

# Università degli Studi di Bologna

## Facoltà di Ingegneria

---

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

D.I.S.T.A.R.T. – Tecnica delle Costruzioni

Corso di Tecnica delle Costruzioni II

---

# COMPORAMENTO DIFFERITO DI TRAVI INFLESSE IN C.C.A

Tesi di Laurea di:

**YLENIA PONZONI**

Matricola n° 2142 62374

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing.

**MARCO SAVOIA**

Correlatore:

Prof. Ing. **CLAUDIO MAZZOTTI**

*Sessione III*

---

*Anno Accademico 2006/2007*

# 1 Introduzione

La presente tesi ha un carattere eminentemente sperimentale e consiste nella presentazione e nell'analisi di quattro prove, eseguite su elementi in calcestruzzo autocompattante (Self Compacting Concrete, SCC) e di un'altra prova eseguita su una trave in calcestruzzo prefabbricato su cui è stata eseguito un successivo getto di completamento. Tutte le prove si sono svolte presso il Laboratorio Prove Strutture (L.A.P.S.) dell'Università di Bologna.

Nella parte prima vengono descritte le prove eseguite su quattro travi in calcestruzzo autocompattante. Una coppia delle quali era stata precedentemente sottoposta ad un ciclo di carico costante durato circa 16 mesi e successivamente lasciata a riposo, mentre l'altra coppia non è mai stata sottoposta a sollecitazioni e per questo ha risentito del solo effetto del ritiro, fino al giorno della rottura. I risultati ottenuti dalle quattro prova di rottura verranno confrontati con quelli ottenuti da altre due prove eseguite su una coppia di travi della medesima natura che sono state rotte il 28° giorno di maturazione.

Dai confronti si ottengono dati sul comportamento flessionale differito di travi in calcestruzzo autocompattante.

Nella seconda parte si è valutato il comportamento flessionale differito di una trave prefabbricata costruita per fasi. A tale proposito è stata eseguita una prova di rottura durante la quale si è cercato di simulare la tecnologia produttiva effettivamente seguita dal prefabbricatore nella realizzazione di tali elementi prefabbricati per costruire strutture prefabbricate multipiano. Sulla trave in calcestruzzo prefabbricato sono stati applicati due cicli di carico rispettivamente mantenuti costanti per un certo periodo e quello definitivo di rottura. Dopo il primo caricamento è stato eseguito un getto di completamento.

Lo scopo di questo studio è stato quello di determinare l'evoluzione dello stato deformativo della trave durante la prova, tenendo conto degli effetti della viscosità, della capacità resistente a flessione dell'elemento portandolo a rottura e in ultimo di confrontare i dati strumentali con quelli relativi a metodi di calcolo analitici come le tensioni ammissibili e il modello a fibre.

Per ottenere i dati necessari si è dovuto strumentare adeguatamente la trave. L'operazione di strumentazione è avvenuta in momenti diversi, poichè si sono volute osservare tutte le deformazioni relative anche alle armature che sono state immerse nel getto prefabbricato e quelle relative al calcestruzzo di completamento che è stato eseguito dopo 7 giorni dall'inizio della prova. La disposizione degli strumenti è stata concentrata in 3 sezioni, in prossimità

dell'appoggio, vicino al punto di carico e in mezzeria, in tal modo dai dati strumentali ottenuti è stato possibile eseguire un'analisi sezionale.

Il programma degli esperimenti prevede l'esecuzione di una serie di prove sia su provini cilindrici in calcestruzzo prefabbricato che su quelli realizzati con il getto di completamento.

Sui provini cilindrici sono state svolte sia prove istantanee, a tempi di maturazione diversi, per la valutazione dello sviluppo nel tempo delle caratteristiche meccaniche del materiale (resistenza a compressione e modulo elastico), sia prove a lungo termine per la determinazione del comportamento del materiale a seguito dei fenomeni del ritiro e del creep.

Entrando un po' più nel dettaglio si ha che: sono state eseguite prove per la valutazione dello sviluppo nel tempo della resistenza e del modulo elastico, due serie di prove, ciascuna delle quali ha analizzato i fenomeni del ritiro e del creep su provini cilindrici. La prima serie è iniziata il 27 settembre 2007 ed è stata relativa alla miscela di calcestruzzo prefabbricato, mentre la seconda serie che ha interessato la miscela del getto di completamento è iniziata il 30 ottobre relativamente al fenomeno del creep e il 9 ottobre per il ritiro,.

Il lavoro svolto in questi mesi si è incentrato su attività differenti: vi sono state attività prettamente manuali, nel senso che si è collaborato, col personale addetto, per la realizzazione dei vari getti di calcestruzzo, per poi passare ad attività di misura e monitoraggio delle prove stesse, con conseguente elaborazione dei dati ricavati dalle misurazioni e successive interpretazioni e modellazioni dei risultati ottenuti.

Nei capitoli che seguiranno si è cercato di descrivere l'esperienza secondo questo ordine:

## **PARTE I**

- **Cap.1- Introduzione**

- **Cap. 2 – Creep e ritiro**

In questo capitolo si attua una breve trattazione teorica dei fenomeni del ritiro e del creep del calcestruzzo, analizzando i fattori che influenzano il loro sviluppo.

- **Cap. 3 – Strumentazione**

In questo capitolo si effettua la descrizione di tutta la strumentazione utilizzata per le prove in esame. Vengono riportate le caratteristiche, le modalità di funzionamento, la metodolo-

gia di collegamento degli strumenti agli elementi strutturali. Gli strumenti descritti sono: gli estensimetri (relazioni fondamentali dell'estensimetria elettrica, ponte di Wheatstone, ecc.), i trasduttori di spostamento resistivi (detti 'omega), le celle di carico, i trasduttori di spostamento induttivi (LVDT, Linear Variable Differential Transformer).

Ovviamente, visto il numero elevato di strumenti utilizzati e la loro complessità, la spiegazione è abbastanza semplificata e va intesa come filo conduttore per riuscire a comprendere i passaggi principali connessi alle fasi di preparazione, inizio e svolgimento delle prove.

- **Cap. 4 – Il calcestruzzo autocompattante**

Nel capitolo è riportata una breve descrizione delle caratteristiche comportamentali e composizionali del calcestruzzo autocompattante ed i metodi di misura delle sue proprietà reologiche. Si sono brevemente descritte le modalità d'esecuzione del getto dei cilindri e delle travi.

- **Cap. 5 – Prove di rottura su travi in SCC**

Il capitolo descrive le modalità d'esecuzione, lo svolgimento e i risultati di due analoghe prove di rottura eseguite su due travi di calcestruzzo autocompattante.

Inoltre viene descritta la procedura di tracciatura della trave, il tipo di strumenti utilizzati ed il loro posizionamento. Attraverso un certo numero di foto si è cercato di rappresentare la varie fasi di svolgimento delle due prove, da inizio caricamento fino a giungere alla rottura della trave.

Nei grafici raffiguranti l'andamento della freccia assoluta e relativa in funzione del carico agente, sono state definite anche le rette di stadio I ,Ille stadio II traslato, che possono essere considerate come dei riferimenti per la valutazione della variazione della rigidezza flessionale della trave al variare del carico agente su essa.

- **Cap. 6 – Analisi dei risultati**

In questo capitolo vengono riportati e confrontati con l'ausilio di grafici e tabelle riassuntive i risultati ottenuti dalle prove descritte nella presente tesi e le prove descritte nella tesi di Mirco Pritoni. Di seguito sono riportate anche le osservazioni e i commenti sui dati ottenuti.

## **PARTE II**

### **• Cap. 7 – Strumentazione**

In questo capitolo si effettua la descrizione di tutta la strumentazione utilizzata per la prova oggetto di studio in questa seconda parte. Vengono riportate le caratteristiche, le modalità di funzionamento, la metodologia di collegamento degli strumenti agli elementi strutturali. Gli strumenti descritti sono: gli estensimetri (relazioni fondamentali dell'estensimetria elettrica, ponte di Wheatstone, ecc.), i trasduttori di spostamento resistivi (detti 'omega), le celle di carico, i trasduttori di spostamento induttivi (LVDT, Linear Variable Differential Transformer). Viene inoltre riportata una rapida descrizione del sistema e dell'apparecchiatura d'acquisizione, attraverso la quale si ricavano i dati che gli strumenti misurano nel corso della prova.

Ovviamente, visto il numero elevato di strumenti utilizzati e la loro complessità, la spiegazione è abbastanza semplificata e va intesa come filo conduttore per riuscire a comprendere i passaggi principali connessi alle fasi di preparazione, inizio e svolgimento delle prove.

### **• Cap. 8 – Getto della trave e dei cilindri**

Nel capitolo è riportata una tabella nella quale sono stati indicati i quantitativi dei componenti e le caratteristiche fisiche dei getti eseguiti. A seguire si sono descritte le modalità d'esecuzione del getto dei cilindri e delle travi. Per concludere, sono state riportate alcune foto attraverso le quali è possibile osservare le diverse fasi e modalità di esecuzione dei getti realizzati.

### **• Cap. 9 – Prove per determinare la resistenza e il modulo dei calcestruzzi**

In questo capitolo si esaminano le prove, eseguite su provini cilindrici di calcestruzzo prefabbricato, attraverso le quali è stato possibile valutare lo sviluppo nel tempo della resistenza e del modulo elastico di tale miscela. Parallelamente sono state portate avanti analoghe prove su uguali provini di calcestruzzo con miscela del getto di completamento del 3-10-07, con lo scopo di poter sfruttare i risultati nello studio del comportamento della trave.

### **• Cap. 10– Prove per la valutazione del ritiro e del creep del cls**

In questo capitolo si esamina una serie di prove attraverso le quali si è analizzato il comportamento dei calcestruzzi costituenti la trave quando sono soggetti ai fenomeni del creep e del ritiro. Le prove sono state svolte parallelamente sia su provini cilindrici di cls prefabbrica-

to, che su analoghi provini di cls costituente il getto di completamento. Separatamente si è inoltre valutato l'andamento del ritiro termico su un cubo di cls non del tipo costituente la trave, ma abbastanza vecchio per non risentire del ritiro e della viscosità.

Le prove sono state svolte nel medesimo ambiente in cui è stata eseguita la prova di rottura della trave per garantire una relazione diretta tra fenomeni di ritiro della trave e dei cilindri.

• **Cap. 11– Prova di rottura della trave APE**

Il capitolo descrive le modalità d'esecuzione, lo svolgimento e i risultati di due analoghe prove di rottura eseguite su due travi di calcestruzzo autocompattante.

Inoltre viene descritta la procedura di tracciatura della trave, il tipo di strumenti utilizzati ed il loro posizionamento. Attraverso un certo numero di foto si è cercato di rappresentare le varie fasi di svolgimento della prova, dall'inizio del primo caricamento fino a giungere alla rottura della trave passando per tutti gli incrementi di carico e la fase del getto di completamento. Si riportano in oltre tutti i grafici ottenuti dall'elaborazione delle letture strumentali con corrispondenti osservazioni.

• **Cap. 12– Elaborazione dei risultati**

In questo capitolo si riportano i grafici ottenuti dall'elaborazione dei dati strumentali in termini di freccia assoluta, relativa e curve momento-curvatura. In oltre sono stati inseriti una serie di diagrammi in cui si osserva l'evoluzione dello stato deformativo della sezione di mezzeria determinati attraverso i valori letti strumentalmente e calcolati attraverso il metodo delle tensioni ammissibili. Infine è stato eseguito il confronto tra le curve sperimentali e le curve teoriche ricavate da un'analisi numerica con ausilio del "Modello a fibre".



## 2 Creep e Ritiro

### 2.1 Generalità

La deformazione totale  $\varepsilon$  all'istante  $t$  di un elemento in calcestruzzo soggetto a condizioni di carico e temperatura costanti, è la somma della deformazione istantanea  $\varepsilon_0$ , della deformazione viscosa  $\varepsilon_\varphi$  e di quella da ritiro  $\varepsilon_{cs}$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_{cs}$$

Nella figura sottostante si mostrano le differenti componenti della deformazione totale per un elemento soggetto ad uno stato tensionale costante  $\sigma_0$  applicato al tempo  $t_0$ .

Le deformazioni differite del calcestruzzo sono quelle dovute ai fenomeni del ritiro e del creep e, come si può vedere dalla Figura 2-1, sono deformazioni che si evolvono nel tempo.

Nei paragrafi seguenti si descriveranno sinteticamente le principali caratteristiche del ritiro e del creep del calcestruzzo e si riporteranno le indicazioni in merito ad essi fornite dall'Eurocodice2 e dal CEB-FIP Model Code 90, che propongono modelli attraverso i quali è possibile prevedere l'andamento delle deformazioni differite nel tempo.

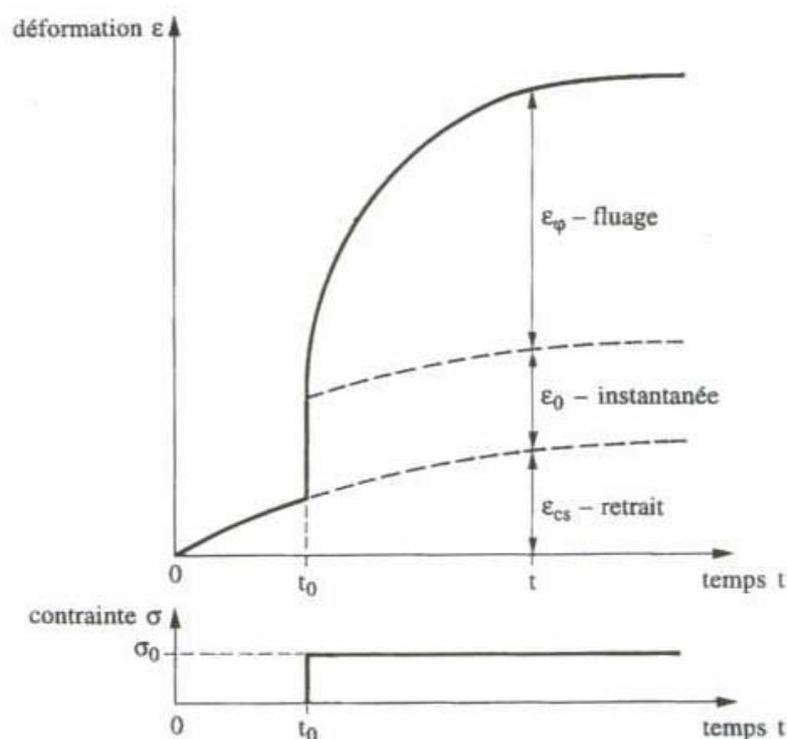


Figura 2-1: deformazione totale del calcestruzzo per effetto di uno stato di tensione costante

## 2.2 Ritiro

Il ritiro è la diminuzione di volume che il calcestruzzo subisce, in assenza di sollecitazioni, a causa di una serie di reazioni chimico-fisiche. La principale di queste è legata all'evaporazione dell'acqua d'impasto durante la fase di maturazione.

Si possono definire cinque differenti tipi di ritiro per il calcestruzzo (Aitcin, 1997):

- il *ritiro plastico* (plastic shrinkage), chiamato anche ritiro fresco, è dovuto all'evaporazione dell'acqua dalla superficie libera del calcestruzzo quando ancora si trova in condizioni plastiche (non è ancora avvenuto l'indurimento) subito dopo la sua messa in opera. Esso induce fenomeni di fessurazione della suddetta superficie con conseguente calo della durabilità dell'elemento.
- il *ritiro termico* (thermal shrinkage), è dovuto al fatto che all'inizio della presa le reazioni chimiche d'idratazione sviluppano calore dunque la temperatura aumenta e il calcestruzzo si dilata. Alla fine della presa le reazioni sono molto rallentate e la temperatura si abbassa progressivamente a seguito della dissipazione di calore che avviene attraverso le casseforme, che non offrono condizioni adiabatiche. A seguito di questo raffreddamento (la temperatura del calcestruzzo diventa prossima a quella dell'ambiente esterno) si ha una conseguente contrazione del materiale, che viene appunto indicata come ritiro termico.
- il *ritiro autogeno* (autogenous shrinkage), chiamato anche ritiro d'idratazione, è dovuto al consumo dell'acqua interna al momento dell'idratazione del cemento e questo fatto porta ad una riduzione di volume della pasta cementizia. Tale ritiro si sviluppa isotropicamente all'interno della massa del conglomerato e il suo valore aumenta al diminuire del rapporto acqua-cemento. La sua curva d'evoluzione ricalca bene quella dello sviluppo della resistenza meccanica: è molto rapida nei primi giorni e raggiunge a 28 giorni il 60÷90% del suo valore ultimo.
- il *ritiro d'essiccamento* (drying shrinkage), è dovuto all'evaporazione dell'acqua dai pori capillari presenti nella pasta di cemento idrata. Tale acqua, chiamata acqua libera, è trattenuta da forze che sono tanto più forti quanto più piccolo è il diametro dei pori. Questo ritiro non è isotropo ed infatti si manifesta dall'esterno verso l'interno della massa. Il fenomeno dell'essiccazione si sviluppa molto lentamente e può avere una durata di molti anni durante i quali la massa di calcestruzzo è soggetta ad una continua, anche se decrescente, riduzione di volume.

- il *ritiro di carbonatazione* (carbonation shrinkage), si produce quando l'idrossido di calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  reagisce con l'anidride carbonica  $\text{CO}_2$  per formare il carbonato di calcio  $\text{CaCO}_3$ . Questo ritiro comincia dalla superficie del conglomerato e si dirige poi, col passare del tempo, verso il cuore della massa di calcestruzzo.

I vari tipi di ritiro, visti in precedenza, interessano la pasta di cemento idrata; il calcestruzzo però contiene anche gli aggregati, che occupano la maggior parte del volume del conglomerato, e che non risentono di alcun tipo di ritiro e svolgono perciò l'azione di resistere alla contrazione indotta dall'idratazione della pasta di cemento. Dunque più elevato è il rapporto aggregati-cemento minori sono le deformazioni differite del calcestruzzo.

Per ridurre lo sviluppo di fessure superficiali è opportuno, subito dopo il getto, coprire la superficie a contatto con l'atmosfera con panni umidi e mantenere bagnato il getto stesso per un periodo di tempo tale da permettere che la resistenza a trazione del calcestruzzo raggiunga valori abbastanza alti, così da resistere alle forze di contrazione della massa. Mantenendo bagnato il getto per i primi sette giorni, si fa in modo che il calcestruzzo raggiunga i  $\frac{3}{4}$  della sua resistenza a trazione a lungo termine, cosicché quando si smette di bagnare l'elemento e il ritiro d'essiccamento inizia a svilupparsi, il calcestruzzo sarà in grado di resistere all'insorgere dei fenomeni fessurativi dovuti all'essiccamento.

Per la scrittura di tale paragrafo si è fatto in parte riferimento a quanto riportato nell'articolo "Integrated View of Shrinkage Deformation", 1997, di C. Aitcin, A.M: Neville e P. Acke.

## 2.3 Creep

Il creep (o deformazione viscosa), rappresenta la deformazione che un materiale subisce, oltre a quella elastica, quando esso è sottoposto permanentemente ad una sollecitazione.

Il creep è determinato da vari e complessi meccanismi tra i quali (Merli): lo scivolamento degli strati colloidali di gel di cemento a contatto con l'acqua libera adsorbita, l'espulsione dell'acqua libera all'interno della pasta di cemento, lo sviluppo di microfessure locali coinvolgenti la rottura di legami esistenti.

Da un punto di vista pratico, il calcolo del creep per il calcestruzzo è abbastanza complesso perché, oltre che dai parametri composizionali, la deformazione viscosa dipende molto da parametri ambientali (soprattutto umidità relativa), ma anche da quei parametri geometrici delle strutture (rapporto superficie/volume) che finiscono per influenzare direttamente l'essiccamento del materiale e quindi il suo ritiro e creep.

Tra i fattori che influenzano il creep si ricordano (Barocci, 2002):

- *influenza dell'umidità relativa*: a parità di carico e per uno stesso calcestruzzo, il creep è tanto più elevato quanto più bassa è l'umidità relativa. L'influenza di questa è invece molto inferiore o addirittura assente se il carico viene applicato dopo che il calcestruzzo ha raggiunto l'equilibrio igrometrico con l'ambiente. Ne segue che il creep di un calcestruzzo caricato dopo tempi relativamente lunghi è poco influenzato dall'umidità dell'ambiente.
- *influenza del carico applicato*: molte prove hanno mostrato che esiste una proporzionalità diretta tra creep e carico applicato, con la possibile eccezione dei campioni caricati a brevi stagionature (3-7 giorni). E' noto che il calcestruzzo compresso inizia a subire microlesioni per carichi superiori al 40-60% della resistenza a compressione  $\sigma'_c$  e non è sorprendente che, una volta iniziato questo processo, si verifichino variazioni anche nel comportamento del creep. Sopra il limite di proporzionalità (valutabile come 0.4-0.6  $\sigma'_c$ ) la velocità di creep aumenta in misura superiore all'aumento del carico ed esiste un determinato rapporto carico/resistenza oltre il quale si raggiunge la crisi nel tempo a carico costante (creep terziario). Questo rapporto è pari a circa 0.8-0.9  $\sigma'_c$ . Il creep aumenta infatti la deformazione totale fino al raggiungimento del limite a rottura del materiale.
- *influenza dell'età del calcestruzzo all'atto dell'applicazione del carico*: più il calcestruzzo è giovane meno esso avrà sviluppato la propria resistenza meccanica e dunque più risentirà del fenomeno del creep.
- *influenza della resistenza del conglomerato*: il creep specifico finale, cioè il creep per unità di carico applicato, diminuisce al crescere della resistenza all'atto dell'applicazione del carico.
- *influenza degli aggregati*: l'aggregato normale non ha creep apprezzabile, dunque si può dire che il creep del calcestruzzo si riduce all'aumentare della frazione dell'inerte. Gli aggregati svolgono un'azione di vincolo nei confronti delle deformazioni.
- *influenza delle dimensioni del getto*: il creep, al pari del ritiro, diminuisce all'aumentare delle dimensioni del getto di calcestruzzo. Questo può essere dovuto al fatto che il creep, nelle zone prossime alla superficie, avviene nella fase d'essiccamento ed è pertanto maggiore che nelle zone interne, che rimangono in condizioni prossime alla saturazione. Anche se con il passare del tempo l'interno perde umidità, esso avrà certamente raggiunto un elevato grado d'idratazione ed un'elevata resistenza, con

- conseguente minore effetto del creep. Se la stagionatura avviene senza scambio di umidità con l'esterno, non si verifica alcuna dipendenza dalle dimensioni del getto.
- *influenza della temperatura*: il creep cresce al crescere della temperatura fino a circa 50°C, poi inizia a decrescere.
  - *influenza dei cicli di carico e scarico*: il creep cresce a seguito dell'applicazione di carichi ciclici. Generalmente i dati di laboratorio relativi al creep dei calcestruzzi sono stati ottenuti sotto un carico permanente costante e dunque l'utilizzazione diretta di tali risultati, per il calcolo delle strutture reali, può portare a sottovalutare gli effetti di creep.

### CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI VISCOSE

Quando un elemento di calcestruzzo subisce fenomeni d'essiccamento mentre si trova

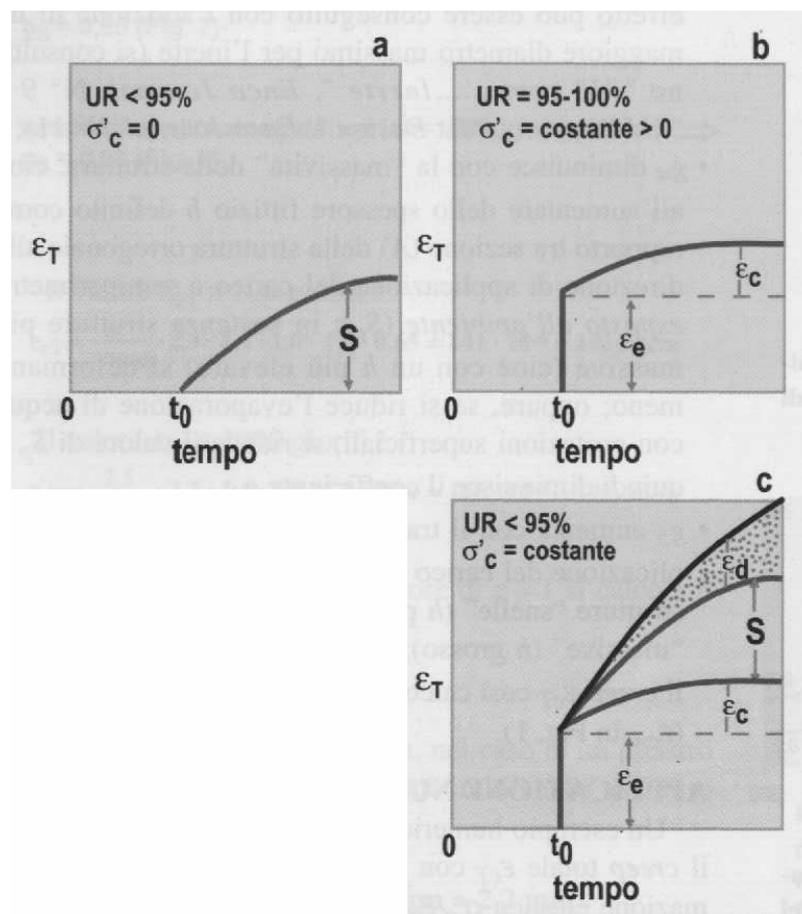


Figura 2-2:

- Contrazione da ritiro ( $S$ ) in ambiente insaturo di vapore ( $UR < 95\%$ ) ed in assenza di sollecitazione;
- Contrazione elastica iniziale ( $\epsilon_e$ ) seguita da quelle da creep puro ( $\epsilon_c$ ) in presenza di una sollecitazione a compressione costante  $\sigma'_c$  in ambiente saturo di vapore;
- Deformazione totale ( $\epsilon_T$ ) dovuta alla deformazione elastica iniziale ( $\epsilon_e$ ), più la deformazione da creep puro ( $\epsilon_c$ ), più la deformazione da ritiro ( $S$ ), più la deformazione da creep da essiccamento ( $\epsilon_d$ );

sotto l'azione di un carico permanente, si assume generalmente che ritiro e creep abbiano effetti additivi e che quest'ultimo sia valutabile come semplice differenza tra la deformazione totale dell'elemento caricato ed il ritiro osservato in un analogo elemento, non sottoposto a carico, nelle stesse condizioni fisiche e per lo stesso periodo di tempo.

Si esaminano ora le interazioni tra creep e ritiro (Barocci, 2002), facendo riferimento a 3 casi particolari (figura 2.2):

- a) una struttura in calcestruzzo in assenza di sollecitazioni ( $\sigma'_c = 0$ ), in ambiente insaturo di vapore, sottoposta ad un ritiro idrometrico (S) in assenza di vincoli a partire dal tempo di scasseratura ( $t_0$ ), misurato a partire dal momento del getto ( $t = 0$ );
- b) una struttura in calcestruzzo, in ambiente saturo di vapore (UR = 95÷100%) e quindi priva di ritiro, sottoposta, al tempo  $t_0$ , ad una sollecitazione  $\sigma'_c$  che provoca una deformazione elastica  $\varepsilon_e$  cui si somma la successiva deformazione  $\varepsilon_c$  da creep (deformazione totale  $\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_c$ ): il valore di  $\varepsilon_c$  misurato in queste condizioni, cioè in assenza di ritiro, prende il nome di *creep puro* o *basic creep*;
- c) una struttura in calcestruzzo esposta al tempo  $t_0$  in ambiente insaturo di vapore che provoca un ritiro S, e simultaneamente sottoposta alla sollecitazione  $\sigma'_c$ : in queste condizioni la deformazione totale  $\varepsilon_T$  risulta maggiore della somma dei singoli contributi alla deformazione  $\varepsilon_e$ ,  $\varepsilon_c$ , S (come riportato graficamente in figura 2.2):

$$\varepsilon_T > \varepsilon_e + \varepsilon_c + S$$

La differenza tra la deformazione totale  $\varepsilon_T$  misurata nelle condizioni c) e la somma dei singoli contributi deformazionali prende il nome di *creep da essiccamento* (drying creep,  $\varepsilon_d$ ). La deformazione totale diventa pertanto:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + S + \varepsilon_c + \varepsilon_d$$

Ciò significa che, sotto la sollecitazione di compressione  $\sigma'_c$  in ambiente insaturo di vapore, l'evaporazione dell'acqua è maggiore di quella che si registra in assenza di  $\sigma'_c$  e che determina il ritiro S: la maggiore evaporazione dell'acqua (una sorta di "effetto spremitura" del calcestruzzo a compressione) comporta una maggiore deformazione addizionale ( $\varepsilon_d$ ) che si somma agli altri contributi deformazionali. In particolare il contributo del creep totale ( $\varepsilon_{cc}$ ) è dato dalla somma del creep puro ( $\varepsilon_c$ ) e dal creep da essiccamento ( $\varepsilon_d$ ):

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c + \varepsilon_d$$

Pertanto si può anche scrivere:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + S + \varepsilon_{cc}$$

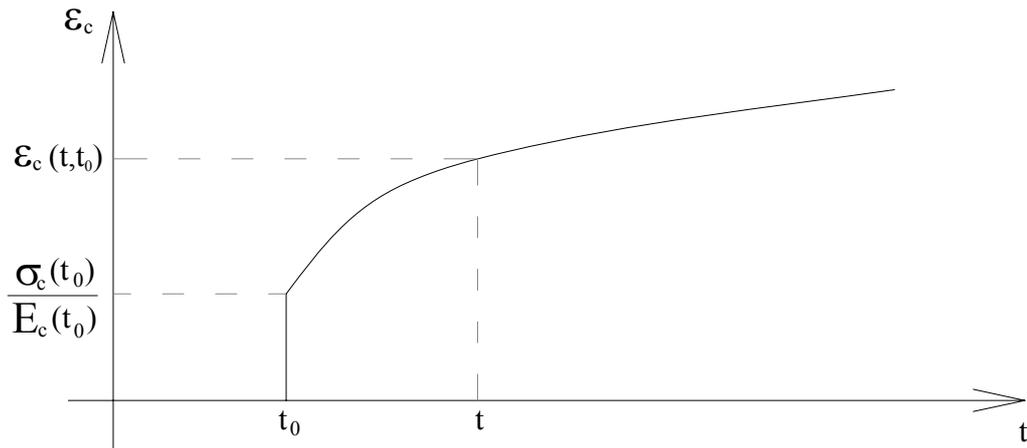


Figura 2-3: andamento delle deformazioni in funzione del tempo

Quando si eseguono prove di creep in un ambiente insaturo si valutano le deformazioni totali  $\varepsilon_T$  subite dai provini e, detraendo da queste le deformazioni da ritiro (valutate su analoghi provini non caricati posti nel medesimo ambiente) e le deformazioni elastiche istantanee, si ottiene il valore del creep totale  $\varepsilon_{cc}$ . Sperimentalmente si vede poi che, mantenendo il carico costante, tali deformazioni evolvono nel tempo e per  $t \rightarrow \infty$  possono assumere valori pari a 3÷4 volte le deformazioni istantanee.

Indicando con  $t_0$  l'istante di applicazione del carico sul provino, si riscontra l'andamento delle deformazioni riportato nella figura 2.3.

La *deformazione totale* dell'elemento in cls al generico istante  $t$  è:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon_{\text{ist}}(t_0) + \varepsilon_{\text{cc}}(t, t_0)$$

La *deformazione istantanea* è pari a:

$$\varepsilon_{\text{ist}}(t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)}$$

mentre la *deformazione viscosa* si può esprimere come (CEB, MC90):

$$\varepsilon_{\text{cc}}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{c,28}} \cdot \Phi(t, t_0).$$

dove  $E_{c,28}$  è il modulo elastico del calcestruzzo a 28 giorni d'età.

Il termine  $\Phi(t, t_0)$  è chiamato **coefficiente di viscosità** ed è dato dal rapporto tra le deformazioni viscosi e quelle istantanee (valutate facendo riferimento al modulo elastico a 28gg).

$$\Phi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{\text{cc}}(t, t_0)}{\frac{\sigma_c(t_0)}{E_{c,28}}}$$

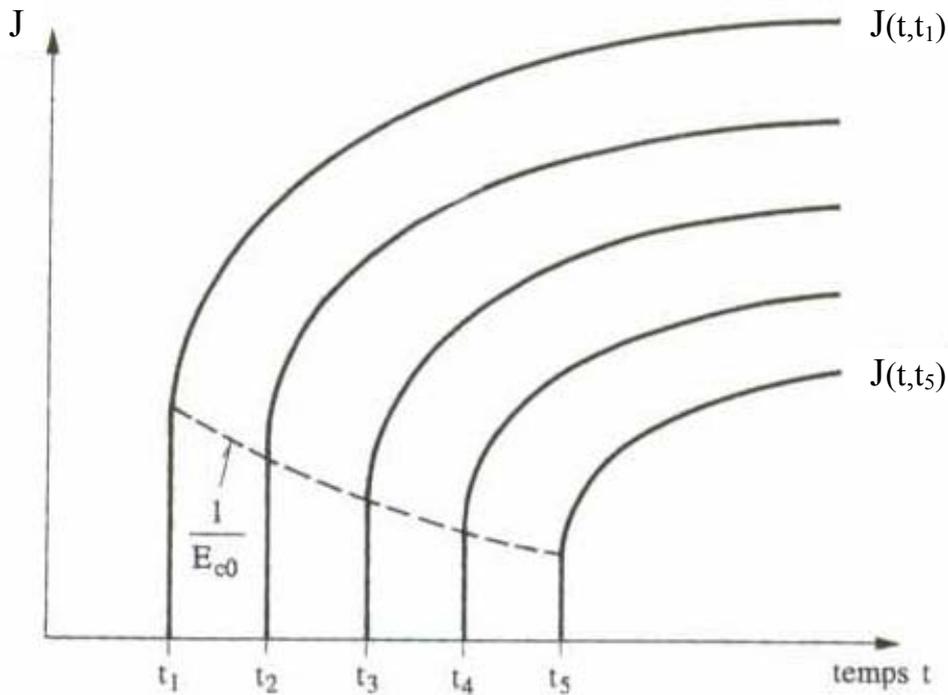


Figura 2-4: andamento della funzione di creep nel tempo e per varie età di caricamento

Per  $t = t_0$  (istante applicazione carico) non ho deformazioni viscose allora  $\Phi(t_0, t_0) = 0$ .

Si ottiene dunque:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot \frac{1}{E_c(t_0)} \cdot \left[ 1 + \frac{E_c(t_0)}{E_{c,28}} \Phi(t, t_0) \right]$$

ponendo:

$$J(t, t_0) = \left[ 1 + \frac{E_c(t_0)}{E_{c,28}} \Phi(t, t_0) \right] \cdot \frac{1}{E_c(t_0)} = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\Phi(t, t_0)}{E_{c,28}}$$

si avrà:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0)$$

La funzione  $J(t, t_0)$  prende il nome di **funzione di viscosità** ed ha le dimensioni dell'inverso del modulo elastico; il suo andamento in funzione del tempo, per un calcestruzzo caricato ad età differenti  $t_i$ , è rappresentato nella figura 2.4 osservando la quale si può dire che:

- la parte elastica istantanea diminuisce all'aumentare dell'età di caricamento; questo deriva dal fatto che il modulo elastico del calcestruzzo aumenta nel tempo;
- il creep è tanto più elevato quanto più il calcestruzzo viene caricato in giovane età;
- la funzione di creep è una funzione monotona crescente ma la velocità di sviluppo del creep è una funzione decrescente infatti la pendenza della curva  $J(t, t_i)$  si attenua nel tempo.

Si introduce poi, per concludere, il concetto di **deformazione viscosa specifica** che rappresenta la deformazione viscosa al tempo  $t$  causata dalla tensione unitaria applicata al tempo  $t_0$ :

$$C(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cc}(t, t_0)}{\sigma_c(t_0)}$$

Visto che 
$$J(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{ist}(t_0)}{\sigma_c(t_0)} + \frac{\varepsilon_{cc}(t, t_0)}{\sigma_c(t_0)} = \frac{1}{E_c(t_0)} + C(t, t_0)$$

considerando inoltre che 
$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\Phi(t, t_0)}{E_{c,28}}$$

si ha secondo il CEB-MC90: 
$$C(t, t_0) = \frac{\Phi(t, t_0)}{E_{c,28}}$$



## 3 Strumentazione

### 3.1 Gli estensimetri

Un estensimetro o *strain gauge* è uno strumento in grado di misurare la deformazione locale della superficie di un corpo al quale viene applicato. Si tratta di particolari trasduttori che si basano sull'effetto piezoresistivo, ossia la proprietà dei materiali di variare la propria resistenza elettrica con la deformazione. Col termine trasduttori si è soliti indicare quei componenti che trasformano un segnale d'ingresso da misurare (in tal caso la deformazione) in un segnale elettrico; questa trasformazione è in genere conveniente in quanto le grandezze elettriche sono molto più comode da maneggiare, sia per quanto concerne la loro amplificazione che per quanto riguarda la loro misura.

Gli estensimetri più comuni sono metallici, costituiti da un sottilissimo filo conduttore disposto come mostrato nella figura seguente e tenuto in posizione da un sottile strato di resina (supporto); sono realizzati con leghe come, ad esempio, manganina (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni) o costantana (60% Cu, 40% Ni). Possono avere lunghezze che vanno da 5 mm a 10÷15 cm a seconda del tipo di materiale sul quale vengono applicati; generalmente sull'acciaio o su lamine in fibre di carbonio, essendo materiali molto omogenei, si utilizzano estensimetri con lunghezze alquanto ridotte, mentre per il calcestruzzo si va dai 5 cm in avanti (Locci, 2002).

Il disegno del film metallico e' costituito da una serie di lati lunghi e sottili (figura 3.1), raccordati mediante elementi ad essi perpendicolari, molto più corti e larghi. In questo modo la resistenza è data quasi esclusivamente dai lati sottili: solo deformazioni dirette lungo questi ultimi (asse di massima sensibilità) producono apprezzabili effetti sulla resistenza stessa. Quanto detto può essere facilmente compreso valutando la formula seguente:

$$R_{\text{filo}} = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

$R_{\text{filo}}$  : resistenza                       $\rho$ : resistività elettrica  
L: lunghezza del filo                      A: sezione del filo



Figura 3.1: estensimetro

Il principio di funzionamento di tali strumenti, espresso in forma molto semplificata (si approfondirà meglio in seguito), è il seguente: l'estensimetro viene incollato al materiale di cui si vuole definire la deformazione, successivamente lo si collega elettricamente inserendolo in un ramo di un circuito opportunamente alimentato, si procede poi mettendo sotto carico il materiale che dunque sarà soggetto ad un certo stato deformativo che interesserà di conseguenza anche l'estensimetro, il quale perciò varierà la propria resistenza (vedi formula seguente); questo fatto determina una variazione di tensione che viene percepita dall'apparecchiatura inserita nel circuito e che, essendo stata precedentemente tarata, permette di risalire dalla variazione della grandezza elettrica alla deformazione che è stata la causa della suddetta variazione.

Andando nel dettaglio si ha che la variazione di resistenza può essere dedotta andando a differenziare la formula precedente e ottenendo dunque (Bisio, 2002):

$$\Delta R = \left( \frac{\partial R}{\partial L} \right) \cdot \Delta L + \left( \frac{\partial R}{\partial A} \right) \cdot \Delta A + \left( \frac{\partial R}{\partial \rho} \right) \cdot \Delta \rho = \frac{\rho}{A} \cdot \Delta L - \frac{\rho \cdot L}{A^2} \cdot \Delta A + \frac{L}{A} \cdot \Delta \rho$$

dividendo entrambi i membri per:  $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$

si ottiene:  $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$

sapendo che:  $A = \pi \cdot \Phi^2 / 4$  e che  $\Delta A = \pi \cdot 2\Phi \cdot \Delta \Phi / 4$

si ha che:  $\frac{\Delta A}{A} = 2 \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Phi} = -2\nu \cdot \frac{\Delta L}{L}$  con  $\nu$ : coefficiente di Poisson

pertanto:  $\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \cdot \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} = \left[ (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon_L} \right] \cdot \varepsilon_L$  con  $\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L}$

Il termine tra parentesi quadre viene definito **Gauge Factor** (GF), si indica con  $K_G$ , e rappresenta il rapporto tra la variazione di resistenza e la deformazione.

$$K_G = \left[ \left( 1 + 2 \underbrace{\nu}_{\cong 0.3} \right) + \underbrace{\frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon_L}}_{\cong 0.4} \right] \cong 2$$

Si nota come la variazione di resistenza sia causata da due fenomeni distinti: l'allungamento (o accorciamento) del filo conduttore, accompagnato da una diminuzione (o aumento) di sezione (primo termine di  $K_G$ ), e la variazione di resistività che si ha in un materiale al variare della sollecitazione (secondo termine di  $K_G$ , per i metalli è  $\cong 0$  mentre per i semiconduttori è  $\cong \pm 100$ ). La costante  $K_G$  viene determinata mediante taratura ed il suo valore è fornito dal costruttore con una tolleranza che normalmente è del  $\pm 1\%$ .

La **prima relazione fondamentale dell'estensimetria elettrica** è dunque data da (“E-stensimetri elettrici parte 1 e 2”, 2001/02):

$$\varepsilon_L = \frac{1}{K_G} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad \text{deformazione lungo l'asse di massima sensibilità dello strumento}$$

In realtà esiste anche una sensibilità per deformazione lungo l'asse perpendicolare a quello in esame, tuttavia è soltanto dell'ordine del 1-2% della massima sensibilità.

Quando si vuole misurare uno stato biassiale di sollecitazione e si conoscono le direzioni principali dello sforzo si usano così dette “rosette” con due griglie a 90°, altrimenti, se le direzioni principali non sono note, si devono usare rosette a tre griglie. Si veda per questo la figura 3.2:

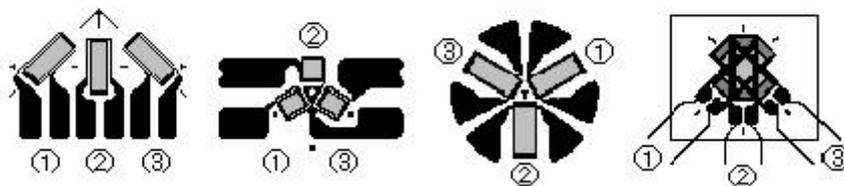


Figura 3.2: rosette estensimetriche

Uno dei problemi principali relativi all'utilizzo di strain gauges è minimizzare gli effetti di variazioni di resistenza indotti dalla temperatura. Pertanto vengono applicate leghe a basso TCR (= *coefficiente di temperatura della resistenza*, ad esempio rame/nichel) e viene scelto un substrato avente stesso coefficiente di dilatazione termica della lega utilizzata, in modo da evitare che variazioni di temperatura inducano stress nel film metallico. I dispositivi che si trovano comunemente in commercio hanno una sensibilità alla temperatura inferiore ai 5  $\mu\varepsilon/C^\circ$ , con un  $GF$  compreso tra 1.8 e 2.3 (gli strain gauge utilizzati nelle prove hanno  $GF$  pari a 2.07 ÷ 2.13) (Spanò, 2000).

Una parziale compensazione degli effetti della temperatura su  $R$  e  $GF$  può essere ottenuta usando la configurazione a *ponte di Wheatstone* per la connessione degli estensimetri; in questo caso si ha un'indipendenza della tensione d'uscita dalla variazione della resistenza dovuta ad un aumento di temperatura, ovviamente solo sotto l'ipotesi che tutti gli estensimetri siano sottoposti alla stessa temperatura ed abbiano stesso  $TCR$ . In tal modo solo a causa di sforzi (compressioni o trazioni) si avvertirà un cambiamento della tensione d'uscita (vedere dettagli in seguito “2° relazione fondamentale dell'estensimetria”).

Per il motivo suddetto e per amplificare l'output di un singolo estensimetro, che altrimenti sarebbe estremamente piccolo, nelle prove di viscosità e di rottura si sono utilizzati questi particolari tipi di reti elettriche detti appunto ponti di Wheatstone (Bisio, 2002).

Una schematizzazione di tale ponte è riportata in figura 3.3, dalla quale si può notare come esso risulta formato da quattro resistenze connesse in modo da realizzare una maglia di forma quadrata, all'interno della quale è disposto un galvanometro che è sensibile al passaggio di corrente nel lato stesso, o alla differenza di potenziale tra i nodi C e D; il circuito viene poi alimentato da un generatore di tensione continua E. Generalmente in uno o più rami della rete vengono inseriti gli estensimetri aventi resistenze note ( $120 \Omega$ , nelle prove analizzate in tale tesi). Prima di poter utilizzare gli strain gauge occorre ricondurre il sistema alla condizione d'equilibrio effettuando il così detto "annullamento del ponte", ossia individuando quel valore di resistenza, assunto incognito, che fa sì che la differenza di potenziale  $V_{CD}$  sia nulla ( $I_G = 0$ ) e che quindi ogni deformazione degli estensimetri comporti una variazione della configurazione d'equilibrio di partenza. Applicando i principi di Kirchoff al ponte, quando è verificata la condizione d'equilibrio, si ha:

$$\text{equazione al nodo C: } I_1 = I_4$$

$$\text{equazione al nodo D: } I_2 = I_3$$

$$\text{equazione alla maglia ACD: } R_1 \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 = 0 \quad \rightarrow \quad I_1 = \frac{R_2}{R_1} \cdot I_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot I_3$$

$$\text{equazione alla maglia BCD: } R_4 \cdot I_4 - R_3 \cdot I_3 = 0 \quad \rightarrow$$

$$I_3 = \frac{R_4}{R_3} \cdot I_4 = \frac{R_4}{R_3} \cdot I_1 = \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot I_3$$

Dall'ultima equazione si ottiene:  $R_1 \cdot R_3 = R_4 \cdot R_2$

La calibrazione del ponte viene effettuata variando la resistenza di un lato del ponte e rilevando l'indicazione dello strumento G. In pratica l'uguaglianza del prodotto delle resistenze

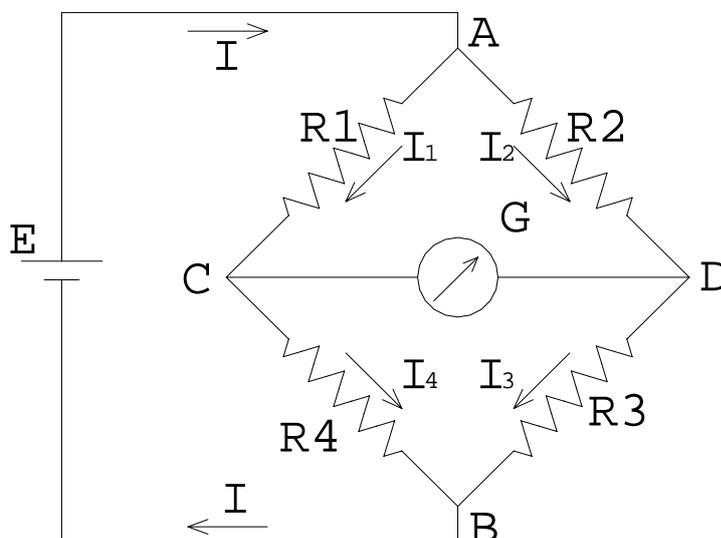


Figura 3.3: Schema del Ponte di Wheastone

in croce è detta condizione d'equilibrio e questa permette di trovare una resistenza incognita una volta note le altre tre. Si procede fissando, ad esempio, le resistenze  $R_3$  e  $R_4$ , si varia la resistenza  $R_1$  finché il ponte raggiunge l'equilibrio (che viene indicato da un segnalatore di zero, null detector, posto nel circuito). In tal modo si ricava il valore della resistenza incognita.

Negli impieghi con trasduttori, il ponte non viene utilizzato in condizioni di perfetto equilibrio, bensì nell'intorno di tale stato (ponte sbilanciato).

Dalle relazioni che descrivono il ponte di Wheatstone si ha:

$$I_1 = \frac{V_{AB}}{(R_1 + R_4)} \quad I_2 = \frac{V_{AB}}{(R_2 + R_3)}$$

$$V_{CD} = I_2 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_4 \Rightarrow V_{CD} = \left( \frac{R_3}{(R_2 + R_3)} - \frac{R_4}{(R_1 + R_4)} \right) \cdot V_{AB}$$

$$\frac{V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)}$$

Si vuole cercare lo squilibrio del ponte quando c'è uno squilibrio in una delle resistenze del ponte stesso. Supponiamo di incrementare  $R_1 = R_1 + \Delta R_1$ :

$$\frac{V_{CD} + \Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{(R_1 + \Delta R_1) R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4 + R_3 \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)}$$

Dato che il ponte, prima della variazione di resistenza, era bilanciato si ha che:

$$V_{CD} = 0 \quad \text{e} \quad R_1 \cdot R_3 - R_4 \cdot R_2 = 0 \quad \text{dunque}$$

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{R_3 \Delta R_1}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3) + \Delta R_1 (R_2 + R_3)}$$

Dividendo numeratore e denominatore per  $(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)$  si ottiene:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{R_3 \Delta R_1}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)} \left( 1 + \frac{\Delta R_1}{R_1 + R_4} \right)$$

$$\text{Ponendo: } \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \alpha \quad \text{e} \quad R_1 + R_4 = R_m$$

$$\text{Si ottiene: } \frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \alpha \cdot \frac{\Delta R_1}{R_m} \left( 1 + \frac{\Delta R_1}{R_m} \right)$$

$$\text{Visto che } \Delta R_1 \ll R_m \text{ allora } \left( 1 + \frac{\Delta R_1}{R_m} \right) \cong 1$$

Considerando tutte le resistenze uguali ( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ), si ha:  $\alpha = 1/2$  e  $R_m = 2R_1$

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

Ripetendo lo stesso ragionamento per una variazione  $\Delta R_2$  di  $R_2$  si ottiene:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_2}{R_2}$$

Le stesse considerazioni si possono svolgere per gli altri due rami del ponte e nel caso in cui tutte e quattro le resistenze subiscano delle variazioni, si ottiene la **seconda relazione fondamentale dell'estensimetria elettrica** ("Estensimetri elettrici parte 1 e 2", 2001/02):

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \text{ sapendo che: } \varepsilon_L = \frac{1}{K_G} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{K_G}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \text{ si suppone che tutti gli estensimetri abbiano lo stesso } K_G$$

Da questa relazione si comprende come le deformazioni subite dagli estensimetri inducano una variazione di tensione ( $\Delta V_{CD}$ ) nel circuito che, misurata attraverso il galvanometro ed essendo nota la tensione d'alimentazione  $V_{AB}$  e il *gauge factor* ( $K_G$ ), previa opportuna taratura, permette di ricavare il valore delle deformazioni.

Si comprende inoltre che se lo squilibrio è di pari intensità e segno su tutti gli estensimetri, ad esempio per effetto di una variazione di temperatura, visto che  $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$ , si ha  $\Delta V_{CD} = 0$  e dunque si ha un'indipendenza della tensione d'uscita dalla variazione di resistenza dovuta ad un aumento di temperatura.

### Esempio applicativo

Si considera un provino soggetto ad una sollecitazione assiale  $N$  e al quale sono collegati vari estensimetri (indicati con 1,2,3,4 nella figura 3.4) ("Estensimetri elettrici parte 1 e 2", 2001/02).

$$\text{Si ha che: } \varepsilon_a = \sigma / A \quad \varepsilon_L = -\nu \varepsilon_a$$

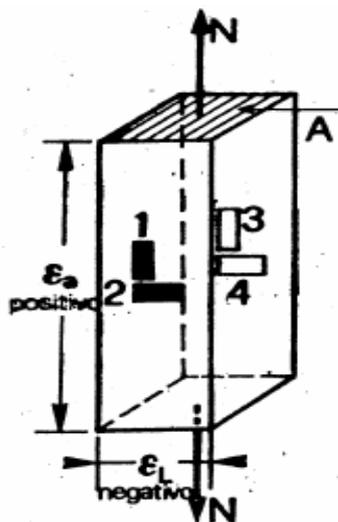


Figura 3.4: provino con estensimetri

-Nel caso di collegamento a ponte intero (4 estensimetri nei quattro lati del ponte) visto che:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_L = -\nu \varepsilon_a = -\nu \varepsilon_1 \quad \frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{K_G}{4} \cdot (\varepsilon_1 - (-\nu \varepsilon_1) + \varepsilon_3 - (-\nu \varepsilon_3))$$

Dato che:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon_a = \varepsilon$

Si ha: 
$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{K_G}{4} \cdot 2\varepsilon \cdot (1 + \nu) = 2.6 \cdot \frac{K_G}{4} \cdot \varepsilon$$

-Nel caso di collegamento a quarto di ponte (un solo estensimetro inserito nel ponte):

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{K_G}{4} \cdot \varepsilon_1$$

-Nel caso di collegamento a doppio quarto di ponte (2 estensimetri inseriti in serie in un lato del ponte):

si considerano gli estensimetri 1 e 3 e si ha: 
$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{K_G}{4} \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)$$

In tal caso se esiste un momento flettente, dovuto ad una piccola eccentricità di N, poiché esso produce deformazioni eguali e di segno opposto sui due estensimetri, si ha cancellazione dell'effetto, mentre la sollecitazione di trazione viene sentita con pari segno.

Nelle prove di creep sui cilindri di cls, proprio per compensare eventuali azioni flettenti, si è scelto di adottare tale tipo di collegamento.

### Collegamenti degli estensimetri nelle prove in esame

Nelle prove di rottura svolte sulle travi si è utilizzato un collegamento a quarto di ponte (figura 3.5); esso consiste nel mettere un estensimetro (di  $120\ \Omega$  di resistenza) in un ramo del ponte e nel “chiudere” quest’ultimo collegando il tutto al sistema d’acquisizione.

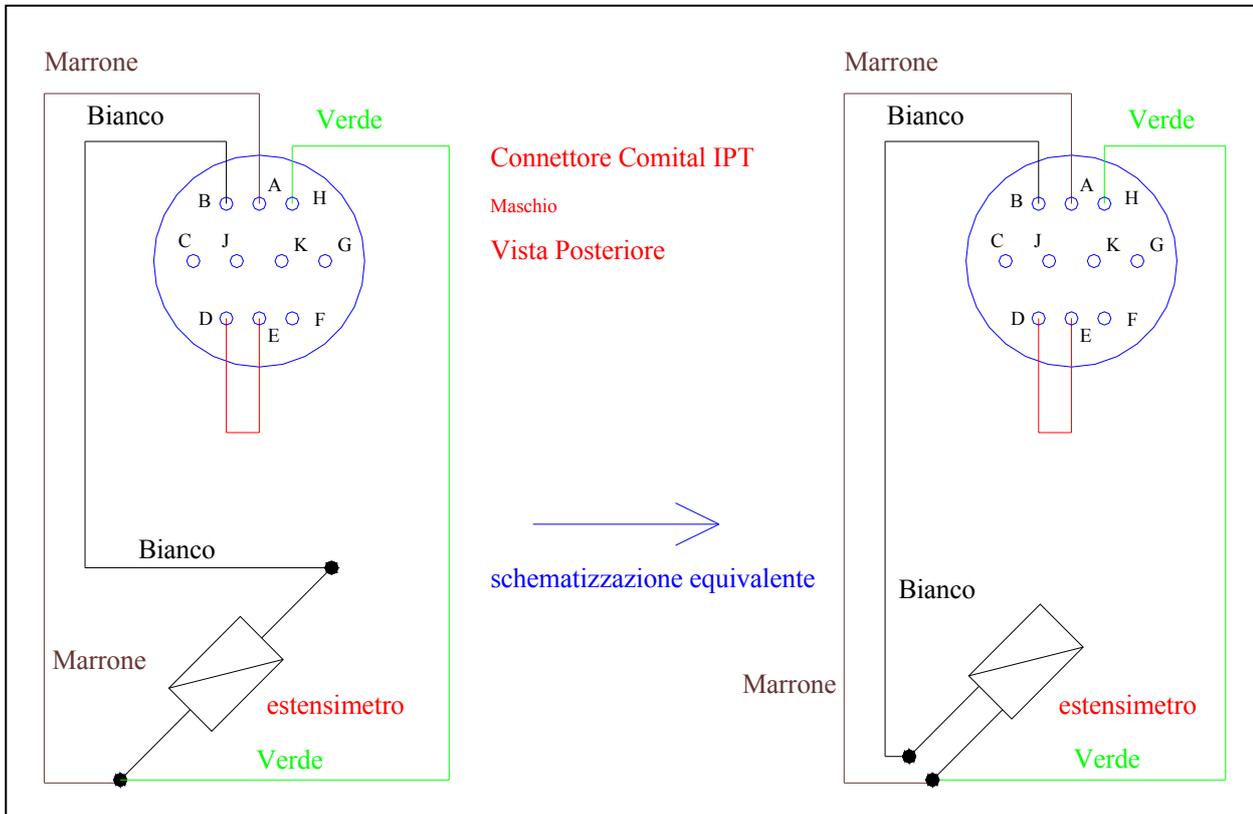


Figura 3.5: schema del collegamento a quarto di ponte

### Fasi del collegamento dell'estensimetro alla superficie oggetto delle misure

Si è fatto riferimento a quanto esposto nel BOLLETTINO TECNICO Cod. B-129-ITR e v. 2 del 07/05/99. Nelle figure 3.9÷3.12 sono rappresentate alcune delle seguenti fasi.

1. *Preparazione della superficie d'attacco attraverso la smerigliatura* della trave (o cilindro). In tal modo si ha un livellamento e un'omogeneizzazione della superficie.
2. *Tracciatura dell'esatto posizionamento dell'estensimetro*. Si tracciano 2 linee perpendicolari l'una all'altra; una di esse è orientata nella direzione della misura.
3. *Condizionamento della superficie*. S'intende che la superficie sulla quale verrà posizionato lo strumento deve essere accuratamente pulita mediante un opportuno solvente e strofinata con vari stecchetti in cotone.
4. *Neutralizzazione*. L'acidità superficiale, che si ha a seguito del condizionamento, deve essere ridotta strofinando con garze imbevute di neutralizzatore.
5. *Asciugatura della superficie*. Riscaldarla con una lampada ad infrarossi o con un asciugacapelli per accelerare l'evaporazione.
6. *Applicazione del collante* a base epossidica.
7. *Posizionamento dell'estensimetro* sopra al collante.
8. *Applicare una pellicola trasparente* sull'estensimetro e premere a lungo per favorire l'incollaggio
9. *Fissaggio della terminazione per estensimetri*. Si procede come visto nelle fasi 6, 7, 8.

Una funzione importante delle terminazioni è quella di proteggere l'estensimetro, infatti in tal modo se i cavi che lo collegano al sistema d'acquisizione, per qualche motivo, vengono tirati con forza, si avranno ripercussioni, strappi in corrispondenza della terminazione e non dello strumento.

Essenzialmente sono disponibili due serie principali di terminazioni, quella con supporto solido a cubo, e quelle ricavate da *foil*, simili agli stessi estensimetri.

#### **Terminazioni con supporto a cubo** (figura 3.6, 3.7)

La serie *T* è realizzata con dei cubetti in plastica in cui sono annegati due conduttori con diametro pari a circa 0,8 mm. La serie *TY* è invece laminata su supporto



Figura 3.6: terminazioni a cubo

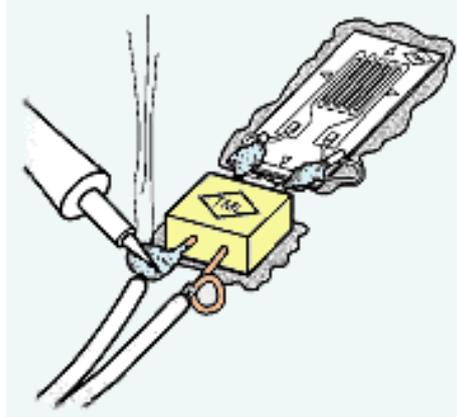


Figura 3.7: terminazioni a cubo in gomma, e si presta in modo particolare per l'uso con estensimetri piuttosto estesi. La serie *TP-2* è invece autoadesiva.

#### **Terminazioni "foil"** (figura 3.8)

La serie *TF* viene realizzata su fogli in rame con spessore 0,03 mm, deposti su supporto in vetroresina epossidica spessa circa 0,15 mm. La serie *TFY* è invece laminata su foglio in gomma con spessore indicativo pari a circa 0,8 mm. La serie *TPF* è invece pensata per l'uso con elevate temperature.



Figura 3.8: terminazioni a "foil"

10. Collegamento dei fili conduttori dell'estensimetro alla terminazione mediante stagnatura.
11. Collegamento del cavo del sistema d' acquisizione alla terminazione mediante stagnatura.

Si riportano di seguito alcune foto del collegamento di un estensimetro eseguite in laboratorio durante la preparazione delle prove.



Figura 3.9: fasi 1, 2, 3 del collegamento dell'estensimetro



Figura 3.10: fase 8 del collegamento dell'estensimetro

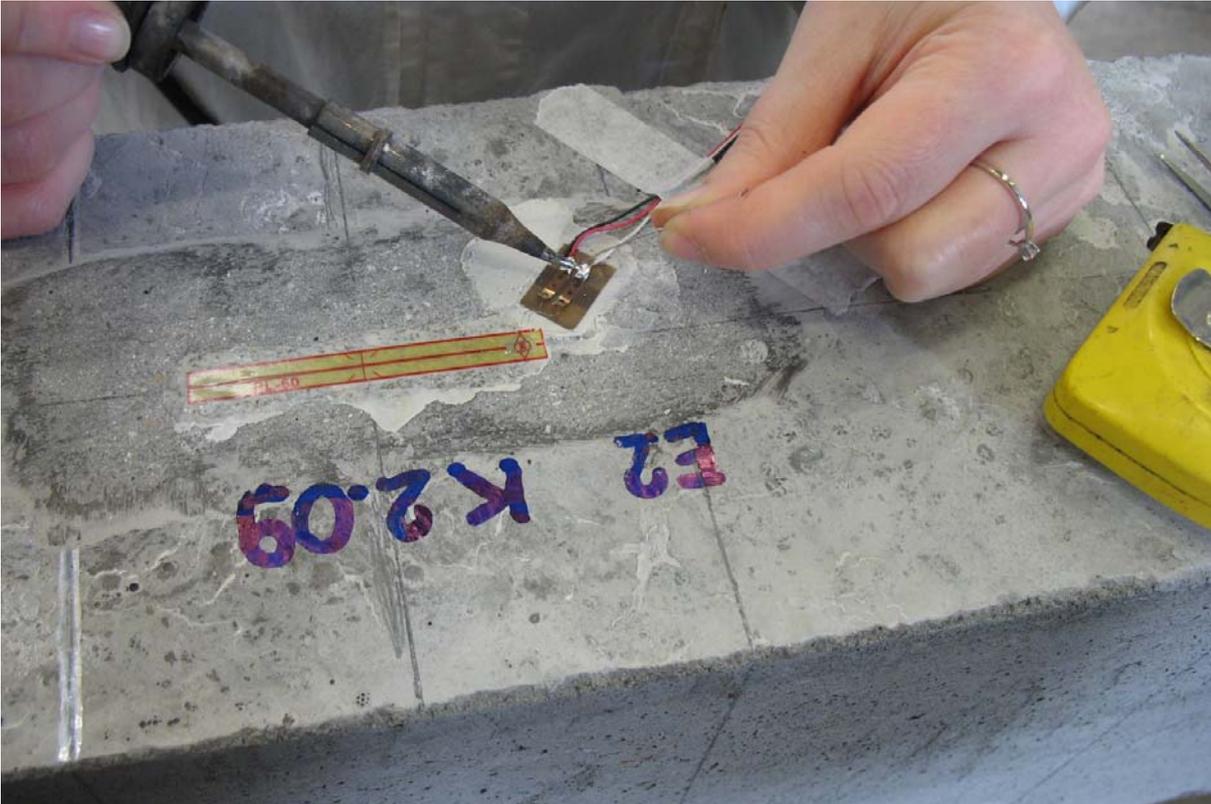


Figura 3.11: fase 8 del collegamento dell'estensimetro



Figura 3.12: lavoro ultimato (i fili rosso e blu sono equivalenti a quelli verde e marrone della figura precedente, al filo nero corrisponde il bianco della figura precedente, mentre il filo bianco di questa figura non è collegato)

### 3.2 Trasduttori di spostamento resistivi (detti 'omega')

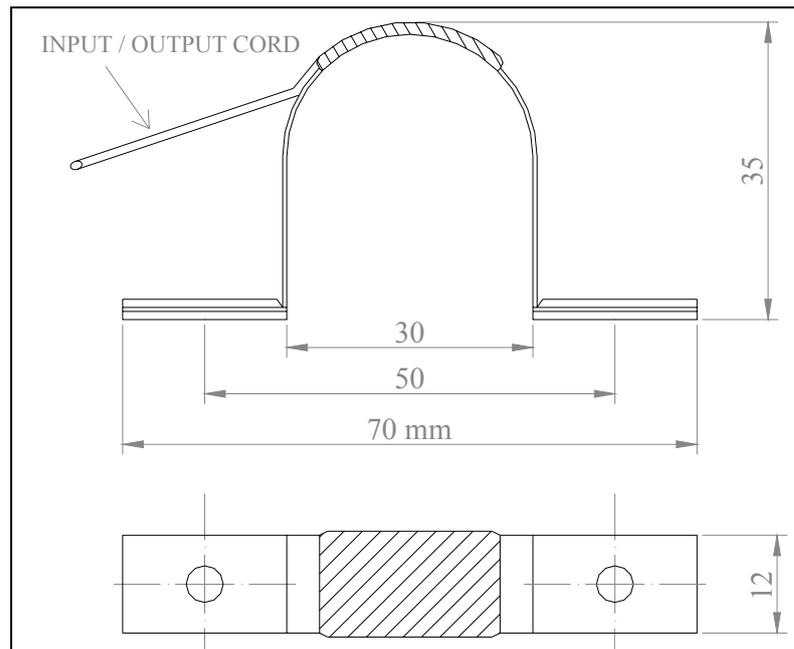


Figura 3.13: viste dello strumento

Questi strumenti sono stati utilizzati nelle prove di rottura delle travi col fine di monitorare lo sviluppo dello stato fessurativo in zone localizzate. Essi sono stati fissati avvitandoli a piastrine, aventi un gambo filettato, che in precedenza erano state incollate alla trave con lo stesso collante già utilizzato per gli estensimetri. Presentano un comportamento resistivo ed infatti nella parte superiore, da dove esce il cavo, che andrà poi collegato al sistema d'acquisizione, sono presenti degli estensimetri collegati a ponte intero (figure 3.13, 3.14).

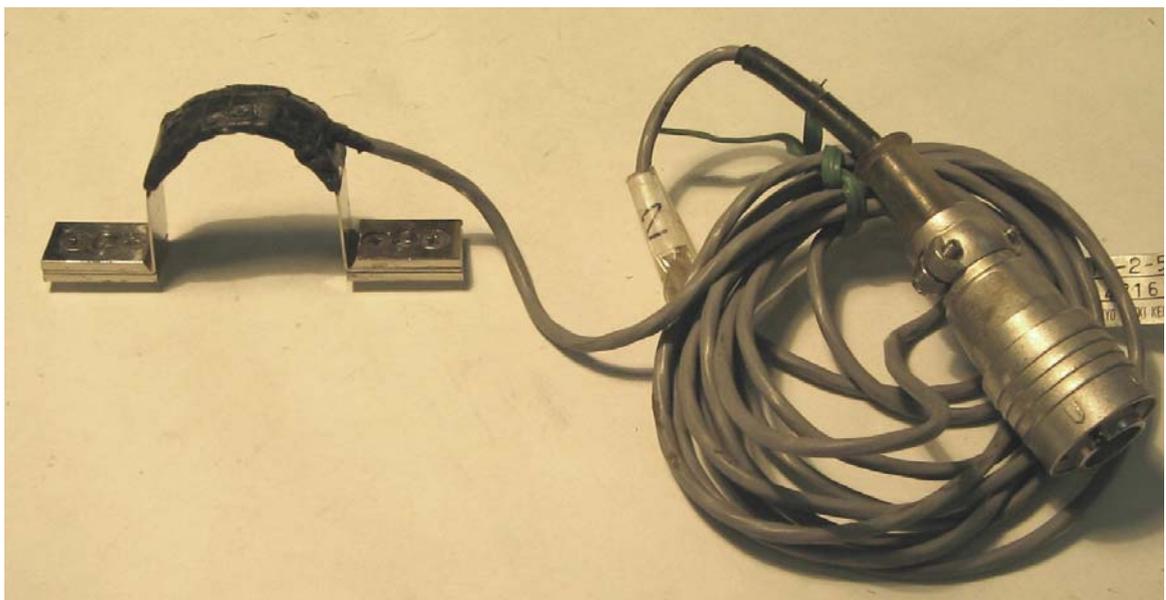


Figura 3.14: strumento con cavo di collegamento

Come si può vedere dalla figura 3.15, tali strumenti sono stati posti in corrispondenza di quei punti in cui si presupponeva si sarebbero aperte le fessure (in prossimità delle staffe, indicate con la riga bianca, essendo zone meno omogenee delle altre). Perché la fessura possa essere rilevata è necessario che passi entro i due punti di collegamento dell'omega con la trave (circa 5 cm).



Figura 3.15: posizionamento durante la prova di rottura

Il principio di funzionamento è abbastanza semplice, infatti l'allontanamento o l'avvicinamento dei due punti in cui lo strumento è collegato alla trave, determinano una variazione della curvatura (nasce uno stato deformativo) della parte inarcata dell'omega, che viene percepita dagli estensimetri incollati ad essa (non visibili a causa del nastro isolante nero) attraverso una variazione della propria resistenza che determina uno squilibrio nel ponte come già visto nel paragrafo dedicato agli estensimetri.

Per concludere si danno alcuni dati tecnici relativi agli omega utilizzati nelle prove:

- Type: PI-2-50
- Temperature Range: 0 ÷ 40 °C
- Resistance: 350 Ω
- Exciting Voltage

### 3.3 Gli LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

L'LVDT è un dispositivo in grado di misurare lo spostamento di un punto al quale è collegato. Il fenomeno che sfrutta è l'induzione elettromagnetica e di fatto esso non è nient'altro che un trasformatore a nucleo mobile e, come tale, è in grado di manipolare solamente grandezze elettriche alternate.

Si riportano di seguito alcune figure (figura 3.16, 3.17) attraverso le quali si descriverà il funzionamento di un LVDT: esso viene inserito e fissato all'interno di un elemento (A) precedentemente fissato ad un supporto (C) posato a terra; la sonda (probe) dello strumento è posta a contatto con un elemento (B) che è incollato o comunque fissato alla trave. Quando quest'ultima viene posta sotto carico l'LVDT permetterà di rilevare lo spostamento del punto punto B (la sonda durante lo sviluppo di tale spostamento continua a rimanere a contatto con l'elemento (B) grazie all'azione di una molla interna (spring)).

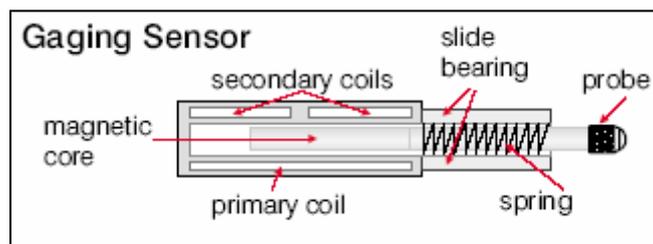


Figura 3.16: sezione longitudinale dell'LVDT

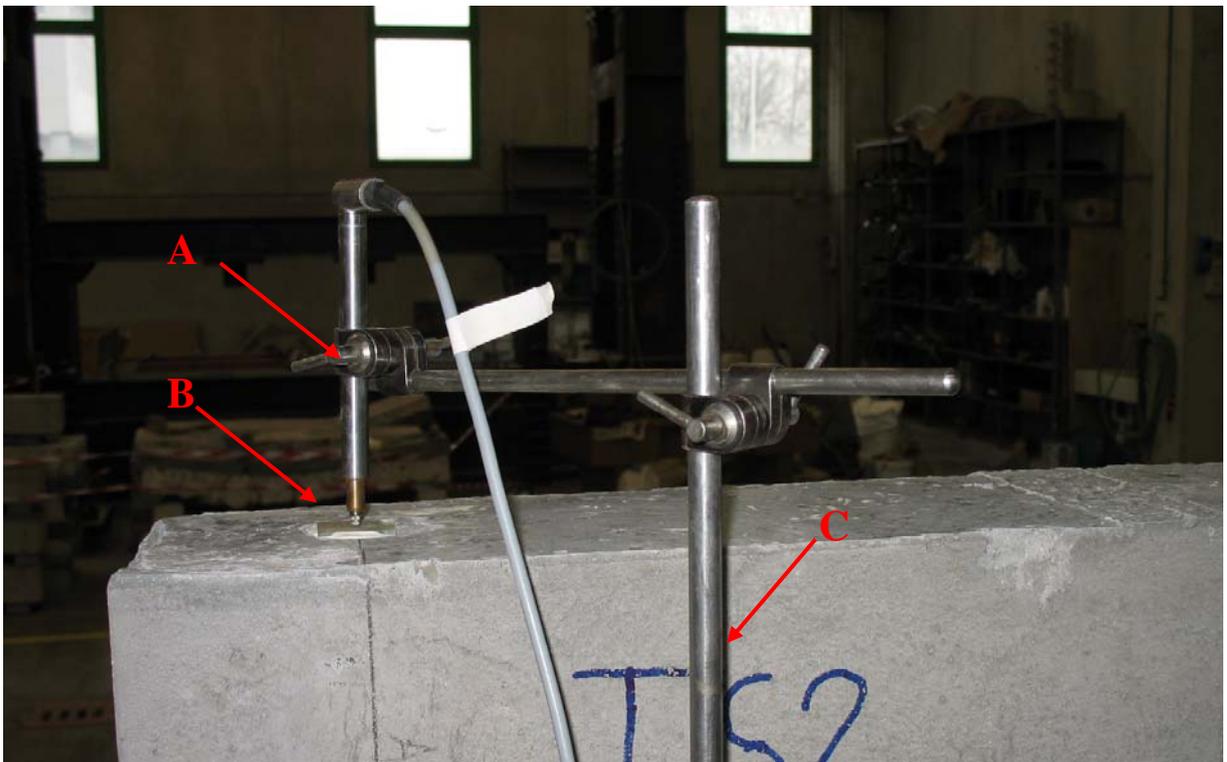


Figura 3.17: LVDT e verticale utilizzati nella prova di rottura delle travi

Si spiega ora in che modo una variazione di spostamento viene trasformata in una variazione di potenziale elettrico che può essere così rilevata dal sistema d'acquisizione (figura 3.18): il circuito è costituito da un solenoide (coil) principale (P) e da due secondari avvolti in controfase l'uno rispetto all'altro ( $S_1, S_2$ ); l'asse di tali solenoidi coincide con quello di un nucleo (core) ferromagnetico, anche se nella figura seguente non si è rappresentata tale coincidenza di assi per maggiore chiarezza. Il solenoide P è percorso da corrente alternata dunque si viene a generare un campo d'induzione magnetica, concatenato ai due solenoidi secondari, variabile nel tempo che perciò induce in essi correnti alternate. Il campo magnetico generato determina anche la magnetizzazione del nucleo ferromagnetico e dunque quando esso occupa una posizione tale da conferire "simmetria" al trasformatore, si ha che il flusso concatenato da  $S_1$  è identico a quello concatenato da  $S_2$  e quindi  $V_{S1} = -V_{S2}$ , quindi la tensione tra i due estremi del circuito secondario, che rappresenta l'output del trasduttore, è nulla. Al contrario, se il nucleo si muove dalla posizione di zero, il voltaggio indotto sul solenoide al quale si è avvicinato aumenta (l'avvicinamento del nucleo determina un aumento del campo magnetico concatenato) a discapito dell'altro che diminuisce generando così un output diverso da zero e linearmente proporzionale allo spostamento del nucleo ( $\Delta x$ ).

Prima di poter utilizzare un simile strumento occorre conoscere la costante di proporzionalità tra la differenza di potenziale [mV] in uscita e lo spostamento registrato dallo strumento.

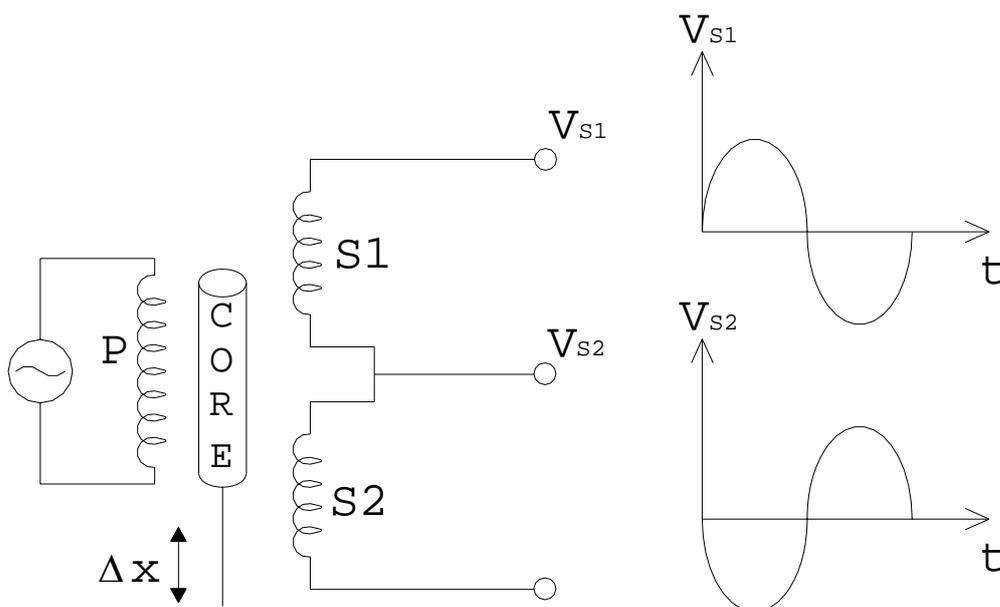


Figura 3.18: Schema del circuito elettromagnetico alla base del funzionamento di un LVDT

### 3.4 Sistema e apparecchiature di acquisizione

Tutti i vari strumenti, descritti in precedenza, vengono collegati per mezzo di un cavo al sistema d'acquisizione attraverso il quale è possibile esprimere numericamente quanto accade nel procedere della prova.

Nelle prove di rottura, essendo prove quasi istantanee, è necessario acquisire i dati ad intervalli di tempo molto ravvicinati dunque l'acquisizione è avvenuta solo col computer e non manualmente anche se possibile. L'acquisizione dei dati è stata possibile collegando tutti gli strumenti ad un sistema gestito attraverso un software (LabView) che ha permesso di acquisire dati ad intervalli di tempo ravvicinati, in tal modo è stato seguito lo sviluppo delle deformazioni indotte dall'applicazione del carico.

Nelle figure 3.19 e 3.21 si mostrano i vari componenti del sistema di acquisizione che verranno brevemente descritti di seguito:

**VISHAY 2110**: è un sistema d'amplificazione al quale possono essere connessi solo quegli strumenti che hanno un funzionamento di tipo resistivo (estensimetri, omega, celle di carico). Nella parte posteriore vengono inseriti i connettori posti all'estremità dei cavi di collegamento degli strumenti (massimo 10 connettori) e al di sotto di ciascuno di essi si diparte un cavo



Figura 3.19: sistema d'acquisizione (vista anteriore)

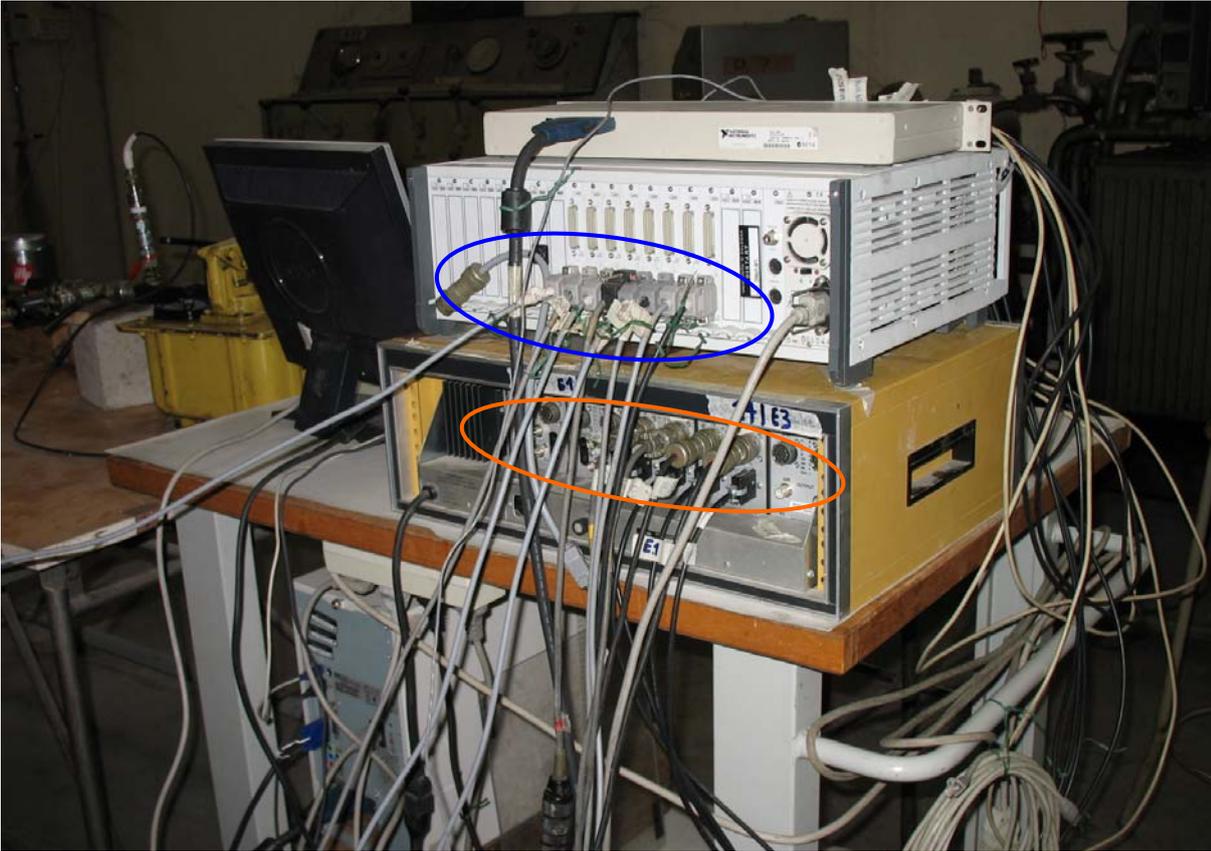


Figura 3.20: sistema d'acquisizione (vista posteriore) – in blu si sono cerchiati i connettori inseriti nella MGC, in arancione quelli inseriti nella 2110.

d'uscita che va ad inserirsi nella morsettiera. Prima dell'inizio di ogni prova è necessario definire, per ciascun strumento, il *voltaggio* (alimentazione), regolare il *Gain* ruotando la manopola nera posta più in basso (attraverso il Gain si definisce il grado d'amplificazione del segnale d'uscita) e *bilanciare il ponte di Wheatstone* ruotando la manopola nera posta più in alto (il ponte è bilanciato quando entrambi i led posti sopra alla manopola sono spenti). Si procede poi inserendo le costanti di taratura di ciascuno strumento all'interno del software.

**MGC**: è un sistema d'amplificazione al quale possono essere connessi sia gli strumenti che hanno un funzionamento di tipo resistivo (estensimetri, omega, celle di carico) che quelli con funzionamento induttivo (LVDT). Nella parte posteriore vengono inseriti i connettori posti all'estremità dei cavi di collegamento degli strumenti (massimo 7 connettori) e anteriormente a ciascuno di essi si diparte un cavo d'uscita che va ad inserirsi nella morsettiera. Le regolazioni sono analoghe a quelle descritte per la 2100 però il tutto è digitalizzato (non sono presenti manopole di regolazione).

**MORSETTIERA**: essa da una parte raccoglie tutti i cavi che fuoriescono dalla 2100 e dall'MGC e dall'altra si collega, mediante un unico cavo, al case del computer. Per chiarire le idee, la sua funzione è banale e analoga a quella di una "presa elettrica multipla" utilizzata quan-

do ad un'unica "presa a muro" si devono collegare più apparecchi elettrici. Nel caso in esame non sarebbe pensabile che ogni cavo d'uscita dalla 2100 e dall'MGC, visto il loro numero elevato, fosse direttamente collegato al case e proprio per ovviare a ciò si utilizza la morsetti-  
ra.

Strumenti utilizzati per effettuare le letture manuali (estensimetri, celle di carico):

**P3500**: la modalità di funzionamento di tale strumento è mostrata in figura 3.21; il connettore 'maschio' posto all'estremità del cavo collegato all'estensimetro viene inserito nel connettore 'femmina' ben visibile nella figura 3.22 e sul display viene indicato il valore delle deformazioni in  $\mu\epsilon$ . Tale strumento presenta una batteria interna, inoltre attraverso una manopola è possibile regolare il *gage factor*. Quest'ultimo, per tutte le misurazioni eseguite, è stato mantenuto costante e pari a 2 anche se il  $K_G$  dell'estensimetro era diverso da 2; la misura corretta è stata poi trovata attraverso una relazione numerica dedotta dalla prima relazione fondamentale dell'estensimetria elettrica (paragrafo 3.1) infatti:

$\Delta R/R$  relativo all'estensimetro è indipendente dal gage factor ( $K_G$ ) che si pone nel P3500 sapendo che:  $K_G$  dell'estensimetro è pari a 2.13 e che il  $K_G$  posto nel P3500 è pari a 2 e visto che:  $\Delta R/R = \epsilon \cdot K_G$

si ha che  $\epsilon_{P3500} \cdot 2 = \epsilon_{reale} \cdot 2.13 \rightarrow \epsilon_{reale} = (\epsilon_{P3500} \cdot 2) / 2.13$

Si è scelto di mantenere costante e pari a 2 il gage factor del P3500 per non doverlo sempre andare a modificare a seconda dei diversi  $K_G$  dei vari estensimetri e rendere in tal modo più celeri le misurazioni (vedi anche la tabella posta alla fine del capitolo).



Figura 3.21: lettura manuale delle deformazioni mediante l'apparecchiatura P3500



Figura 3.22: strumento P3500

## 4 Il Calcestruzzo autocompattante

Nel presente capitolo si descrivono le caratteristiche composizionali e le modalità d'esecuzione dei getti di calcestruzzo autocompattante che si sono svolti per la creazione delle travi e dei provini cilindrici che sono poi stati l'oggetto delle prove in esame. Prima di addentrarsi in tale argomento si vuole presentare una breve introduzione sul calcestruzzo autocompattante che è stata elaborata facendo riferimento principalmente alle "Linee Guida per la produzione del calcestruzzo autocompattante SCC" dell'Atcap.

### 4.1 Cenni sul calcestruzzo autocompattante

Il calcestruzzo autocompattante si è sviluppato in Giappone agli inizi degli anni '80 a seguito di studi sulla reologia dei calcestruzzi ad alta resistenza e con l'obiettivo di realizzare un materiale dotato di una durabilità maggiore rispetto ai cls tradizionali.

La principale caratteristica dell'SCC è l'autocompattabilità, cioè la capacità di essere gettato all'interno di una cassaforma della quale occuperà qualsiasi angolo, anche il più remoto e di difficile accessibilità, senza necessitare di alcuna vibrazione o compattazione, cioè senza aver bisogno di alcuna forza esterna se non quella rappresentata dal peso proprio.

Affinchè un calcestruzzo possa essere definito autocompattante, quindi, è necessario che esso possieda un' elevata deformabilità allo stato fresco, cioè un'elevata capacità di modificare la sua forma sotto l'azione del proprio peso (e a maggior ragione di eventuali forze esterne) assumendo quella dello stampo entro cui viene introdotto.

Suddetta proprietà è strettamente legata alla capacità del materiale di raggiungere zone della cassaforma più o meno distanti dal punto in cui viene effettuato il getto in assenza di ostacoli rappresentati da restringimenti di sezione o di zone ad elevata congestione d'armatura. Nelle strutture in conglomerato cementizio armato ove, invece, è necessario che il materiale fluisca superando gli inevitabili ostacoli rappresentati dai ferri d'armatura, l'autocompattabilità è connessa sia con la deformabilità che con la mobilità in spazi ristretti. Quest'ultima rappresenta la capacità del conglomerato di scorrere in presenza di restringimenti di sezione laddove è elevata la probabilità di un arresto del flusso del calcestruzzo (blocking) a causa dell'aumento del numero di collisioni dei granuli dell'aggregato grosso. Occorrerà dunque un volume di pasta di cemento in eccesso rispetto a quello normalmente impiegato nei calcestruzzi tradizionali: lo spessore di pasta attenuerà tali collisioni facilitando lo scorrimento del calcestruzzo in prossimità di quelle sezioni congestionate (Barocci, 2002).

Tuttavia, perché un calcestruzzo possa essere definito Self-Compacting è necessario che alla proprietà di autocompattabilità, di deformabilità allo stato fresco e di mobilità in spazi ristretti si associ un' elevata resistenza alla segregazione. Questa proprietà identifica la capacità del conglomerato cementizio di conservare un'uniforme distribuzione degli ingredienti che lo compongono (cemento, aggiunte, aggregati, additivi ed acqua):

- durante la posa in opera (resistenza alla segregazione esterna);
- durante il periodo nel quale il materiale fluisce nello stampo e collide con le armature e con le pareti del cassero (resistenza alla segregazione di flusso);
- a riempimento avvenuto del cassero evitando la sedimentazione degli aggregati grossi sul fondo e la conseguente risalita d'acqua di bleeding in superficie (resistenza alla segregazione interna).

Dal punto di vista compositivo i calcestruzzi autocompattanti presentano caratteristiche diverse rispetto ai tradizionali conglomerati cementizi. Le principali differenze consistono:

- in un maggior volume del materiale con finezza inferiore a 150  $\mu\text{m}$  (cemento, aggiunte minerali, frazioni finissime degli aggregati lapidei);
- in un minor contenuto degli aggregati grossi la cui pezzatura massima solitamente non supera i 25 mm;
- nell'importante utilizzo di additivi superfluidificanti che hanno la funzione di rendere più fluido il calcestruzzo e ridurre notevolmente l'acqua d'impasto e additivi modificatori di viscosità che hanno la funzione di diminuire la segregazione dell'impasto.

