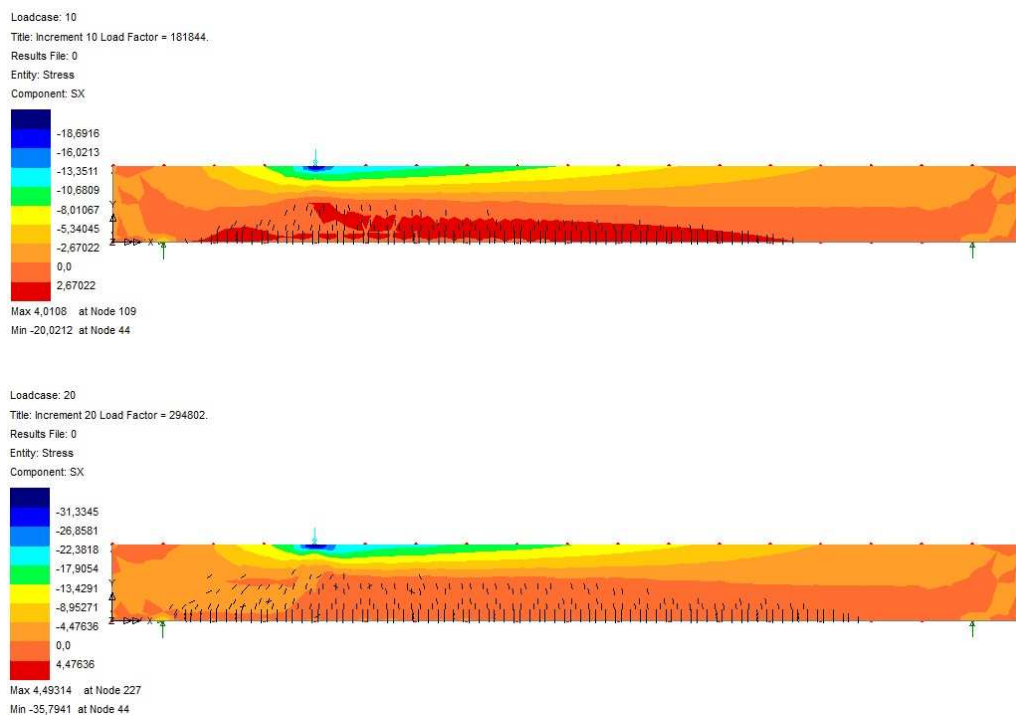


Figura 4.133b: Tensioni σ_x per diversi livello di carico, trave A.02

Nelle figure 4.134 - 4.139 si riportano i diagrammi taglio - deformazione corrispondenti ai punti di applicazione degli estensimetri in modo da paragonare le due curve sperimentale e numerica.

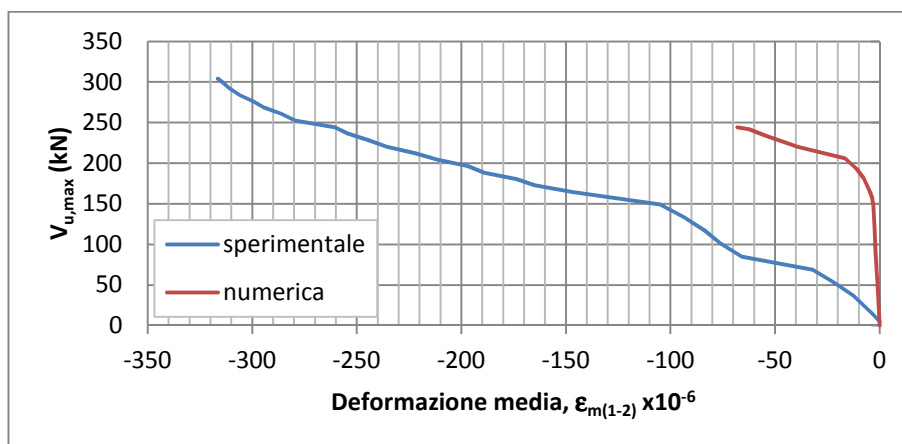


Figura 4.134: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E1/E2, trave A.02

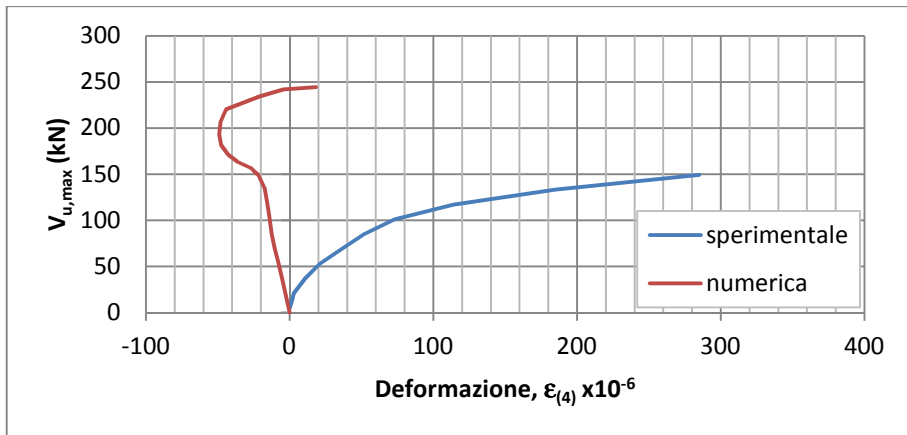


Figura 4.135: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E4, trave A.02

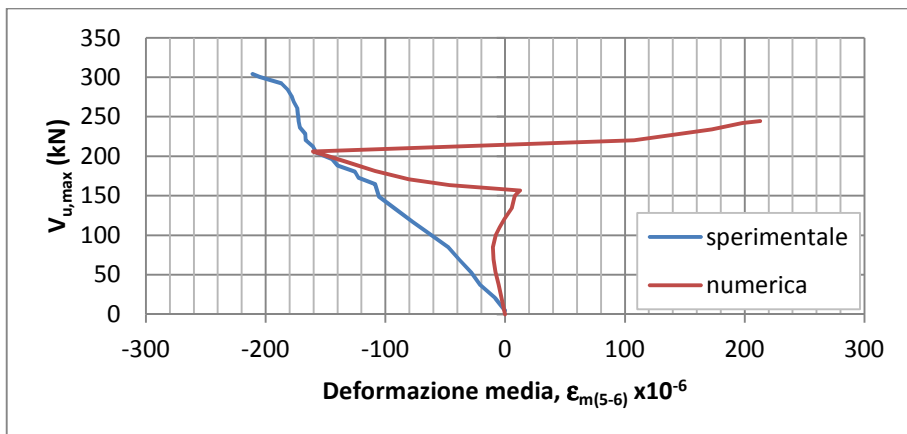


Figura 4.136: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E5/E6, trave A.02

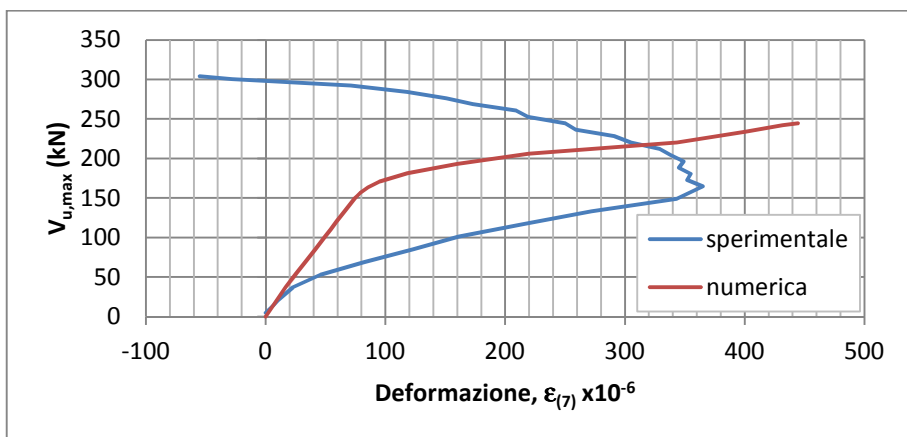


Figura 4.137: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E7, trave A.02

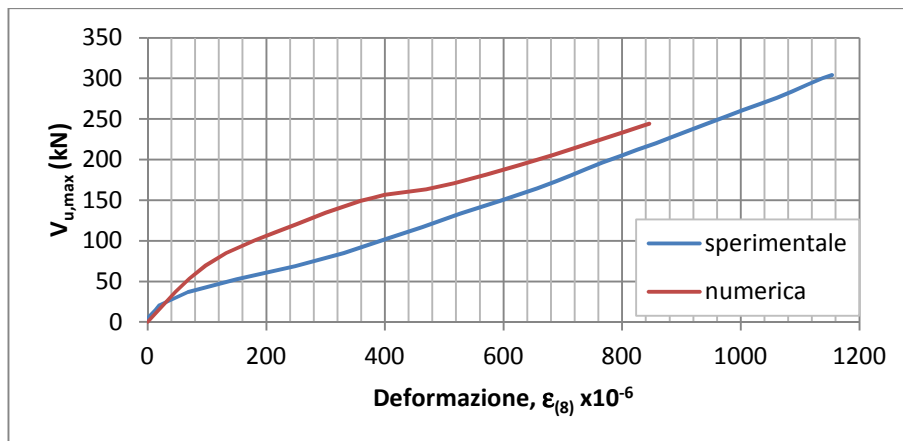


Figura 4.138: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E8, trave A.02

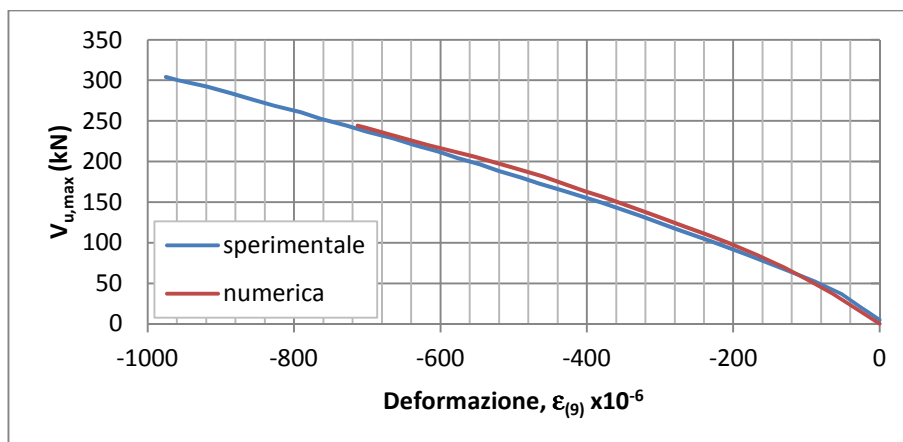


Figura 4.139: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E9, trave A.02

Come si evince dai grafici sopra riportati si nota che la curva numerica non riesce a riprodurre i risultati sperimentali, eccezion fatta per gli estensimetri *E8* ed *E9* caso, quest'ultimo, in cui le due curve sostanzialmente coincidono. Anche nel caso della trave A.01 la curva numerica riesce a riprodurre, per gli estensimetri *E8* ed *E9*, i risultati ottenuti per via sperimentale.

Nella figura 4.140 si riporta la sovrapposizione dei due diagrammi carico - abbassamento del punto sotto il carico ottenuti sperimentalmente e numericamente.

Nella tabella 4.9 si riassumono i risultati ottenuti mettendo a confronto i valori sperimentali, numerici e teorici.

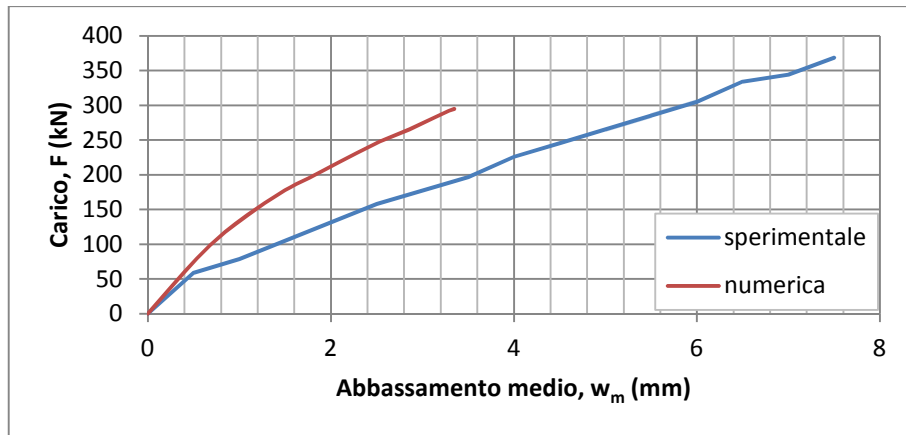


Figura 4.140: Sovrapposizione diagrammi carico - abbassamento, trave A.02

Trave	Valori sperimentali (kN)		Valori numerici (kN)		Valori teorici (kN)		
	F_u	V_u	F_u	V_u	V_R modello 1	V_R modello 2	V_R modello 3
A.02	368,25	304,00	294,80	244,33	166,67	71,13	26,59

Tabella 4.9: Confronto sperimentale - numerico - teorico, trave A.02

Di seguito si riportano le *colormaps* per la **trave A.03**. Sono visualizzate le tensioni nel calcestruzzo (N/mm^2) in direzione X e l'evolversi del quadro fessurativo per tre livelli del carico applicato (figure 4.141a - 4.141b).

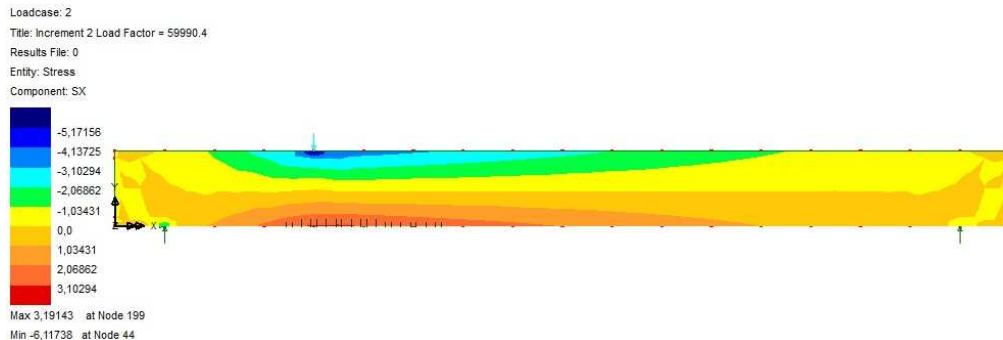


Figura 4.141a: Tensioni σ_x per bassi livello di carico, trave A.03

Per i primi incrementi di carico nell'analisi non lineare la trave si comporta elasticamente, all'aumentare del carico compaiono le prime fessure, da associare alle sollecitazioni flessionali. Per la trave in esame si riscontra uno scostamento dai dati sperimentali, infatti il livello di carico di prima

fessurazione rilevato dalla prova sperimentale è di 40 kN rispetto ai 60 kN rilevati dall'analisi numerica.

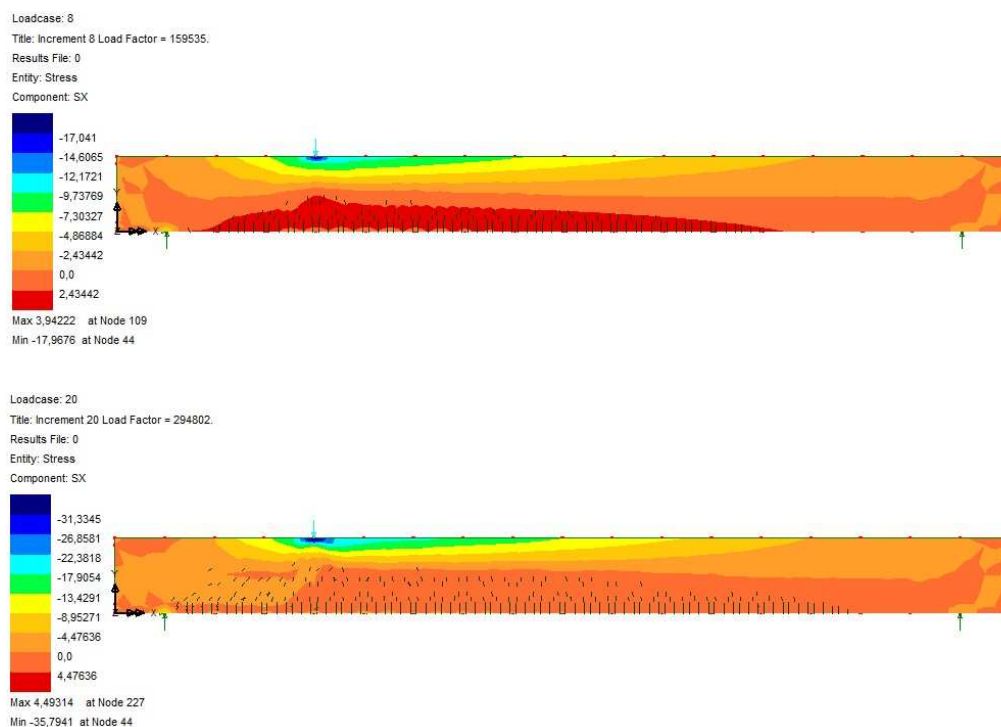


Figura 4.141b: Tensioni σ_x per diversi livello di carico, trave A.03

All'aumentare del carico si manifestano le prime fessure da taglio, senza apprezzabili differenze dei dati numerici da quelli sperimentali. In corrispondenza della rottura si riscontra la formazione di una zona compressa, compresa tra l'appoggio e il carico, che rappresenta proprio la formazione delle bielle compresse (figura 4.141b).