Dal punto di vista reologico il calcestruzzo può essere schematizzato come un sistema costituito da due fasi di cui una, la pasta, costituisce il *fluido trasportatore*; l'altra, invece, costituita dagli aggregati lapidei, rappresenta la fase *trasportata*. Pertanto, la reale possibilità di confezionare un calcestruzzo autocompattante d'elevata fluidità è associata alle necessità di aumentare il volume di materiale finissimo che costituisce il fluido trasportatore a scapito del minor volume di aggregato, ed in particolare di quello grosso che, invece, deve essere trasportato.

La limitazione del volume di aggregato grosso si rende necessaria non solo per diminuire la fase del sistema che deve essere trasportata, ma soprattutto per ridurre il numero di collisioni tra i granuli dell'elemento lapideo responsabili del fenomeno di bloccaggio del calcestruzzo (blocking) in prossimità di restringimenti di sezione o di zone particolarmente congestionate dalle armature (Barocci, 2002).

METODI DI MISURA DELLE PROPRIETÀ REOLOGICHE

I metodi più diffusi per la misura delle proprietà reologiche dei Self-Compacting Concrete sono (Barocci, 2002):

- *Slump-Flow*: per valutare la capacità di riempimento e resistenza alla segregazione;
- *V-Funnel*: per valutare la capacità di scorrimento e resistenza alla segregazione;
- *U-Box*: per valutare la capacità di scorrimento e attraversamento di ostacoli;
- *L-Box*: per valutare la capacità di scorrimento e attraversamento di ostacoli e armature;
- *J Aing*: per valutare la capacità di scorrimento e attraversamento di ostacoli orizzontali;

SLUMP-FLOW (figura 4.1)

La misura dell'abbassamento al cono di Abrams (lo slump) rappresenta il metodo più diffuso, utilizzato nella quasi totalità dei cantieri, per valutare le proprietà reologiche dei tradizionali calcestruzzi la cui classe di consistenza varia da *terra umida* (S1 in accordo alla UNI 9858) a *superfluida* (S5). La misura dello slump, tuttavia, perde di significato per i calcestruzzi autocompattanti in quanto l'abbassamento risulterebbe, per l'elevata fluidità dell'impasto, pari per tutti i conglomerati alla differenza tra l'altezza del cono (300 mm) ed il diametro massimo dell'aggregato ( $D_{mex}$ ). Tenendo presente che i valori delle pezzature massime correntemente impiegate variano tra 16 e 32 mm, lo slump dei calcestruzzi autocompattanti risulterebbe, indipendentemente dalle reali proprietà reologiche dell'impasto, sempre compreso tra 284 e 268 mm.

La misura delle proprietà reologiche dei calcestruzzi autocompattanti risulta, tuttavia, ancora possibile utilizzando il cono di Abrams per misurare (prova dello slump-flow):

- a) il diametro della focaccia di calcestruzzo ottenuta dopo il sollevamento del cono quando il flusso del conglomerato si è arrestato ( $d_f$ );
- b) il tempo necessario alla focaccia di calcestruzzo per spandersi e per raggiungere il diametro di 500 mm ( $t_{500}$ ) e la posizione finale ( $t_f$ ).

La misura del diametro finale ( $d_f$ ) può assumersi proporzionale al limite di scorrimento ( $f$ ) del conglomerato e, quindi, alla deformabilità dello stesso per effetto del peso proprio: maggiore risulterà  $d_f$  e più elevata sarà la deformabilità del calcestruzzo allo stato fresco.

I tempi  $t_{500}$  e  $t_f$  invece, a parità di  $d_f$  e quindi di deformabilità sono proporzionali alla viscosità plastica del calcestruzzo: maggiore risulterà il valore di  $t_{500}$  e  $t_f$  e più elevata sarà la viscosità plastica del calcestruzzo.

I valori minimi di  $d_f$  e  $t_f$  per conseguire una sufficiente autocompattabilità del materiale sono:

$$d_f > 600 \text{ mm} \quad t_f < 12 \text{ secondi}$$

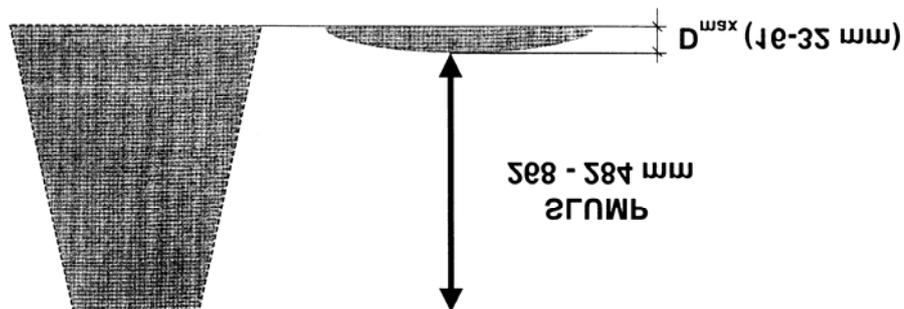


Fig. 2.6.1 – Abbassamento al cono dei cls autocompattanti

In funzione delle normali condizioni operative di getto, può essere opportuno il superamento di tali limiti minimi per ottenere uno spandimento compreso tra 650 e 750 mm.

## 4.2 Componenti e caratteristiche del getto

Le modalità d'esecuzione del getto sono abbastanza standardizzate infatti dopo aver accuratamente stabilito, mediante pesatura, i quantitativi di ghiaietto, pietrischetto e sabbia, questi vengono inseriti, insieme ad una parte dell'acqua preventivata, all'interno della betoniera che viene poi messa in funzione; quando il mescolamento dei vari componenti è ritenuto sufficiente, la betoniera viene momentaneamente arrestata per inserire in essa il cemento, il filler (contenente una certa percentuale di silice attiva), l'additivo e la rimanente parte d'acqua, per poi essere rimessa in funzione fino ad ottenere il getto delle caratteristiche volute.

Si riporta nella tabella 4-1 il riassunto delle caratteristiche e dei componenti dei getti di calcestruzzo autocompattante che sono stati eseguiti per l'attuazione delle prove che sono oggetto di tale tesi. Nel calcolare il quantitativo d'acqua si è tenuto conto dell'umidità della sabbia, al peso della quale bisogna dunque sottrarre il peso della percentuale d'acqua insita in essa.

	Cilindri MISCELA A	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	Cilindri MISCELA B
Data getto	27/09/04	02/12/04	10/12/04	16/12/04	13/01/05	26/01/05	28/01/05	08/04/05
Quantità getto [L]	100	140	140	140	100	140	100	90
Cemento [Kg]	35	49	49	49	35	49	35	32.4
Filler [Kg]	19.5	27.3	27.3	27.3	19.5	27.3	19.5	15.6
Sabbia [Kg]	95.4	136.8	138.8	138.1	99.1	139.4	99.1	81.6
Umidità sabbia	2.5%	5%	6.5%	6%	6.5%	7%	6.5%	6%
Pietrischetto [Kg]	45.4	63.6	63.6	63.6	45.4	63.6	45.4	49.5
Ghiaietto [Kg]	17.7	24.8	24.8	24.8	17.7	24.8	17.7	16.3
Acqua [L]	15.9	18.1	17.1	17.5	12.2	17.2	15	14.6
Additivo [L]	0.7	0.98	0.98	0.98	0.7	0.98	0.7	0.87
A/C	0.52	0.51	0.53	0.52	0.53	0.53	0.61	0.60
Slump Flow [cm]	79	77	76.5	72	72	75	73	79
T. amb. [°C]	26.6	12.2	9.5	10.5	5.8	1.8	2.7	18
T. cls [°C]	27.2	15.3	17	16.9	13.4	9.1	9.8	20

Tabella 4-1: componenti e caratteristiche dei vari getti di SCC

## 4.3 Getto dei cilindri

Una parte delle prove trattate nella presente tesi si sono incentrate sullo studio delle proprietà del calcestruzzo autocompattante visto come componente di un elemento strutturale.

Per far ciò si sono utilizzati i risultati ottenuti da prove di resistenza, di valutazione del modulo d'elasticità, del ritiro e del creep eseguiti su provini di forma cilindrica, che sono stati raccolti in una tesi precedente, ma connessa a questa.

## 4.4 Getto delle travi

Per la valutazione del comportamento del calcestruzzo autocompattante in opera sono state eseguite delle prove di rottura e creep su elementi strutturali tipo trave costituite dal materiale suddetto.

Nelle sei travi gettate in laboratorio sono state inserite gabbie d'armature uguali tra loro e aventi le caratteristiche indicate nella figura 4.2. Il passo delle staffe è stato dimezzato alle due estremità per evitare l'insorgere di crisi per taglio, visto che le travi saranno soggette a prove di flessione a quattro punti, a seguito delle quali le massime sollecitazioni taglianti si riscontreranno proprio all'estremità.

Prima di ciascun getto si è proceduto a cospargere la parte interna della cassaforma con un olio disarmante; successivamente si è inserita al suo interno la gabbia d'armatura avendo cura di garantire un adeguato copriferro.

Dopo queste preliminari operazioni si è attuato il getto vero e proprio.

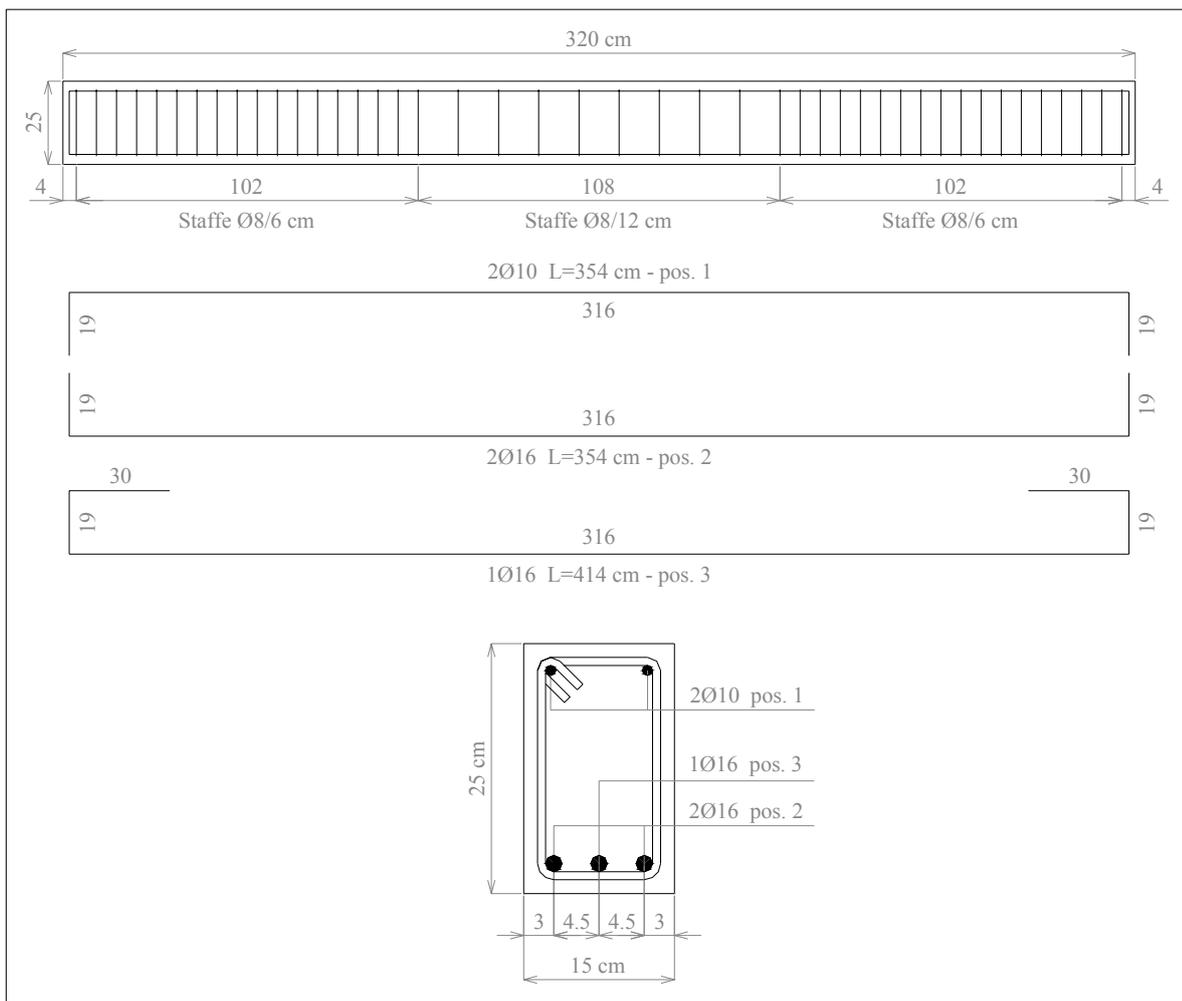


Figura 4.1: dimensioni e armature delle travi

## 5 Prove di rottura su travi in SCC

### 5.1 Generalità

Le prove qui riportate rappresentano la terza fase degli esperimenti svolti su questa serie di travi in calcestruzzo autocompattante.

Il programma di esperimenti prevedeva infatti 3 fasi, di cui la prima da svolgersi intorno al 28° giorno di maturazione, in cui sono state sottoposte le travi TS3 e TS4 ad una prova di flessione istantanea a quattro punti fino a portarle a rottura.

La seconda fase consisteva nell' eseguire una prova di creep sulle travi TS5 e TS6 sottoponendole a momento flettente costante per circa sedici mesi in ambiente a temperatura e umidità controllata ( $T = 20^{\circ}\text{C}$  e  $\text{RH} \cong 60\%$ ), analizzando come variano nel tempo le deformazioni viscosse.

La terza ed ultima fase consiste nel ripetere la stessa prova di rottura per la coppia di travi TS1-TS2 e per la coppia TS5-TS6. Tutte le travi sono state conservate nello stesso ambiente controllato, in cui sono avvenute le prove di creep, dal momento della scasseratura per le prime e dopo la fine della prova di creep per le seconde.

In tal modo si può analizzare:

- a) quanto i sedici mesi di carico influiscono sulla resistenza ultima delle travi (ottenibile paragonando i dati della rottura di TS1 e TS2 con quelli della rottura di TS5 e TS6);
- b) quanto i sedici mesi di maturazione in ambiente controllato influiscono sulla resistenza ultima delle travi (ottenibile dalla comparazione dei risultati delle prove di rottura di TS1 e TS2 con quelli di TS3 e TS4).

Si riporta nella seguente tabella 5-1 riassuntiva il programma temporale di getto e di esecuzione delle prove di rottura sulle travi:

	Data del getto	Data esecuzione prova di rottura	Giorni di maturazione
TS1	02/12/2004	06/06/2007	981
TS2	10/12/2004	30/03/2007	914
TS3	16/12/2004	21/01/2005	36
TS4	13/01/2005	14/02/2005	32
TS5	26/01/2005	17/04/2007	931
TS6	28/01/2005	27/03/2007	911

La prima operazione è stata quella di posizionare su di una coppia di cavalletti le travi per poter eseguire in sicurezza e comodità le operazioni qui di seguito descritte (figura 5.1). Si prosegue con l'operazione di tracciatura della trave, ossia segnare su essa i punti in cui posizionare gli strumenti necessari per l'acquisizione dei dati della prova. Nella fase successiva sono stati incollati sulla trave, nelle posizioni prestabilite, gli estensimetri, gli omega e parte degli LVDT; fatto ciò la trave è stata posizionata nel telaio sede della prova, si sono poi posizionati i rimanenti LVDT (quelli atti a valutare l'entità degli spostamenti assoluti), si sono collegati tutti i cavi degli strumenti all'apparecchiatura d'acquisizione, e dopo aver configurato il software si è dato inizio alla prova.



Figura 5-1: posa della trave su cavalletti

Lo schema statico utilizzato per le prove di rottura è mostrato nella figura 5.2.: il carico viene fornito per mezzo di due pistoni azionati da una pompa idraulica e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria della trave, in modo tale che tra essi si abbia un momento flettente costante. In sostanza lo schema statico creato è quello di una trave inflessa a quattro punti.

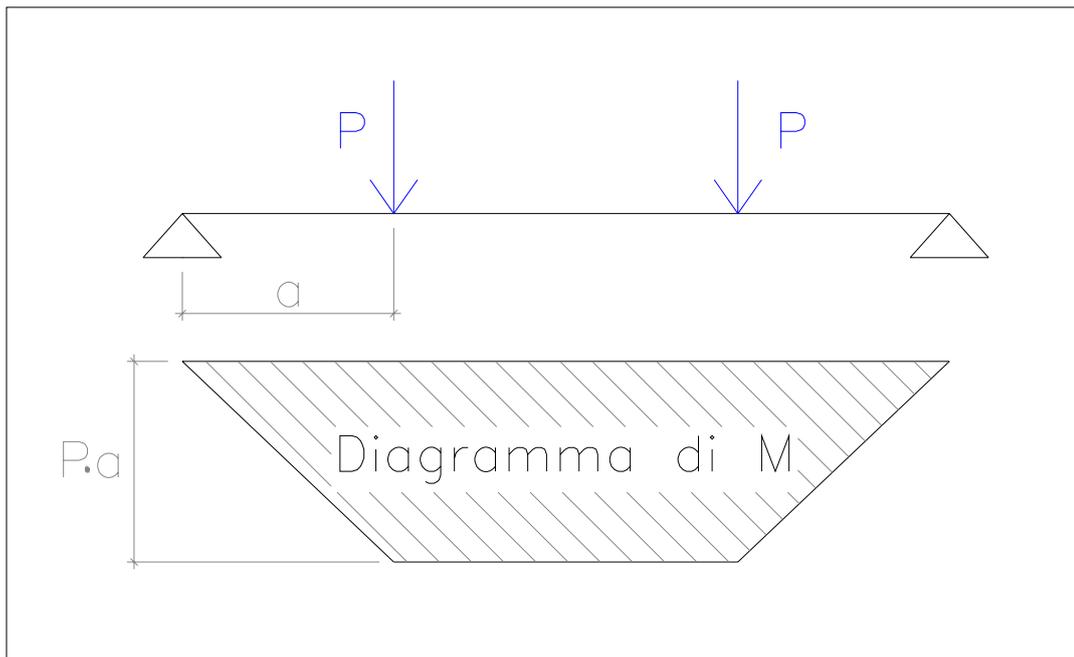


Figura 5-2: schema statico

## 5.2 Preparazione della prova di rottura

### 5.2.1 Tracciatura della Trave

Col termine tracciare si vuole indicare quella procedura attraverso la quale si definisce con cura l'esatta posizione che dovranno avere gli strumenti e i carichi sulla trave; tale posizionamento dipende da che cosa si vuole andare a valutare mediante la prova. Servendosi di una riga, una squadra e un pennarello si individuano gli allineamenti ed i punti di misura.

Per le prove in esame la tracciatura è stata eseguita facendo riferimento a quanto illustrato nella figura 5.3.

Nella parte centrale della trave si è tracciato anche la posizione delle staffe presenti al suo interno dividendo così la trave in vari campi, questo perché alcuni strumenti dovevano essere posti a cavallo di esse (gli omega) o tra la mezzeria di un campo e la mezzeria del successivo (LVDT orizzontali); la posizione delle staffe è stata definita grazie al fatto che prima di eseguire il getto si è misurata la posizione di ciascuna di esse rispetto al bordo interno della cassaforma. L'esigenza di conoscere la loro collocazione è dovuta al fatto che in corrispondenza di esse, essendo dei punti di discontinuità trasversale nel getto, si sarebbero sviluppate le prime fessure nella parte inferiore della trave a seguito del caricamento della trave stessa. Dunque conoscere la posizione delle staffe significa conoscere più o meno il punto in cui disporre gli strumenti atti a valutare lo sviluppo dell'apertura di una fessura.

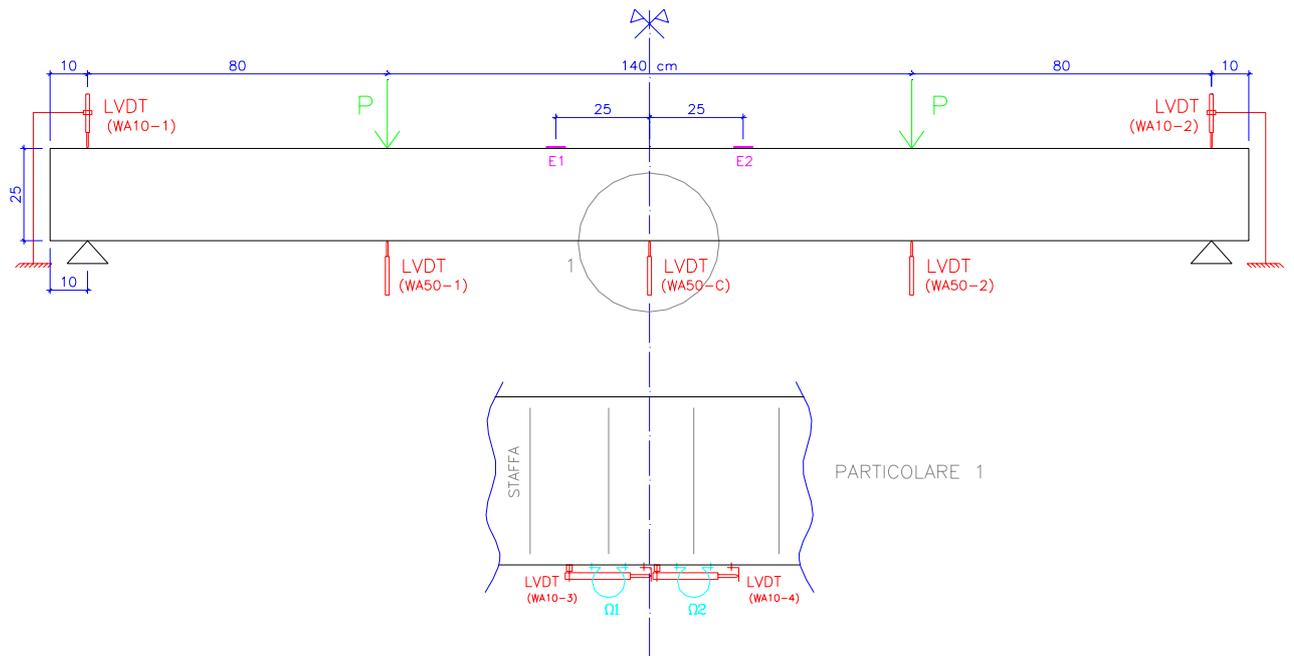


Figura 5-3: posizionamento degli strumenti e dei carichi

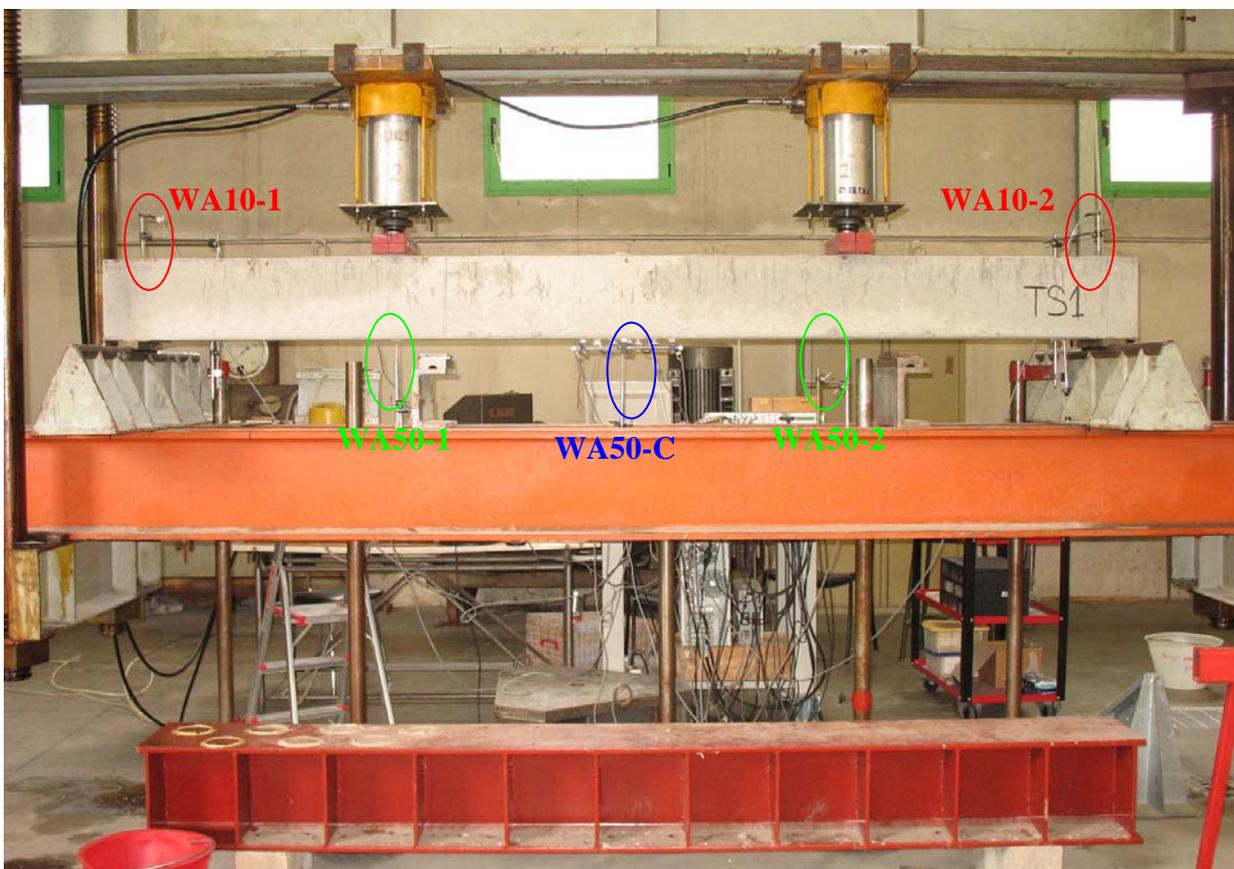


Figura 5-4: configurazione della trave prima dell'inizio della prova di rottura

### 5.2.2 Strumenti utilizzati nella Prova

Per la valutazione degli spostamenti assoluti della trave sono stati posizionati cinque LVDT (figura 5.4); due di essi sono stati posti sopra agli appoggi (figura 5.8), altri due al di sotto del punto di applicazione dei carichi e l'ultimo in corrispondenza della mezzeria (figura 5.5).

Per valutare lo sviluppo dello stato fessurativo e del comportamento deformativo a trazione, nella parte centrale inferiore della trave sono stati posizionati altri due LVDT e due omega (figure 5.6 e 5.7). Non sono stati posti estensimetri in zona tesa perché, da prove eseguite precedentemente, si è visto che già per carichi ridotti cessa il loro funzionamento a causa delle fessure che si creano nel calcestruzzo e che vanno ad interrompere le resistenze di cui sono costituiti.

Per concludere, si sono posizionati due estensimetri nella parte centrale superiore di tutte le travi (figura 5.9) attraverso i quali si è valutato lo sviluppo deformativo a compressione.

Si ricorda che la trave TS1 presentava un estensimetro immerso nel getto e dato che i risultati ottenuti non erano attendibili si è pensato di non considerarli nelle osservazioni.

Il  $K_G$  degli estensimetri utilizzati è pari a 2.09 e visto che si è dato un segnale di calibrazione alla 2100 pari a 1000, i dati acquisiti sono stati moltiplicati per  $^{1000}/_{1035}$  come visto nel capitolo sulla Strumentazione.

Tutti questi strumenti sono poi stati collegati al sistema d'acquisizione (regolato utilizzando i valori riportati nelle tabelle 5-1 e 5-2) e precisamente i due estensimetri e i due omega hanno occupato i primi quattro canali della 2100 mentre i sedici LVDT sono stati collegati alla MGC. Si riportano, nelle foto seguenti, alcuni particolari degli strumenti utilizzati.

Strumenti TS1-TS2	Cella	WA10-1	WA50-1	WA10-3	WA50-C	WA10-4	WA50-2	WA10-2
Canale	0	1	2	3	4	5	6	7
Corsa [mm]	/	10	50	50	50	10	50	10
Costanti inserite nel LabView	61.57	0.9903	4.997	0.9926	5.01	0.9949	5.019	0.9909

Tabella 5-1: corse e costanti relative agli LVDT

Strumenti TS1-TS2	$\Omega_1$ TS2	$\Omega_2$ TS1	$\Omega_3$ TS1	$\Omega_4$ TS2	E1	E2
Canale	8	9	8	9	10	11
Dimensione [mm]	50	50	55	54	60	60
Costanti inserite nel LabView	0.2375	0.2325	0.2221	0.231	2.09	2.09

Tabella 5-2: dimensioni e costanti relative ad omega ed estensimetri

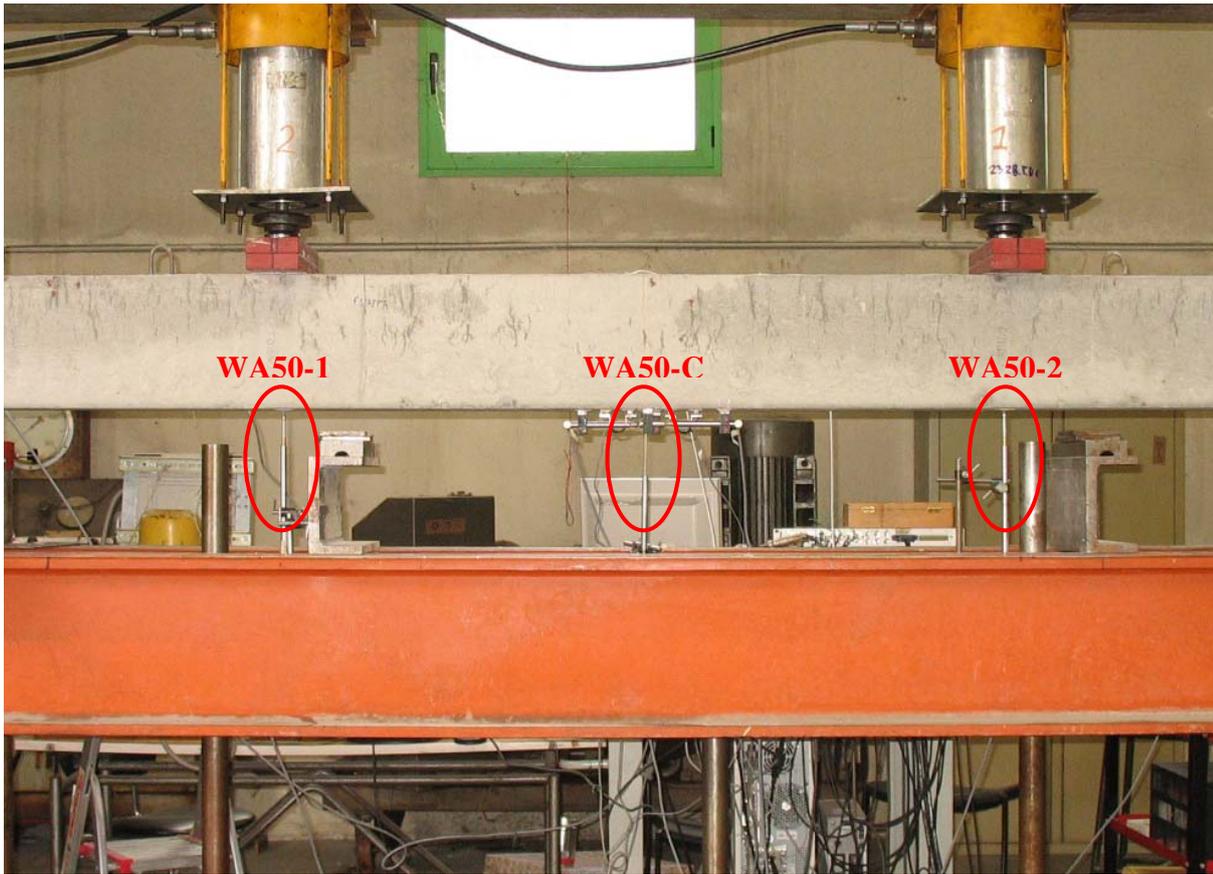


Figura 5-5: LVDT verticali posti sotto la trave

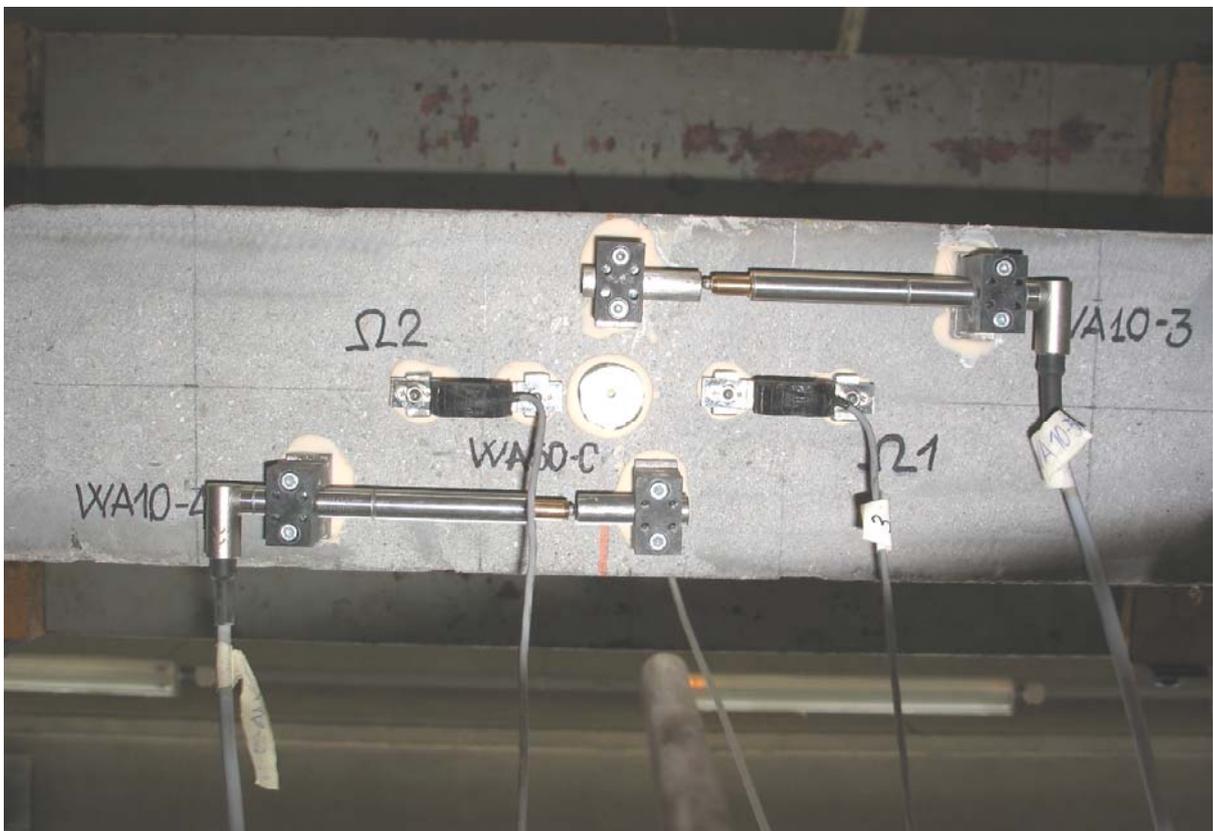


Figura 5-6: vista dal basso degli strumenti posti nella mezziera della trave (omega, LVDT orizzontali)

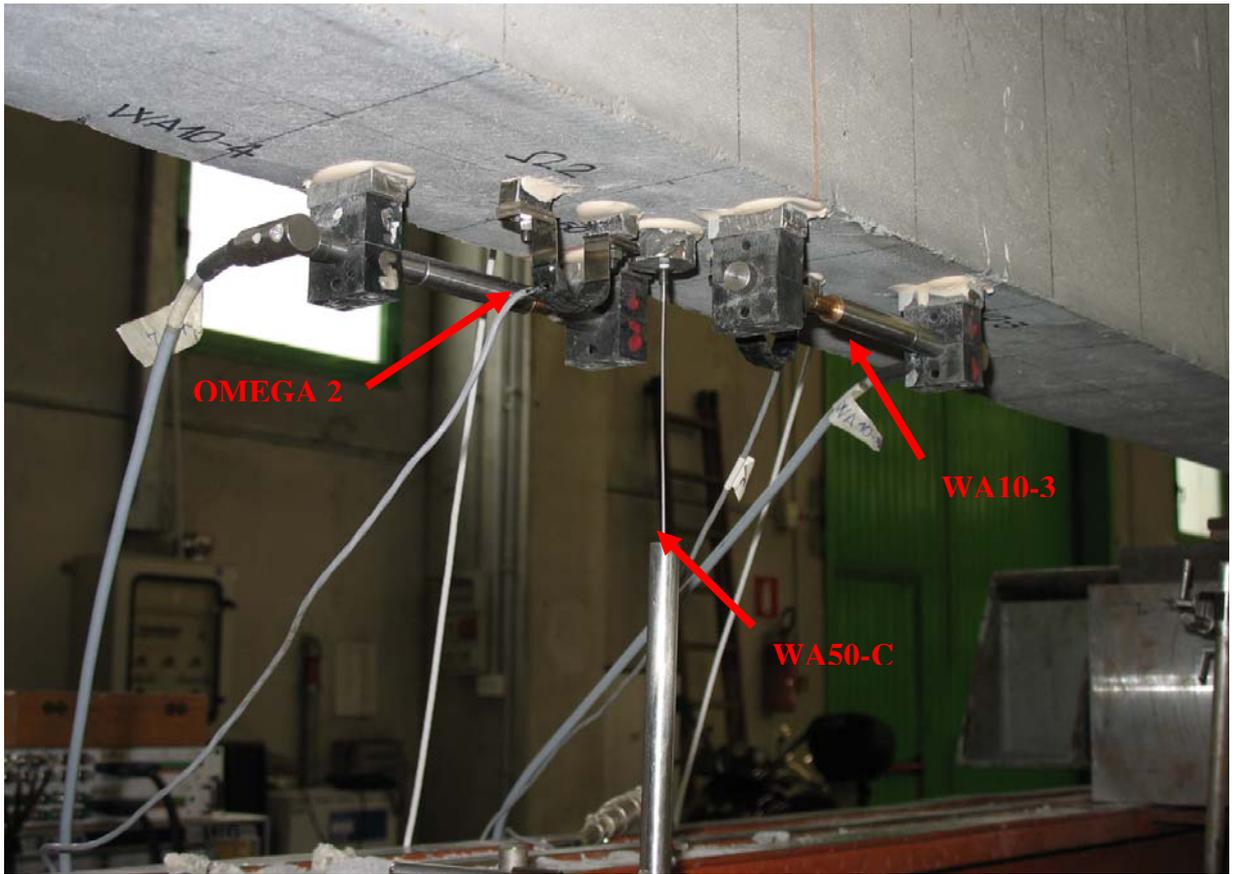


Figura 5-7: parte centrale della trave (omega e LVDT orizzontali)



Figura 5-8: LVDT sopra l'appoggio (WA10-2)

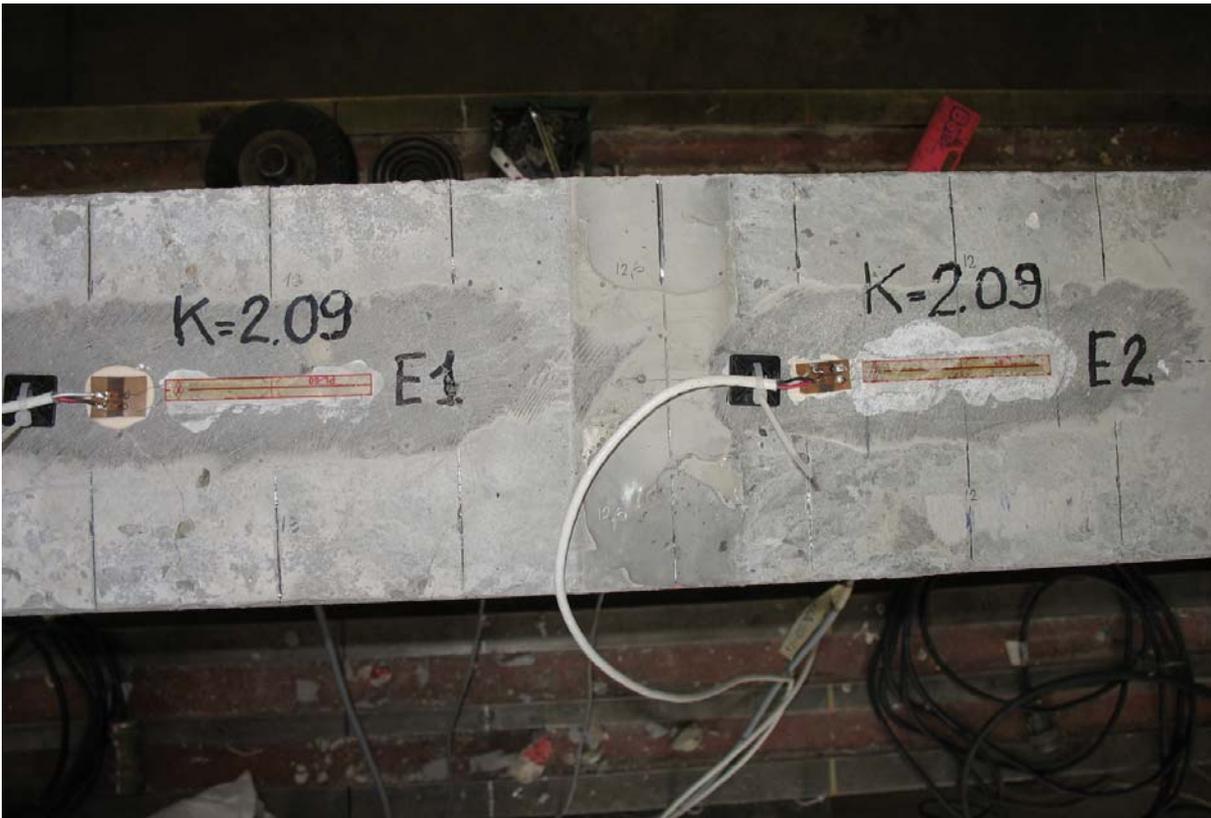


Figura 5-9: estensimetri posti sulla parte superiore della trave

### 5.3 Svolgimento della prova di rottura

Dopo aver svolto le operazioni descritte in precedenza (vedi paragrafo 5.2) si è dato il via alla prova di rottura procedendo con il caricamento della trave.

Sono stati effettuati diversi cicli di carico, ad una velocità di circa 300 N/s.

Per tutte e quattro le travi, il processo di carico ha previsto: un primo ciclo di carico che ha raggiunto il valore di 8 kN, un secondo che ha raggiunto 30 kN, il terzo è arrivato a 60 kN ed infine si è incrementato il carico fino alla rottura della trave; ad ogni ciclo di carico è seguita una fase di scarico fino a 2 kN.

Al termine di ogni ciclo, mentre il carico veniva mantenuto costante, con pennarelli si è tracciato l'andamento delle fessure visibili ad occhio nudo cosicché, al termine della prova, è stato possibile osservare l'evoluzione dello stato fessurativo al variare del carico.

Riportiamo qui di seguito una serie di foto che rappresentano le varie fasi eseguite durante le prove di rottura.

Nella [figura 5.10](#) e [5.11](#) (relativa alla trave TS2), si vede il sistema di acquisizione dei dati e il telaio a contrasto su cui vengono appoggiate le travi, le quali sono soggette ad un'azione concentrata trasmessa dai pistoni che distano circa 140 cm e che inducono nella zona centrale un momento costante come evidenziato nello schema statico di [figura 5.2](#).

Nella [figura 5.12 e 5.13](#) sono evidenti le evoluzioni dello stato fessurativo dopo i cicli di carico a 30 e 60 kN.

Nella [figura 5.14](#) si nota l'incremento della freccia rispetto all'immagine precedente, ciò è dovuto all'incremento del carico.

Nella [figura 5.15](#) viene evidenziato il momento in cui si manifesta la crisi nel lembo compresso della trave. La porzione di trave compresa tra i due pistoni è soggetta a momento flettente costante, dunque la crisi avrebbe potuto manifestarsi in ogni sezione compresa tra i due punti di carico; essa si manifesta nella zona prossima al pistone di destra probabilmente perché in quel punto si avevano condizioni tali da indurre una minore resistenza del materiale oppure l'applicazione del carico non è avvenuta in modo perfettamente simmetrico. Si nota inoltre l'importante inflessione della trave, dovuta al fatto che nel momento di crisi del calcestruzzo compresso, l'acciaio aveva già sviluppato deformazioni superiori al limite di snervamento.

Nelle [figura 5.16 ÷ 5.17](#) si riportano i particolari della zona in cui è avvenuta la crisi del calcestruzzo; in particolare nella [figura 5.16](#) si vede il materiale fratturato che costituisce il copriferro dell'armatura superiore, mentre nella [figura 5.17](#) è stata rappresentata la posizione dell'asse neutro alla rottura identificata con la linea blu, ottenuta dalla congiunzione della parte terminale delle fessure evidenziate con un pennarello rosso.

Analogamente alla trave TS2 per la trave TS1 sono state riportate le [figure dalla 5.18 alla 5.24](#).



Figura 5-10: TS2 - fase antecedente la prova di carico, sistema di acquisizione



Figura 5-11: TS2 - fase antecedente la prova di carico



Figura 5-12: TS2 - fase intermedia della prova, evoluzione stato fessurativo (30 kN)



Figura 5-13: TS2 - fase intermedia della prova, avanzamento dello stato fessurativo (60 kN)



Figura 5-14: TS2 - aumento del carico, incremento della freccia



Figura 5-15: TS2 – rottura trave



Figura 5-16: TS2 – zona di rottura

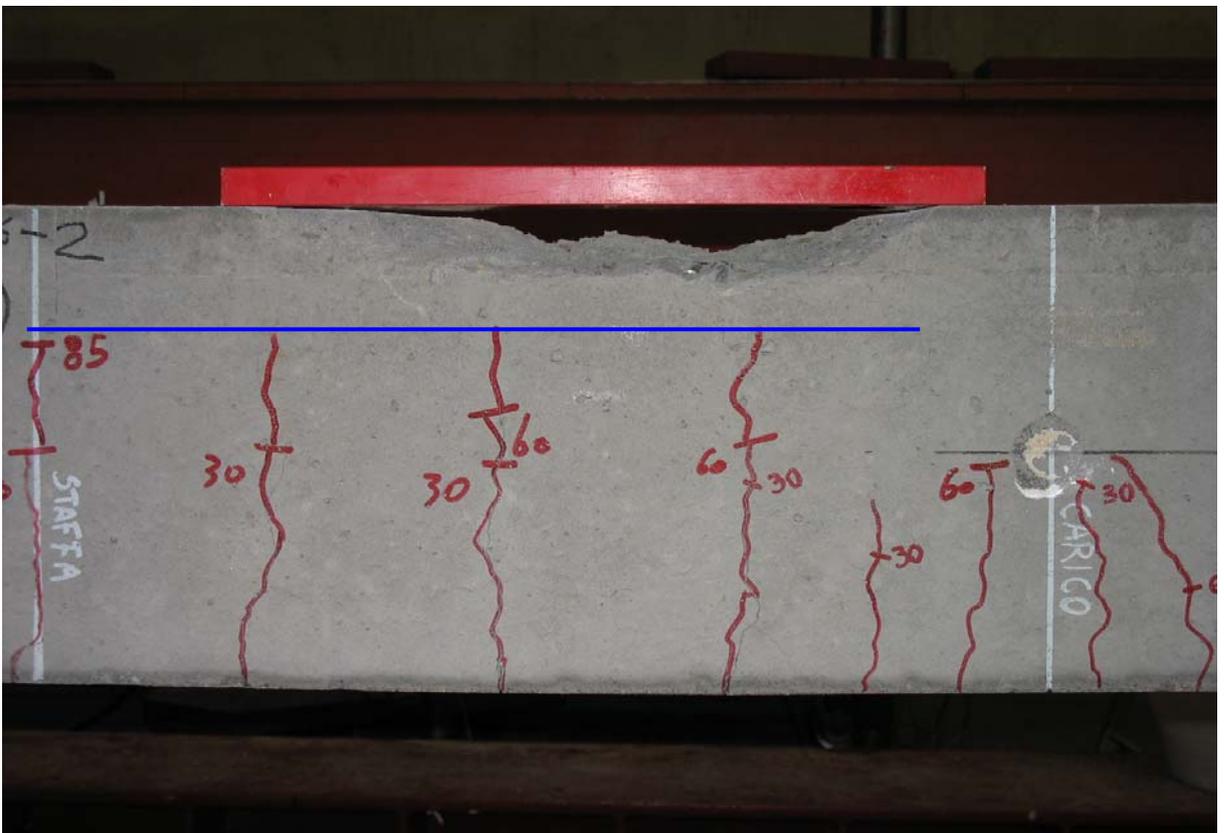


Figura 5-17: TS2 – particolare della rottura



Figura 5-18: TS1 - fase antecedente la prova di carico



Figura 5-19: TS1 - fase intermedia della prova, evoluzione stato fessurativo (30 kN)



Figura 5-20: TS1 - fase intermedia della prova, avanzamento dello stato fessurativo (60 kN)

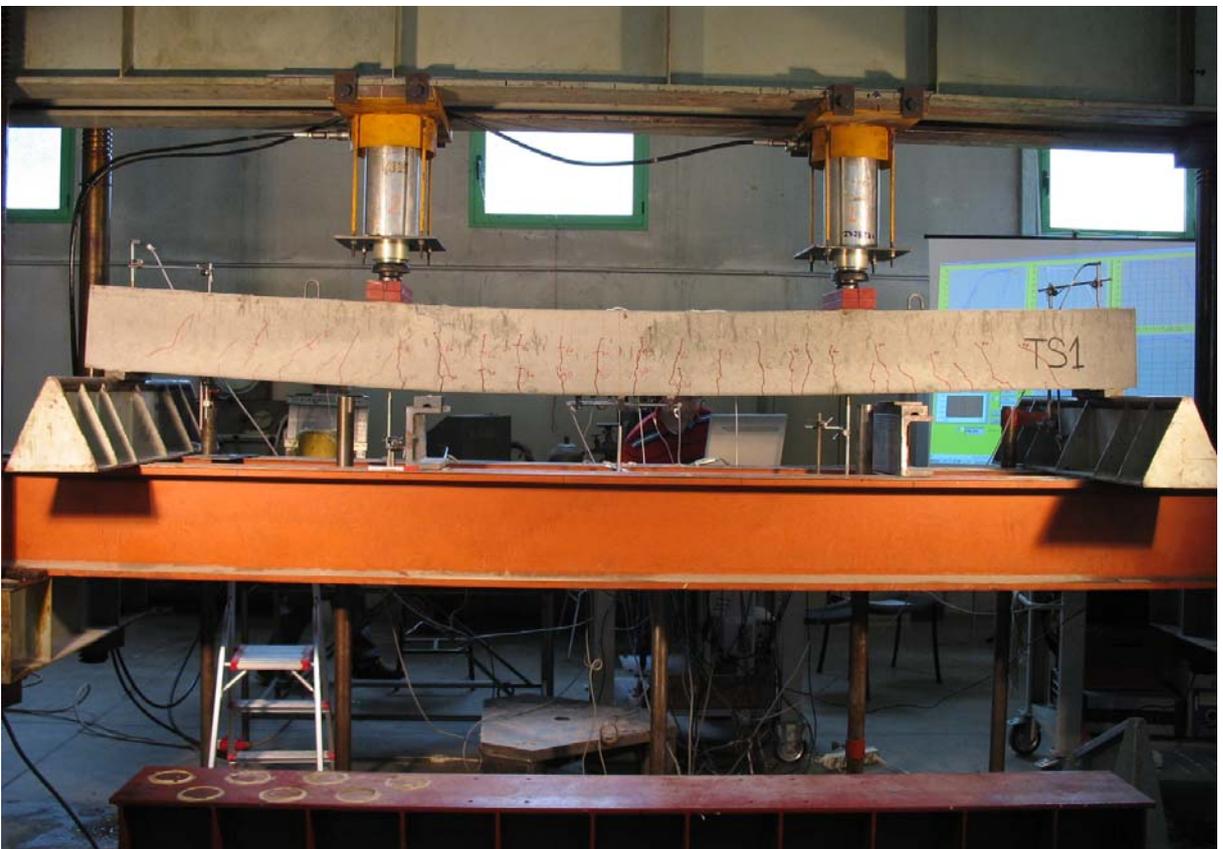


Figura 5-21: TS1 - aumento del carico, incremento della freccia



Figura 5-22: TS1 – rottura trave, quadro fessurativo completo



Figura 5-23: TS2 – particolare della zona di rottura

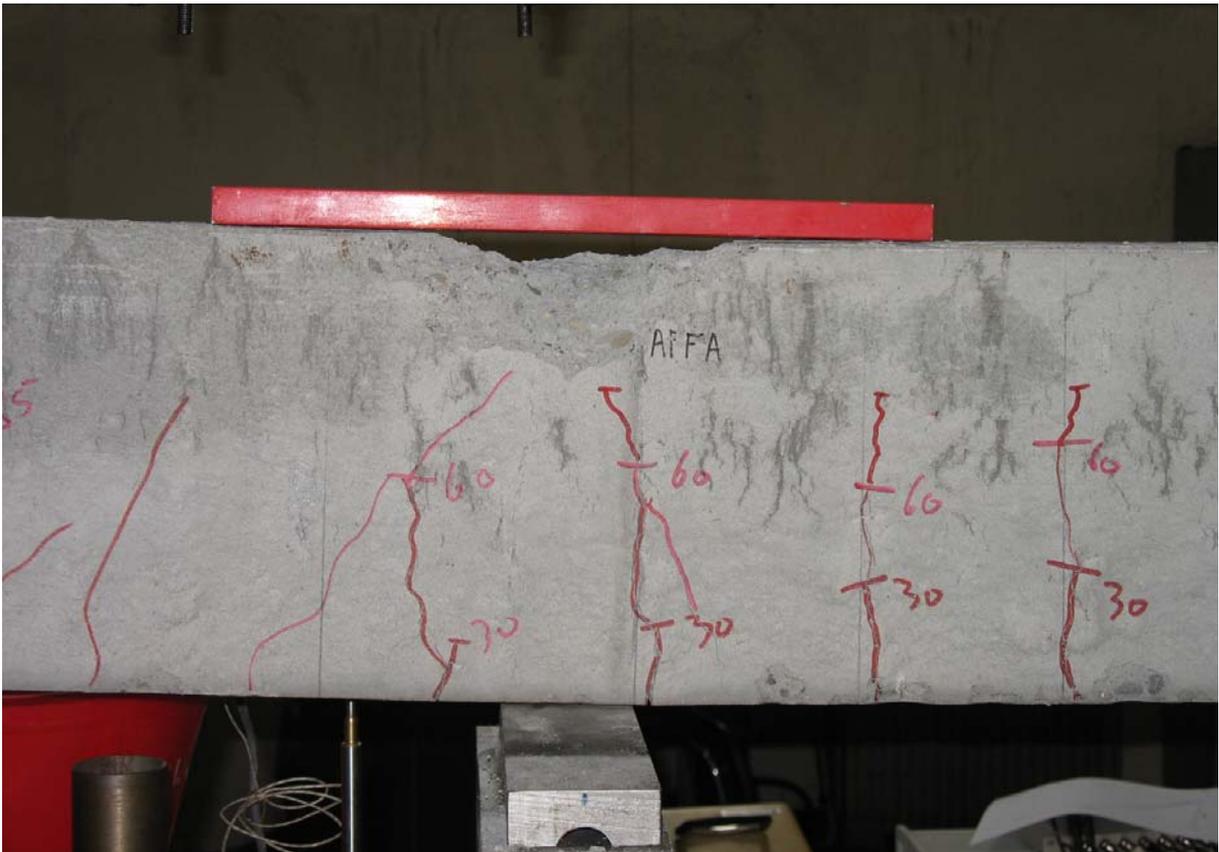


Figura 5-24: TS1 – zona di rottura

Nei paragrafi successivi si riportano i risultati che sono il frutto dell'elaborazione dei dati inviati dagli strumenti al sistema d'acquisizione per ogni prova di rottura. In ciascun grafico è stato riportato, per un determinato strumento, l'andamento che si è rilevato durante le fasi di carico e scarico che caratterizzano la prova oggetto di studio.

## 5.4 Rottura travi TS1-TS2: risultati ottenuti

La trave TS1 è stata portata a rottura il 6 Giugno del 2007 dopo 981 giorni di stagionatura, durante i quali è stata conservata in ambiente a temperatura di 20° e umidità al 60% senza subire nessun tipo di sollecitazione, quindi soggette a solo ritiro.

La trave TS2 è stata portata a rottura il 30 Marzo del 2007 dopo 914 giorni di stagionatura, durante i quali è stata conservata in ambiente a temperatura e umidità controllata come la trave TS1.

Per esse sono stati previsti cinque LVDT verticali, due orizzontali e due estensimetri, la cui disposizione è mostrata in figura 5.3.

Nei grafici 5.1 e 5.2 è stato riportato il diagramma delle deformazioni relative alla fibra di bordo della zona compressa, in funzione del carico; è evidente un comportamento sostanzialmente simile degli estensimetri E2, mentre per quanto riguarda l'estensimetro E1 si nota una deformazione ultima maggiore per la trave TS2 di circa 250  $\mu\epsilon$  rispetto alla trave TS1.

Nei grafici 5.3 e 5.4 sono stati graficati gli spostamenti in corrispondenza degli appoggi della trave, in funzione del carico; è evidente un comportamento sostanzialmente simile dei WA10-1, mentre per quanto riguarda LVDT WA10-2 si nota uno spostamento ultimo maggiore per la trave TS1 di circa 0.275 mm rispetto alla trave TS2.

Nei grafici 5.5 e 5.6 sono stati graficati gli spostamenti in corrispondenza della zona centrale inferiore della trave, valutati attraverso gli LVDT orizzontali; si nota un comportamento sostanzialmente simile dei WA10-3, mentre per quanto riguarda LVDT WA10-4 si nota uno spostamento ultimo maggiore per la trave TS2 di circa 0.650 mm rispetto alla trave TS1.

Nei grafici 5.7 e 5.8 sono stati graficati l'andamento delle aperture delle fessure in corrispondenza della zona centrale tesa della trave, valutati attraverso gli omega; si nota come sia  $\Omega_1$  che  $\Omega_2$  per TS2 abbiano registrato un ampiezza di fessura massima di circa 2.0 mm, mentre per la trave TS1 si sono registrate ampiezze massime di circa 0.15 mm, questo ultimo dato non è corretto, ed è connesso alla sbagliata disposizione degli strumenti. Infatti, gli omega sono stati predisposti in prossimità delle staffe, dove si è presupposto che sarebbe avvenuta la formazione delle fessure non essendo visibili ad occhio nudo prima della prova di rottura.

Nei grafici 5.9 e 5.10 è stato riportato l'andamento degli spostamenti verticali della sezione della trave posta in corrispondenza dei punti di applicazione del carico.

Nel grafico 5.11 è stato riportato l'andamento degli spostamenti verticali della sezione in corrispondenza della zona centrale inferiore della trave. Entrambe le travi sviluppano un abbassamento della sezione di mezzzeria pari a circa 52 mm.

Nel grafico 5.12 si è rappresentato l'andamento della freccia assoluta, mentre nel grafico 5.13 si è graficata la freccia relativa. La prima è data dalla differenza tra gli spostamenti verticali in corrispondenza della mezzeria della trave valutati mediante WA50-C e la media degli spostamenti verticali delle sezioni di appoggio, mentre la seconda è data dalla differenza tra gli spostamenti verticali in corrispondenza della mezzeria della trave e la media degli spostamenti verticali in corrispondenza delle sezioni di applicazione del carico. Osservando i grafici si rileva che i carichi di rottura per le travi TS1 e TS2 sono rispettivamente 84 kN e 85.8 kN, però già a partire da 74 kN, per entrambe le travi si nota una forte riduzione della rigidità dovuto probabilmente allo snervamento dell'acciaio teso. Per quanto riguarda il carico di fessurazione per entrambe le travi si aggira intorno ai 6 kN.

Nel grafico 5.14 sono rappresentati i diagramma momento-curvatura delle due travi.

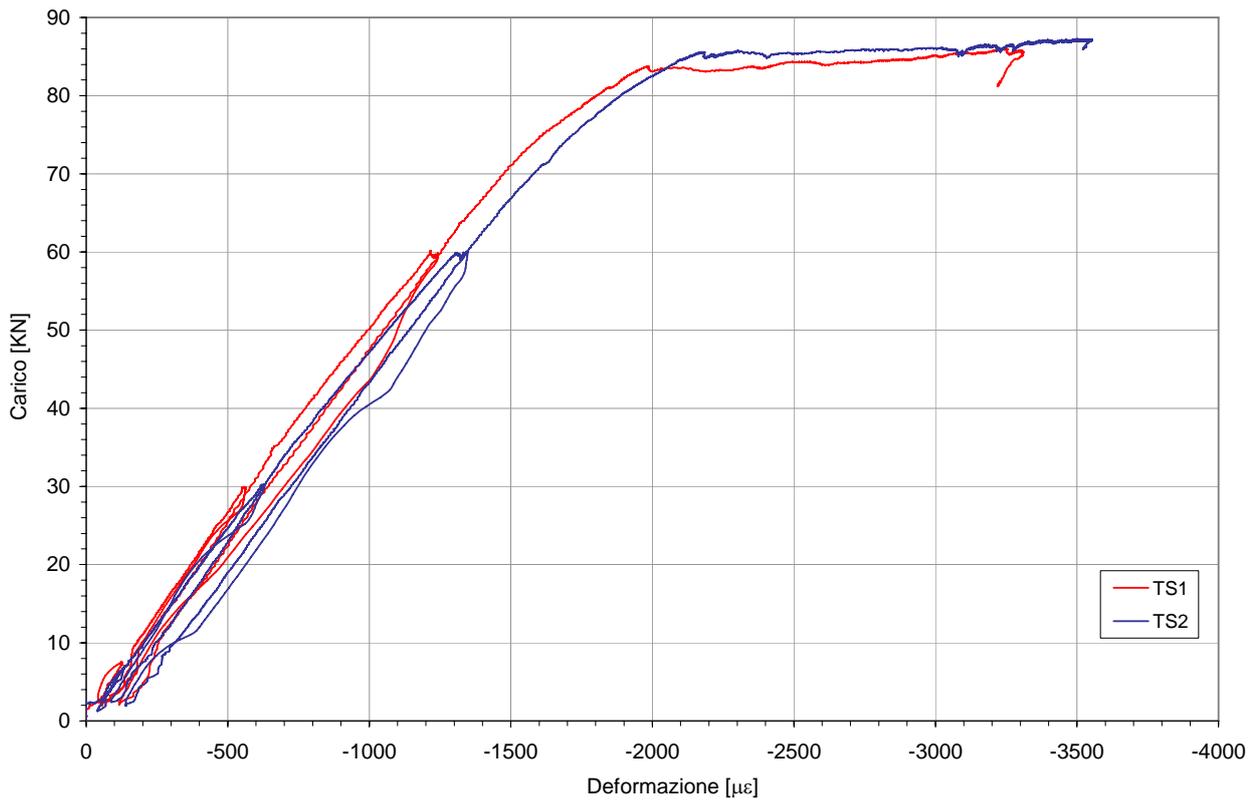


Grafico 5.1: E1 - estensimetro sinistro

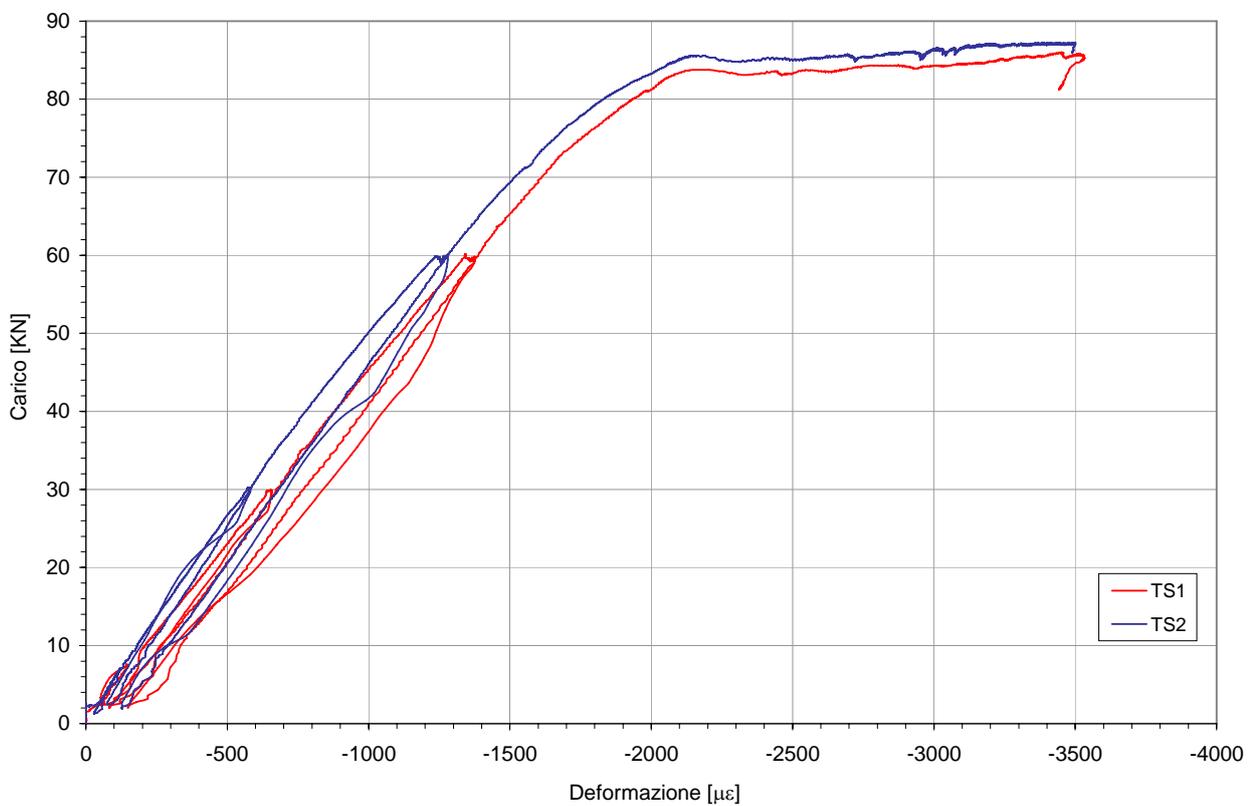


Grafico 5.2: E2 - estensimetro destro

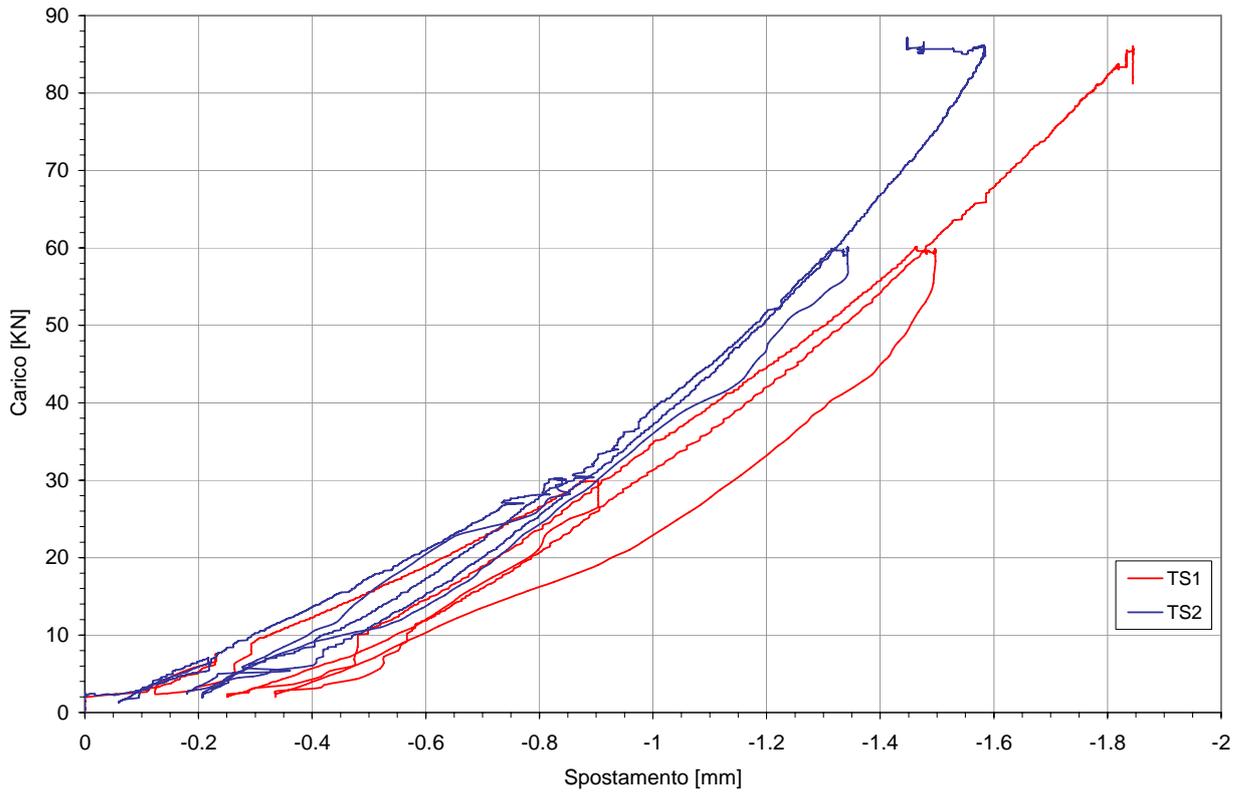


Grafico 5.3: WA10-1 - appoggio sinistro

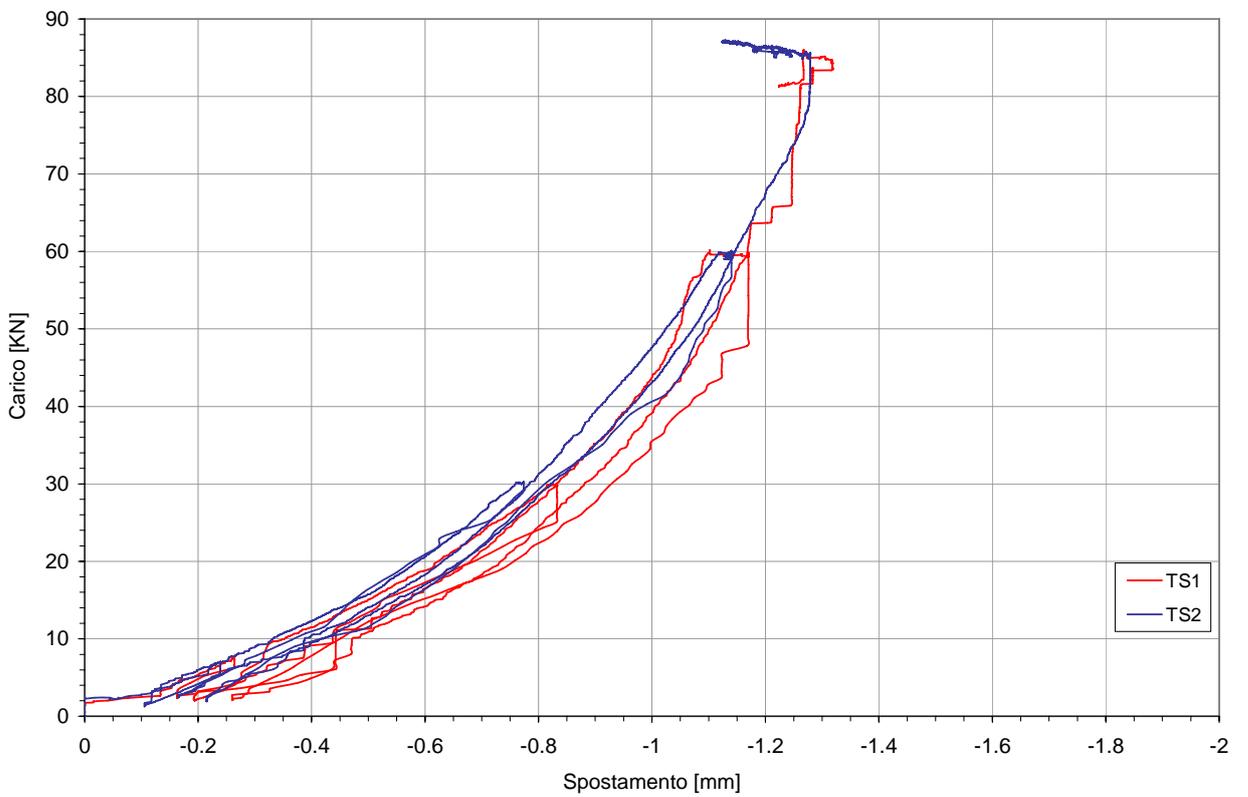


Grafico 5.4: WA10-2 - appoggio destro

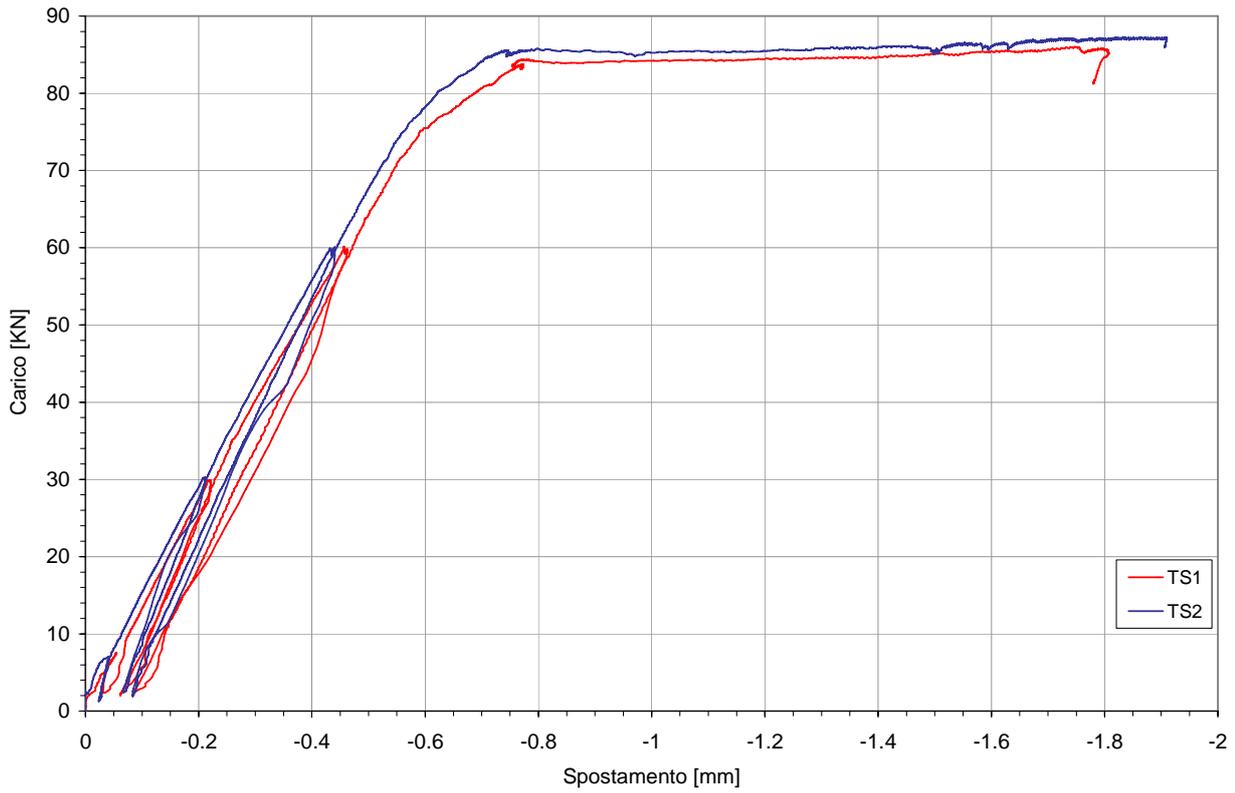


Grafico 5.5: WA10-3 - orizzontale

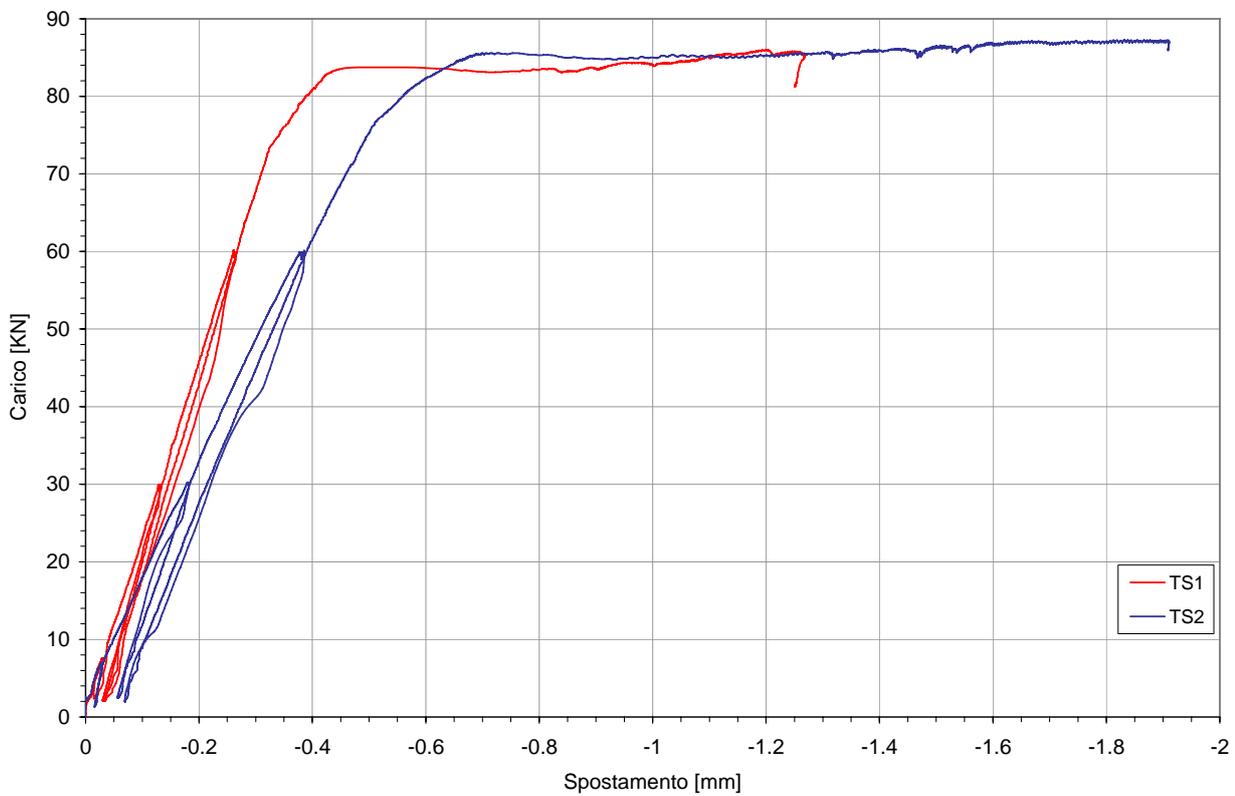


Grafico 5.6: WA10-4 - orizzontale

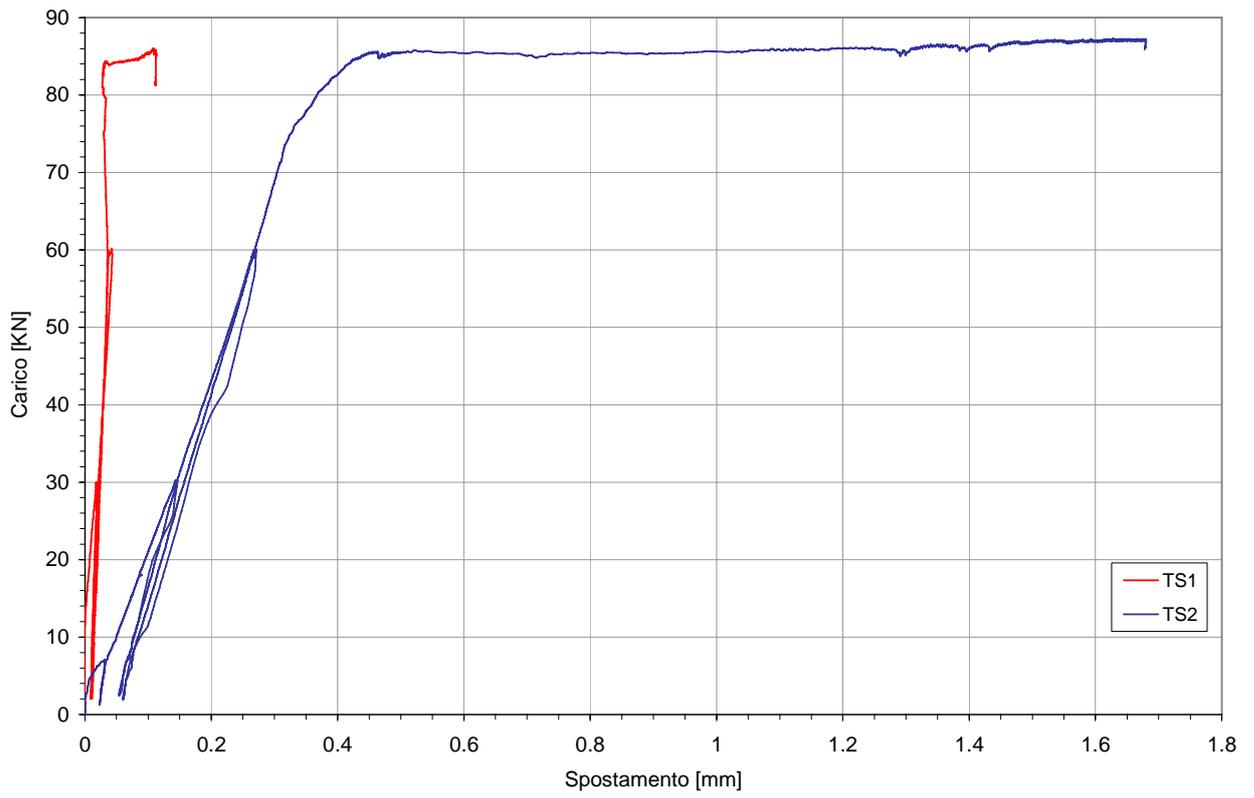


Grafico 5.7: omega 1

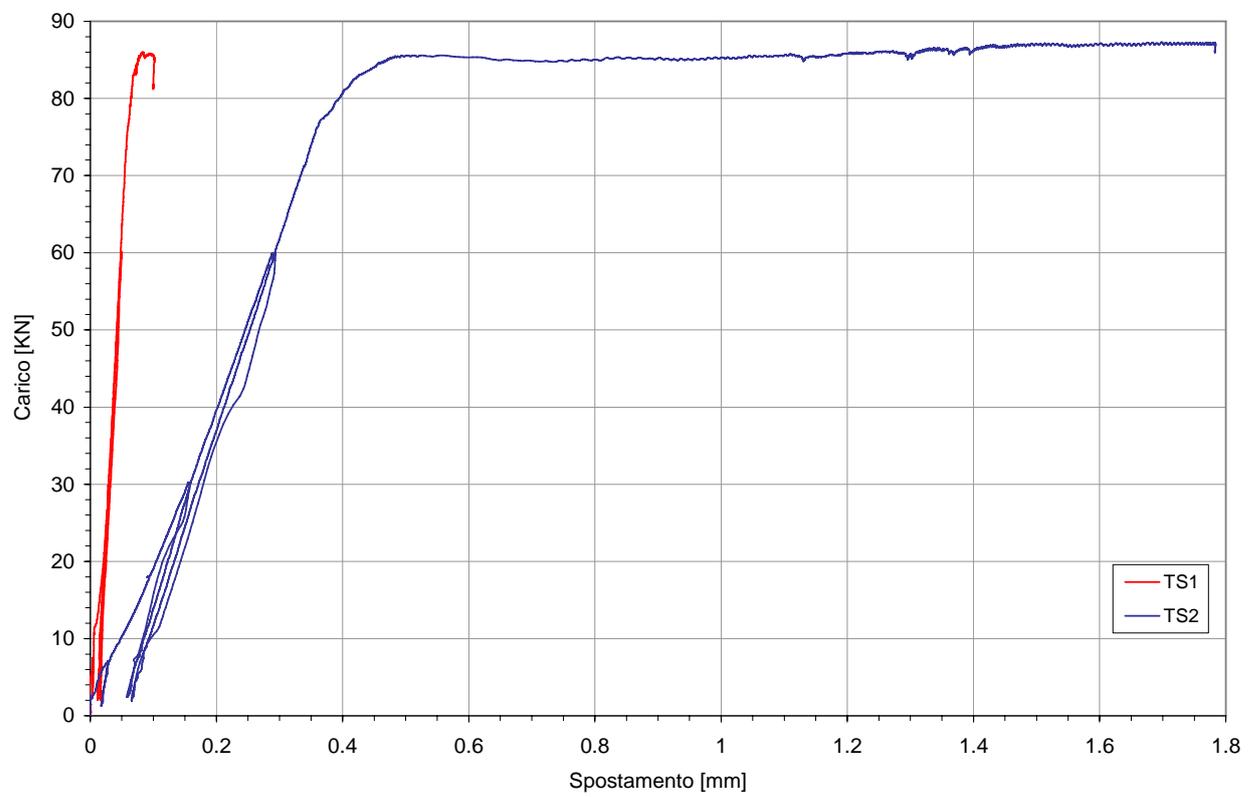


Grafico 5.8: omega 2

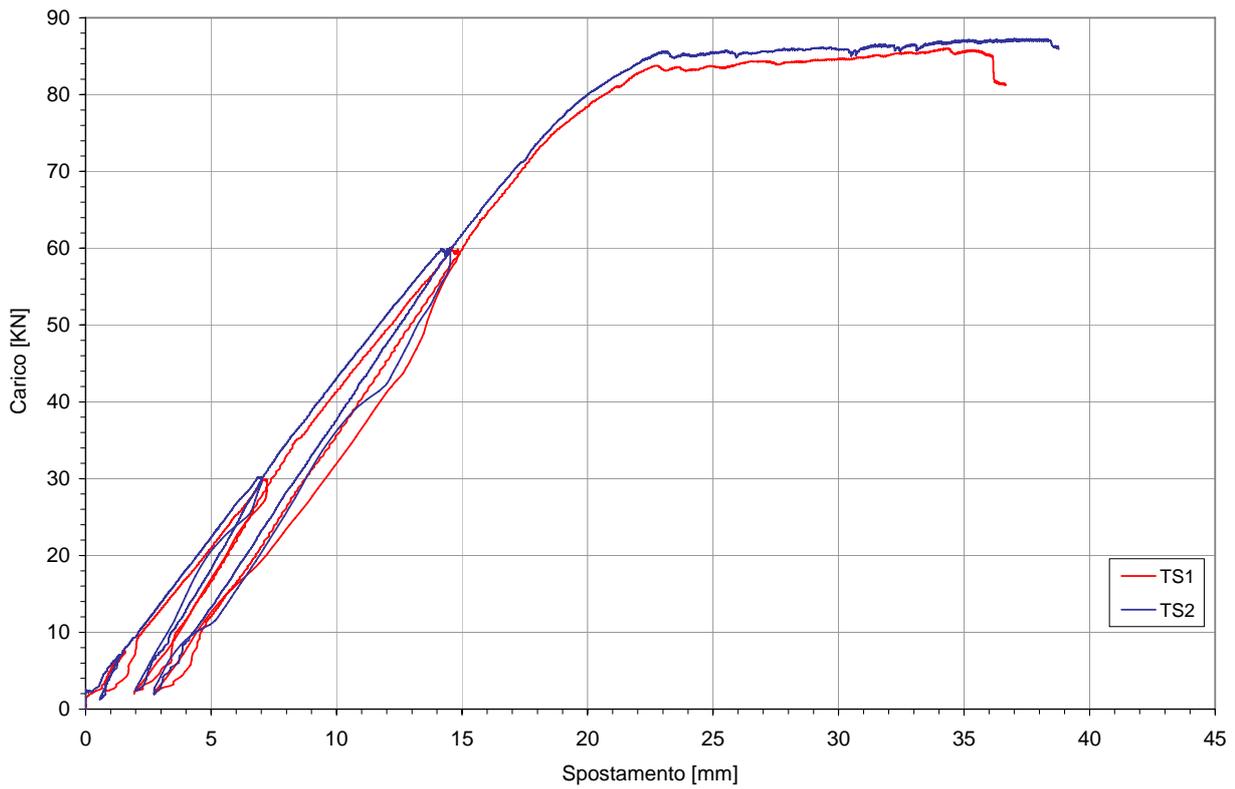


Grafico 5.9: WA50-1 - abbassamento sotto il carico sinistro

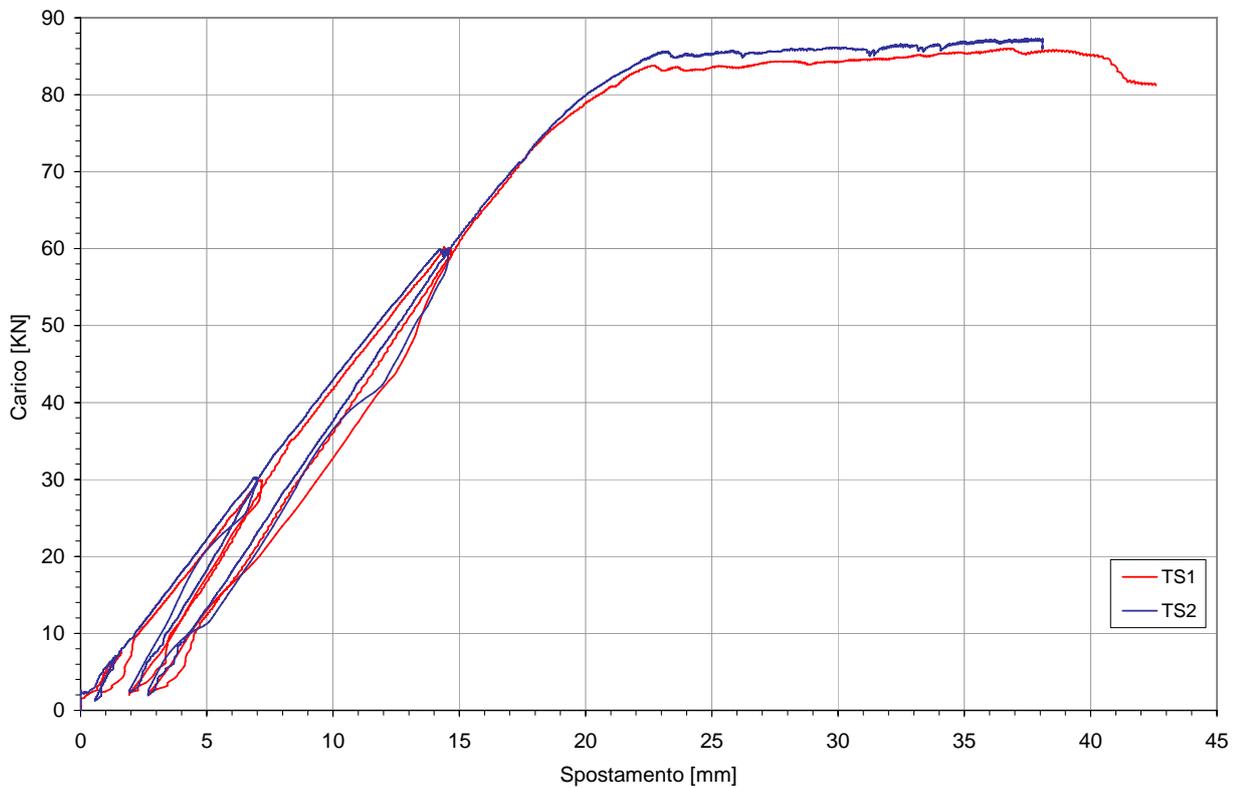


Grafico 5.10: WA50-2 - abbassamento sotto il carico destro

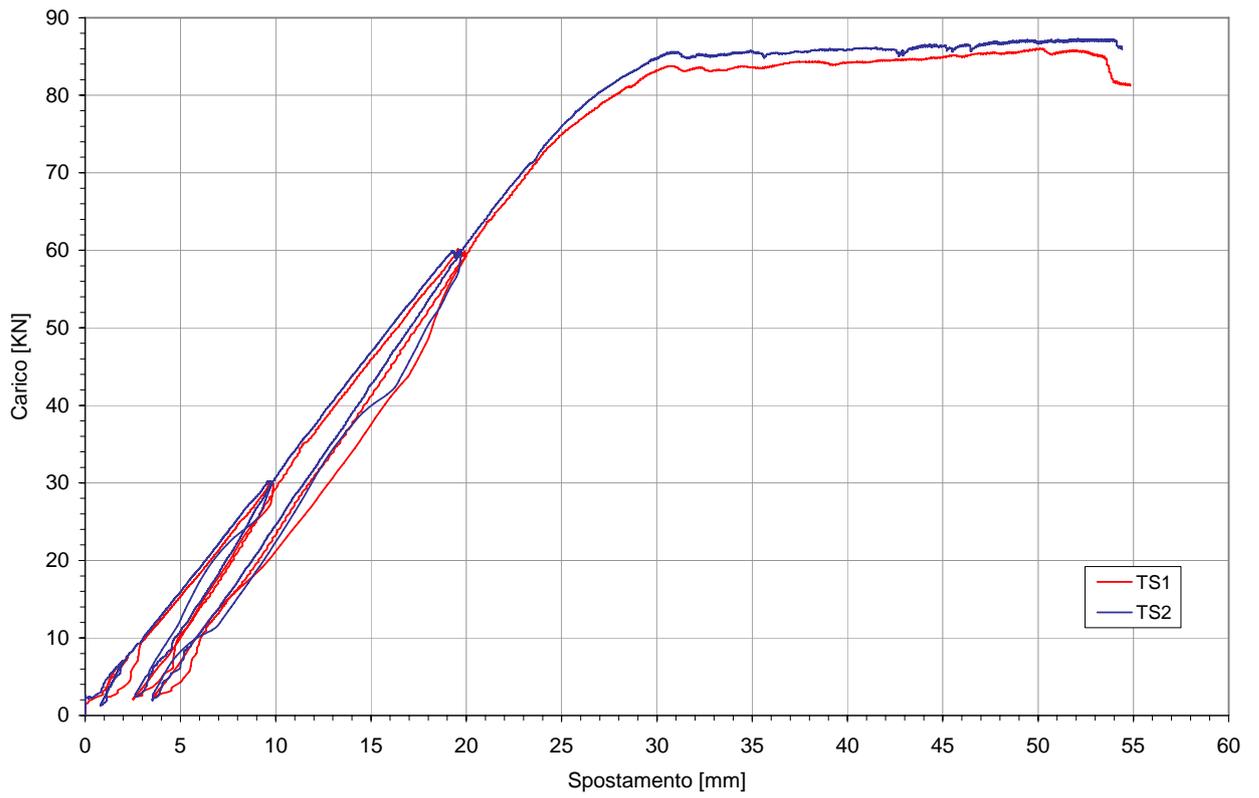


Grafico 5.11: WA50-C - abbassamento in mezzeria

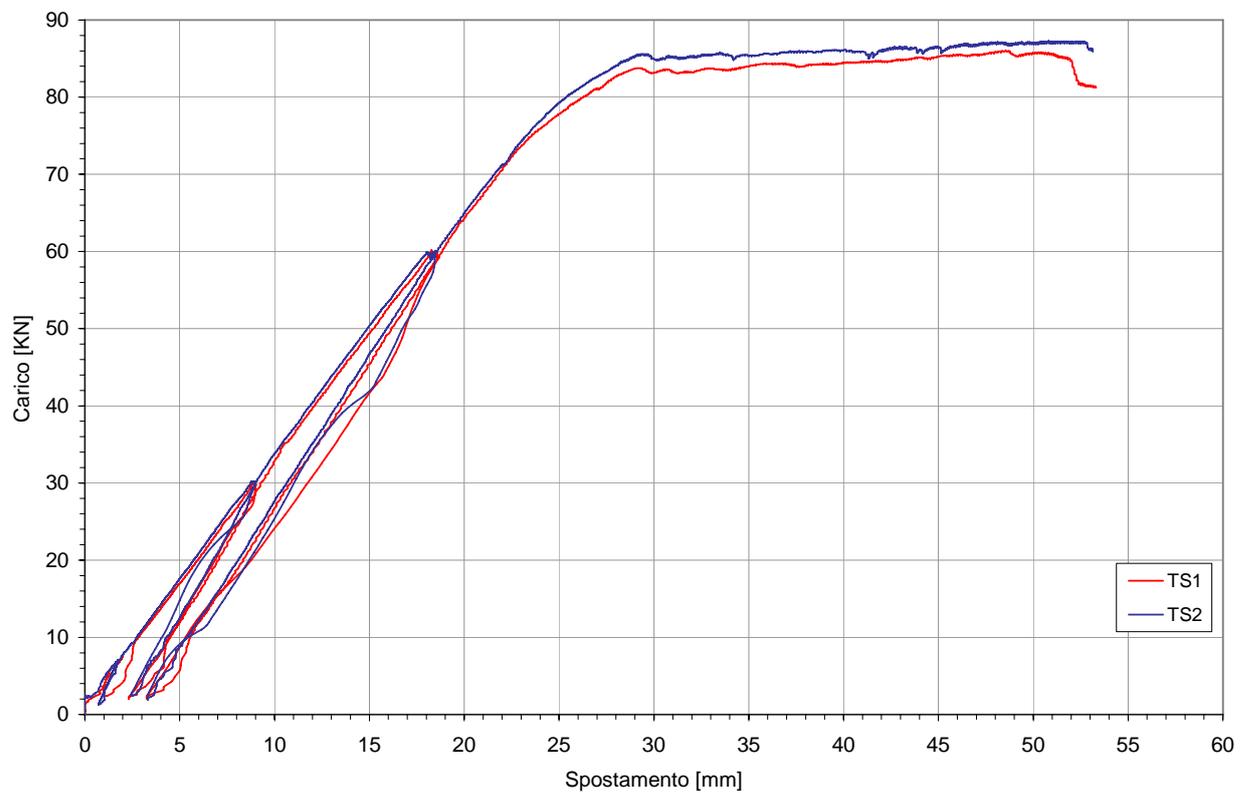


Grafico 5.12: freccia assoluta

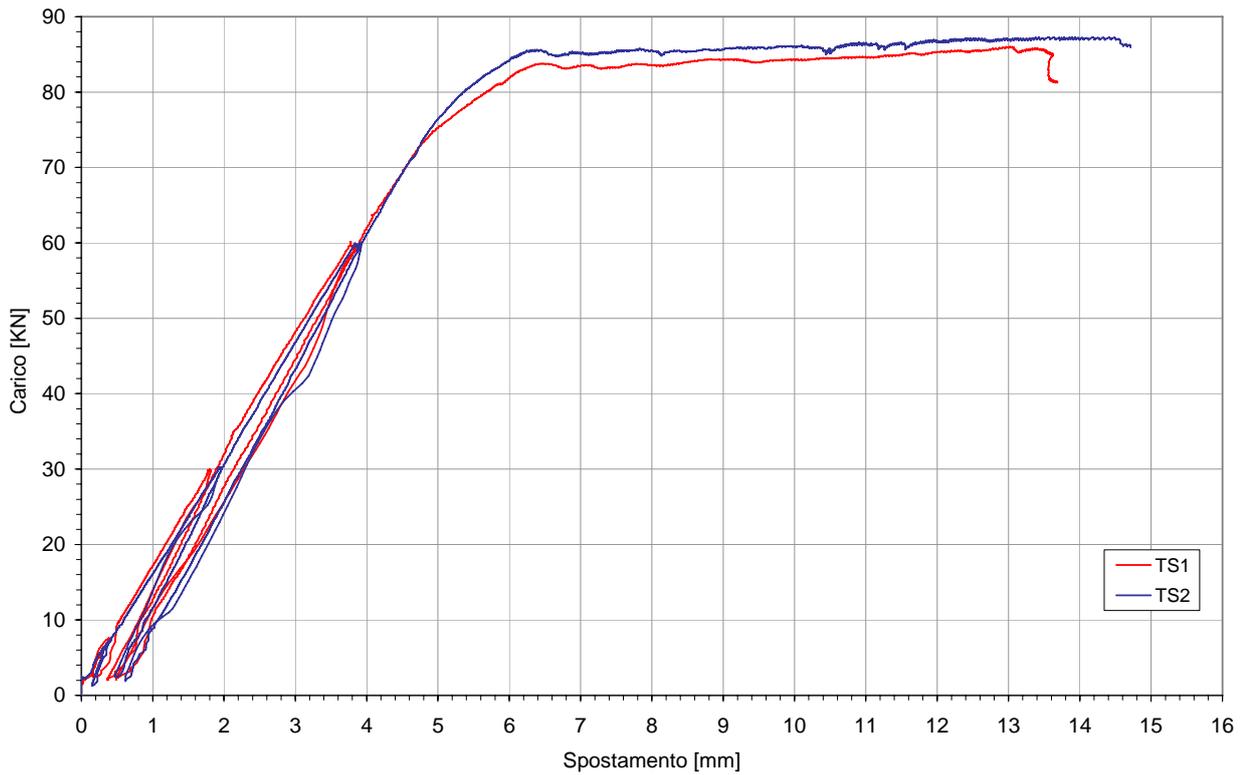


Grafico 5.13: freccia relativa

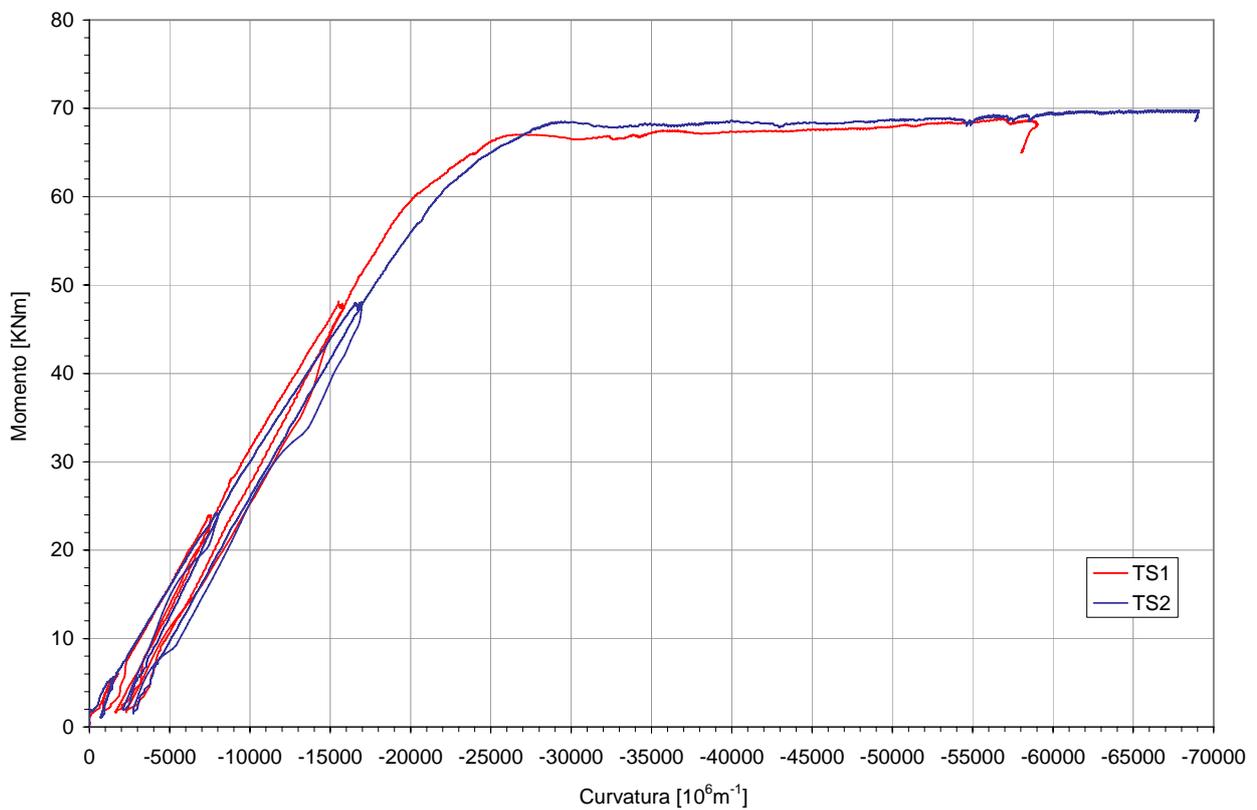


Grafico 5.14: diagramma momento-curvatura

### 5.4.1 Valutazione dello stadio I e II e del Tension Stiffening

Nei grafici 5.15 ÷ 5.17 oltre alla curva sperimentale definita attraverso la prova di rottura, vengono riportate tre rette di diversa inclinazione che possono essere considerate come dei riferimenti per la valutazione della variazione della rigidezza flessionale della trave al variare del carico agente su essa.

La retta che presenta la maggiore pendenza è quella che definisce lo “stadio I” che rappresenta il comportamento delle sezioni inflesse in cemento armato per bassi livelli di sollecitazione, quando il comportamento d’entrambi i materiali (acciaio e cls) è ancora elastico e la sezione può essere considerata come completamente reagente.

La retta di “stadio II” rappresenta lo stato in cui, a seguito dei maggiori carichi agenti, è stata ormai raggiunta la resistenza a trazione del calcestruzzo e dunque s’innesca una fessurazione che induce una forte diminuzione della rigidezza flessionale.

La terza retta rappresenta la retta di “stadio II traslato” traslata di una quantità pari al valore della curvatura prodotta dall’effetto uniforme del ritiro che si è sviluppato nel tempo, fino al momento della prova di rottura, quindi rappresenta lo stato della sezione quando è stata raggiunta la resistenza a trazione del calcestruzzo e dunque s’innesca una fessurazione che innesca una diminuzione della rigidezza flessionale.

Nella fase iniziale di caricamento la curva sperimentale risulta essere tangente alla retta di stadio I, al formarsi delle fessure dovrebbe sovrapporsi istantaneamente alla retta di stadio II; questo in realtà avviene progressivamente e la distanza orizzontale tra curva sperimentale e quella di stadio II rappresenta l’irrigidimento ancora offerto dai conci di calcestruzzo teso tra una fessura e l’altra; tale valore prende il nome di *tension stiffening*.

Per il tracciamento delle tre rette è stato necessario ricavare la rigidezza della trave, che rappresenta il coefficiente angolare di tali rette. Nella formula della rigidezza per lo stadio I si è inserito il valore del momento d’inerzia omogeneizzato della sezione interamente reagente, mentre per lo stadio II si è inserito il valore del momento d’inerzia omogeneizzato della sezione parzializzata, ed infine per la terza retta che rappresenta il “stadio II traslato” è stato necessario ricavare la curvatura per effetto del ritiro uniforme del calcestruzzo che viene considerata come contributo della curvatura nello stadio II assieme alla curvatura istantanea e a quella prodotta per effetto della viscosità. Facciamo riferimento, per tale determinazione alle indicazioni contenute nel CEB.

Si calcola ora la rigidezza della trave facendo riferimento allo schema statico riportato in figura 5.25 e utilizzando l’equazione della linea elastica. Si ricorda che per rigidezza s’intende quel valore della forza che induce lo spostamento unitario.

$$0 < z < a \quad M(z) = P \cdot z$$

$$a < z < L \quad M(z) = P \cdot a$$

Equazione della linea elastica:

$$\begin{cases} \frac{d^2 v_1}{dz^2} = -\frac{P \cdot z}{EI} & 0 < z < a \\ \frac{d^2 v_2}{dz^2} = -\frac{P \cdot a}{EI} & a < z < L \end{cases}$$

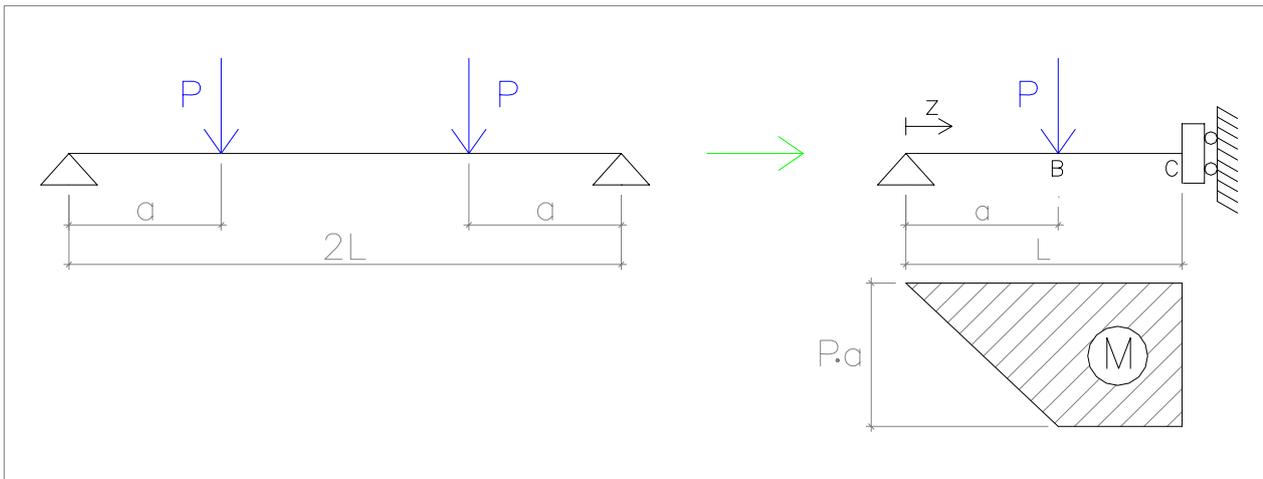


Figura 5-25: schema statico

Con successive integrazioni si ottiene:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dz} = -\frac{P \cdot z^2}{2EI} + C_1 \Rightarrow v_1 = -\frac{P}{6EI} \cdot z^3 + C_1 \cdot z + C_2 \\ \frac{dv_2}{dz} = -\frac{P \cdot a \cdot z}{EI} + C_3 \Rightarrow v_2 = -\frac{P \cdot a}{2EI} \cdot z^2 + C_3 \cdot z + C_4 \end{cases}$$

Condizioni ai limiti:

$$\begin{cases} v_1(z=0) = 0 \\ \left(\frac{dv_2}{dz}\right)(z=L) = 0 \end{cases}$$

Dalle condizioni ai limiti si ottiene:

$$C_2 = 0 \quad \text{e} \quad C_3 = P \cdot a \cdot L / EI$$

Condizioni di continuità:

$$\begin{cases} v_1(z=a) = v_2(z=a) \\ \left(\frac{dv_1}{dz}\right)(z=a) = \left(\frac{dv_2}{dz}\right)(z=a) \end{cases}$$

Dalle condizioni di continuità e considerando i valori di  $C_2$  e  $C_3$  prima trovati si ha:

$$C_1 = \frac{P \cdot a}{EI} \cdot \left( L - \frac{a}{2} \right) \quad C_4 = -\frac{P \cdot a^3}{6EI}$$

Noto il valore delle quattro costanti è ora possibile esprimere il valore dello spostamento verticale assoluto in corrispondenza della mezzeria della trave:

$$v_C = v_2(z = L) = \frac{P \cdot a}{2EI} \cdot \left( L^2 - \frac{a^2}{3} \right)$$

Dunque la rigidezza cercata è pari a:

$$U_C = \frac{2EI}{a} \cdot \left( L^2 - \frac{a^2}{3} \right)$$

Il valore dello spostamento verticale della mezzeria della trave rispetto alla sezione d'applicazione del carico è pari a:

$$v_B = v_2(z = a) = \frac{P \cdot a^2}{EI} \cdot \left( L - \frac{2}{3} a \right) \quad \text{spostamento verticale assoluto della sezione B}$$

$$v_{C,rel} = v_C - v_B = \frac{P \cdot a}{2EI} \cdot (L^2 + a^2 - 2aL)$$

Dunque la rigidezza cercata è pari a:

$$U_{C,rel} = \frac{2EI}{a} \cdot (L^2 + a^2 - 2aL)$$

Note le dimensioni caratteristiche della trave (figura 5.25 e 5.26):

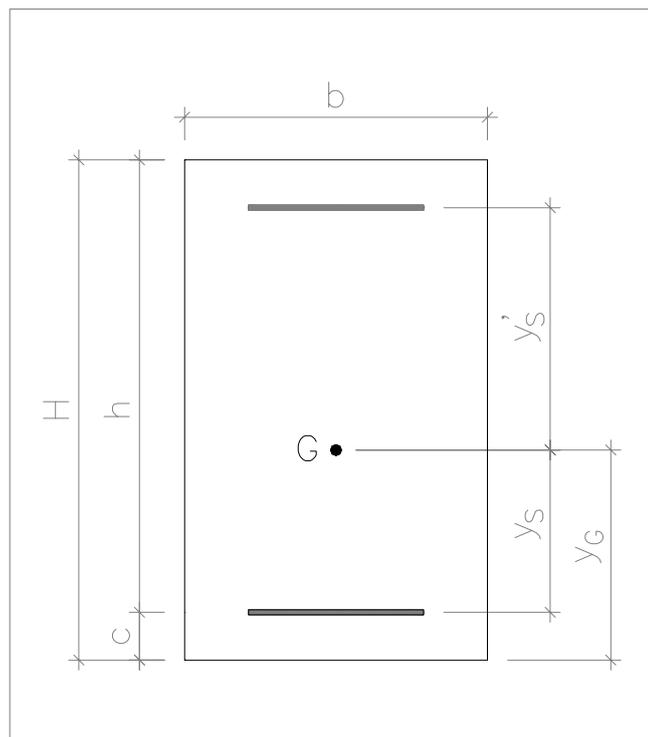


Figura 5-26: sezione della trave

$$a = 80 \text{ cm}$$

$$L = 150 \text{ cm}$$

$$b = 15 \text{ cm}$$

$$H = 25 \text{ cm}$$

$$c = 3.5 \text{ cm}$$

$$A_s' = 2\emptyset 10 = 1.57 \text{ cm}^2 \text{ tipo di acciaio FEB44K}$$

$$A_s = 3\emptyset 16 = 6.03 \text{ cm}^2 \text{ tipo di acciaio FEB44K}$$

$$E_s = 206000 \text{ N/mm}^2 \text{ modulo elastico dell'acciaio}$$

$$E_c = 35000 \text{ N/mm}^2 \text{ modulo elastico del calcestruzzo posseduto osservato dalle prove}$$

svolte su provini cilindrici di SCC (Miscela A)

$$n = E_s / E_c = 5.98 \text{ coefficiente d'omogeneizzazione}$$

Si ottiene la posizione del baricentro della sezione interamente reagente omogeneizzata al calcestruzzo:

$$y_G = \frac{S_{ci}}{A_{ci}} = \frac{\frac{H^2 \cdot b}{2} + n \cdot A_s \cdot c + n \cdot A_s' \cdot (H - c)}{H \cdot b + n \cdot (A_s + A_s')} = 11.94 \text{ cm}$$

$$y_s = y_G - c = 8.24 \text{ cm}$$

$$y'_s = H - c - y_G = 8.86 \text{ cm}$$

Il valore del momento d'inerzia della sezione interamente reagente omogeneizzata è pari a:

$$I_{ci} = \frac{H^3 \cdot b}{12} + H \cdot b \cdot \left( \frac{H}{2} - y_G \right)^2 + n \cdot A_s \cdot y_s^2 + n \cdot A_s' \cdot y_s'^2 = 22784 \text{ cm}^4$$

Si calcola il momento d'inerzia della sezione parzializzata (riferimento figura 5.25):

$$(x^2 \cdot b / 2) + n \cdot A_s' \cdot (x - c) - n \cdot A_s \cdot (H - c - x) = 0$$

Sostituendo si ottiene:  $x = 7.75 \text{ cm}$  distanza dell'asse neutro dal bordo compresso della sezione

$$I_{c2} = \frac{b \cdot x^3}{3} + n \cdot A_s' \cdot (x - c)^2 + n \cdot A_s \cdot (h - x)^2 = 8960 \text{ cm}^4$$

Facendo le dovute sostituzioni si ottiene:

STADIO I

$$U_C = 97.87 \text{ KN/cm}$$

$$U_{C,rel} = 406.86 \text{ kN/cm}$$

STADIO II

$$U_C = 38.49 \text{ KN/cm}$$

$$U_{C,rel} = 160.00 \text{ kN/cm}$$

Il valore della curvatura per effetto del ritiro uniforme è data dalla seguente espressione:

$$\frac{1}{r_{2cs}} = \kappa_{cs2} \cdot \frac{|\epsilon_{cs}|}{d}$$

$\kappa_{cs2} = 0.98$  coefficiente preso dalle tabelle del CEB (figura 5.27)

$\epsilon_{cs} = 0.000630$  deformazione da ritiro sviluppata nei giorni tra il getto del cls e il giorno del caricamento della trave

$d = 0.215$  m distanza tra armatura tesa inferiore e il lembo superiore compresso

Per la determinazione del coefficiente  $\kappa_{cs2}$  si sono dovuti calcolare alcuni rapporti dipendenti dalle condizioni geometriche della sezione della trave:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c} = 9.47 \quad \rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.011 \quad \rho' = \frac{A'_s}{b \cdot d} = 0.0029$$

$E_s = 206000$  N/mm<sup>2</sup> modulo di elasticità dell'acciaio

$E_c = 21759$  N/mm<sup>2</sup> primo modulo di elasticità del cls disponibile (2.98 giorni dal getto)

$A_s = 6.03$  cm<sup>2</sup> area acciaio teso

$A'_s = 1.57$  cm<sup>2</sup> area acciaio compresso

$b = 15$  cm larghezza della sezione

$d = 21.5$  cm altezza meno copri ferro della sezione

da questi valori determiniamo i rapporti:

$$\frac{\rho'}{\rho} = 0.264 \quad \alpha \cdot \rho = 0.104 \quad \rightarrow \quad \kappa_{cs2} = 0.98$$

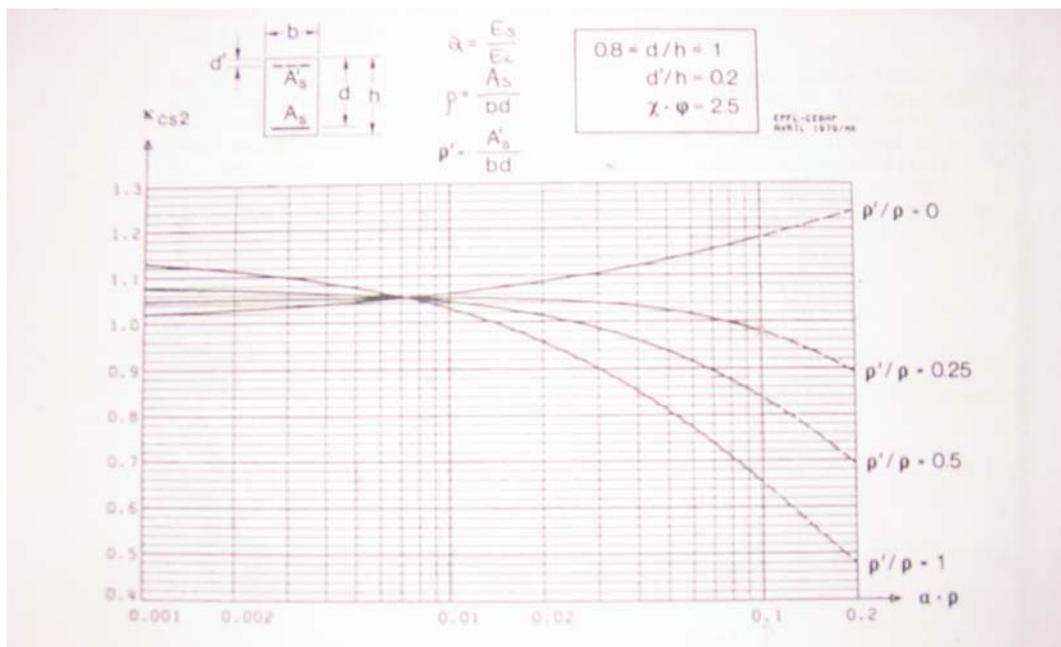


Figura 5-27: sezione della trave

Sono di seguito riportati i diagrammi ottenuti dall'elaborazione dei dati strumentali. In questo caso, rispetto ai diagrammi precedenti, sono stati eliminati i vari cicli di carico che hanno caratterizzato la prova così da facilitare la lettura del diagramma.

Nei diagrammi sono rappresentate le curve sperimentali della curvatura in funzione del momento, quella delle frecce relative in funzione del carico ed infine vengono riportate anche le rette di stadio I, II e nuovo stadio.

Nei grafici 5.15 e 5.16 sono riportate le curve che mettono in relazione momento-curvatura rispettivamente per le travi TS1 e TS2. La curvatura è stata determinata andando a valutare le deformazioni a trazione e compressione che si sviluppano in corrispondenza del concio di trave monitorato attraverso gli strumenti (gli estensimetri nel lembo compresso e gli LVDT in quello teso).

Le deformazioni del lembo teso ( $\varepsilon^+$ ) della trave sono state determinate in tal modo:

$$\varepsilon^+ = \Delta L / L \quad \text{per ottenere le } \mu\text{e si è moltiplicato il valore ottenuto per } 106$$

con

L: distanza iniziale delle due sezioni terminali del concio di trave monitorato dall'LVDT (figura 5.37, WA10-3 = 120 mm, WA10-4 = 120 mm per la TS1,

$$\text{WA10-3} = 122 \text{ mm, WA10-4} = 125 \text{ per la TS2)$$

$\Delta L$ : spostamenti orizzontali misurati dall'LVDT nel corso della prova

Le deformazioni del lembo compresso ( $\varepsilon^-$ ) della trave non sono altro che i dati provenienti dagli estensimetri.

Per entrambe le travi, essendo presenti due LVDT e due estensimetri, si sono considerati per valutare le deformazioni del lembo compresso due concetti di trave (quello in cui sono presenti l'LVDT WA10-3 e l'estensimetro E1 e quello in cui sono presenti l'LVDT WA10-4 e l'estensimetro E2), poi si è eseguita la media tra valori ottenuti elaborando i dati relativi ai due concetti distinti.

La curvatura ( $\chi$ ) è stata calcolata in tal modo:

$$\chi = (\varepsilon^+ + \varepsilon^-) / H \quad \text{H: altezza della trave (25cm)}$$

Il momento è pari a:

$$M = P \cdot a \quad a = 80 \text{ cm}$$

Nei grafici 5.15 e 5.16 si vede come la curva sperimentale TS1 sia fin dall'inizio sovrapposta alla retta di "stadio II" e se ne distacchi per poi tendere alla retta "nuovo stadio" al raggiungimento di 60 KNm di momento. Per quanto riguarda la curva sperimentale TS2 si vede analogamente una sovrapposizione iniziale alla retta di "stadio II", ma in questo caso si osserva che la curva tende alla retta di "nuovo stadio" già ad un valore di 30 KNm di momento.

La sovrapposizione con la retta di stadio II è giustificata dal fatto che, pur non essendo mai stata sottoposta a carichi le travi presentano comunque fessurazioni prodotte dal ritiro del calcestruzzo. A causa delle dello strato di boiaccia che riveste il cls non erano visibili ad occhio nudo.

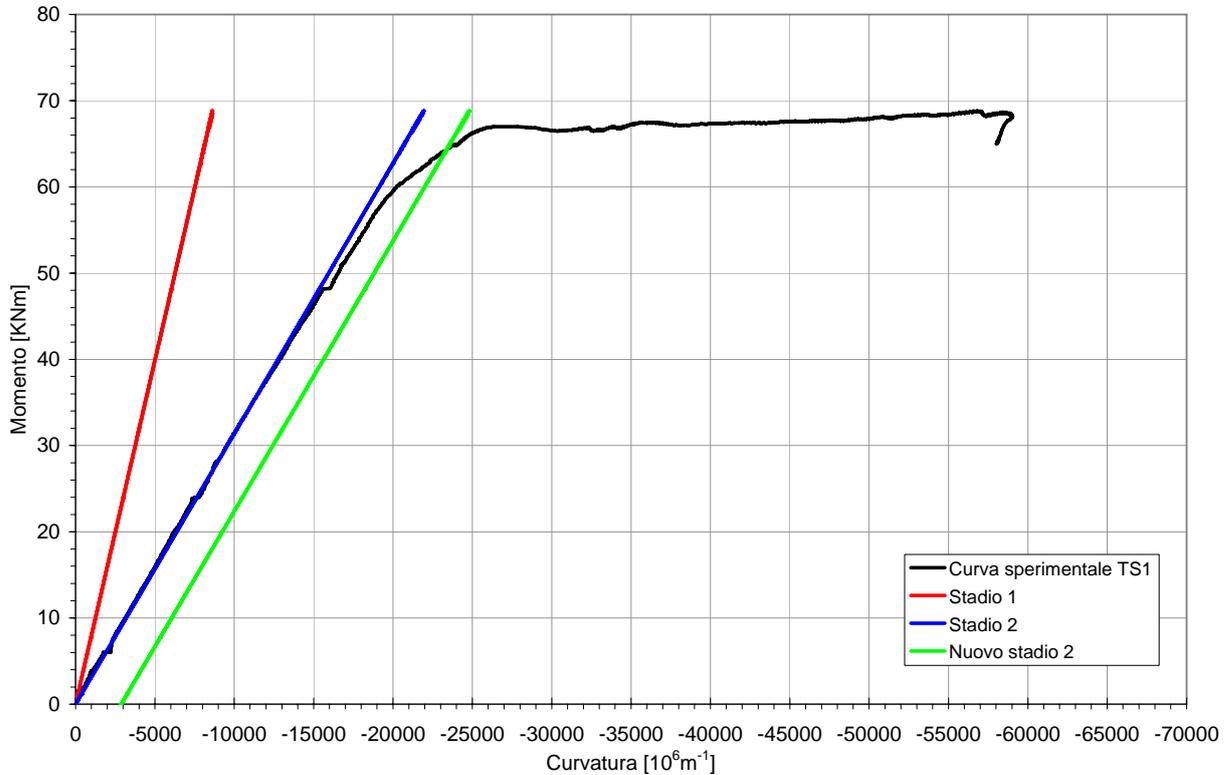


Grafico 5.15: diagramma momento-curvatura trave TS1

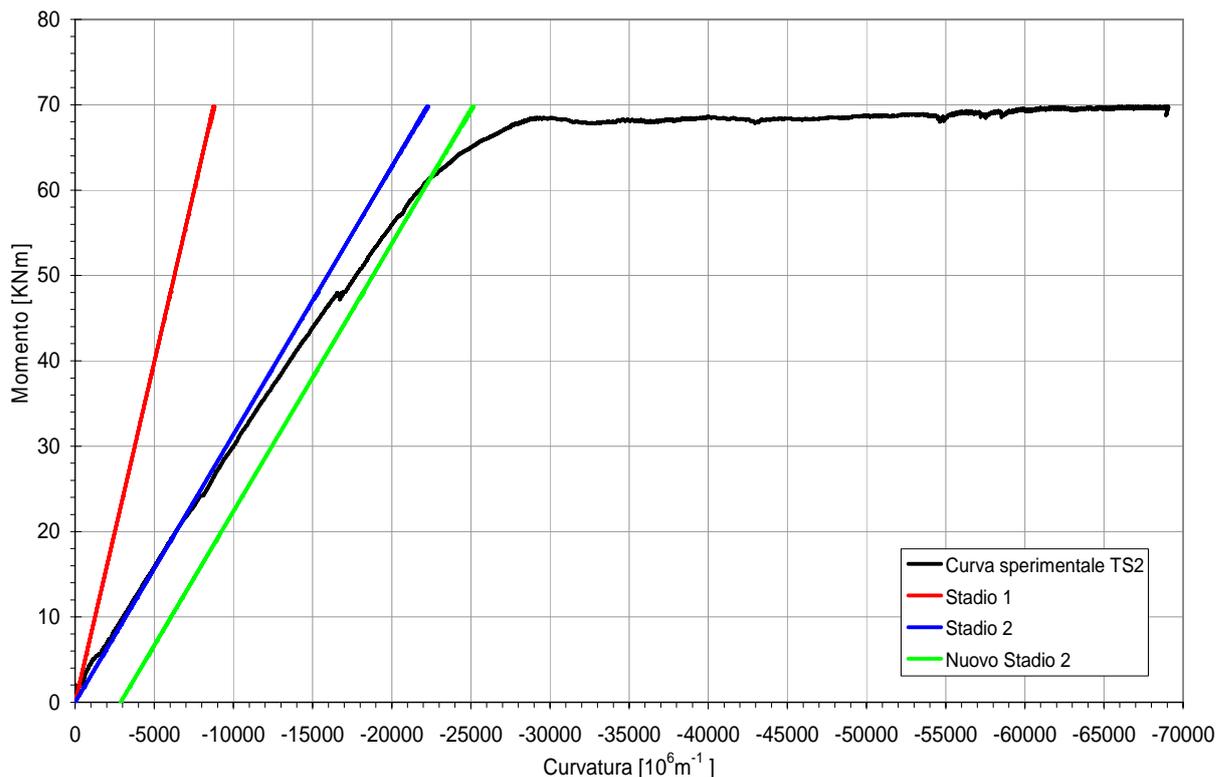


Grafico 5.16: diagramma momento-curvatura trave TS2

Nei grafici 5.17 e 5.18 sono riportate la freccia relativa per le travi TS1 e TS2.

La freccia relativa è stata determinata facendo la differenza tra il valore dello spostamento letto dall'LVDT centrale WA50-C e la media degli spostamenti letti dagli LVDT WA50-1 e WA50-2 posti sotto i punti di applicazione del carico.

La freccia relativa (fmc) è stata calcolata in tal modo:

$$f_{cm} = (WA50 - C) - \left[ \frac{(WA50 - 1) + (WA50 - 2)}{2} \right]$$

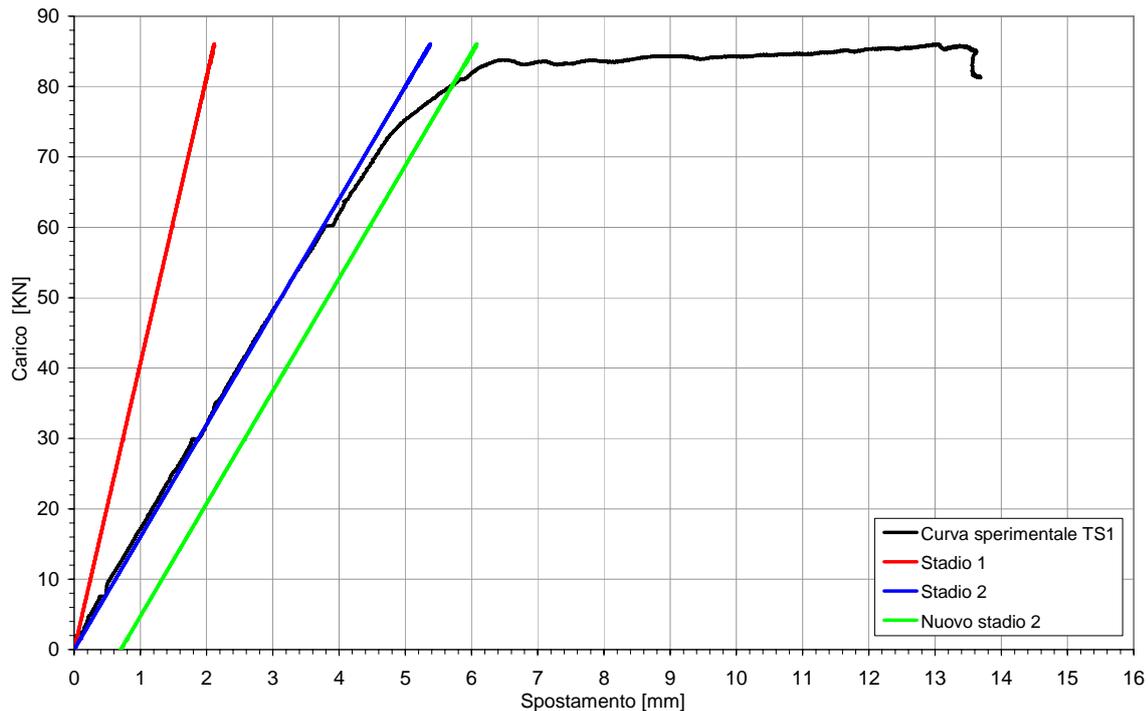


Grafico 5.17: diagramma freccia relativa trave TS1

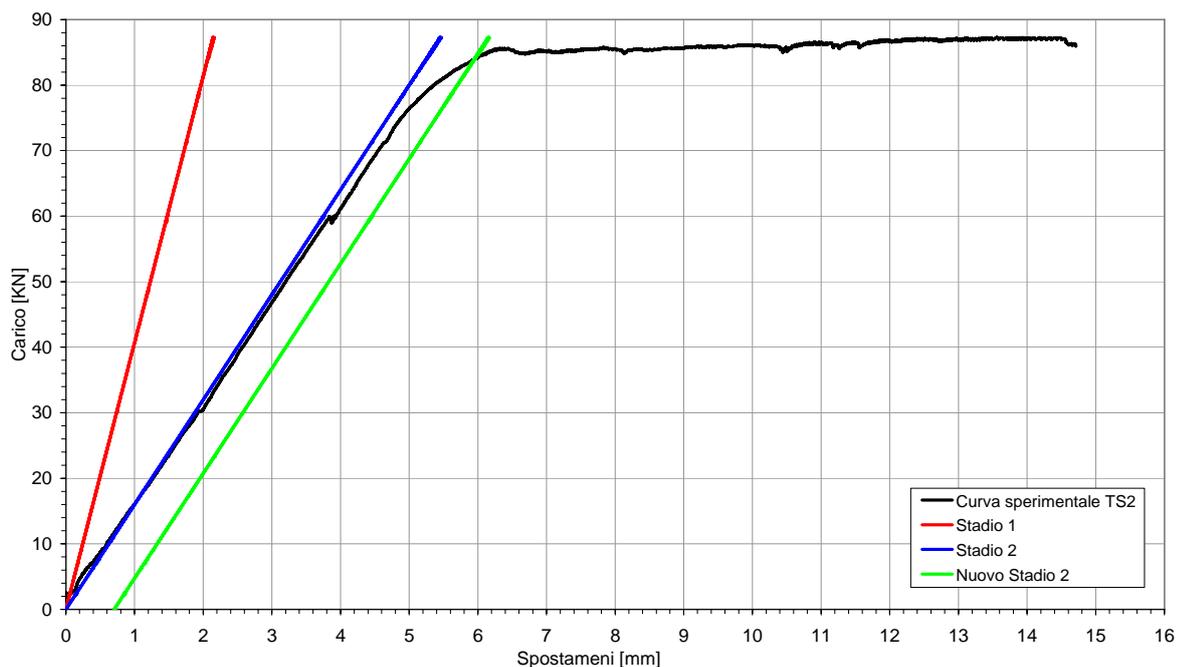


Grafico 5.18: diagramma freccia relativa trave TS2

## 5.5 Preparazione della prova di rottura TS5-TS6

### 5.5.1 Tracciatura della trave

Si è proceduto come già descritto per le prove di rottura precedenti, definendo la posizione degli strumenti, osservando la presenza di fessure prodotte dallo stato di creep e di ritiro a cui sono state sottoposte le travi. Il posizionamento degli strumenti dipende da che cosa si vuole andare a valutare mediante la prova. Servendosi di una riga, una squadra e un pennarello si individuano gli allineamenti ed i punti di misura.

Per le prove in esame la tracciatura è stata eseguita facendo riferimento a quanto illustrato nella figura 5.3.

Nella parte centrale della trave si è tracciata anche la posizione delle staffe presenti al suo interno dividendo così la trave in vari campi (figura 5.28), questo perché alcuni strumenti devono essere posti a cavallo di esse (gli omega) o tra la mezzeria di un campo e la mezzeria del successivo (LVDT orizzontali). L'esigenza di conoscere la loro collocazione è dovuta al fatto che in corrispondenza di esse, essendo dei punti di discontinuità trasversale nel getto, si sarebbero sviluppate le prime fessure nella parte inferiore della trave a seguito del caricamento della trave stessa. In questo caso, la disposizione degli LVDT e degli omega risulta semplificato dalla già evidente presenza di fessure, che si sono formate precedentemente, in seguito alla fase di caricamento.

### 5.5.2 Strumenti utilizzati nella prova

Per la valutazione degli spostamenti assoluti della trave sono stati posizionati cinque LVDT (figura 5.29); due di essi sono stati posti sopra agli appoggi, altri due al di sotto del punto di applicazione dei carichi e l'ultimo in corrispondenza della mezzeria (figura 5.32).

Per valutare lo sviluppo dello stato fessurativo e del comportamento deformativo a trazione, nella parte centrale inferiore della trave sono stati posizionati altri due LVDT posti in mezzeria tra un campo e il successivo e due omega a cavallo delle fessure visibili (figure 5.29 e 5.30). Non sono stati posti estensimetri in zona tesa perché, da prove eseguite precedentemente, si è visto che già per carichi ridotti cessa il loro funzionamento a causa delle fessure che si creano nel calcestruzzo e che vanno ad interrompere le resistenze di cui sono costituiti.

Per concludere, si sono posizionati due estensimetri nella parte centrale superiore di tutte le travi (figura 5.31) attraverso i quali si è valutato lo sviluppo deformativo a compressione.

I  $K_G$  degli estensimetri utilizzati sono diversi, tale diversità è dovuta semplicemente alla disponibilità degli strumenti del laboratorio

Tutti questi strumenti sono poi stati collegati al sistema d'acquisizione (regolato utilizzando i valori riportati nelle tabelle 5-3 e 5-4) e precisamente i due estensimetri e i due omega hanno occupato i primi quattro canali della 2100 mentre i sedici LVDT sono stati collegati alla MGC.

Si riportano, nelle foto seguenti, alcuni particolari degli strumenti utilizzati.

Strumenti TS5-TS6	Cella	WA10-1	WA50-1	WA10-3	WA50-C	WA10-4	WA50-2	WA10-2
Canale	0	1	2	3	4	5	6	7
Corsa [mm]	/	10	50	50	50	10	50	10
Costanti inserite nel LabView	61.57	0.9903	4.997	0.9926	5.01	0.9949	5.019	0.9909

Tabella 5-3: corse e costanti relative agli LVDT

Strumenti	$\Omega 1$	$\Omega 2$	E1 TS5	E2 TS5	E1 TS6	E2 TS6
Canale	8	9	8	9	10	11
Dimensione [mm]	50	50	55	54	60	50
Costanti inserite nel LabView	0.2375	0.2325	2.02	2.02	2.09	2.07

Tabella 5-4: dimensioni e costanti relative a omega ed estensimetri

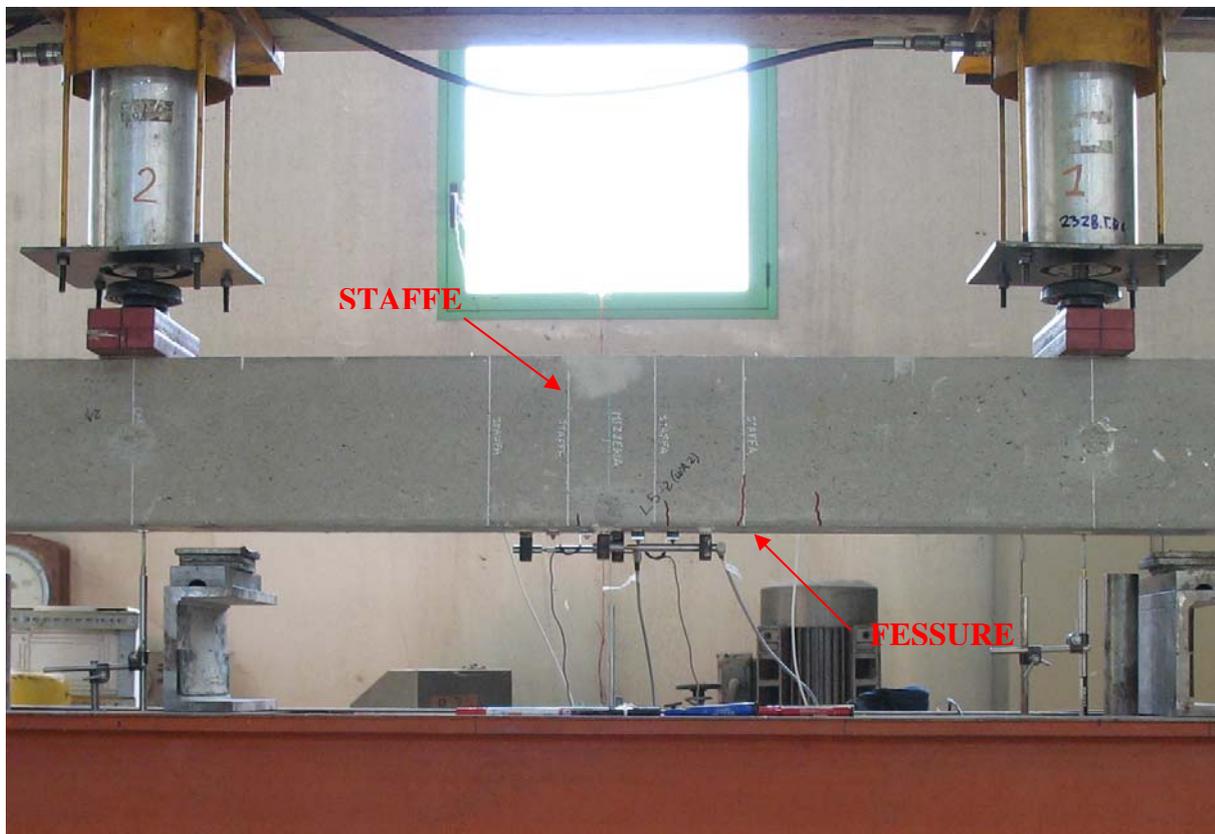


Figura 5-28: TS5- individuazione delle staffe e delle fessure

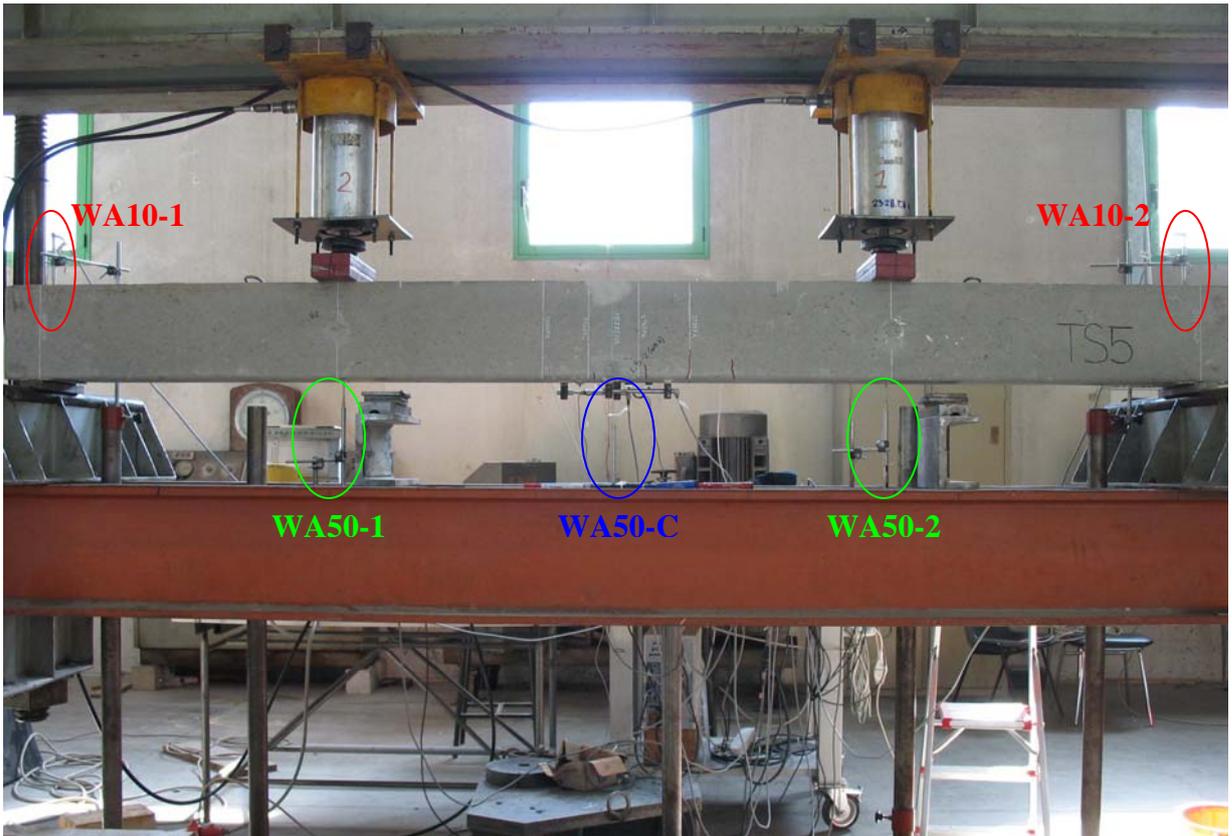


Figura 5-29: TS5 – configurazione della trave prima della prova

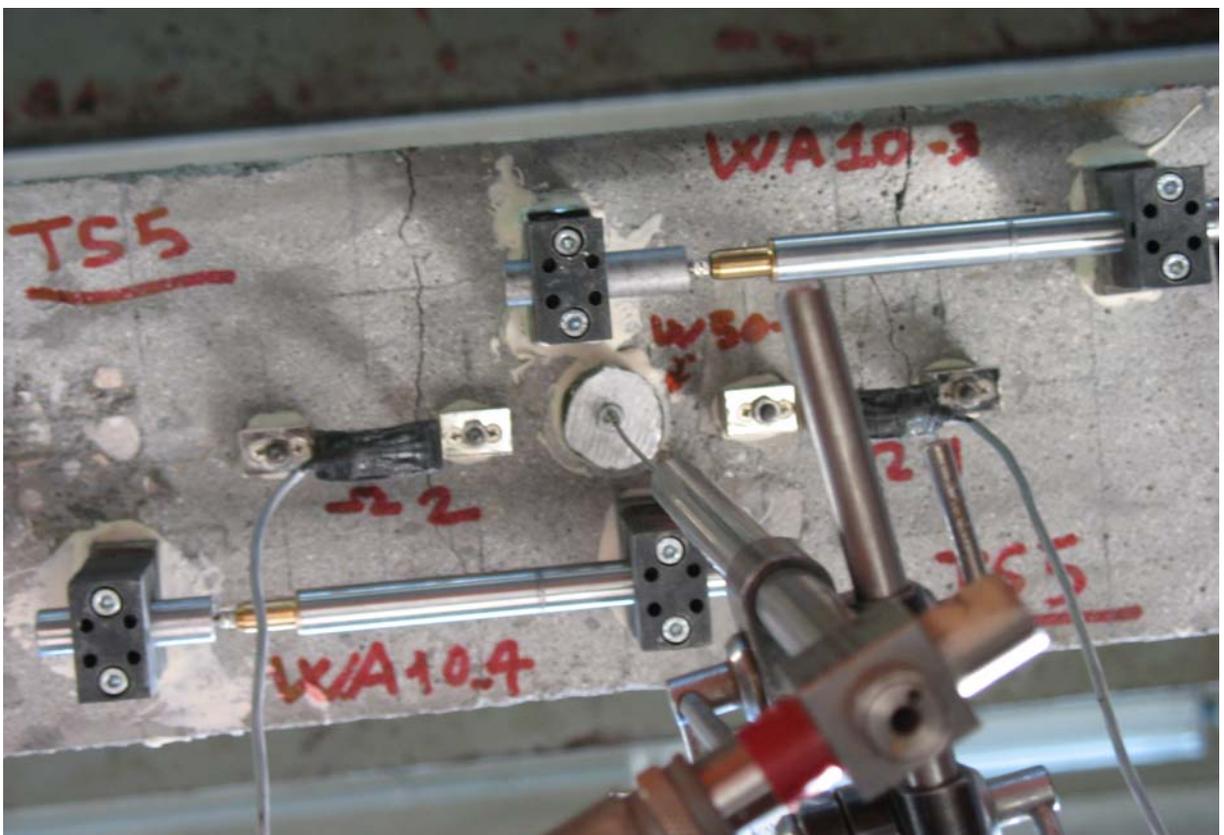


Figura 5-30: vista dal basso degli strumenti posti nella parte centrale della trave (omega ed LVDT orizzontali)

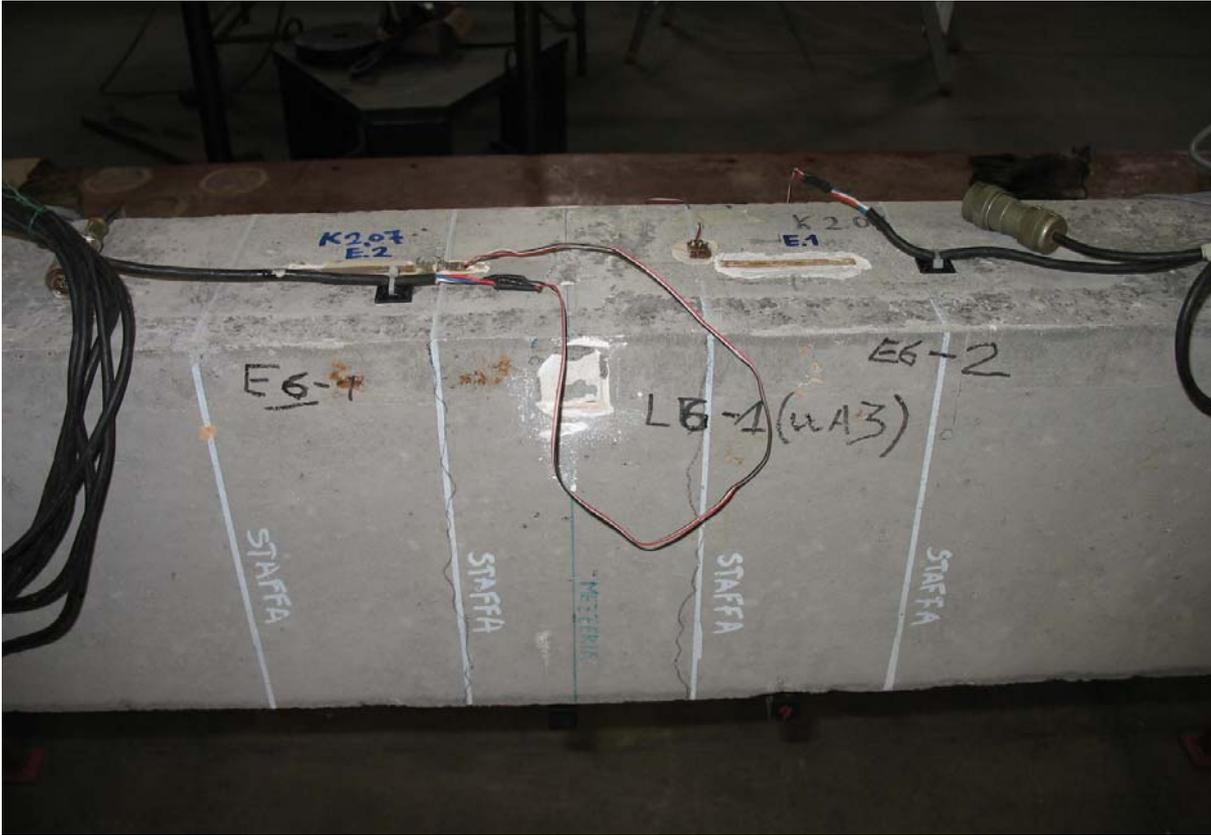


Figura 5-31: estensimetri posti sulla parte superiore della trave



Figura 5-32: LVDT sopra l'appoggio (WA10-2) e sotto il pistone (WA50-2)

## 5.6 Svolgimento della prova di rottura

Dopo aver svolto le operazioni descritte in precedenza (vedi paragrafo 5.2) si è dato il via alla prova di rottura procedendo con il caricamento della trave.

Sono stati effettuati diversi cicli di carico, ad una velocità di circa 30kN/s.

Per tutte e quattro le travi, il processo di carico ha previsto: un primo ciclo di carico che ha raggiunto il valore di 8 kN, un secondo che ha raggiunto 30 kN, il terzo è arrivato a 60 kN ed infine si è incrementato il carico fino alla rottura della trave; ad ogni ciclo di carico è seguita una fase di scarico fino a 2 kN.

Al termine di ogni ciclo, mentre il carico veniva mantenuto costante, con pennarelli si è tracciato l'andamento delle fessure visibili ad occhio nudo cosicché, al termine della prova, è stato possibile osservare l'evoluzione dello stato fessurativo al variare del carico.

Riportiamo qui di seguito una serie di foto che rappresentano le varie fasi eseguite durante le prove di rottura.

Nella [figura 5.33 e 5.34](#) (relativa alla trave TS5), si vede la pompa manuale attraverso la quale si applica il carico e il telaio a contrasto su cui vengono appoggiate le travi, le quali sono soggette ad un'azione concentrata trasmessa dai pistoni che distano circa 140 cm e che inducono nella zona centrale un momento costante come evidenziato nello schema statico di [figura 5.2](#).

Nella [figura 5.34 e 5.35](#) sono evidenti le evoluzioni dello stato fessurativo dopo i cicli di carico a 30 e 60 kN.

Nella [figura 5.36](#) si nota l'incremento della freccia rispetto all'immagine precedente, ciò è dovuto all'incremento del carico.

Nella [figura 5.37](#) viene mostrato il quadro fessurativo finale a cui corrisponde un carico applicato di circa 85 kN in cui si manifesta la crisi nel lembo compresso della trave. La porzione di trave compresa tra i due pistoni è soggetta a momento flettente costante, dunque la crisi avrebbe potuto manifestarsi in ogni sezione compresa tra i due punti di carico; essa si manifesta nella zona prossima al pistone di destra probabilmente perché in quel punto si avevano condizioni tali da indurre una minore resistenza del materiale oppure l'applicazione del carico non è avvenuta in modo perfettamente simmetrico. Si nota inoltre l'importante inflessione della trave, dovuta al fatto che nel momento di crisi del calcestruzzo compresso, l'acciaio aveva già sviluppato deformazioni superiori al limite di snervamento.

Nella [figura 5.38](#) si rappresenta un particolare della zona centrale della trave ed è mostrata la posizione dell'asse neutro alla rottura identificata con la linea blu, ottenuta dalla congiunzione della parte terminale delle fessure evidenziate con un pennarello rosso.

Nelle [figura 5.39](#) e [5.40](#) si riporta il particolare della zona in cui si è avuta la crisi del calcestruzzo; in particolare nella [figura 5.40](#) avendo rimosso il materiale fratturato si possono vedere alcune parti dell'armatura longitudinale e delle staffe della trave TS5.

Analogamente alla trave TS5 sono state riportate le figure dalla 5.41÷5.45 per la trave TS6.

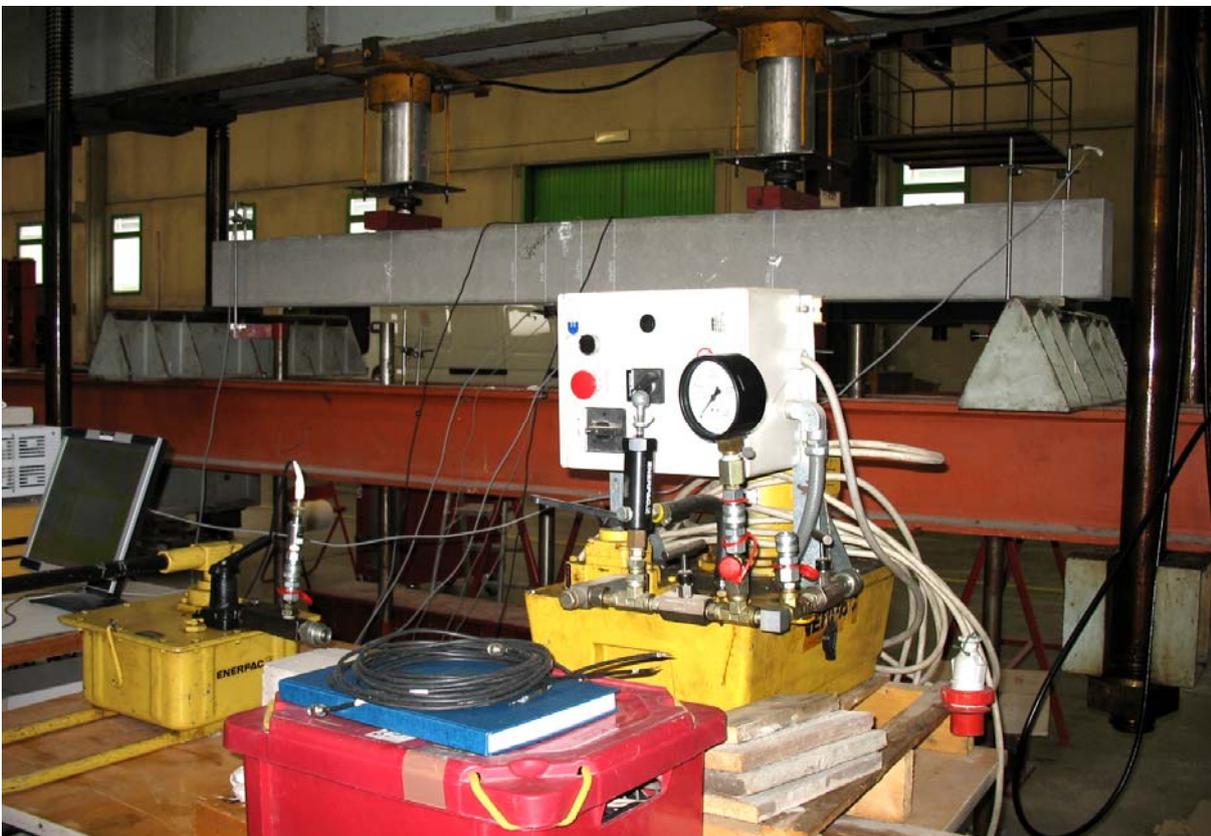


Figura 5-33: TS5 – fase antecedente la prova di carico, pompa manuale



Figura 5-34: TS5 – fase intermedia della prova, evoluzione dello stato fessurativo (30 kN)



Figura 5-35: TS5 – fase intermedia della prova, evoluzione dello stato fessurativo (60 kN)



Figura 5-36: TS5 – fase intermedia della prova di carico, incremento della freccia



Figura 5-37: TS5 – fase intermedia della prova, evoluzione dello stato fessurativo (85 kN)



Figura 5-38: TS5 – particolare dello zona centrale, quadro fessurativo definitivo



Figura 5-39: TS5 – zona di rottura



Figura 5-40: TS5 – particolare della rottura



Figura 5-41: TS6 – fase antecedente la prova di carico



Figura 5-42: TS6 – fase intermedia della prova, evoluzione dello stato fessurativo (30 kN)



Figura 5-43: TS6 – fase intermedia della prova, evoluzione dello stato fessurativo (85 kN)



Figura 5-44: TS6 – zona di rottura



Figura 5-45: TS6 – trave rotta, quadro fessurativo completo

Nei paragrafi successivi si riportano i risultati che sono il frutto dell'elaborazione dei dati inviati dagli strumenti al sistema d'acquisizione per ogni prova di rottura. In ciascun grafico è stato riportato, per un determinato strumento, l'andamento che si è rilevato durante le fasi di carico e scarico che caratterizzano la prova oggetto di studio.

## 5.7 Rottura trave TS5-TS6: risultati ottenuti

La trave TS5 è stata portata a rottura il 17 Aprile del 2007 dopo 931 giorni di stagionatura, durante i quali è stata conservata in ambiente a temperatura di 20° e umidità al 60% e che è stata sottoposta a caricamento per qualche mese.

La trave TS6 è stata portata a rottura il 30 Marzo del 2007 dopo 911 giorni di stagionatura, durante i quali è stata conservata in ambiente a temperatura e umidità controllata ed è stata sottoposta a caricamento come la trave TS5.

Per esse sono stati previsti cinque LVDT verticali, due orizzontali e due estensimetri, la cui disposizione è mostrata in figura 5.3.

Nei grafici 5.19 e 5.20 è stato riportato il diagramma delle deformazioni relative alla fibra di bordo della zona compressa, in funzione del carico; è evidente un comportamento sostanzialmente diverso sulle due travi. Per quanto riguarda gli estensimetri posti sulla trave TS5 si notano deformazioni ultime maggiori rispetto a quelle rilevate per la trave TS6 di circa 3500  $\mu\epsilon$  per l'estensimetro E1 e di 2500  $\mu\epsilon$  per l'estensimetro E2. Dall'osservazione dei grafici, si è evidenziata una prima fase di carico durante la quale il calcestruzzo in zona compressa non lavora, infatti inizialmente si ha la chiusura delle fessure che erano presenti sulla trave prima di iniziare la prova di rottura. Solo dopo la chiusura delle stesse che avviene attorno ai 14 kN si ha un graduale incremento delle deformazioni del cls compresso.

Nei grafici 5.21 e 5.22 sono stati graficati gli spostamenti in corrispondenza degli appoggi della trave, in funzione del carico; è evidente un comportamento sostanzialmente simile dei WA10-1, mentre per quanto riguarda LVDT WA10-2 si nota uno spostamento ultimo maggiore per la trave TS6 di circa 0.4 mm rispetto alla trave TS5.

Nei grafici 5.23 e 5.24 sono stati graficati gli spostamenti in corrispondenza della zona centrale inferiore della trave, valutati attraverso gli LVDT orizzontali. Gli LVDT posizionati sulla trave TS5 raggiungono spostamenti ultimi maggiori di quelli rilevati per la trave TS6 ; per quanto riguarda LVDT WA10-3 si nota uno spostamento ultimo maggiore per la trave TS5 di circa 2 mm rispetto alla trave TS6, e di circa 0.4 per il WA10-4.

Nei grafici 5.25 e 5.26 sono stati graficati l'andamento delle aperture delle fessure in corrispondenza della zona centrale tesa della trave, valutati attraverso gli omega; si nota come sia  $\Omega_1$  che  $\Omega_2$  per TS5 abbiano registrato un'ampiezza di fessura maggiori di quelle rilevate da entrambi gli strumenti posti sulla TS6. Per la trave TS5 si sono registrate ampiezze massime di circa 1.8 mm. In questo caso i dati ottenuti non dipendono dalla disposizione degli strumenti. Infatti, gli omega sono stati predisposti in prossimità delle staffe facendo particolare attenzione a intercettare le fessure che erano visibili ad occhio nudo.

Nei grafici 5.27 e 5.28 è stato riportato l'andamento degli spostamenti verticali della sezione della trave posta in corrispondenza dei punti di applicazione del carico.

Nel grafico 5.29 è stato riportato l'andamento degli spostamenti verticali della sezione in corrispondenza della zona centrale inferiore della trave. Si osserva che lo spostamento per la trave TS5 è circa 63 mm, mentre per la TS6 si sono raggiunti 47 mm.

Nel grafico 5.30 si è rappresentato l'andamento della freccia assoluta, mentre nel grafico 5.31 si è graficata la freccia relativa. La prima è data dalla differenza tra gli spostamenti verticali in corrispondenza della mezzeria della trave valutati mediante WA50-C e la media degli spostamenti verticali delle sezioni di appoggio, mentre la seconda è data dalla differenza tra gli spostamenti verticali in corrispondenza della mezzeria della trave e la media degli spostamenti verticali in corrispondenza delle sezioni di applicazione del carico. Osservando i grafici si rileva che i carichi di rottura per le travi TS5 e TS6 sono rispettivamente 81 kN e 85.8 kN. Nella prima parte del caricamento, per entrambe le travi, si nota che si hanno grandi deformazioni per piccoli incrementi di carico. Tale comportamento si mantiene fino a 15 kN, dopo si osserva un incremento di rigidità, questo comportamento è una conseguenza della chiusura delle fessure presenti sulle travi prodotte dagli effetti del creep e del ritiro manifestati nel tempo.

Nel grafico 5.32 si è graficato l'andamento del diagramma momento-curvatura.