Nelle figure 4.142 - 4.148 si riportano i diagrammi taglio - deformazione corrispondenti ai punti di applicazione degli estensimetri in modo da paragonare le due curve sperimentale e numerica. Dai confronti si vede come le curve numeriche riproducono quelle sperimentali per bassi valori di carico, mentre divergono da esse per livelli superiori di carico. Anche per questa trave, così come per le due precedenti, la curva numerica riesce a riprodurre con buona approssimazione, per gli estensimetri *E8* ed *E9*, i risultati ottenuti per via sperimentale.

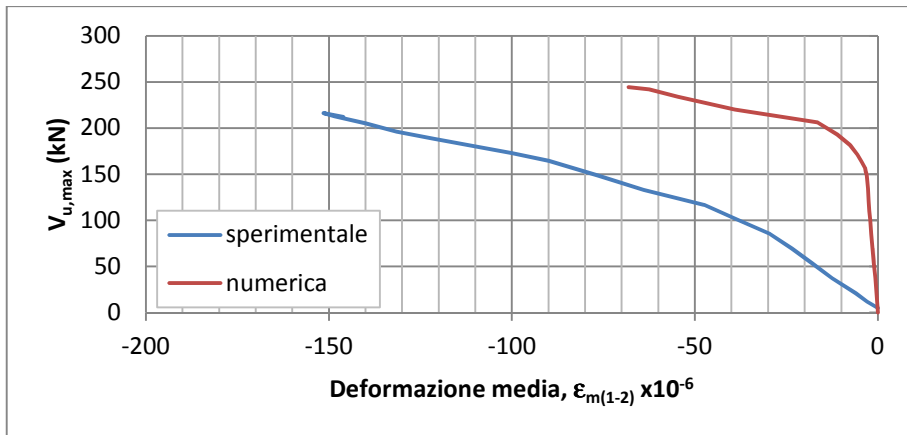


Figura 4.142: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E1/E2, trave A.03

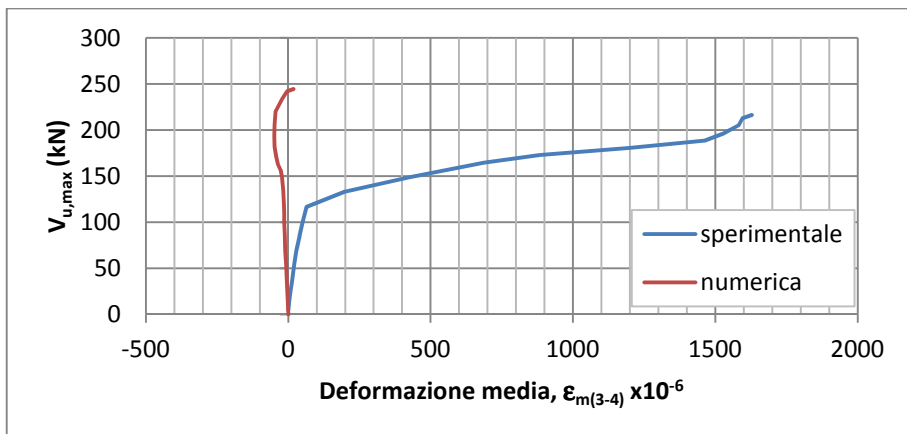


Figura 4.143: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E3/E4, trave A.03

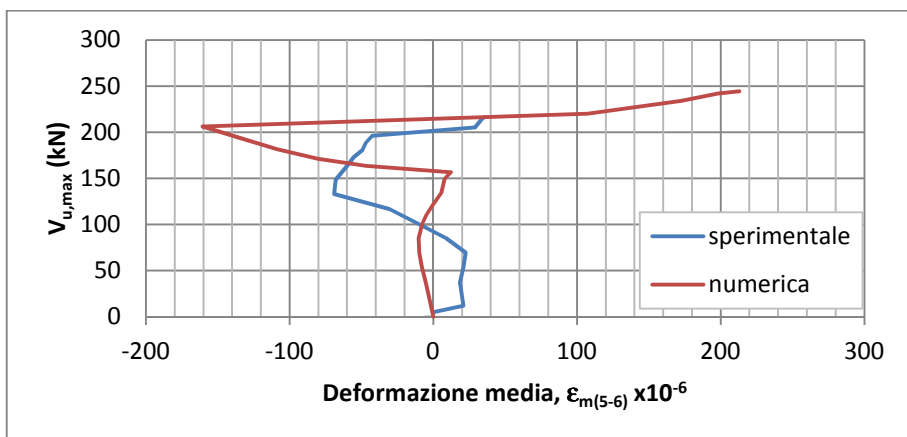


Figura 4.144: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E5/E6, trave A.03

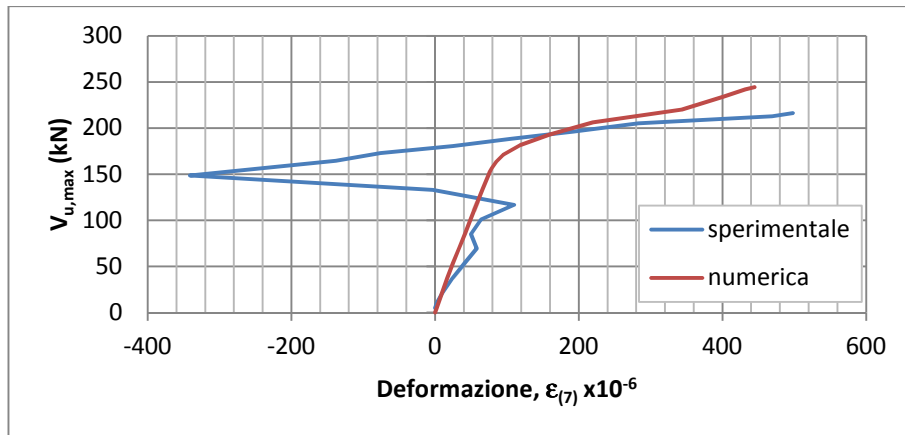


Figura 4.145: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E7, trave A.03

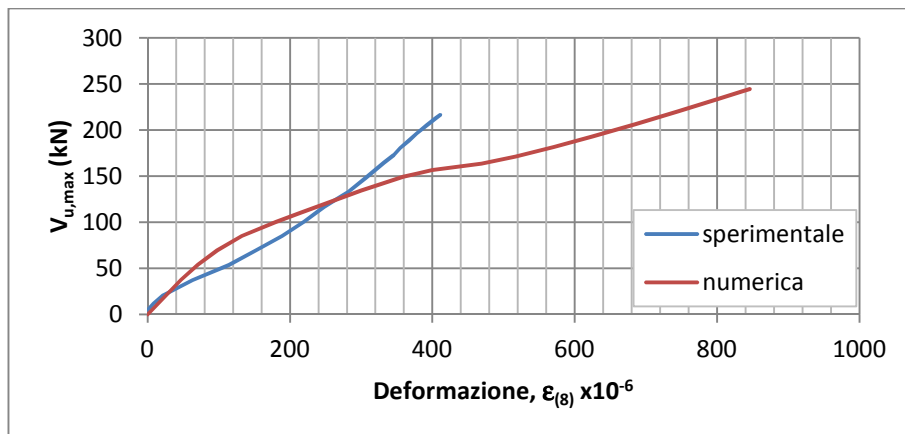


Figura 4.146: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E8, trave A.03

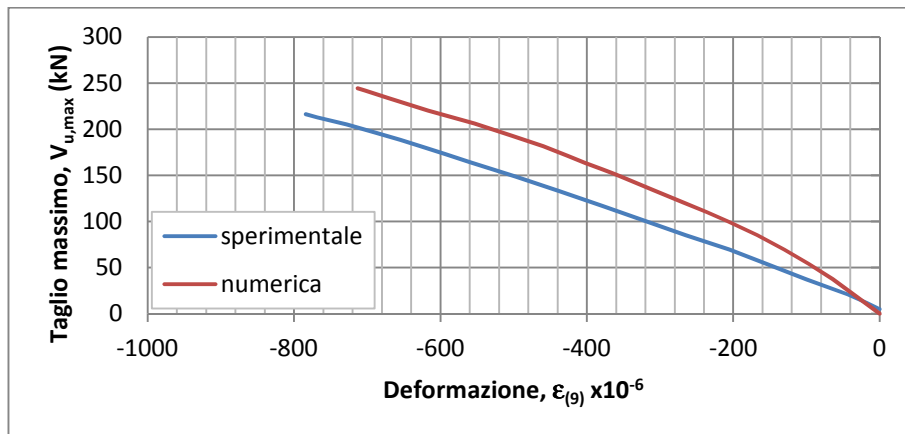


Figura 4.147: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E9, trave A.03

Nella figura 4.148 si riporta la sovrapposizione dei due diagrammi carico - abbassamento del punto sotto il carico ottenuti sperimentalmente e numericamente.

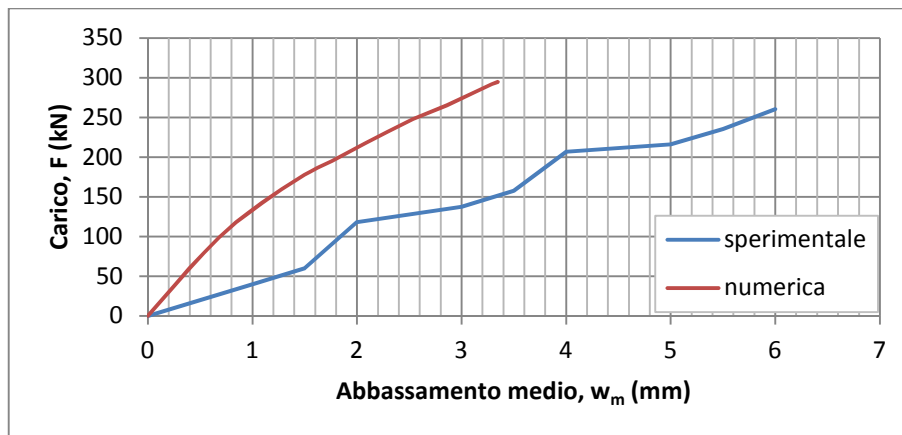


Figura 4.148: Sovrapposizione diagrammi carico - abbassamento, trave A.03

Dal confronto si evince come, per questa trave, la soluzione numerica sovrastimi il carico ultimo rispetto a quello rilevato sperimentalmente; inoltre, la curva evidenzia un comportamento più rigido rispetto a quello reale.

Nella tabella 4.10 si riassumono i risultati ottenuti mettendo a confronto i valori sperimentali, numerici e teorici.

Trave	Valori sperimentali (kN)		Valori numerici (kN)		Valori teorici (kN)		
	F_u	V_u	F_u	V_u	V_R modello 1	V_R modello 2	V_R modello 3
A.03	260,21	216,22	294,80	244,33	166,67	71,13	26,59

Tabella 4.10: Confronto sperimentale - numerico - teorico, trave A.03

Di seguito si riportano le *colormaps* per la **trave B.01**. Sono visualizzate le tensioni nel calcestruzzo (N/mm^2) in direzione X e l'evolversi del quadro fessurativo per tre livelli del carico applicato (figura 4.149). Nel modello numerico, le prime fessure si manifestano per un valore del carico di circa 64kN, quasi coincidente col valore sperimentale di 60kN. Anche per la formazione delle fessure da taglio si registra una pratica coincidenza dei due valori numerico e sperimentale (170kN). Per quanto concerne invece il carico di rottura, l'analisi numerica sottostima il valore effettivamente registrato: 300,84kN rispetto a 493,69kN.

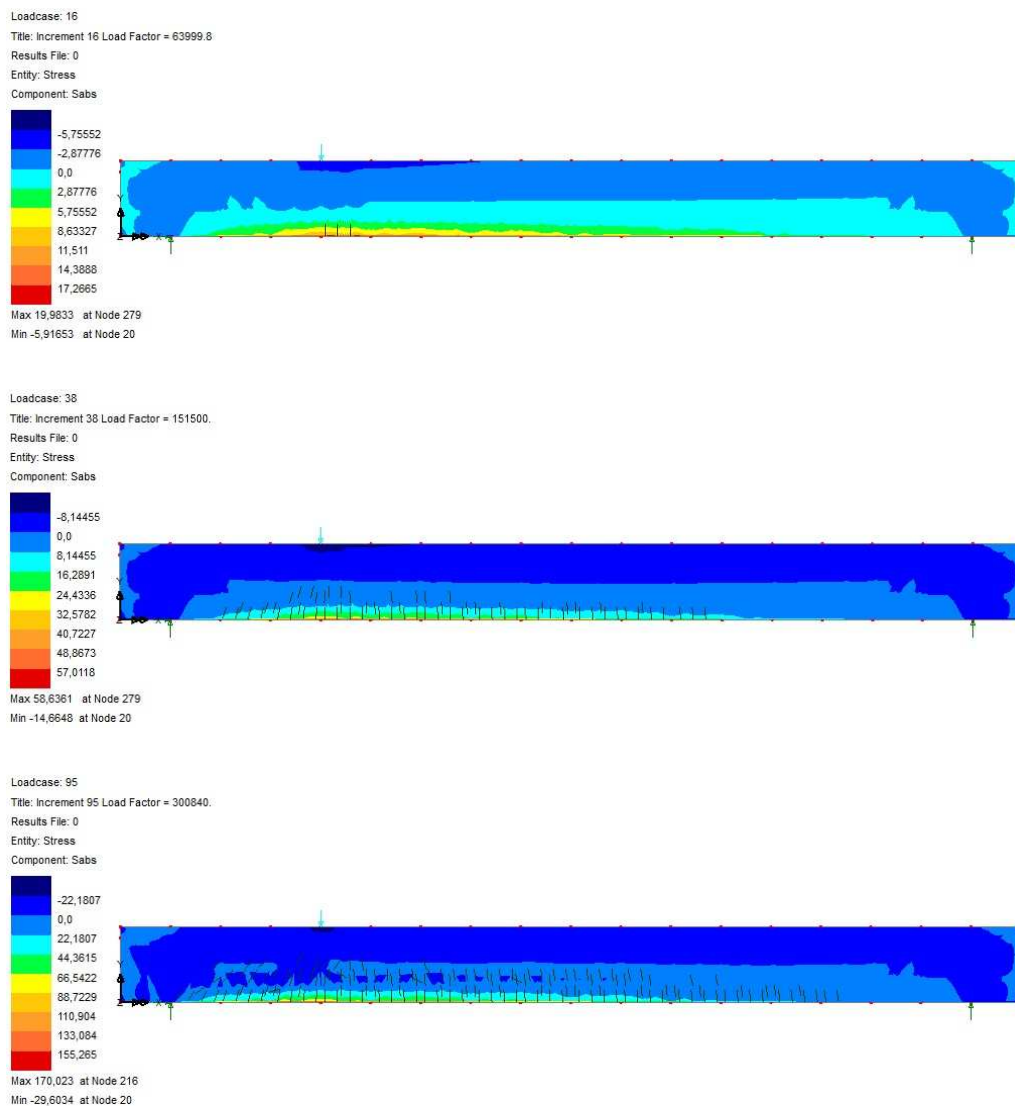


Figura 4.149: Tensioni σ_x per tre livelli di carico, trave B.01

Nelle figure 4.150 - 4.156 si riportano i diagrammi taglio - deformazione corrispondenti ai punti di applicazione degli estensimetri in modo da paragonare le due curve sperimentale e numerica. Dai confronti si vede come le curve numeriche riproducono quelle sperimentali per bassi valori di carico, mentre divergono da esse per livelli superiori di carico. Anche per questa trave la curva numerica riesce a riprodurre con buona approssimazione, per gli estensimetri $E8$ ed $E9$, i risultati ottenuti per via sperimentale.