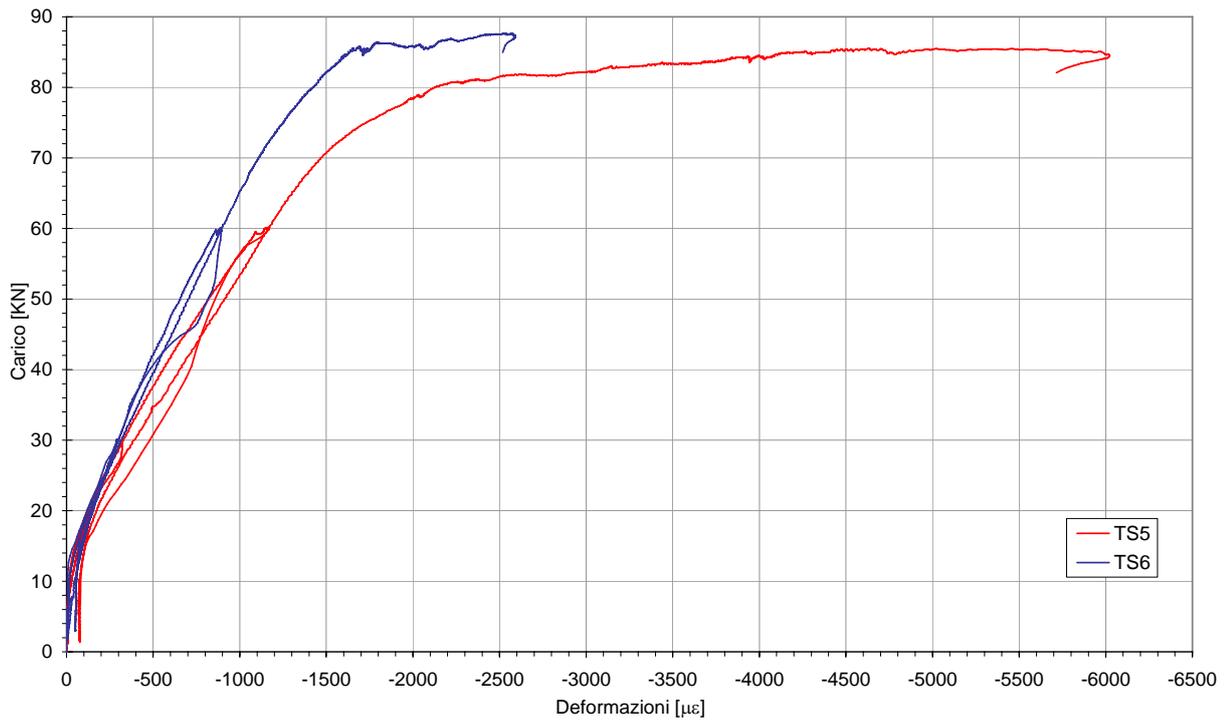


Grafico 5.19: E1- estensimetro sinistro

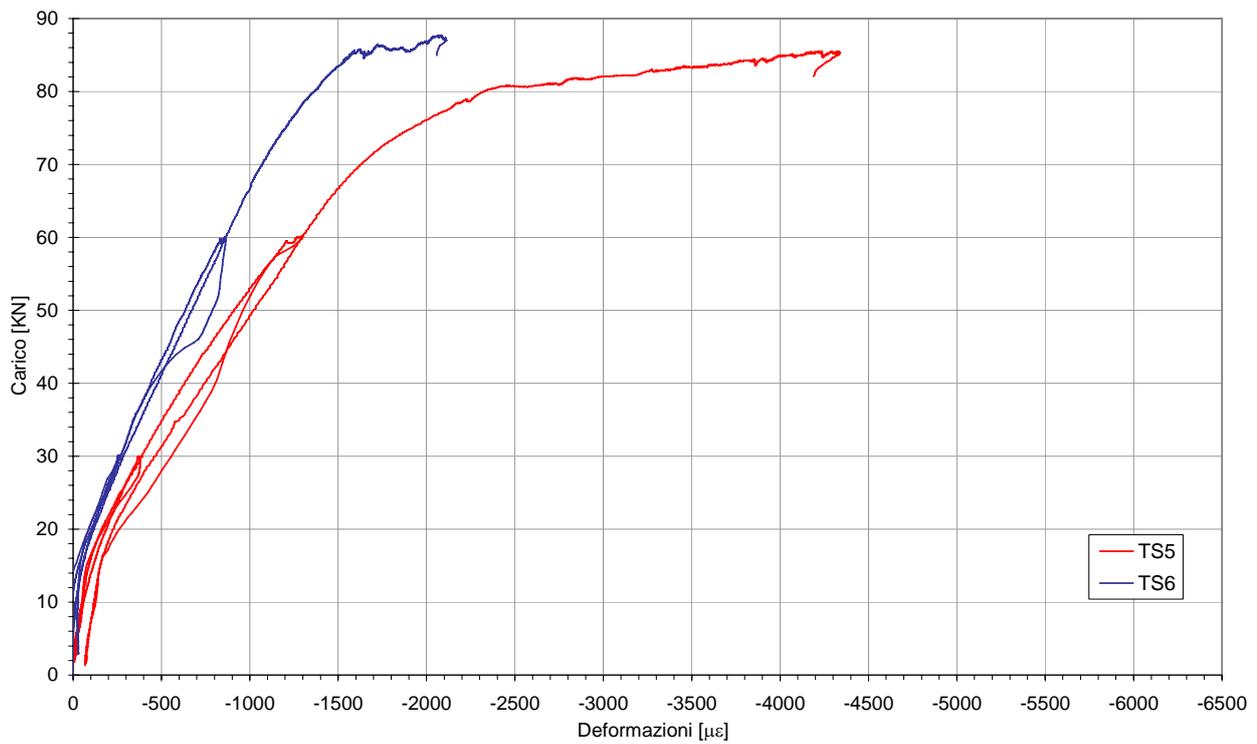


Grafico 5.20: E2 - estensimetro destro

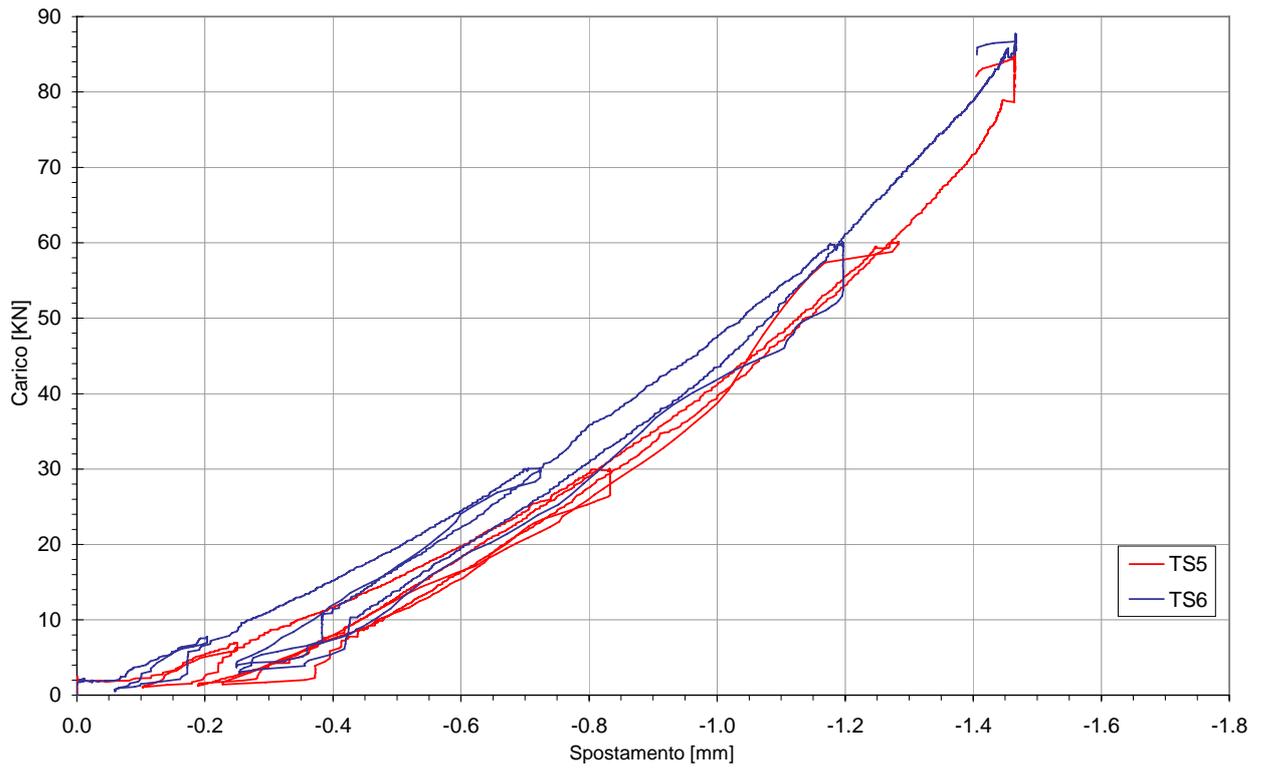


Grafico 5.21: WA10-1 - appoggio sinistro

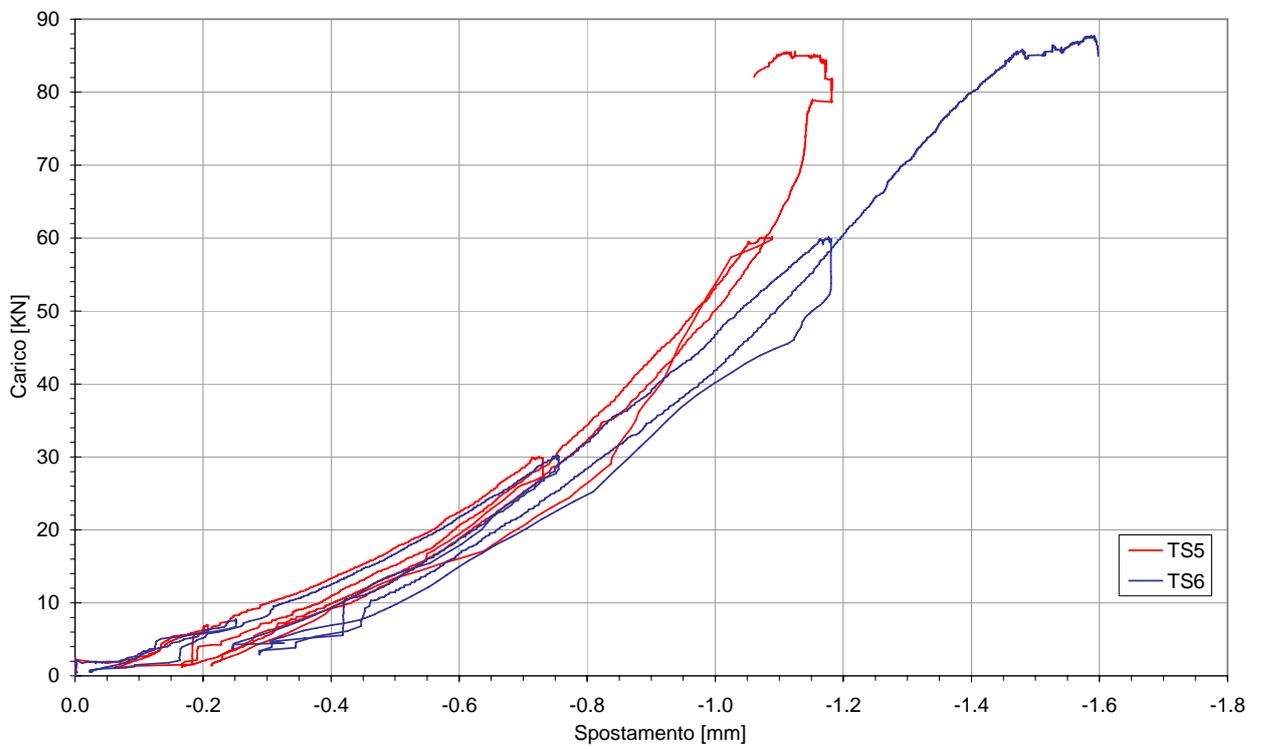


Grafico 5.22: WA10-2 - appoggio destro

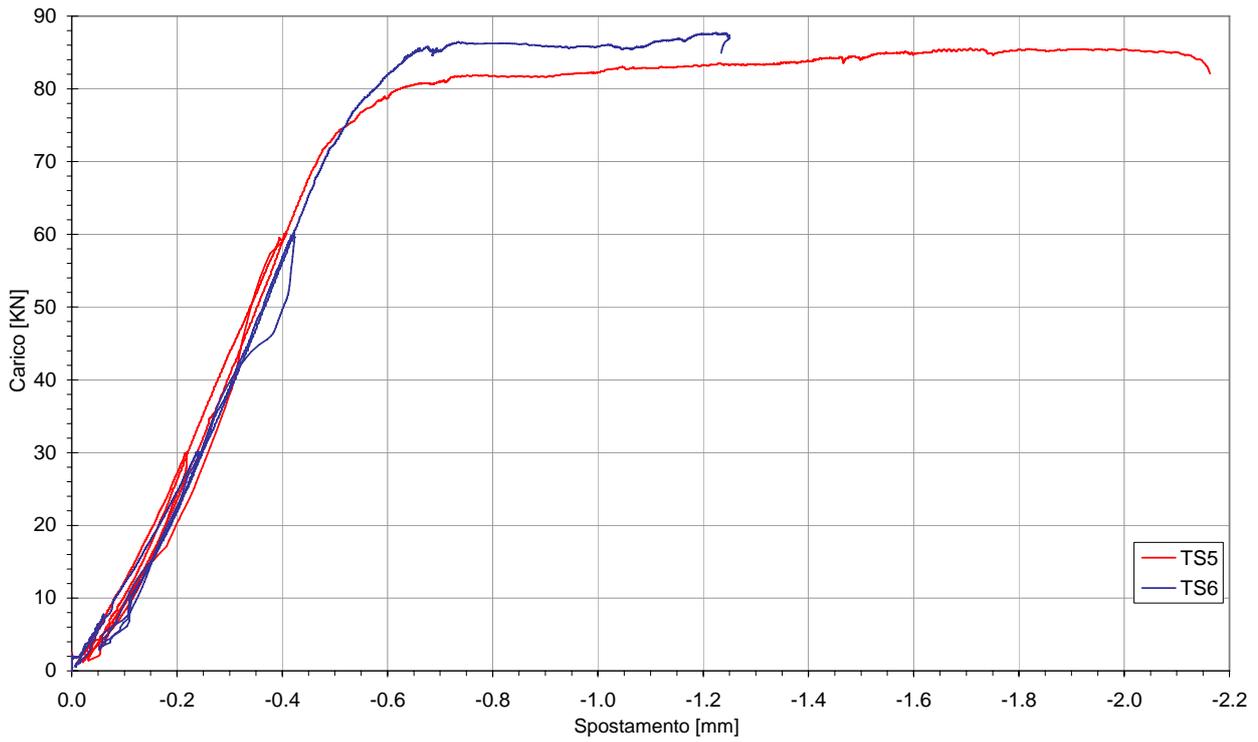


Grafico 5.23: WA10-3 - orizzontale

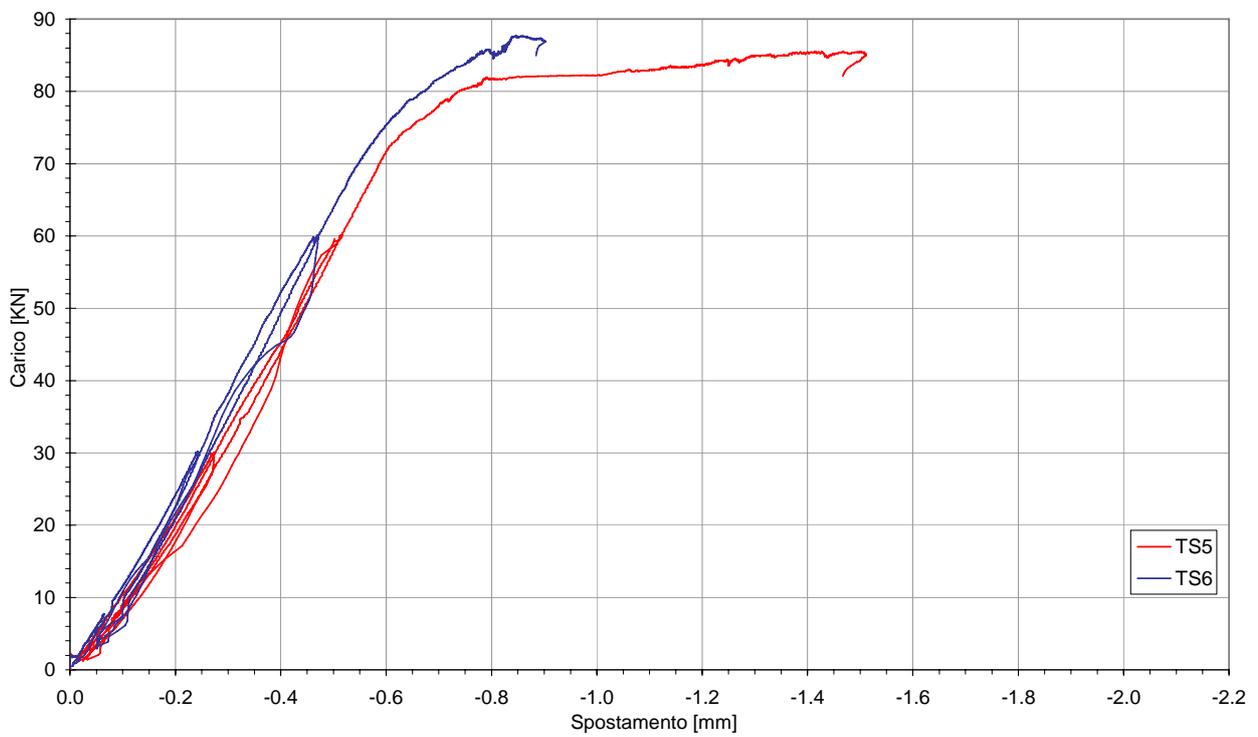


Grafico 5.24: WA10-4 - orizzontale

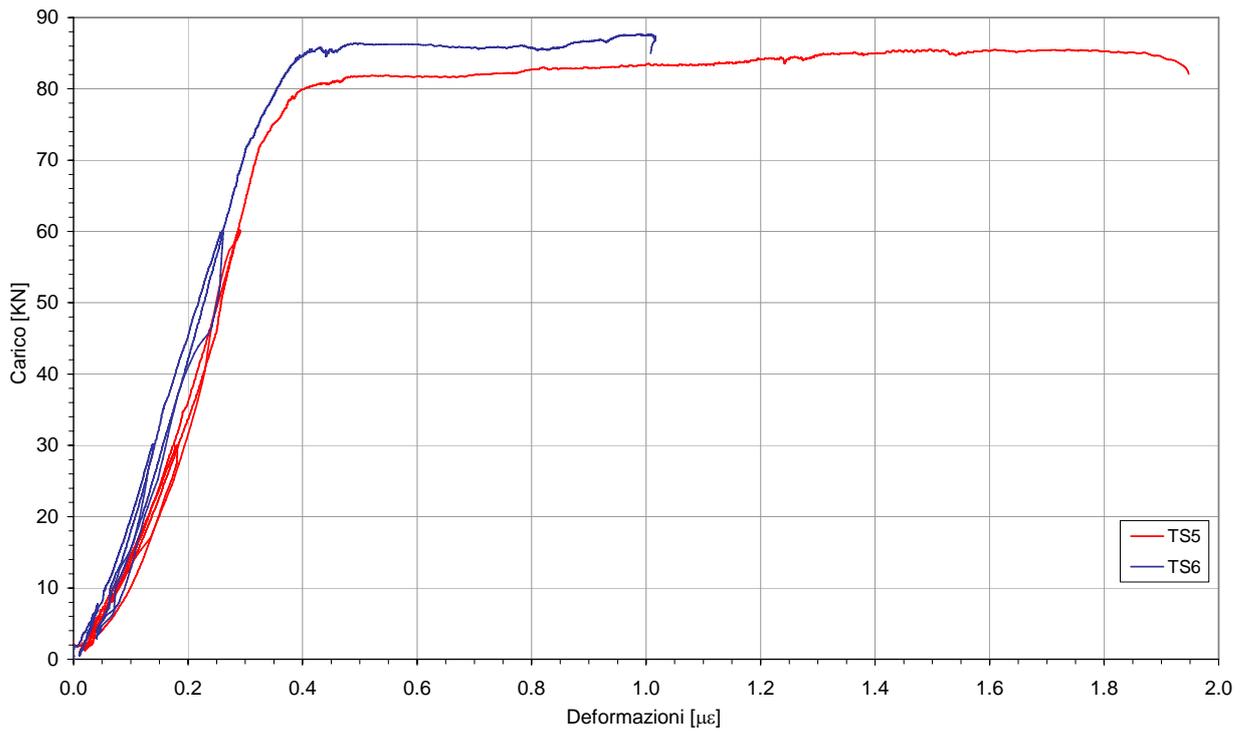


Grafico 5.25: omega1

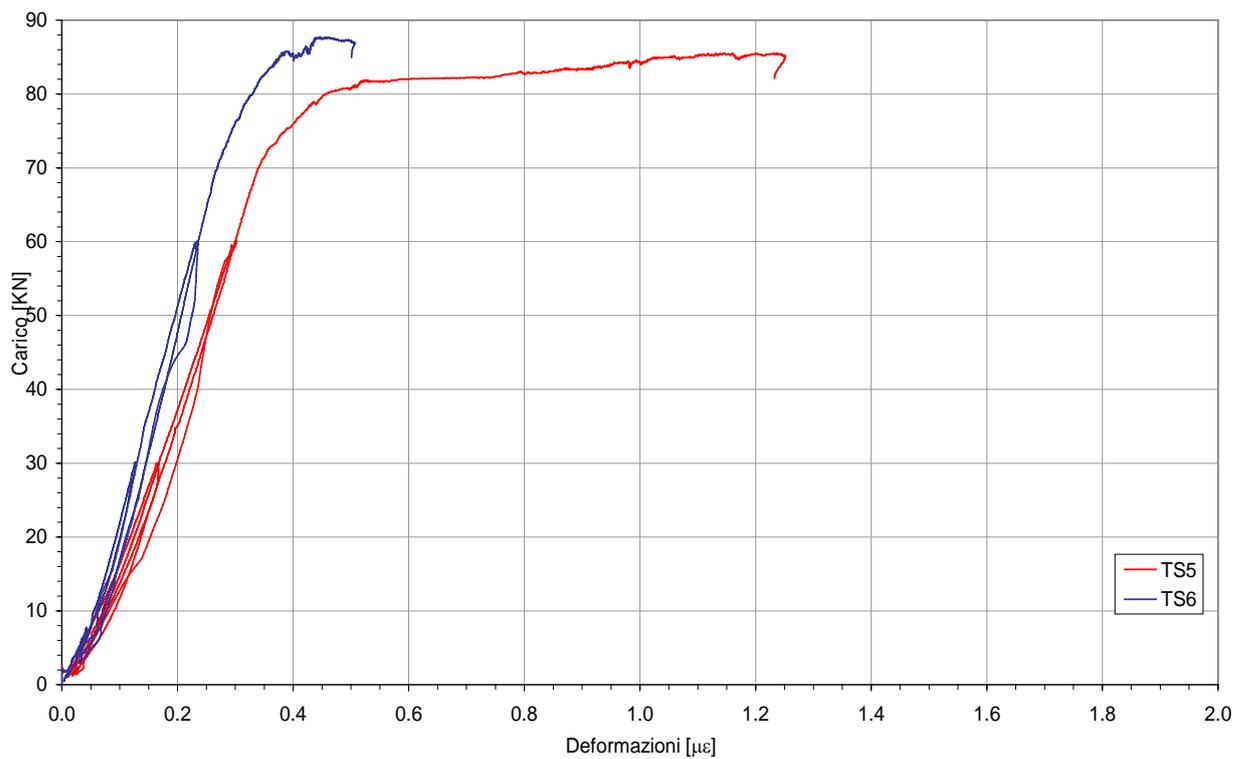


Grafico 5.26: omega2

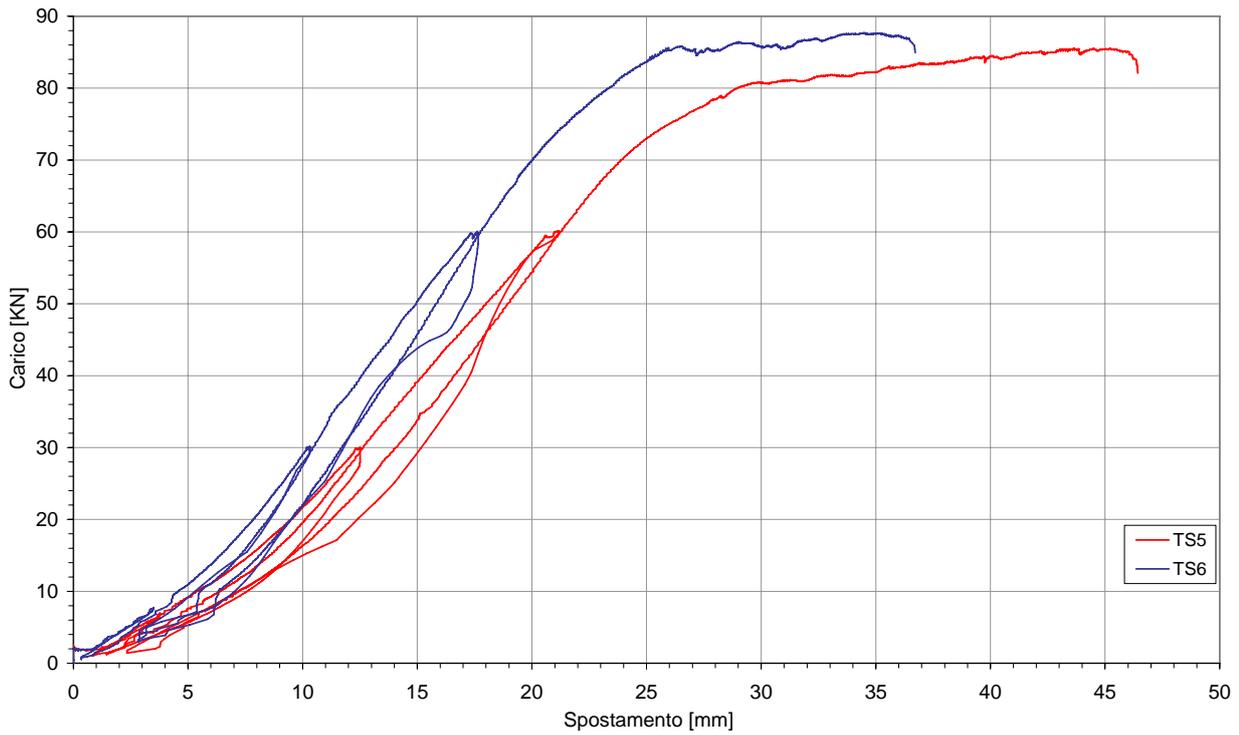


Grafico 5.27: WA50-1 - abbassamento sotto il carico sinistro

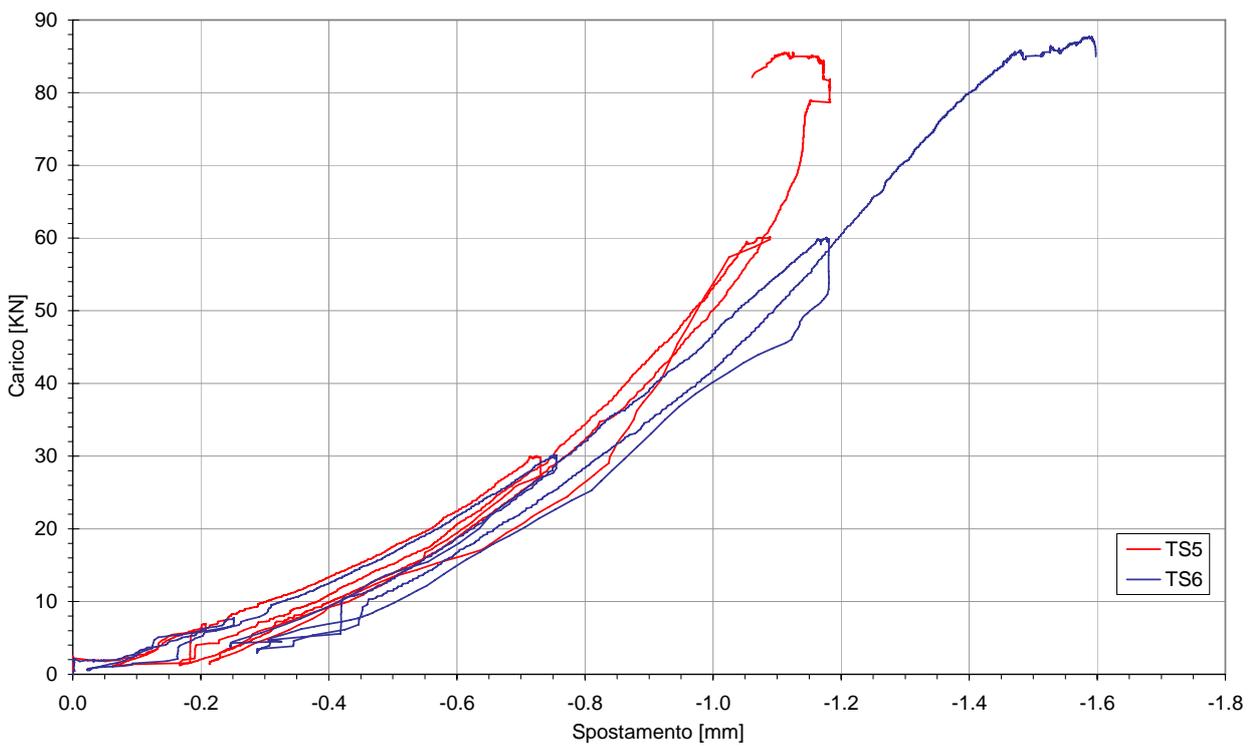


Grafico 5.28: WA50-2 - abbassamento sotto il carico destro

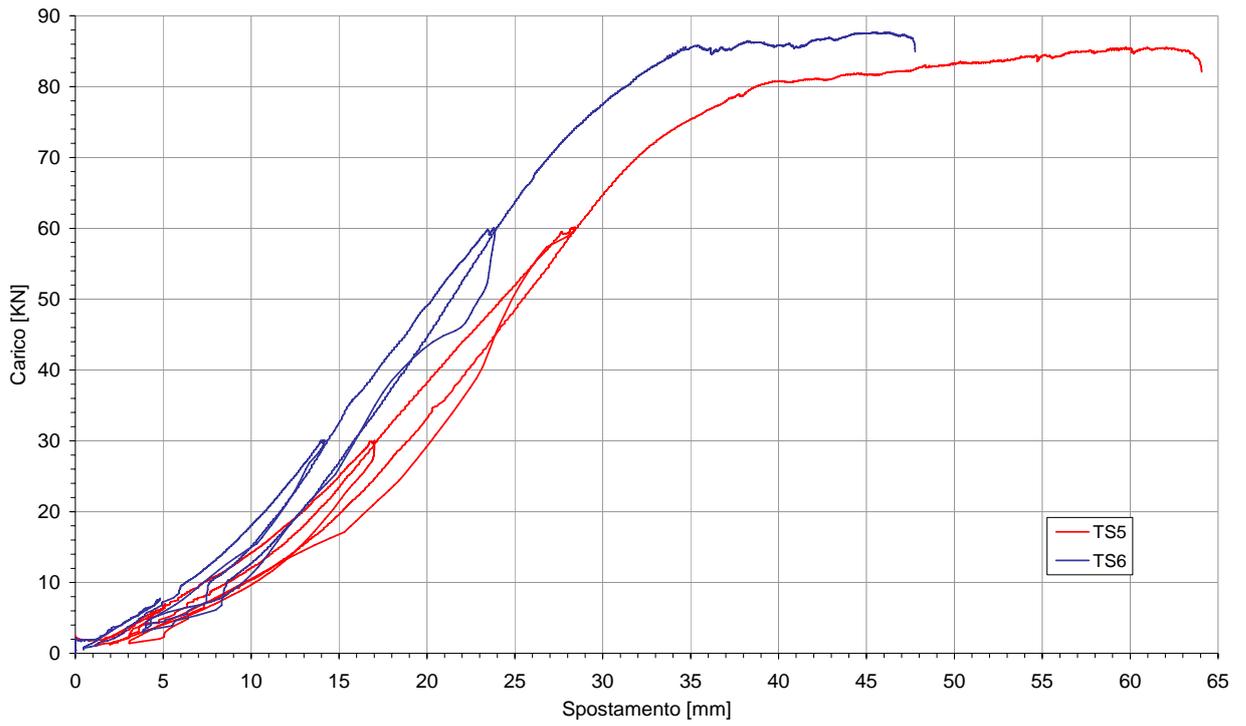


Grafico 5.29: WA50-C— abbassamento in mezzeria

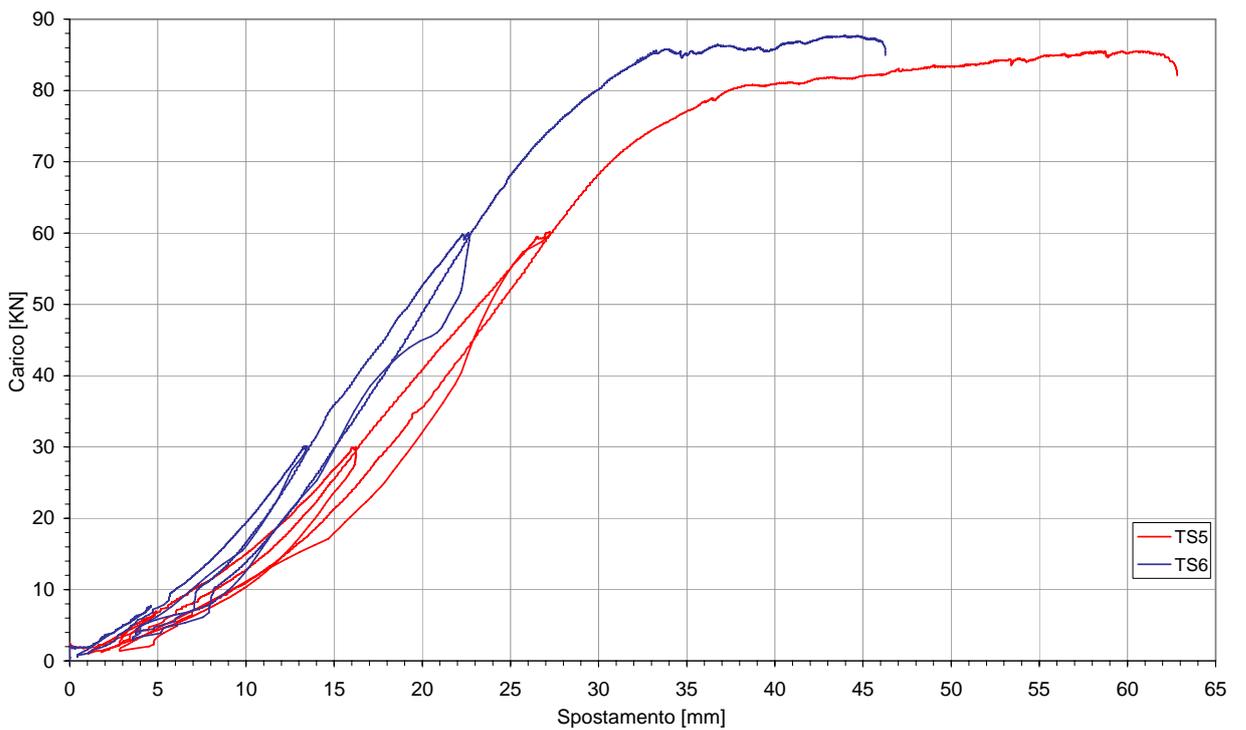


Grafico 5.30: freccia assoluta

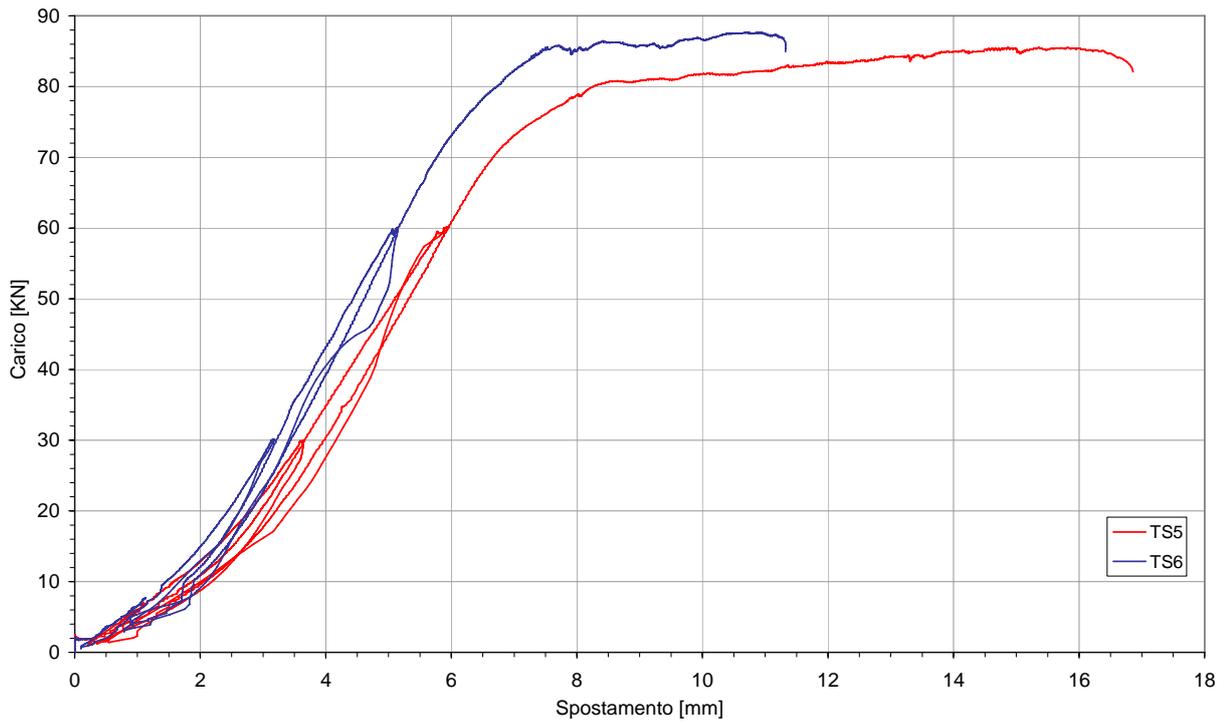


Grafico 5.31: freccia relativa

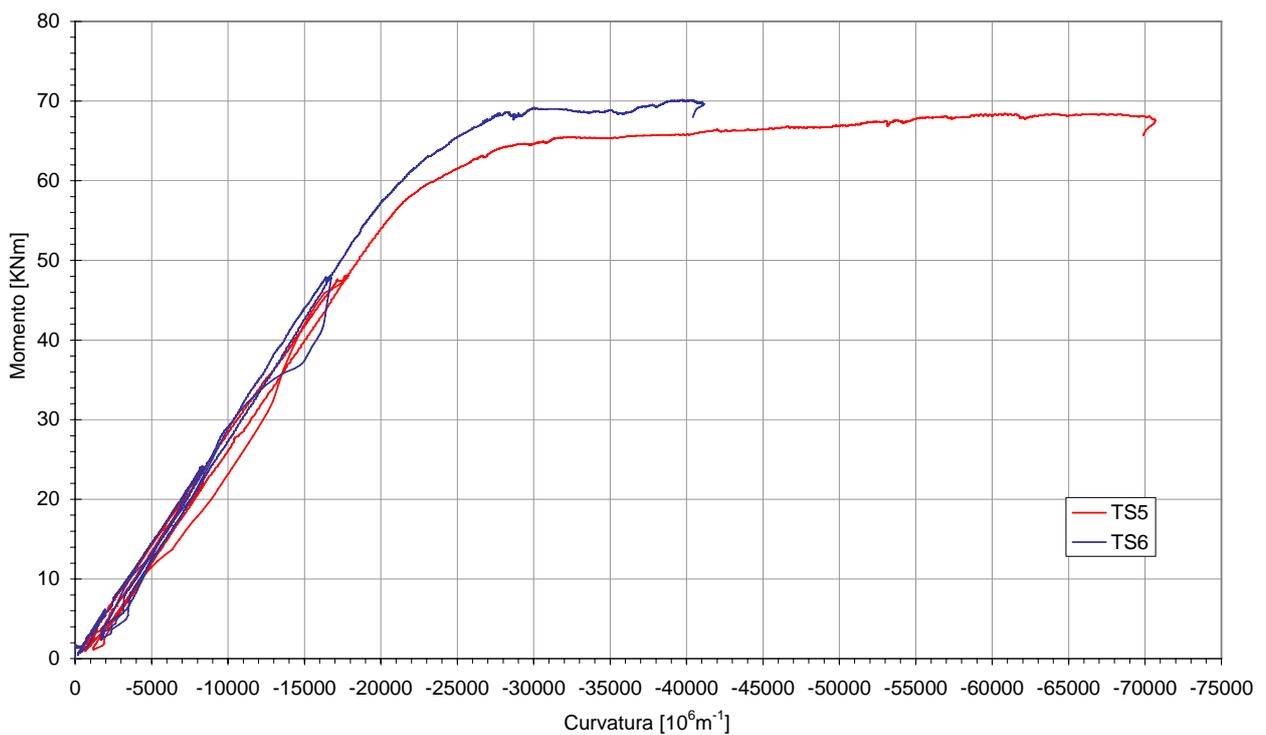


Grafico 5.32: diagramma momento-curvatura

### 5.7.1 Valutazione dello stadio I e II e del Tension Stiffening

Nei grafici 5.33 ÷ 5.35 oltre alla curva sperimentale definita attraverso la prova di rottura, vengono riportate tre rette di diversa inclinazione che possono essere considerate come dei riferimenti per la valutazione della variazione della rigidezza flessionale della trave al variare del carico agente su essa.

La retta che presenta la maggiore pendenza è quella che definisce lo “stadio I” che rappresenta il comportamento delle sezioni inflesse in cemento armato per bassi livelli di sollecitazione, quando il comportamento d’entrambi i materiali (acciaio e cls) è ancora elastico e la sezione può essere considerata come completamente reagente.

La retta di “stadio II” rappresenta lo stato in cui, a seguito dei maggiori carichi agenti, è stata ormai raggiunta la resistenza a trazione del calcestruzzo e dunque s’innesca una fessurazione che induce una forte diminuzione della rigidezza flessionale.

La terza retta rappresenta la retta di “stadio II traslato” traslata di una quantità pari al valore della curvatura prodotta dall’effetto uniforme del ritiro che si è sviluppato nel tempo, fino al momento della prova di rottura, quindi rappresenta lo stato della sezione quando è stata raggiunta la resistenza a trazione del calcestruzzo e dunque s’innesca una fessurazione che innesca una diminuzione della rigidezza flessionale.

Nella fase iniziale di caricamento la curva sperimentale risulta essere tangente alla retta di stadio I, al formarsi delle fessure dovrebbe sovrapporsi istantaneamente alla retta di stadio II; questo in realtà avviene progressivamente e la distanza orizzontale tra curva sperimentale e quella di stadio II rappresenta l’irrigidimento ancora offerto dai conci di calcestruzzo teso tra una fessura e l’altra; tale valore prende il nome di *tension stiffening*.

Per il tracciamento delle tre rette è stato necessario ricavare la rigidezza della trave, che rappresenta il coefficiente angolare di tali rette. Nella formula della rigidezza per lo stadio I si è inserito il valore del momento d’inerzia omogeneizzato della sezione interamente reagente, mentre per lo stadio II si è inserito il valore del momento d’inerzia omogeneizzato della sezione parzializzata, ed infine per la terza retta che rappresenta il “stadio II traslato” è stato necessario ricavare la curvatura per effetto del ritiro uniforme del calcestruzzo che viene considerata come contributo della curvatura nello stadio II assieme alla curvatura istantanea e a quella prodotta per effetto della viscosità. Facciamo riferimento, per tale determinazione alle indicazioni contenute nel CEB.

Si calcola ora la rigidezza della trave facendo riferimento allo schema statico riportato in figura 5.46 e utilizzando l’equazione della linea elastica. Si ricorda che per rigidezza s’intende quel valore della forza che induce lo spostamento unitario.

$$0 < z < a \quad M(z) = P \cdot z$$

$$a < z < L \quad M(z) = P \cdot a$$

Equazione della linea elastica:

$$\begin{cases} \frac{d^2 v_1}{dz^2} = -\frac{P \cdot z}{EI} & 0 < z < a \\ \frac{d^2 v_2}{dz^2} = -\frac{P \cdot a}{EI} & a < z < L \end{cases}$$

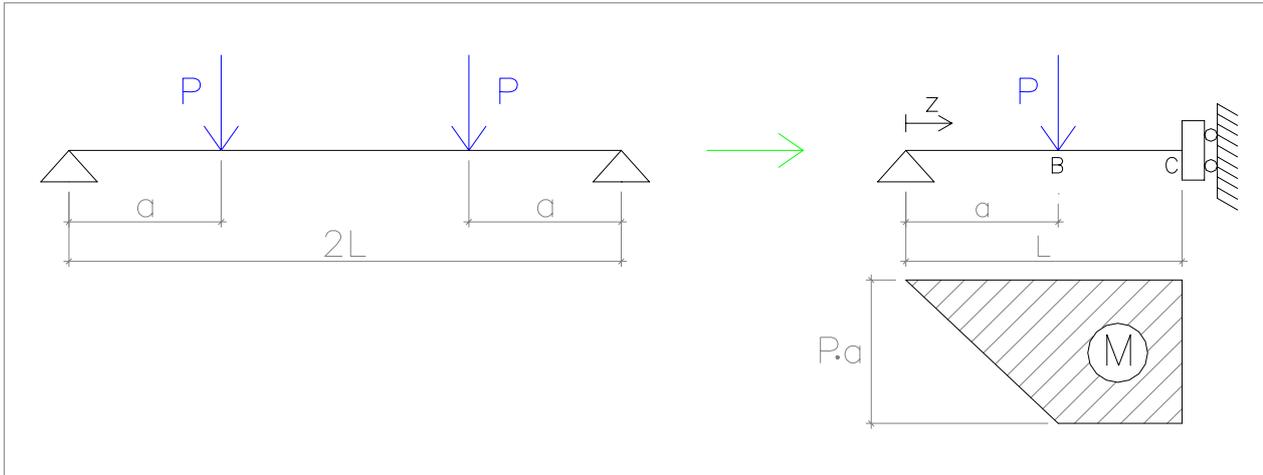


Figura 5-46: schema statico

Con successive integrazioni si ottiene:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dz} = -\frac{P \cdot z^2}{2EI} + C_1 \Rightarrow v_1 = -\frac{P}{6EI} \cdot z^3 + C_1 \cdot z + C_2 \\ \frac{dv_2}{dz} = -\frac{P \cdot a \cdot z}{EI} + C_3 \Rightarrow v_2 = -\frac{P \cdot a}{2EI} \cdot z^2 + C_3 \cdot z + C_4 \end{cases}$$

Condizioni ai limiti:

$$\begin{cases} v_1(z=0) = 0 \\ \left(\frac{dv_2}{dz}\right)(z=L) = 0 \end{cases}$$

Dalle condizioni ai limiti si ottiene:

$$C_2 = 0 \quad \text{e} \quad C_3 = P \cdot a \cdot L / EI$$

Condizioni di continuità:

$$\begin{cases} v_1(z=a) = v_2(z=a) \\ \left(\frac{dv_1}{dz}\right)(z=a) = \left(\frac{dv_2}{dz}\right)(z=a) \end{cases}$$

Dalle condizioni di continuità e considerando i valori di  $C_2$  e  $C_3$  prima trovati si ha:

$$C_1 = \frac{P \cdot a}{EI} \cdot \left( L - \frac{a}{2} \right) \quad C_4 = -\frac{P \cdot a^3}{6EI}$$

Noto il valore delle quattro costanti è ora possibile esprimere il valore dello spostamento verticale assoluto in corrispondenza della mezzeria della trave:

$$v_C = v_2(z = L) = \frac{P \cdot a}{2EI} \cdot \left( L^2 - \frac{a^2}{3} \right)$$

Dunque la rigidezza cercata è pari a:

$$U_C = \frac{2EI}{a} \cdot \left( L^2 - \frac{a^2}{3} \right)$$

Il valore dello spostamento verticale della mezzeria della trave rispetto alla sezione d'applicazione del carico è pari a:

$$v_B = v_2(z = a) = \frac{P \cdot a^2}{EI} \cdot \left( L - \frac{2}{3}a \right) \quad \text{spostamento verticale assoluto della sezione B}$$

$$v_{C,rel} = v_C - v_B = \frac{P \cdot a}{2EI} \cdot (L^2 + a^2 - 2aL)$$

Dunque la rigidezza cercata è pari a:

$$U_{C,rel} = \frac{2EI}{a} \cdot (L^2 + a^2 - 2aL)$$

Note le dimensioni caratteristiche della trave (figura 5.46 e 5.47):

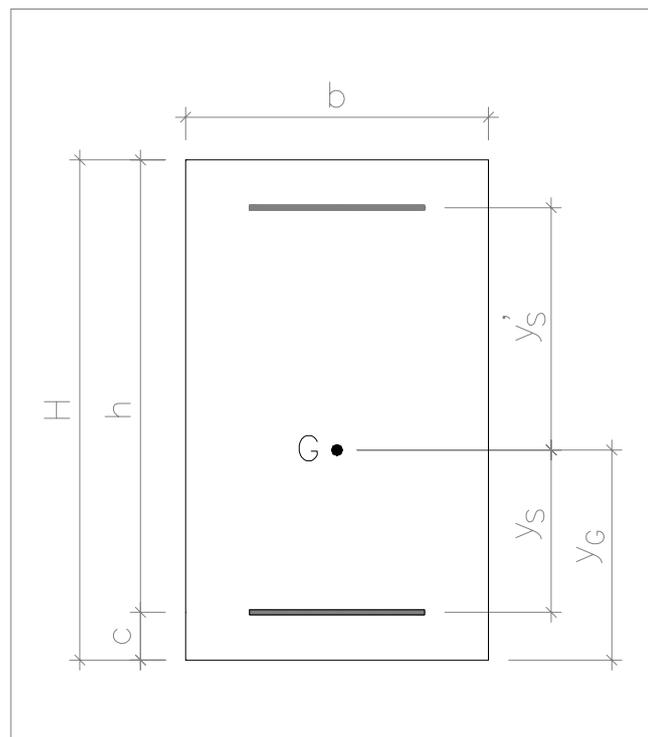


Figura 5-47: sezione della trave

$$a = 80 \text{ cm}$$

$$L = 150 \text{ cm}$$

$$b = 15 \text{ cm}$$

$$H = 25 \text{ cm}$$

$$c = 3.5 \text{ cm}$$

$$A_s' = 2\emptyset 10 = 1.57 \text{ cm}^2 \text{ tipo di acciaio FEB44K}$$

$$A_s = 3\emptyset 16 = 6.03 \text{ cm}^2 \text{ tipo di acciaio FEB44K}$$

$$E_s = 206000 \text{ N/mm}^2 \text{ modulo elastico dell'acciaio}$$

$$E_c = 35000 \text{ N/mm}^2 \text{ modulo elastico del calcestruzzo posseduto osservato dalle prove}$$

svolte su provini cilindrici di SCC (Miscela A)

$$n = E_s / E_c = 5.98 \text{ coefficiente d'omogeneizzazione}$$

Si ottiene la posizione del baricentro della sezione interamente reagente omogeneizzata al calcestruzzo:

$$y_G = \frac{S_{ci}}{A_{ci}} = \frac{\frac{H^2 \cdot b}{2} + n \cdot A_s \cdot c + n \cdot A_s' \cdot (H - c)}{H \cdot b + n \cdot (A_s + A_s')} = 11.94 \text{ cm}$$

$$y_s = y_G - c = 8.24 \text{ cm}$$

$$y'_s = H - c - y_G = 8.86 \text{ cm}$$

Il valore del momento d'inerzia della sezione interamente reagente omogeneizzata è pari a:

$$I_{ci} = \frac{H^3 \cdot b}{12} + H \cdot b \cdot \left( \frac{H}{2} - y_G \right)^2 + n \cdot A_s \cdot y_s^2 + n \cdot A_s' \cdot y_s'^2 = 22784 \text{ cm}^4$$

Si calcola il momento d'inerzia della sezione parzializzata (riferimento figura 5.347):

$$(x^2 \cdot b / 2) + n \cdot A_s' \cdot (x - c) - n \cdot A_s \cdot (H - c - x) = 0$$

Sostituendo si ottiene:  $x = 7.75 \text{ cm}$  distanza dell'asse neutro dal bordo compresso della sezione

$$I_{c2} = \frac{b \cdot x^3}{3} + n \cdot A_s' \cdot (x - c)^2 + n \cdot A_s \cdot (h - x)^2 = 8960 \text{ cm}^4$$

Facendo le dovute sostituzioni si ottiene:

STADIO I

$$U_C = 97.87 \text{ KN/cm}$$

$$U_{C,rel} = 406.86 \text{ KN/cm}$$

STADIO II

$$U_C = 38.49 \text{ KN/cm}$$

$$U_{C,rel} = 160.00 \text{ KN/cm}$$

Il valore della curvatura per effetto del ritiro uniforme è data dalla seguente espressione:

$$\frac{1}{r_{2cs}} = \kappa_{cs2} \cdot \frac{|\varepsilon_{cs}|}{d}$$

$\kappa_{cs2} = 0.98$  coefficiente preso dalle tabelle del CEB (figura 5.48)

$\varepsilon_{cs} = 0.000456$  deformazione da ritiro sviluppata nei giorni tra il getto del cls e il giorno del caricamento della trave

$d = 0.215$  m distanza tra armatura tesa inferiore e il lembo superiore compresso

Per la determinazione del coefficiente  $\kappa_{cs2}$  si sono dovuti calcolare alcuni rapporti dipendenti dalle condizioni geometriche della sezione della trave:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c} = 9.47 \quad \rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.011 \quad \rho' = \frac{A'_s}{b \cdot d} = 0.0029$$

$E_s = 206000$  N/mm<sup>2</sup> modulo di elasticità dell'acciaio

$E_c = 21759$  N/mm<sup>2</sup> primo modulo di elasticità del cls disponibile (2.98 giorni dal getto)

$A_s = 6.03$  cm<sup>2</sup> area acciaio teso

$A'_s = 1.57$  cm<sup>2</sup> area acciaio compresso

$b = 15$  cm larghezza della sezione

$d = 21.5$  cm altezza meno copri ferro della sezione

da questi valori determiniamo i rapporti:

$$\frac{\rho'}{\rho} = 0.264 \quad \alpha \cdot \rho = 0.104 \quad \rightarrow \quad \kappa_{cs2} = 0.98$$

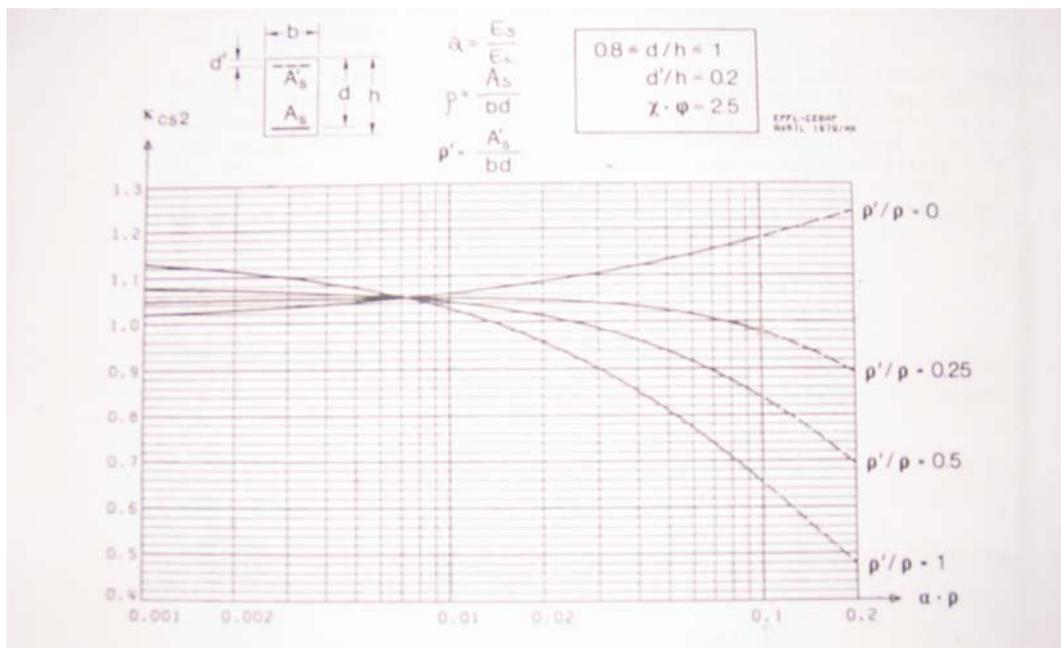


Figura 5-48: sezione della trave

Sono di seguito riportati i diagrammi ottenuti dall'elaborazione dei dati strumentali. In questo caso, rispetto ai diagrammi precedenti, sono stati eliminati i vari cicli di carico che hanno caratterizzato la prova così da facilitare la lettura del diagramma.

Nei diagrammi sono rappresentate le curve sperimentali della curvatura in funzione del momento, quella della freccia relativa in funzione del carico ed infine vengono riportate le rette di "stadio I", "stadio II" e "stadio II traslato".

Nei grafici 5.33 e 5.34 sono riportate le curve che mettono in relazione momento-curvatura rispettivamente per le travi TS5 e TS6. La curvatura è stata determinata andando a valutare le deformazioni a trazione e compressione che si sviluppano in corrispondenza del concio di trave monitorato attraverso gli strumenti (gli estensimetri nel lembo compresso e gli LVDT in quello teso).

Le deformazioni del lembo teso ( $\varepsilon^+$ ) della trave sono state determinate in tal modo:

$$\varepsilon^+ = \Delta L / L \quad \text{per ottenere le } \mu\text{e si è moltiplicato il valore ottenuto per } 10^6$$

con

L: distanza iniziale delle due sezioni terminali del concio di trave monitorato dall'LVDT (figura 5.49, WA10-3 = 130 mm, WA10-4 = 120 mm per la TS5,

WA10-3 = 120 mm, WA10-4 = 120 per la TS6)

$\Delta L$ : spostamenti orizzontali misurati dall'LVDT nel corso della prova

Le deformazioni del lembo compresso ( $\varepsilon^-$ ) della trave non sono altro che i dati provenienti dagli estensimetri.

Per entrambe le travi, essendo presenti due LVDT e due estensimetri, si sono considerati per valutare le deformazioni del lembo compresso due concii di trave (quello in cui sono presenti l'LVDT WA10-3 e l'estensimetro E1, e quello in cui sono presenti l'LVDT WA10-4 e l'estensimetro E2), poi si è eseguita la media tra valori ottenuti elaborando i dati relativi ai due concii distinti.

La curvatura ( $\chi$ ) è stata calcolata in tal modo:

$$\chi = (\varepsilon^+ + \varepsilon^-) / H \quad H: \text{altezza della trave (25cm)}$$

Il momento è pari a:

$$M = P \cdot a \quad a = 80 \text{ cm}$$



Figura 5-49: sezione della trave

Nei grafici 5.33 e 5.34 si vede come la curva sperimentale TS5 sia inizialmente sovrapposta alla retta di “stadio II” e se ne distacchi per poi tendere alla retta “nuovo stadio” che interseca al raggiungimento di 48 kNm di momento. Per quanto riguarda la curva sperimentale TS6 si vede analogamente una sovrapposizione iniziale alla retta di “stadio II”, con una graduale tendenza alla retta di nuovo stadio che viene intersecata a 59 kNm. La sovrapposizione con la retta di stadio II è giustificata dal fatto che, essendo state sottoposte a carico costante per qualche mese le travi presentano fessurazioni prodotte dall’effetto creep e dal ritiro del calcestruzzo.

La trave TS5 raggiunge valori ultimi di curvatura e freccia relativa maggiori di quelli determinati per la trave TS6. La diversità dei risultati e quindi il comportamento degli elementi studiati non è da attribuire alla modalità di esecuzione della prova o di conservazione delle travi, dato che, sono stati seguiti i medesimi criteri per entrambe le travi.

Nei grafici 5.35 e 5.36 sono riportate le curve carico-freccia relativa rispettivamente per le travi TS5 e TS6. La freccia relativa è stata determinata facendo la differenza tra il valore dello spostamento letto dall’LVDT centrale WA50-C e la media degli spostamenti letti dagli LVDT WA50-1 e WA50-2 posti sotto i punti di applicazione del carico.

La freccia relativa ( $f_{cm}$ ) è stata calcolata in tal modo:

$$f_{cm} = (WA50 - C) - \left[ \frac{(WA50 - 1) + (WA50 - 2)}{2} \right]$$

Entrambe le curve freccia relativa-carico sono state traslate orizzontalmente rispetto all’asse delle ordinate rispettivamente di 1.45 mm e 1.2 mm. Tale operazione cerca di tenere conto dell’eccessiva deformabilità iniziale posseduta dalle travi che è conseguenza della presenza di fessurazioni che, in prima fase di caricamento, si chiudono facendo incrementare il valore dello spostamento verticale delle quantità precedentemente indicate.

In questo modo si sono depurate le curve della freccia relativa delle quantità che sono legate alla fase durante la quale si hanno la chiusura delle fessure e in cui il calcestruzzo compresso non ha ancora cominciato a lavorare.

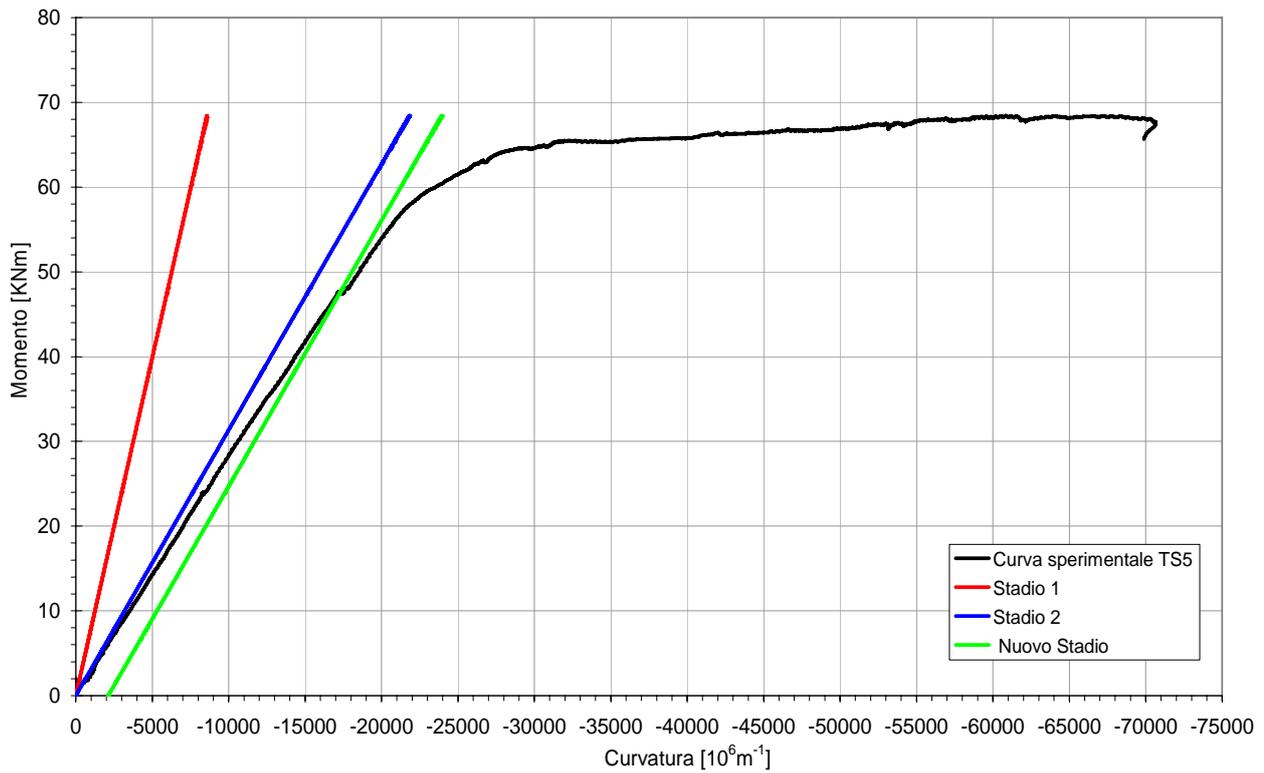


Grafico 5.33: diagramma momento-curvatura trave TS5

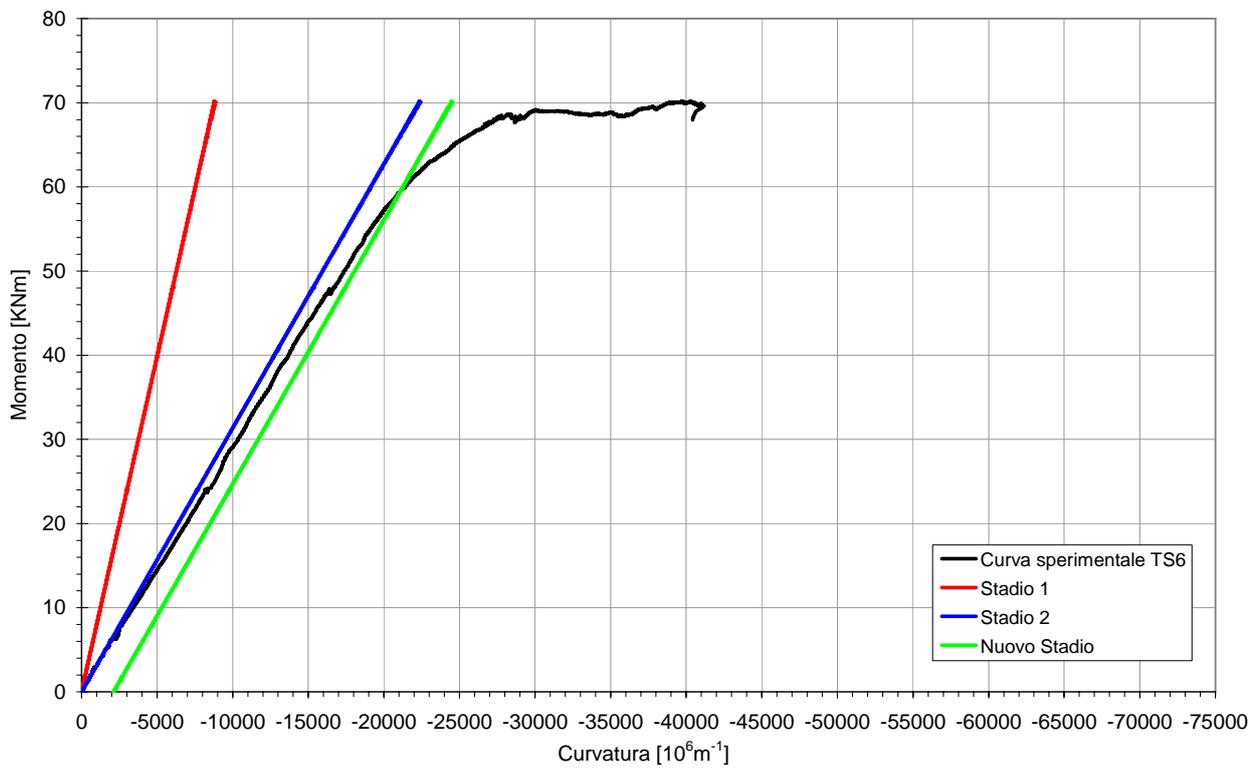


Grafico 5.34: diagramma momento-curvatura trave TS6

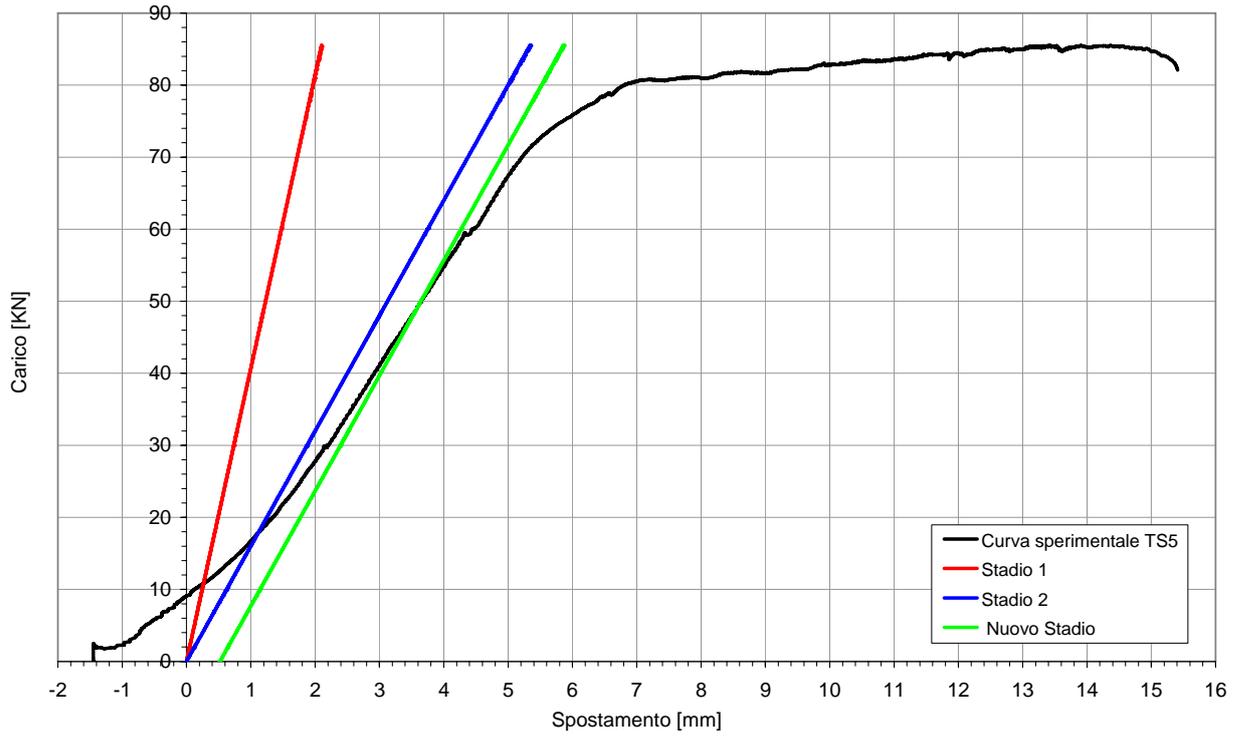


Grafico 5.35: diagramma freccia relativa trave TS5

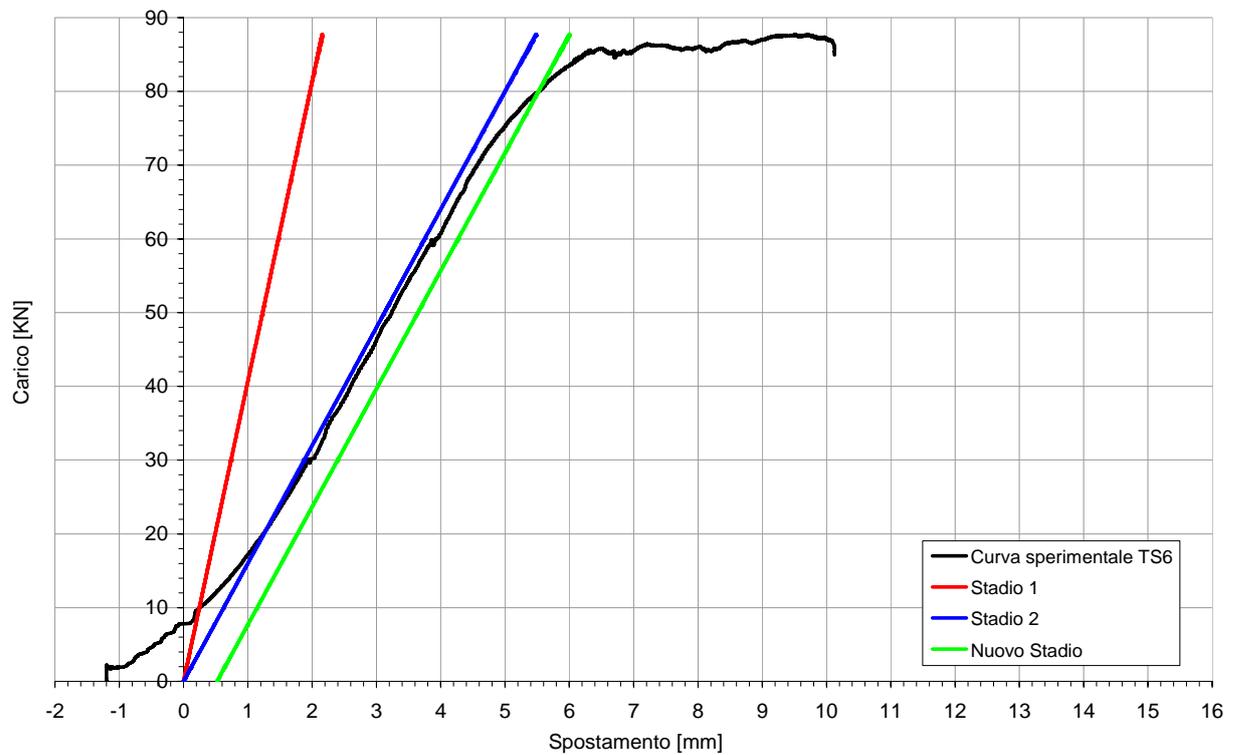


Grafico 5.36: diagramma freccia relativa trave TS6



## 6 Analisi dei risultati

### 6.1 Generalità

I risultati presentati nel capitolo precedente, relativamente al comportamento differito e istantaneo, di travi inflesse in calcestruzzo autocompattante sono nel seguito rielaborati al fine di valutare il diverso comportamento materiale nei casi di creep o di solo ritiro.

Vengono presi in considerazione anche i risultati dalle prove di rottura delle travi TS3 e TS4 avvenute dopo 28 giorni dal getto delle travi stesse. Per meglio rappresentare i risultati si riportano tabelle e grafici rappresentanti frecce assolute e relative, carico di rottura, momento di fessurazione di ogni trave.

### 6.2 Confronto tra i dati relativi alle rotture

Nella tabella 6-1 seguente riportiamo i dati registrati per le varie travi durante le prove di rottura.

	Carico max [KN]	Freccia assoluta [mm]	Freccia relativa [mm]	Deformazione esten. compressa a rottura [ $\mu\epsilon$ ]	Momento di plasticizzazione [KNm]	Curvatura [ $m^{-1}\cdot 10^6$ ]
<b>TS1</b>	85.87	53.61	13.63	3532	67	58500
<b>TS2</b>	85.47	54.31	14.77	3531	68	69000
<b>TS3</b>	86.05	73.43	21.80	3958	65	70500
<b>TS4</b>	88.10	59.98	17.00	3182	67	67000
<b>TS5</b>	85.42	56.89	15.03	5146	65	70500
<b>TS6</b>	86.47	43.65	10.10	2341	69	41000

Tabella 6-1: dati di rottura

Per quanto riguarda le deformazioni estensimetriche, i valori del momento e della curvatura si sono presi in considerazione i valori medi, in quanto i dati relativi ad ogni coppia di strumenti destro e sinistro per ogni trave forniscono risultati diversi.

I grafici riportati in seguito sono stati depurati dei cicli di carico eseguiti durante la prova così da semplificarne la lettura.

Nel grafico 6.1 è riportato l'andamento della freccia assoluta per tutte le travi in funzione del carico e di seguito si elencano le osservazioni.

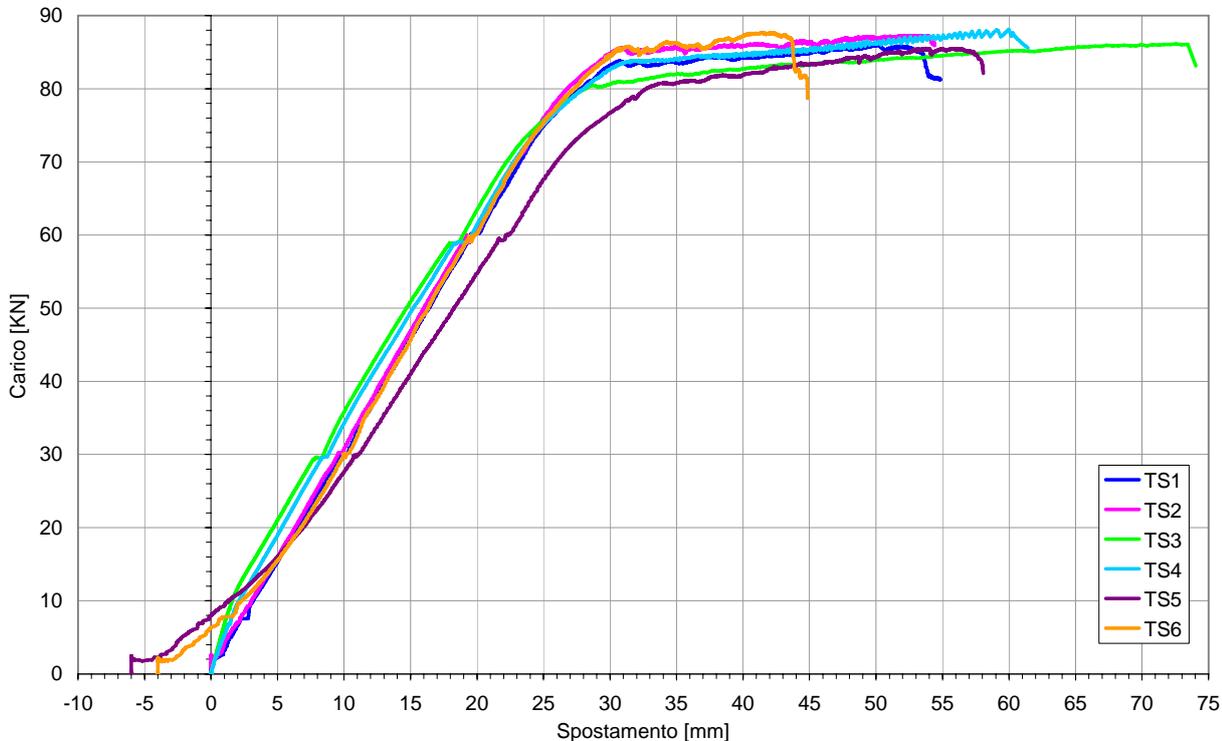


Grafico 6.1: freccia assoluta

#### OSSERVAZIONI:

- 1) Come si può vedere dalle curve TS1-TS2 il comportamento delle travi, che sono le travi che hanno subito solo l'effetto del ritiro, è sostanzialmente analogo.
- 2) Gli spostamenti massimi sono stati raggiunti dalle travi TS3-TS4 che sono state portate a rottura dopo 28 giorni di maturazione.
- 3) Le travi TS5-TS6, pur essendo state sottoposte alla stesso sistema di carico mantenuto costante per circa sedici mesi, presentano comportamento diverso sia in termini di rigidità che di freccia assoluta. La trave TS5 è infatti meno rigida e raggiunge una freccia assoluta massima di circa 57 mm, mentre la trave TS6 raggiunge solo 44 mm. Per tener conto della maggior deformabilità iniziale delle due travi, dovuta ad una prima fase in cui si ha la chiusura delle fessure superiori presenti nelle travi già prima della prova di rottura e a cui corrispondono i diagrammi iniziali di figura 4.30 e figura 4.31 riportati nel capitolo precedente, si sono traslate le curve rispetto all'asse delle ordinate rispettivamente di 6 e 4 mm.

Nel grafico 6.2 è riportato l'andamento della freccia relativa per tutte le travi in funzione del carico e di seguito si elencano le osservazioni.

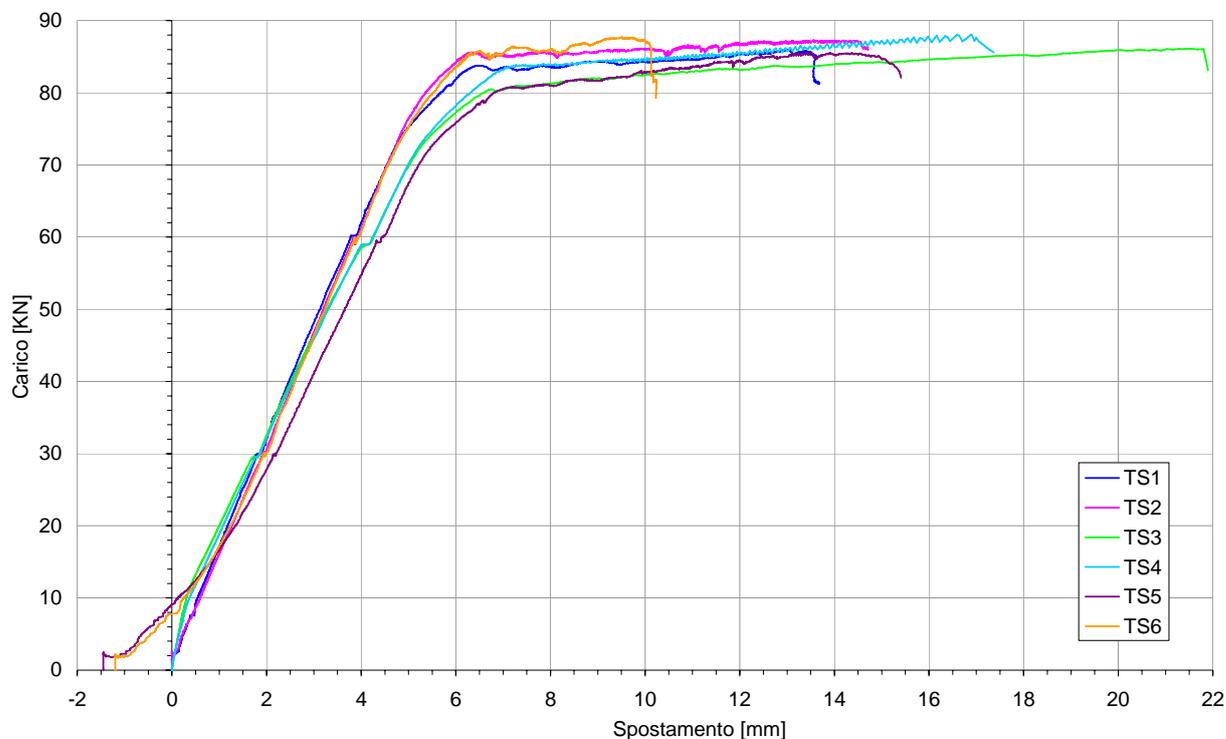


Grafico 6.2: freccia relativa

#### OSSERVAZIONI:

- 1) Come nel precedente le travi TS1 e TS2 mostrano un comportamento simile.
- 2) Le travi TS3-TS4 raggiungono i valori massimi della freccia relativa del sestetto di travi anche se TS4.
- 3) Per le travi TS5 e TS6 si nota come per il grafico precedente che per piccoli valori di carico si hanno grandi deformazioni, tale comportamento è dovuto alla presenza di fessure che si chiudono nella prima fase di caricamento. Per tener conto di questo fattore si è traslato la curva di TS5 rispetto all'asse delle ordinate di 1.45 mm, mentre la trave TS6 di 1.2 mm.

Nel grafico 6.3 sono rappresentate le curve sperimentali ottenute dagli estensimetri posti nella zona di calcestruzzo compresso. Le curve sono ottenute dalla media dei dati rilevati dagli estensimetri E1 ed E2 posizionati su ogni trave.

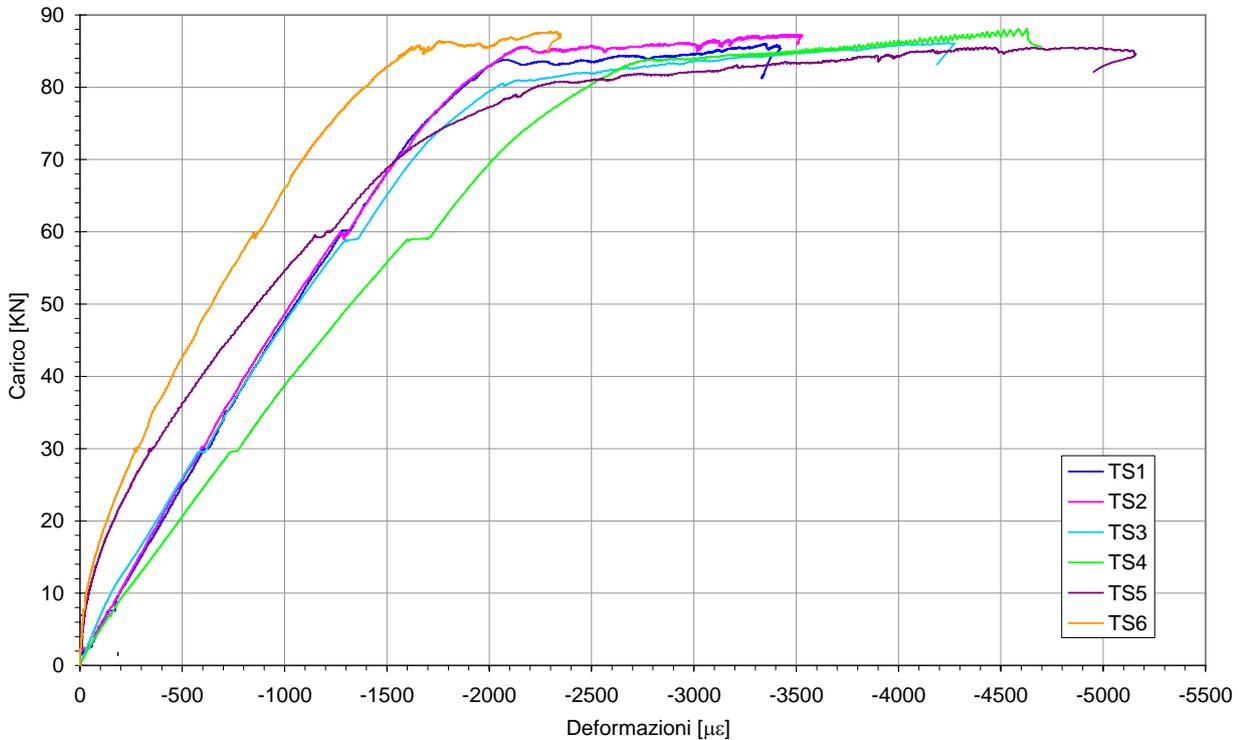


Grafico 6.3: media estensimetri

#### OSSERVAZIONI:

- 1) Le travi TS1-TS2 presentano ancora un comportamento analogo fino a rottura.
- 2) Le travi TS3-TS4 presentano deformazione dei lembi compressi di cls maggiori di quelle delle travi sottoposte a solo ritiro (TS1-TS2).
- 3) Per le travi TS5-TS6, che sono state sottoposte a carico costante per circa sedici mesi e poi a ritiro, si nota un deformazione iniziale quasi nulla che diventa più evidente quando il carico supera i 6 kN. Tale comportamento, è dovuto alla chiusura delle fessure esistenti sulla trave prima di cominciare la prova di rottura, perciò, in un primo momento, fino a quando le fessure non sono chiuse è come se il calcestruzzo non lavori e per questo gli estensimetri non hanno rilevato deformazioni.

Nel grafico 6.4 sono rappresentate le curve sperimentali momento-curvatura delle travi.

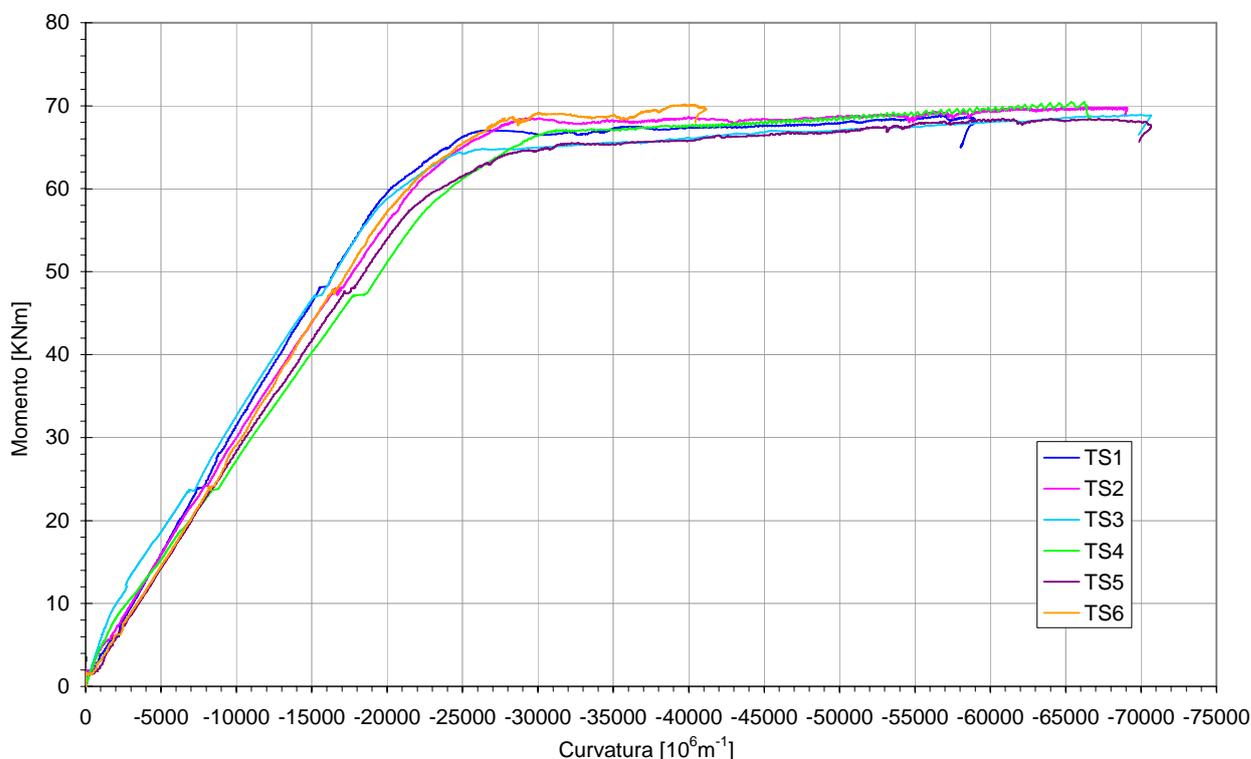


Grafico 6.4: momento-curvatura

#### OSSERVAZIONI:

- 1) Le travi TS1-TS2, presentano un andamento abbastanza simile, il momento di plasticizzazione della TS1 è circa 67 kNm con una curvatura ultima pari a 58500  $\text{m}^{-1} \cdot 10^6$ , mentre per la TS2 si ha un momento pari a 68 kNm e una  $\chi$  ultima di 69000  $\text{m}^{-1} \cdot 10^6$ , che è prossima a quella delle travi TS3 e TS5.
- 2) Le travi TS3-TS4, presentano un andamento abbastanza simile, il momento di plasticizzazione della TS3 è circa 65 kNm con una curvatura ultima pari a 70500  $\text{m}^{-1} \cdot 10^6$ , mentre per la TS4 si ha un momento pari a 67 kNm e una  $\chi$  ultima di 67000  $\text{m}^{-1} \cdot 10^6$ .
- 3) Le travi TS5-TS6, presentano un comportamento diverso, come già si era notato per gli altri grafici. Per la trave TS5 il momento di plasticizzazione raggiunge il valore di 65 kNm con una curvatura ultima pari a 70500  $\text{m}^{-1} \cdot 10^6$ , mentre per la TS6 si ha un momento pari a 69 kNm ed una curvatura ultima di appena 41000  $\text{m}^{-1} \cdot 10^6$ .



## PARTE II

Lo scopo della prova in esame è quello di valutare l'andamento nel tempo delle deformazioni viscosi, la capacità portante costruita in fase successive di una trave in calcestruzzo armato. In particolare durante la prova sono state simulate le prove di montaggio e completamento di una trave prefabbricata prodotta dall'APE di Montecchio Emilia (RE). Tale tecnologia produttiva è utilizzata per la realizzazione di strutture prefabbricate multipiano e prevede quattro fasi: la posa dei pilastri con nodi di attacco trave-pilastro libero, successivamente si posizionano le travi sui pilastri, si posano i solai sulle travi ed infine si esegue un getto di completamento partendo dai solai che completa la trave e riempie i nodi di attacco realizzando un sistema continuo (figure 1÷7.4). La prova è stata condotta fino alla crisi dell'elemento. L'applicazione del carico è avvenuta in tre fasi successive differite nel tempo. Il primo caricamento è avvenuto il 26-09-07 con cui sono stati raggiunti 127 kN che sono equivalenti a tutti i carichi permanenti più il 30% di quelli accidentali, previsti per tale tipo di trave. Dopo 7 giorni dall'inizio della prova è stato eseguito il getto di completamento della trave, realizzato dalla ditta Sapaba di Bologna, mentre la trave continuava ad essere mantenuta sotto carico costante. Il secondo incremento di carico è stato applicato il 30 ottobre, con il quale si sono raggiunti i 177 kN, in questo caso equivalenti a tutti i carichi permanenti e accidentali presunti per la trave. Il carico è stato mantenuto costante fino al giorno della rottura definitiva avvenuta il 16 novembre. Per poter eseguire tale prova si è utilizzata una strumentazione in parte simile a quella descritta nel capitolo 3 ed in parte nuova che sarà descritta nei paragrafi successivi di questo capitolo. In particolare è bene sottolineare che, al fine di una buona rilevazione che consentisse di sviluppare un'analisi sezionale della trave gli strumenti sono stati applicati in più fasi in modo da avere dati deformativi sull'armatura che fin dall'inizio della prova è stata immersa nel getto prefabbricato, dati deformativi sul calcestruzzo prefabbricato ed infine di quello gettato successivamente.

Parallelamente a tale prova sulla trave sono state eseguite prove di creep e ritiro sui cilindri di entrambi i calcestruzzi costituenti la trave. L'inizio delle suddette prove è corrispondente all'inizio della prova di carico per i cilindri di cls prefabbricato, mentre per quelli relativi al getto di completamento sono state iniziate immediatamente dopo l'indurimento del cls.

Oltre alle suddette prove ne sono state eseguite altre allo scopo di valutare l'evoluzione della resistenza e del modulo elastico di entrambi i cls.



Figura 1: posizionamento pilastri con nodo di attacco trave-pilastro libero



Figura 2: travi prefabbricate appoggiate sui pilastri



Figura 3: posa dei solai sulle travi prefabbricate

## 7 Strumentazione

### 7.1 Gli estensimetri da calcestruzzo

Sono stati utilizzati estensimetri o *strain gauge* per la misurazione delle deformazioni locali della superficie del corpo in calcestruzzo. Per la descrizione e il principio di funzionamento si rimanda al paragrafo 3.1.

#### **Collegamenti degli estensimetri nelle prove in esame**

Nelle prove di ritiro e creep svolte sui provini cilindrici si è utilizzato un collegamento detto ‘half bridge’ (mezzo ponte) (figura 7.2); esso consiste nel mettere due estensimetri in serie (ognuno di 120  $\Omega$  di resistenza) nello stesso ramo del ponte, nell’inserire due resistenze da 120  $\Omega$  nel ramo seguente e nel “chiudere” il ponte collegando il tutto al sistema d’acquisizione (figura 7.1). I due estensimetri sono disposti in posizioni diametralmente opposte come mostrato in figura 7.3; dopo essere stati incollati sul cilindro vengono uniti al cavo di collegamento mediante stagnatura. Per valutare le deformazioni è necessario collegare il connettore ad opportune apparecchiature (se ne parlerà in seguito).

Nella prove di rottura e di creep svolta sulla trave si è utilizzato un collegamento a quarto di ponte (figura 7.4); esso consiste nel mettere un estensimetro (di 120  $\Omega$  di resistenza) in un ramo del ponte e nel “chiudere” quest’ultimo collegando il tutto al sistema d’acquisizione.

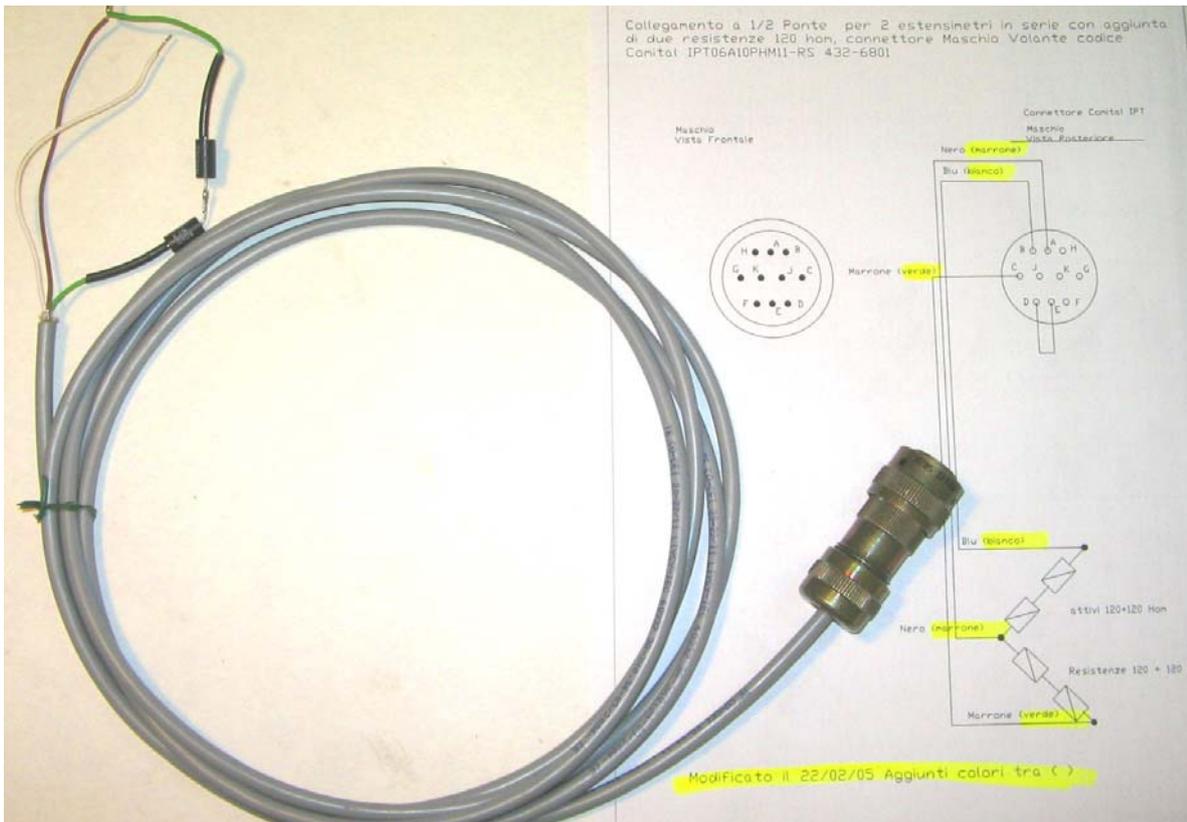


Figura 7.1: cavo di collegamento degli estensimetri con annesso connettore Comital

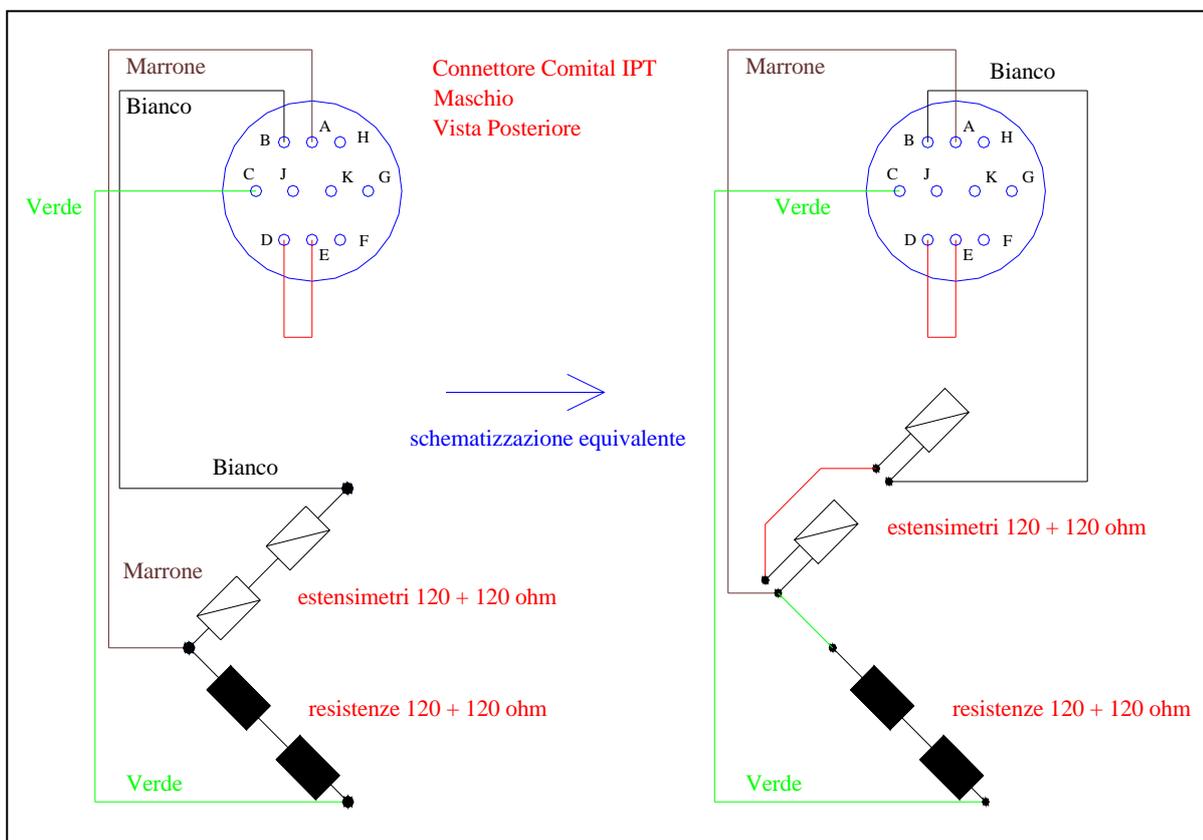


Figura 7.2: schema del collegamento a 'half bridge'

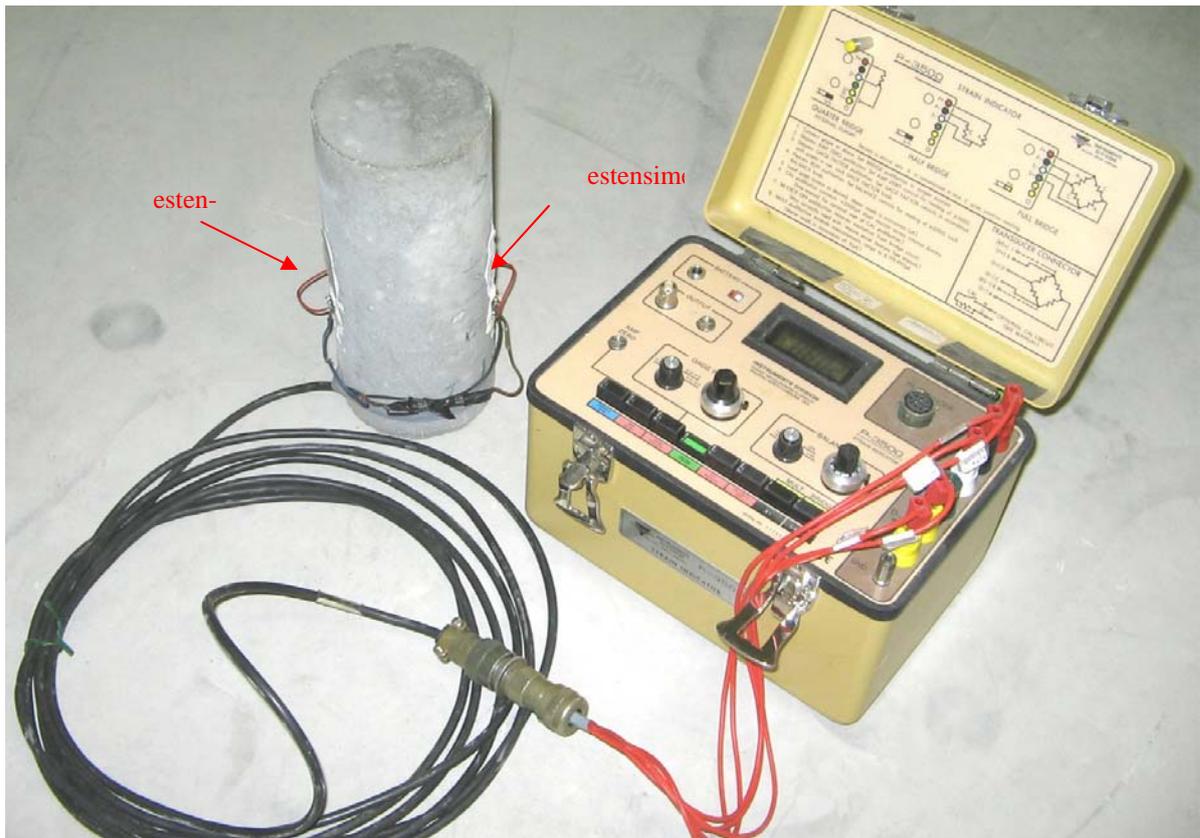


Figura 7.3: lettura manuale delle deformazioni mediante l'apparecchiatura P3500

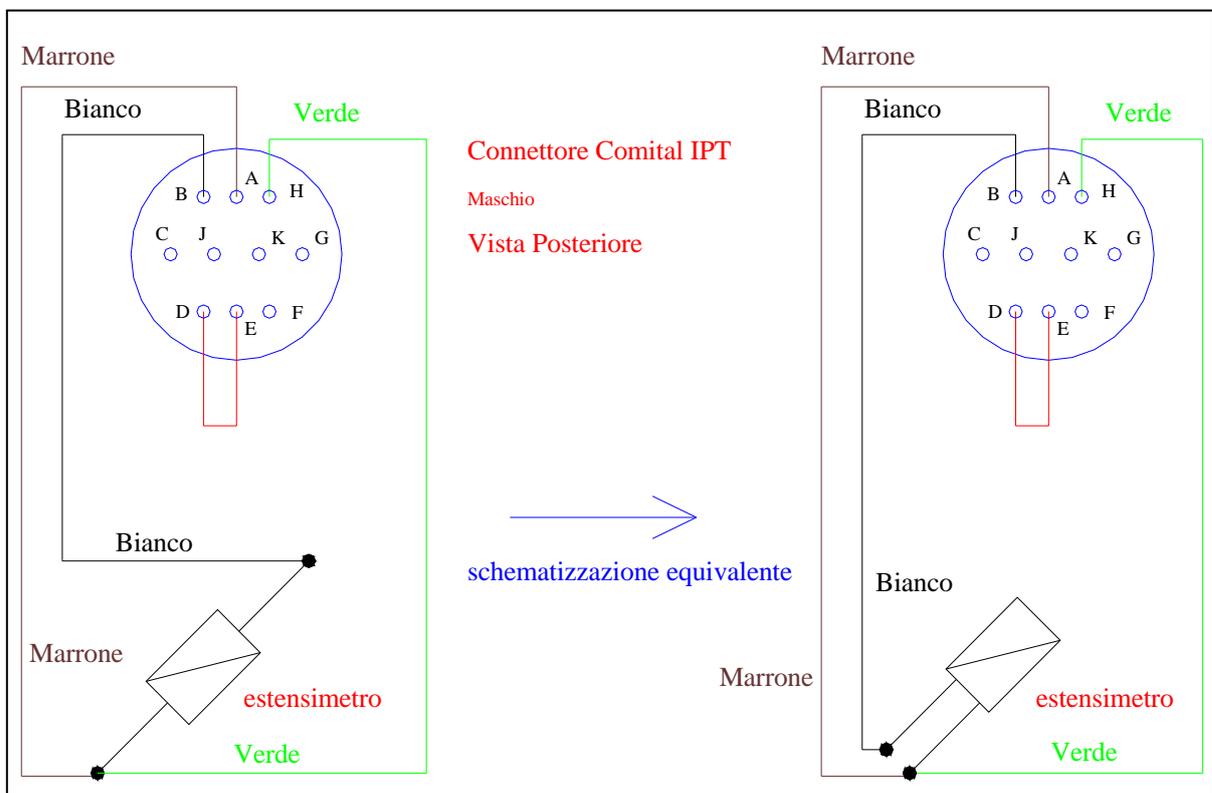


Figura 7.4: schema del collegamento a quarto di ponte

### Fasi del collegamento degli estensimetri alle superfici oggetto di misura

Sono stati posizionati diversi estensimetri sul calcestruzzo, all'estradosso della trave prefabbricata gettata in opera. In seguito al getto di completamento della trave questi risultavano immersi nel calcestruzzo, ovvero posizionati sulla superficie di contatto tra i due calcestruzzi che costituiscono la trave. Per quanto riguarda la modalità di applicazione su superfici libere e di collegamento in tali condizioni si rimanda al paragrafo 3.1.