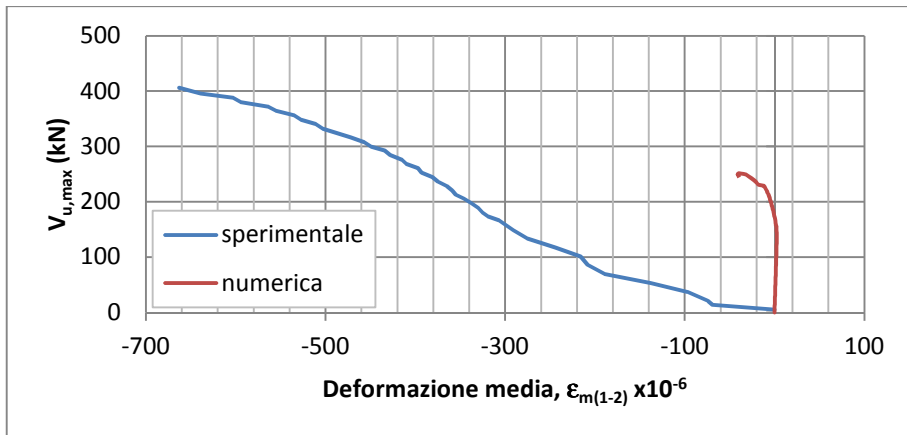


Figura 4.150: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E1/E2, trave B.01

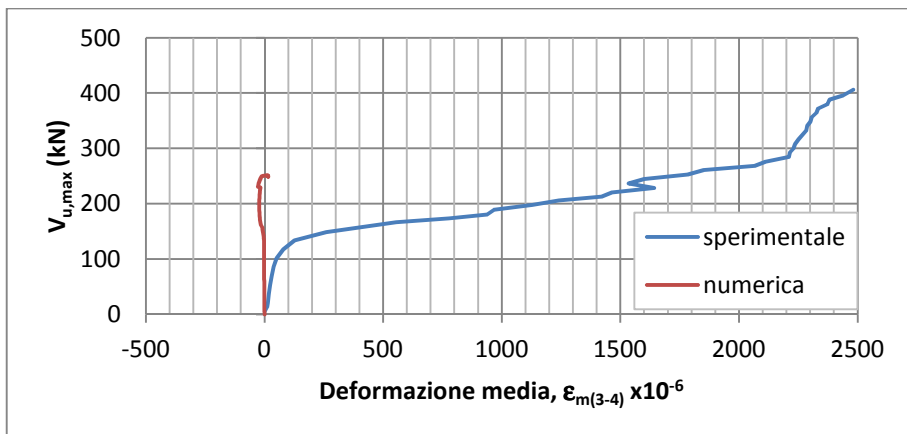


Figura 4.151: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E3/E4, trave B.01

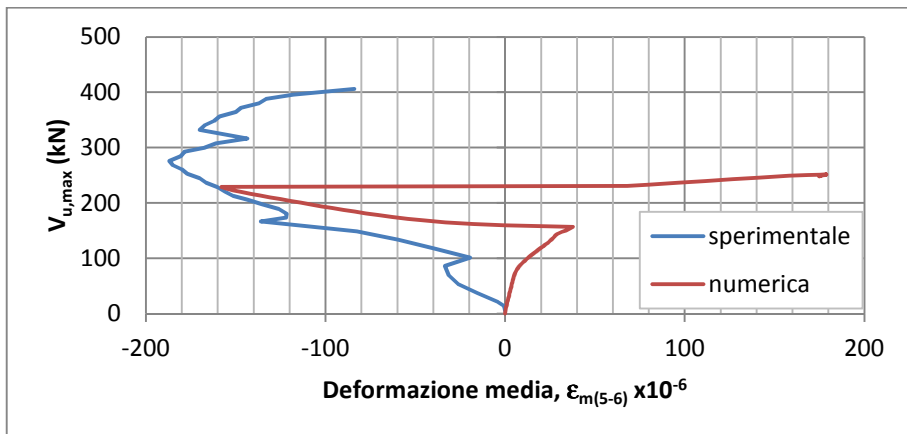


Figura 4.152: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E5/E6, trave B.01

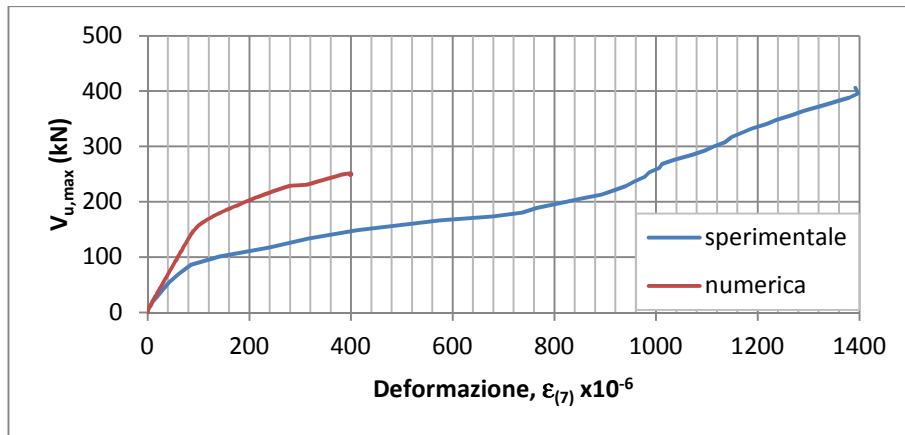


Figura 4.153: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E7, trave B.01

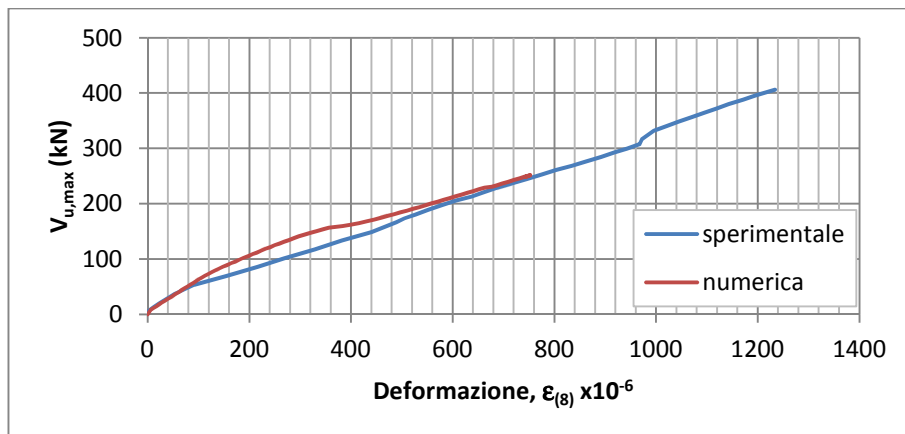


Figura 4.154: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E8, trave B.01

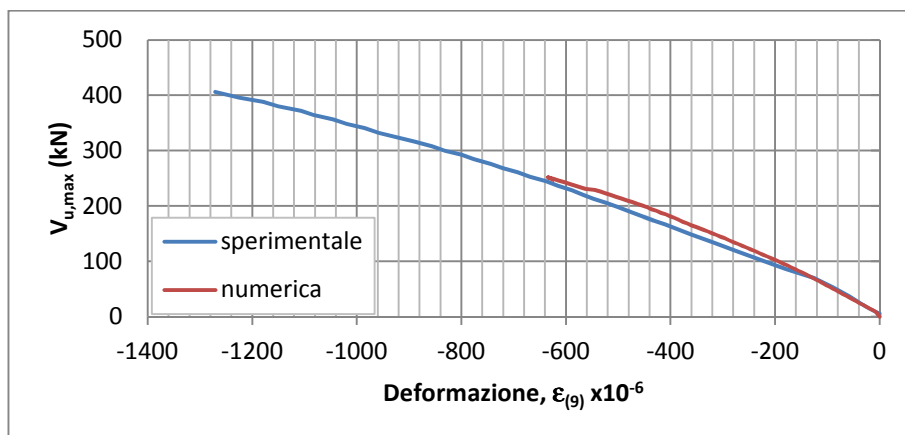


Figura 4.155: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E9, trave B.01

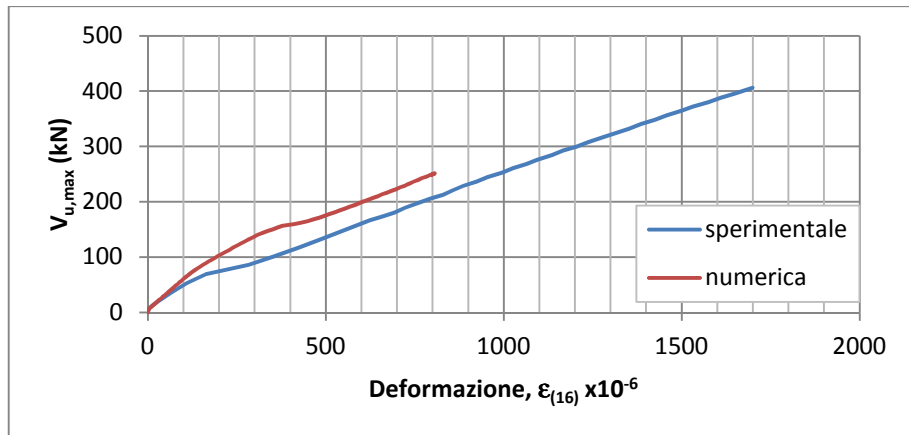


Figura 4.156: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E16, trave B.01

Nella figura 4.157 si riporta la sovrapposizione dei due diagrammi carico - abbassamento del punto sotto il carico ottenuti sperimentalmente e numericamente. Anche in questo caso la curva numerica esprime un comportamento più rigido di quello reale.

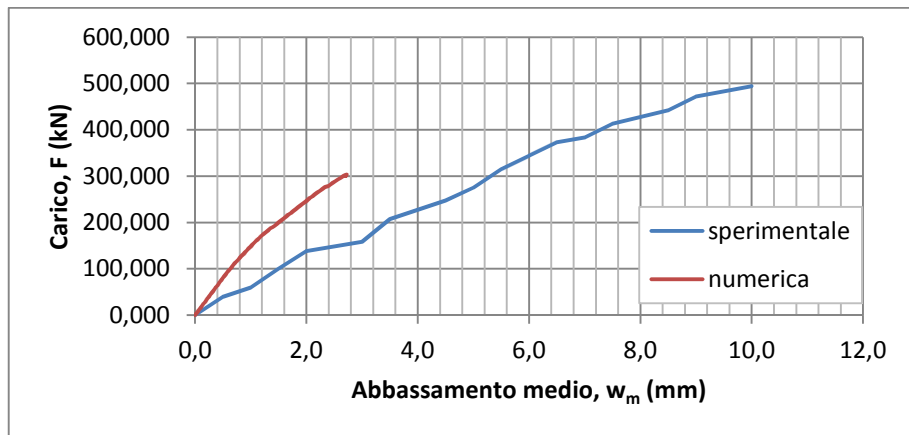


Figura 4.157: Sovrapposizione diagrammi carico - abbassamento, trave B.01

Nella tabella 4.11 si riassumono i risultati ottenuti mettendo a confronto i valori sperimentali, numerici e teorici.

Trave	Valori sperimentali (kN)		Valori numerici (kN)		Valori teorici (kN)		
	F_u	V_u	F_u	V_u	V_R modello 1	V_R modello 2	V_R modello 3
B.01	493,69	405,92	300,84	249,23	178,90	99,96	34,48

Tabella 4.11: Confronto sperimentale - numerico - teorico, trave B.01

Di seguito si riportano le *colormaps* per la **trave B.02**. Sono visualizzate le tensioni nel calcestruzzo (N/mm^2) in direzione X e l'evolversi del quadro fessurativo per tre livelli del carico applicato (figura 4.158).

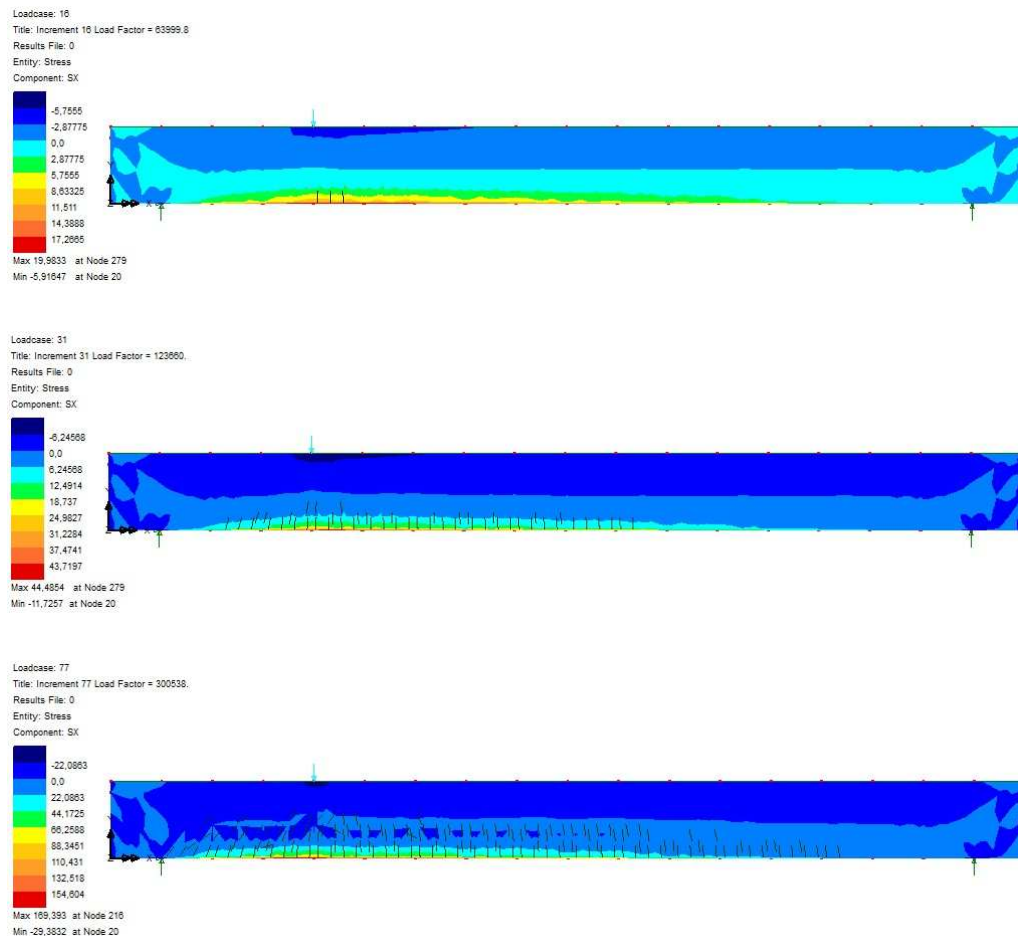


Figura 4.158: Tensioni σ_x per tre livelli di carico, trave B.02

Anche in questo caso il modello numerico riesce a cogliere il valore di prima fessurazione (circa 64kN) e il valore di formazione delle prime fessure diagonali da taglio (circa 123kN). Per quanto concerne il valore di rottura l'analisi si arresta al valore di 300,54kN rispetto al valore sperimentale di 491,48kN.

Nelle figure 4.159 - 4.165 si riportano i diagrammi taglio - deformazione corrispondenti ai punti di applicazione degli estensimetri in modo da paragonare le due curve sperimentale e numerica.

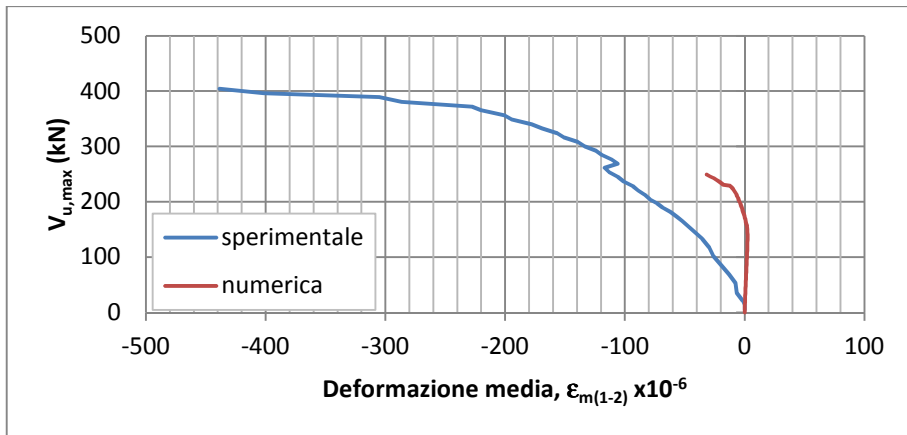


Figura 4.159: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E1/E2, trave B.02

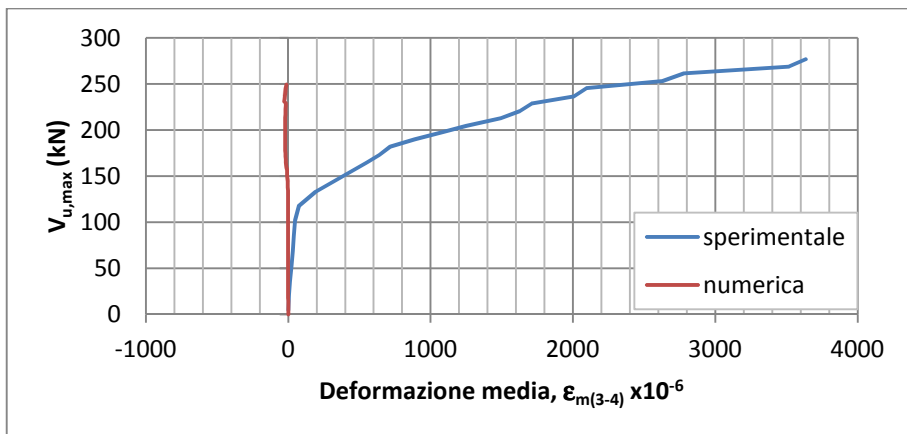


Figura 4.160: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E3/E4, trave B.02

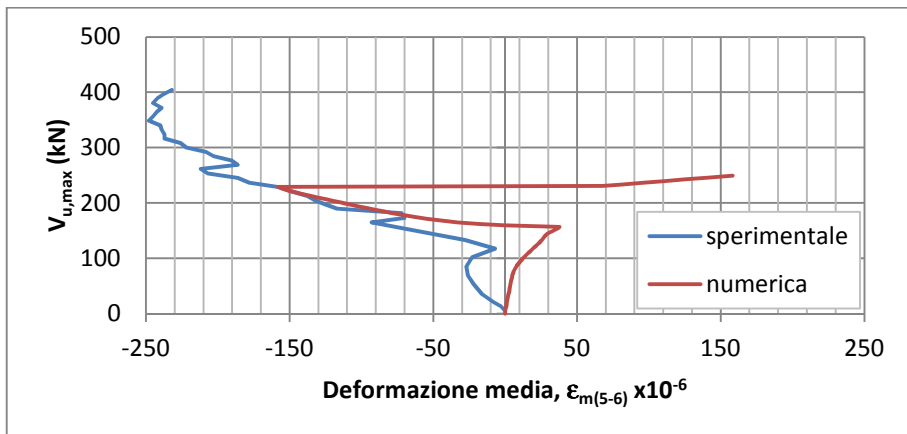


Figura 4.161: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E5/E4, trave B.02

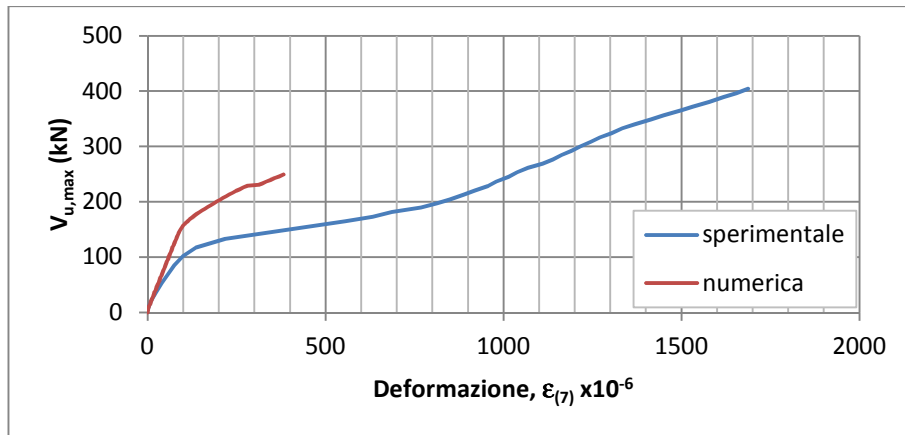


Figura 4.162: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E7, trave B.02

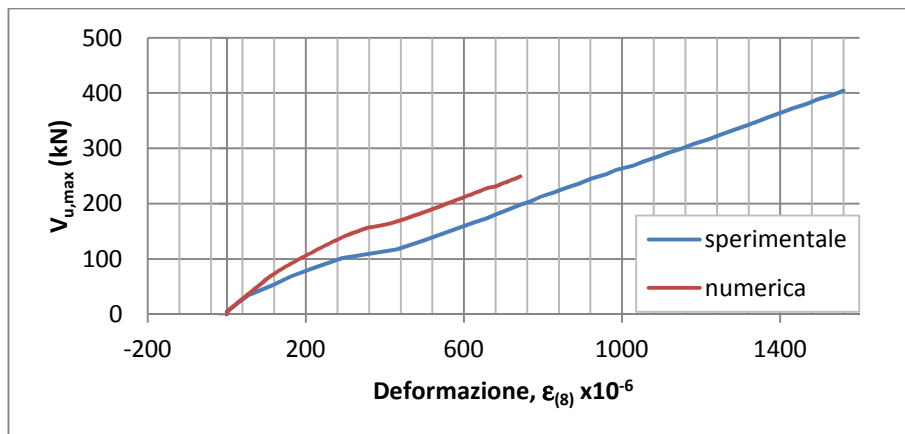


Figura 4.163: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E8, trave B.02

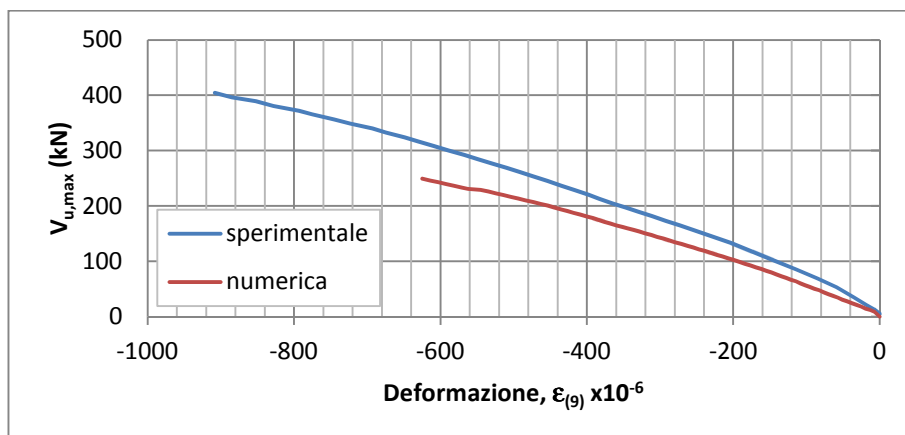


Figura 4.164: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E9, trave B.02

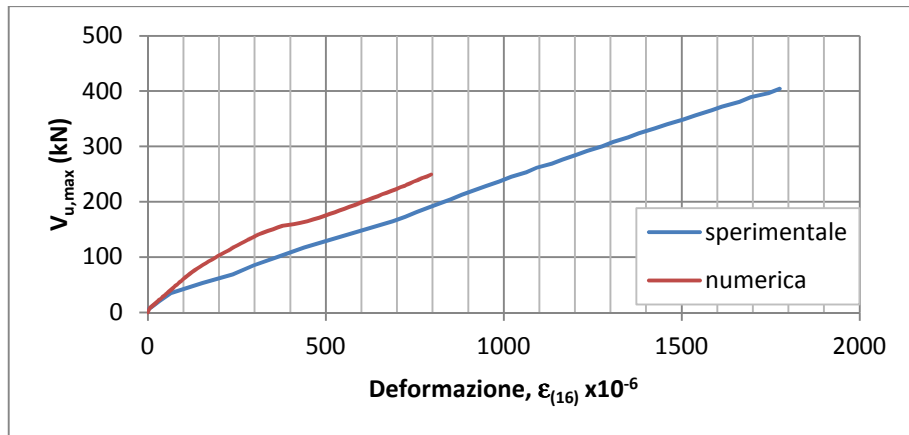


Figura 4.165: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E16, trave B.02

Le curve riproducono bene l'andamento sperimentale negli ultimi tre casi, mentre si discostano dal comportamento reale negli altri casi.

Nella figura 4.166 si riporta la sovrapposizione dei due diagrammi carico - abbassamento del punto sotto il carico ottenuti sperimentalmente e numericamente. Anche in questo caso la curva numerica esprime un comportamento più rigido di quello reale.

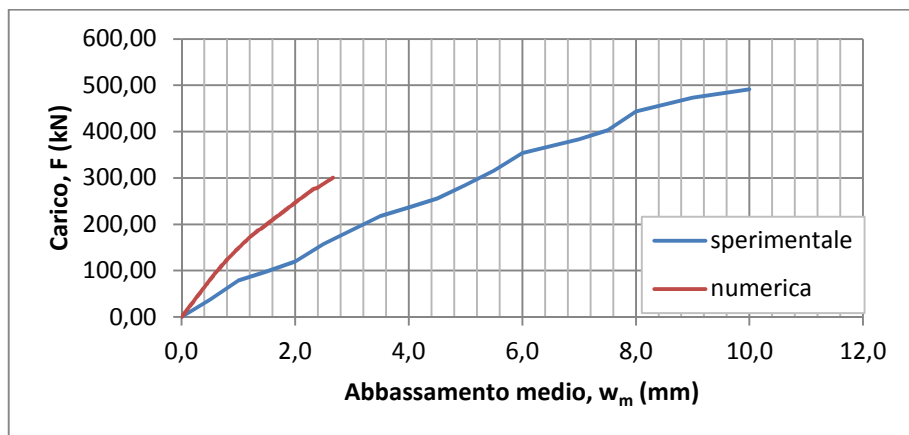


Figura 4.166: Sovrapposizione diagrammi carico - abbassamento, trave B.02

Nella tabella 4.12 si riassumono i risultati ottenuti mettendo a confronto i valori sperimentali, numerici e teorici.

Trave	Valori sperimentali (kN)		Valori numerici (kN)		Valori teorici (kN)		
	F_u	V_u	F_u	V_u	V_R modello 1	V_R modello 2	V_R modello 3
B.02	491,48	404,13	300,54	248,99	168,20	77,09	26,59

Tabella 4.12: Confronto sperimentale - numerico - teorico, trave B.02

Di seguito si riportano le *colormaps* per la **trave B.03**. Sono visualizzate le tensioni nel calcestruzzo (N/mm^2) in direzione X e l'evolversi del quadro fessurativo per tre livelli del carico applicato (figura 4.167).

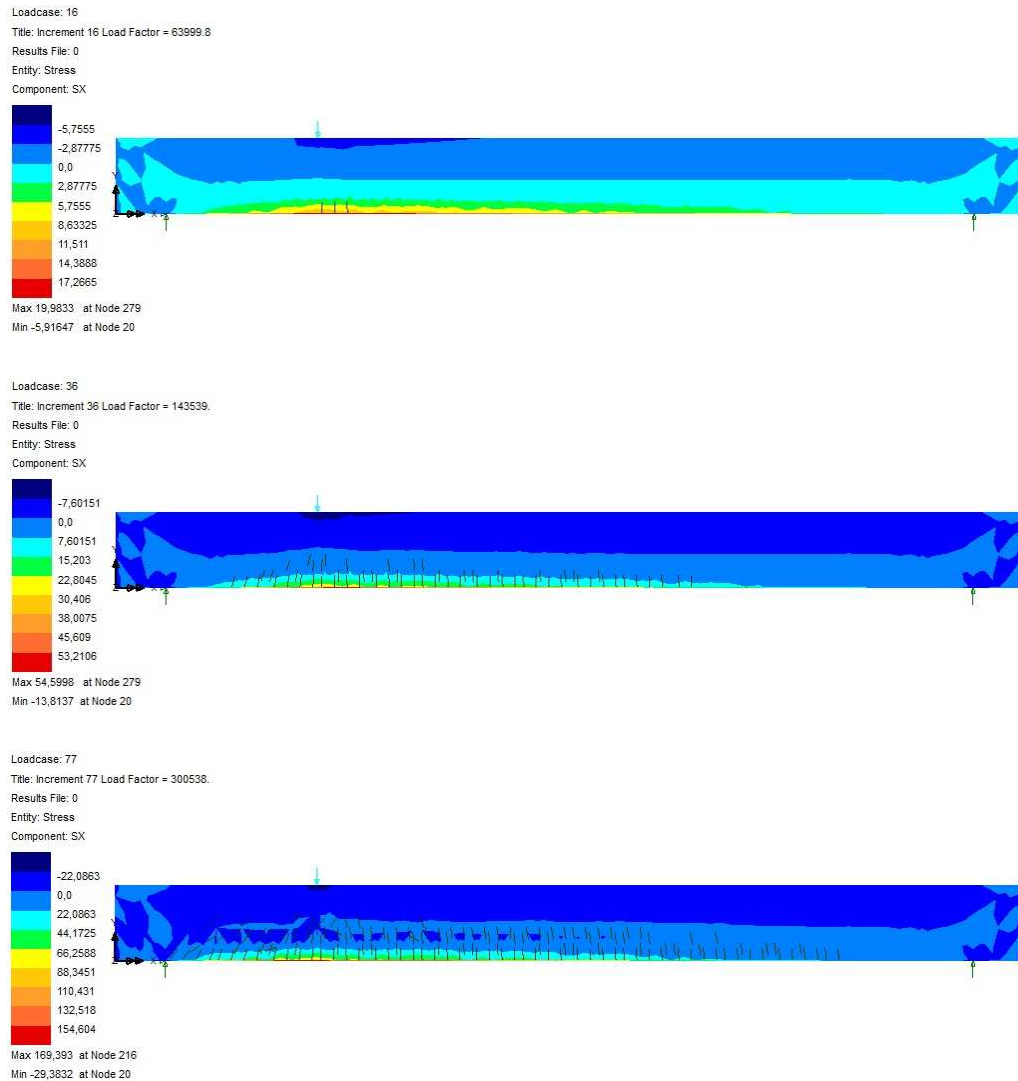


Figura 4.167: Tensioni σ_x per tre livelli di carico, trave B.03

In questo caso il modello numerico non riesce a cogliere il valore di prima fessurazione, circa 64kN dell'analisi numerica a fronte di circa 90kN rilevato sperimentalmente, e il valore di formazione delle prime fessure diagonali da taglio, circa 143kN dell'analisi numerica rispetto a circa 280kN osservato sperimentalmente. Per quanto concerne il valore di rottura l'analisi si arresta al valore di 300,54kN, di molto inferiore al valore sperimentale di 432,26kN. Nelle figure 4.168 - 4.174 si riportano i diagrammi taglio - deformazione corrispondenti ai punti di applicazione degli estensimetri in modo da paragonare le due curve sperimentale e numerica. Le curve riproducono bene l'andamento sperimentale negli ultimi tre casi, mentre, negli altri casi, approssimano il comportamento reale solo per bassi valori del carico.