Per proteggere gli estensimetri e garantirne il funzionamento anche nella seconda fase di prova si sono eseguite una serie di operazioni, elencate di seguito:

1. *Posizionamento dell'estensimetro* sul cls secondo la procedura già descritta (fig. 7.5).
2. Si ricopre con uno strato di *isolante trasparente* per isolare dall'umidità (fig.7.5)
3. Si dispone uno *strato di mastice* che ha la funzione di proteggere dagli urti e isolare dall'umidità con plastilina (fig. 7.6).
4. *Predisposizione di una fascetta di neoprene* per proteggere lo strumento da eventuali urti a cui potrebbe essere soggetto durante il getto di completamento (fig. 7.7).
5. *Fissaggio e protezione* con foglio di alluminio adesivo (fig. 7.8).



Figura 7.5: estensimetro incollato sulla superficie di calcestruzzo prefabbricato



Figura 7.6: estensimetro ricoperto con plastilina



Figura 7.7: estensimetro ricoperto con foglio gommato di neoprene

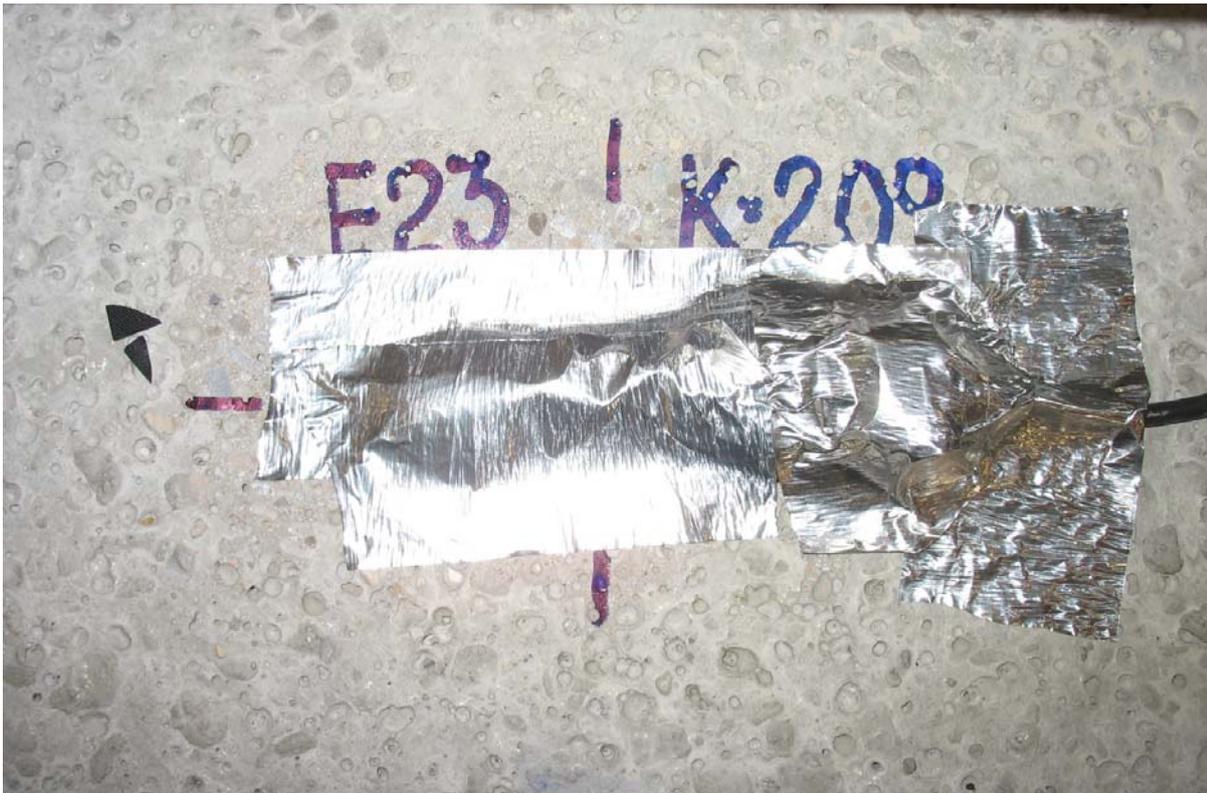


Figura 7.8: estensimetro ricoperto con alluminio adesivo

## 7.2 Gli estensimetri da acciaio

Un estensimetro o *strain gauge* è uno strumento in grado di misurare la deformazione locale della superficie di un corpo al quale viene applicato (figura 7.9). Si tratta di particolari trasduttori che si basano sull'effetto piezoresistivo, ossia la proprietà dei materiali di variare la propria resistenza elettrica con la deformazione. Col termine trasduttori si è soliti indicare quei componenti che trasformano un segnale d'ingresso da misurare (in tal caso la deformazione) in un segnale elettrico; questa trasformazione è in genere conveniente in quanto le grandezze elettriche sono molto più comode da maneggiare, sia per quanto concerne la loro amplificazione che per quanto riguarda la loro misura.

Gli estensimetri più comuni sono metallici, costituiti da un sottilissimo filo conduttore disposto come mostrato nella figura seguente e tenuto in posizione da un sottile strato di resina (supporto); sono realizzati con leghe come, ad esempio, manganina (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni) o costantana (60% Cu, 40% Ni). Possono avere lunghezze che vanno da 5 mm a 10÷15 cm a seconda del tipo di materiale sul quale vengono applicati; generalmente sono incollati sull'acciaio o su lamine in fibre di carbonio, essendo materiali molto omogenei, si utilizzano estensimetri con lunghezze alquanto ridotte.

Per quanto riguarda il principio di funzionamento si rimanda al paragrafo 3.1.



Figura 7.9: estensimetro per barre di acciaio

### **Collegamenti degli estensimetri nelle prove in esame**

Nella prova di rottura e di creep svolta sulla trave, sono stati posizionati diversi estensimetri sulle barre di armatura. In particolare si è utilizzato un collegamento a quarto di ponte per gli estensimetri posizionati su barre longitudinali, mentre per quelli sul traliccio si è adottato un collegamento detto 'half bridge' (doppio quarto di ponte); (figura 7.2)

### **Fasi del collegamento degli estensimetri alle superfici oggetto di misura**

Si è fatto riferimento a quanto esposto nel BOLLETTINO TECNICO Cod. B-129-ITR e v. 2 del 07/05/99. Nelle figure 3.12÷3.15 sono rappresentate alcune delle seguenti fasi.

1. *Preparazione della superficie*, prevede una serie di fasi quali: sgrassare, carteggiare a secco con carta vetrata, carteggiare con condizionatore ed asciugare con una garza (fig 7.10).
2. *Tracciare le linee di riferimento* (fig 7.11).
3. *Usare il neutralizzatore* e asciugare con una garza la superficie ricordando di non strofinare avanti indietro, in quanto questo potrebbe contaminare la superficie.
4. *Posizionare l'estensimetro* secondo i riferimenti precedentemente individuati dopo averlo fissato su di uno strato di nastro adesivo (fig 7.12, 7.13).
5. *Applicare uno strato di catalizzatore* sul retro dell'estensimetro e della basetta in modo uniforme e pellicolare.
6. *Imprimere con garza una leggera pressione* per circa un minuto così da favorire l'incollaggio.
7. *Aspettare qualche secondo e sollevare* il nastro adesivo.
8. *Realizzazione dei collegamenti* tra i terminali dell'estensimetro e i cavi mediante stagnatura (fig 7.14).

Dato che tali estensimetri sono poi stati ricoperti dal getto, si è proceduto a realizzare uno strato protettivo nei confronti di urti e umidità.

9. *Applicazione dell'isolante trasparente* per isolare dall'umidità (fig 7.15).
10. *Si applica lo strato di mastice* che protegge da umidità e urti (fig 7.16).
11. *Si dispone un foglio di neoprene* come protettivo dagli urti (fig 7.17).
12. *Fissaggio del complesso protettivo* con un foglio di alluminio adesivo (fig 7.18).

Si sono riportate di segue una serie di foto rappresentative delle fasi descritte nell'elenco soprastante.



Figura 7.10: preparazione superficie



Figura 7.11: tracciatura e superficie pronta all'incollaggio



Figura 7.12: posizionamento dell'estensimetro con pinze



Figura 7.13: avvicinamento dei terminali con ausilio di pinze



Figura 7.14: collegamento dei terminali mediante stagnatura

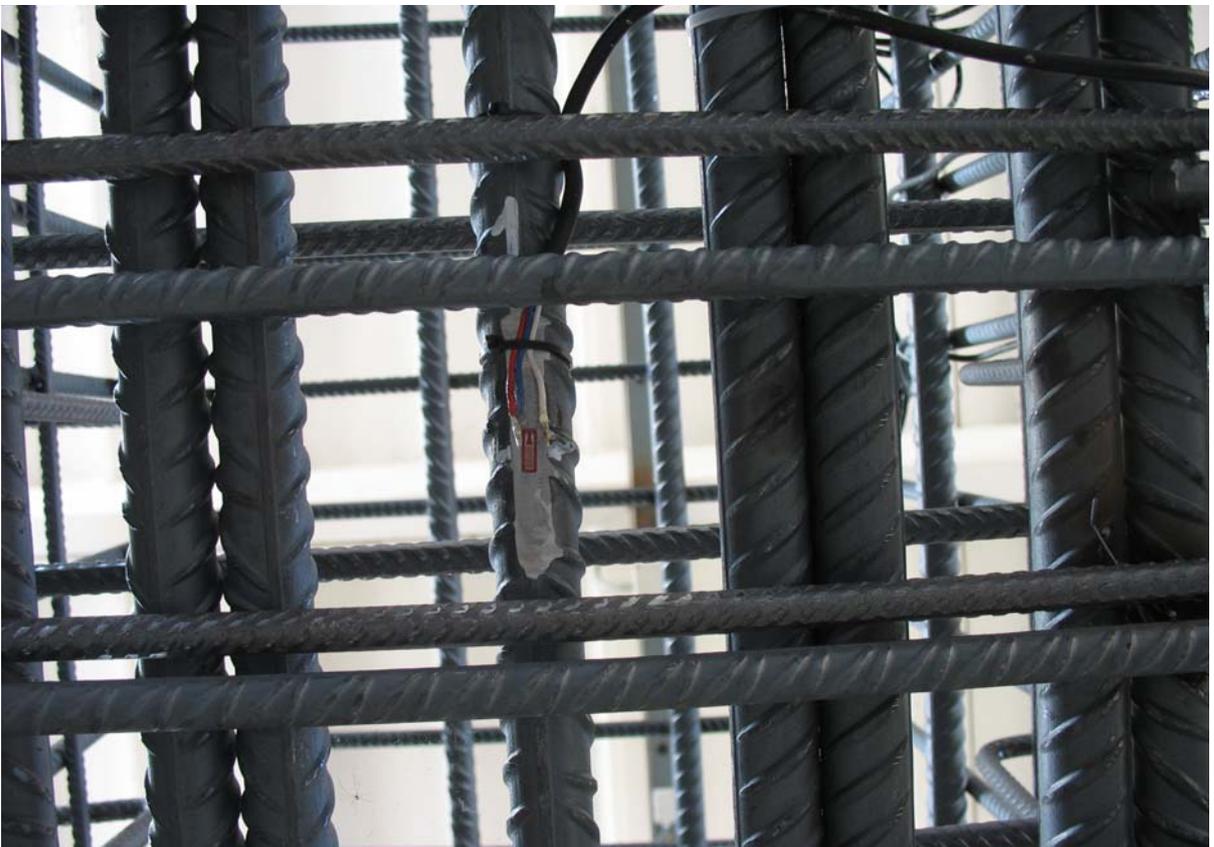


Figura 7.15: fissaggio dei cavi con fascetta e isolante trasparente



Figura 7.16: applicazione di uno strato di mastice

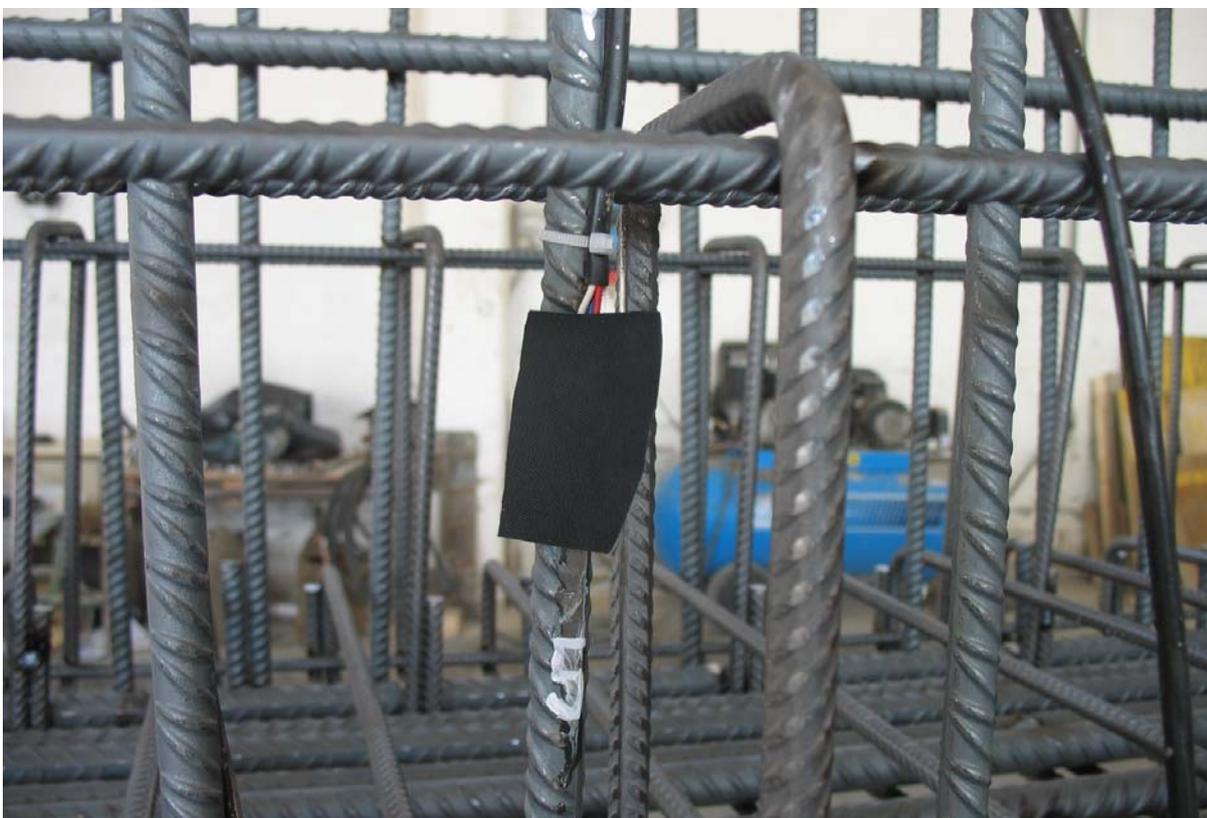


Figura 7.17: disposizione di un foglio gommato di neoprene



Figura 7.18: disposizione di un foglio di alluminio adesivo

### 7.3 Misura del carico e modalità applicativa

I trasduttori di pressione sono strumenti in grado di misurare la forza di compressione che applico ad un generico corpo. Nel caso delle prove effettuate in laboratorio il loro utilizzo si è reso indispensabile per poter costantemente monitorare il carico a cui era sottoposti sia la trave che i cilindri soggetti al fenomeno del creep (figura 7.19). L'obiettivo di tali prove è quello di valutare le deformazioni indotte sugli elementi da uno stato di tensione costante, e poichè nel tempo si sviluppano gli accorciamenti viscosi che provocano un calo del carico agente, proprio attraverso il monitoraggio delle celle di carico si è valutata di tanto in tanto tale riduzione e si è riportato, mediante l'uso di una pompa il carico al valore costante preventivato.

Le celle di carico e i trasduttori di pressione hanno un comportamento di tipo resistivo infatti presentano al loro interno degli estensimetri collegati in modo tale da formare un ponte di Wheatstone intero.



Figura 7.19: pistone di carico

Per avere un adeguato trasferimento del carico alla trave mediante i pistoni si è dimensionato un controtelaio che fungesse da supporto e da base di appoggio per il pistone durante tutta la prova di carico. Tali supporti sono stati realizzati per ogni pistone e le caratteristiche geometriche sono riportate in figura 7.20. Inizialmente, per posizionare il pistone, sono stati predisposti 4 tubi agli spigoli del controtelaio opportunamente incernierate ai tubi saldati al controtelaio di supporto (figura 7.21). Durante la prova questi tubi sono stati eliminati, successivamente il complesso è stato ancorato al solaio rinforzato con fori del laboratorio mediante una coppia di barre Dividag (figura 7.22 e 7.23) opportunamente imbullonate come mostrato in figura 7.24 e 7.25. Il compito di queste ultime era quello di garantire e mantenere la posizione del pistone durante la prova di carico. Come ultimo elemento di fissaggio del pistone sono state predisposti dei cavi di acciaio anche loro impegnati ad impedire lo sbandamento del pistone all'inflexione della trave, quindi con funzione di controvento (figura 7.26).

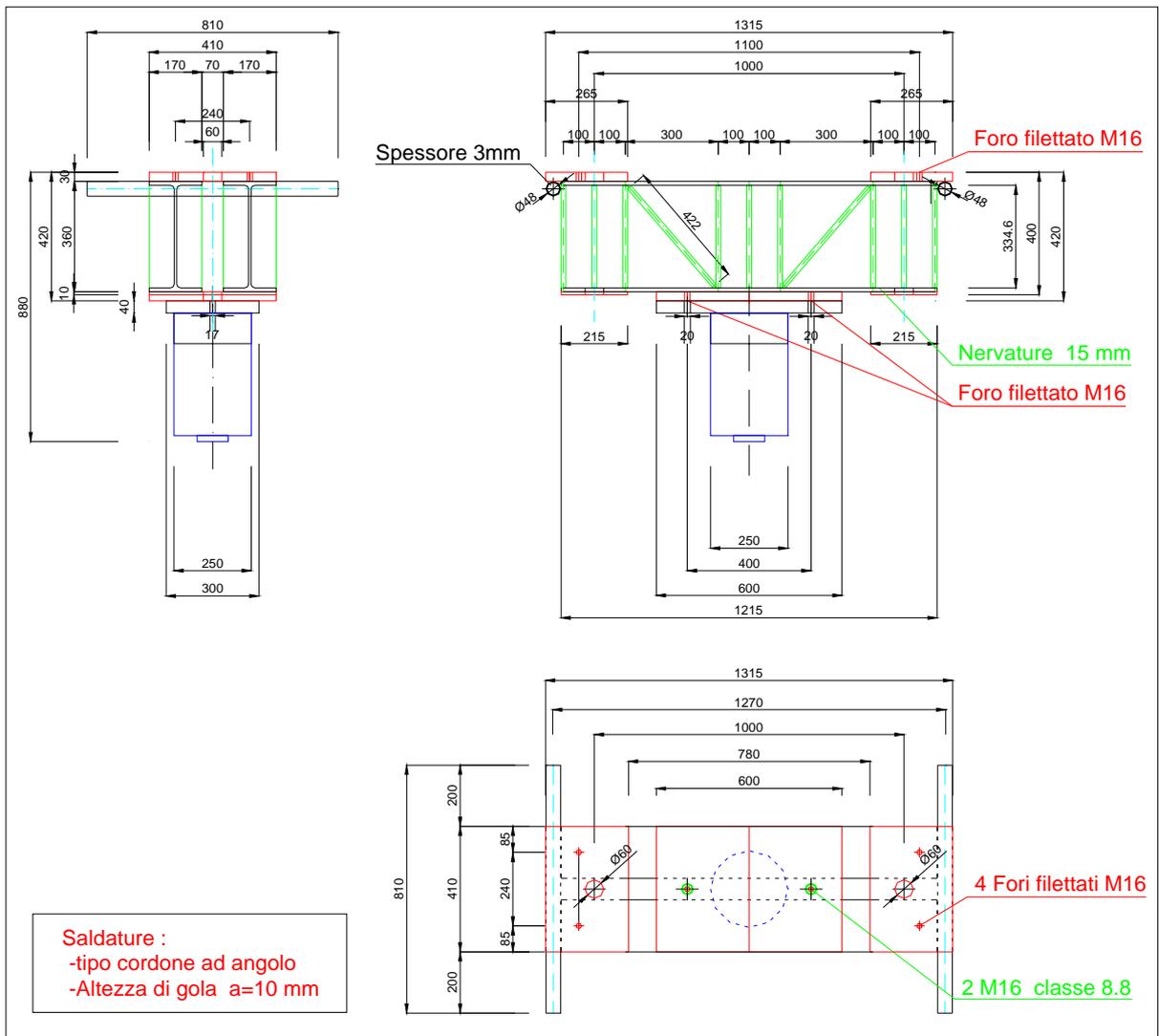


Figura 7.20: schema del controtelaio



Figura 7.21: posa del controtelaio con tubi di supporto



Figura 7.22: inserimento barre dividag



Figura 7.23: inserimento della barra nel foro del solaio rinforzato del laboratorio



Figura 7.24: avvvitamento delle barre dalla parte inferiore del solaio rinforzato



Figura 7.25: avvvitamento delle barre nella parte superiore del controltaio

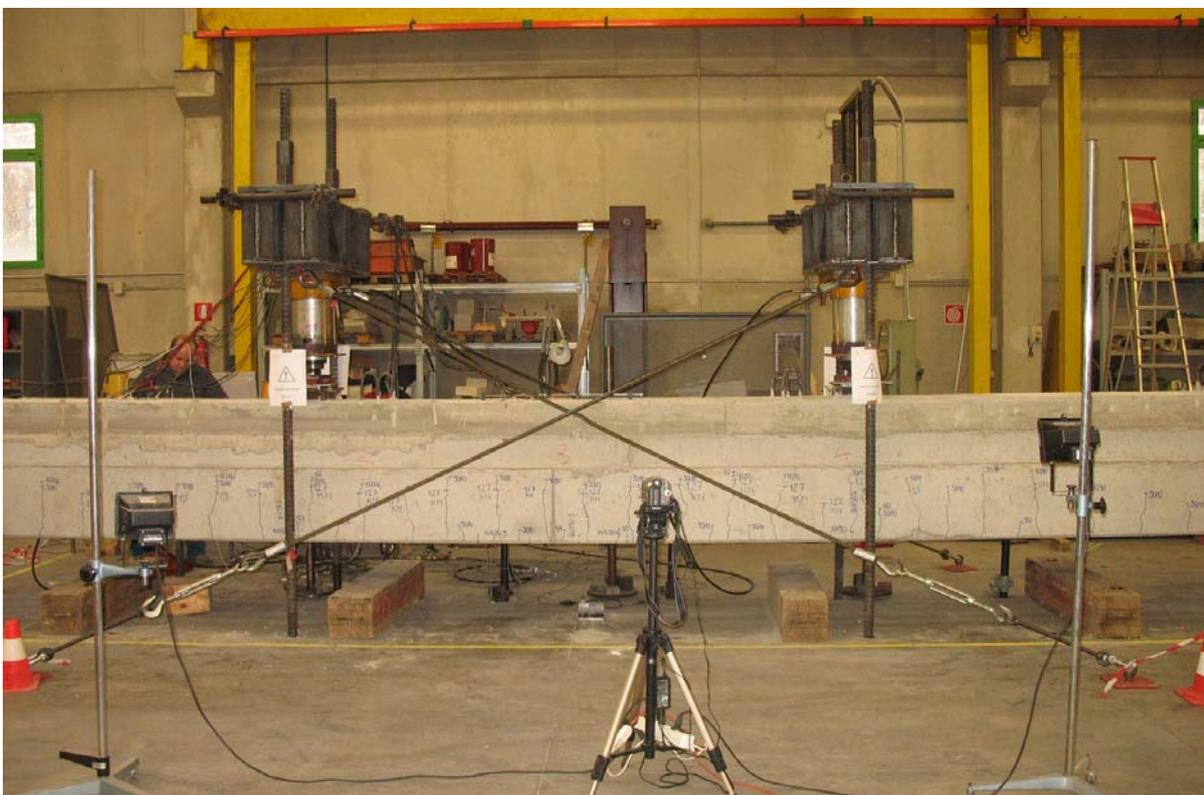


Figura 7.26: avvvitamento delle barre nella parte superiore del controltaio

TARATURA DELLA CATENA DI APPLICAZIONE DELLA FORZA: per il corretto funzionamento del pistone è indispensabile trovare il fattore di conversione tra i Volts e il carico che agisce su di essa. Per eseguire la taratura si è utilizzata una pressa tarata (fig. 7.27), collegata ad un trasduttore di pressione tarato, in modo che il carico applicato fosse noto (fig.7.28 e 7.29). Si sono posizionati i pistoni (uno alla volta) sotto la pressa, si sono eseguiti 3 cicli di carico a vuoto senza registrare nessun valore in ingresso e in uscita, fase in cui si è scaldata la pressa, dopo di che è stato possibile eseguire i 3 cicli di carico durante i quali si sono registrati i segnali relativi alla pressa e al trasduttore di pressione. Dall'elaborazione dei segnali d'uscita si ottiene un grafico lineare. Il coefficiente angolare di tale retta e il coefficiente che ci permette di convertire il segnale elettrico emesso dal pistone in unità fisica.

La costante di conversione per il trasduttore di pressione è: 12829.



Figura 7.27: pressa tarata sulla quale è stato posto il pistone per la taratura



Figura 7.28: trasduttore di pressione dal quale si legge il valore di carico applicato

## 7.4 Gli LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

L'LVDT è un dispositivo in grado di misurare lo spostamento di un punto al quale è collegato. Il fenomeno che sfrutta è l'induzione elettromagnetica e di fatto esso non è nient'altro che un trasformatore a nucleo mobile e, come tale, è in grado di manipolare solamente grandezze elettriche alternate.

Il funzionamento di tale strumento è stato adeguatamente descritto nel paragrafo 3.3 .

Prima di poter utilizzare un simile strumento occorre conoscere la costante di proporzionalità tra la differenza di potenziale [mV] in uscita e lo spostamento registrato dallo strumento, perciò tutti gli strumenti sono stati adeguatamente tarati.

La taratura degli strumenti consiste in pratica nell'assegnare ciclicamente spostamenti noti agli LVDT (tramite lo strumento rappresentato nella figura 7.29) e nel rilevare le differenze di potenziale in uscita; successivamente i dati vengono interpolati ricavando la pendenza e l'intercetta della retta che rappresenta la proporzionalità tra le due grandezze in esame.

Nella prove di rottura sono stati utilizzati complessivamente sette LVDT di cui quattro con una corsa da 20 mm disposti orizzontalmente e i rimanenti con una corsa da  $\pm 50$  mm disposti verticalmente.



Figura 7.29: taratore per LVDT

## 7.5 Sistema di acquisizione

Tutti i vari strumenti, descritti in precedenza, devono essere collegati per mezzo di un cavo al sistema di acquisizione attraverso il quale è possibile esprimere numericamente quanto accade durante la prova.

Per tale prova si è utilizzato un sistema di acquisizione dati multicanale per la gestione e il condizionamento dei segnali: il SCXI (Signal Conditioning Extensions for instrumentation), sistema elaborato dalla National Instruments che si avvale anche di un apposito software (fig.7.30 e 7.31). È formato da una serie di moduli 1520, 1521 e 1540 che amplificano, filtrano, trasformano e evidenziano una grande moltitudine di dati provenienti dalla strumentazione.

Ad ognuno di questi moduli che sono poi collegati al PC, fanno riferimento diversi canali di lettura degli strumenti; per mezzo di 4 “scatoline” si collegano tutti i terminali dei cavi degli strumenti ai suddetti moduli come mostra la figura 7.32. In generale al modulo 1520 e 1521 sono affidati tutti gli estensimetri applicati alla trave e il trasduttore di pressione mentre al modulo 1540 sono collegati tutti gli LvdT.



Figura 7.30: vista frontale del sistema d'acquisizione



Figura 7.31: vista posteriore del sistema d'acquisizione

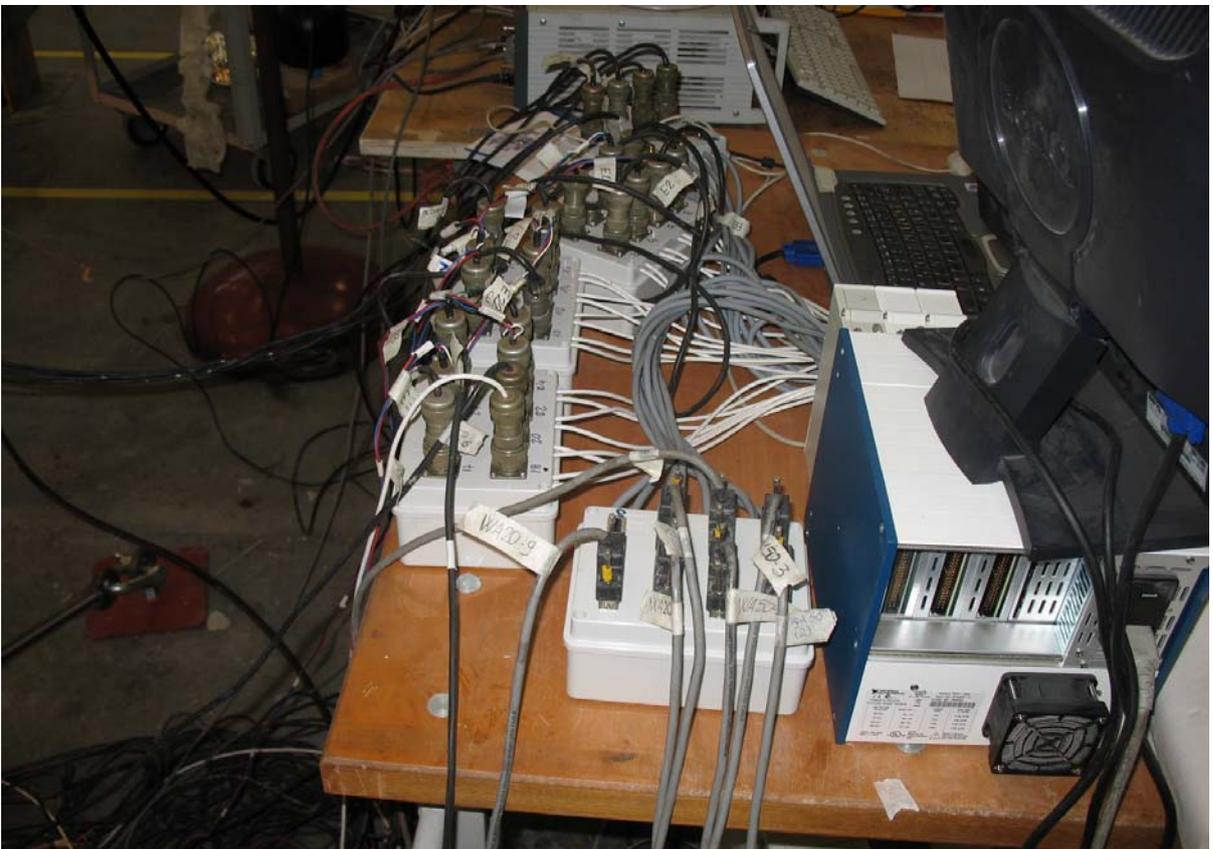


Figura 7.32: vista posteriore del sistema d'acquisizione, scatoline



## 8 Getto della trave e dei cilindri

Nel presente capitolo si descrivono le caratteristiche composizionali e le modalità di esecuzione dei getti di calcestruzzo prefabbricato e gettato in opera che si sono svolti per la realizzazione della trave e dei provini cilindrici che sono poi stati oggetto delle prove in esame.

### 8.1 Componenti e caratteristiche del getto

Le modalità d'esecuzione del getto sono abbastanza standardizzate infatti dopo aver accuratamente stabilito, mediante pesatura, i quantitativi di ghiaietto, pietrischetto e sabbia, questi vengono inseriti, insieme ad una parte dell'acqua preventivata, all'interno della betoniera che viene poi messa in funzione; quando il mescolamento dei vari componenti è ritenuto sufficiente, la betoniera viene momentaneamente arrestata per inserire in essa il cemento, il filler (contenente una certa percentuale di silice attiva), l'additivo e la rimanente parte d'acqua, per poi essere rimessa in funzione fino ad ottenere il getto delle caratteristiche volute.

Nelle tabelle seguenti si sono indicati schematicamente i quantitativi dei componenti e le caratteristiche fisiche dei getti eseguiti per l'attuazione delle prove che sono oggetto di tale tesi. Da notare che nel calcolare il quantitativo d'acqua si è tenuto conto dell'umidità della sabbia.

*Getto del 07 Settembre 2007, ore 11:30*

*Calcestruzzo prefabbricato per prove di ritiro e creep su trave e cilindri*

<b>MATERIALI</b>	<b>PESO x 100 Lt.</b>
Cemento 52.5 R	Kg 380
Filler PLASTOFILL HSC	Kg 19.5
Sabbia tonda 51%	Kg 933 umidità 6 %
Ghiaietto 6/12	Kg 910
Acqua	Lt. 3.5
Additivo SUPERFLUIDIFICANTE (0.85kg/ql.cem.)	Lt. 2.8

Tabella 8-1: miscela del getto

## 8.2 Getto dei cilindri

Parallelamente alla prova sull trave, è stato studiato il comportamento differito dei calcestruzzi che costituiscono la trave inteso come materiale e non come componente di un elemento strutturale. Per far ciò si sono utilizzati provini di forma cilindrica sui quali si sono attuate prove di resistenza, di valutazione del modulo d'elasticità, del ritiro e del creep.

Il getto dei cilindri in cls prefabbricato è stato eseguito presso la sede di produzione della APE s.p.a di Montecchio (RE) il 7 Settembre 2007. Il getto è stato eseguito predisponendo, su di un piano in acciaio dei tranci di tubi di plastica aventi la funzione di cassaforma per cilindri (figura 8.1); tali tubi prima del getto sono stati opportunamente fissati al piano mediante un telaio protettivo di ferri saldati, in modo da impedire ogni possibile movimento. Dopo aver versato in essi il calcestruzzo prefabbricato mediante una pala, si è attuata la vibrazione automatica azionando il sistema di vibrazione del piano.

I cilindri relativi al cls del getto di completamento sono stati realizzati in laboratorio il 3 Ottobre 2007 dalla Sapaba. In questo caso, i cilindri di cls di completamento sono stati realizzati facendo uso di una benna e vibrati con un ferro con il fine di far uscire le bolle d'aria eventualmente presenti come mostrato in figura 8.2. Prima del getto si sono fissati i tranci di tubi ad una piastra di acciaio con silicone così da impedire ogni tipo di movimento

I cilindri di calcestruzzo prefabbricato sono stati portati in laboratorio dopo circa 8 giorni dal getto assieme alla trave.



Figura 8.1: getto dei cilindri di cls prefabbricato (Montecchio, RE)



Figura 8.2: getto dei cilindri Sapaba (Laps, Bologna)

### 8.3 Getto della trave

Per la valutazione del comportamento di una trave prefabbricata con successivo getto di completamento in opera, sono state eseguite prove di rottura e creep su tale elemento strutturale.

Nella trave gettata presso la sede produttiva della s.p.a. APE di Montecchio, è stata inserita una gabbia d'armatura le cui caratteristiche geometriche sono riportate nelle figure 8.3÷8.5.

L'armatura a taglio è rappresentata da un traliccio metallico nella zona centrale, il cui passo è stato dimezzato in prossimità dei punti di applicazione dei carichi e da un sistema di staffe verticali in prossimità degli appoggi con passo fitto per evitare l'insorgere di crisi per taglio, visto che la trave sarà soggetta ad una prova di flessione a quattro punti, a seguito delle quali le massime sollecitazioni taglianti si riscontreranno proprio all'estremità.

In corrispondenza dei punti di applicazione è stato inserito un sostegno metallico, che verrà inglobato dal calcestruzzo con la funzione di punto di appoggio del pistone e di consentire una miglior distribuzione del carico sulla trave evitando il fenomeno di punzonamento del calcestruzzo (figura 8.7).



Figura 8.3: armatura della trave

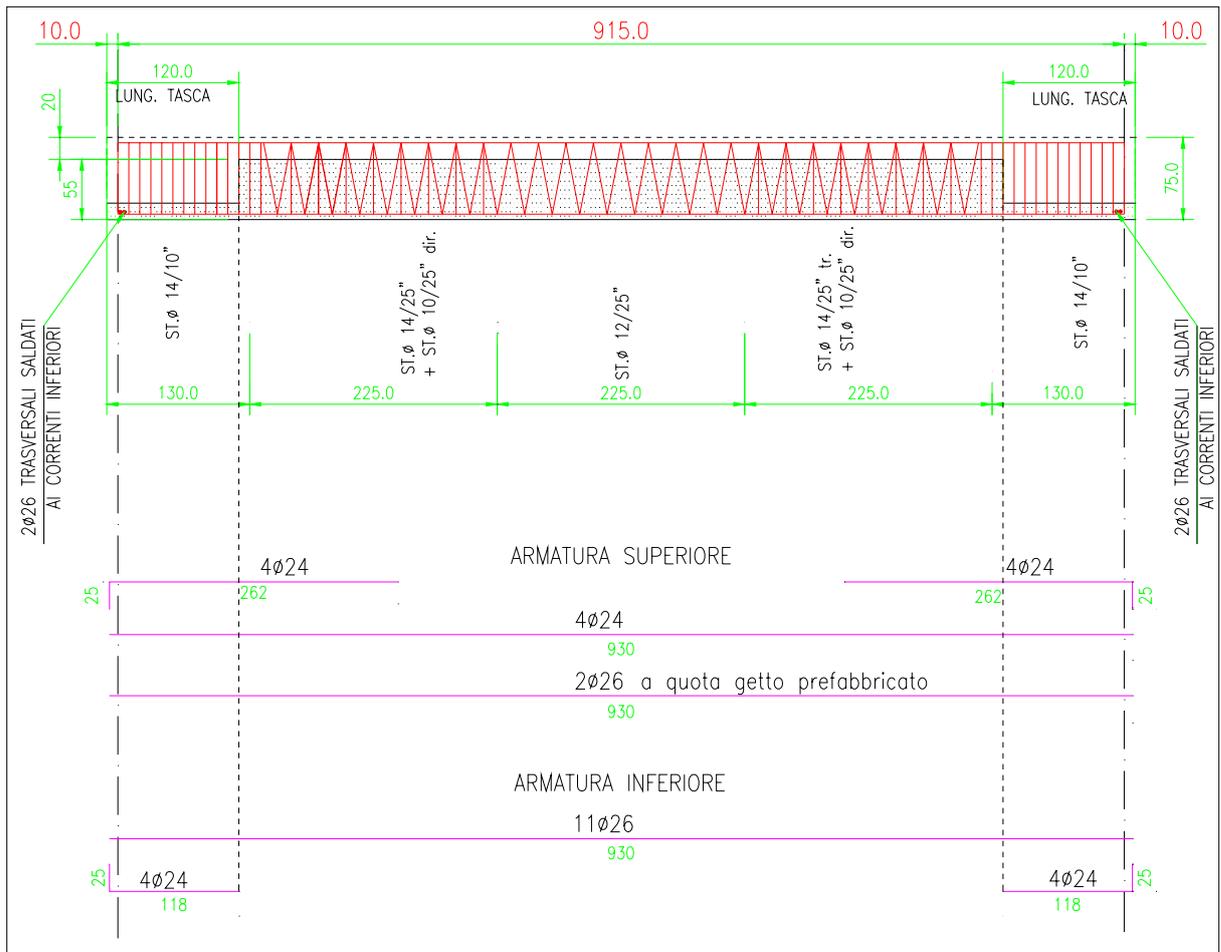


Figura 8.4: armatura e dimensione della trave

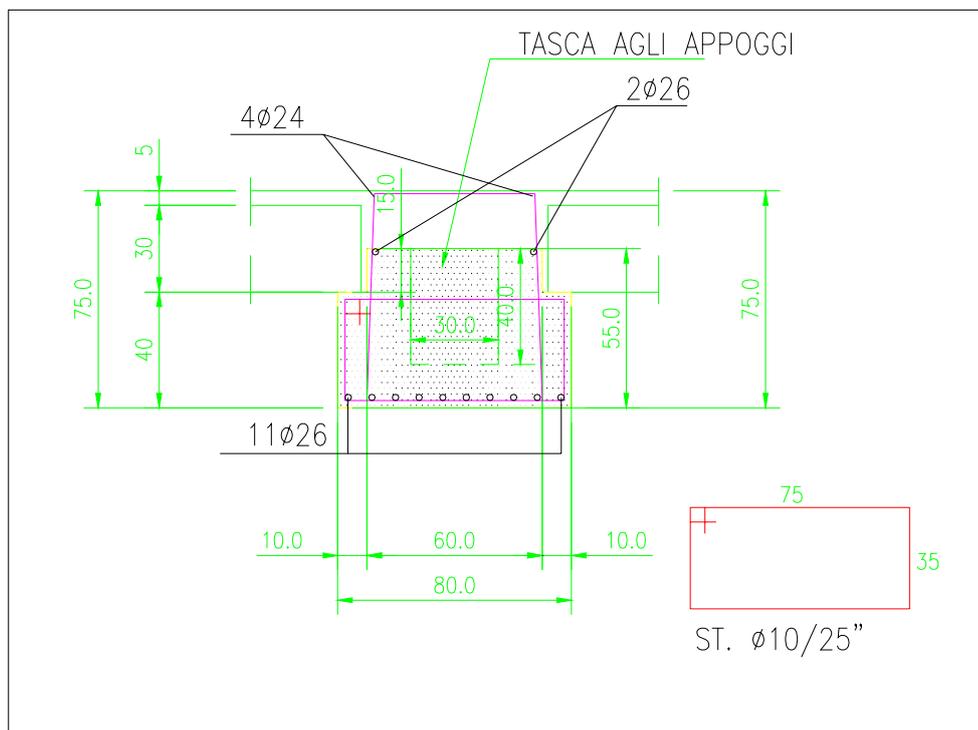


Figura 8.5: sezione trasversale della trave

La cassaforma utilizzata per il getto prefabbricato è di tipo metallico ed è costituita da più parti assemblate e bloccate mediante cunei di fissaggio, togliendo i quali è stato possibile smontare la cassaforma stessa e attuare il disarmo della trave (figura 8.6).



Figura 8.6: gabbia d'armatura inserita nella cassaforma

Prima del getto si è proceduto a cospargere la parte interna della cassaforma con un olio disarmante; successivamente si è inserita al suo interno la gabbia d'armatura avendo cura di garantire un adeguato copri ferro (figura 8.6)



Figura 8.7: elemento metallico, punto d'applicazione del carico

Dopo queste operazioni preliminari si è attuato il getto vero e proprio, come mostrato nelle figure 8.8÷8.10. L'operazione è cominciata alle ore 11.30 ed è terminata alle ore 12.15, ad ogni versamento di calcestruzzo si è proceduto alla vibrazione mediante vibratore ad ago; quest'ultima operazione è finalizzata a distribuire meglio il materiale e a occupare ogni angolo della cassaforma (figura 8.11).



Figura 8.8: getto della trave



Figura 8.9: getto della trave e vibrazione



Figura 8.10: getto della trave con vibratore con vibratore in funzione



Figura 8.11: getto prefabbricato ultimato

Alla fine del getto è stata fatta una lettura manuale con la P3500 degli estensimetri che sono stati applicati sull'armatura e che sono stati ricoperti dal getto, per verificare il loro stato di funzionalità come evidenzia la figura 8.12.



Figura 8.12: lettura degli estensimetri con la P3500

Riportiamo nella tabella 8-2 i valori letti:

DATA	ORA	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
07/09/2007	12.15	-960	-238	181	753	-566	1129	367	-1091	-1207

Tabella 8-2: lettura con P3500 degli estensimetri immersi nel getto

Il 26 settembre ha avuto inizio la prova e la trave è stata caricata con 127 kN e il carico è stato mantenuto costante fino al 30 ottobre, in tale giorno si è eseguito il secondo incremento di carico raggiungendo i 177 kN. Dopo circa 7 giorni dall'inizio della prova si è eseguito il getto di completamento la trave è stata portata in laboratorio e il 3 Ottobre 2007 è stato realizzato il getto di completamento dalla ditta Sapaba di Bologna.

In questo caso è stata realizzata una cassaforma in legno (fig. 8.13 e 8.14) e successivamente si è bagnata la superficie di getto prefabbricato con abbondante acqua (fig. 8.15) e per ultimo è stata cosparsa la cassaforma con il disarmante.

Eseguite tali operazioni, si è proceduto al getto della trave mediante betoniera come mostrato in figura 8.16. Il getto è avvenuto in più fasi e ad ogni versamento è seguita una vibrazione per consentire una miglior distribuzione del calcestruzzo tra le barre di armatura facendo attenzione a non toccare gli estensimetri incollati su piano prefabbricato sulle armature (figura 8.17). Al termine del getto abbiamo coperto la trave è stata coperta con un telo di plastica per impedire l'evaporazione di acqua durante la fase di presa e indurimento e la formazione di fessure.



Figura 8.13: montaggio cassaforma



Figura 8.14: montaggio cassaforma



Figura 8.15: inizio fase di getto di completamento



Figura 8.16: fase intermedia del getto di completamento



Figura 8.17: getto di completamento con vibratore in funzione



Figura 8.18: getto di completamento ultimato

Al termine del getto, che è iniziato alle ore 11.30 ed è durato circa un'ora e mezza, è stata effettuata una lettura degli strumenti per verificare che i suddetti non avessero subito danni durante l'operazione di getto.

Riportiamo nella tabella 8-2 sottostante i valori rilevati:

DATA	ORA	0	1	2	3	4	5	6	7
03/10/2007	13.33	792158.52	-126.8	-106.7	-467.0	578.4	-220.4	98.9	477.5
DATA	ORA	0	8	9	10	11	12	13	14
03/10/2007	13.33	792158.52	768.6	803.8	-12.0	43.2	-55.1	-16.2	-12.1
DATA	ORA	0	15	16	17	18	19	20	21
03/10/2007	13.33	792158.52	-6.5	11.2	-165.2	-23.5	-138.1	-201.7	-167.9
DATA	ORA	0	22	23	24	25	26	27	28
03/10/2007	13.33	792158.52	-617.1	-585.7	161.6	16.2	17.1	16.8	19.4

Tabella 8-3: lettura con SCXI di tutti gli strumenti applicati alla trave

Dopo il getto la trave è rimasta costantemente sotto carico e dopo circa sei giorni sono stati riattaccati gli Lvdt WA20-7 e WA20-9 e dopo due settimane si è proceduto al disarmo.

## 9 Prove per determinare la resistenza e il modulo elastico dei calcestruzzi

In questo capitolo si esaminano i risultati delle prove, eseguite su provini cilindrici di calcestruzzo del getto eseguito il 7-09-07 (getto prefabbricato) e su provini cilindrici di calcestruzzo il cui getto è stato eseguito il 3-10-07 (getto di completamento). Attraverso tali provi è stato possibile valutare lo sviluppo nel tempo della resistenza e del modulo elastico di entrambi i getti che costituiscono la trave oggetto di studio nella presente tesi.

### 9.1 Dimensione dei provini cilindrici

Durante l'esecuzione del getto prefabbricato, una parte della miscela è stata utilizzata per realizzare i cilindri, di controllo delle proprietà meccaniche. Per quanto riguarda il getto di completamento, i provini cilindri sono stati realizzati solo dopo aver completato la trave.

Dopo l'esecuzione del getto, e la successiva liberazione dei provini dalla "camicia" di plastica che li avvolgeva, si è provveduto a valutare le caratteristiche geometriche di ciascun cilindro. Dopo averli pesati si è passati alla valutazione del diametro medio, eseguendo una serie di misure per mezzo di un opportuno calibro. Per ciascun provino sono state eseguite sei misure del diametro e precisamente due di sommità ( $D_1$  e  $D_{1-2^\circ}$  perpendicolari l'una all'altra), due centralmente ( $D_2$  e  $D_{2-2^\circ}$ ) e due nella parte inferiore ( $D_3$  e  $D_{3-2^\circ}$ ) e di esse ne è stata fatta la media (figura 9.1). I valori misurati sono stati riportati nella tabella 9-1 e tabella 9-2 e nella colonna "Descrizione" si è indicato il tipo di prova eseguita su ciascun provino.

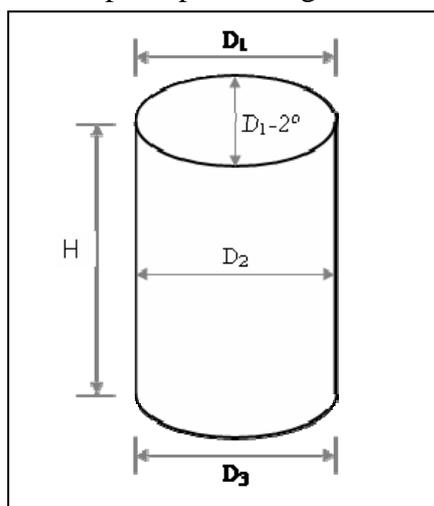


Figura 9.1 : dimensioni provino cilindrico

9. Prove per determinare la resistenza e il modulo elastico dei calcestruzzi

Dimensione provini cilindrici del getto del 07/09/2007												Descrizione
Nome	D1 [cm]	D1-2° [cm]	D2 [cm]	D2-2° [cm]	D3 [cm]	D3-2° [cm]	D medio [cm]	H [cm]	Vol [dmc]	Peso [Kg]	Densita [kg/dmc]	
P1	15.31	14.96	15.24	14.99	15.21	15.07	15.129	30.04	5.400	12.75	2.361	Carico massimo 27/09/07
P2	15.09	15.07	15.2	15.03	15.23	14.94	15.093	29.99	5.365	12.73	2.373	Creep 27/09/07
P3	15.3	14.9	15.33	14.87	15.35	14.85	15.098	29.99	5.368	12.78	2.381	Creep 27/09/07
P4												Ritiro 27/09/07
P5												Ritiro 27/09/07
P6	15.352	15.294	15.260	15.231	15.121	15.023	15.214	30.005	5.454	12.87	2.360	Modulo 28/09/07
P7							15.126	30.00	5.390	12.68	2.352	
P8							15.079	30.00	5.357	12.73	2.376	Carico massimo 6/11/07
P9							15.143	30.00	5.403	12.76	2.362	Modulo 14/11/07
P10							15.137	30.00	5.399	12.75	2.361	

Tabella 9-1: caratteristiche geometriche dei provini cilindrici gettati il 7-09-07

Dimensione provini cilindrici del getto del 03/10/2007												Descrizione
Nome	D1 [cm]	D1-2° [cm]	D2 [cm]	D2-2° [cm]	D3 [cm]	D3-2° [cm]	D medio [cm]	H [cm]	Vol [dmc]	Peso [Kg]	Densita [kg/dmc]	
Ps21												Ritiro 09/10/07
Ps22												Ritiro 09/10/07
Ps23										12.42		Creep 30/10/07
Ps24										12.31		Creep 30/10/07
Ps25										12.23		Modulo 14/11/07
Ps26										12.38		Modulo 07/11/07
Ps27										12.37		Carico massimo 09/11/07

Tabella 9-2: caratteristiche geometriche dei provini cilindrici gettati il 03-10-07

**Nota:** Le caratteristiche non riportate nella tabella 9-2 sono state perdute a causa di un problema del computer.

## 9.2 Prove di rottura su provini cilindrici

La prova è molto semplice e rapida infatti consiste nel porre ciascun provino sotto ad una pressa e dopo averla azionata, valutare il carico che ha portato a rottura il cilindro. Tale valore è fornito da un indicatore posto sulla pressa stessa. Noto il valore dell'area di ciascun provino è banale il calcolo della tensione di rottura.

Lo scopo di queste prove è stato quello di valutare lo sviluppo nel tempo della resistenza dei calcestruzzi che costituiscono la trave. In particolare si è cercato di eseguire le prove in momenti prossimi alle varie fasi di carico che hanno caratterizzato la prova.

Per alcuni cilindri, il carico ultimo è stato determinato dopo aver eseguito una serie di cicli di carico, con il fine di valutare il modulo elastico del calcestruzzo.

Nella tabella 9-3 e nella tabella 9-4 si riportano i dati sperimentali ottenuti e i valori della resistenza  $f_{cm}$  per i due tipi di calcestruzzo.

Provini cilindrici del getto del 07/09/2007				Giorni trascorsi dal momento del getto	Descrizione
Nome	Dimensioni [cm]	Carico rottura [Kg]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
P1	15.129	92000	51.20	20	Carico massimo 27/09/07
P6	15.214	105000	57.79	21	Modulo 28/09/07
P8	15.079	105500	59.11	60	Carico massimo 6/11/07
P9	15.143	105000	58.33	68	Modulo 14/11/07

Tabella 9-3: tensioni medie di rottura dei provini cilindrici gettati il 07-09-07

Provini cilindrici del getto del 03/10/2007				Giorni trascorsi dal momento del getto	Descrizione
Nome	Dimensioni [cm]	Carico rottura [Kg]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
Ps25	15.00	57000	32.27	48	Modulo 14/11/07
Ps26	15.00	54000	30.57	41	Modulo 07/11/07
Ps27	15.00	52500	29.72	43	Carico massimo 09/11/07

Tabella 9-4: tensioni medie di rottura dei provini cilindrici gettati il 03-10-07

**Nota:** nella tabella 9-4 si sono usati i diametri nominali e non determinati da una misura diretta.

## 9.3 Prove per la determinazione del modulo elastico

### 9.3.1 Descrizione della prova

Per l'esecuzione della prova è stato necessario preliminarmente disporre sul provino cilindrico due estensimetri in posizione diametralmente opposta come mostrato dalla figura 9.2, collegandoli tra loro e alle opportune resistenze in modo da creare un canale da inserire poi nella MGC (per maggiori dettagli consultare il capitolo 3 sulla Strumentazione). Dopo aver eseguito tali operazioni, il cilindro viene posto sotto ad una pressa, si avvia il programma di acquisizione dei dati (LabView) e si inizia a dare carico sino ad arrivare a circa un terzo della resistenza ultima a compressione; giunti a tale valore si scarica il provino completando così il primo ciclo di carico per poi cominciare la fase di carico eseguendo il secondo ed il terzo ciclo, dopo il quale il carico viene fatto crescere fino a giungere alla rottura del cilindro come rappresentato in figura 9.3.

Il file d'acquisizione contiene valori del carico e delle deformazioni dei due estensimetri espressi in Volt, che sono poi stati convertiti rispettivamente in Kg e  $\mu\epsilon$  moltiplicandoli per opportune costanti riportate di seguito.

-Per gli estensimetri 1000  $\mu\epsilon$ /Volt

-Per il carico 35.94 Ton/Volt per la pressa da 60 t con scala da 30

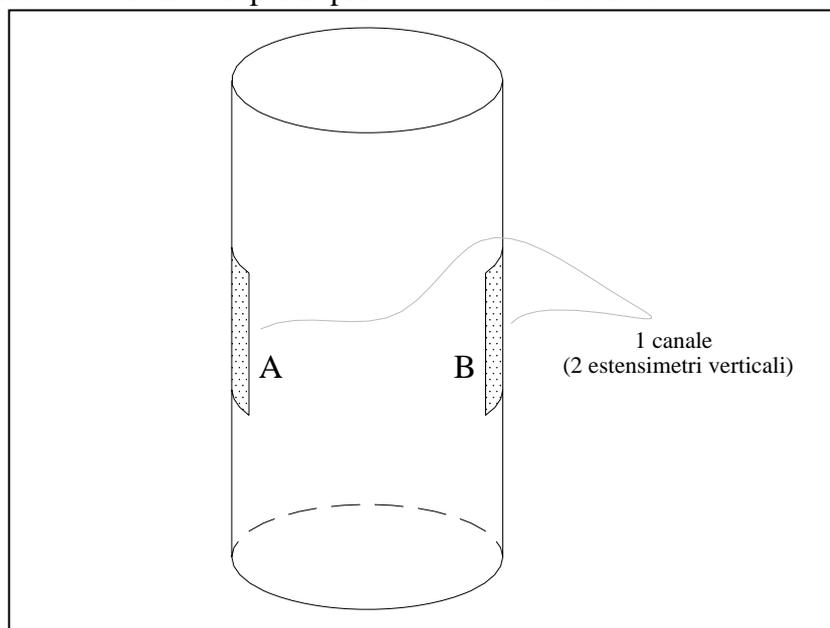


Figura 9.2: disposizione estensimetri per l'esecuzione della prova

I cicli di carico sono stati mantenuti sotto la soglia di  $\frac{1}{3}$  della resistenza ultima a compressione in modo tale da tentare di rimanere in un campo di comportamento elastico del materiale. Per attuare tale operazione è stato necessario conoscere a priori il valore in

corrispondenza più o meno del quale si sarebbe rotto il provino. Ciò si è reso possibile eseguendo, prima di tale prova, le prove di rottura su campioni uguali per getto, maturazione e dimensioni, descritte nel paragrafo precedente.

Nella fase d'elaborazione dei dati si è, per ciascuna prova, graficato il corrispondente diagramma  $\sigma$ - $\varepsilon$  e il modulo elastico cercato è stato ottenuto calcolando, per ciascun ciclo di carico, la pendenza della retta congiungente i punti estremi del ciclo ed effettuando poi la media tra esse.

La presenza di due estensimetri verticali ha permesso di poter definire un valore medio delle deformazioni subite dal cilindro, evitando in tal modo eventuali errori dovuti all'applicazione di un carico non perfettamente uniforme su tutta la superficie di base del provino.

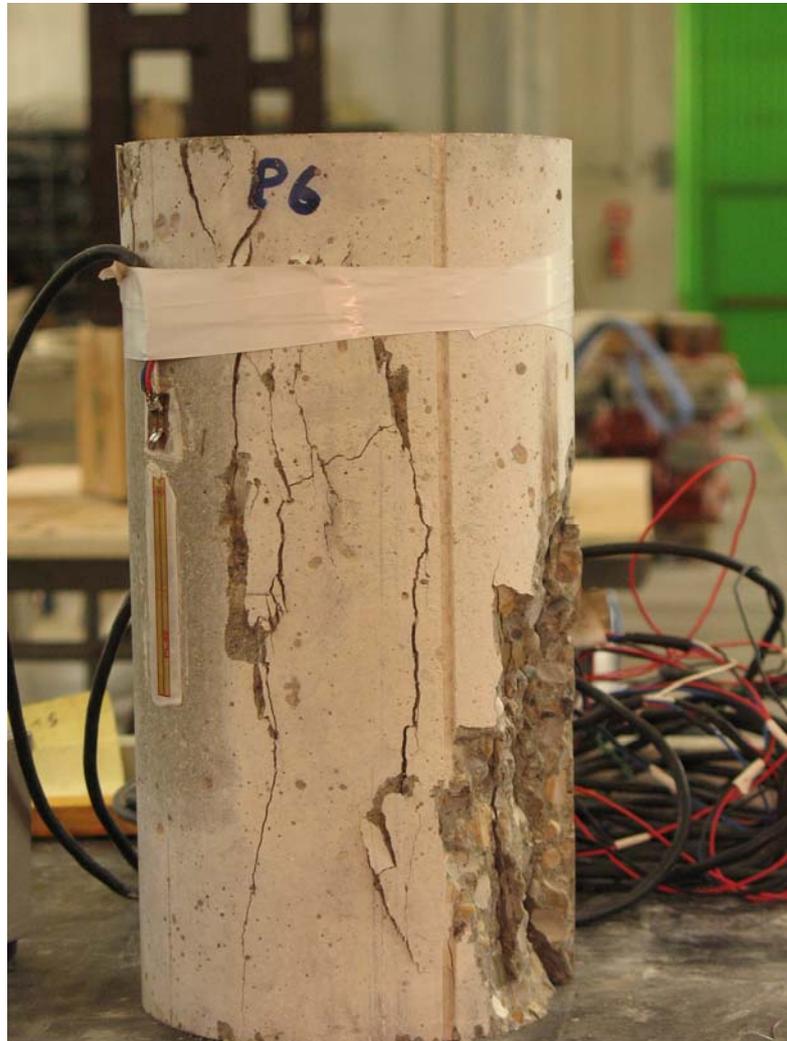


Figura 9.3: cilindro P6 dopo la rottura

### 9.3.2 Diagramma $\sigma$ - $\varepsilon$ per i provini in cls prefabbricato

In questo paragrafo si riportano i grafici relativi alle prove eseguite per la definizione del modulo elastico del calcestruzzo prefabbricato (grafici 9.1÷9.2). In essi si sono rappresentati con linea tratteggiata gli andamenti deformativi ricavati tramite i due estensimetri, mentre con linea continua è stata definita la curva ottenuta mediando i valori misurati. In tal modo si sono compensati eventuali errori di centraggio del carico che possono provocare un iniziale comportamento non uniforme della sezione.

Osservando i grafici 9.1 e 9.2 si osserva che tra il 38÷48 % della corrispettiva tensione di rottura si ha un comportamento non più lineare.

Nel grafico 9.3 è stato effettuato un confronto tra l'andamento medio dei diagrammi  $\sigma$ - $\varepsilon$  ottenuti dalle varie prova. Si nota come l'effetto dell'invecchiamento del materiale si abbia una progressiva crescita nel tempo del modulo elastico del calcestruzzo prefabbricato.

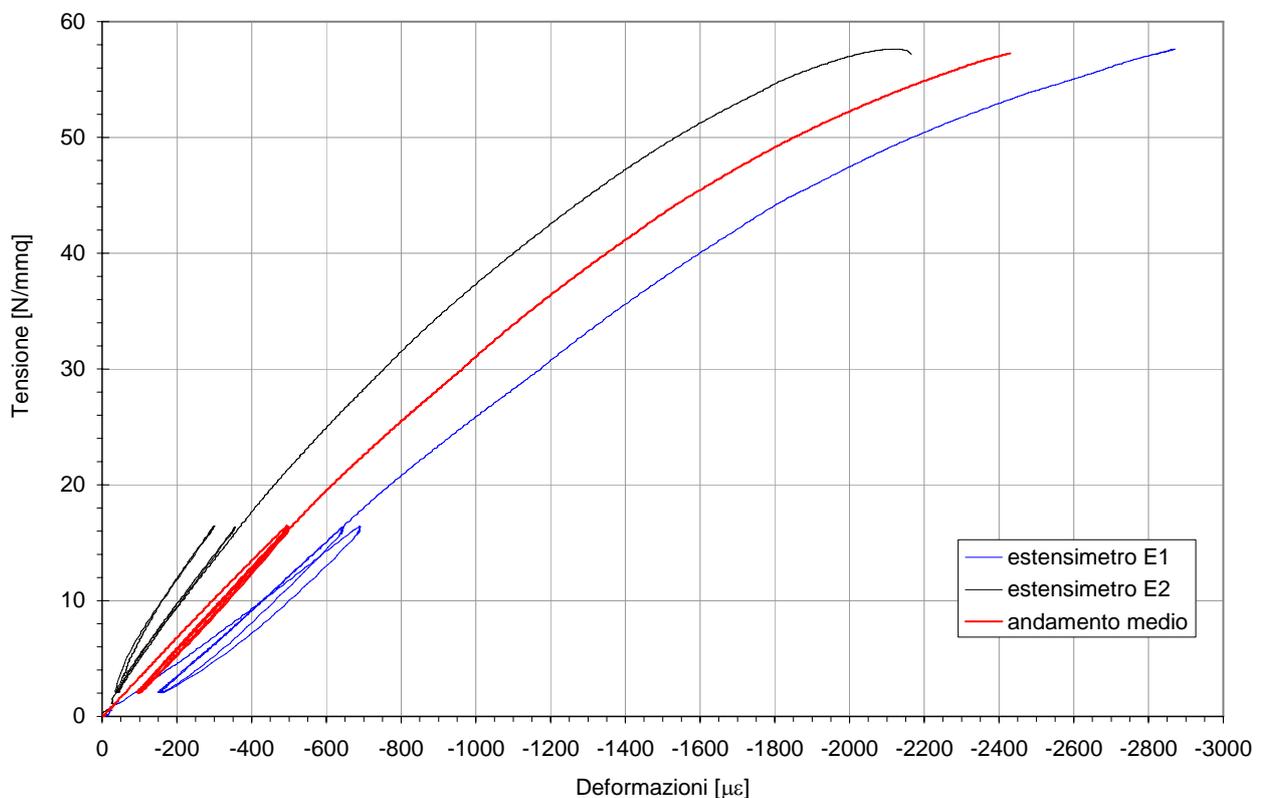


Grafico 9.1: prova del 28-09-07 eseguita sul cilindro P6

## 9. Prove per determinare la resistenza e il modulo elastico dei calcestruzzi

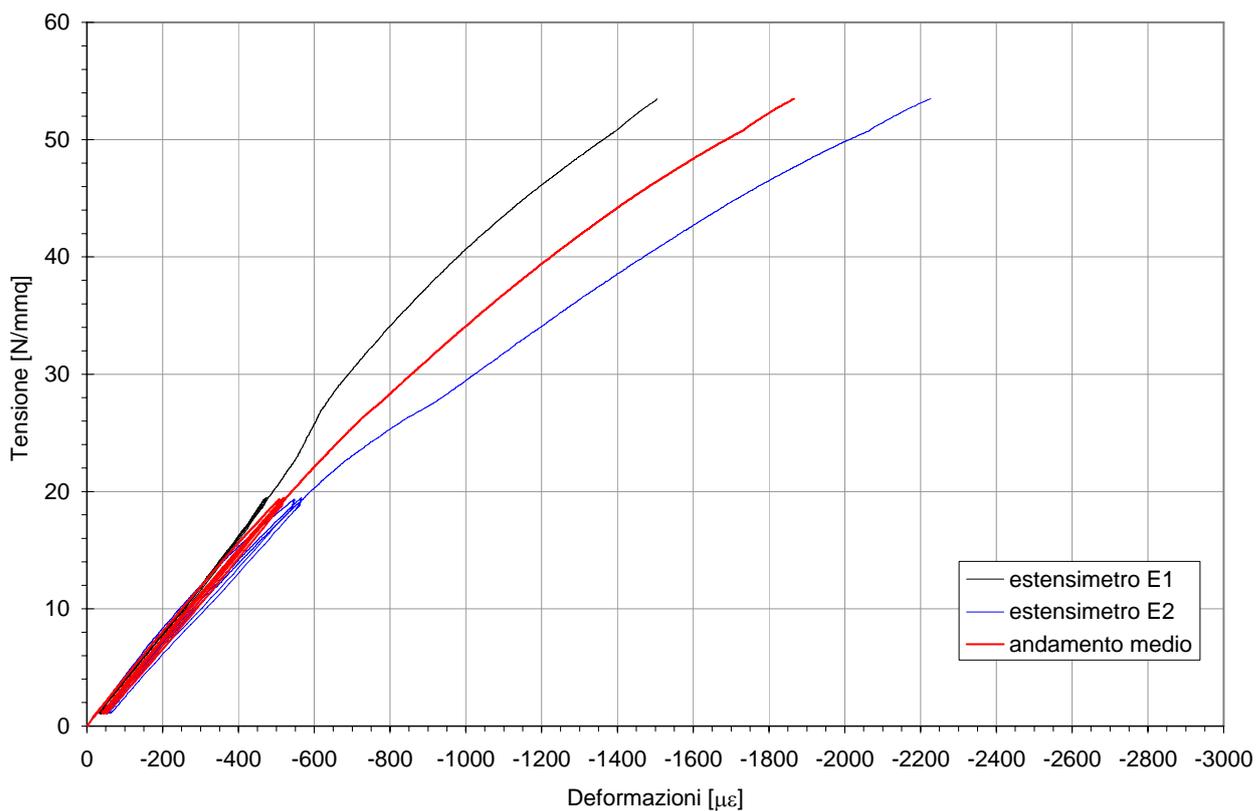


Grafico 9.2: prova del 14-11-07 eseguita sul cilindro P9

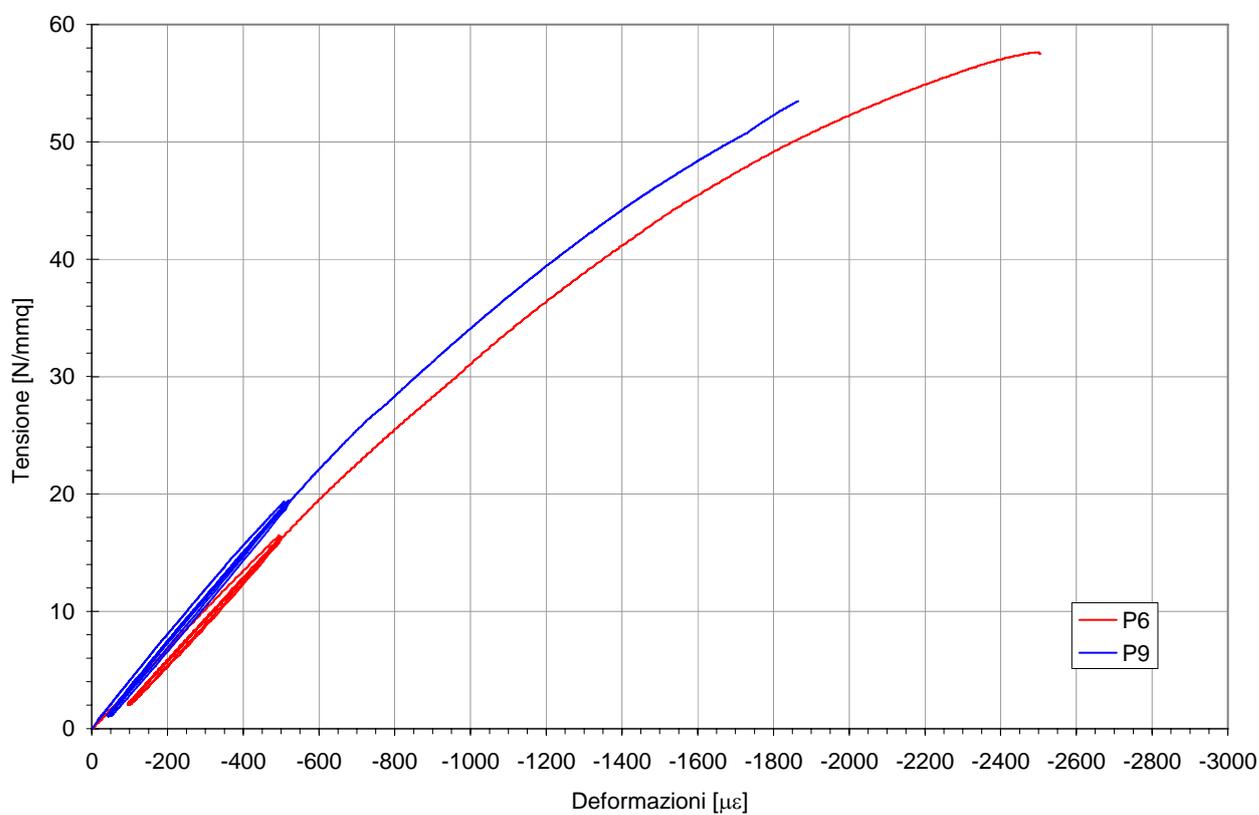


Grafico 9.3: confronto tra le prove eseguite sui provini P6 e P9

### 9.3.3 Diagramma $\sigma$ - $\varepsilon$ per i provini in cls gettato il 3-10-07

In questo paragrafo si riportano i grafici relativi alle prove eseguite per la definizione del modulo elastico del calcestruzzo gettato successivamente (grafici 9.4÷9.5). In essi si sono rappresentati con linea tratteggiata gli andamenti deformativi ricavati tramite i due estensimetri, mentre con linea continua è stata definita la curva ottenuta mediando i valori misurati. In tal modo si sono compensati eventuali errori di centraggio del carico che possono provocare un iniziale comportamento non uniforme della sezione.

Osservando i grafici 9.4 e 9.5 si osserva che tra il 40% della corrispettiva tensione di rottura si ha un comportamento non più lineare.

Nel grafico 9.6 è stato effettuato un confronto tra l'andamento medio dei diagrammi  $\sigma$ - $\varepsilon$  ottenuti dalle varie prova. Si nota come l'effetto dell'invecchiamento del materiale si abbia una progressiva crescita nel tempo del modulo elastico del calcestruzzo prefabbricato.

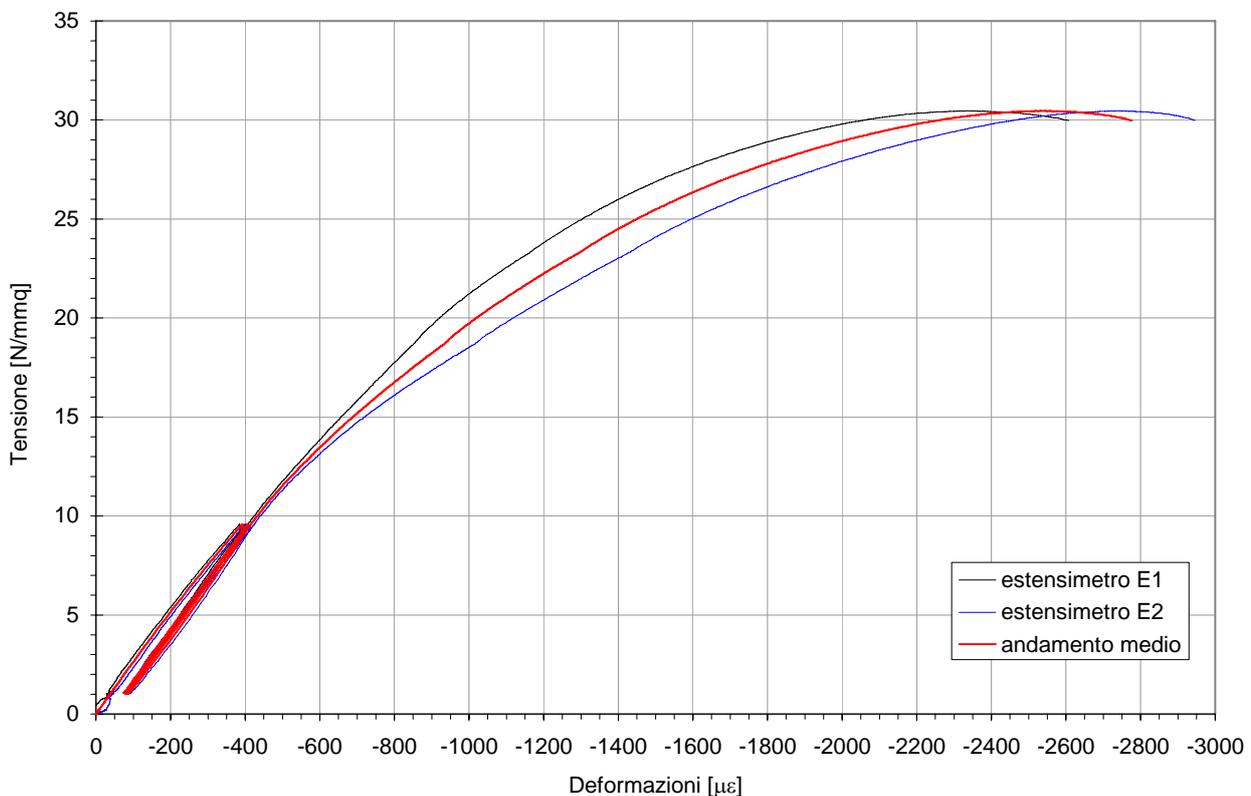


Grafico 9.4: prova del 07-11-07 eseguita sul cilindro Ps26

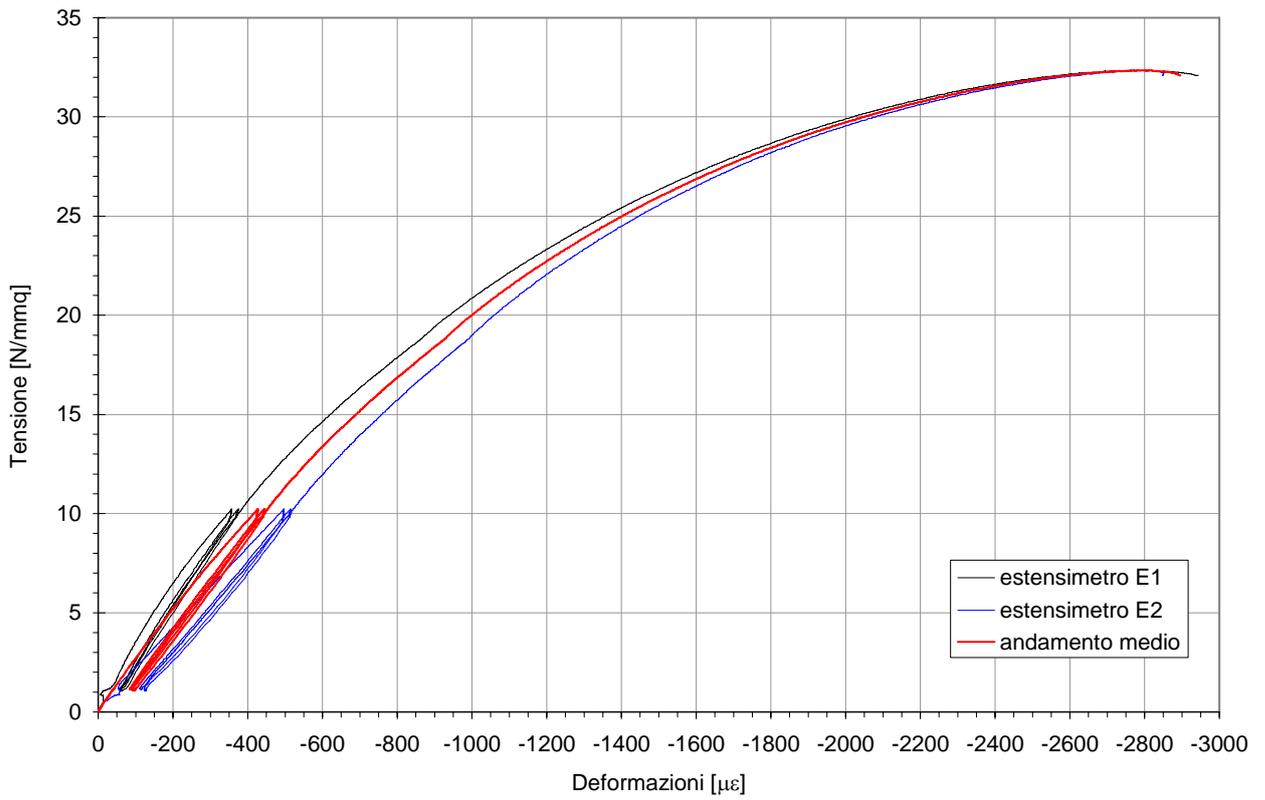


Grafico 9.5: prova del 14-11-07 eseguita sul cilindro Ps25

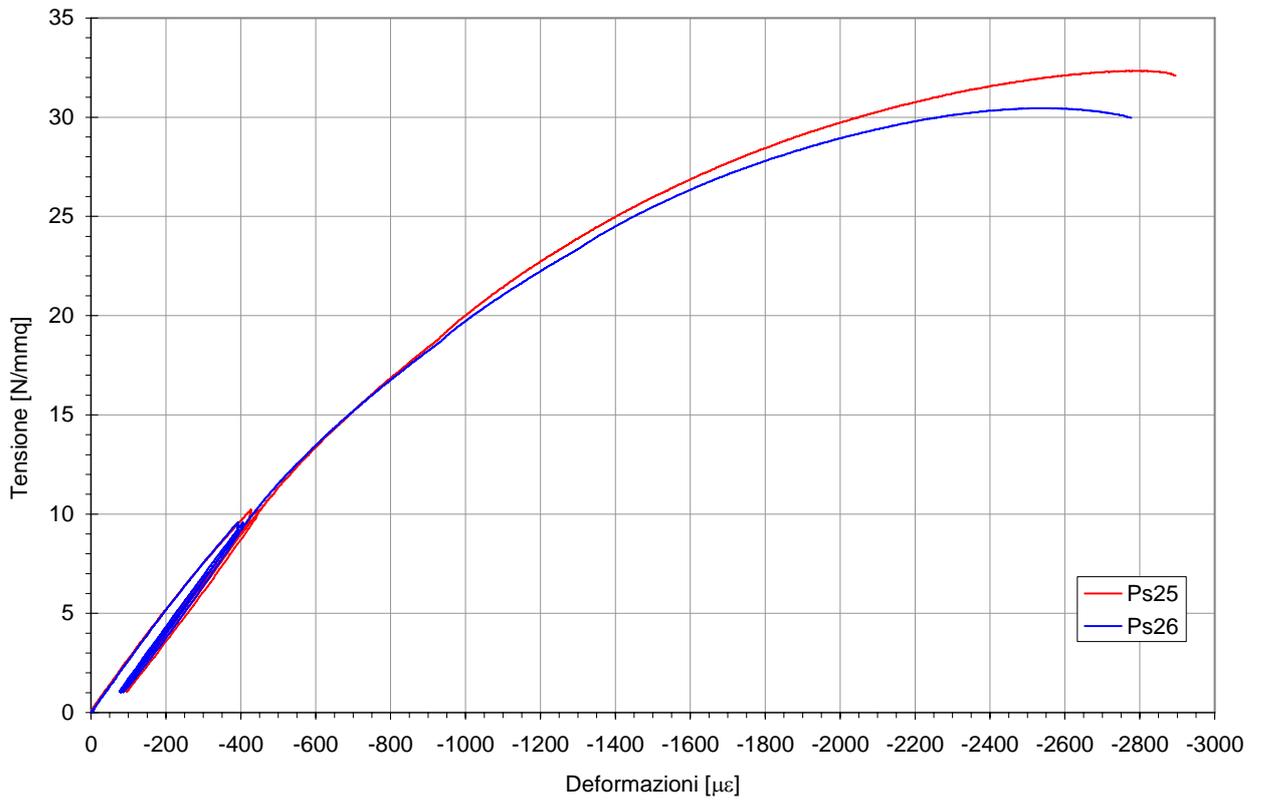


Grafico 9.6: confronto tra le prove eseguite sui provini Ps25 e Ps26

### 9.3.4 Sviluppo nel tempo del modulo elastico

Si riportano le tabelle dello sviluppo nel tempo del modulo elastico dei due materiali (tabelle 9-5 e 9-6) e il grafico ottenuto utilizzando i valori presenti in esse (grafico 9.7).

<b>Data</b>	<b>Ora</b>	<b>Provino</b>	<b>Pressa</b>	<b>Giorni trascorsi dal momento del getto</b>	<b>E (N/mm<sup>2</sup>)</b>
28/09/2007	11,35	P6	60t scala da 30	21	36022
14/11/2007	11,40	P9	60t scala da 30	68	39017

Tabella 9-5: modulo elastico per provini cilindrici gettati il 07-09-07

<b>Data</b>	<b>Ora</b>	<b>Provino</b>	<b>Pressa</b>	<b>Giorni trascorsi dal momento del getto</b>	<b>E (N/mm<sup>2</sup>)</b>
07/11/2007	11,30	Ps26	60t scala da 30	35	26545
14/11/2007	12,30	Ps25	60t scala da 30	42	26029

Tabella 9-6: modulo elastico per provini cilindrici gettati il 03-10-07

# 10 Prove per la valutazione del ritiro e del creep dei calcestruzzi

In questo capitolo si esaminano i risultati delle prove, eseguite su provini cilindrici di calcestruzzo con getto eseguito il 7-09-07 (getto prefabbricato) e su provini cilindrici di calcestruzzo il cui getto è stato eseguito il 3-10-07 (getto di completamento). Si esamineranno inizialmente le prove relative al ritiro dei due diversi calcestruzzi e poi si analizzeranno quelle per la valutazione del creep, tutte eseguite col fine di completare ed estendere la conoscenza di alcuni comportamenti dei calcestruzzi in merito allo sviluppo di deformazioni viscoso e del ritiro.

## 10.1 Dimensione dei provini cilindrici

Dopo l'esecuzione del getto e la successiva liberazione dei provini dalla 'camicia' di plastica che li avvolgeva, si è provveduto a valutare le caratteristiche geometriche di ciascun cilindro. Dopo averli pesati, si è passati alla valutazione del diametro medio, eseguendo una serie di misure per mezzo di un opportuno calibro. Per ciascun provino sono state eseguite sei misure del diametro (figura 9.1) e precisamente due in sommità ( $D_1$  e  $D_{1-2^\circ}$  perpendicolari l'una all'altra), due centralmente ( $D_2$  e  $D_{2-2^\circ}$ ) e due nella parte inferiore ( $D_3$  e  $D_{3-2^\circ}$ ) e di esse ne è stata fatta la media. I valori misurati si sarebbero dovuti riportare nelle **Erroneo. L'origine riferimento non è stata trovata.** e 9-2, ma a causa della perdita d'informazione non sono stati riportati.

## 10.2 Prove di ritiro su provini cilindrici

Nelle prove svolte, e descritte in questo capitolo si fa sempre riferimento a provini che sono stati conservati nella sede in cui si è eseguita la prova di rottura della trave, in modo da uniformare le condizioni ambientali di tutti gli elementi coinvolti nello studio.

Parallelamente alle prove di ritiro sono state eseguite anche prove di creep che verranno descritte nel prossimo paragrafo.

Sono stati monitorati complessivamente 4 cilindri, in tutti sono stati disposti due estensimetri per il rilevamento delle deformazioni verticali, aventi tutti  $K_G = 2.09$ , come già mostrato nella figura 9.1 del capitolo precedente.

I rilevamenti sono cominciati dopo circa un giorno dalla conclusione della prima fase di carico. Per quanto riguarda dettagli sulla strumentazione utilizzata nella prova si rimanda al capitolo 6 sulla strumentazione.

### 10.2.1 Ritiro nei provini cilindrici di cls prefabbricato

La prova è iniziata il 27/09/07 collegando i cinque canali dei provini alla 2100, regolandola ed avviando il programma d'acquisizione. Contemporaneamente, sono stati affiancati a tali canali quelli dei corrispettivi cilindri della prova di creep e quello del cubo per visualizzare il ritiro termico, di seguito si riporta nella figura 10.1 la sede della prove e si evidenziano i cilindri a ritiro con un cerchio rosso. Prima di iniziare la prova è stata fatta una lettura manuale di tutti gli strumenti con la P3500 i cui valori rilevati sono stati riportati nella tabella 10-1 assieme alle impostazioni del sistema d'acquisizione.

Si ricorda che l'acquisizione dei dati relativi al provino P5 per il ritiro, ai cilindri P2 e P3 per il creep e il cubo termico sono tuttora in atto, mentre il l'acquisizione dei dati del provino P4 è stata interrotta il 30/10 alle ore 15.20.

Data	Ora	Sist. Acquisizione	Cella	P2 Creep	P3 Creep	P4 Ritiro	P5 Ritiro	Cubo Termico
27/09/2007	18.30	P 3500	438	-520	-65	44	194	-160
		Gain 2100	0.54	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
		Bal 2100		6.38	5.24	5.00	4.56	5.46

Tabella 10-1: provini cilindrici utilizzati il 27-09-07 per le prove di ritiro e creep

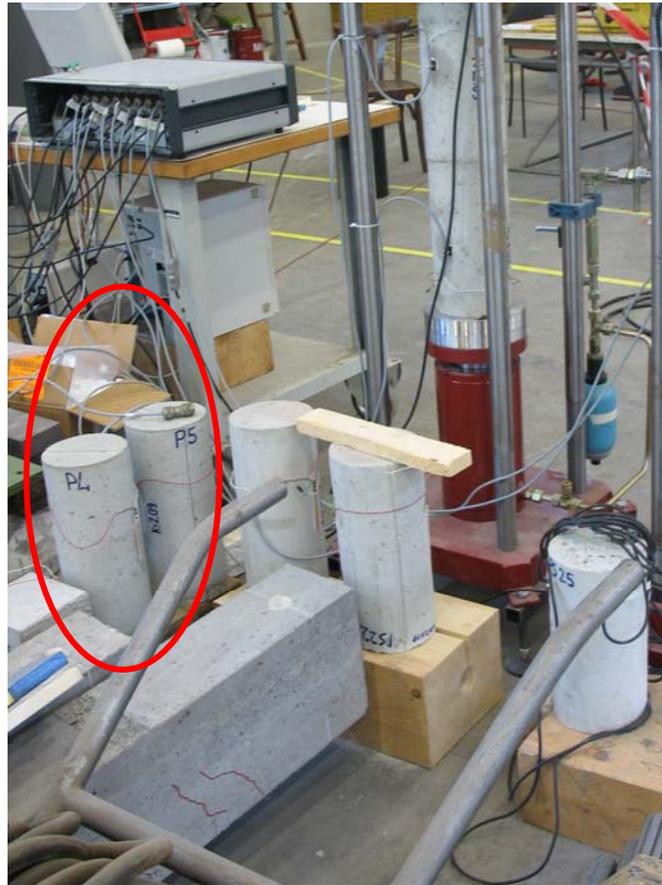


Figura 10.1 : provini cilindrici di cls prefabbricato soggetti alla prova di ritiro

Si riportano di seguito i diagrammi ottenuti dall'elaborazione dei dati strumentali.

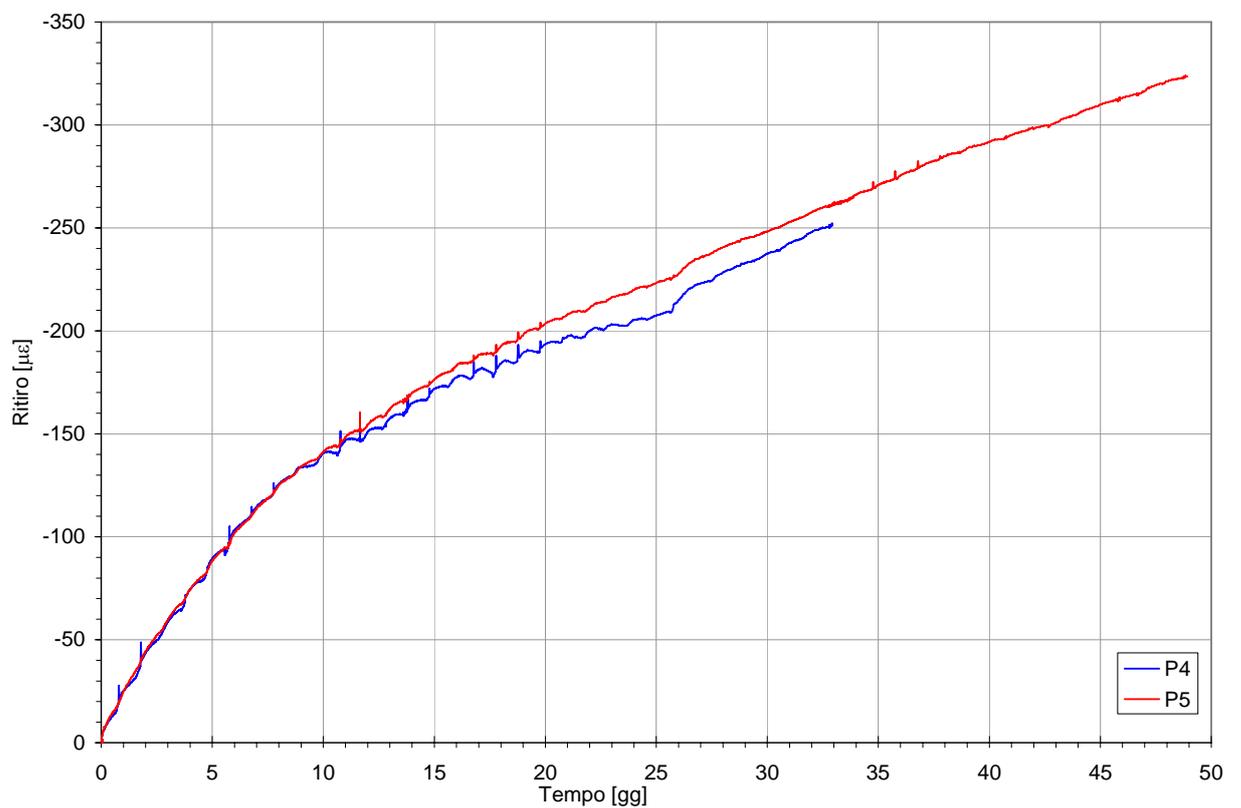


Grafico 10.1: andamento del ritiro su due cilindrici, valutato a partire da 1 gg dopo l'inizio della prova

### OSSERVAZIONI:

Come è evidente dal grafico 10.1, i provini hanno il medesimo ritiro durante i primi dieci giorni dopo si evidenzia meno ritiro per il provino P4, anche se presentano la stessa pendenza di crescita deformativa. Entrambe le curve presentano un andamento ondulato con frequenza giornaliera, tale comportamento è dovuto all'escursione termica giornaliera del laboratorio.

La curva relativa al provino P4 si interrompe attorno al trentatre-esimo giorno di prova, per permettere l'esecuzione di una prova diversa raggiungendo una deformazione ultima di circa 250  $\mu\epsilon$  di compressione mentre per il provino P5 si raggiunge una deformazione massima di circa 325  $\mu\epsilon$  al quarantottesimo giorno di prova.

### 10.2.2 Ritiro termico del cubo di calcestruzzo tradizionale

Come già precedentemente accennato, contemporaneamente alle prove di ritiro e di creep è stata eseguita una prova di valutazione del ritiro dovuto al solo effetto della temperatura ambientale in cui si è eseguita la prova. A tale proposito è stato collegato al sistema d'acquisizione un cubo di calcestruzzo tradizionale sufficientemente vecchio così da aver subito tutte le deformazioni da ritiro e creep possibili e quindi da consentire una valutazione delle sole deformazioni dovute alla variazione di temperatura esterna (Grafico 10.2). Essendo le prove di ritiro e di ritiro termico attivate nello stesso momento, i dati ottenuti presentano anche una corrispondenza temporale che garantisce una precisa rilevazione delle diverse deformazioni nel tempo.

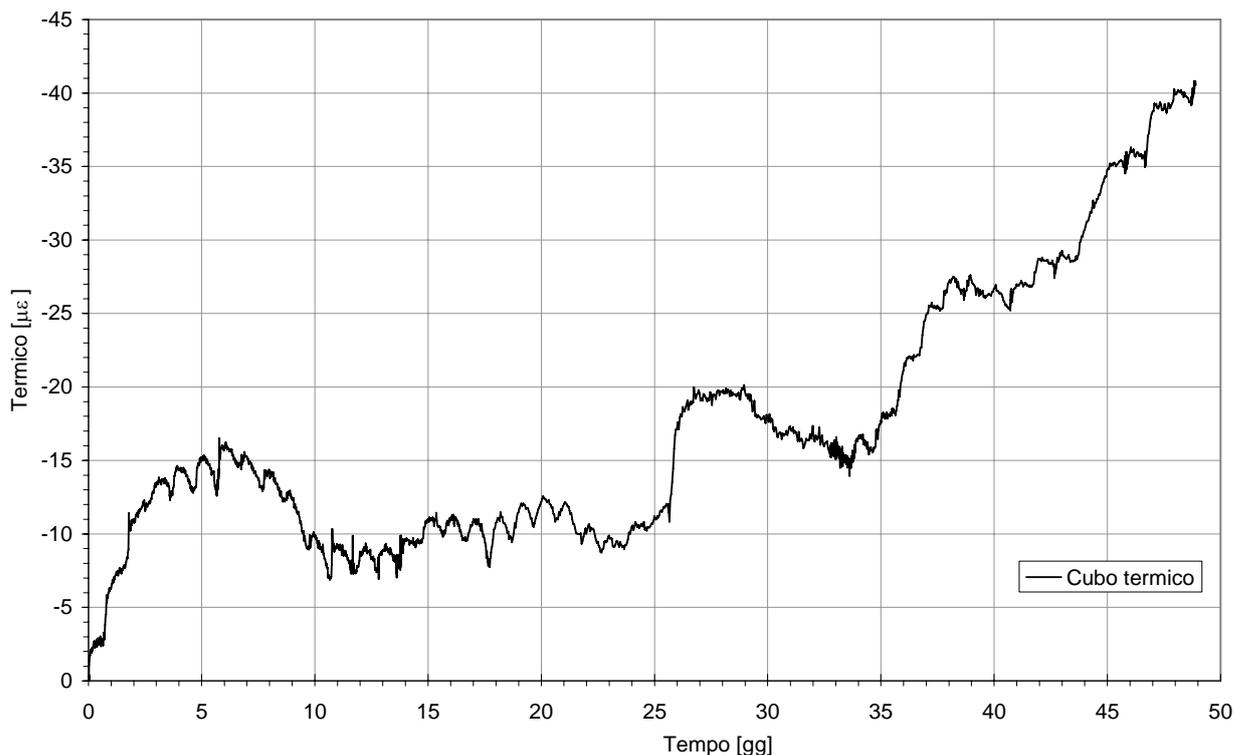


Grafico 10.2: andamento del ritiro termico, valutato a partire da 1gg dopo l'inizio della prova

Osservando il [grafico 10.2](#) si nota in modo più evidente l'andamento ondulatorio con frequenza giornaliera visibile anche nel grafico 10.1, anche in questo caso tale andamento è dovuto all'escursione termica giornaliera del laboratorio in cui ha avuto sede la prova. Più in generale si vedono: fasi in cui le deformazioni aumentano (da 0 a 6.5 gg) e quindi la temperatura sta diminuendo e il provino subisce una contrazione di ritiro e fasi in cui le deformazioni diminuiscono in cui il provino tende a dilatarsi (da 6.5 a 10 gg) oppure in cui si mantengono pressoché costanti come da 10 a 26 gg. Tali andamenti sono da riferirsi a periodi dell'ordine della settimana in cui è sempre piovuto facendo abbassare la temperatura oppure no facendola aumentare. La tendenza complessiva è quella di un abbassamento della temperatura che ha fatto ritirare il provino cubico di circa 41  $\mu\epsilon$  in 48 giorni prova.

I nuovi diagrammi che si sono ottenuti (grafico10.3), sono frutto di una semplice operazione di sottrazione tra le deformazioni da ritiro che sono chiamate  $\epsilon$  e quelle dovute al termico chiamate  $\epsilon_T$  :

$$\epsilon_{\text{depurate}} = \epsilon - \epsilon_T$$

Si riportano di seguito i diagrammi di ritiro per i provini cilindrici P4 e P5 depurati della deformazione dovuta alla variazione termica ambientale secondo la procedura prima descritta.

Guardando il grafico 10.3 si nota che entrambe le curve presentano una deformazione massiva inferiore a quelle del grafico 10.1 di circa  $40\mu\epsilon$  come quelle rilevate dal grafico 10.2 ed è meno pronunciato l'effetto dell'escursione termica giornaliera essendo stata sottratta con la procedura suddetta.

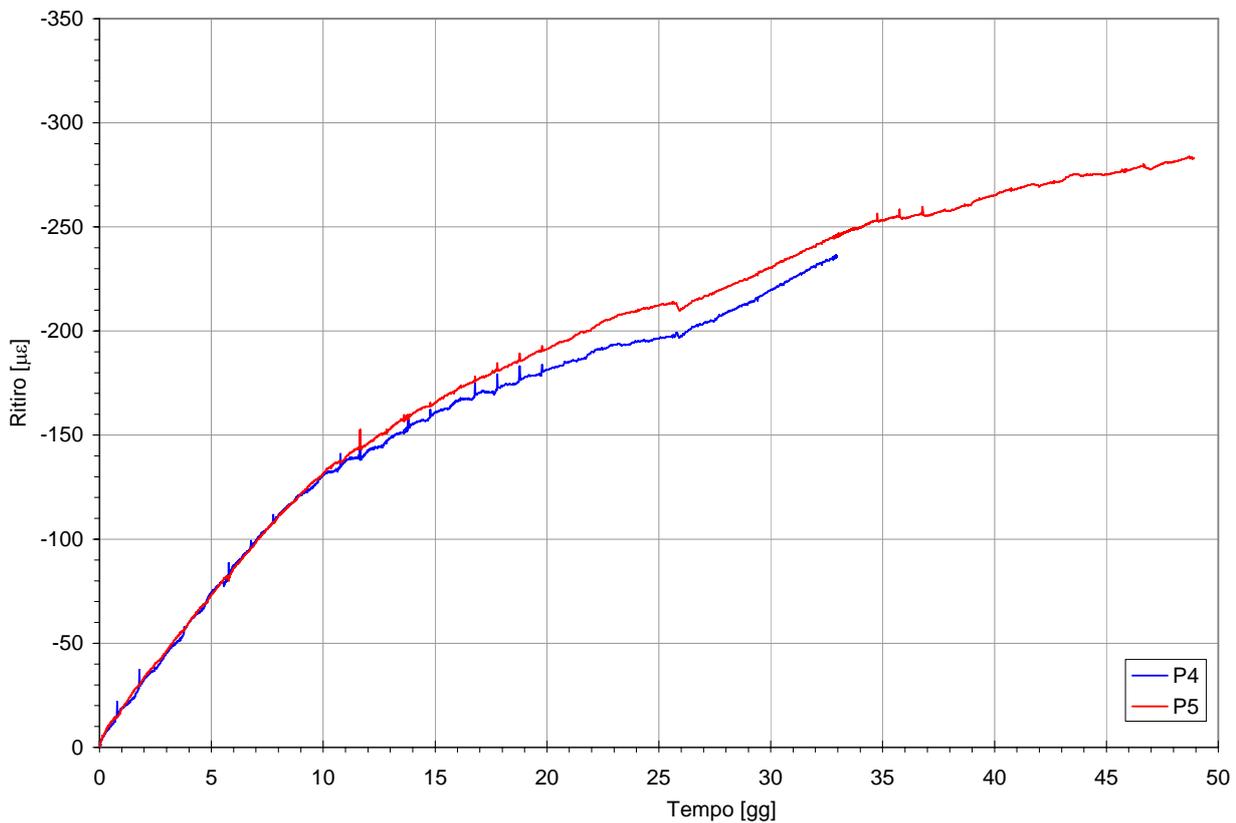


Grafico 10.3: andamento del ritiro depurato della deformazione da variazione termica

### 10.2.3 Ritiro nei provini cilindrici di calcestruzzo di completamento

Dopo sei giorni dall'inizio della prova, è stato eseguito il getto di completamento della trave avvenuto il 03-10-07 si è deciso di predisporre a ritiro altri due provini cilindrici. I provini sono stati collegati il 09-10-07 circa sei giorni dopo l'esecuzione del getto di completamento.

Dato che i canali disponibili nel sistema d'acquisizione sono sette non si è dovuto interrompere nessuna lettura, e sono stati collegati al computer i cilindri Ps21 e Ps22 (figura 10.2) affiancandoli ai canali dedicati alle osservazioni sul calcestruzzo prefabbricato. Prima di iniziare la prova è stata fatta anche in questo caso una lettura manuale dei due canali introdotti nel sistema d'acquisizione i cui valori sono stati riportati nella tabella 10-2, la lettura dei dati del-

le prove descritte è tuttora in atto. Le modalità di collegamento, nella fase d'elaborazione dati sono riportate nel capitolo 6 della strumentazione.

Data	Ora	Sist. Acquisizione	Ps21 Ritiro	Ps22 Ritiro
09/10/2007	10.00	P 3500	-68	-112
		Gain 2100	1.19	1.20
		Bal 2100	5.27	5.27

Tabella 10-2: provini cilindrici utilizzati il 09-10-07 per le prove di ritiro

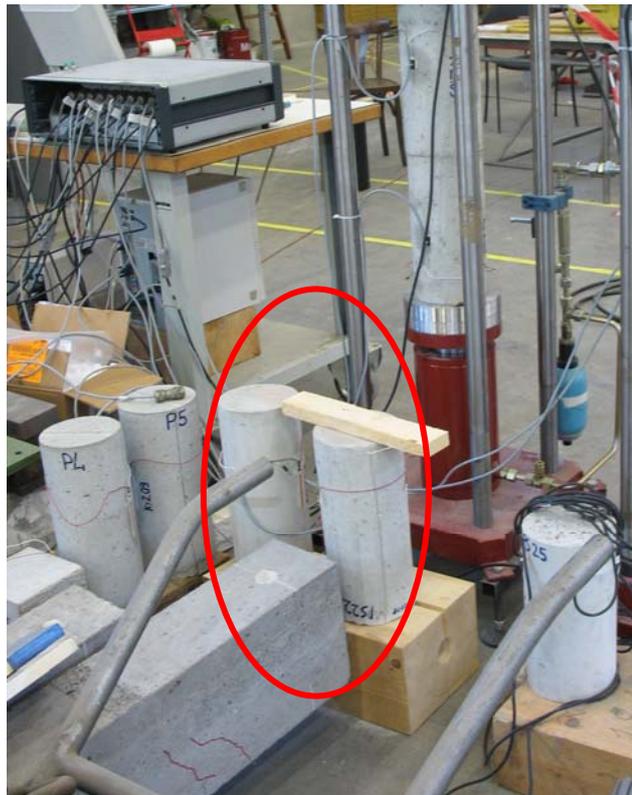


Figura 10.2 : provini cilindrici di Ps21 e Ps22 soggetti alla prova di ritiro

Si riportano di seguito il diagramma ottenuti dall'elaborazione dei dati strumentali.

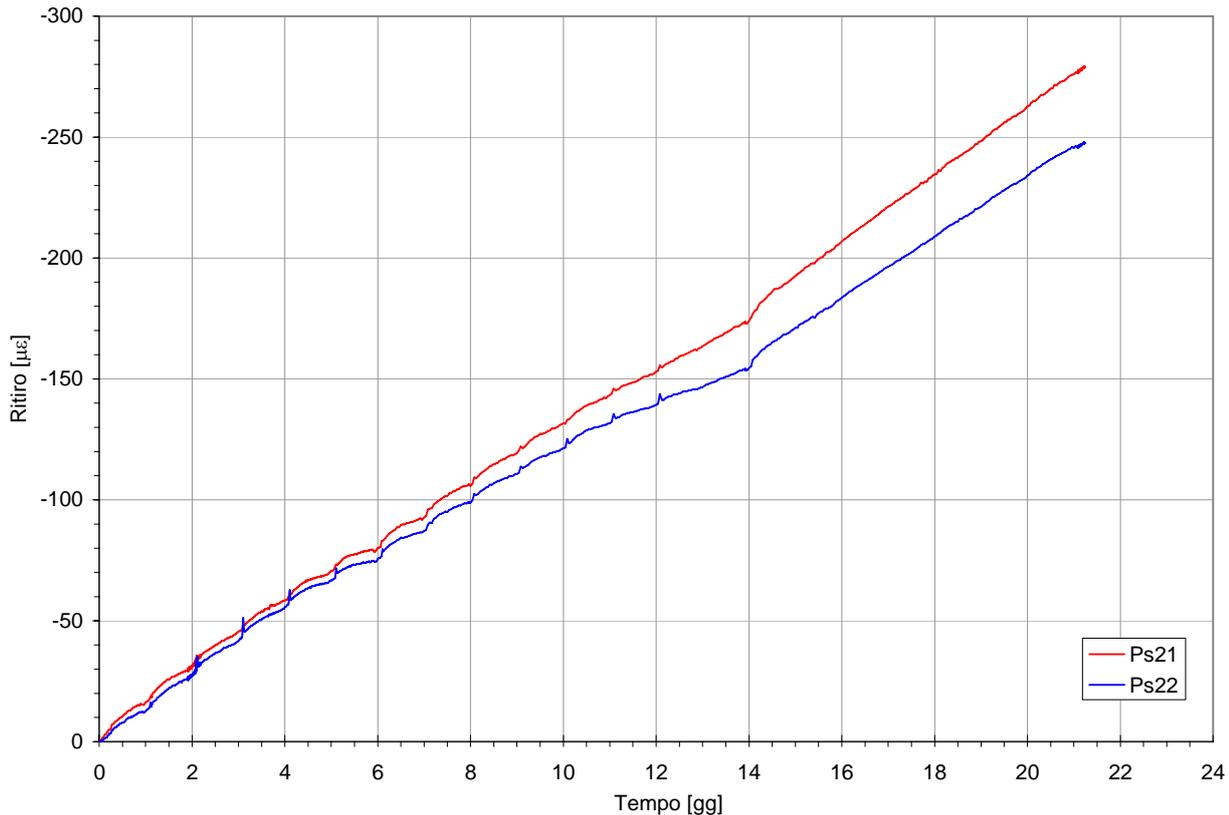


Grafico 10.4: andamento del ritiro su due cilindrici, valutato a partire da 6 gg dopo il getto di complet.

#### OSSERVAZIONI:

Come è evidente dal [grafico 10.4](#), il provino Ps21 presenta una deformazione maggiore rispetto a quella del provino Ps22 fin dall'inizio della prova, tale divergenza comporta una differenza alla fine della prova tra i due cilindri di circa  $35 \mu\epsilon$ . Entrambe le curve presentano un andamento ondulato con frequenza giornaliera, tale comportamento è dovuto all'escursione termica giornaliera del laboratorio.

Le prove di ritiro dei cilindri Ps21 e Ps22 sono iniziate il 09-10 e sono terminate il 16-11 quindi sono durate circa 21 giorni, per maggiore chiarezza si precisa che l'origine del grafico coincide con il giorno 09-10 e non con il giorno 27-09 dei precedenti grafici.

### 10.2.4 Ritiro termico del cubo di calcestruzzo tradizionale

Anche per i provini cilindrici Ps21 e Ps22 sono state fatte le stesse considerazioni descritte al paragrafo 10.2.2 relative al ritiro termico dovuto alla variazione di temperatura ambientale.

Facendo riferimento allo stesso grafico 10.2 per le deformazioni dovute alla sola escursione termica, sono state prodotte delle nuove curve per Ps21 e Ps22 che rappresentano il solo ritiro del calcestruzzo. L'operazione eseguita per fare ciò è stata descritta nel paragrafo 10.2.2.

Guardando il [grafico 10.5](#) si nota che entrambe le curve presentano una deformazione massima inferiore a quelle del grafico 10.4 di circa  $20 \mu\epsilon$  come quelle rilevate dal grafico 10.2 in 21 giorni di prova, in oltre è meno evidente, come per i cilindri P4 e P5, l'effetto dell'escursione termica giornaliera, essendo stata sottratta con la procedura suddetta.

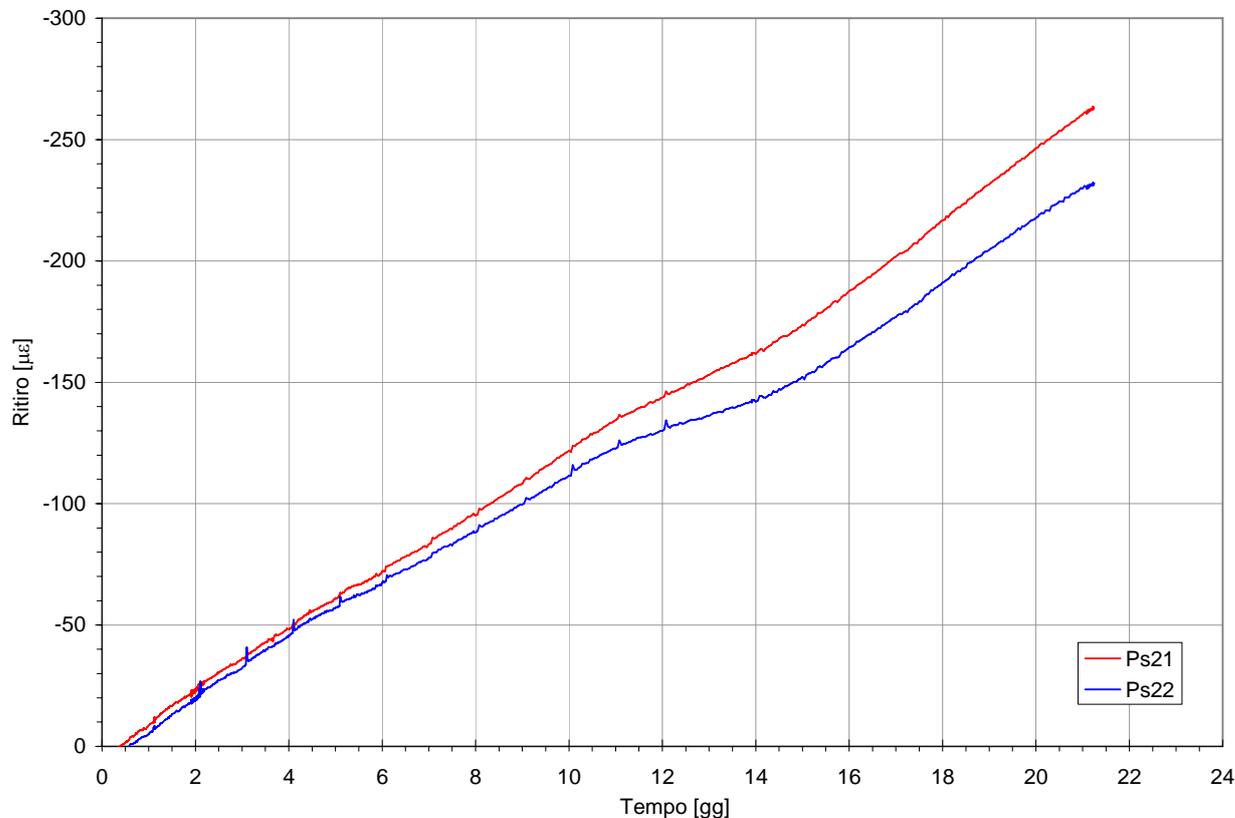


Grafico 10.5: andamento del ritiro depurato della deformazione da variazione termica

## 10.3 Prove di creep su provini cilindrici

Tutte le prove di creep svolte su provini cilindrici sono state eseguite con uguali modalità e attrezzature.

I provini utilizzati per ciascuna prova sono stati inseriti in un apposito telaio metallico entro il quale è stato possibile applicare ad essi una certa forza.

Per ogni prova sono stati utilizzati 2 cilindri, aventi un diametro di circa 15 cm. L'intensità del carico agente in un certo telaio è stata determinata in modo tale che sui "provini agisse una tensione pari a circa il 55% della tensione di rottura. Quest'ultima è stata determinata andando a rompere, prima dell'esecuzione della prova, alcuni provini generati dallo stesso getto di quelli utilizzati poi per la prova di creep.

La teoria sulla viscosità del calcestruzzo considera che il materiale abbia un comportamento lineare per stati tensionali inferiori al 40÷45% della tensione di rottura, oltre i quali si manifestano fenomeni di non linearità.

Per ciascun stato tensionale sono stati previsti due provini in modo da poter confrontare e mediare i risultati della prova e valutarne meglio l'attendibilità.

### 10.3.1 Considerazioni sulla prova e Modalità di esecuzione

Come prima cosa si è provveduto a incollare sui provini cilindrici gli estensimetri, ciascuna coppia di questi è stata poi collegata ad un cavo con annesso un connettore, definendo così un canale che sarebbe poi stato inserito nella 2100. Maggiori dettagli su tali argomenti sono presenti nel capitolo sulla strumentazione.

Successivamente il telaio è stato portato nella zona in cui è stata eseguita la prova. Tale telaio è costituito da due grosse piastre metalliche posizionate alle due estremità e unite da 4 grosse barre metalliche filettate nelle parti terminali, in modo tale che la distanza tra le piastre possa essere regolata andando a ruotare i vari dadi.

Gli elevati spessori e diametri, rispettivamente delle piastre e delle barre, sono dovuti all'esigenza di garantire l'indefornabilità del telaio durante lo svolgimento della prova. Sopra alla piastra inferiore è posizionato un pistone attraverso il quale viene fornito il carico ai cilindri. Il pistone viene alimentato mediante una pompa manuale ad olio. Sotto alla piastra superiore viene fissata una cella di carico attraverso la quale è possibile valutare l'intensità del carico che si sta applicando ai provini (figura 10.3).

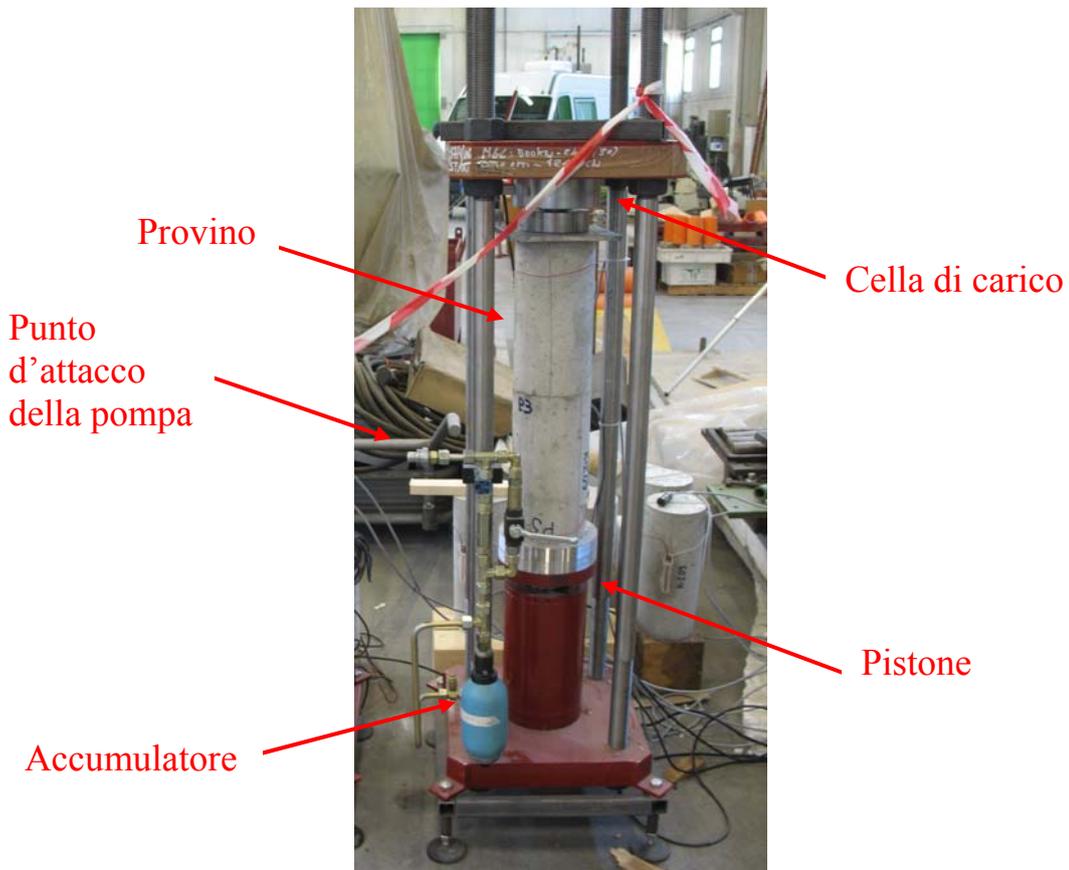


Figura 10.3 : caratteristiche del telaio della prova di creep

Nel telaio è inserita anche un'altra apparecchiatura, chiamata accumulatore (figura 10.4): questo strumento è suddiviso in 2 camere (in una c'è dell'olio e nell'altra del gas) separate da una membrana la cui curvatura è rivolta verso la camera contenente olio fintanto che su essa non agisce una pressione (pressione di precarico) pari a circa  $50 \div 55$  bar, per effetto della quale la membrana inverte la propria curvatura mettendo in pressione il gas e dunque il pistone, essendo questo collegato alla camera del gas.

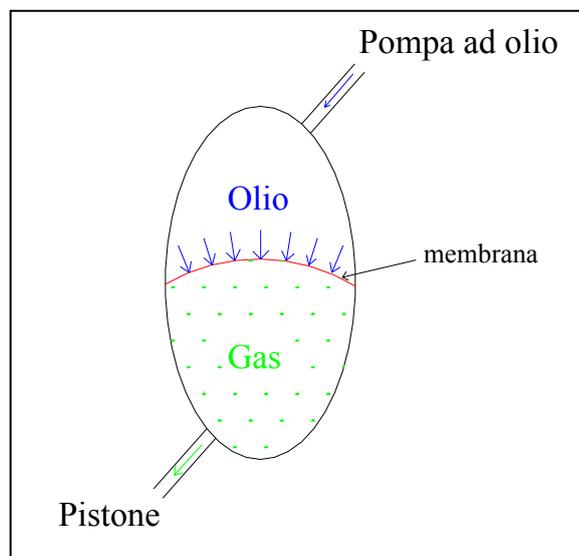


Figura 10.4 : accumulatore

A seguito degli accorciamenti viscosi dei provini, si ha un'attenuazione del contrasto fornito da essi sul pistone, da cui ne deriva una conseguente espansione del gas (con lieve riduzione di pressione) che fa sì che il pistone segua gli accorciamenti sviluppatasi. Di tanto in tanto è comunque necessario riportare la pressione del gas al valore iniziale. Per far ciò si inserisce il connettore della pompa in quello fissato al telaio che è in comunicazione con la camera ad olio dell'accumulatore. Azionando la pompa si va ad incrementare la pressione nella camera dell'olio e di conseguenza, per mezzo della membrana, si incrementa la pressione del gas che si ripercuote poi in un aumento di carico per i cilindri.

Attraverso questo strumento si riesce a far sì che il carico sia in grado di 'seguire le deformazioni' dei provini, garantendo che il suo valore si mantenga circa costante nel tempo.

Si è passati poi alla sistemazione dei cilindri nel telaio, andando a ruotare le basi di questi le une sulle altre in modo da cercare di compensare le irregolarità presenti su esse, così da ottenere una colonna il più rettilinea possibile al fine di garantire la centralità del carico, ossia la coincidenza tra l'asse del carico e quello della colonna.

Una volta posizionati i cilindri si è provveduto ad abbassare la parte superiore del telaio alla quale è collegata la cella di carico; si è fatto in modo che quest'ultima fosse a contatto con la faccia superiore dell'ultimo cilindro, ma che non esercitasse carico in modo che il successivo azzeramento di tutti i canali (incluso quello della cella stessa) fosse il più preciso possibile.

Prima dell'inizio della prova tutti i canali estensimetrici sono stati letti con la P3500, così da definire gli zeri di partenza dei vari canali con quegli strumenti che sarebbero poi stati utilizzati dopo la fase iniziale d'acquisizione dati tramite computer.

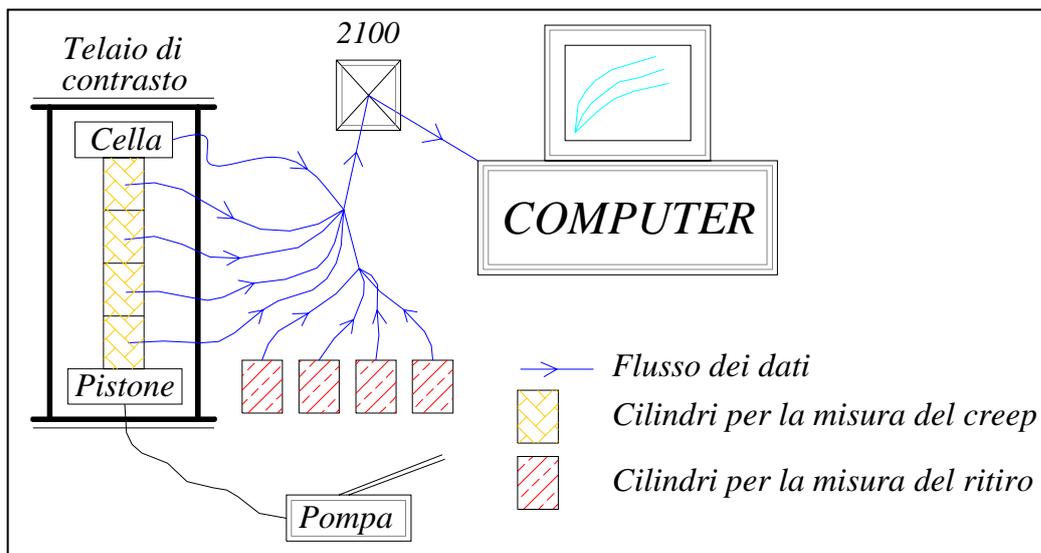


Figura 10.5 : modalità di acquisizione dati nella prova di creep su provini cilindrici

La fase successiva è stata quella di collegare tutti i canali alla 2100, sia quelli dei cilindri del telaio che quelli per la valutazione del ritiro (figure 10.5 e 10.6), operando poi su essa per fissare il voltaggio, il bilanciamento del ponte e il gain di ciascun canale (tabella 10-1). Si è poi provveduto ad inserire nel programma d'acquisizione le costanti dei vari strumenti utilizzati (estensimetri e cella di carico).

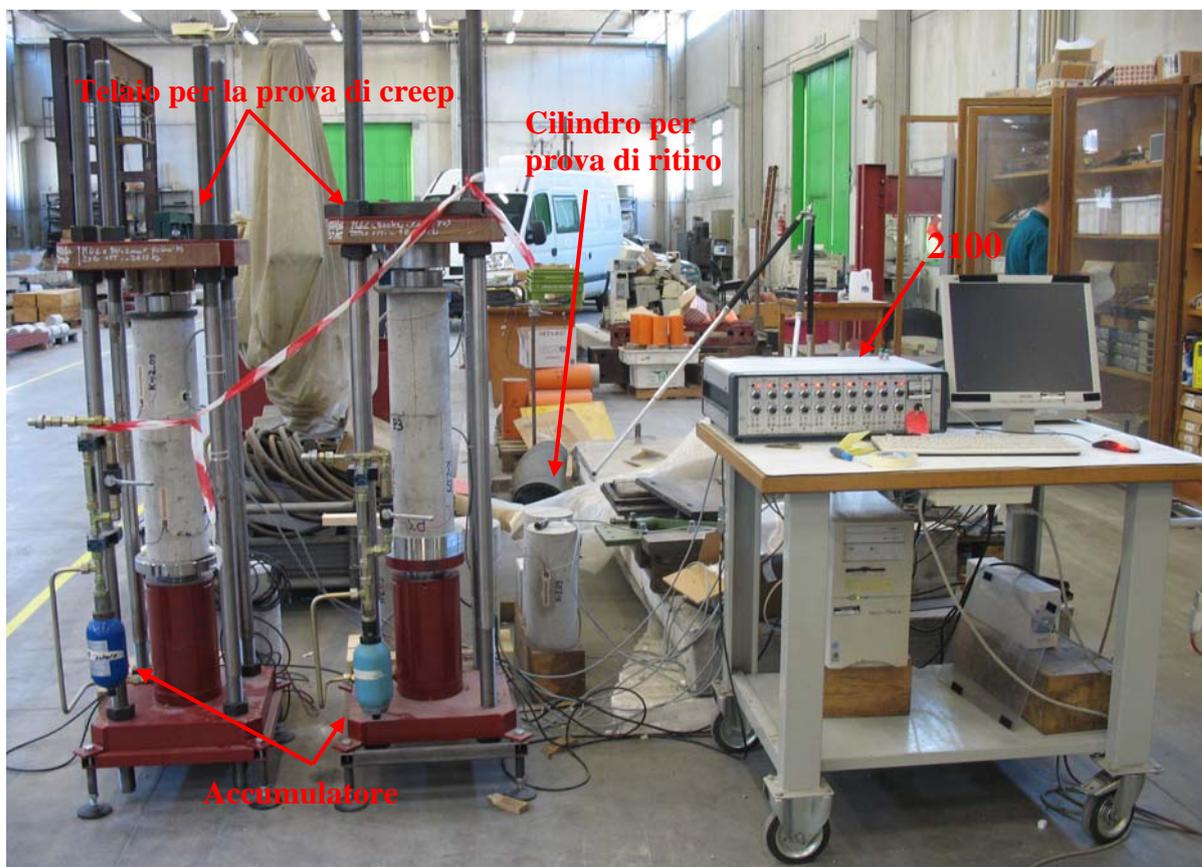


Figura 10.6 : componenti della prova di creep su provini cilindrici

Dopo aver collegato la pompa al telaio è stato possibile dare il via alla prova iniziando a caricare i cilindri posti nel telaio. Generalmente la fase di carico è abbastanza rapida e in qualche minuto si raggiunge il carico preventivato.

I vari canali sono rimasti collegati al computer avendo cura di mantenere un intervallo di lettura del sistema d'acquisizione molto basso all'inizio, principalmente in fase di carico e subito dopo, per poi progressivamente ampliarlo.

Nella figura 10.7 riportiamo i telai sede delle prove di creep descritte in questo paragrafo.



Figura 10.7 : modalità di acquisizione dati nella prova di creep su provini cilindrici

### 10.3.2 Prova di creep su provini cilindrici in cls prefabbricato

La prova è iniziata il il 27-09-07 collegando i canali dei provini del telaio, insieme a quelli dei cilindri della prova di ritiro descritti in precedenza, alla 2100.

Prima di iniziare la prova è stata fatta una lettura con la P3500, si è fissato il voltaggio , il bilanciamento del ponte e il gain di ciascun nuovo canale. Si è provveduto ad inserire le costanti dei vari strumenti utilizzati e della nuova cella di carico nel programma d'acquisizione (tabella 10-3).

Data	Ora	Sist. Acquisizione	Cella 1	P2	P3
27/09/2007	18.30	P 3500	438	-520	-65
		Gain 2100	0.54	1.20	1.20
		Bal 2100		6.38	5.24
		K	25500	2.09	2.09

Tabella 10-3: provini cilindrici utilizzati il 27-09-07 per le prove di creep

Per definire il carico da applicare ai provini si è proceduto, visualizzando la deformazione ultima del calcestruzzo ( $\epsilon_u$ ) nella trave a fine carico di prima fase (127 KN), si è moltiplicato per il modulo del calcestruzzo (E) tale deformazione ultima ottenendo così il valore del-

la tensione nel calcestruzzo ( $\sigma$ ). Per ultimo si è moltiplicata la tensione per l'area del provino (A) ottenendo il valore del carico da applicare (P).

$$\varepsilon_u = 450 \mu\varepsilon$$

$$E = 33000 \text{ MPa/mm}^2$$

$$\sigma = \varepsilon_u \cdot E = 14,8 \text{ MPa}$$

$$A = 176 \text{ cm}^2$$

$$P = A \cdot \sigma = 22970 \text{ Kg} \approx 23000 \text{ Kg}$$

Successivamente, in seguito ad una seconda fase di carico applicato alla trave (177 KN), il giorno 30-10-07 si è incrementato il carico agente sui pistoncini di una quantità pari a 3000 Kg, calcolato con la procedura precedentemente descritta.

La prova di valutazione del creep è attualmente in atto, ed in base ai dati ottenuti dalla rilevazione strumentale sono stati prodotti una serie di grafici che descrivono nel tempo, in funzione del carico, e della tensione sul provino l'andamento della deformazione viscosa.

Si riportano di seguito i grafici ottenuti dalle elaborazioni dei dati raccolti:

Dal grafico 10.6 è rappresentato l'andamento della deformazione viscosa nel tempo che è espresso in scala logaritmica. E' evidente come la fase di carico sia durata circa 3 minuti, mentre il carico sia stato mantenuto costante per circa 33 giorni, per poi essere incrementato in pochi minuti e di nuovo mantenuto costante fino alla fine della prova.

Sul grafico è disegnata una linea nera che rappresenta l'andamento ideale che avrebbe dovuto avere la curva P3. Tali discontinuità sono conseguenza di un cattiva stagnatura dei terminali dell'estensimetro con i cavi che vengono collegati alla 2100 è stata opportunamente rifatta. In generale le due curve presentano un andamento simile con deformazione ultima pari 1200  $\mu\varepsilon$  per P2 e 1120 per P3. L'incremento verticale in corrispondenza del 33 esimo giorno di prova, è una deformazione istantanea subita dal cls, è dovuto ad un aumento del carico applicato P poiché il 30-10-07 è stata eseguita una seconda fase di carico sulla trave e quindi anche sui provini cilindrici si è incrementato il carico della quantità corrispondente.

Nel grafico 10.7 si vede l'andamento della deformazione viscosa in funzione del carico e perciò si vedono chiaramente i due incrementi di carico applicati ai cilindri: uno all'inizio della prova che ha raggiunto i 23000 Kg ed il secondo di altri 3000 Kg, per un totale di 26000 Kg applicato il 30-10-07 alle ore 15.20.

Nel grafico 10.8 è graficato l'andamento delle deformazioni viscosi in funzione della tensione nel cilindro

## 10. Prove per la valutazione del ritiro e del creep dei calcestruzzi

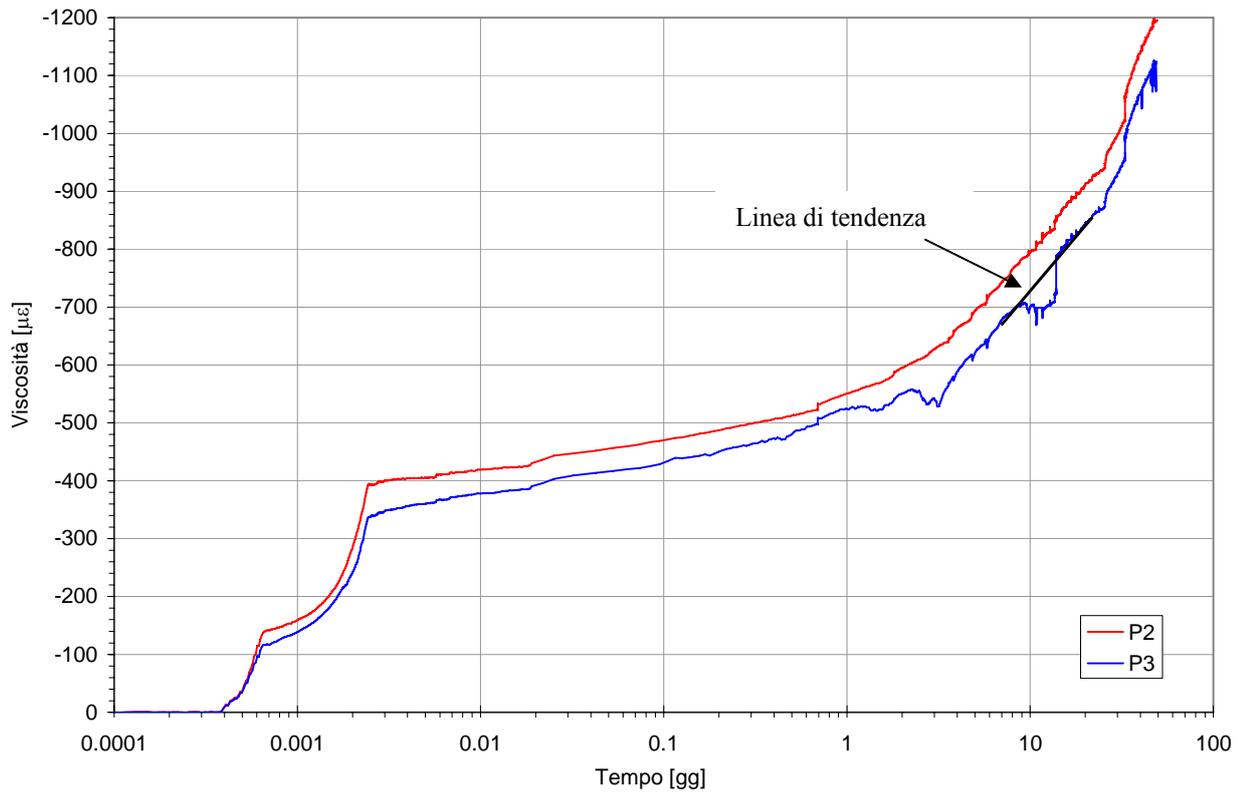


Grafico 10.6: andamento nel tempo della deformazione viscosa

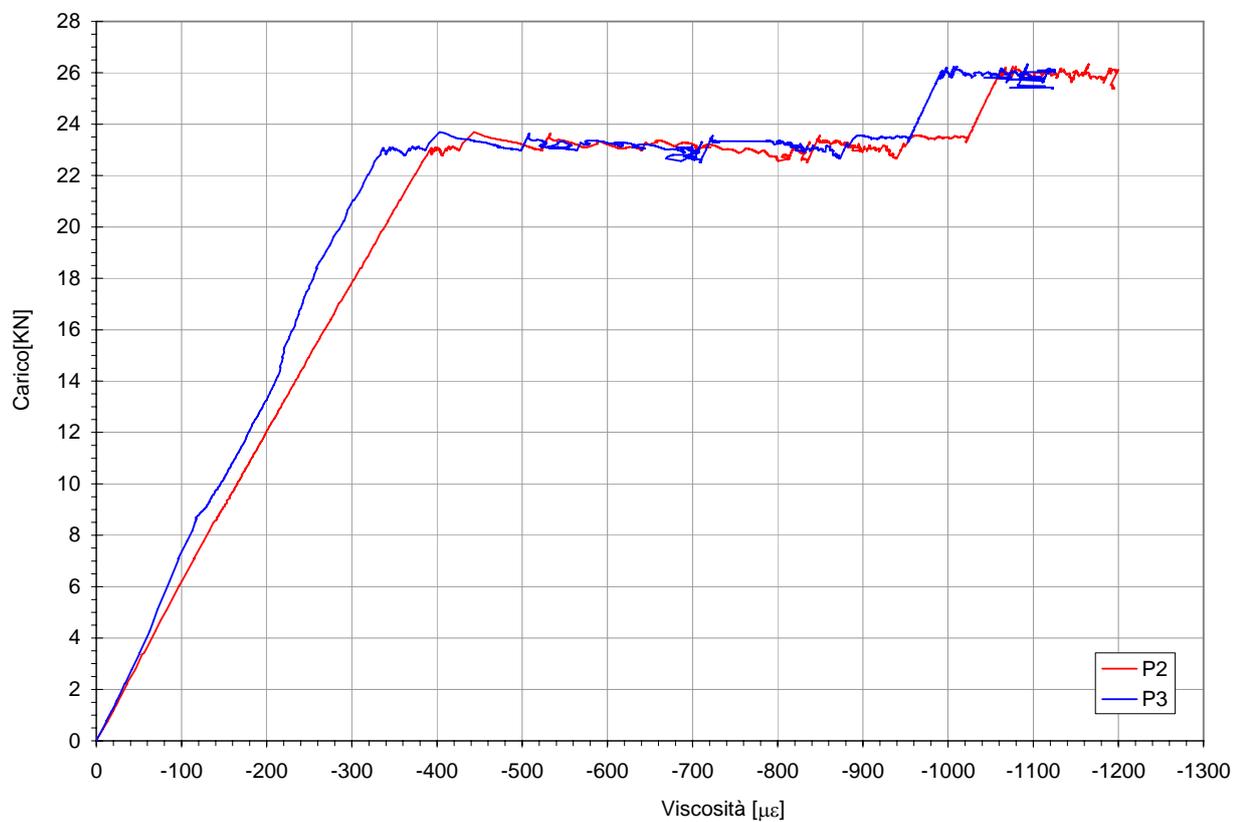


Grafico 10.7: andamento della deformazione viscosa in funzione del carico

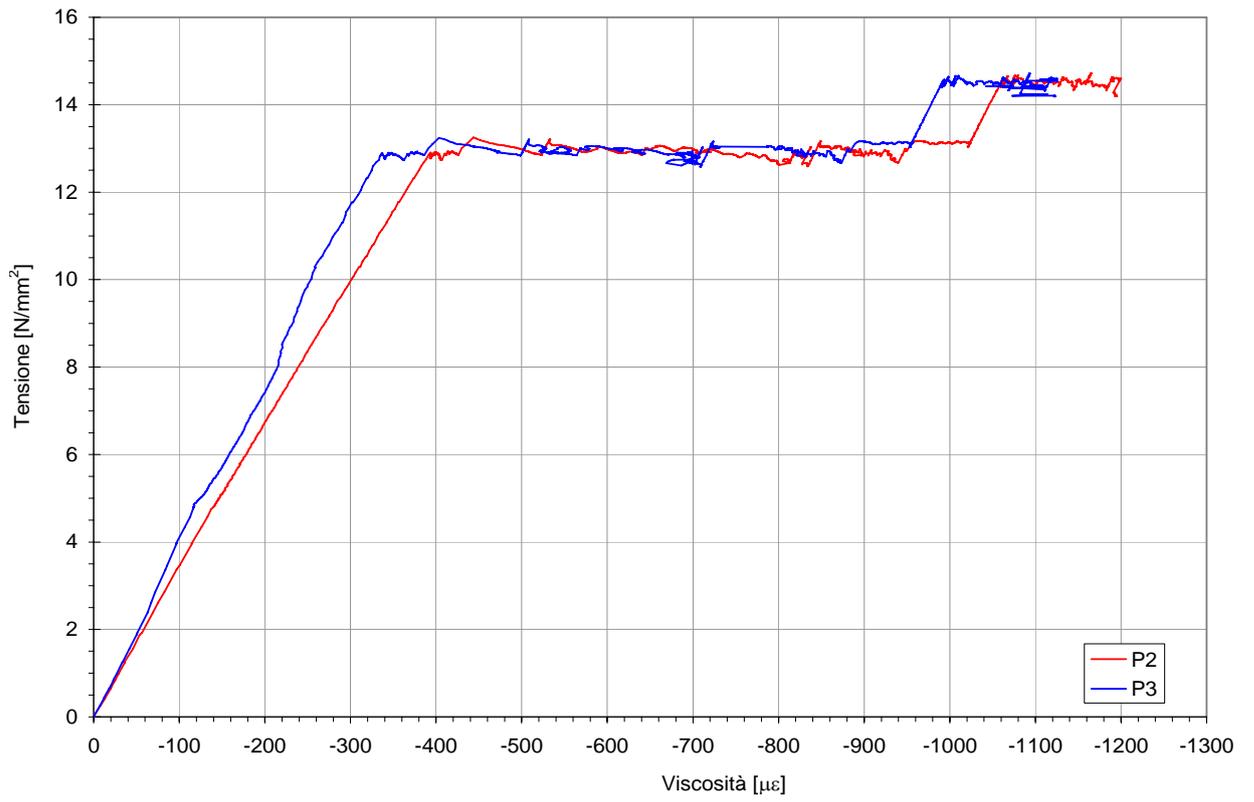


Grafico 10.8: andamento della deformazione viscosa in funzione della tensione nel cilindro

### 10.3.3 Prova di creep su provini cilindrici di cls di completamento

La prova è iniziata il 30-10-07 alle ore 15.20 collegando i canali dei provini Ps23 e Ps24 del telaio, insieme a quelli dei cilindri della prova di ritiro e creep descritti in precedenza, alla 2100.

Prima di iniziare la prova è stata fatta una lettura con la P3500, si è fissato il voltaggio, il bilanciamento del ponte e il gain di ciascun nuovo canale. Si è provveduto ad inserire le costanti dei vari strumenti utilizzati e della nuova cella di carico nel programma d'acquisizione (tabella 10-5). Questo stesso giorno è stato staccato dal sistema d'acquisizione il cilindro P4, per mancanza di canali di lettura.

Data	Ora	Sist. Acquisizione	Cella 2	Ps23	Ps24
30/10/2007	15.20	P 3500	-125	-523	-436
		Gain 2100	0.54	1.20	1.20
		Bal 2100		6.41	6.19
		K	25200	2.09	2.09

Tabella 10-4: provini cilindrici utilizzati il 30-10-07 per le prove di creep

Si riportano di seguito i grafici ottenuti dalle elaborazioni dei dati strumentali raccolti.

Dal [grafico 10.9](#) è rappresentato l'andamento della deformazione viscosa nel tempo che è espresso in scala logaritmica. E' evidente la fase di carico sia durata circa 3 minuti, mentre il carico sia stato mantenuto costante per circa 16 giorni.

In generale le due curve presentano un andamento simile con deformazione ultima pari 530  $\mu\epsilon$  per Ps24 e 490 per Ps23.

Nel [grafico 10.10](#) si vede l'andamento della deformazione viscosa in funzione del carico e perciò si vede chiaramente che il carico applicato è pari a 5600 Kg ed è mantenuto costante fino alla fine producendo una deformazione viscosa media di circa 380  $\mu\epsilon$ .

Nel [grafico 10.11](#) è graficato l'andamento delle deformazioni viscosi in funzione della tensione nel cilindro.

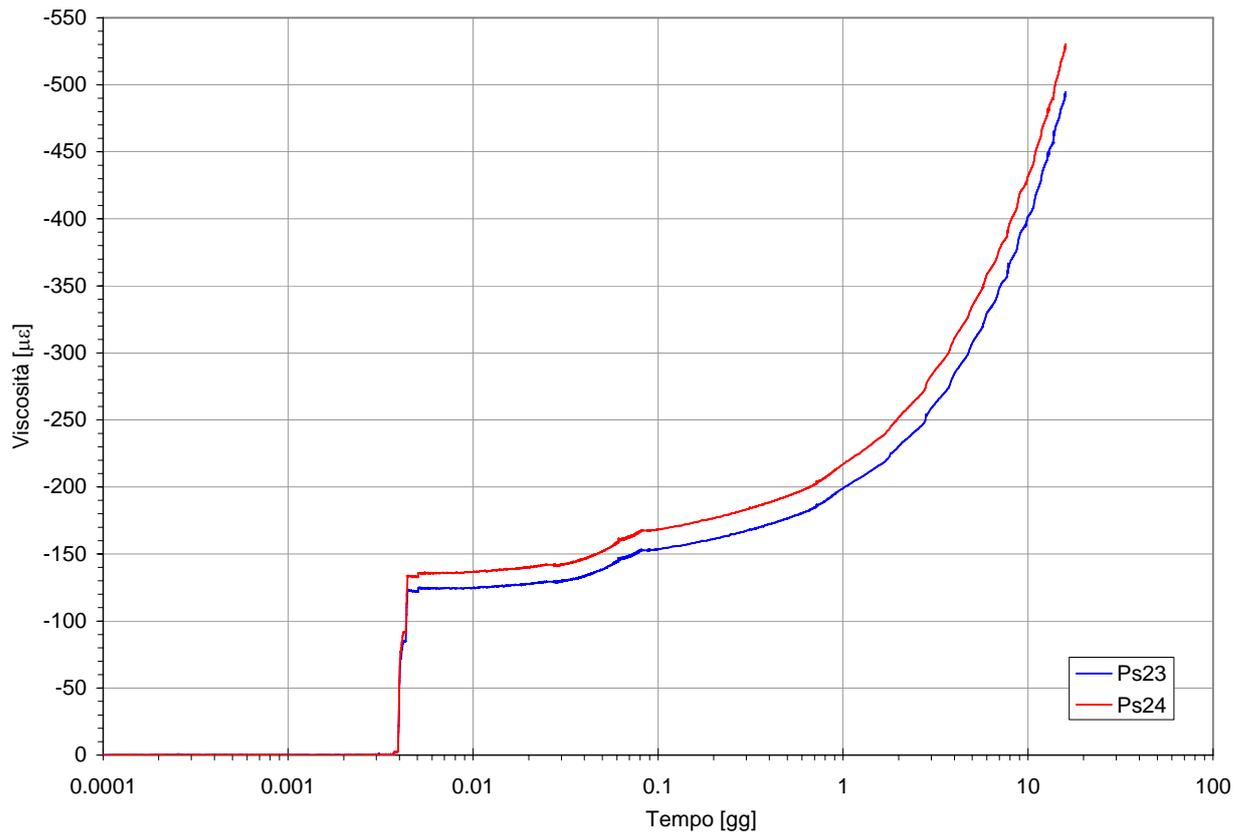


Grafico 10.9: andamento della deformazione viscosa in funzione del carico

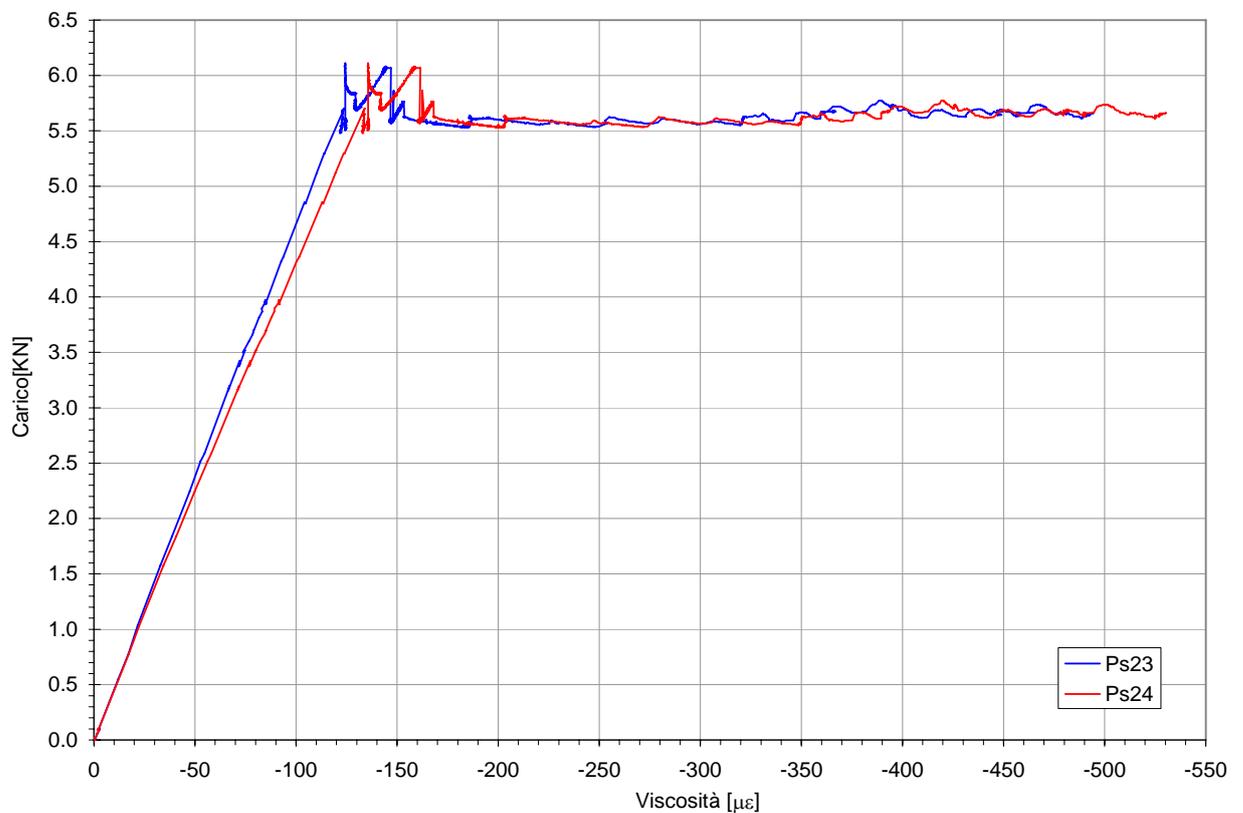


Grafico 10.10: andamento della deformazione viscosa in funzione del carico

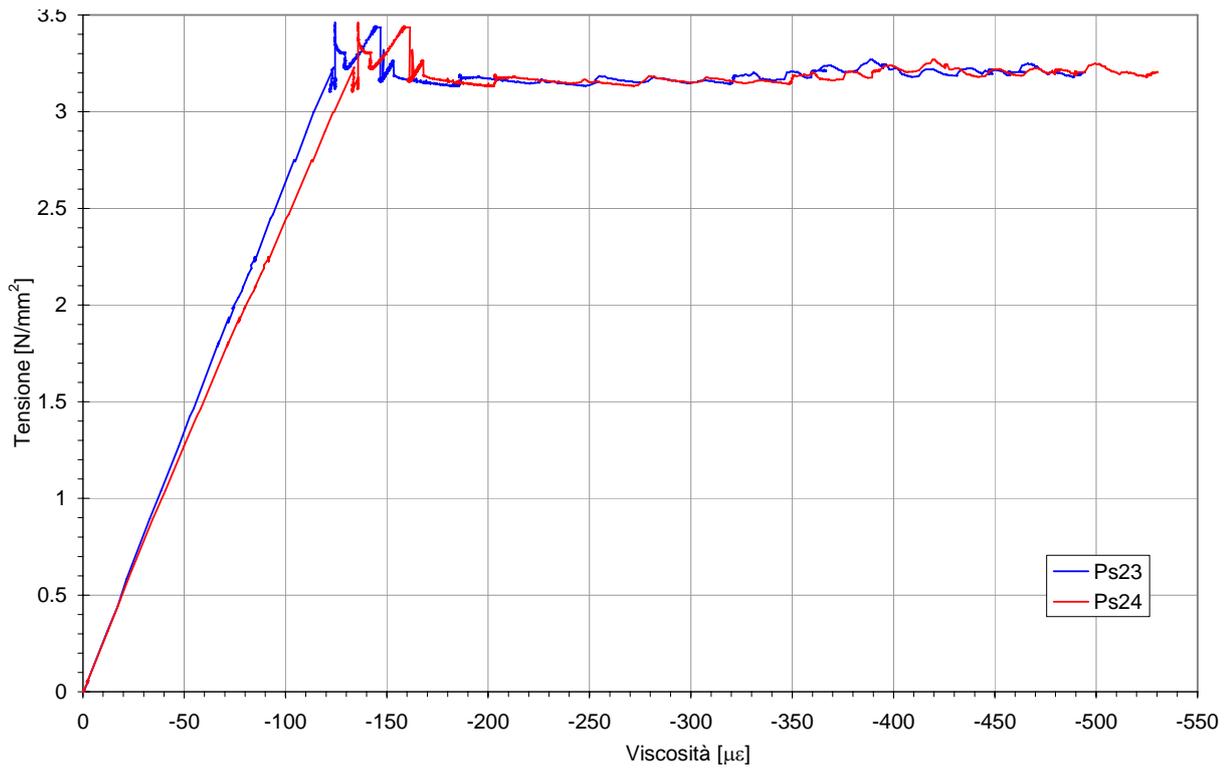


Grafico 10.11: andamento della deformazione viscosa in funzione della tensione nel cilindro



# 11 Prova di rottura della trave APE

## 11.1 Generalità

Nel seguente capitolo sarà descritta l'intera prova di rottura effettuate sulla trave APE tenendo come filo conduttore il tempo di esecuzione di ogni operazione effettuata.

Lo scopo di tale prova è stato quello di determinare l'evoluzione dello stato deformativo della trave indotto da una serie di fasi di carico che si sono succedute in un tempo reale di 51 giorni.

Sono stati applicati incrementi di carico successivi mantenuti costanti per un determinato periodo di tempo, in modo da consentire l'osservazione delle deformazioni viscosse indotte nel calcestruzzo dal carico costante applicato ed infine è stato incrementato il carico fino alla rottura della trave potendo così analizzarne il comportamento a rottura.

Nella presente tesi viene analizzata tutta la prova di rottura (in questo capitolo), mentre nei capitoli 9 e 10 sono state fatte osservazioni sui materiali costituenti la trave.

La trave dopo essere stata gettata, scasserata è stata portata in laboratorio e posizionata su più traverse di legno (figura 11.1), dopo di che sono iniziati i preparativi per lo svolgimento della prova di rottura.



Figura 11.1: trave prima dell'inizio della fase di preparazione

La prima operazione è stata quella di tracciare la trave, ossia segnare su di essa i punti di applicazione degli strumenti necessari per l'acquisizione dei dati della prova. Nella fase successiva sono stati incollati sulla trave, nelle posizioni prestabilite, gli estensimetri e gli LVDT sulla superficie superiore del getto prefabbricato e gli estensimetri sulla armatura libera non ancora immersa nel getto di completamento. Fatto ciò la trave è stata sollevata e posata sul sistema di appoggi, adeguatamente ancorato al pavimento, sede della prova ed è stato possibile posizionare gli LVDT nella parte inferiore della trave per la misurazione degli spostamenti verticali. Finita l'operazione di incollaggio degli strumenti si sono collegati tutti gli strumenti al sistema d'acquisizione e dopo aver configurato il software si è dato inizio alla prova.

Lo schema statico utilizzato durante la prova (figura 11.2) è mostrato nella figura sottostante; il carico viene fornito per mezzo di due pistoni azionati da una pompa idraulica e disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria della trave, in modo tale che tra essi si abbia un momento costante. In sostanza lo schema statico creato è quello di una trave inflessa a quattro punti.

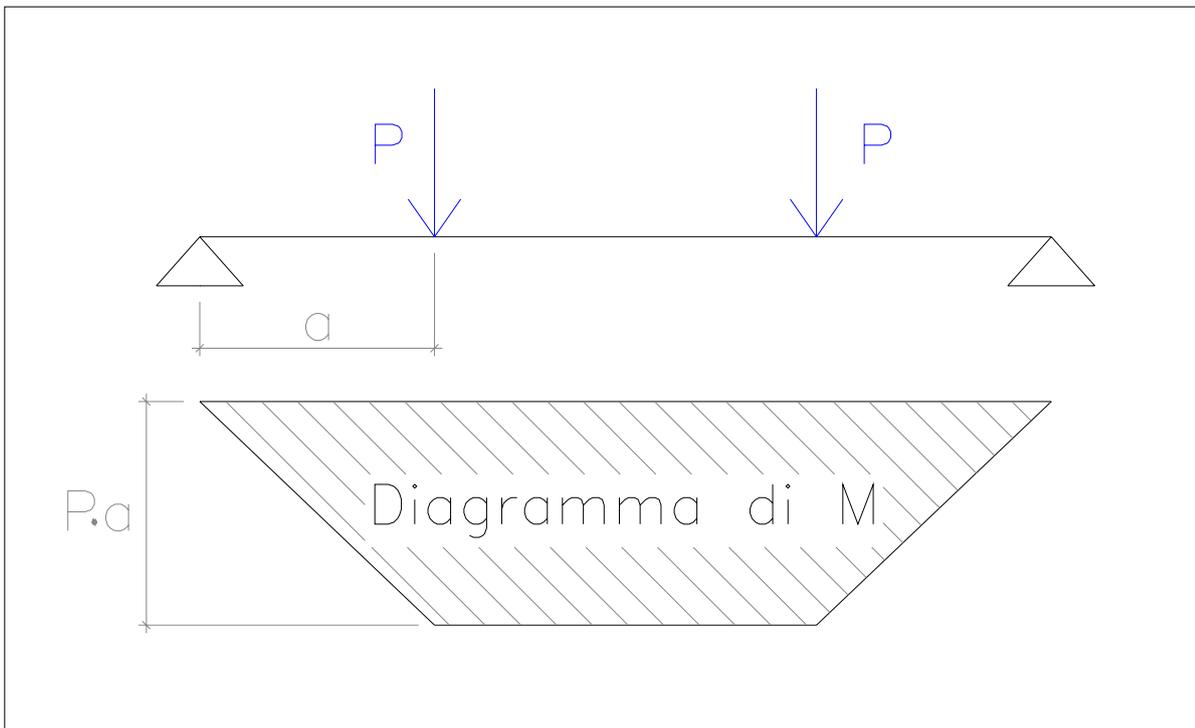


Figura 11.2: schema statico

## 11.2 Tracciatura della trave

Col termine tracciare si vuole indicare quella procedura attraverso la quale si definisce con cura l'esatta posizione che dovranno avere gli strumenti e i carichi sulla trave; tale posizionamento dipende da che cosa si vuole andare a valutare mediante la prova. Servendosi di una riga, una squadra e un pennarello si individuano gli allineamenti ed i punti di misura (figura 11.2).

Per le prove in esame la tracciatura è stata eseguita facendo riferimento a quanto illustrato nella figura 11.2 e descritto numericamente nelle tabelle 11-1 e 11-2.

Si sono individuate tre sezioni di studio (figura 11.3), due a sinistra del pistone sinistro (figura 11.4 e 11.5) e una in mezzeria della trave (figura 11.6) a ridosso della quale ed in maniera simmetrica sono stati disposti gli strumenti in modo da poter ottenere valori medi delle letture e avere una doppia dimostrazione del comportamento così da poter escludere errori di valutazione legati alla mal funzionamento di un qualsiasi strumento. In corrispondenza di tali sezioni sono già stati predisposti degli estensimetri sulle barre di armature che attualmente non sono più visibili, poiché sono immersi nel getto.

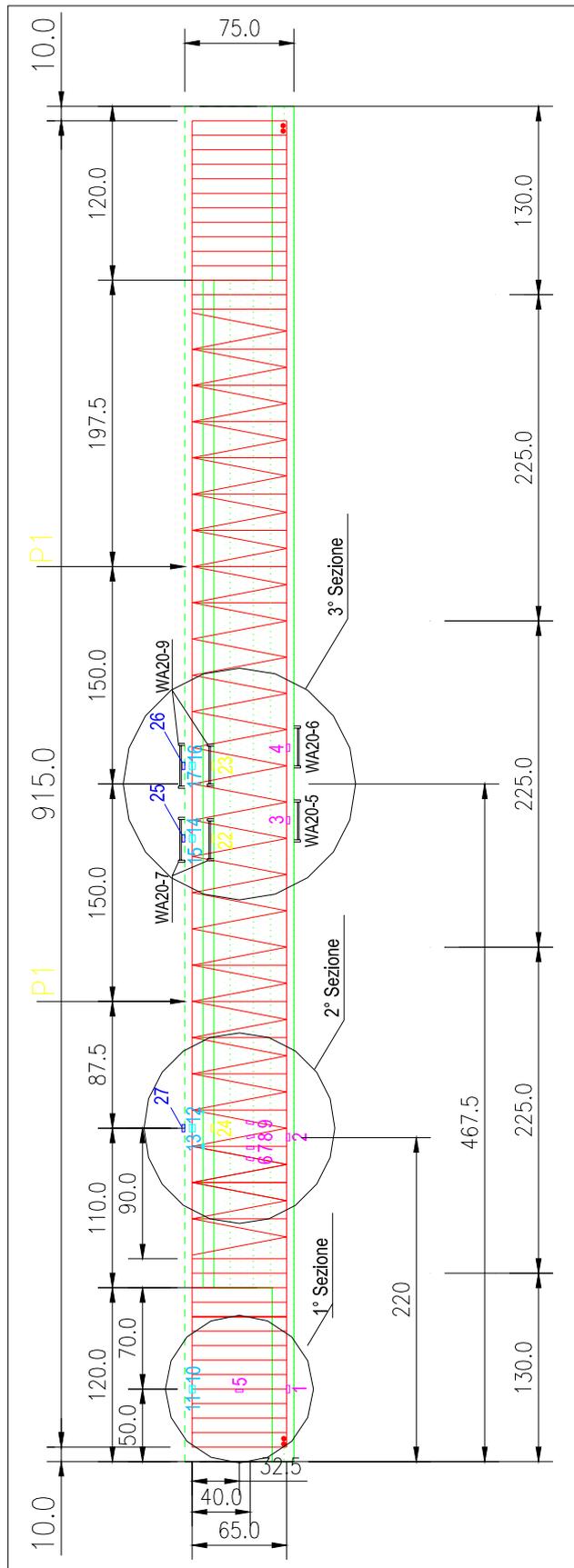


Figura 11.3: posizionamento degli strumenti

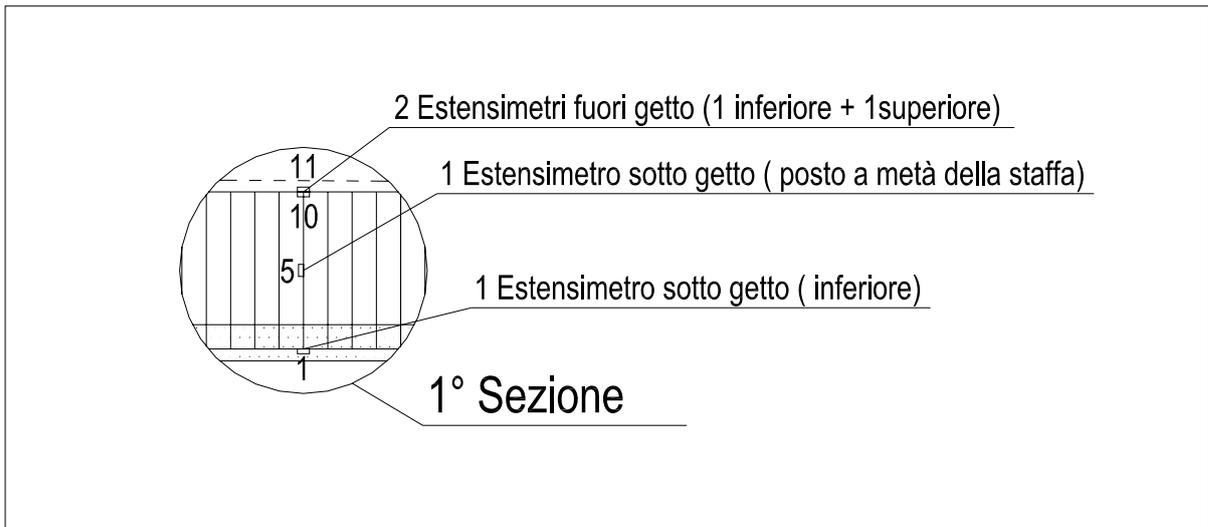


Figura 11.4: sezione 1, strumenti

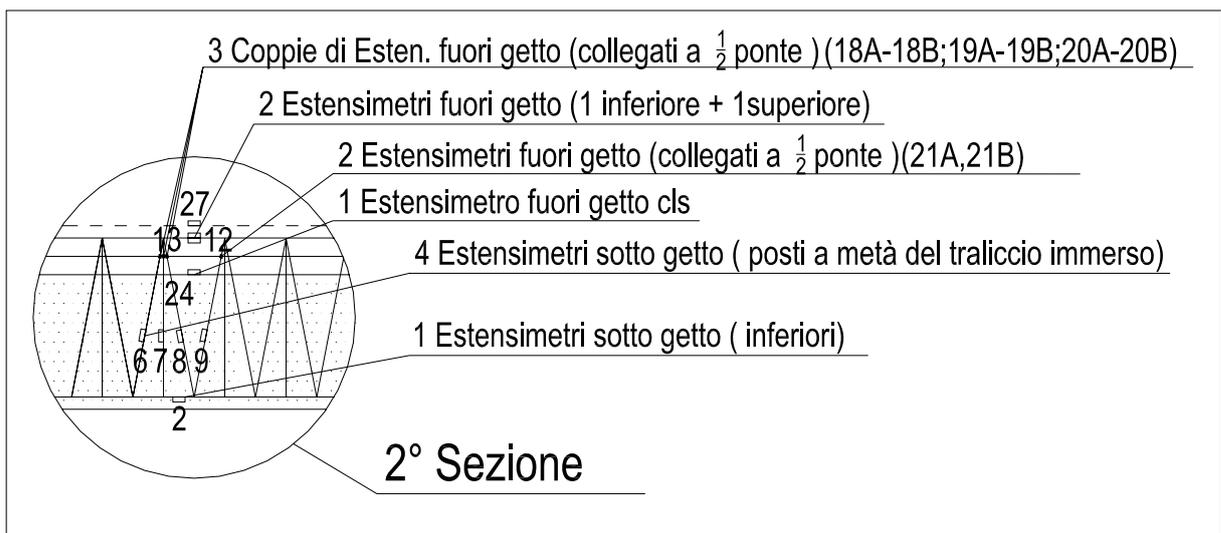


Figura 11.5: sezione 2, strumenti e modalità di collegamento

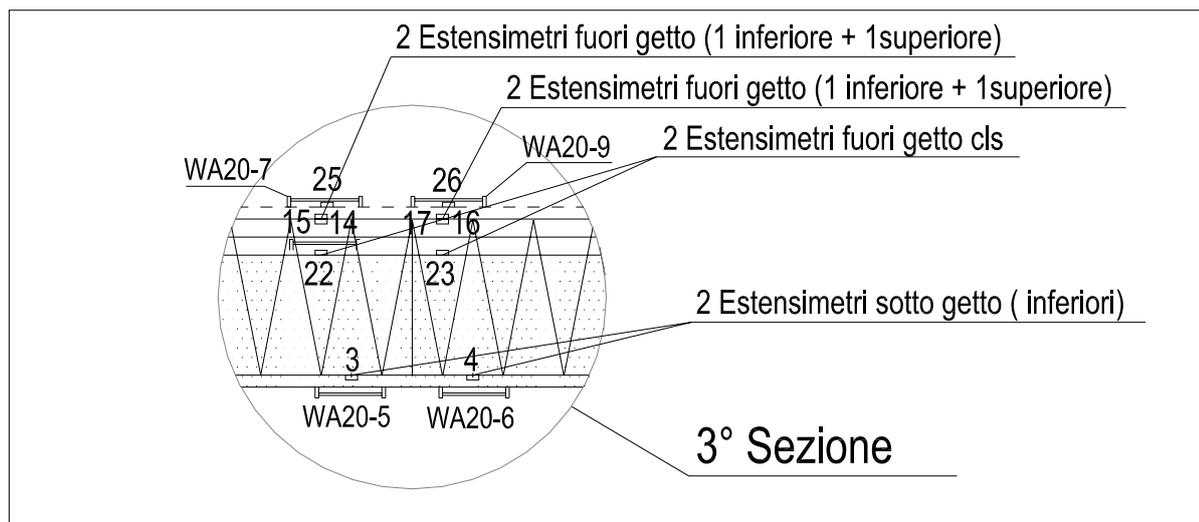


Figura 11.6: sezione 3, strumenti

L'esigenza di conoscere la collocazione esatta di tutti gli strumenti è necessaria per dare una migliore interpretazione dei dati strumentali e perchè si vuole determinare il comportamento sezionale della trave nella modo più preciso possibile.

Si riportano di seguito le tabelle 11-1 e 11-2, rispettivamente relative agli LVDT e agli estensimetri, contenente la posizione esatta, il giorno di applicazione e la caratteristica geometrica di ogni strumento applicato alla trave.

Strumento	WA20-5	WA20-6	WA20-7	WA20-9	WA20-7 2°fase	WA20-9 2° fase
Distanza dal lato sinistro della trave (cm)	427	480	427	480	427	480
Giorno di in-collaggio	26-set	26-set	26-set	26-set	09-ott	09-ott
L (cm)	26	26	26	26	28	28

Tabella 11-1:LVDT applicati alla trave

Strumento	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Distanza dal lato sinistro della trave (cm)	50	224	442	493	50	204	208	212	230
Giorno di in-collaggio	26-lug								
K <sub>G</sub>	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.14	2.10	2.10

Strumento	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18
Distanza dal lato sinistro della trave (cm)	60	50	220	220	430	430	485	485	206
Giorno di incollaggio	20-set								
$K_G$	2.10	2.10	2.10	2.10	2.13	2.10	2.13	2.13	2.13
Strumento	E19	E20	E21	E22	E23	E24	E25	E26	E27
Distanza dal lato sinistro della trave (cm)	208	210	230	430	485	220	430	485	220
Giorno di incollaggio	20-set	20-set	20-set	20-set	20-set	20-set	09-ott	09-ott	09-ott
$K_G$	2.13	2.13	2.13	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09

Tabella 11-2: estensimetri applicati alla trave

## 11.3 Preparazione della prova

### 11.3.1 Strumenti utilizzati nella prova

Per valutare lo stato deformativo a compressione e a trazione delle armature sono state disposti complessivamente 21 estensimetri. I primi nove estensimetri sono stati applicati il 26 Luglio 2007 presso la sede produttiva dell'APE e sono stati fin da prima dell'inizio della prova immersi nel cls prefabbricato (figura 11.7÷12). Tutti gli strumenti sono stati posizionati secondo la tracciatura prevista e adeguatamente protetti come descritto nel capitolo 6 della strumentazione. Tali estensimetri sono stati provati con lettura manuale mediante la P3500, senza annotarne la lettura, per verificarne la funzionalità, come mostrato in figura 11.13.

Sono invece state annotate le letture fatte dopo il getto prefabbricato e all'arrivo della trave in laboratorio per verificare che gli strumenti non avessero subito danni durante la fase di presa del calcestruzzo e durante il trasporto. Si riportano in seguito le letture effettuate su tali strumenti in ordine cronologico (tabelle 11-3).

Tutti gli estensimetri sono poi stati collegati al sistema di acquisizione regolato utilizzando i valori riportati in tabella 11-6, grazie al quale è stato monitorate la fase di sollevamento della trave dai traversi agli appoggi del sistema sede della prova di rottura.

Strumento	Data	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
P3500	07/09/2007	-870	-255	185	750	-534	-1133	365	-1102	-1204
Descrizione		Letture eseguita alle ore 11.00 prima del getto.								
P3500	07/09/2007	-960	-238	181	753	-566	-1129	367	-1091	-1207
Descrizione		Letture eseguita alle ore 12.15 dopo il getto.								
P3500	19/09/2007	-960	-400	-49	587	-604	-1126	390	-1124	-1163
Descrizione		Letture eseguita alle ore 8.50 in laboratorio								
P3500	19/09/2007	-966	-460	180	428	-652	-1121	377	-1132	-1303
Descrizione		Letture eseguita alle ore 11.30 con connettori.								