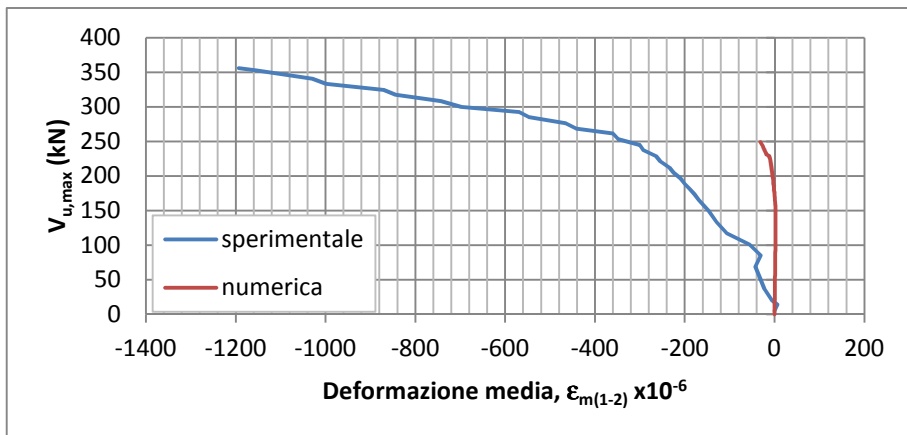


Figura 4.168: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E1/E2, trave B.03

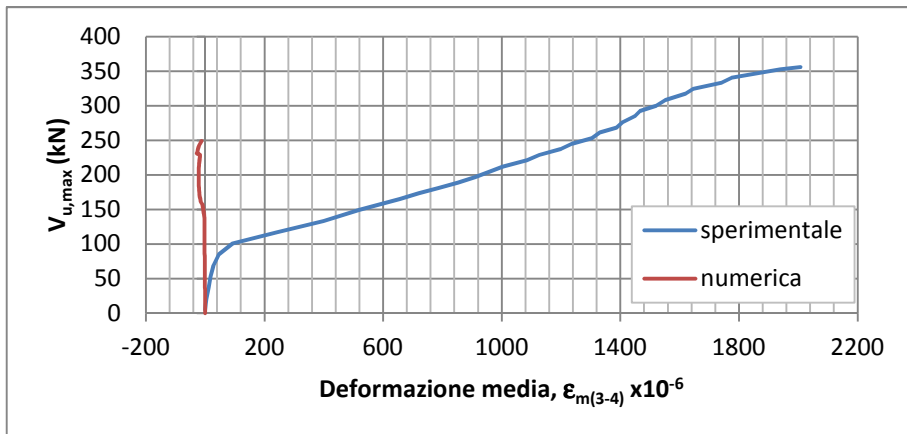


Figura 4.169: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E3/E4, trave B.03

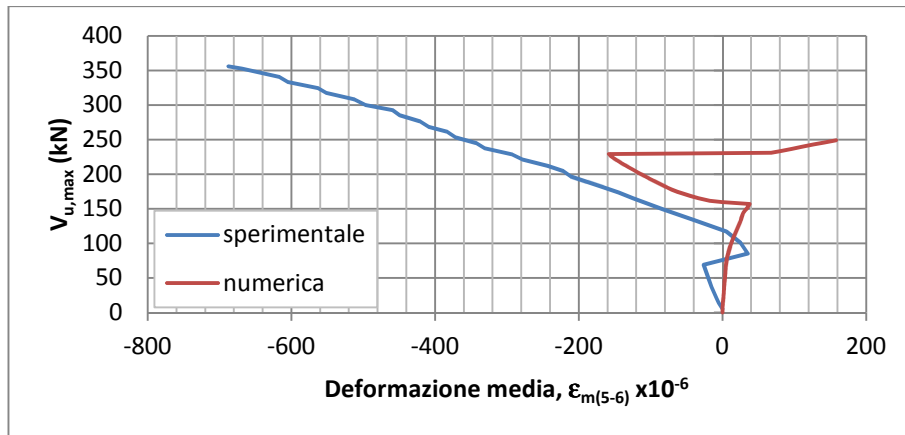


Figura 4.170: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E5/E6, trave B.03

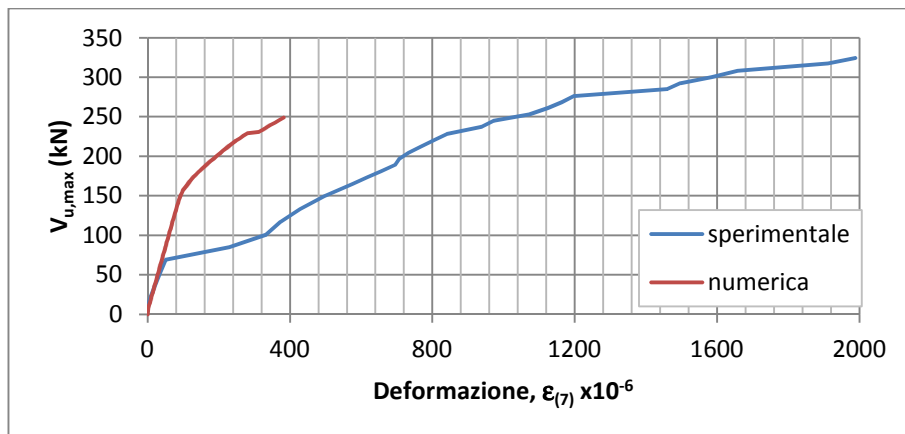


Figura 4.171: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E7, trave B.03

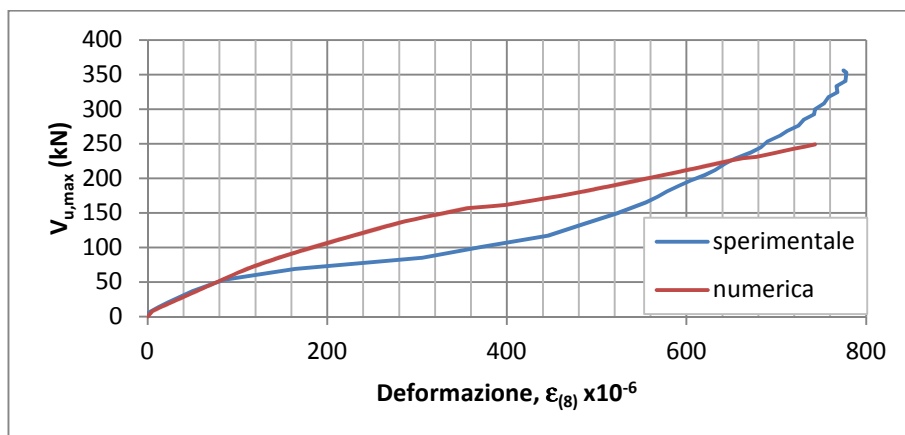


Figura 4.172: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E8, trave B.03

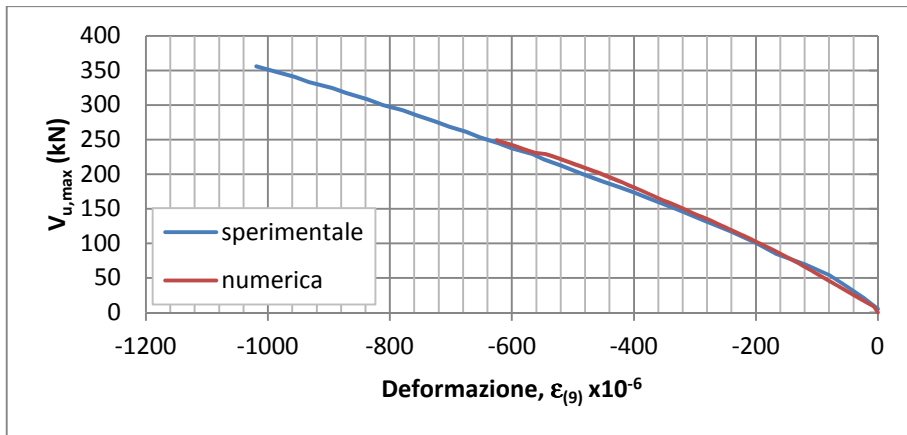


Figura 4.173: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E9, trave B.03

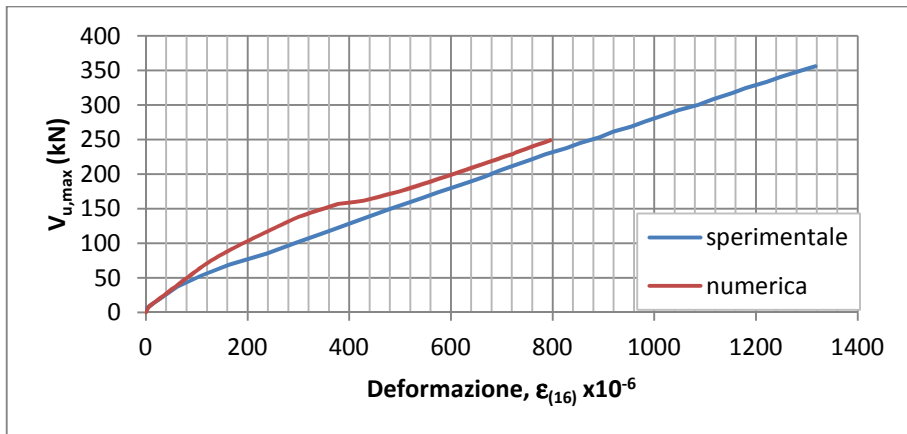


Figura 4.174: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E16, trave B.03

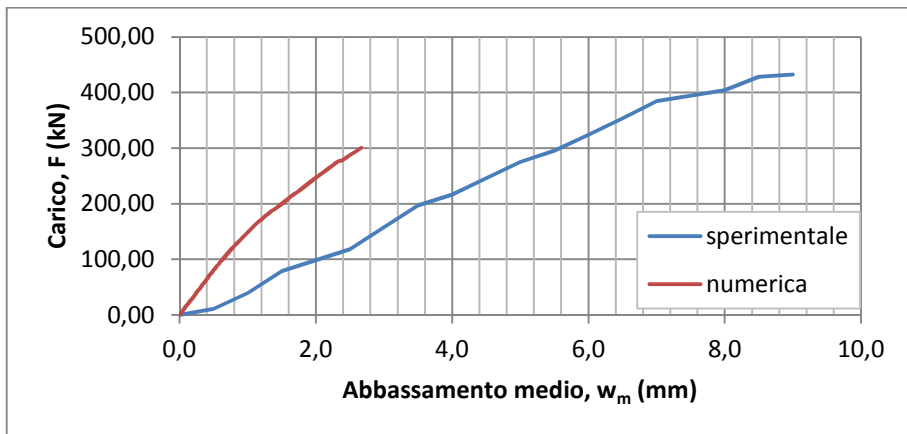


Figura 4.175: Sovrapposizione diagrammi carico - abbassamento, trave B.03

Nella figura 4.175 si riporta la sovrapposizione dei due diagrammi carico - abbassamento del punto sotto il carico ottenuti sperimentalmente e numericamente. Anche in questo caso la curva numerica esprime un comportamento più rigido rispetto a quello rilevato sperimentalmente.

Nella tabella 4.13 si riassumono i risultati ottenuti mettendo a confronto i valori sperimentali, numerici e teorici.

Trave	Valori sperimentali (kN)		Valori numerici (kN)		Valori teorici (kN)		
	F_u	V_u	F_u	V_u	V_R modello 1	V_R modello 2	V_R modello 3
B.03	432,26	356,01	300,54	248,99	168,20	77,09	26,59

Tabella 4.13: Confronto sperimentale - numerico - teorico, trave B.03

Di seguito si riportano le *colormaps* per la trave C.01. Sono visualizzate le tensioni nel calcestruzzo (N/mm^2) in direzione X e l'evolversi del quadro fessurativo per tre livelli del carico applicato (figure 4.176a - 4.176b).

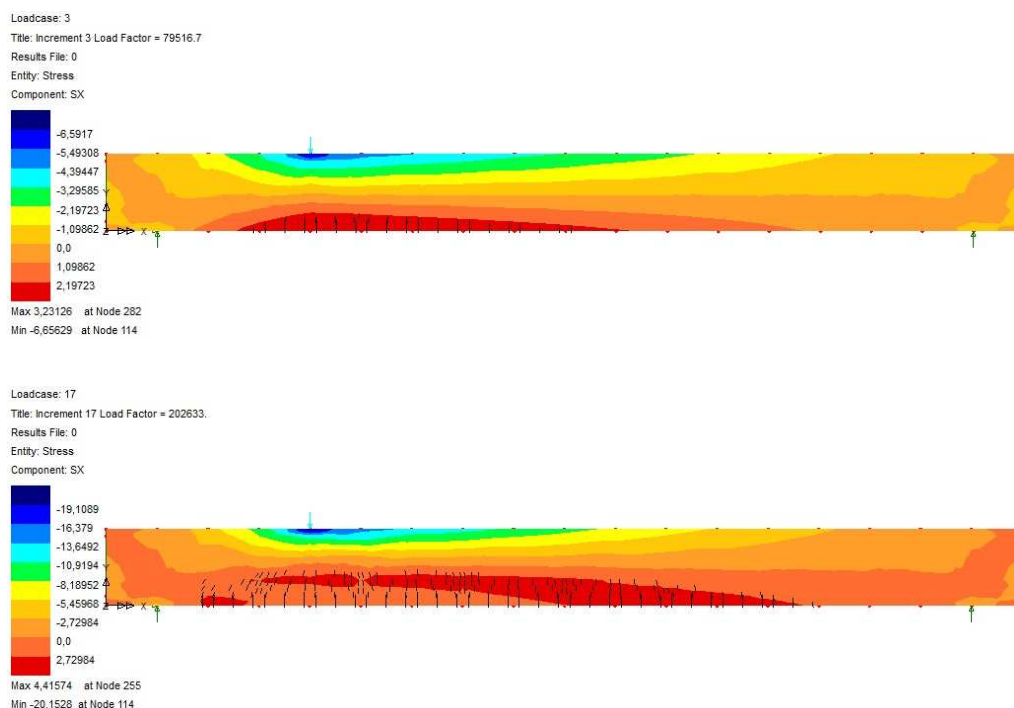


Figura 4.176a: Tensioni σ_x per diversi livello di carico, trave C.01

Le prime fessure rilevate sperimentalmente si sono riscontrate per un valore del carico di circa 40kN rispetto ai circa 60kN dell'analisi numerica.

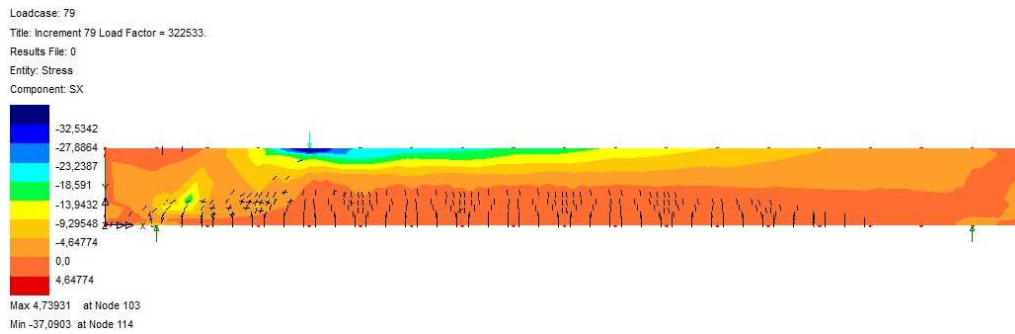


Figura 4.176b: Tensioni σ_x a rottura, trave C.01

Nelle figure 4.177 - 4.182 si riportano i diagrammi taglio - deformazione corrispondenti ai punti di applicazione degli estensimetri in modo da paragonare le due curve sperimentale e numerica.