Tabella 11-3: letture manuali degli estensimetri sull'acciaio

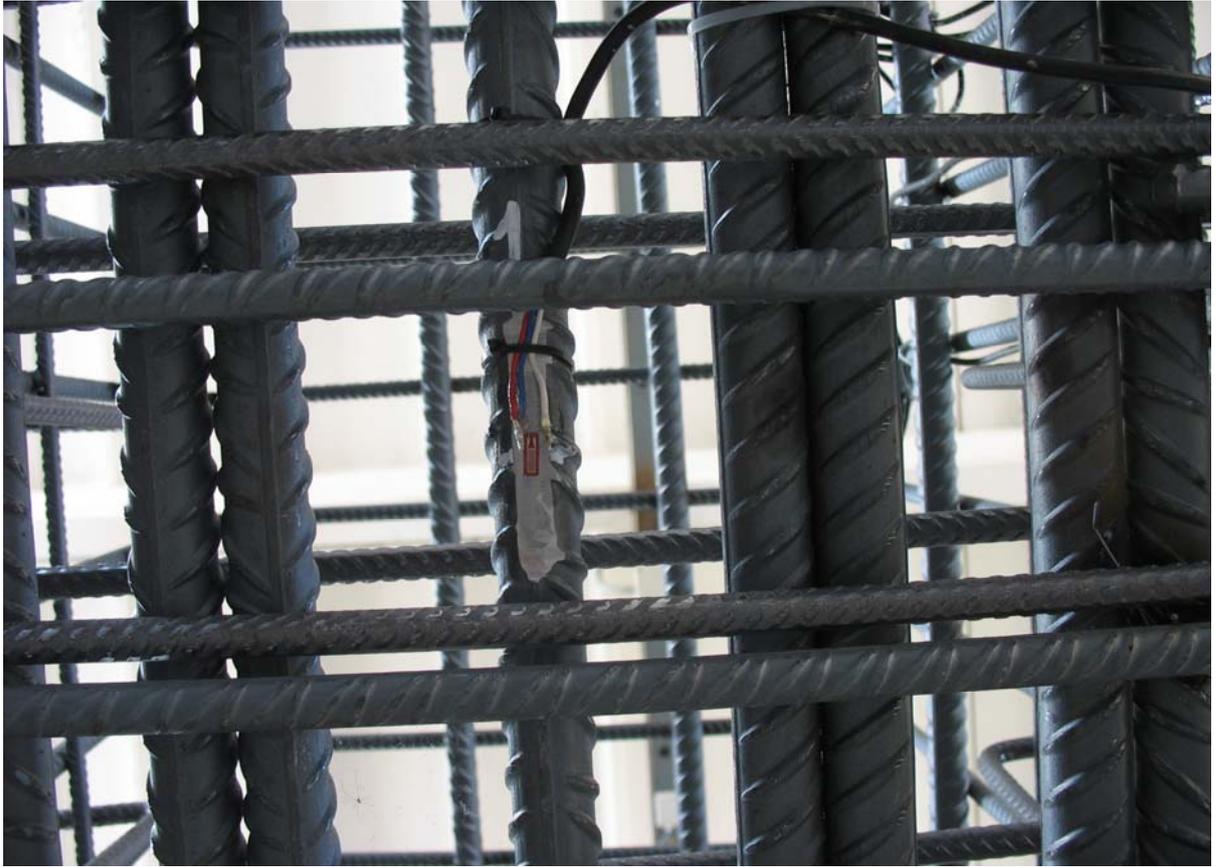


Figura 11.7: estensimetro 1 corrente inferiore longitudinale, sezione 1

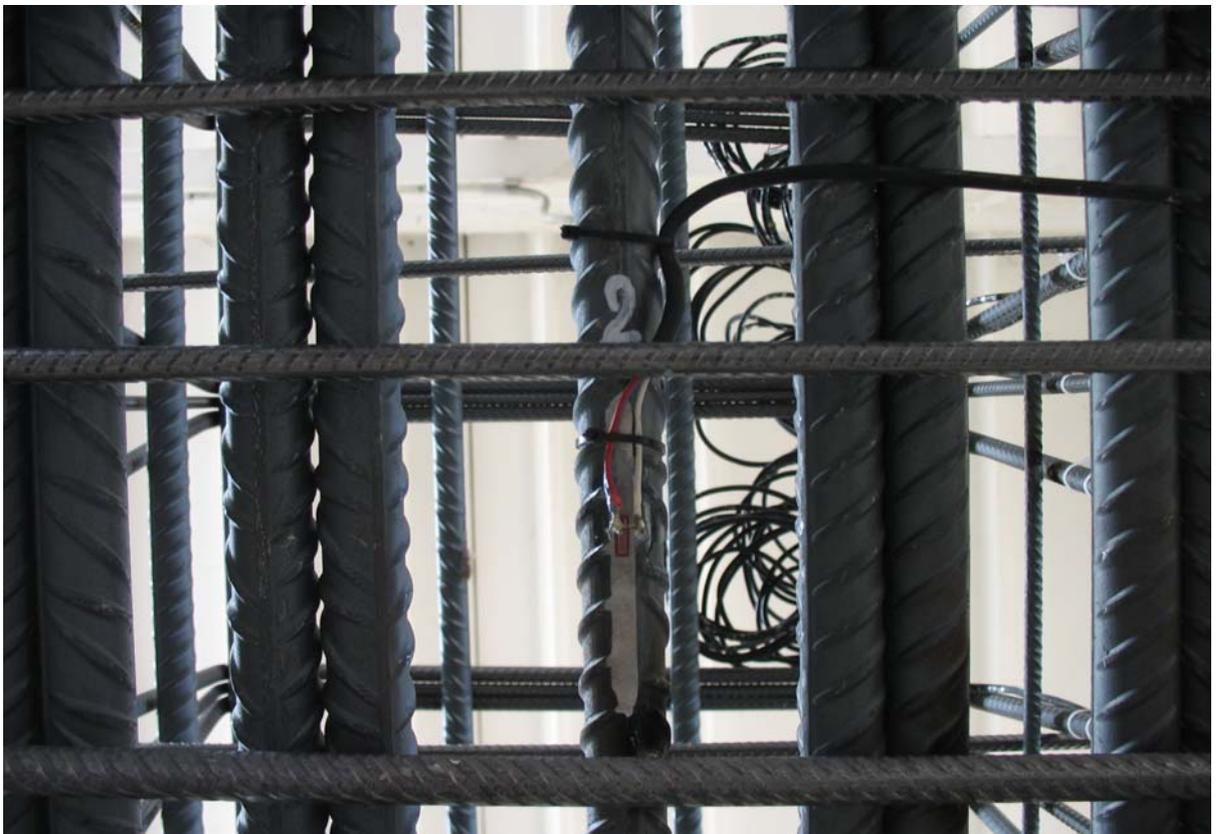


Figura 11.8: estensimetro 2 corrente inferiore longitudinale, sezione 2

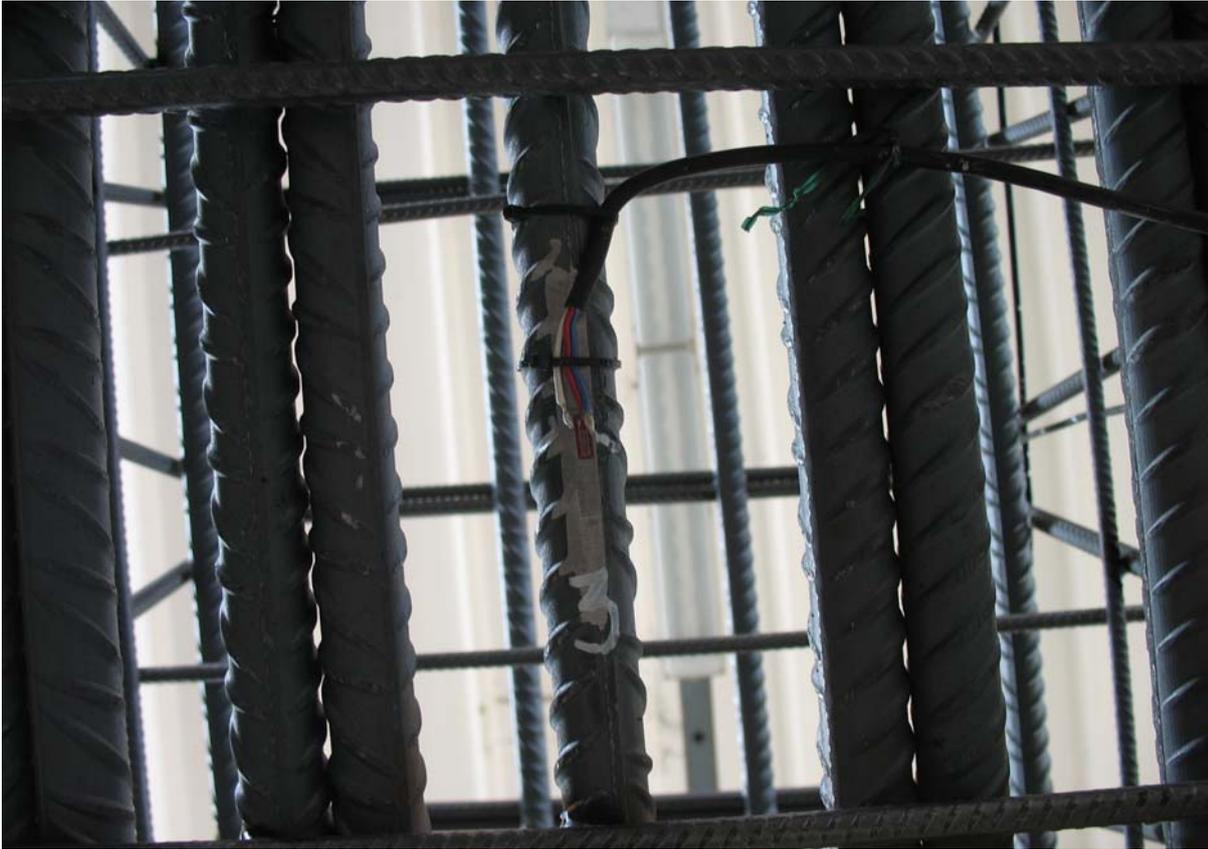


Figura 11.9: estensimetro 3 corrente inferiore longitudinale, sezione 3

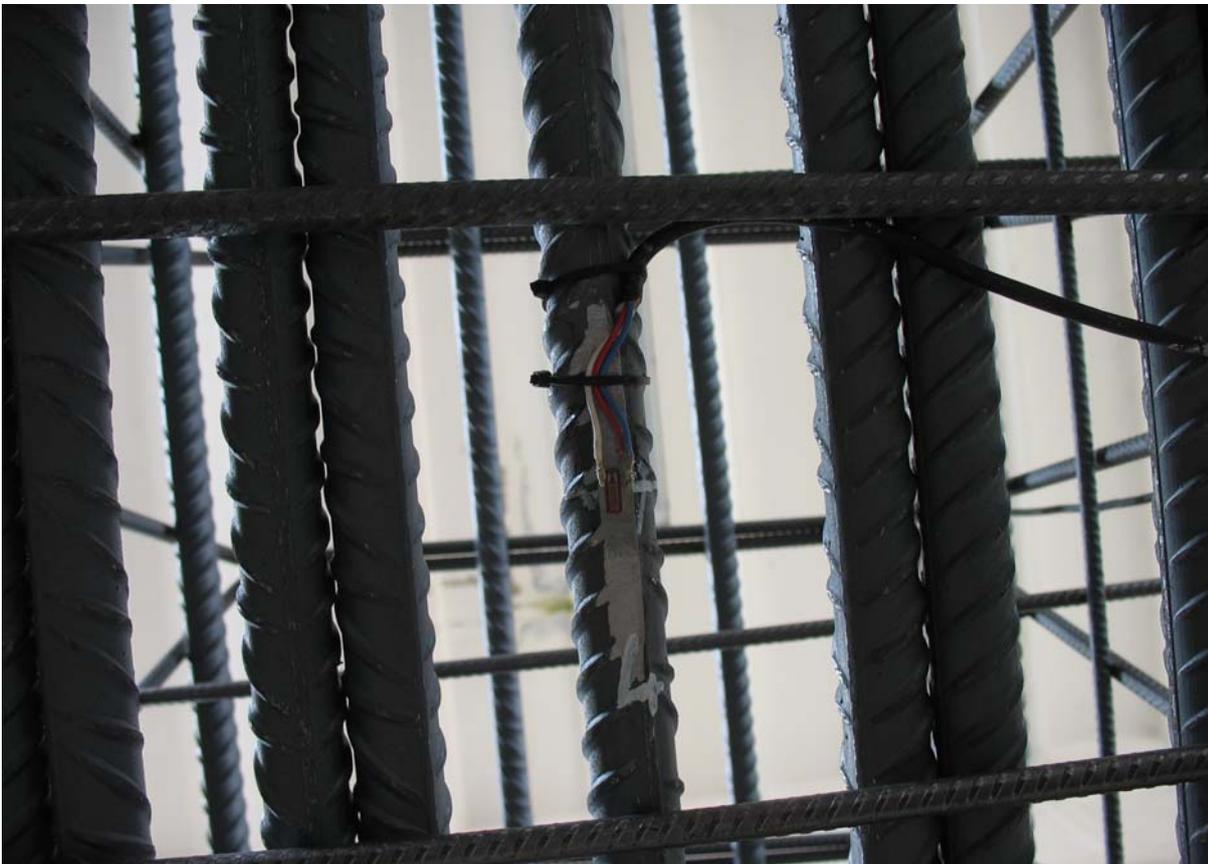


Figura 11.10: estensimetro 4 corrente inferiore longitudinale, sezione 3

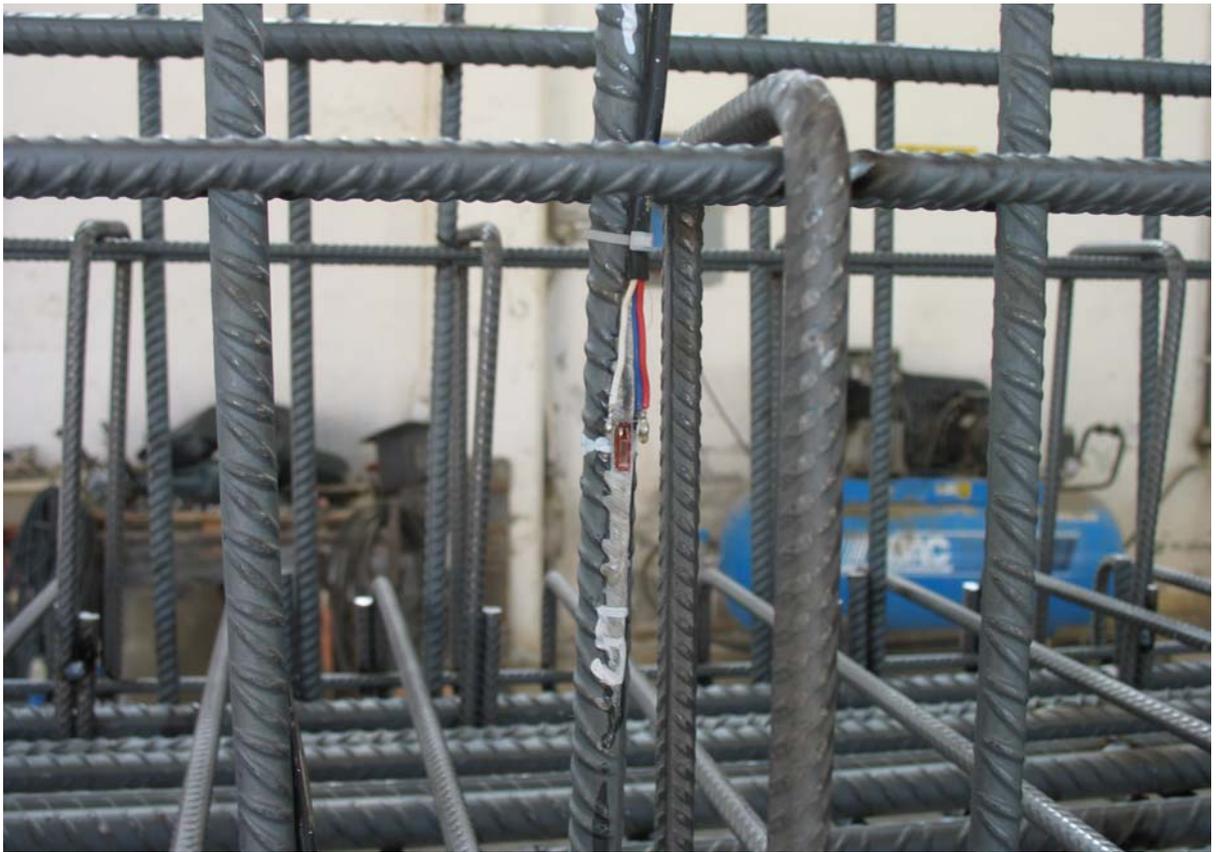


Figura 11.11: estensimetro 5 staffa verticale, sezione 1



Figura 11.12: estensimetro 6-7-8-9 disposti sul traliccio, sezione 2



Figura 11.13: lettura manuale con la P3500

Una volta che la trave è giunta in laboratorio è stato possibile applicare anche tutti gli altri strumenti che per precauzione non sono stati applicati prima.

Sono stati quindi applicati altri 13 estensimetri posizionati sulle armature libere (fig. 11.14) e tre sul calcestruzzo prefabbricato (fig. 11.15) secondo lo schema riportato in figura 11.1 e come indicato nelle tabelle 10-2; anche in questo caso sono state rispettate tutte le prescrizioni sulla modalità di collegamento descritte nel capitolo 6.

Anche di questi altri strumenti si è fatta una lettura manuale con la P3500 (figura 11.16) i cui valori letti sono stati riportati nella tabella 10-4 per gli estensimetri sull'acciaio e tabella 10.5 per quelli sul calcestruzzo.

Strumento	Data	Ora	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
P3500	24/09/2007	12.00	-870	-255	185	750	-534	-1133	-1204
Strumento	Data	Ora	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14
P3500	24/09/2007	12.00	-870	-255	-482	295	210	-433	-1153
Strumento	Data	Ora	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21
P3500	24/09/2007	12.00	-283	265	-135	310	667	1650	445

Tabella 11-4: letture manuali con la P3500 degli estensimetri sull'acciaio

Strumento	Data	Ora	E22	E23	E24
P3500	24/09/2007	12.00	-249	-467	-112

Tabella 11-5: letture manuali con la P3500 degli estensimetri sul cls prefabbricato

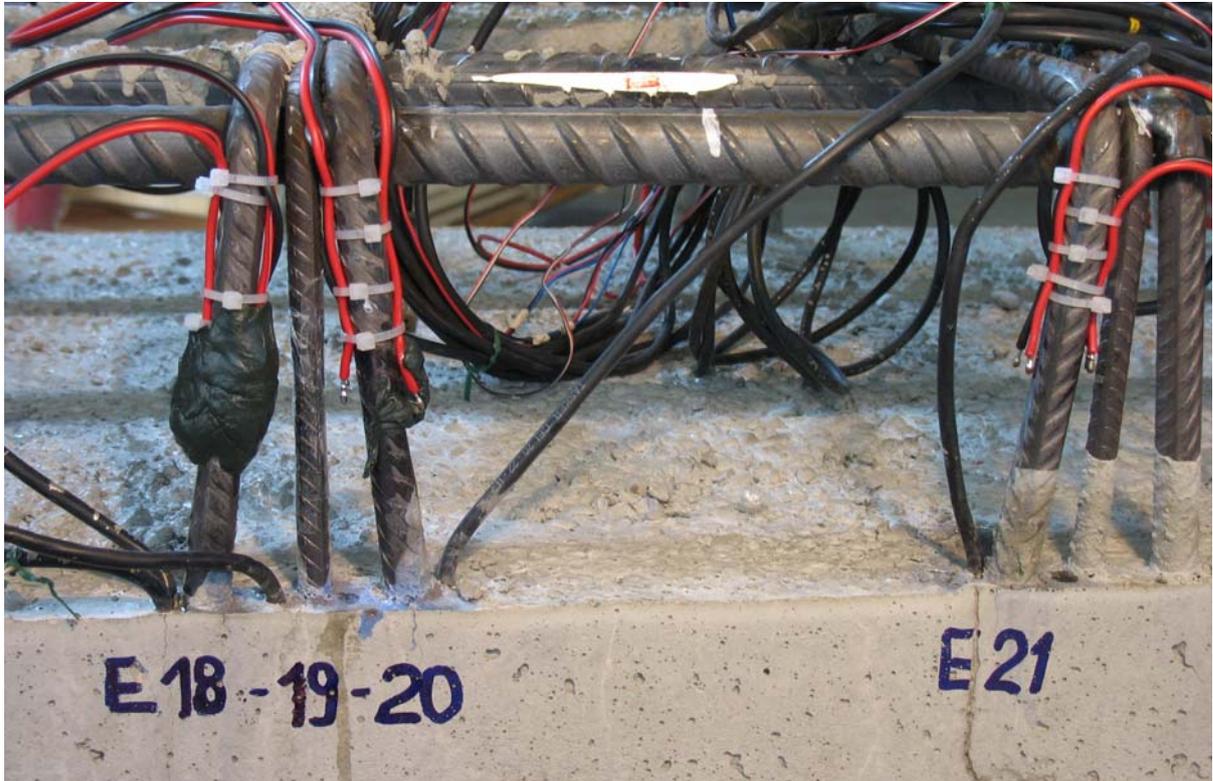


Figura 11.14: estensimetri sul traliccio



Figura 11.15: estensimetri 22-23 sul cls prefabbricato



Figura 11.16: lettura manuale con la P3500

Tutti gli strumenti sono poi stati collegati al sistema d'acquisizione SCXI che è stato opportunamente regolato utilizzando i dati riportati in tabella 10-6 per gli estensimetri sull'acciaio e tabella 11-7 per quelli sul cls prefabbricato.

Strumento	Data	Ora		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
SCXI	25/09/2007	15.30	G							
			F	2221	2163	1997	1839	2150	2292	2022
			1521	0	1	18	3	4	5	6
Strumento	Data	Ora		E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14
SCXI	25/09/2007	15.30	G							
			F	2255	2323	2090	1954	1958	2105	2231
			1521	7	8	9	10	11	12	13
Strumento	Data	Ora		E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21
SCXI	25/09/2007	15.30	G				62	62	62	62
			F	2107	1945	2062	2304	2524	2500	2376
			1521	14	15	16	4	5	6	7

Tabella 11-6: letture eseguite con SCXI prima della fase di sollevamento, in giallo scheda 1520

Strumento	Data	Ora		E22	E23	E24
SCXI	25/09/2007	15.30	G			
			F	2100	2089	2086
			1521	21	22	23

Tabella 11-7: letture eseguite con SCXI prima della fase di sollevamento

Una volta avvenuto il sollevamento della trave dalle traverse di legno agli appoggi sede della prova sono stati posizionati altri strumenti. Il 26-9-07 sono stati predisposti complessivamente sette LVDT, di cui 3 verticali (figura 11.17÷19) per la valutazione degli spostamenti verticali e 4 orizzontali posizionati a coppie rispettivamente sulle superficie inferiore e superiore del calcestruzzo prefabbricato per valutarne lo stato fessurativo e il comportamento deformativo a trazione e compressione. Si riportano in tabella 11-8 alcuni particolari di questi strumenti. Si ricorda che inseguito al getto di completamento gli LVDT WA20-7 e WA20-9 sono stati staccati dalla superficie prefabbricata il 03-10 alle ore 11.00 e successivamente e riattaccati sul calcestruzzo il 09-10. La nuova posizione assunta da tali LVDT è riportata in fig. 11.6 e in tab.11-1.

Strumento	WA50-2	WA50-3	WA50-4	WA20-5	WA20-6	WA20-7	WA20-9	WA20-7 2°fase	WA20-9 2° fase
Corsa	50	50	50	20	20	20	20	20	20
Canale LV	28	29	30	31	32	33	34	33	34
Scheda	1540	1540	1540	1540	1540	1540	1540	1540	1540

Tabella 11-8: caratteristiche geometriche degli LVDT



Figura 11.17: LVDT WA50-2 in asse con il pistone



Figura 11.18: LVDT WA20-5, WA20-6 e WA50-3



Figura 11.19: E22, E23, WA20-9 e WA20-7 sul getto prefabbricato

Tutti gli strumenti sono stati collegati al sistema d'acquisizione che è stato opportunamente regolato inserendo le costanti, eseguendo il bilanciamento e il voltaggio come riportato in tab. 11-9 ed in base al quale è stato possibile iniziare la prova.

Strumento	LV	GF	Min. Value	Max. Value	Scheda	Canale scheda	Costante	Sensibilità	Ponte	Alimen. [V]
Trasd.di pressione	1	0.2	-0.01	0.01	1520	0	12829	-	Full. Bridge	5
E18	2	2.13	-0.01	0.01	1520	4	1E-06	-	Quarter Br II	4
E19	3	2.13	-0.01	0.01	1520	5	1E-06	-	Quarter Br II	4
E20	4	2.13	-0.01	0.01	1520	6	1E-06	-	Quarter Br II	4
E21	5	2.13	-0.01	0.01	1520	7	1E-06	-	Quarter Br II	4
E1	6	2.10	-0.005	0.03	1521	0	1E-06	-	Quarter Br I	4
E2	7	2.10	-0.005	0.03	1521	1	1E-06	-	Quarter Br I	4
E3	8	2.10	-0.005	0.03	1521	18	1E-06	-	Quarter Br I	4
E4	9	2.10	-0.005	0.03	1521	3	1E-06	-	Quarter Br I	4
E5	10	2.10	-0.005	0.01	1521	4	1E-06	-	Quarter Br I	4
E6	11	2.10	-0.01	0.01	1521	5	1E-06	-	Quarter Br I	4
E8	12	2.10	-0.01	0.01	1521	7	1E-06	-	Quarter Br I	4
E9	13	2.10	-0.01	0.01	1521	8	1E-06	-	Quarter Br I	4
E10	14	2.10	-0.01	0.005	1521	9	1E-06	-	Quarter Br I	4
E11	15	2.10	-0.01	0.005	1521	10	1E-06	-	Quarter Br I	4
E12	16	2.10	-0.01	0.005	1521	11	1E-06	-	Quarter Br I	4
E13	17	2.10	-0.01	0.005	1521	12	1E-06	-	Quarter Br I	4
E15	18	2.10	-0.01	0.005	1521	14	1E-06	-	Quarter Br I	4
E7	19	2.14	-0.01	0.01	1521	6	1E-06	-	Quarter Br I	4
E14	20	2.13	-0.01	0.005	1521	13	1E-06	-	Quarter Br I	4
E16	21	2.13	-0.01	0.005	1521	15	1E-06	-	Quarter Br I	4
E17	22	2.13	-0.01	0.005	1521	16	1E-06	-	Quarter Br I	4
E22	23	2.09	-0.01	0.005	1521	21	1E-06	-	Quarter Br I	4
E23	24	2.09	-0.01	0.005	1521	22	1E-06	-	Quarter Br I	4
E24	25	2.09	-0.01	0.005	1521	23	1E-06	-	Quarter Br I	4
E25	33	2.09	-0.01	0.001	1521	17	1E-06	-	Quarter Br I	4
E26	34	2.09	-0.01	0.001	1521	19	1E-06	-	Quarter Br I	4
E27	35	2.09	-0.01	0.001	1521	20	1E-06	-	Quarter Br I	4
WA50-2	26	-	0	0.05	1540	0	1052.0	1.5	-	1
WA50-3	27	-	0	0.05	1540	1	1049.4	1.5	-	1
WA50-4	28	-	0	0.05	1540	2	1049.3	1.5	-	1
WA20-5	29	-	0	0.02	1540	3	1069.4	4	-	1
WA20-6	30	-	0	0.02	1540	4	1073.4	4	-	1
WA20-7	31	-	0	0.02	1540	5	1111.0	4	-	1
WA20-9	32	-	0	0.02	1540	6	1046.4	4	-	1

Tabella 11-9: regolazione del sistema d'acquisizione

Durante la fase finale di carico avvenuta il 30-10-07 gli strumenti WA50-2 e WA50-4 sono stati spostati da sotto alla trave a sopra come visibile in figura 11.28 per salvaguardarne l'integrità poiché sono stati previsti notevoli incrementi freccia.

LVDT WA50-3 è stato sostituito con un trasduttore a filo (figura 11.21) e in corrispondenza degli appoggi sono stati posizionati dei comparatori meccanici centesimali per misurare l'abbassamento degli appoggio.

Al di sotto del solaio il 18-10-07 sono stati in oltre posizionati altri due flessimetri per misurare l'eventuale abbassamento del solaio durante la fase di carico (figura 11.22). Si riportano in tabella 11-10 i valori letti dai suddetti strumenti.

Strumento (mm)	127 kN	127 kN + peso del getto	177 kN	400 kN	600 kN
F1	/	20.00	/	19.90	19.69
F2	/	20.00	/	19.82	19.59
App. (A)	1.20	1.87	2.04	/	/
App. (B)	1.30	1.85	2.01	/	/

Tabella 11-10: letture eseguite in modo meccanico



Figura 11.20: comparatore meccanico centesimale



Figura 11.21: trasduttore a filo



Figura 11.22: trasduttori a filo F1 e F2 per la misurazione dell'abbassamento del solaio

## 11.4 Svolgimento della prova di rottura

Dopo aver svolto tutte le operazioni descritte in precedenza e quindi dopo aver posizionato tutti gli estensimetri si è proceduto al sollevamento della trave avvenuto il 25 settembre 2007 alle ore 15.30. Durante questa operazione gli estensimetri hanno registrato le deformazioni locali delle superfici su cui erano stati incollati ed è stato possibile mediante elaborazione dei dati strumentali visualizzare l'effetto del peso proprio della trave la cui azione si è esaurita con questa operazione. Il sistema di acquisizione è stato successivamente azzerato e il giorno 26-09-07 si è potuto iniziare la prova di rottura vera e propria.

La prova ha previsto in 3 fasi di incremento di carico differite nel tempo, con la prima fase di carico si sono applicati circa 127 kN, che sono stati mantenuti costanti nei giorni successivi fino al 30-10, giorno durante il quale si è applicato un nuovo incremento di carico pari a 5000 kg raggiungendo complessivamente 177 kN che è stato mantenuto costante fino al 16-11. Il 16-11-07 è il giorno in cui è stata portata a rottura la trave, in tale fase si sono eseguiti tre cicli di carico, il primo ha raggiunto i 230 kN, il secondo i 500 kN e poi si è incrementato il carico fino alla rottura della trave. Tra la prima e la seconda fase di carico si è effettuato il getto di completamento della trave, il cui peso ha gravato sullo stato flessionale della trave e di cui si è tenuto conto nell'elaborazione dei grafici.

Al termine di ogni fase di carico, mentre il carico veniva mantenuto costante, mediante l'uso di pennarelli si è tracciato l'andamento delle fessure visibili ad occhio nudo cosicché, al termine della prova è stato possibile osservare l'evoluzione dello stato fessurativo al variare del carico. Tale procedura di controllo è stata eseguita anche prima di ogni nuovo incremento di carico rendendo perciò visibile le fessure prodotte nel tempo mantenendo il carico costante.

Di seguito sono presentate una serie di foto dove sono riportate le varie fasi della prova.

Nella figura 11.23 si vede la trave prima del trasferimento dalle traverse agli appoggi; tale sollevamento è avvenuto con l'ausilio del carro ponte del laboratorio.

Nella figura 11.24 si vede la trave posizionata sugli appoggi, mentre si sistemano gli ultimi strumenti di lettura prima dell'inizio della prima fase di carico.

Nella figura 11.25 viene mostrato lo stato fessurativo dopo che sono stati applicati 127kN.

Nelle figure 11.26 e 11.27 viene mostrato lo stato fessurativo di entrambi i lati della trave in zona centrale, dopo aver applicato 127 kN.

Nella figura 11.28 si vede l'evoluzione dello stato fessurativo registrato prima del secondo incremento di carico a 177 kN.

Nella figura 11.29 si vede l'evoluzione dello stato fessurativo registrato dopo aver raggiunto un valore di carico pari a 177 kN, nella zona centrale.

Nella figura 11.30 si vede l'evoluzione dello stato fessurativo raggiunto dopo il secondo incremento di carico a 177 kN.

Nella figura 11.31 viene mostrato l'evoluzione dello stato fessurativo registrato prima dell'ultima fase di carico che ha portato a rottura la trave.

Nella figura 11.32 viene mostrato l'evoluzione dello stato fessurativo registrato prima dell'ultima fase di carico che ha portato a rottura la trave, nella zona appoggio sinistro.

Nella figura 11.33 viene mostrato l'inizio dell'ultima fase di carico.

Nella figura 11.34 viene mostrato l'incremento della freccia rispetto alla foto precedente dovuto all'incremento di carico applicato che ha registrato i 500 kN.

Nella figura 11.35 viene mostrato lo stato fessurativo complessivo dopo la rottura ossia quando il carico ha registrato i 630 kN.

Nella figura 11.36 viene mostrato lo stato fessurativo dopo la rottura, in zona appoggio sinistro.

Nella figura 11.37 viene mostrato lo stato fessurativo dopo la rottura, in zona appoggio destro.

Nella figura 11.38 viene mostrato lo stato fessurativo dopo la rottura, in zona centrale.



Figura 11.23: fase preparatoria al sollevamento



Figura 11.24: trave disposta sugli appoggi, applicazione LVDT inferiori



Figura 11.25: fase intermedia della prova, sviluppo dello stato fessurativo a 127 kN



Figura 11.26: stato fessurativo nella zona centrale della trave a 127 kN



Figura 11.27: stato fessurativo nella zona centrale della trave a 127 kN



Figura 11.28: nuova disposizione dei WA50-2 e WA50-3 prima della incremento di carico a 177 kN

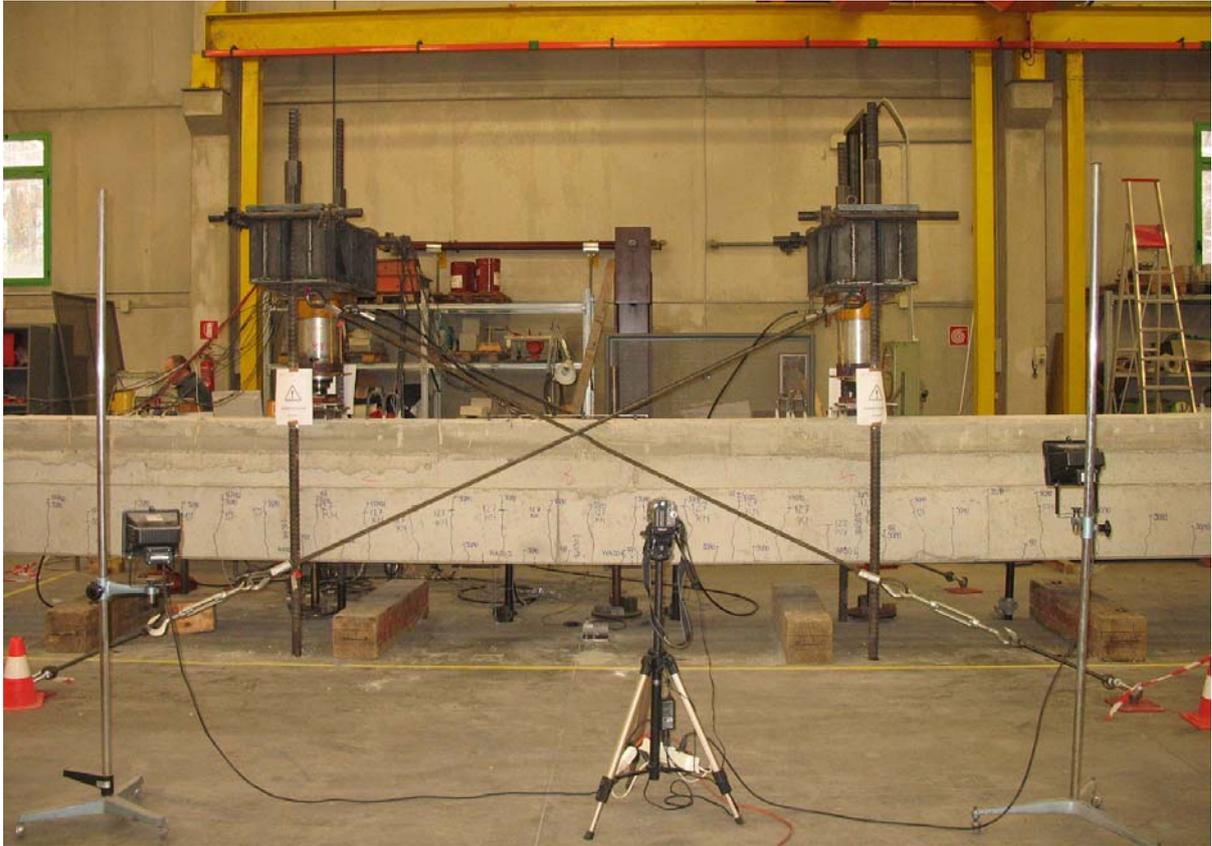


Figura 11.29: sviluppo dello stato fessurativo nella zona centrale a 177 kN



Figura 11.30: fase intermedia della prova, sviluppo dello stato fessurativo a 177 kN



Figura 11.31: sviluppo dello stato fessurativo, immediatamente prima dell'ultima fase di carico

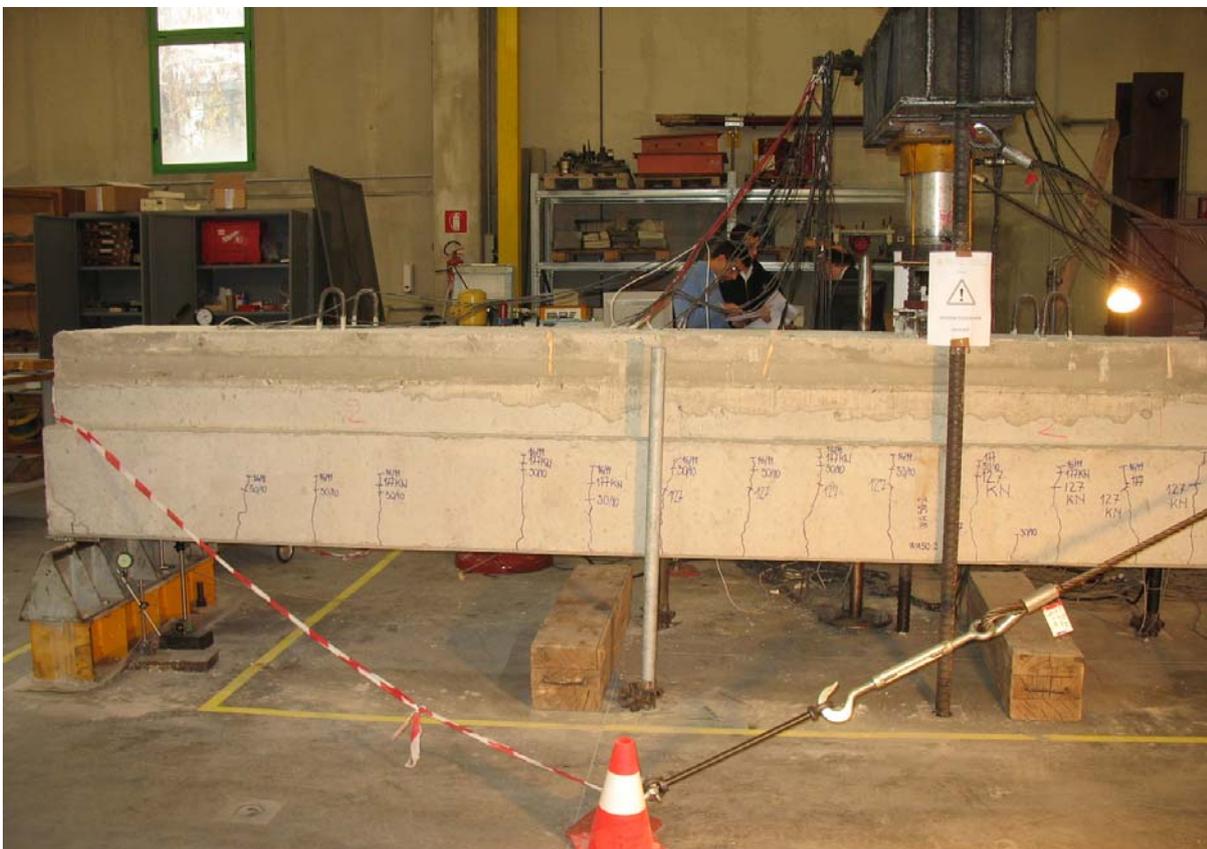


Figura 11.32: stato fessurativo in zona appoggio, prima dell'ultima fase carico

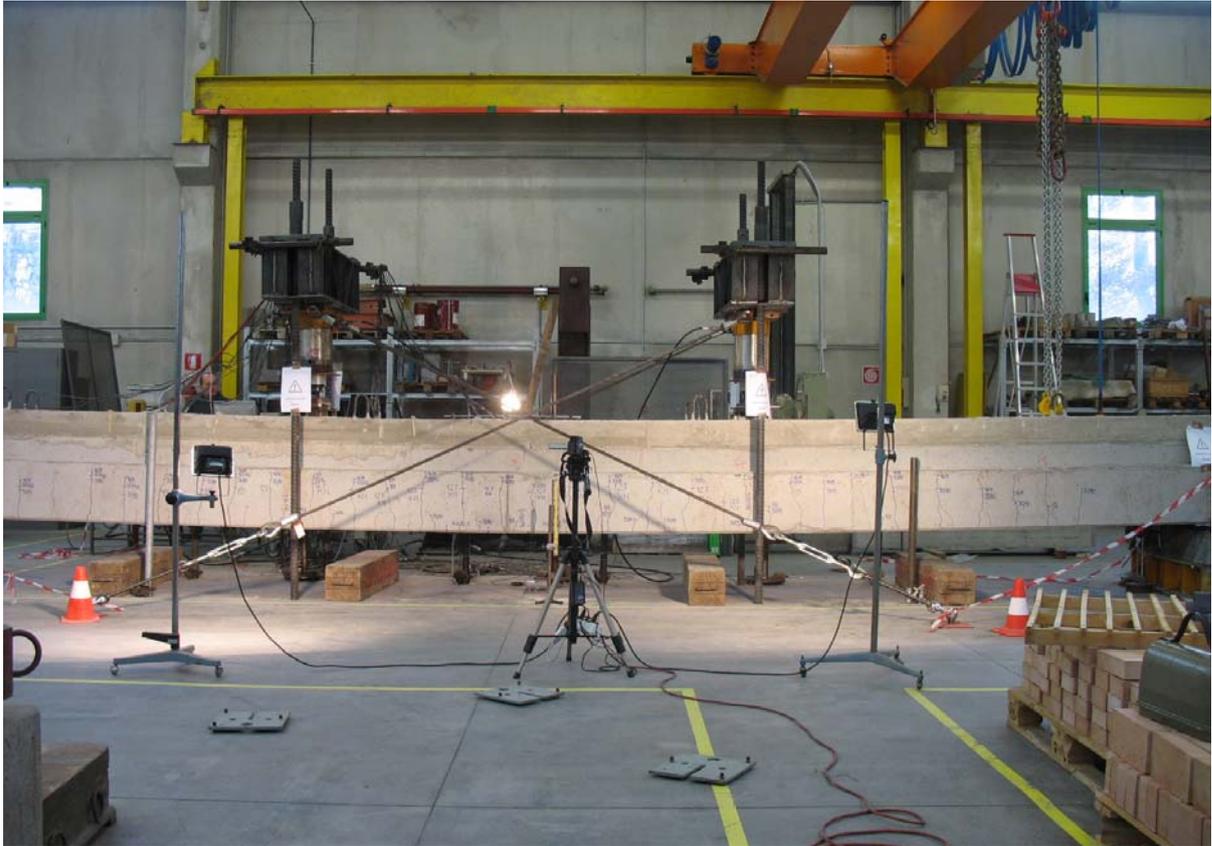


Figura 11.33: inizio dell'ultima fase di carico che porterà a rottura la trave

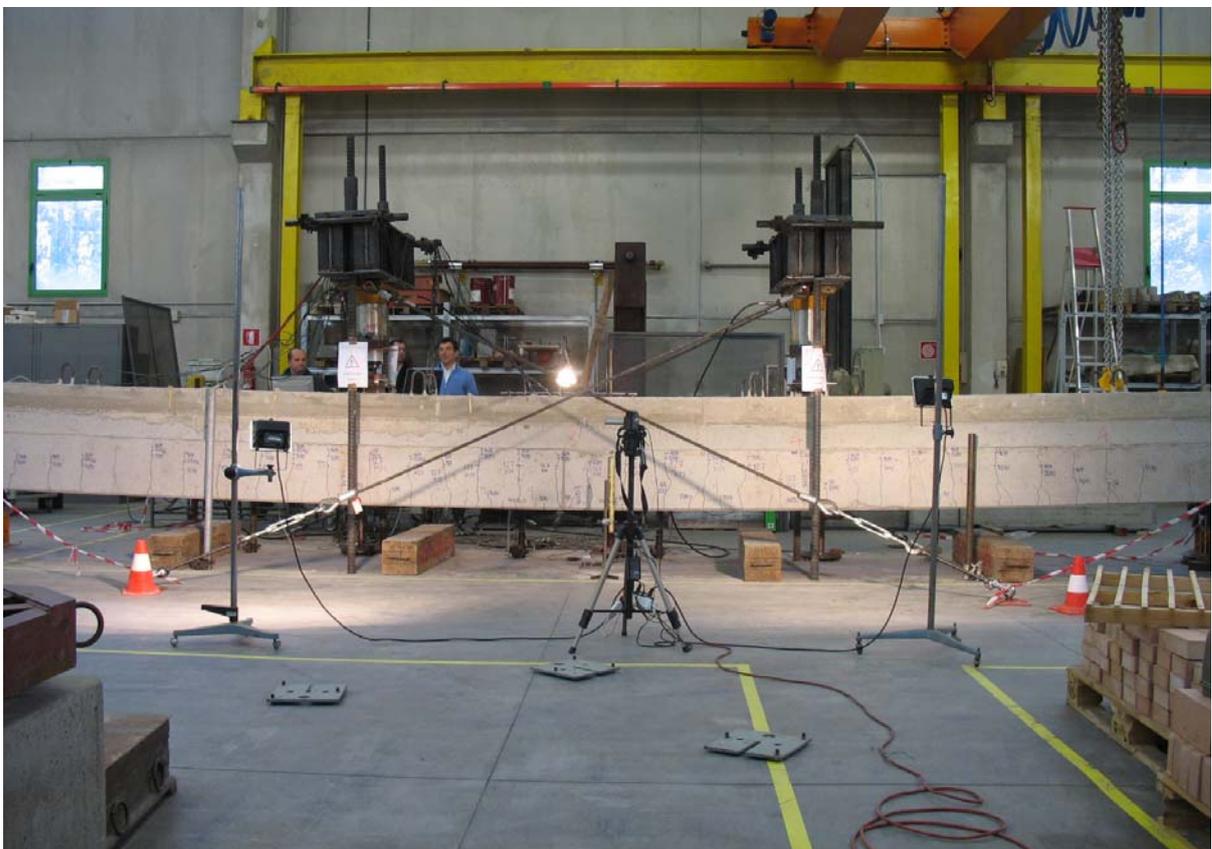


Figura 11.34: incremento della freccia, carico applicato pari a 500 kN



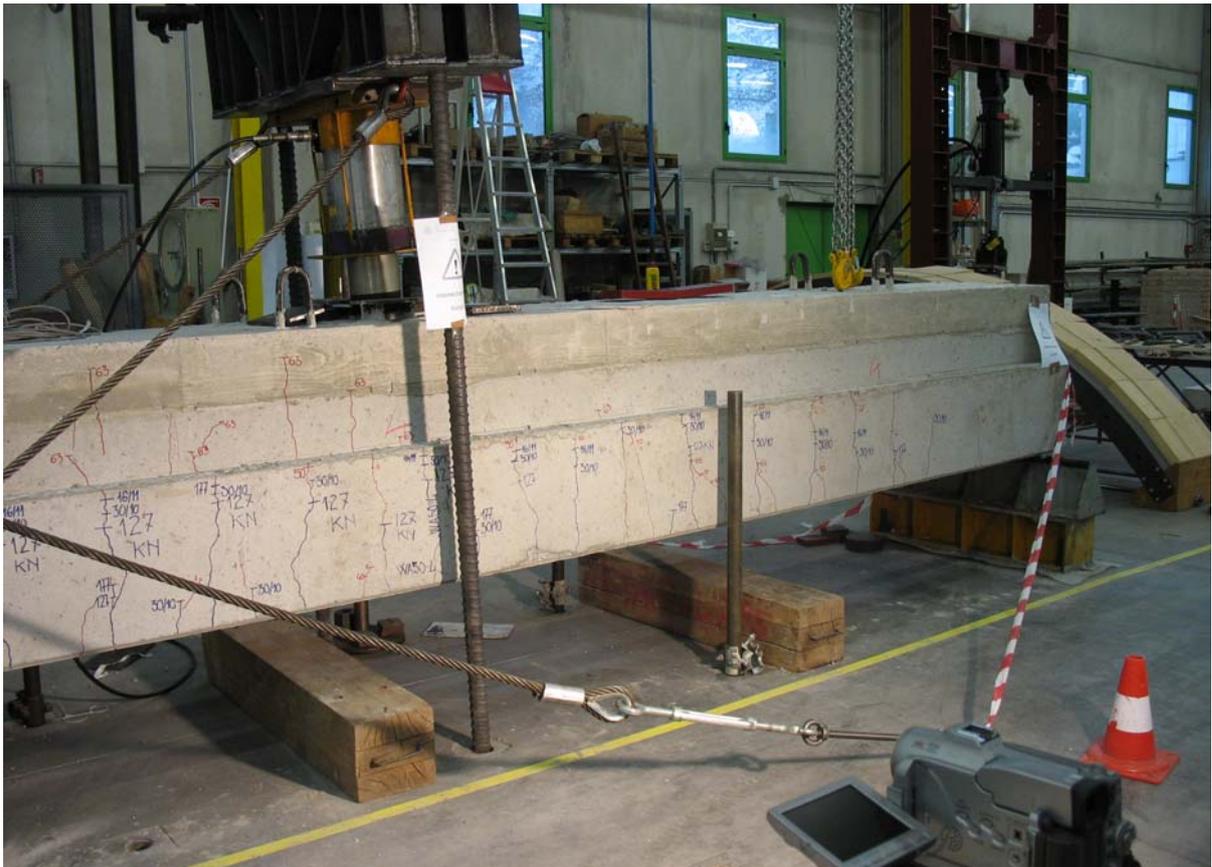


Figura 11.37: rottura della trave, zona appoggio destro

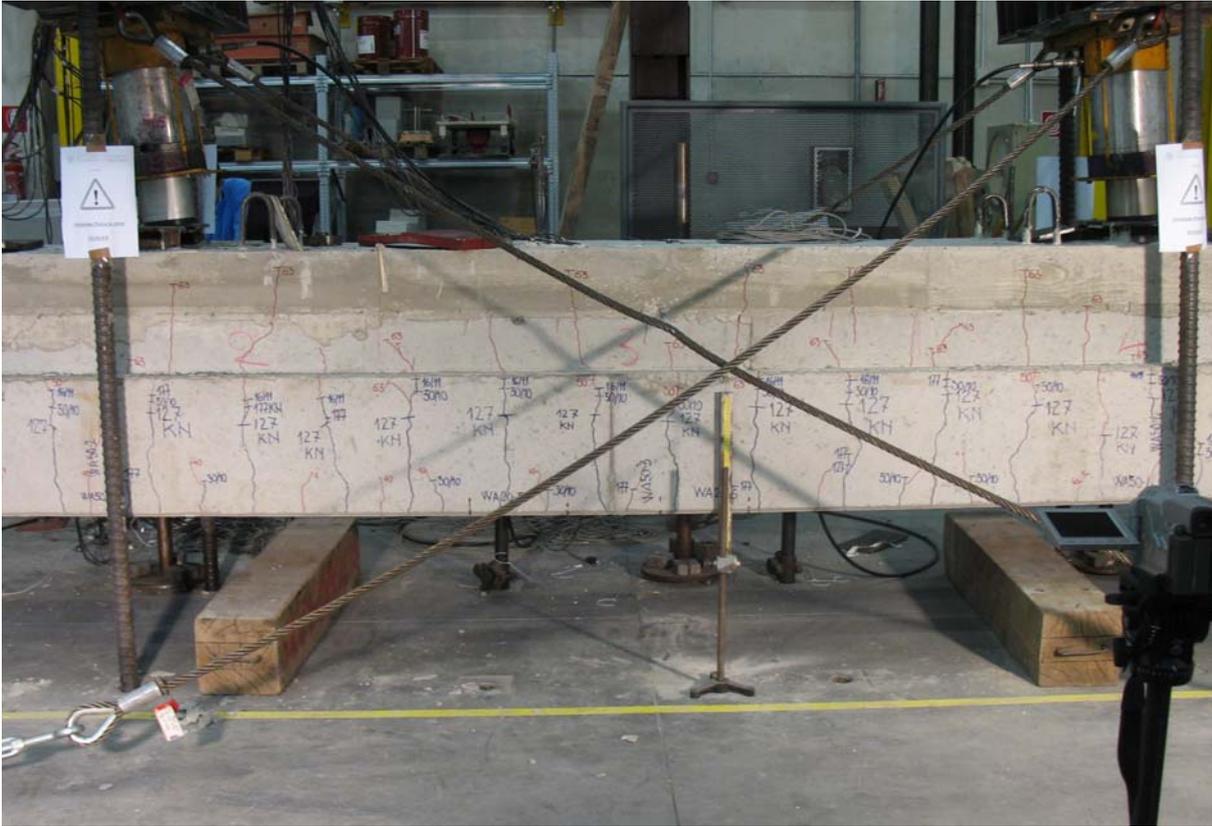


Figura 11.38: rottura della trave, zona centrale

## 11.5 Risultati della prova di sollevamento

I grafici riportati nel seguito sono il frutto dell'elaborazione dei dati inviati dagli strumenti al sistema d'acquisizione. In ciascun grafico è stato riportato, per un determinato strumento, l'andamento che si è rilevato durante il sollevamento della trave, in modo così da poter confrontare i risultati (per comprendere a cosa si riferiscono bisogna fare riferimento alle figure precedenti, in particolare alla figura 11.3).

### 11.5.1 Grafici relativi agli strumenti della sezione 1

Nel grafico 11.1 sono rappresentate le deformazioni sul corrente superiore che in tale fase è ancora libero, si nota un primo tratto in cui le deformazioni sono nulle, il salto corrispondente al distacco e il salto corrispondente alla posa sugli appoggi, le successive deformazioni sono dovute all'azione peso proprio della trave poiché la trave è già stata posata.

Nel grafico 11.2 sono rappresentate le deformazioni della staffa verticale posta all'estremità sinistra della trave che in tale fase è ancora libero, si nota un primo tratto in cui le deformazioni sono nulle, il salto corrispondente al distacco e il salto corrispondente alla posa sugli appoggi, subisce sostanzialmente deformazioni a trazione.

Nel grafico 11.3 sono rappresentate le deformazioni sul corrente inferiore, si nota il salto corrispondente alla posa sugli appoggi, le successive deformazioni di trazione sono dovute all'azione del solo peso proprio della trave.

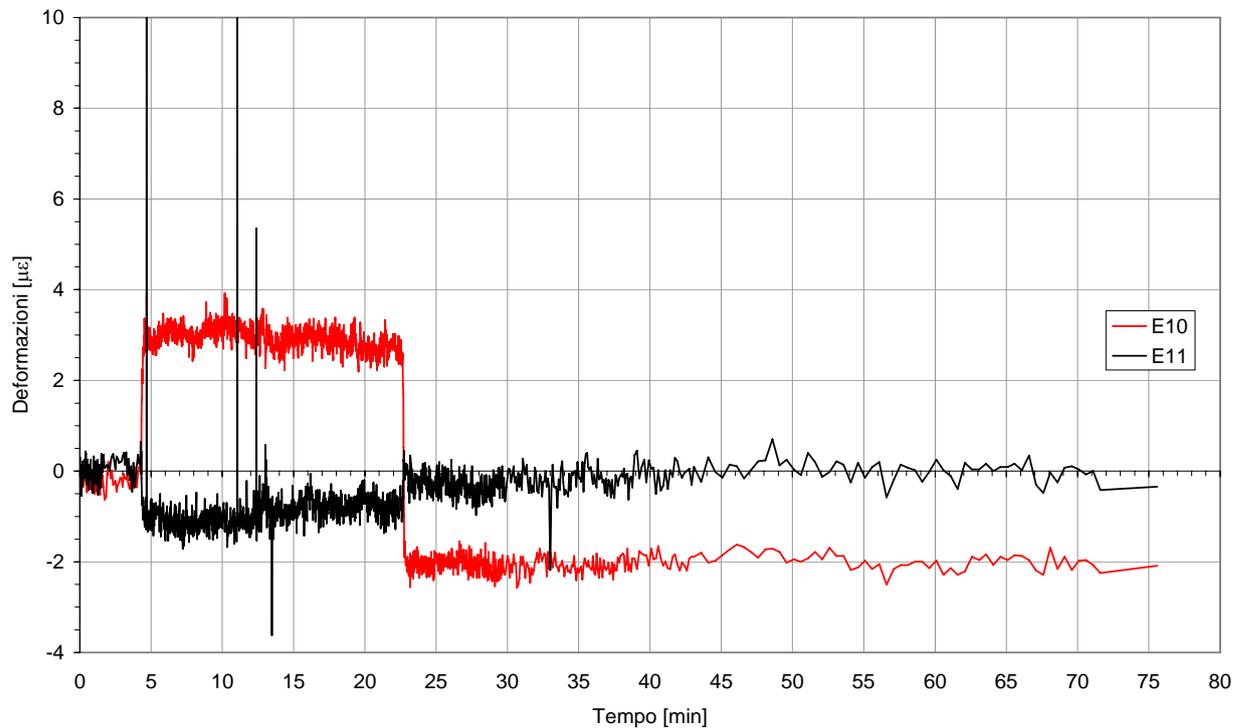


Grafico 11.1: estensimetri sul corrente superiore

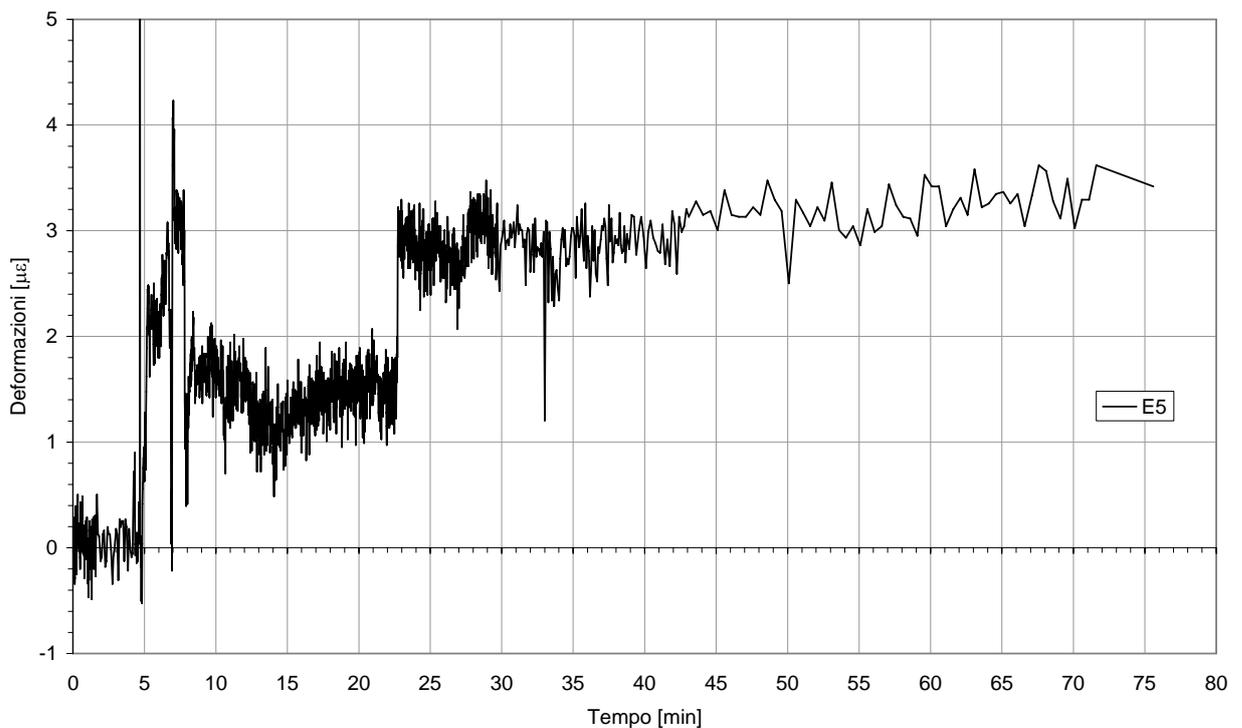


Grafico 11.2: estensimetro sulla staffa verticale

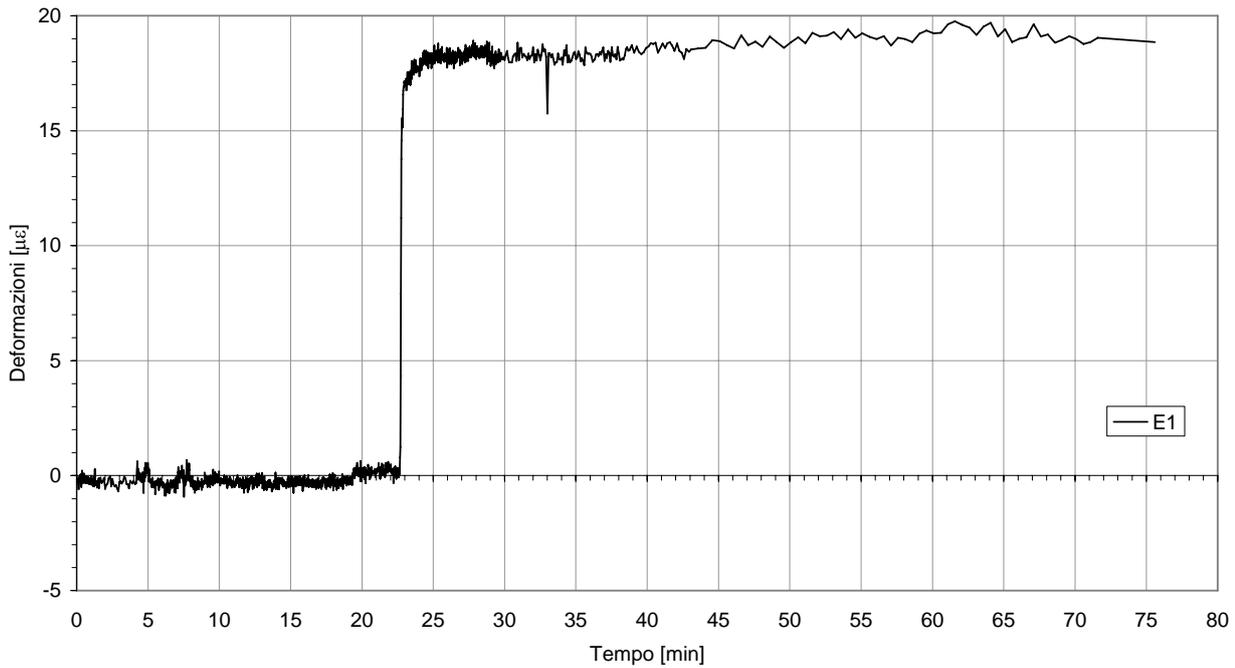


Grafico 11.3: estensimetro sul corrente inferiore

### 11.5.2 Grafici relativi agli strumenti della sezione 2

Nel [grafico 11.4](#) è rappresentato l'andamento deformativo del calcestruzzo prefabbricato, si nota un primo tratto in cui le deformazioni sono nulle, il salto corrispondente al sollevamento e il salto corrispondente alla posa sugli appoggi, le successive deformazioni di compressione sono dovute all'azione peso proprio della trave poiché la trave è già stata posata.

Nel [grafico 11.5](#) sono rappresentate le deformazioni sul corrente superiore che in tale fase è ancora libero, si nota un primo tratto in cui le deformazioni sono nulle, il salto corrispondente al sollevamento e il salto corrispondente alla posa sugli appoggi, le successive deformazioni sono dovute all'azione peso proprio della trave poiché la trave è già stata posata.

Nel [grafico 11.6](#) sono rappresentate le deformazioni sull'armatura a traliccio che in tale fase è ancora libero.

Nel [grafico 11.7](#) sono rappresentate le deformazioni sull'armatura a traliccio che però è immersa nel getto prefabbricato.

Nel [grafico 11.8](#) sono rappresentate le deformazioni sul corrente inferiore, si nota il salto corrispondente alla posa sugli appoggi, le successive deformazioni di trazione sono dovute all'azione del solo peso proprio della trave.

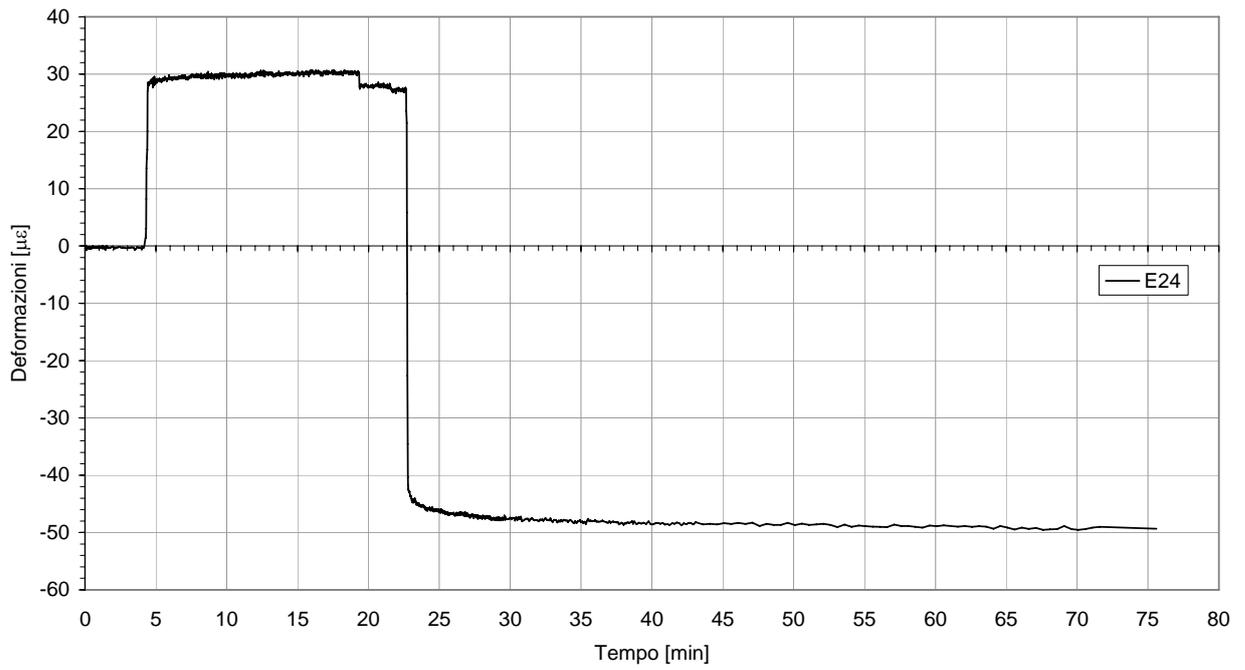


Grafico 11.4: estensimetro sul calcestruzzo prefabbricato

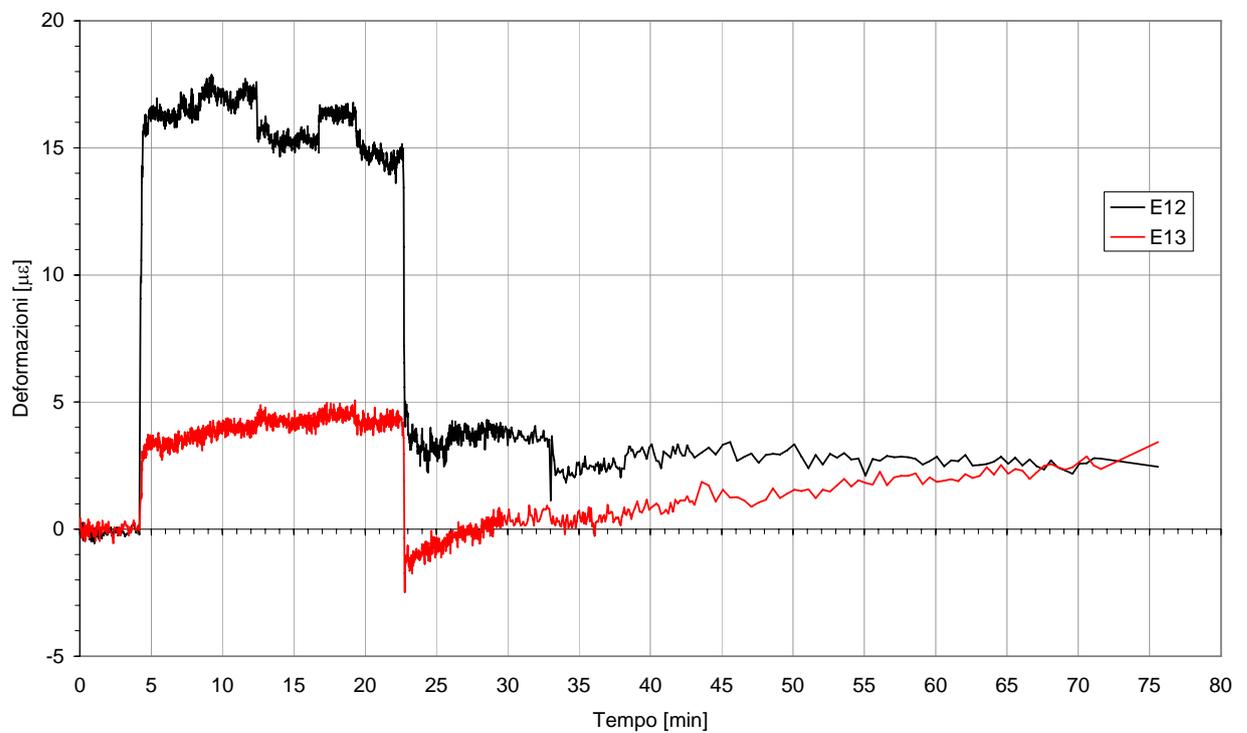


Grafico 11.5: estensimetri sul corrente superiore

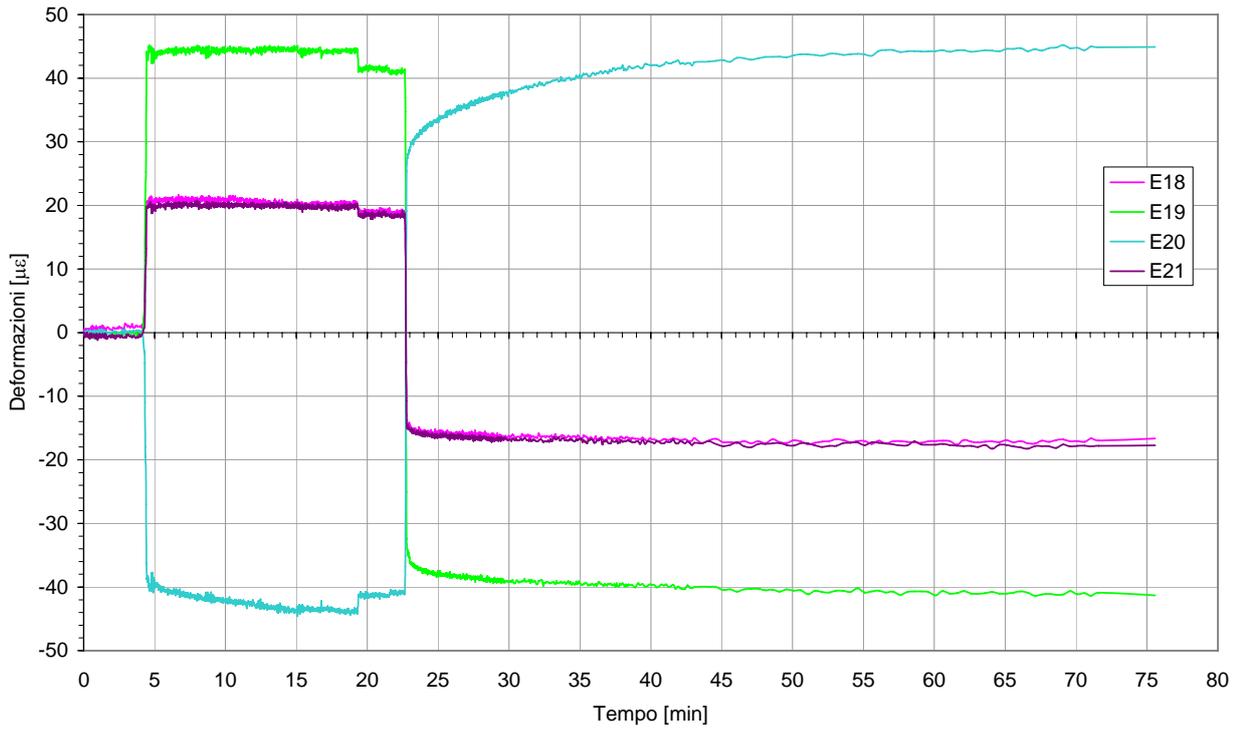


Grafico 11.6: estensimetri sul traliccio libero, collegati a mezzo ponte

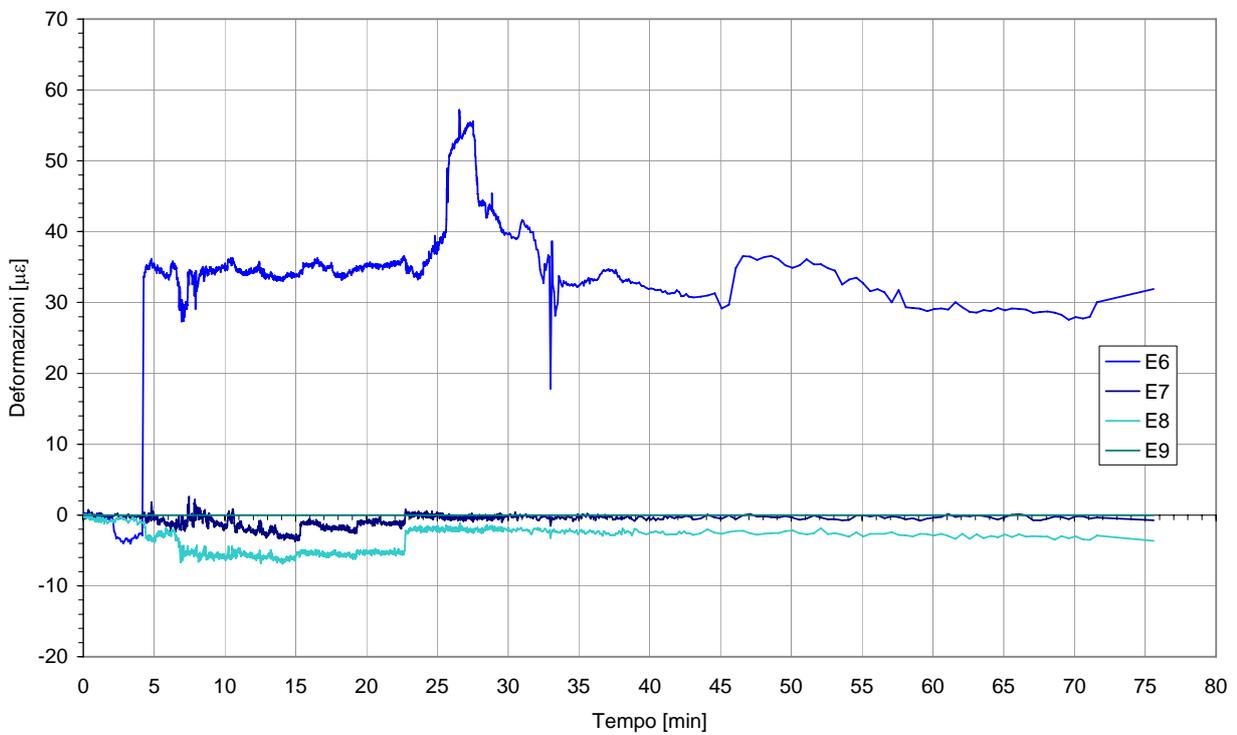


Grafico 11.7: estensimetri sul traliccio immersi nel getto prefabbricato

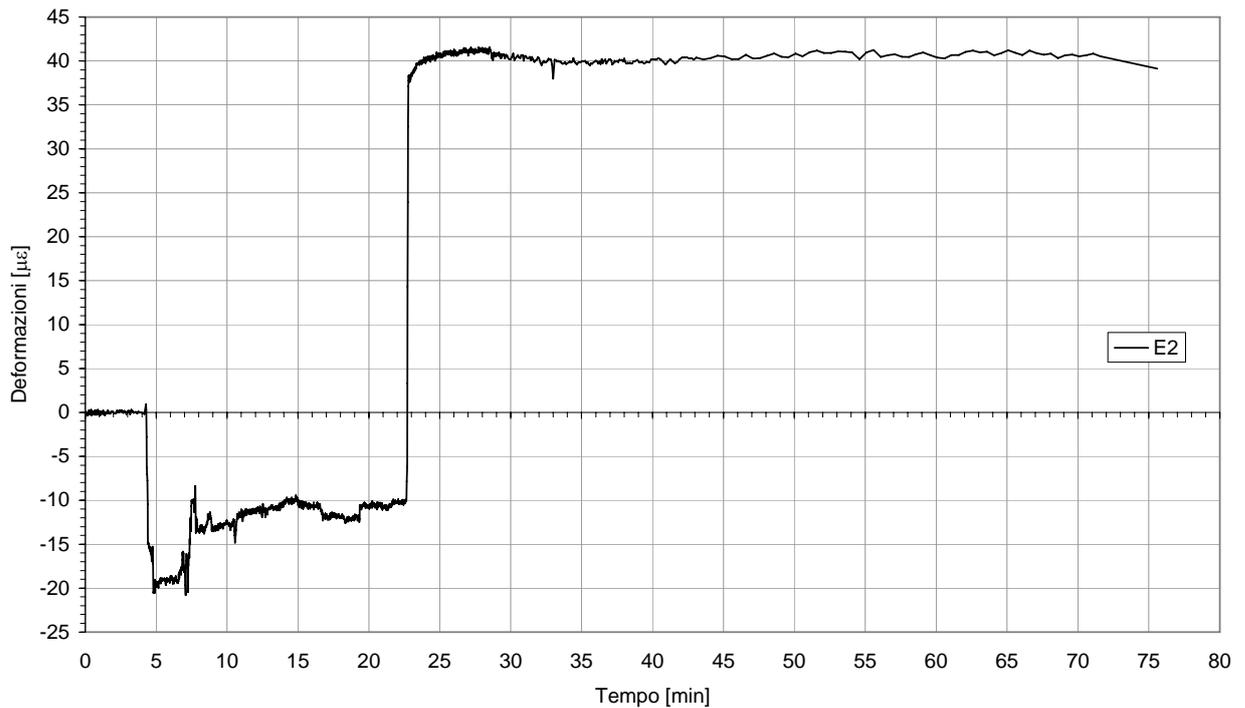


Grafico 11.8: estensimetri sul corrente inferiore

### 11.5.3 Grafici relativi agli strumenti della sezione 3

Nel [grafico 11.9](#) è rappresentato l'andamento deformativo del calcestruzzo prefabbricato, si nota un primo tratto in cui le deformazioni sono nulle, il salto corrispondente al sollevamento e il salto corrispondente alla posa sugli appoggi, le successive deformazioni di compressione sono dovute all'azione peso proprio della trave poiché la trave è già stata posata. Si osserva che i valori delle deformazioni ultime sono maggiori rispetto alle sezioni esaminate precedentemente, tutto è giustificato dal fatto che la sezione 3 è quella di mezzeria per la quale il momento è massimo.

Nel [grafico 11.10](#) sono rappresentate le deformazioni sul corrente superiore che in tale fase è ancora libero, si nota un primo tratto in cui le deformazioni sono nulle, il salto corrispondente al sollevamento e il salto corrispondente alla posa sugli appoggi; le deformazioni ultime sono di compressione mentre nei casi precedenti sono di trazione.

Nel [grafico 11.11](#) sono rappresentate le deformazioni del corrente inferiore, si nota il salto corrispondente alla posa sugli appoggi, le successive deformazioni di trazione sono dovute all'azione del solo peso proprio della trave, essendo la sezione considerata quella di mezzeria le deformazioni ultime sono maggiori di quelle misurate in corrispondenza delle altre due sezioni.

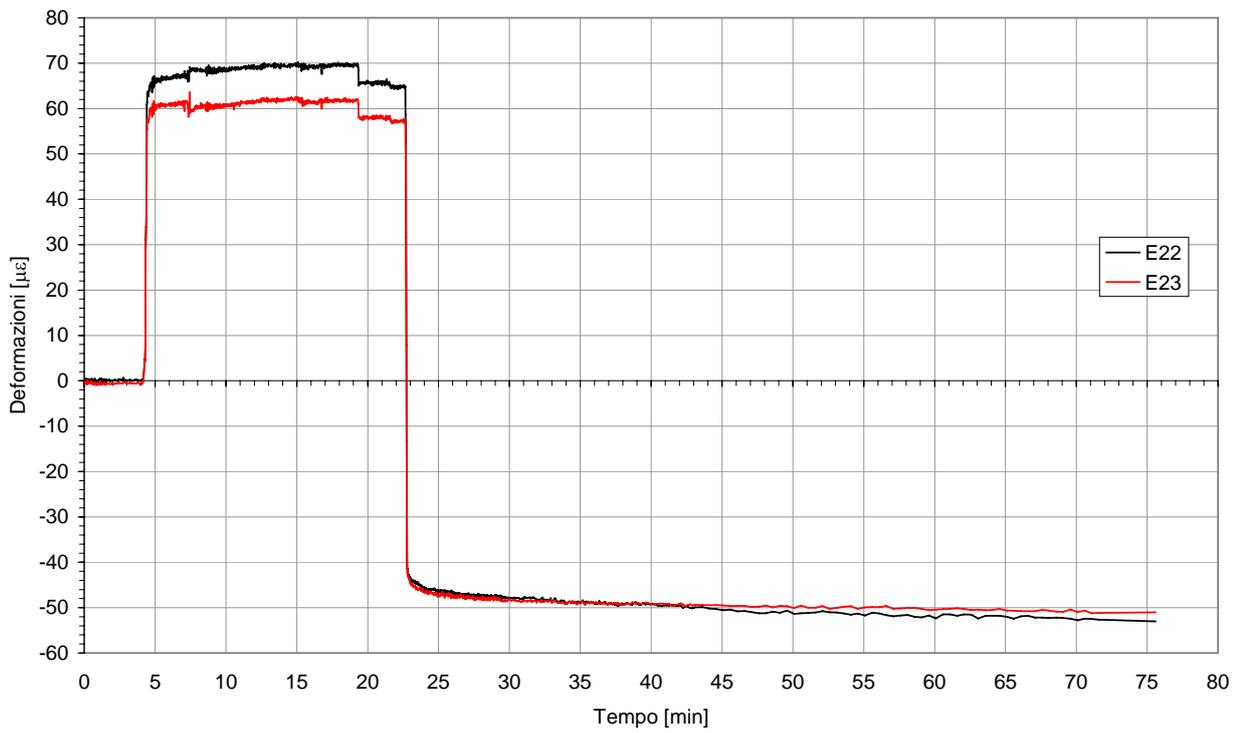


Grafico 11.9: estensimetri sul calcestruzzo prefabbricato

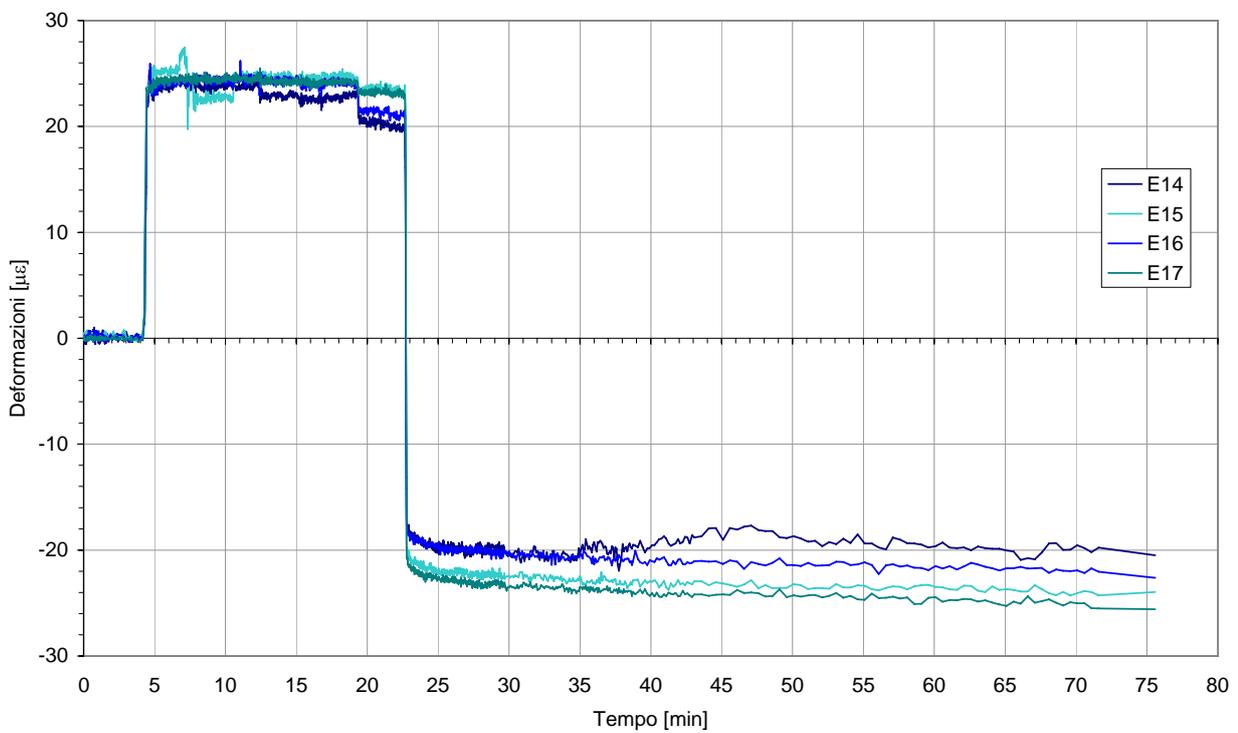


Grafico 11.10: estensimetri sul corrente superiore

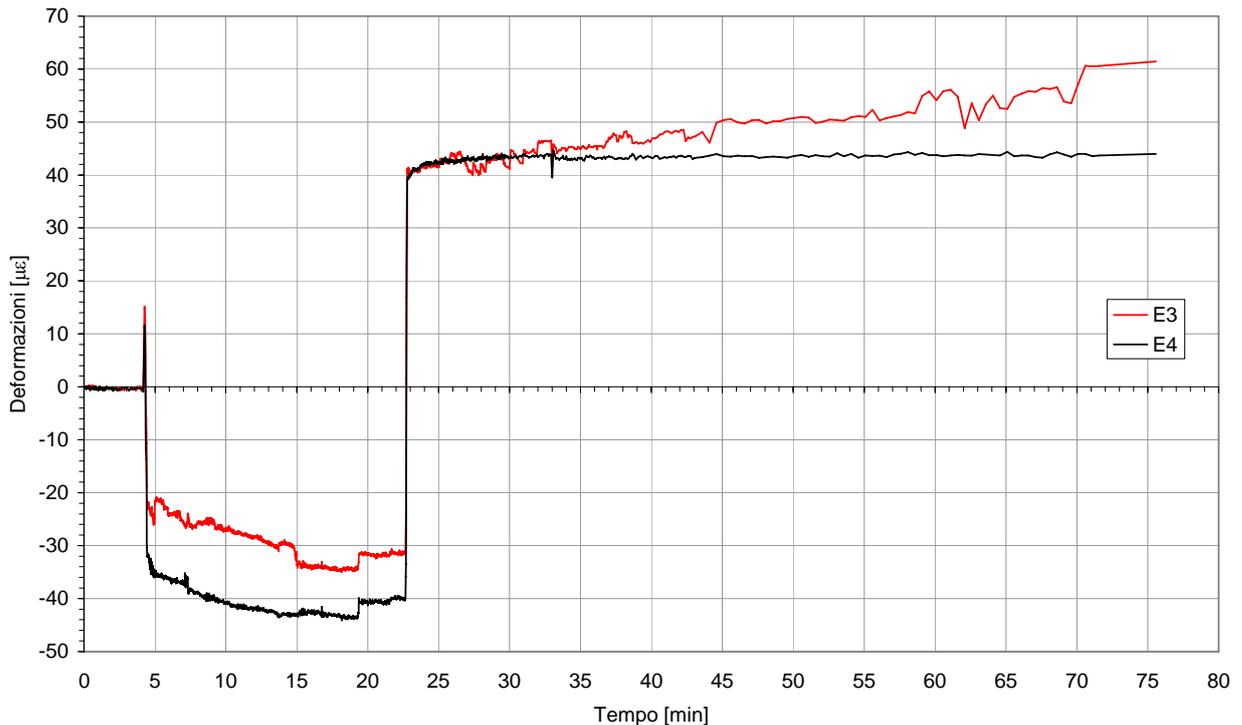


Grafico 11.11: estensimetri sul corrente inferiore

## 11.6 Risultati della prova di rottura

I grafici riportati nel seguito sono il frutto dell'elaborazione dei dati inviati dagli strumenti al sistema d'acquisizione. In ciascun grafico è stato riportato, per un determinato strumento, l'andamento che si è rilevato durante la prova di rottura della trave, in modo così da poter confrontare i risultati (per comprendere a cosa si riferiscono bisogna fare riferimento alle figure precedenti, in particolare alla figura 11.3).

### 11.6.1 Grafici relativi agli strumenti della sezione 1

Nel [grafico 11.12](#) è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni del corrente compresso in funzione del carico. I tratti orizzontali rappresentano le deformazioni subite dall'armatura compressa nei periodi in cui il carico è stato mantenuto costante, gli altri quando si sono effettuati gli incrementi.

Nel [grafico 11.13](#) è stato rappresentato lo sviluppo delle deformazioni subite dall'armatura superiore della trave in funzione del tempo, in particolare il tratto compreso tra il 7 e il 9 giorno in cui le deformazioni sono aumentate repentinamente e poi tendono a diminuire sono da attribuirsi al getto di completamento e al conseguente ritiro subito dal calcestruzzo durante la fase di presa ed indurimento.

Nel grafico 11.16 è stato rappresentato lo sviluppo delle deformazioni per l'armatura inferiore in funzione del carico.

Nel grafico 11.17 è stato rappresentato lo sviluppo delle deformazioni per l'armatura inferiore in funzione del tempo, con il cerchio rosso abbiamo contrassegnato la fase del getto di completamento.