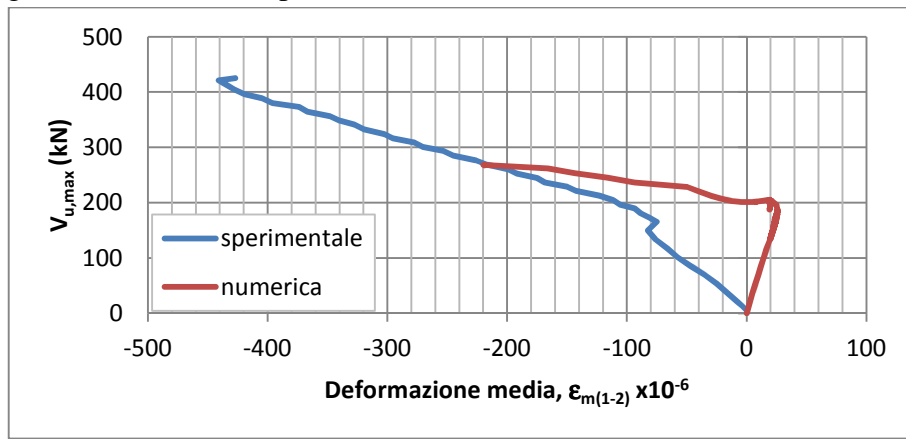


Figura 4.177: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E1/E2, trave C.01

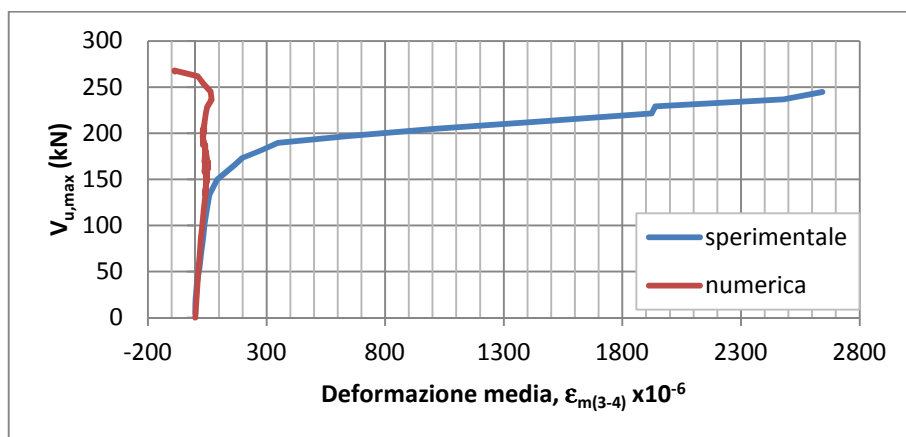


Figura 4.178: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E3/E4, trave C.01

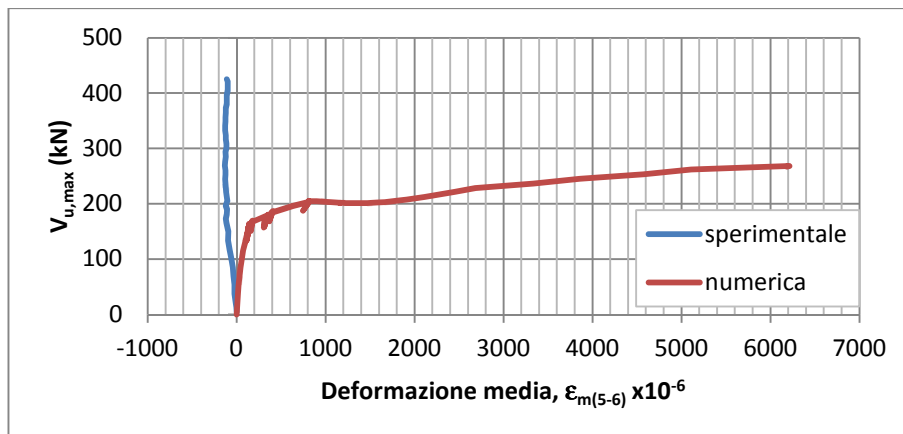


Figura 4.179: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E5/E6, trave C.01

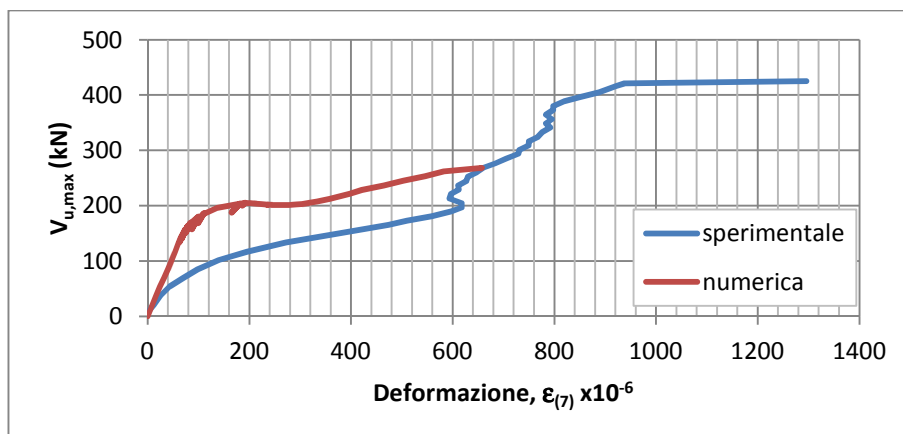


Figura 4.180: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E7, trave C.01

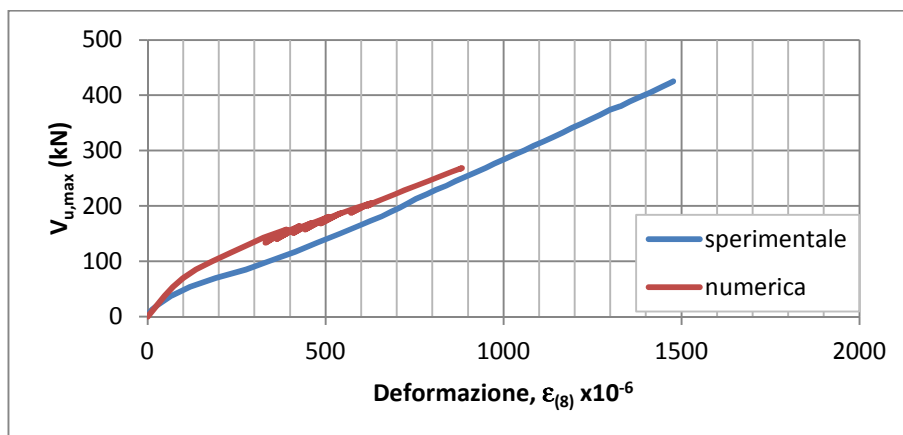


Figura 4.181: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E8, trave C.01

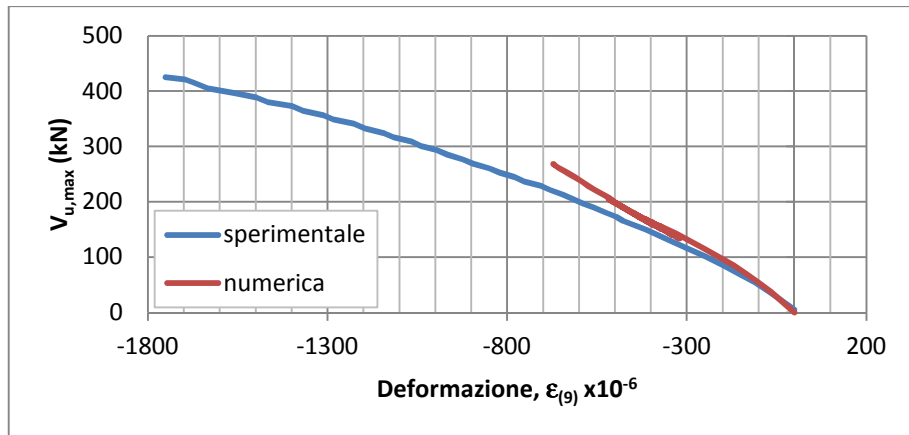


Figura 4.182: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E9, trave C.01

Come si evince dai grafici sopra riportati si nota che la curva numerica non riesce a riprodurre i risultati sperimentali per elevati incrementi di carico, eccezion fatta per gli estensimetri E8 ed E9.

Nella figura 4.183 si riporta la sovrapposizione dei due diagrammi carico - abbassamento del punto sotto il carico ottenuti sperimentalmente e numericamente. Anche in questo caso la curva numerica esprime un comportamento più rigido rispetto a quello rilevato sperimentalmente ed il carico di rottura numerico sottostima di molto quello sperimentale.

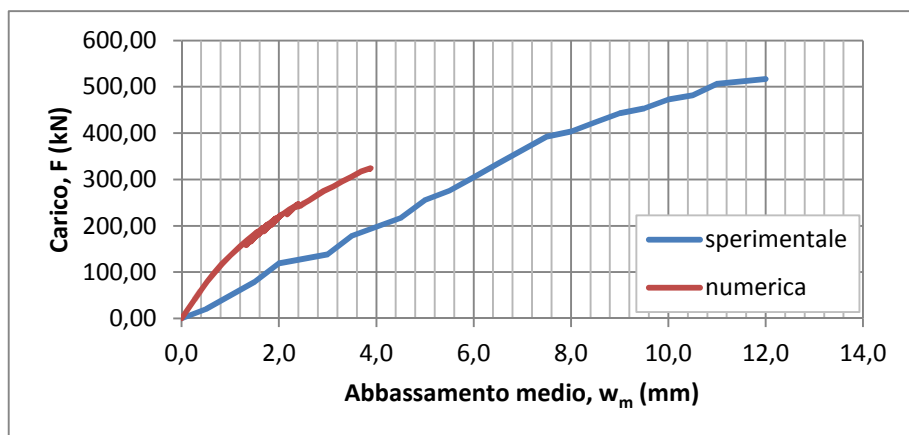


Figura 4.183: Sovrapposizione diagrammi carico - abbassamento, trave C.01

Nella tabella 4.14 si riassumono i risultati ottenuti mettendo a confronto i valori sperimentali, numerici e teorici.

Trave	Valori sperimentali (kN)		Valori numerici (kN)		Valori teorici (kN)		
	F_u	V_u	F_u	V_u	V_R modello 1	V_R modello 2	V_R modello 3
C.01	516,99	424,85	322,53	266,86	180	92	34,48

Tabella 4.14: Confronto sperimentale - numerico - teorico, trave C.01

Di seguito si riportano le *colormaps* per la **trave C.02**. Sono visualizzate le tensioni nel calcestruzzo (N/mm^2) in direzione X e l'evolversi del quadro fessurativo per tre livelli del carico applicato (figura 4.184).

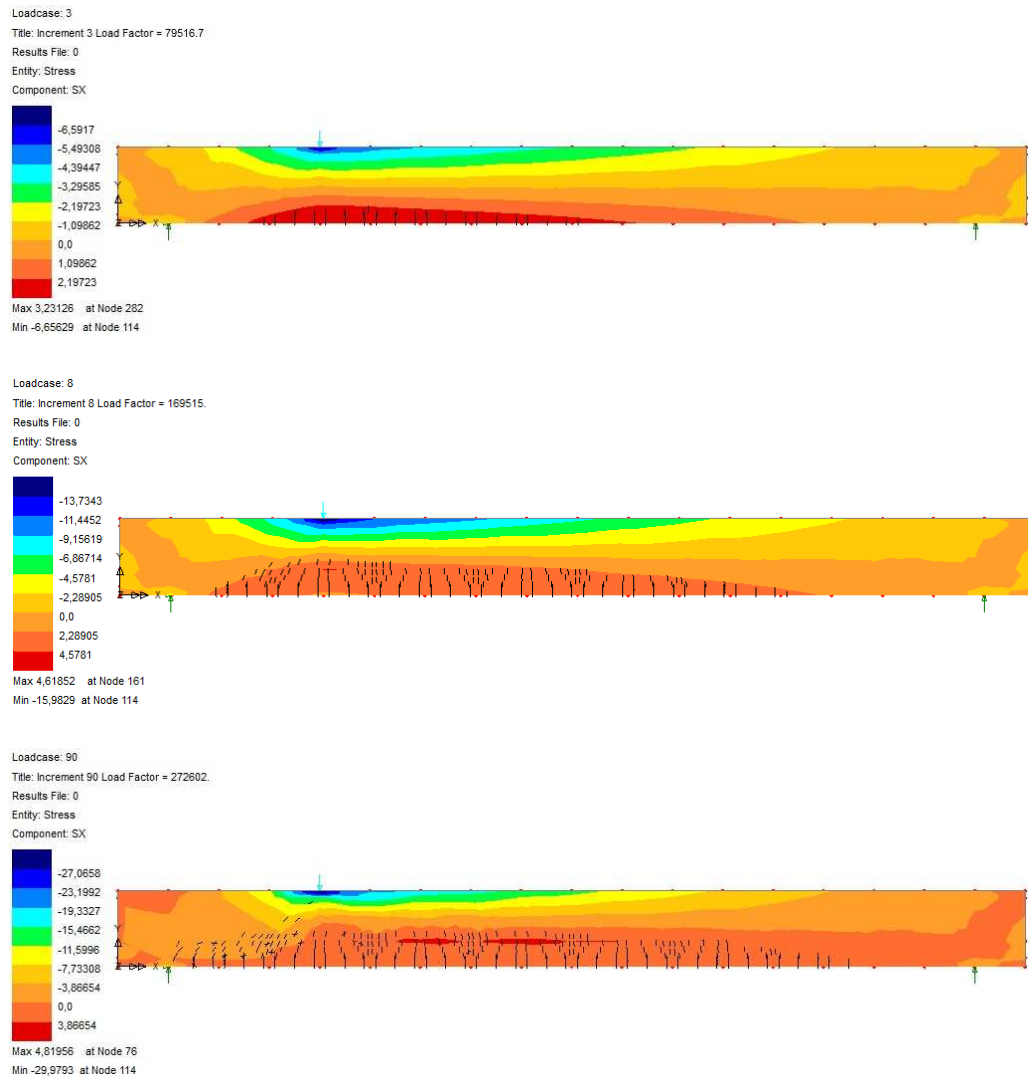


Figura 4.184: Tensioni σ_x per tre livelli di carico, trave C.02

Le prime fessure rilevate sperimentalmente compaiono per un valore del carico di circa 70kN che corrisponde al valore ottenuto dall'analisi non lineare. All'aumentare del carico si manifestano le prime fessure da taglio per valori che approssimano quelli reali. Anche per questa trave il valore numerico di rottura risulta essere inferiore a quello sperimentalmente, anche se lo scostamento è minore rispetto alla trave precedente.

Nelle figure 4.185 - 4.190 si riportano i diagrammi taglio - deformazione corrispondenti ai punti di applicazione degli estensimetri in modo da paragonare le due curve sperimentale e numerica.

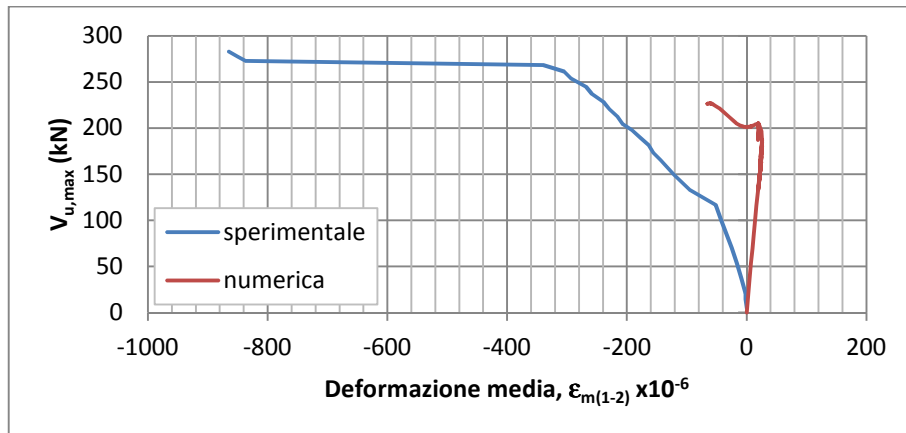


Figura 4.185: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E1/E2, trave C.02

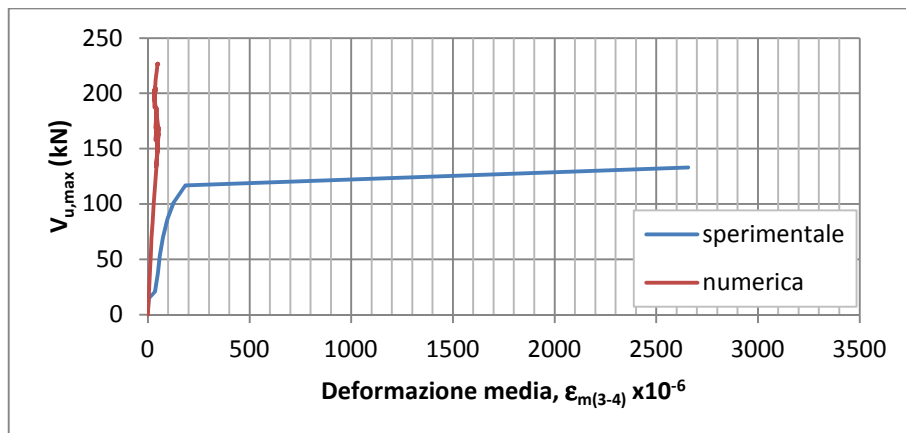


Figura 4.186: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E3/E4, trave C.02

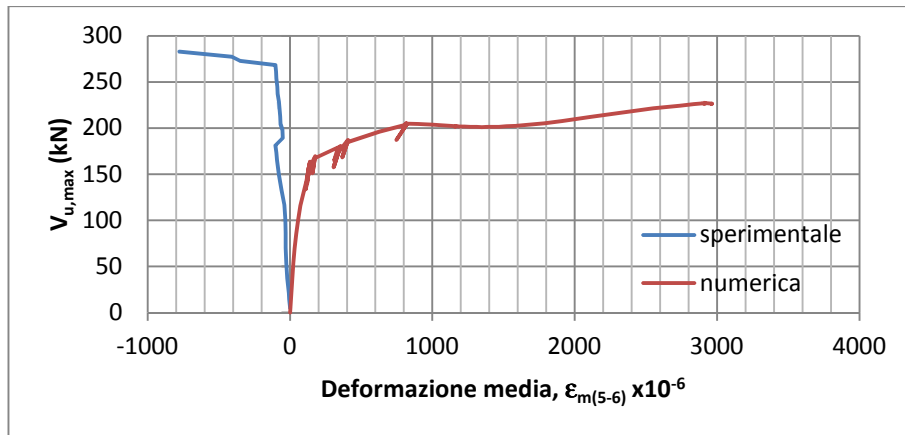


Figura 4.187: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E5/E6, trave C.02

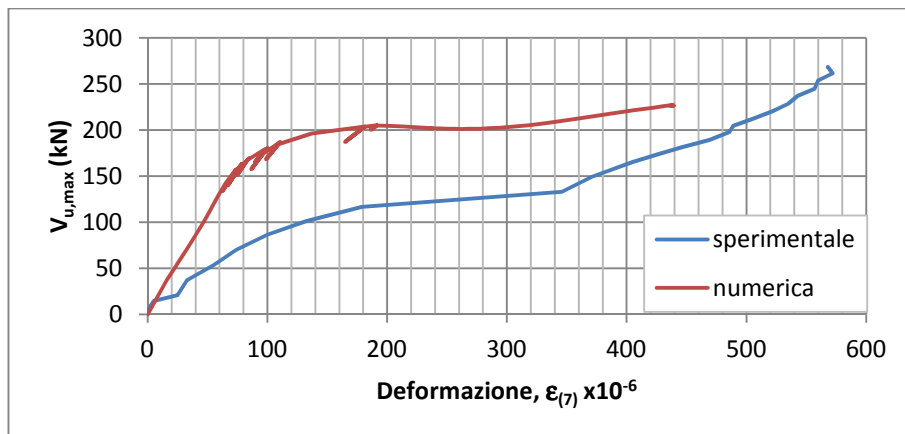


Figura 4.188: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E7, trave C.02

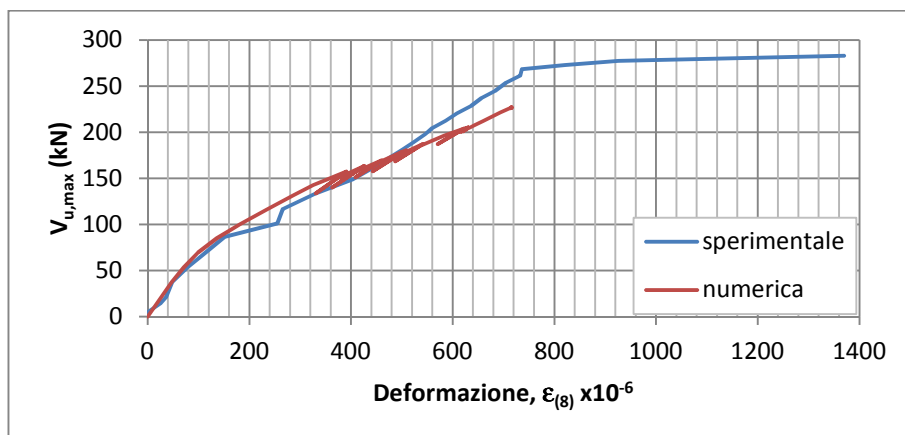


Figura 4.189: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E8, trave C.02

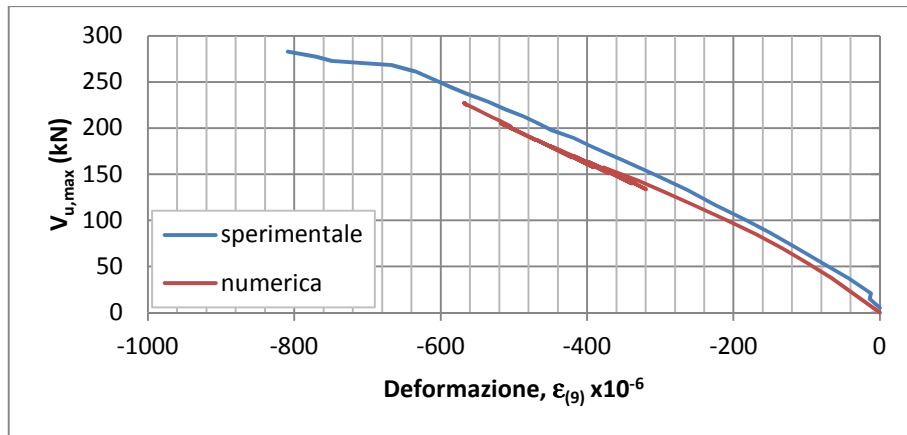


Figura 4.190: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E9, trave C.02

Come si evince dai grafici sopra riportati si nota che la curva numerica non riesce a riprodurre i risultati sperimentali per elevati incrementi di carico, eccezion fatta per gli estensimetri E8 ed E9.

Nella figura 4.191 si riporta la sovrapposizione dei due diagrammi carico - abbassamento del punto sotto il carico ottenuti sperimentalmente e numericamente. Anche in questo caso la curva numerica esprime un comportamento più rigido rispetto a quello rilevato sperimentalmente.

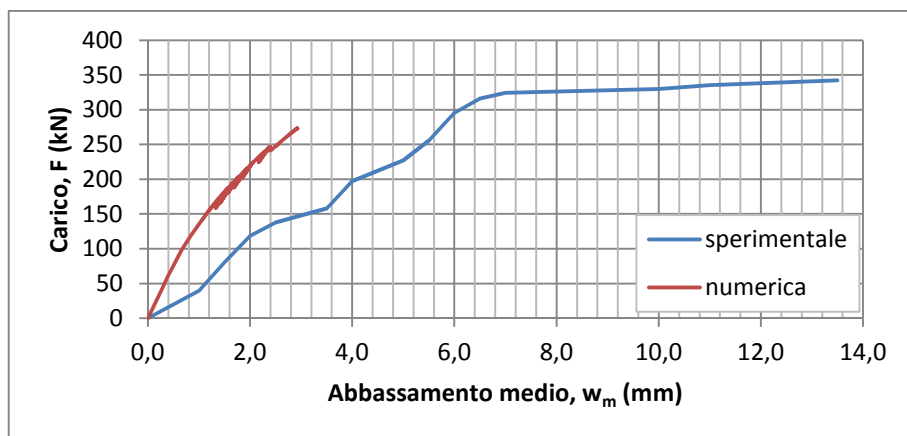


Figura 4.191: Sovrapposizione diagrammi carico - abbassamento, trave C.02

Nella tabella 4.15 si riassumono i risultati ottenuti mettendo a confronto i valori sperimentali, numerici e teorici.

Trave	Valori sperimentali (kN)		Valori numerici (kN)		Valori teorici (kN)		
	F_u	V_u	F_u	V_u	V_R modello 1	V_R modello 2	V_R modello 3
C.02	342,00	282,68	272,60	226,29	169	71	26,59

Tabella 4.15: Confronto sperimentale - numerico - teorico, trave C.02

Di seguito si riportano le *colormaps* per la **trave C.03**. Sono visualizzate le tensioni nel calcestruzzo (N/mm^2) in direzione X e l'evolversi del quadro fessurativo per tre livelli del carico applicato (figura 4.192).

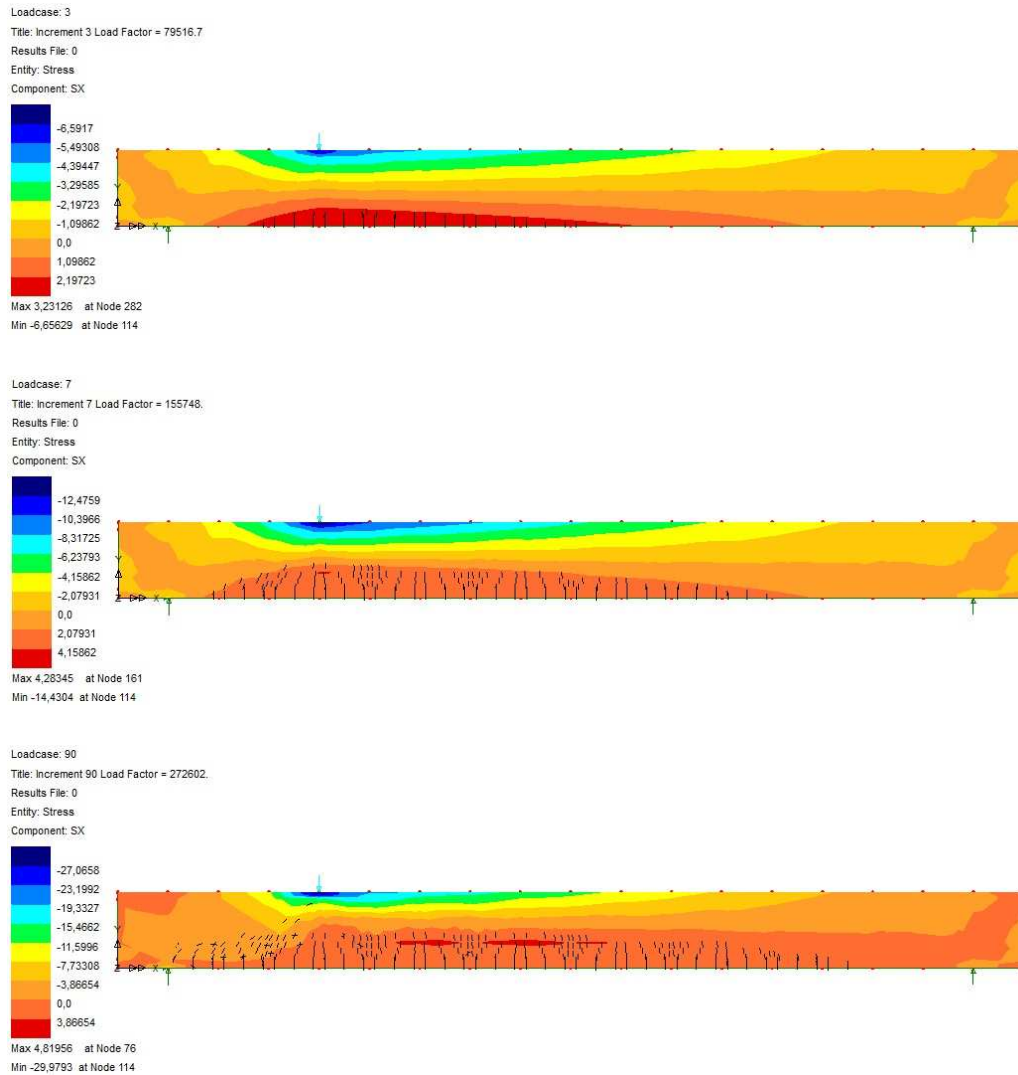


Figura 4.192: Tensioni σ_x per tre livelli di carico, trave C.03

La trave si comporta elasticamente fino alla formazione delle prime fessure manifestatesi per un valore del carico di circa 60kN che corrisponde sostanzialmente al valore ottenuto dall'analisi non lineare.

Nelle figure 4.193 - 4.198 si riportano i diagrammi taglio - deformazione corrispondenti ai punti di applicazione degli estensimetri in modo da paragonare le due curve sperimentale e numerica. Come si evince dai grafici sotto riportati si nota che la curva numerica non riesce a riprodurre i risultati sperimentali per elevati incrementi di carico, eccezion fatta per gli estensimetri E8 ed E9.

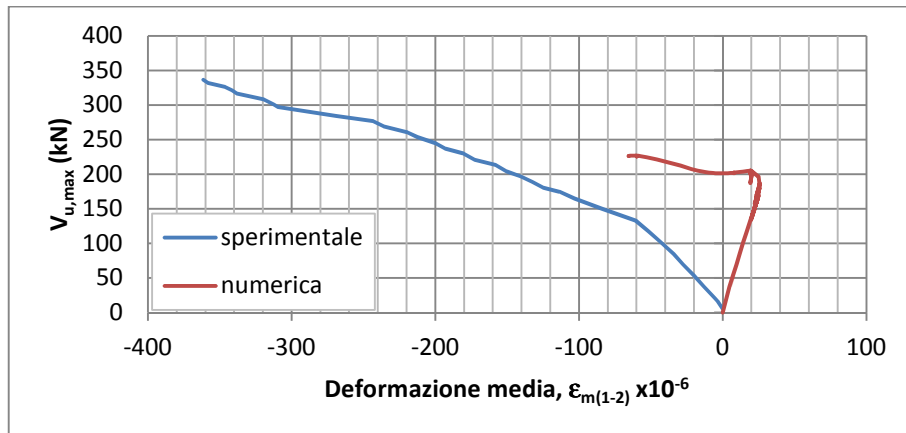


Figura 4.193: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E1/E2, trave C.03

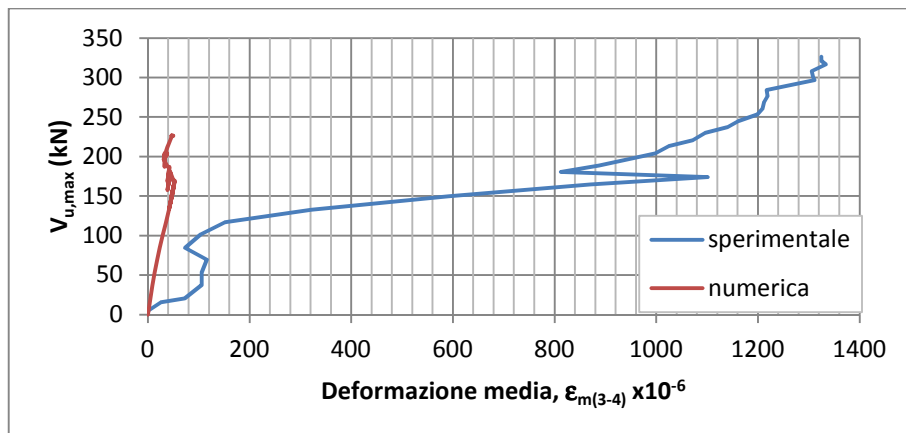


Figura 4.194: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E3/E4, trave C.03

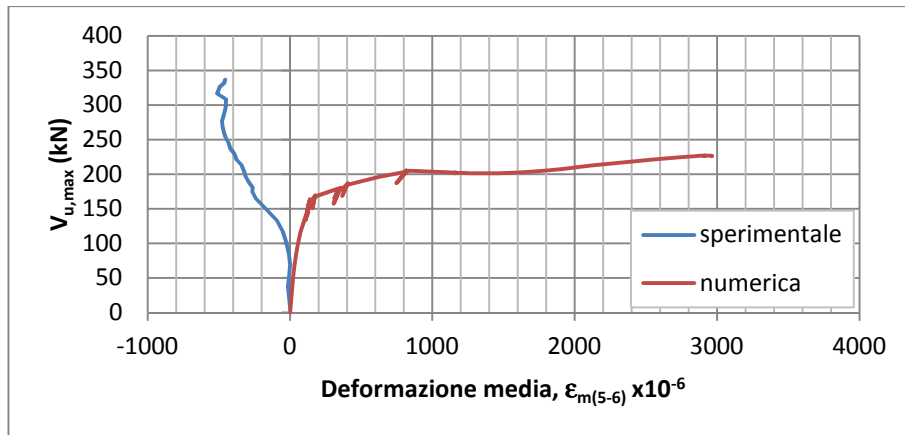


Figura 4.195: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetri E5/E6, trave C.03

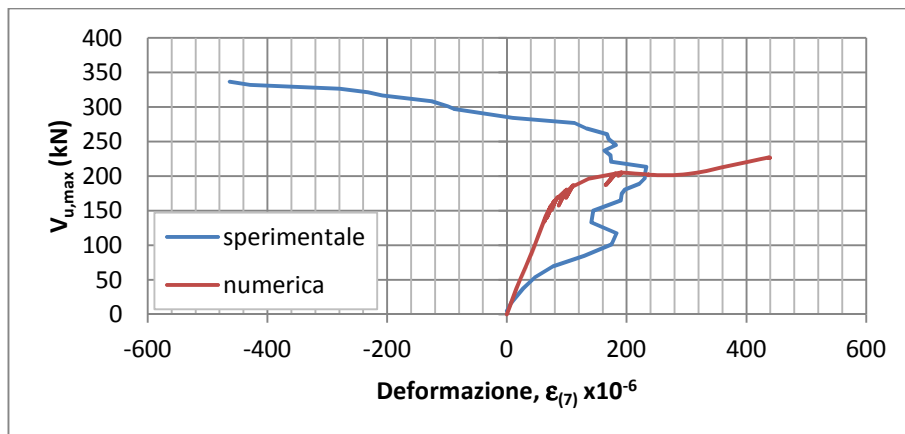


Figura 4.196: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E7, trave C.03

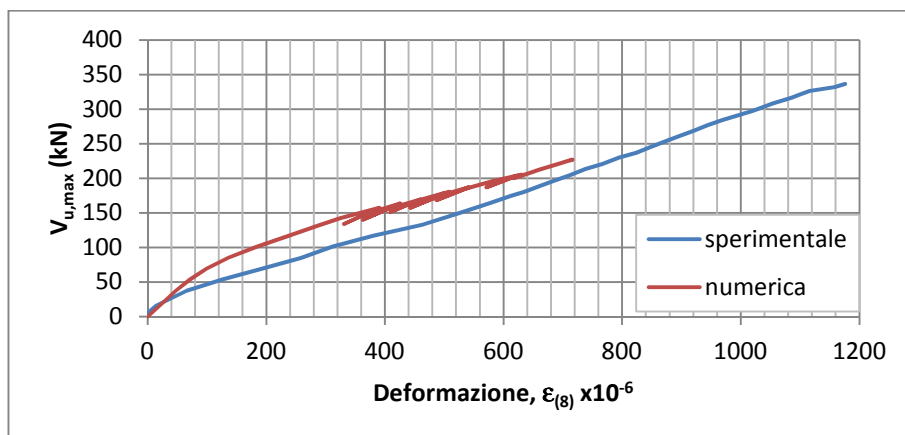


Figura 4.197: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E8, trave C.03

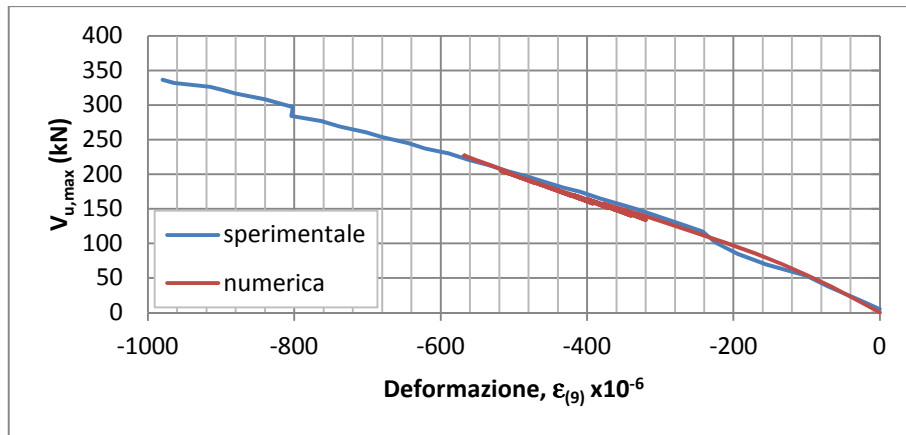


Figura 4.198: Sovrapposizione diagrammi taglio - deformazione estensimetro E9, trave C.03

Nella figura 4.199 si riporta la sovrapposizione dei due diagrammi carico - abbassamento del punto sotto il carico ottenuti sperimentalmente e numericamente. Anche in questo caso la curva numerica esprime un comportamento più rigido rispetto a quello rilevato sperimentalmente.

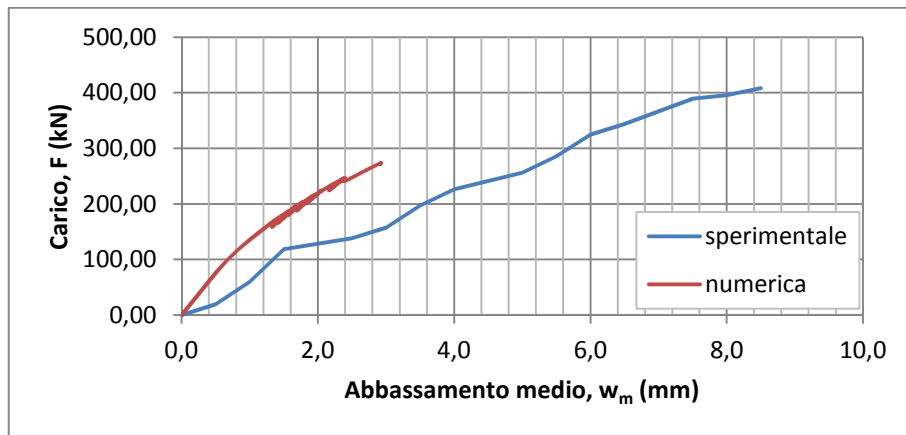


Figura 4.199: Sovrapposizione diagrammi carico - abbassamento, trave C.03

Nella tabella 4.16 si riassumono i risultati ottenuti mettendo a confronto i valori sperimentali, numerici e teorici.

Trave	Valori sperimentali (kN)		Valori numerici (kN)		Valori teorici (kN)		
	F_u	V_u	F_u	V_u	V_R modello 1	V_R modello 2	V_R modello 3
C.03	407,98	336,28	272,60	226,29	169	71	26,59

Tabella 4.16: Confronto sperimentale - numerico - teorico, trave C.03

Dai confronti effettuati si evince quanto segue:

- per tutte le travi il valore sperimentale è superiore sia al valore numerico sia ai valori teorici forniti dai tre modelli esaminati;
- il modello teorico che più si avvicina ai risultati sperimentali è il modello a traliccio isostatico (modello 1);
- il modello teorico che più si allontana dai risultati sperimentali è il modello della mensola equivalente (modello 3);
- l'analisi numerica fornisce un comportamento più rigido di quello rilevato sperimentalmente;
- nel caso di presenza di fondello, sia in acciaio che in calcestruzzo, aumenta la resistenza a taglio delle travi per effetto spinotto (*dowel action*), fatto questo che non viene messo in conto da nessuno dei tre modelli analitici esaminati;
- qualunque sia il modello previsionale adottato si hanno notevoli margini di sicurezza rispetto al valore di rottura realmente riscontrato.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di dottorato si presentano i risultati di un'attività di ricerca che ha riguardato lo studio sperimentale di elementi tralicciati in acciaio conglobati nel getto di calcestruzzo denominati travi PREM. L'attività di ricerca svolta ha riguardato sia il comportamento a flessione sia quello a taglio delle travi PREM.

Durante l'esecuzione delle prove a flessione si è rilevato il quadro fessurativo all'aumentare del carico esterno. Il carico di prima fessurazione sperimentale è stato di circa 50kN per la trave n°01 e di 30kN per la trave n°02, cui corrispondono i momenti di prima fessurazione $M_{pf} = 30\text{kNm}$ e 18kNm . I valori teorici sono rispettivamente: $M_{pf,teo} = 40,58\text{ kNm}$ per la trave n°01; $M_{pf,teo} = 25,87\text{ kNm}$ per la trave n°02. I valori sperimentali risultano, dunque, inferiori rispetto ai valori calcolati con la teoria classica del cemento armato. Il momento di snervamento teorico per le due travi vale: $M_{sy,teo} = 275,96\text{ kNm}$ per la trave n°01, $M_{sy,teo} = 149,71\text{ kNm}$ per la trave n°02; cui corrispondono i carichi teorici: $F_{sy,teo} = 459,93\text{ kN}$ per la trave n°01, $F_{sy,teo} = 249,52\text{ kN}$ per la trave n°02. I valori sperimentali sostanzialmente coincidono con quelli teorici. Per quanto concerne il carico ultimo si sono ottenuti i seguenti valori sperimentali: $F_{u,exp} = 501,48\text{ kN}$ per la trave n°01, $F_{u,exp} = 266,82\text{ kN}$ per la trave n°02; cui corrispondono i seguenti valori del momento ultimo: $M_{u,exp} =$

300,9 kNm per la trave n°01, $M_{u,exp} = 160,1$ kNm per la trave n°02. I valori teorici del momento ultimo risultano: $M_{u,teo} = 283,62$ kNm per la trave n°01, $M_{u,teo} = 154,26$ kNm per la trave n°02. Si può notare un lieve incremento dei valori sperimentali rispetto a quelli teorici. Il collasso nella trave n°01 è avvenuto per flessione a seguito della formazione di una estesa fessura diagonale; mentre nella trave n°02 il collasso è avvenuto per schiacciamento del calcestruzzo.

Per quanto concerne il comportamento a flessione si può concludere che la teoria classica del calcestruzzo armato è applicabile, con buona approssimazione, anche alle travi PREM.

Dalla sperimentazione eseguita per esaminare gli aspetti legati al taglio allo SLU si può concludere quanto segue:

- il tipo di barre di armatura (lisce o nervate) non influenza il valore della resistenza ultima;
- per tutte le travi il valore sperimentale è superiore sia al valore numerico sia ai valori teorici forniti dai tre modelli esaminati;
- il modello teorico che più si avvicina ai risultati sperimentali è il modello a traliccio isostatico (modello 1);
- il modello teorico che più si allontana dai risultati sperimentali è il modello della mensola equivalente (modello 3);
- qualunque sia il modello previsionale adottato si hanno notevoli margini di sicurezza rispetto al valore di rottura realmente riscontrato;
- l'analisi numerica fornisce un comportamento più rigido di quello rilevato sperimentalmente;
- nel caso di presenza di fondello, sia in acciaio che in calcestruzzo, aumenta la resistenza a taglio delle travi per effetto spinotto (*dowel action*), fatto questo che non viene messo in conto da nessuno dei tre modelli analitici esaminati; inoltre si è osservato uno scorrimento del fondello in calcestruzzo all'interfaccia con il calcestruzzo gettato in seconda fase;
- in tutte le travi sperimentate il tirante in acciaio si è snervato e probabilmente il puntone di calcestruzzo si è plasticizzato;

- rimane comunque il vantaggio di un sistema di prefabbricazione che utilizzi un fondello legato ai tempi di messa in opera delle travi;
- dalle sovrapposizioni dei diagramma carico - abbassamento medio della sezione di carico per le tre tipologie di travi con la stessa armatura fra loro, emerge che il comportamento è sostanzialmente identico in termini di rigidità; cambia solo il valore del carico ultimo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] TECNOSTRUTTURE s.r.l., *Progettare con il sistema REP[®]: Travi REP[®] Pilastrri e Setti*, 4^a Edizione, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna 2011.
- [2] G. Ballio, C. Bernuzzi, *Progettare Costruzioni in Acciaio*, Editore Ulrico Hoepli, Milano 2004.
- [3] M. A. Aiello, A. N. Cancelli, *Progettare con le Travi Prefabbricate Reticolari Miste, PREM*, Editore Tecniche Nuove, Milano 2011.
- [4] L. Ombres, *Progettare con le Travi Prefabbricate Reticolari Miste, PREM*, Editore Tecniche Nuove, Milano 2011.
- [5] F. Bencardino, *Analisi numerica e confronti sperimentali di travi inflesse in c.a. con rinforzo esterno in CFRP*, L'industria italiana del Cemento, N. 794, 2004.
- [6] E. Cosenza, G. Manfredi, M. Pecce, *Strutture in cemento armato*, Hoepli, Milano 2008.

- [7] G. Giordano, L. Ombres, G. Spadea, *Modellazione teorica e controllo del comportamento a rottura di travi infless di tipo REP*, L'industria italiana del Cemento, N. 617, 1987.
- [8] L. La Mendola, N. Scibilia, P. Colajanni, V. Badalamenti, *Indagine sperimentale su nodi di tralicci in acciaio di travi reticolari miste*, Università degli Studi di Palermo, Meccanica dei Materiali e delle Strutture, Vol.1 (2009), no.1, pp. 108-125.
- [9] V. Badalamenti, P. Colajanni, L. La Mendola, R. Pucinotti, N. Scibilia, *Prove di Push-Out su travi reticolari miste*, Atti del 17° Congresso C.T.E. [Roma 5-6-7-8 Novembre 2008], a cura del Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia, Milano 2008, Vol.1.
- [10] V. Badalamenti, P. Colajanni, L. La Mendola, R. Pucinotti, N. Scibilia, *Indagine sperimentale su tralicci in acciaio di travi reticolari miste*, Atti del 17° Congresso C.T.E. [Roma 5-6-7-8 Novembre 2008], a cura del Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia, Milano 2008, Vol.1.
- [11] M. Bottoni, C. Mazzotti, M. Savoia, *Prove sperimentali a lungo termine su una trave prefabbricata realizzata in due fasi*, Atti del 17° Congresso C.T.E. [Roma 5-6-7-8 Novembre 2008], a cura del Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia, Milano 2008, Vol.1.
- [12] P. Bernardi, I. Iori, E. Michelini, *Studio sperimentale del comportamento di travi reticolari acciaio – conglomerato: il ruolo delle modalità di saldatura*, Atti del 17° Congresso C.T.E. [Roma 5-6-7-8 Novembre 2008], a cura del Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia, Milano 2008, Vol.1.
- [13] L. Vincenzi, C. Mazzotti, M. Savoia, *Stabilità in fase I del traliccio metallico delle travi reticolari miste*, Atti del 17° Congresso C.T.E. [Roma 5-6-7-8 Novembre 2008], a cura del Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia, Milano 2008, Vol.2, pp. 741-750.

- [14] L. Izzo, F. Minelli, G. Plizzari, *Linee guida per le travi reticolari miste PREM*, Atti del 17° Congresso C.T.E. [Roma 5-6-7-8 Novembre 2008], a cura del Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia, Milano 2008, Vol.2, pp. 781-790.
- [15] M. Savoia, *Recenti sviluppi nella ricerca sulle travi tralicciate miste*, DICAM, Università di Bologna.
- [16] M. Ferrari, *Sistema costruttivo integrato la prefabbricazione con un sistema pluripiano iperstatico*, Atti del Congresso C.T.E. 2004, Bari Novembre 4-6.
- [17] C. Amadio, L. Marconi, S. Sorgon, G. Suraci, *Analisi di un sistema ibrido sismo-resistente costituito da elementi tralicciati in acciaio inglobati nel calcestruzzo*, Atti del 17° Congresso C.T.E. [Roma 5-6-7-8 Novembre 2008], a cura del Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia, Milano 2008.
- [18] R. Scotta, L. Tesser, *Sperimentazione su travi tralicciate miste (Experimental tests on composite truss beams)*, Atti del 17° Congresso C.T.E. [Roma 5-6-7-8 Novembre 2008], a cura del Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia, Milano 2008.
- [19] NTC 2008, *Norme tecniche per le costruzioni*, D.M. 14-01-2008.
- [20] UNI EN 1992-1-1:2005, *Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo*, Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici.
- [21] AICAP, *Guida all'uso dell'EUROCODICE 2. Progetto do strutture in calcestruzzo armato Vol.I*, Edizione Pubblicamento.
- [22] UNI EN 10002-1:2004, *Materiali metallici - Prova di trazione - Parte 1*, Metodo di prova a temperatura ambiente.
- [23] UNI EN 12390-3:2003, *Prova sul calcestruzzo indurito - Resistenza alla compressione dei provini*.
- [24] *Modeller Reference Manual LUSAS Version 14:Issue 1*.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il professore Luciano Ombres per avermi fornito la sua disponibilità in questi anni di dottorato e per avermi supportato nei miei studi.

Ringrazio il professore Renato Sante Olivito, coordinatore del corso di dottorato di ricerca.

Ringrazio i professori Giuseppe Spadea e Francesco Bencardino per le opportunità che mi hanno offerto nel campo dell'attività didattica e scientifica.

Ringrazio inoltre tutti i miei colleghi di corso con i quali ho condiviso momenti stimolanti di confronto e di studio, in particolare: Alessandro S., Alessandro M., Arturo, Elisa, Rosamaria, Antonio Z., Antonio L., Oscar, Assunta, Giulia, Angela, Lorenzo.