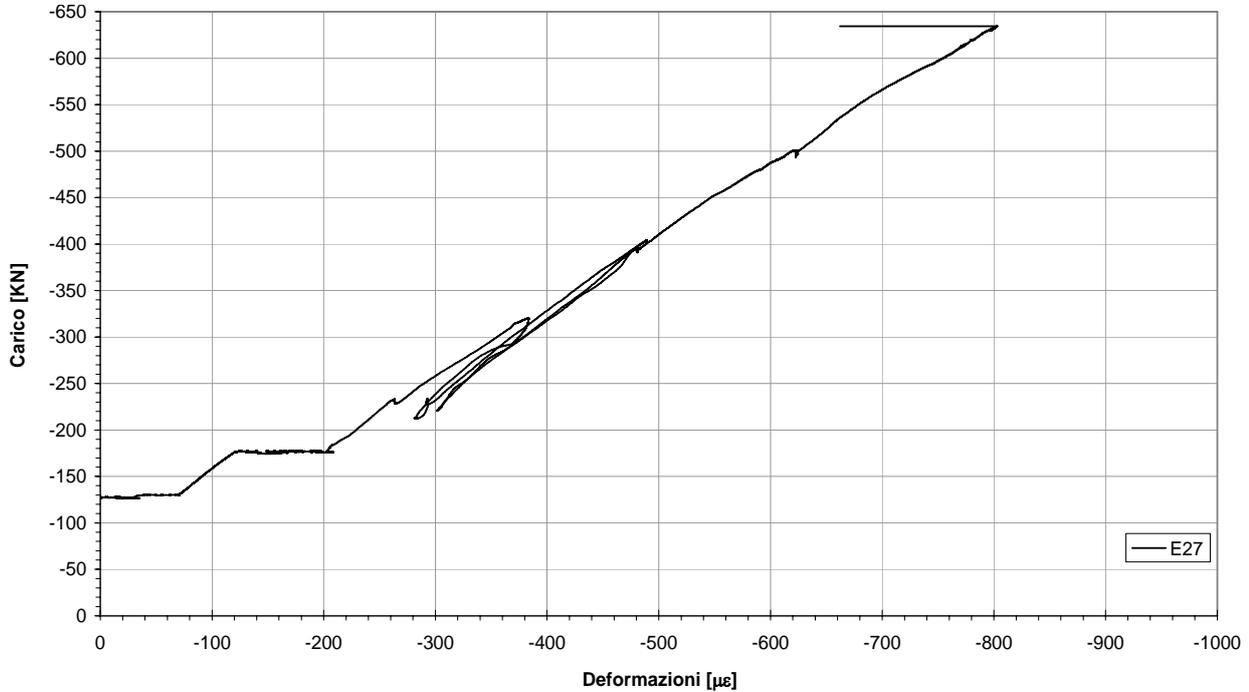


Grafico 11.12: estensimetri sul cls di completamento

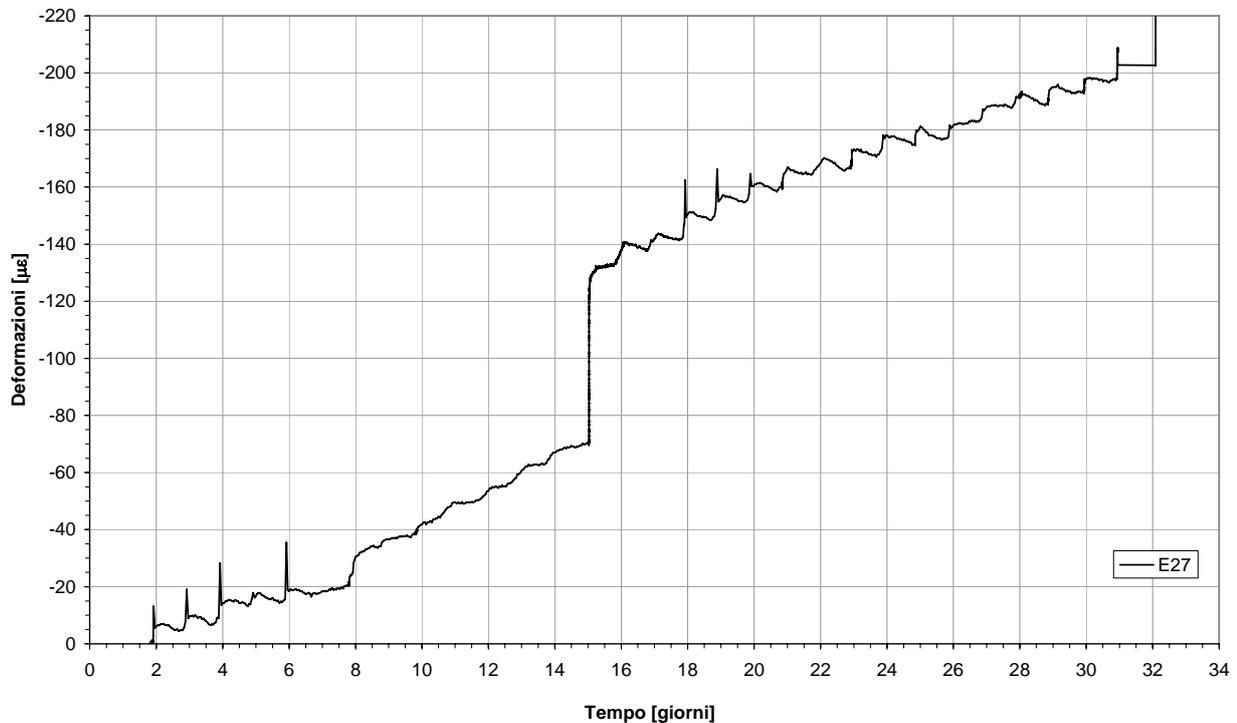


Grafico 11.13: estensimetri sul cls di completamento

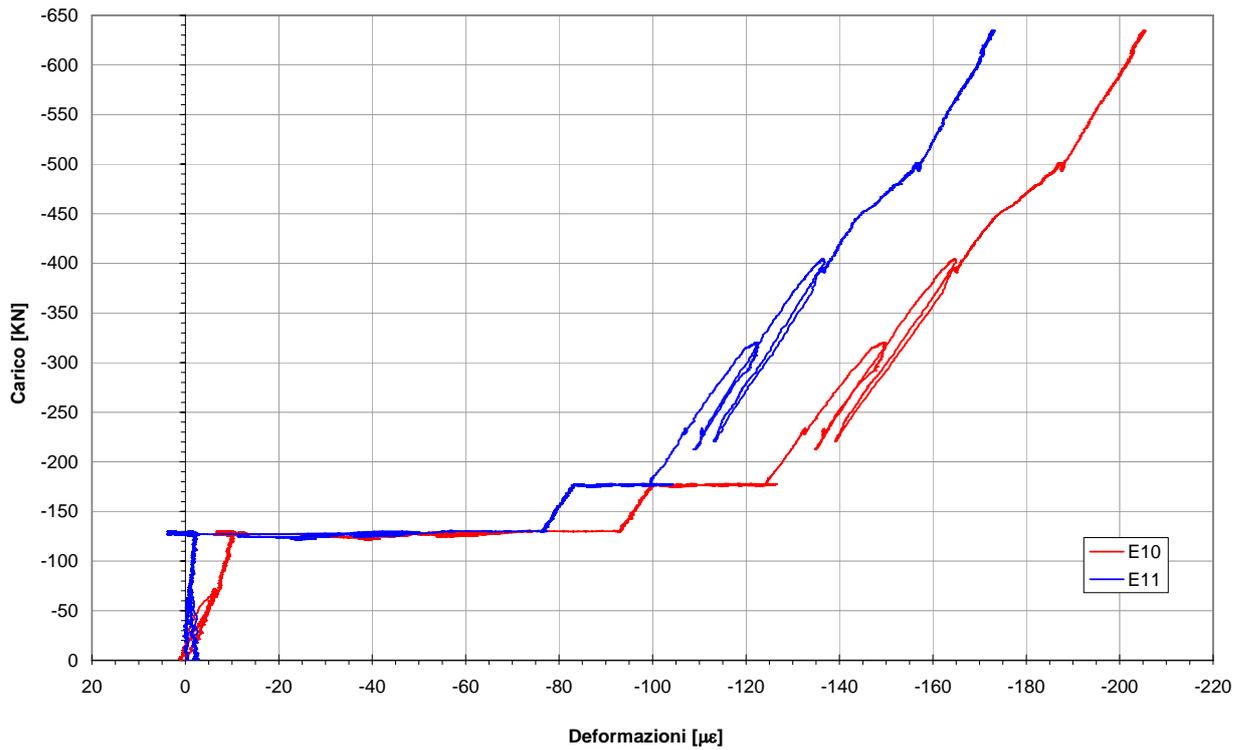


Grafico 11.14: estensimetri sul corrente superiore

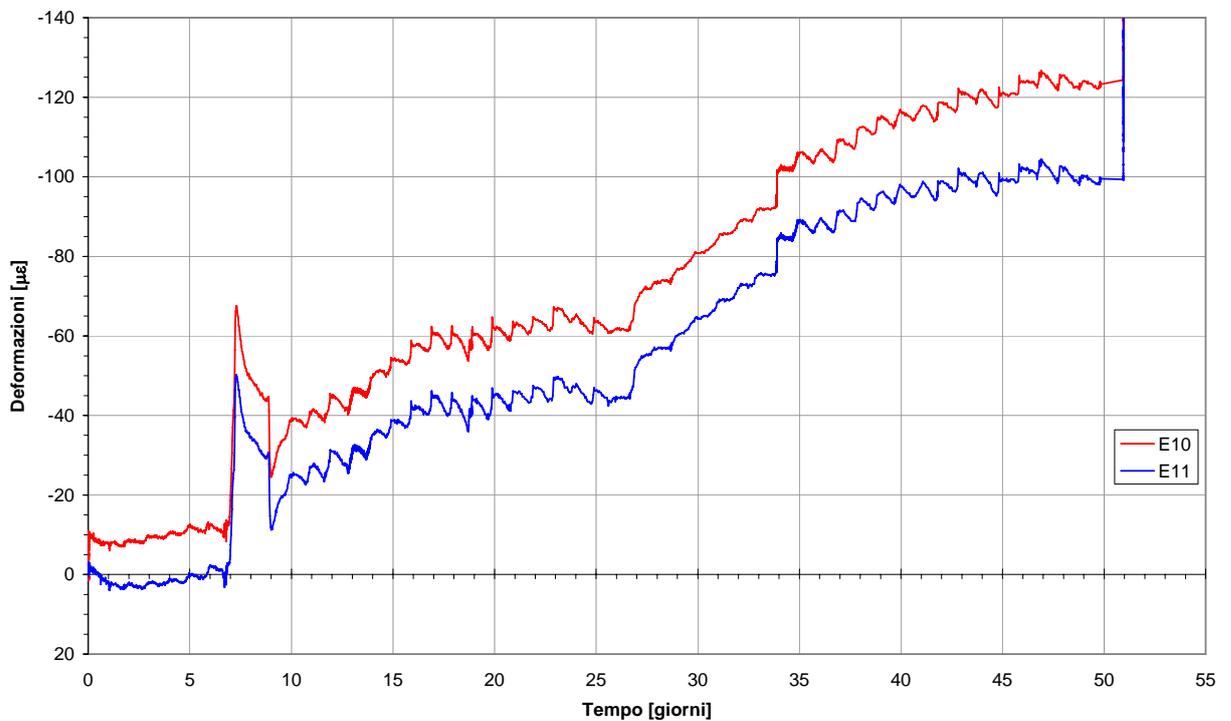


Grafico 11.15: estensimetri sul corrente superiore

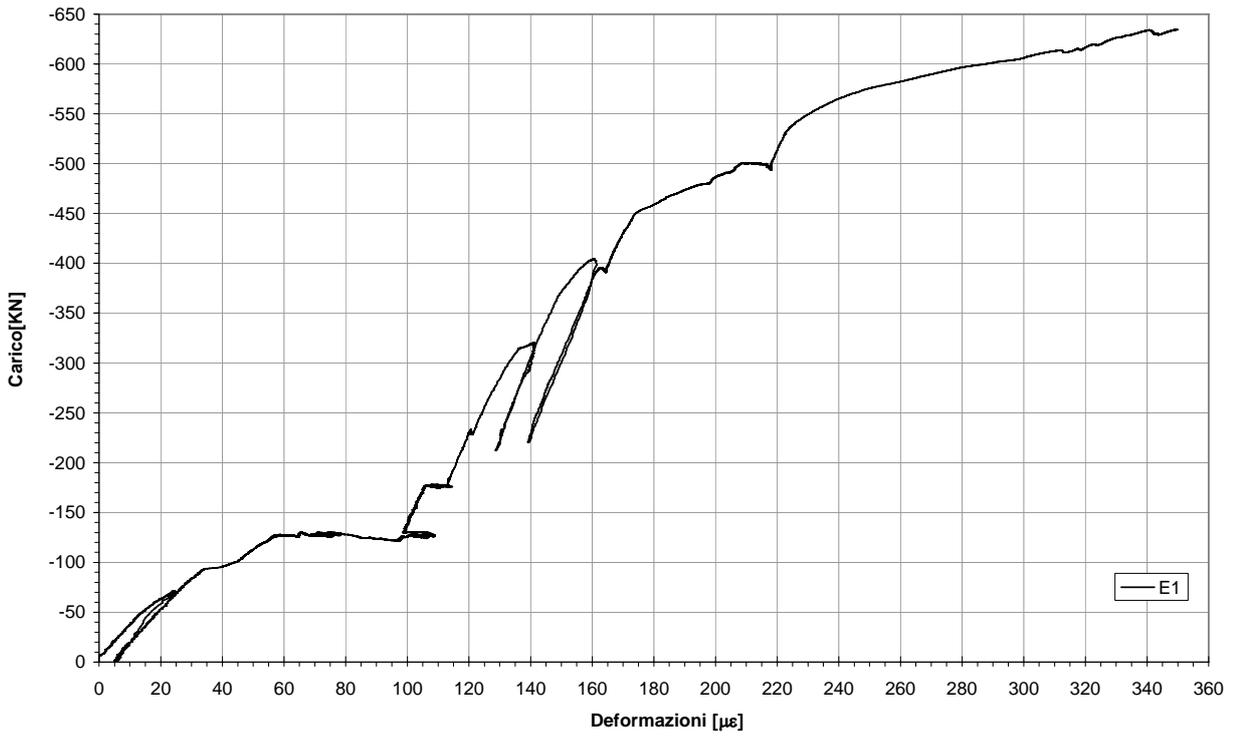


Grafico 11.16: estensimetro sul corrente inferiore

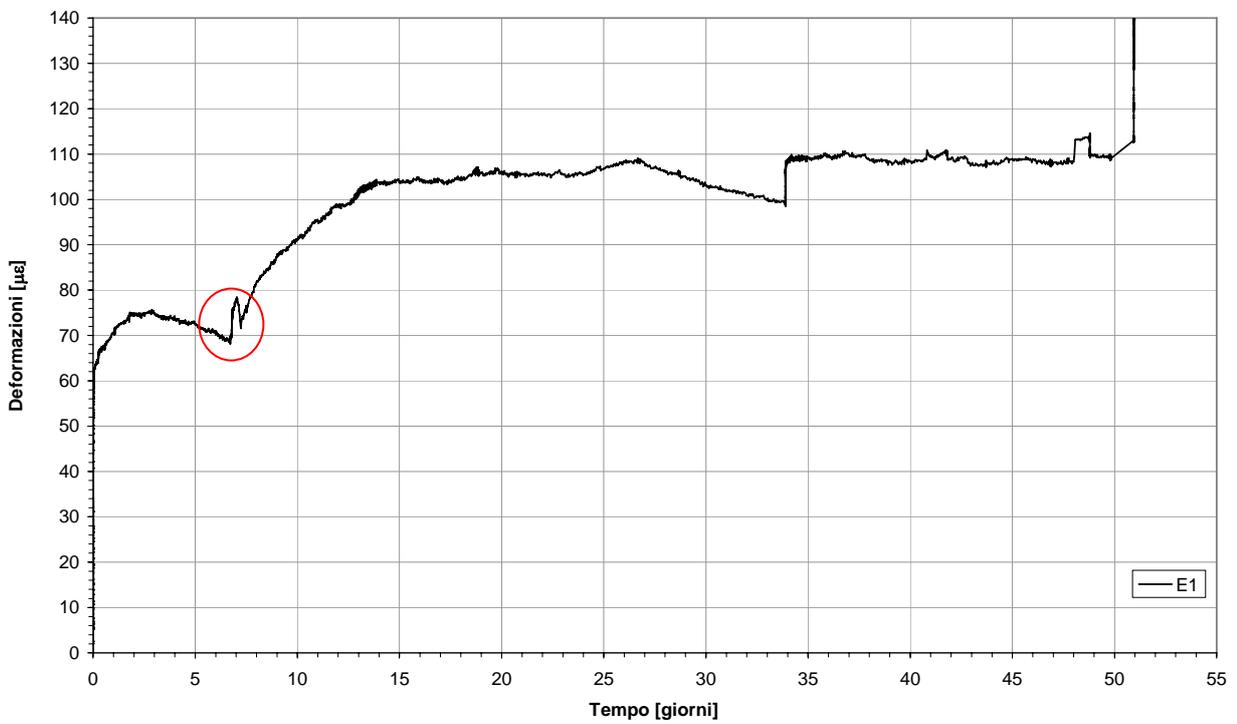


Grafico 11.17: estensimetro sul corrente inferiore

### 11.6.2 Grafici relativi agli strumenti della sezione 2

Nel grafico 11.18 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni in zona compressa in funzione del carico. Il carico parte da 127 kN poiché tali estensimetri sono stati applicati dopo circa 12 giorni dall'inizio della prova, si vede un primo tratto orizzontali di deformazione viscosa dovuto al carico da 127 kN mantenuto costante poi si vede un nuovo incremento di carico fino a 177 kN seguita dalla deformazione viscosa che è terminata quando si è applicato l'ultimo incremento di carico che ha registrato i 635 kN in corrispondenza dei quali si è rotta la trave.

Nel grafico 11.19 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni in zona compressa in funzione del tempo. Si vede un salto verticale in corrispondenza del quindicesimo giorno che corrisponde alla seconda fase di carico dove si sono raggiunti i 177 kN. Al trentaduesimo giorno si è incrementato il carico fino alla rottura della trave, ma non tale incremento non è stato riportato. La curva presenta un andamento ondulato con frequenza giornaliera che è da attribuirsi alla variazione termica giornaliera.

Nel grafico 11.20 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni del corrente superiore in funzione del carico.

Nel grafico 11.21 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni del corrente superiore in funzione del tempo, la prima discontinuità è da attribuirsi al getto, mentre la seconda all'incremento di carico che ha raggiunto i 177 kN.

Nel grafico 11.22 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni sul traliccio in funzione del carico, si nota che tre ferri del traliccio sono compressi, mentre il terzo è teso. Per quanto riguarda l'estensimetro E20 il suo andamento è stato interrotto dopo il getto di completamento poiché i dati forniti non erano più attendibili.

Nel grafico 11.23 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni sul traliccio in funzione del tempo.

Nel grafico 11.24 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni sul traliccio immerso fin dall'inizio della prova nel calcestruzzo prefabbricato in funzione del carico.

Nel grafico 11.25 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni sul traliccio immerso fin dall'inizio della prova nel calcestruzzo prefabbricato in funzione del tempo.

Nel grafico 11.26 è rappresentato l'andamento delle deformazioni sul calcestruzzo prefabbricato in funzione del carico, con un cerchio rosso è stata evidenziata la parte terminale del grafico in cui si vede che al crescere del carico diminuiscono le deformazioni, questo fatto è dovuto all'innalzamento dell'asse neutro della sezione a cui corrisponde la diminuzione delle deformazioni in zona compressa.

Nel [grafico 11.27](#) è rappresentato l'andamento delle deformazioni sul calcestruzzo prefabbricato in funzione del tempo.

Nei [grafici 11.28 e 11.29](#) è rappresentato l'andamento delle deformazioni sul corrente inferiore rispettivamente in funzione del carico e del tempo.

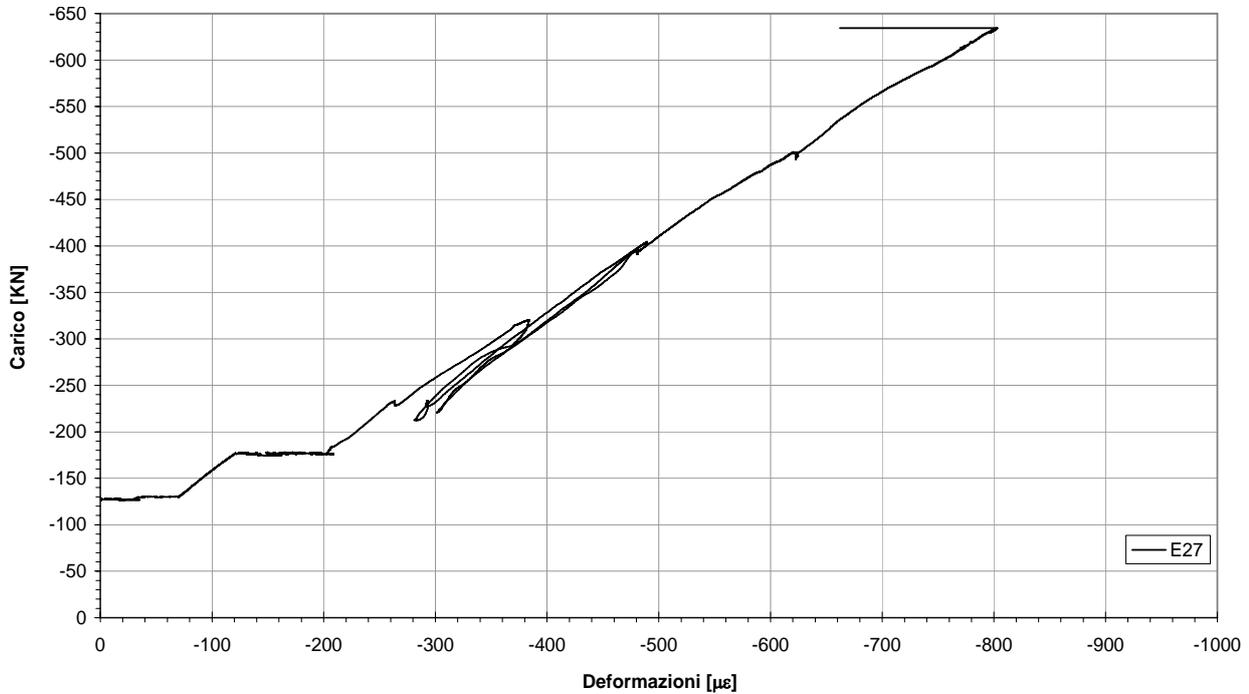


Grafico 11.18: estensimetri sul cls di completamento

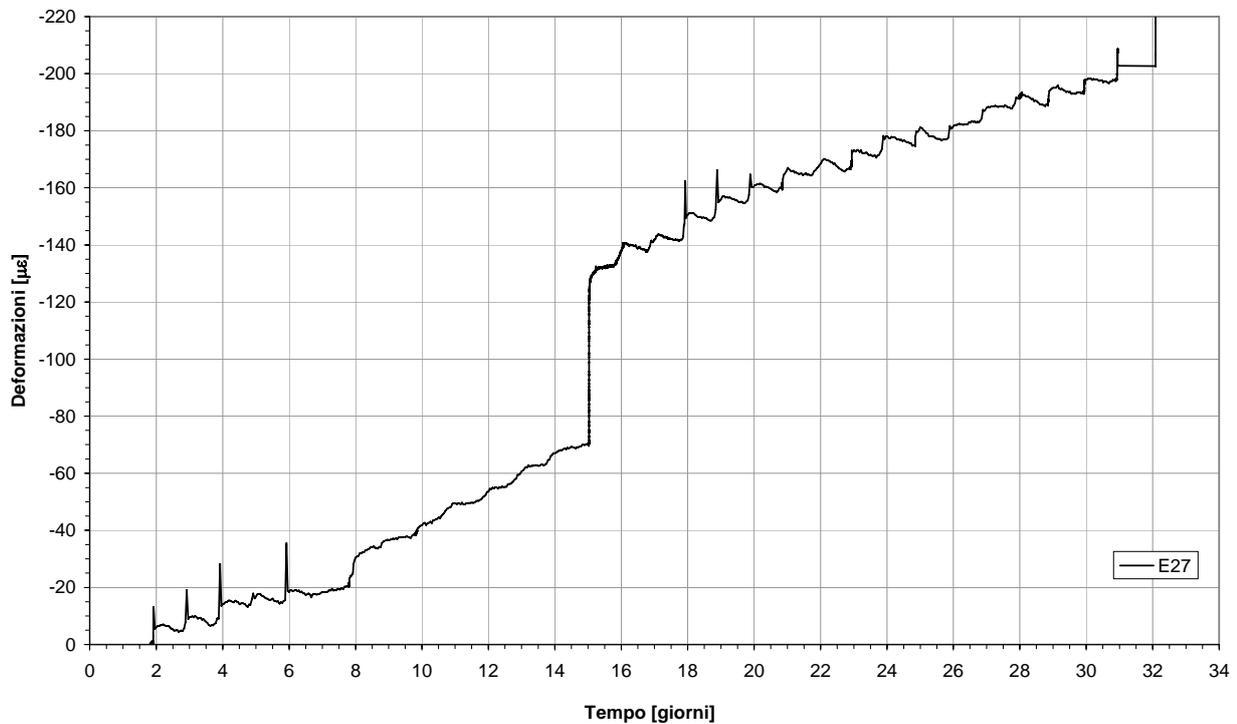


Grafico 11.19: estensimetri sul cls di completamento

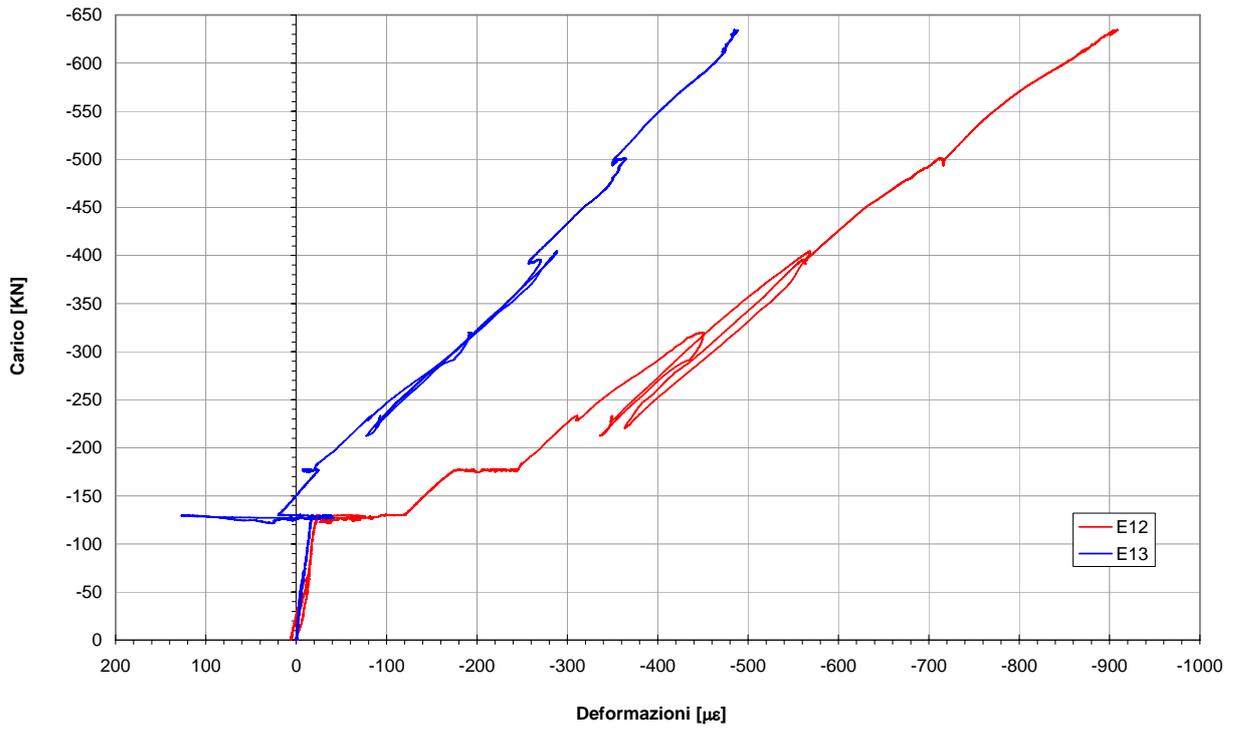


Grafico 11.20: estensimetri sul corrente superiore

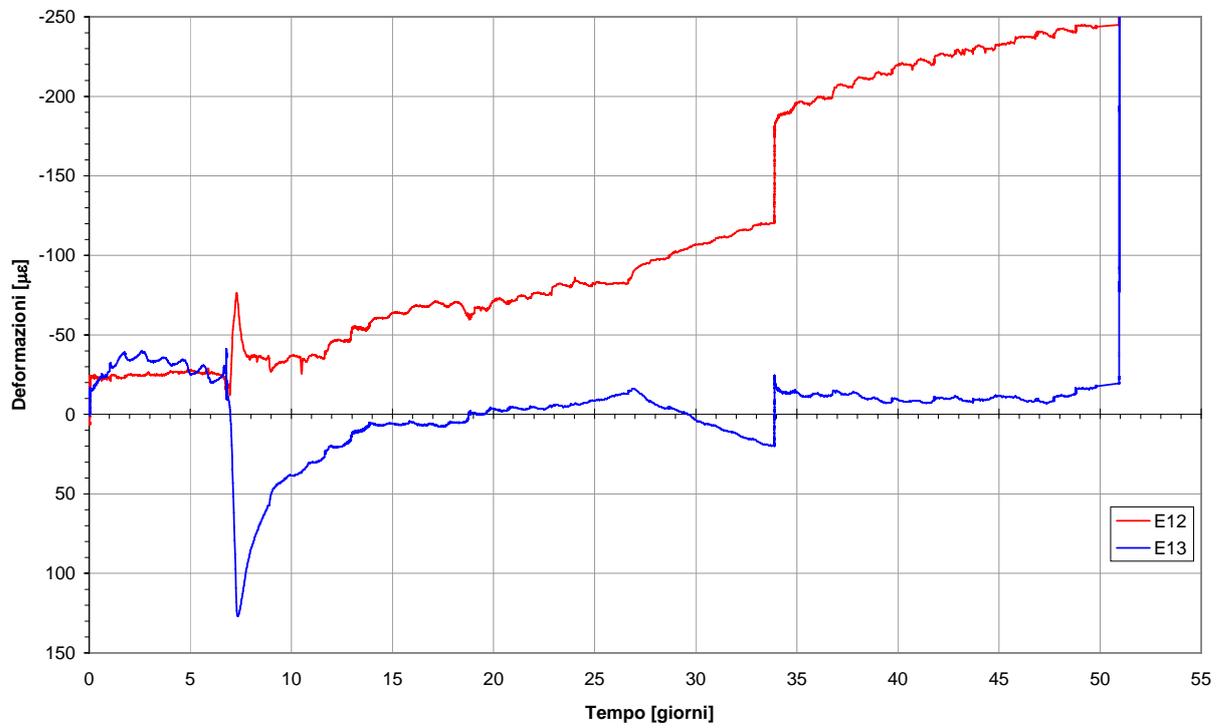


Grafico 11.21: estensimetri sul corrente superiore

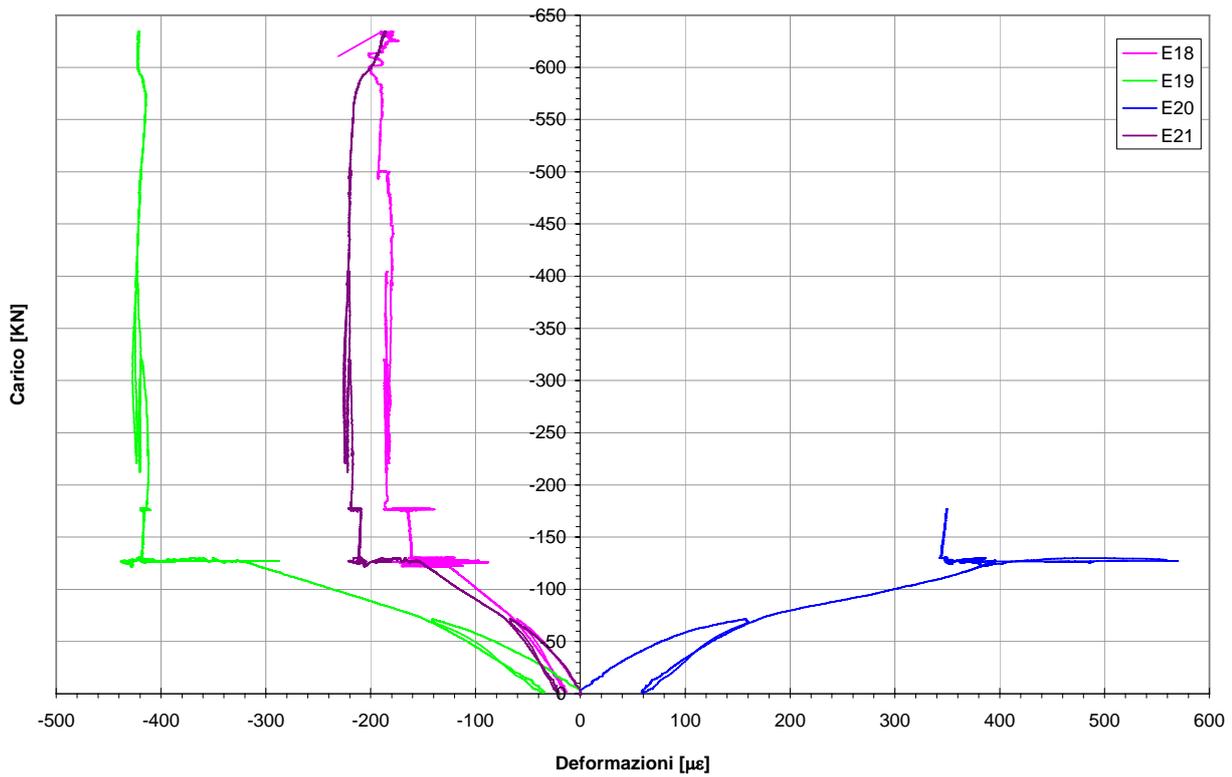


Grafico 11.22: estensimetri sul traliccio libero, collegati a mezzo ponte

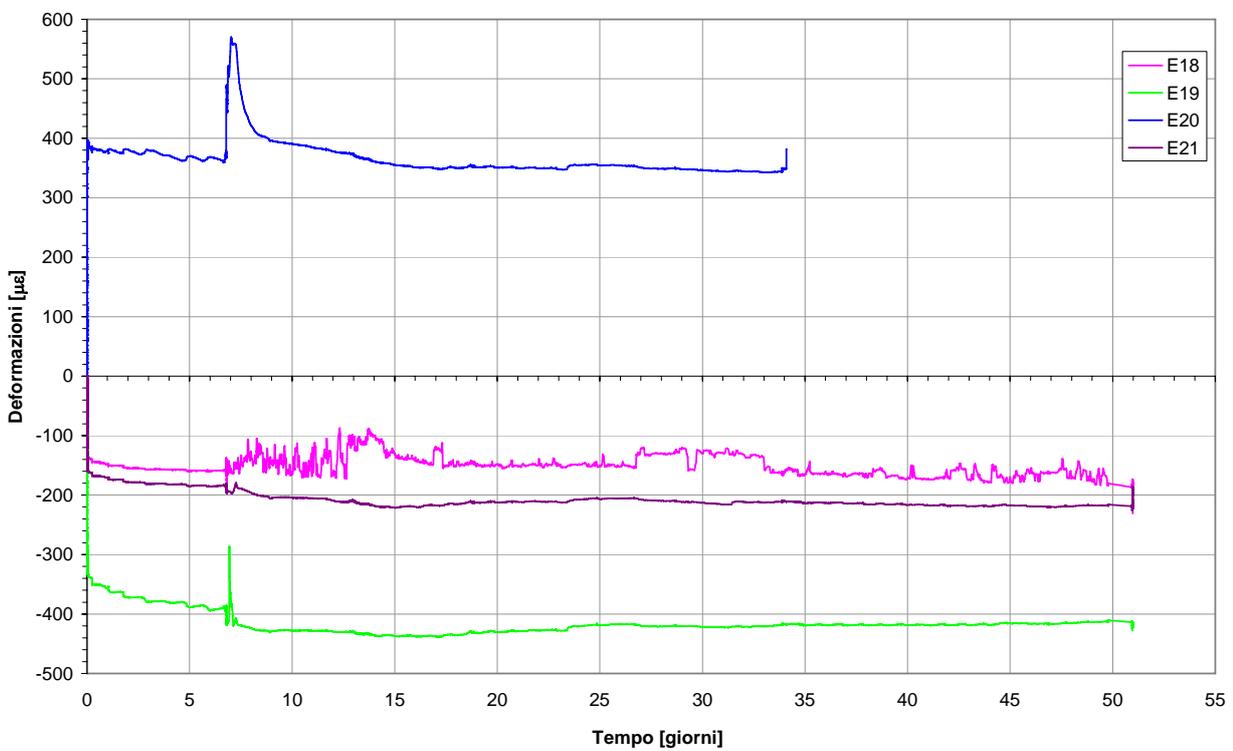


Grafico 11.23: estensimetri sul traliccio, collegati a mezzo ponte

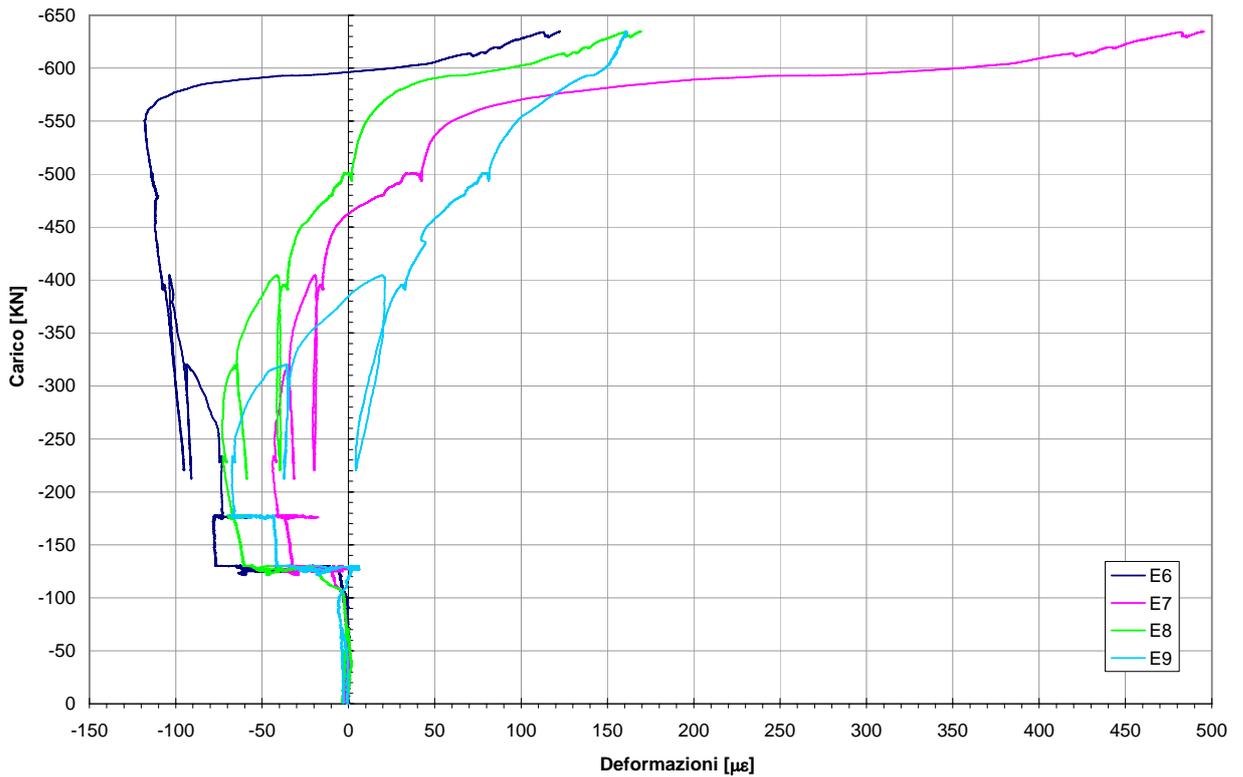


Grafico 11.24: estensimetri sul traliccio immersi nel getto prefabbricato

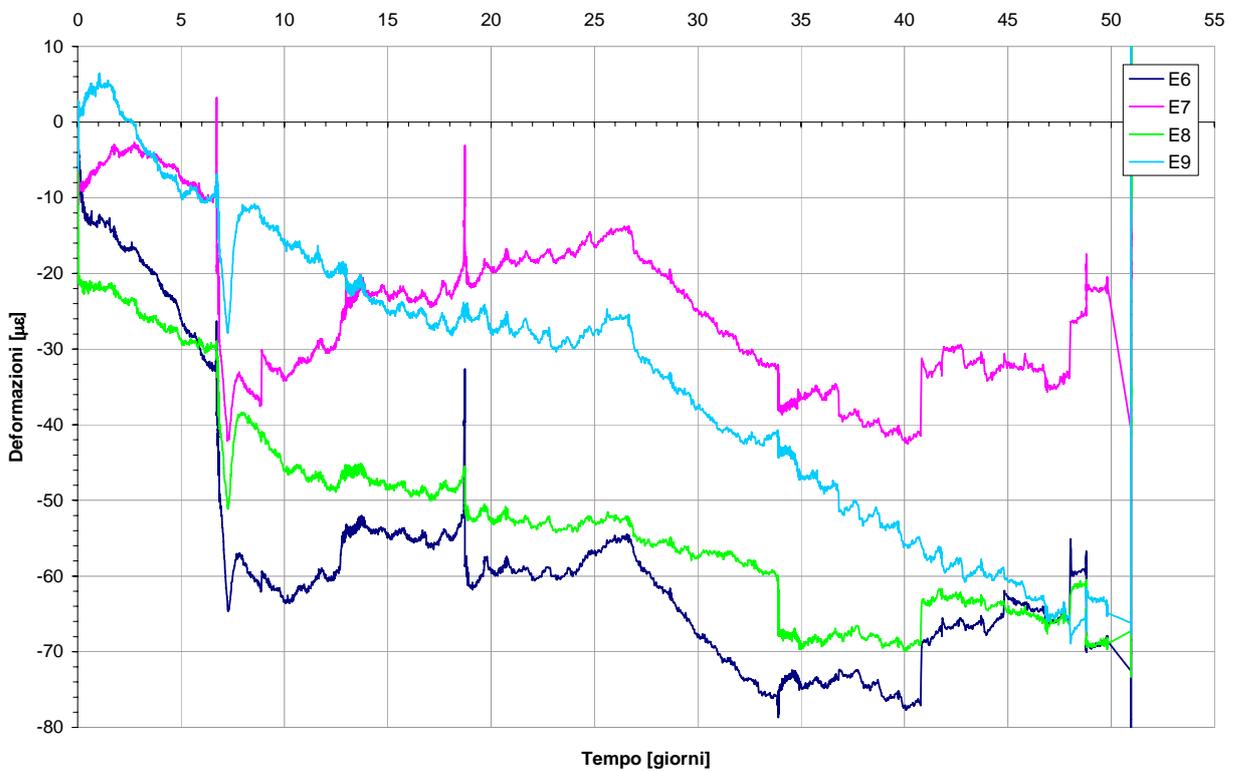


Grafico 11.25: estensimetri sul traliccio immersi nel getto prefabbricato

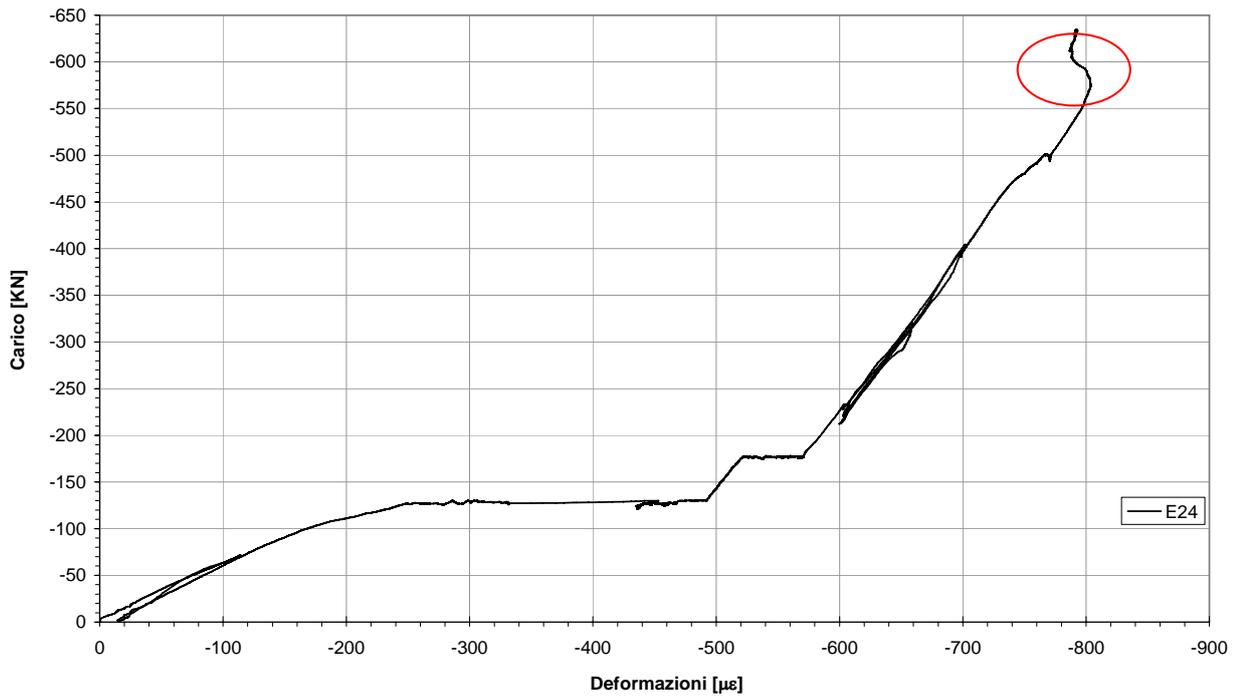


Grafico 11.26:estensimetri sul cls prefabbricato

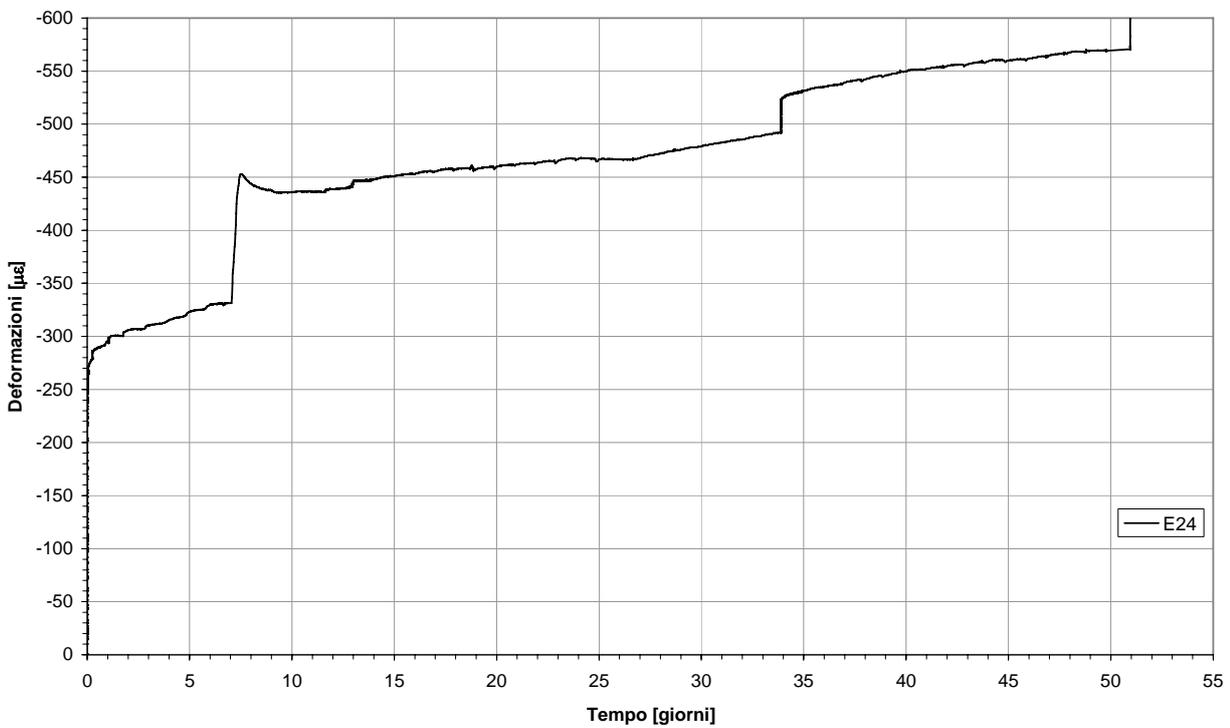


Grafico 11.27: estensimetri sul cls prefabbricato

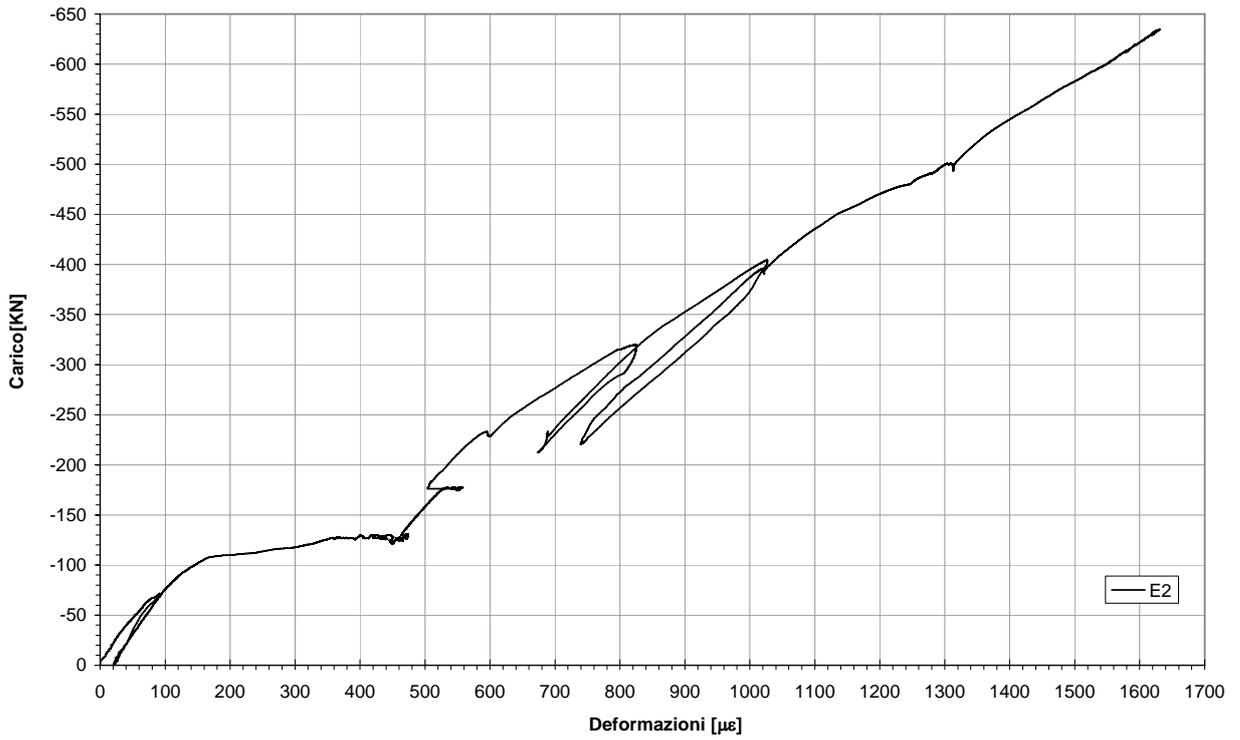


Grafico 11.28: estensimetro sul corrente inferiore

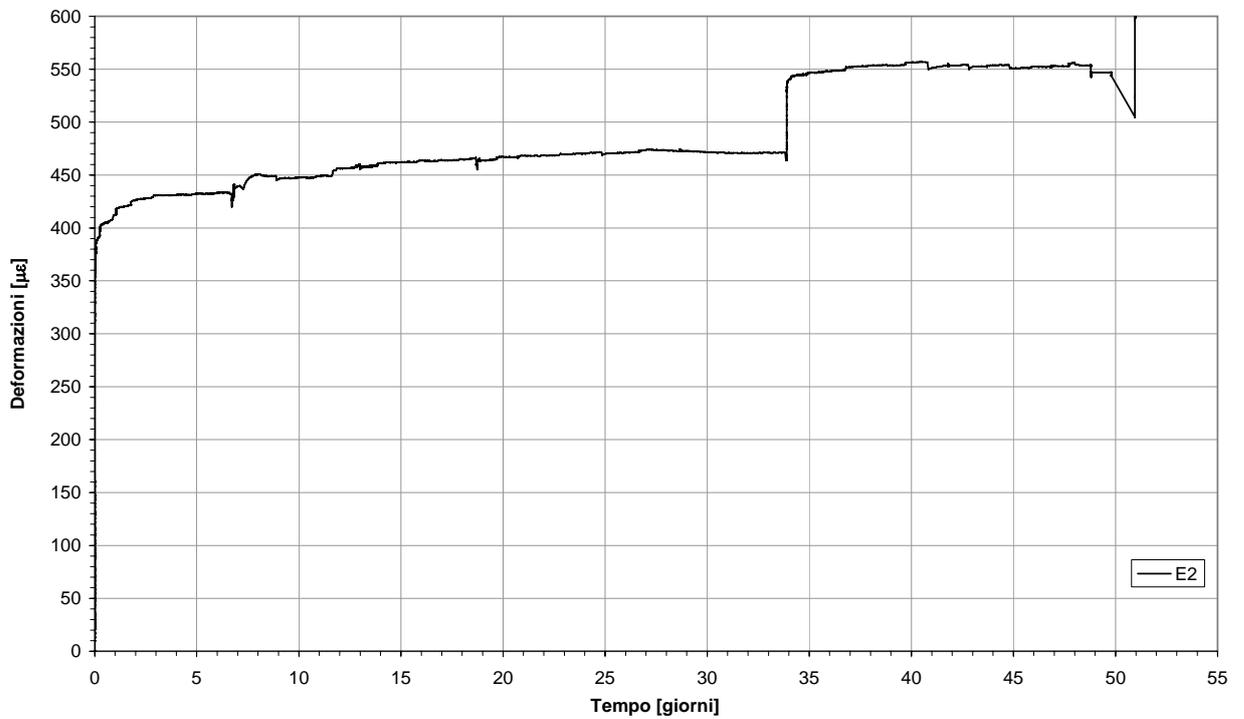


Grafico 11.29: estensimetro sul corrente inferiore

### 11.6.3 Grafici relativi agli strumenti della sezione 3

Nel grafico 11.30 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni in zona compressa in funzione del carico. Il carico parte da 127 kN poiché tali estensimetri sono stati applicati dopo circa 12 giorni dall'inizio della prova, si vede un primo tratto orizzontali di deformazione viscosa dovuto al carico da 127 kN mantenuto costante, poi si vede un nuovo incremento di carico fino a 177 kN seguita dalla deformazione viscosa che è terminata quando si è applicato l'ultimo incremento di carico che ha raggiunto i 635 kN in corrispondenza dei quali si è rotta la trave.

Nel grafico 11.31 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni in zona compressa in funzione del tempo. Si vede un salto verticale in corrispondenza del quindicesimo giorno che corrisponde alla seconda fase di carico dove si sono raggiunti i 177 kN. Al trentaduesimo giorno si è incrementato il carico fino alla rottura della trave, ma tale incremento non è stato riportato. La curva presenta un andamento ondulato con frequenza giornaliera che è da attribuirsi alla variazione termica giornaliera.

Nel grafico 11.32 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni del corrente superiore in funzione del carico. Gli strumenti presentano tutti un comportamento omogeneo tranne l'estensimetro E14 che è stato bagnato durante la fase di getto, ma che poi ha riassunto un andamento in linea con gli altri strumenti.

Nel grafico 11.33 è stato graficato lo sviluppo delle deformazioni del corrente superiore in funzione del tempo, la prima discontinuità è da attribuirsi al getto, mentre la seconda all'incremento di carico che ha raggiunto i 177 kN.

Nel grafico 11.34 è rappresentato l'andamento delle deformazioni sul calcestruzzo prefabbricato in funzione del carico, anche in questo si è visto che nella parte terminale del grafico al crescere del carico diminuiscono le deformazioni del cls, questo fatto è dovuto all'innalzamento dell'asse neutro della sezione a cui corrisponde la diminuzione delle deformazioni in zona compressa.

Nel grafico 11.35 è rappresentato l'andamento delle deformazioni sul calcestruzzo prefabbricato in funzione del tempo.

Nei grafici 11.36 e 11.37 è rappresentato l'andamento delle deformazioni sul corrente inferiore rispettivamente in funzione del carico e del tempo. Nel grafico 11.36 si nota una diminuzione delle deformazioni del corrente inferiore nella parte terminale della curva. Si attribuisce tale fenomeno all'improvvisa interruzione della prova e quindi dell'applicazione del carico che ha permesso alla trave di rilassarsi improvvisamente facendo diminuire le tensioni e le deformazioni.

Nei grafici 11.38 e 11.39 è rappresentato l'andamento degli spostamenti verticali, in mezzera della trave e in corrispondenza dei punti di applicazione del carico, in funzione del carico e del tempo.

Nei grafici 11.40 e 11.41 è rappresentato l'andamento degli spostamenti in corrispondenza della zona centrale superiore della trave. Il grafico è stato ottenuto accostando le letture fatte dagli strumenti quando era posato sulla superficie di calcestruzzo prefabbricato e quelle fatte quando lo strumento era posato sulla superficie di cls di completamento. Il tratto rettilineo compreso tra il settimo e il dodicesimo giorno approssima l'andamento delle deformazioni nel periodo in cui lo strumento era staccato.

Nei grafici 11.42 e 11.43 è rappresentato l'andamento degli spostamenti in corrispondenza della zona centrale inferiore della trave, rispettivamente in funzione del carico e del tempo.

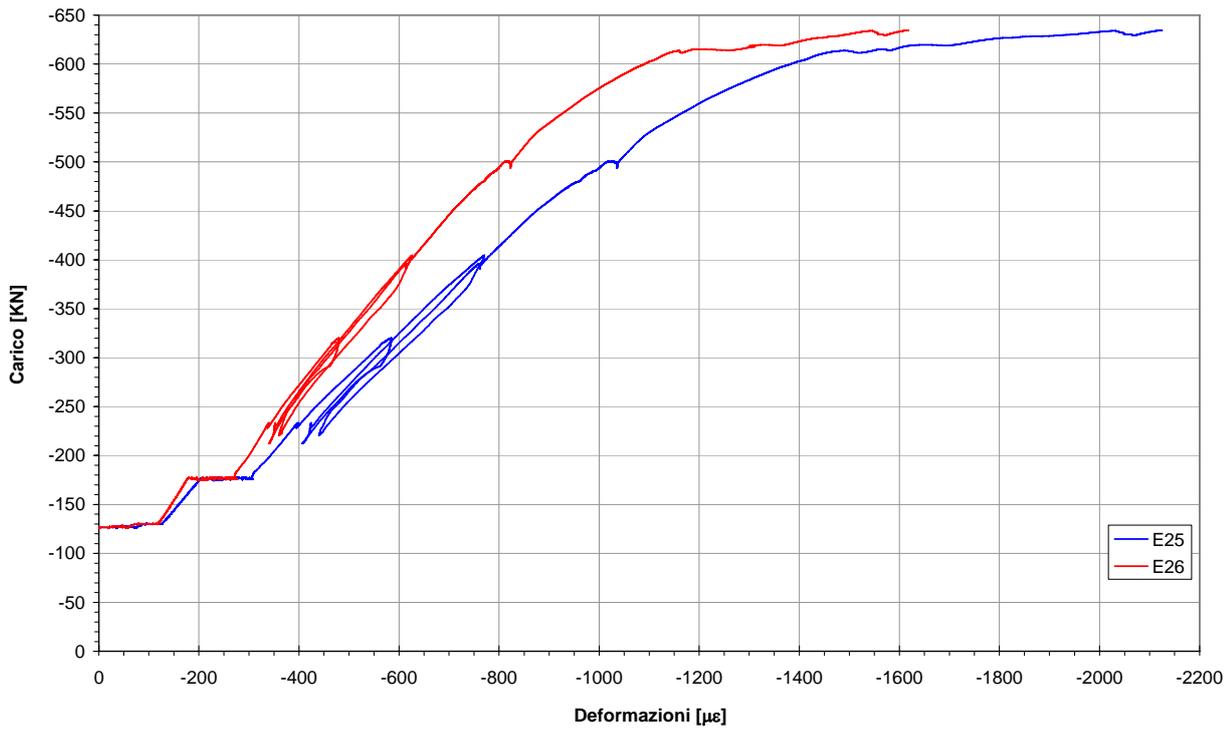


Grafico 11.30: estensimetri sul cls di completamento

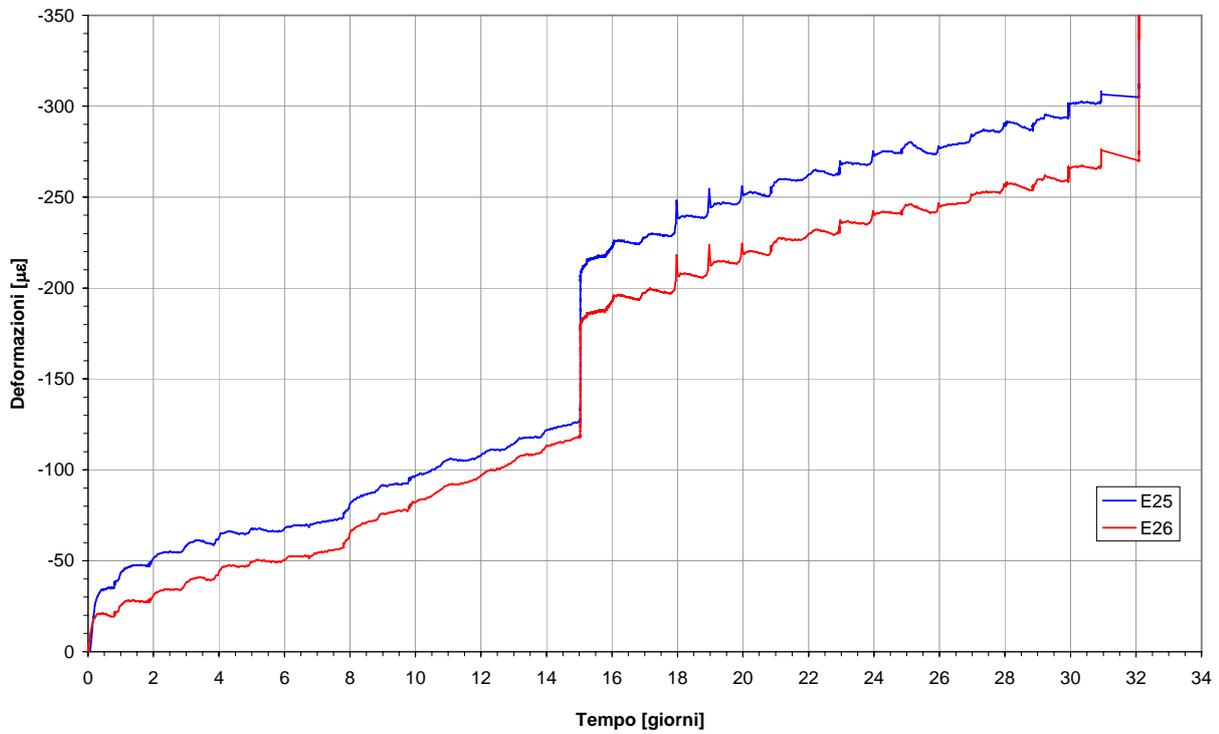


Grafico 11.31: estensimetri sul cls di completamento

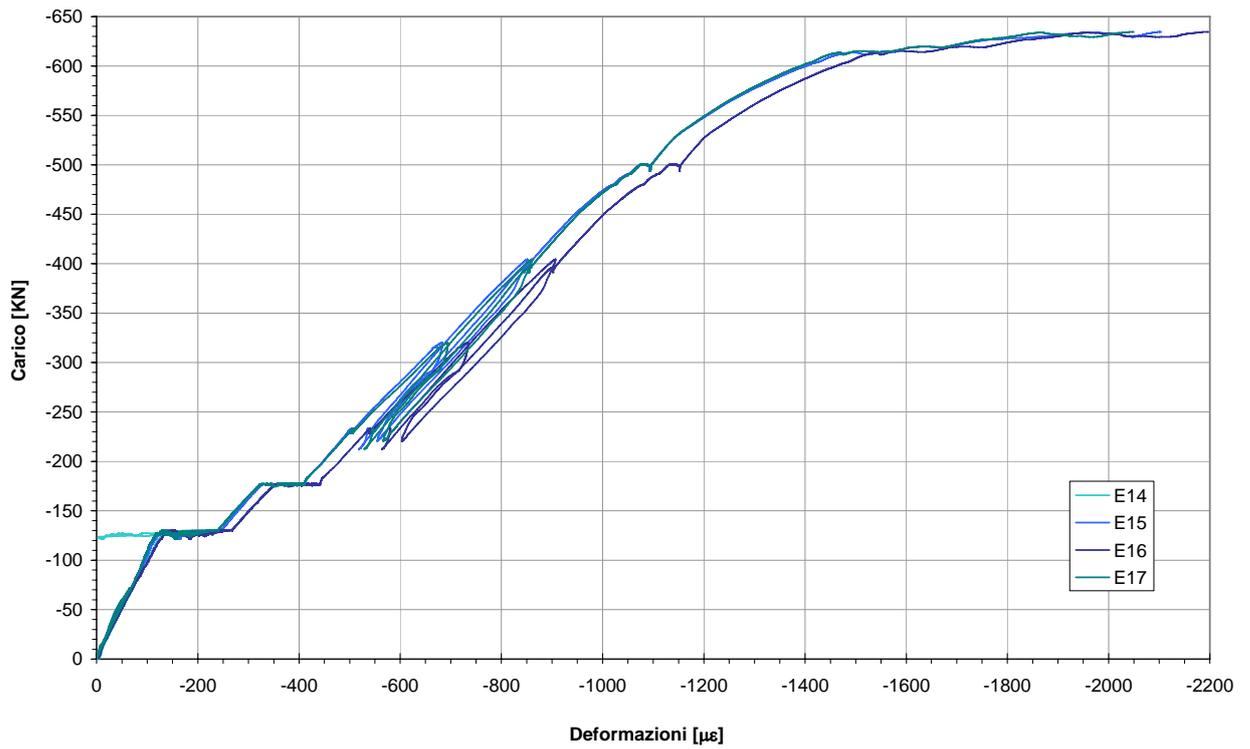


Grafico 11.32: estensimetri sul corrente superiore

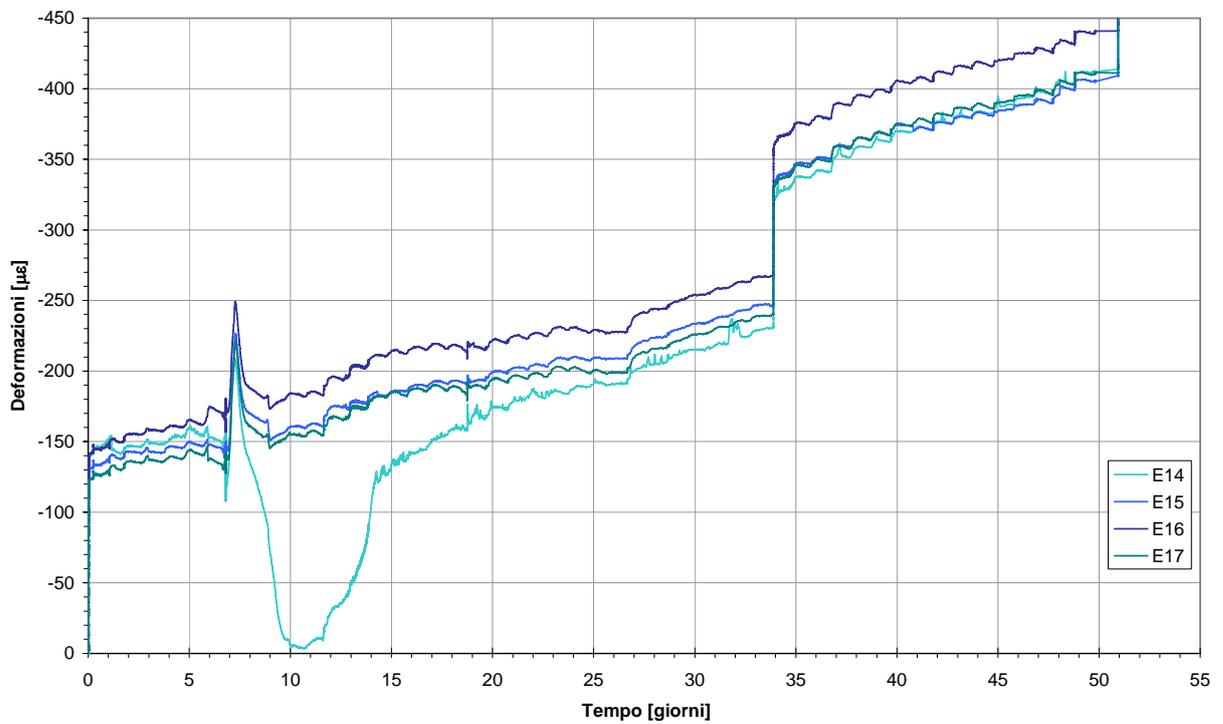


Grafico 11.33: estensimetri sul corrente superiore

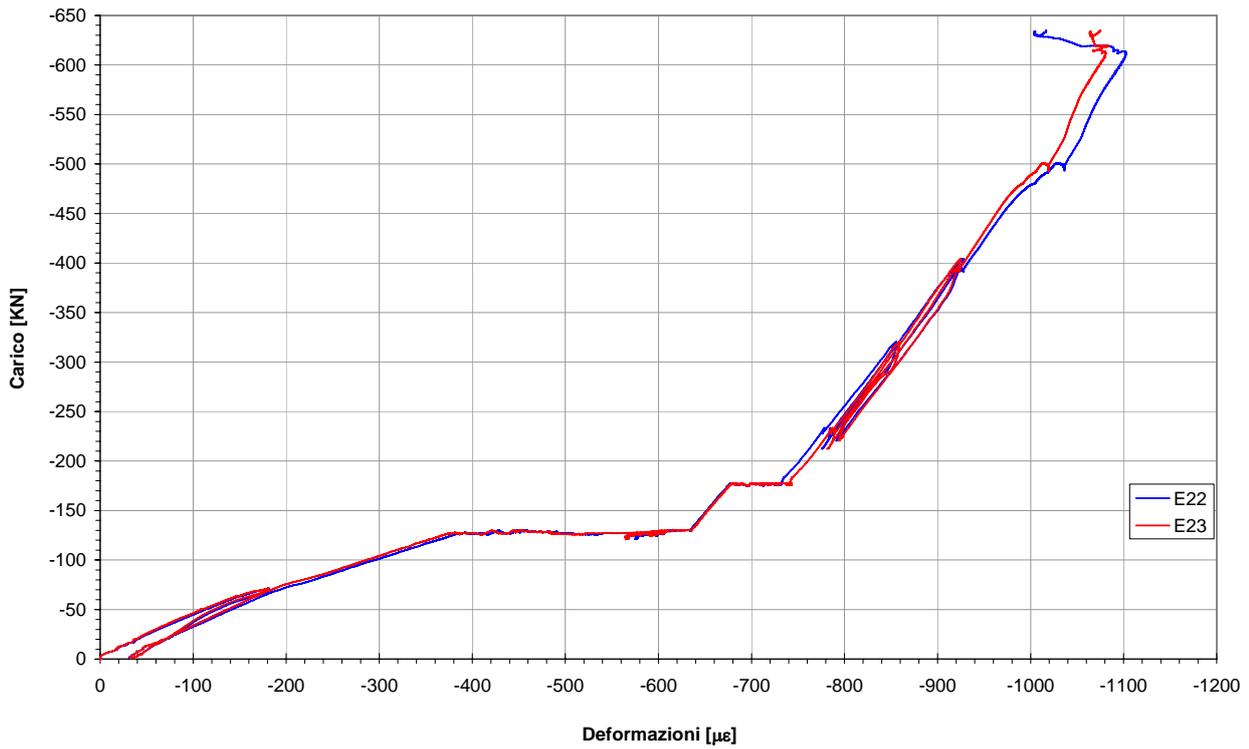


Grafico 11.34: estensimetri sul cls prefabbricato

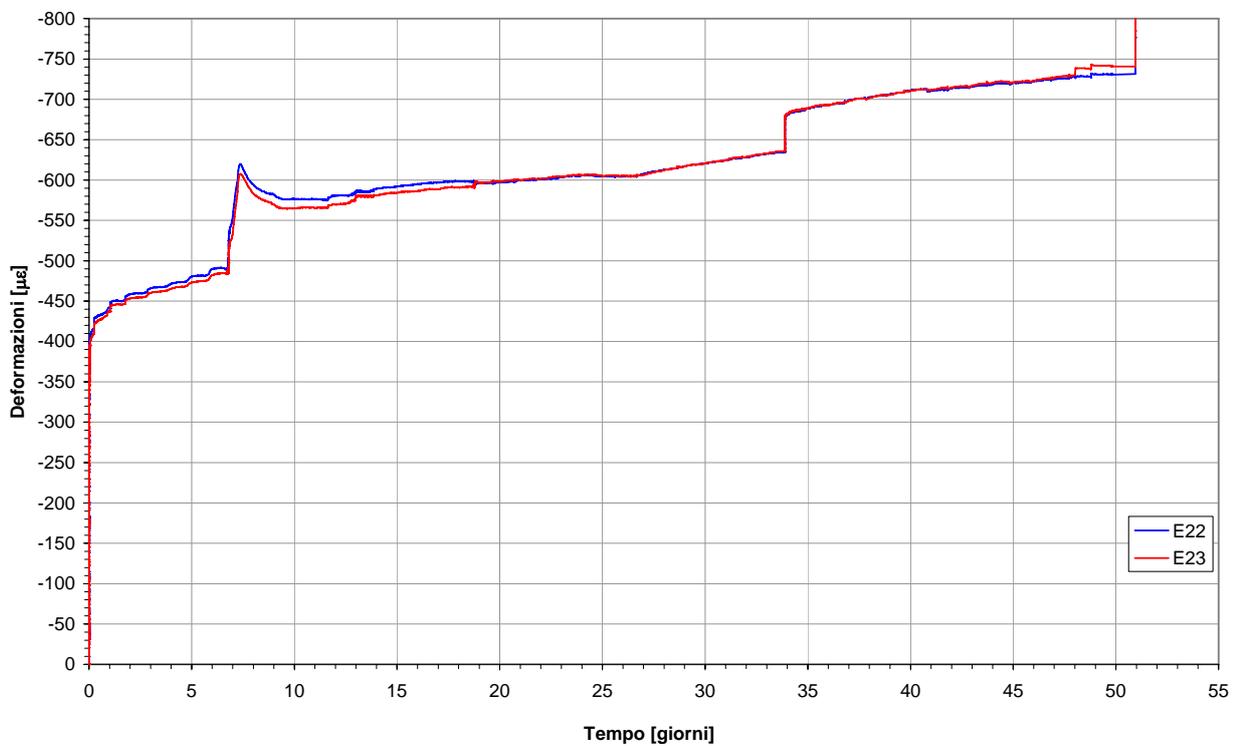


Grafico 11.35: estensimetri sul cls prefabbricato

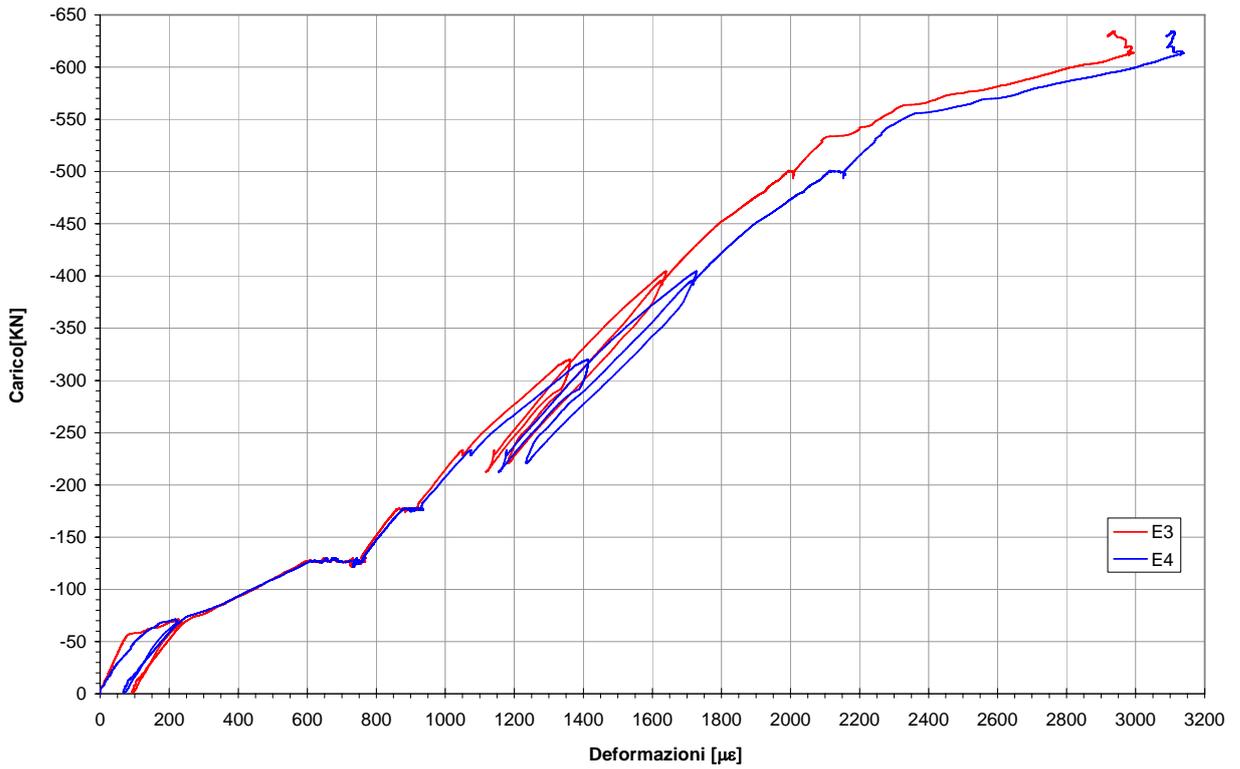


Grafico 11.36: estensimetri sul corrente inferiore

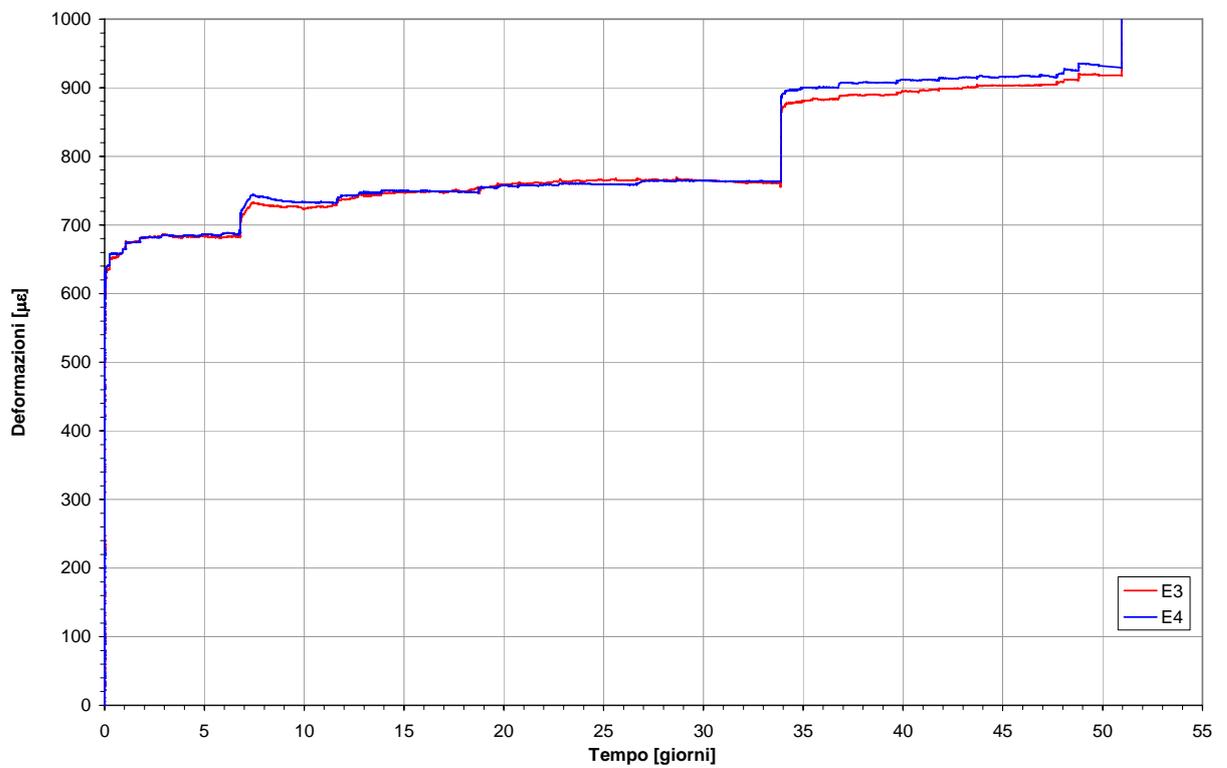


Grafico 11.37: estensimetri sul corrente inferiore

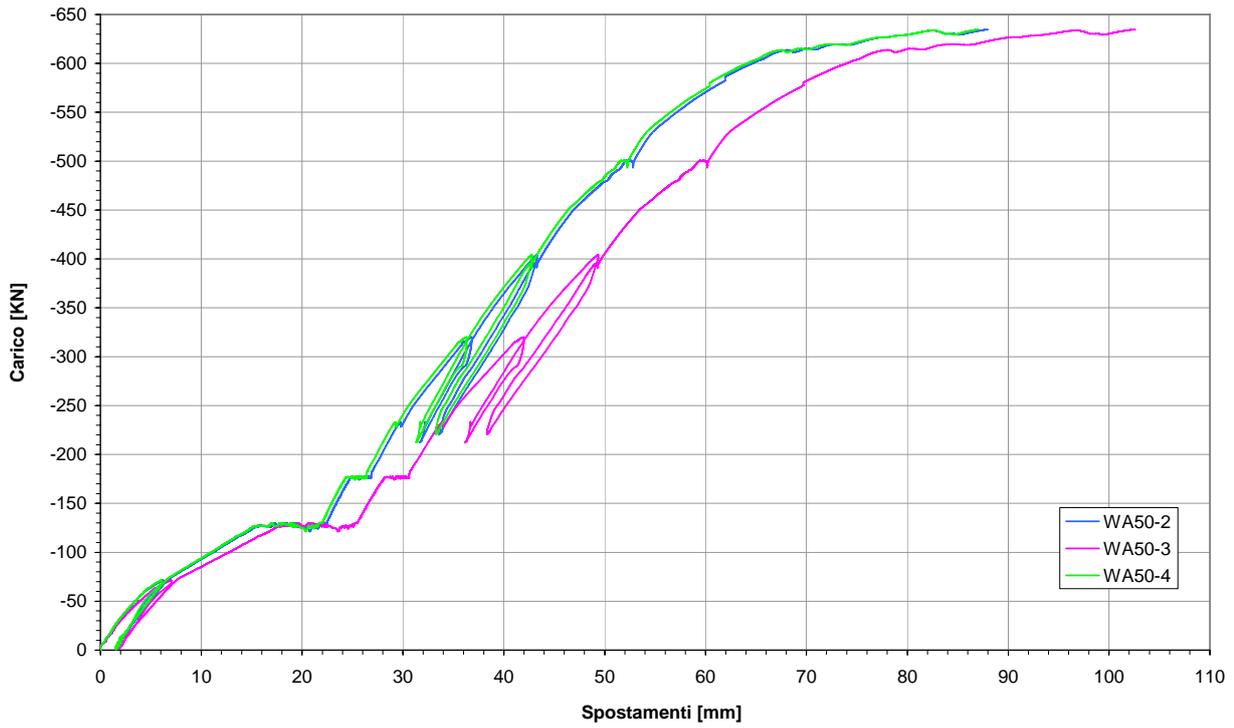


Grafico 11.38: LVDT verticali disposti sotto la trave

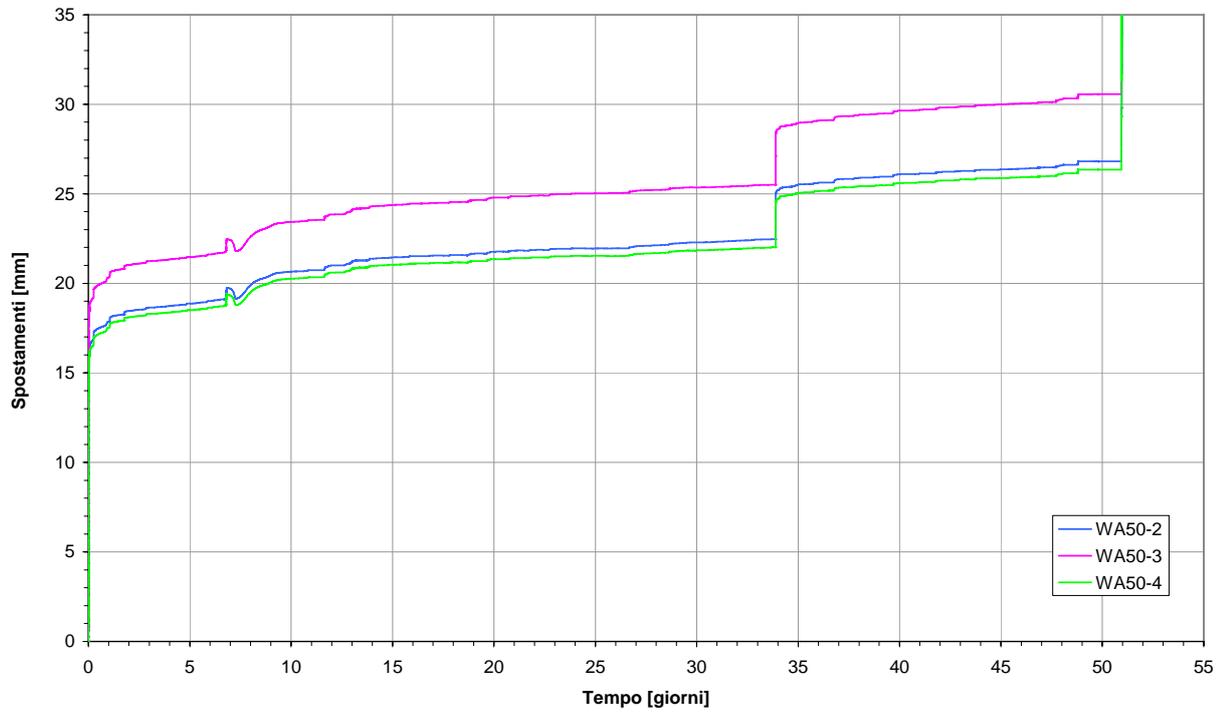


Grafico 11.39: LVDT verticali disposti sotto la trave

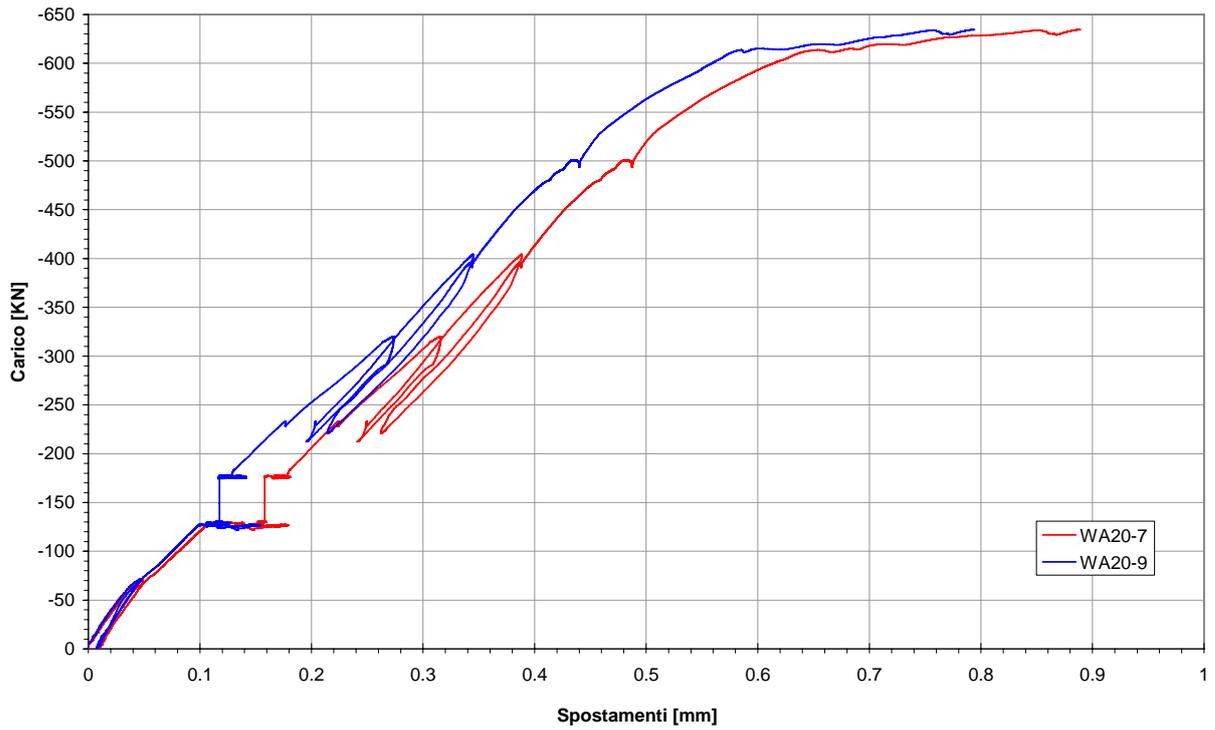


Grafico 11.40: LVDT orizzontali disposti sopra alla trave

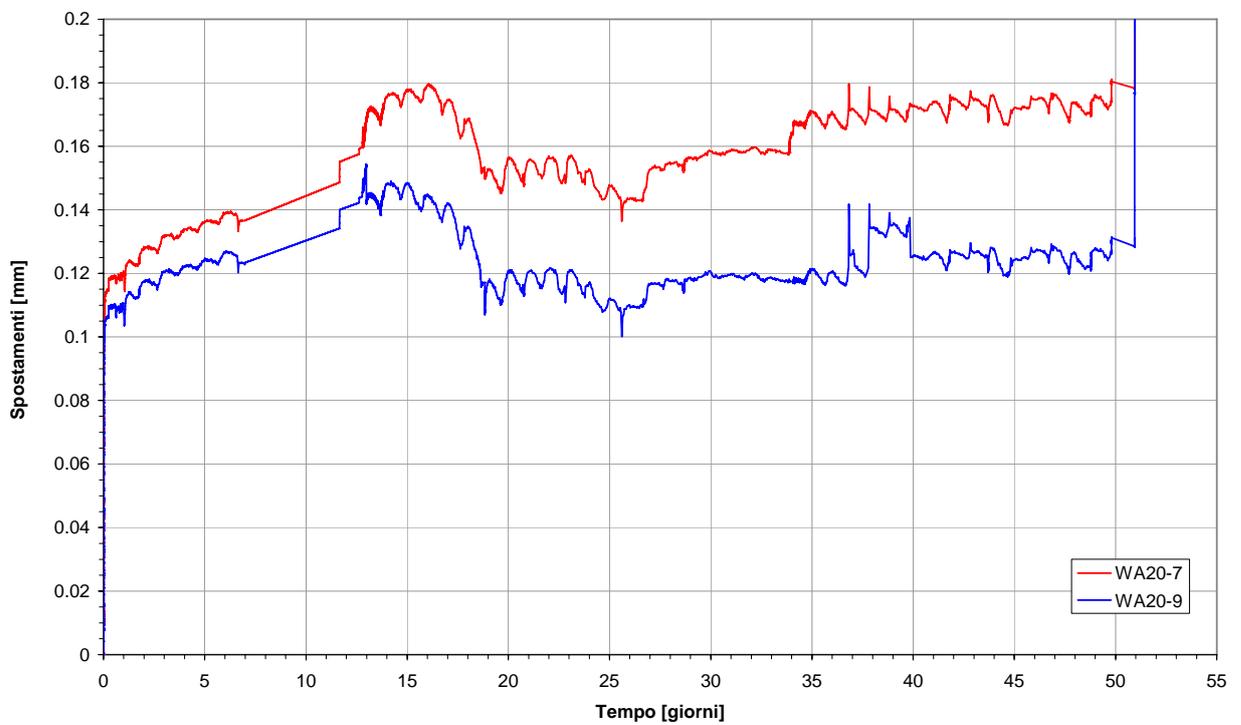


Grafico 11.41: LVDT orizzontali disposti sopra alla trave

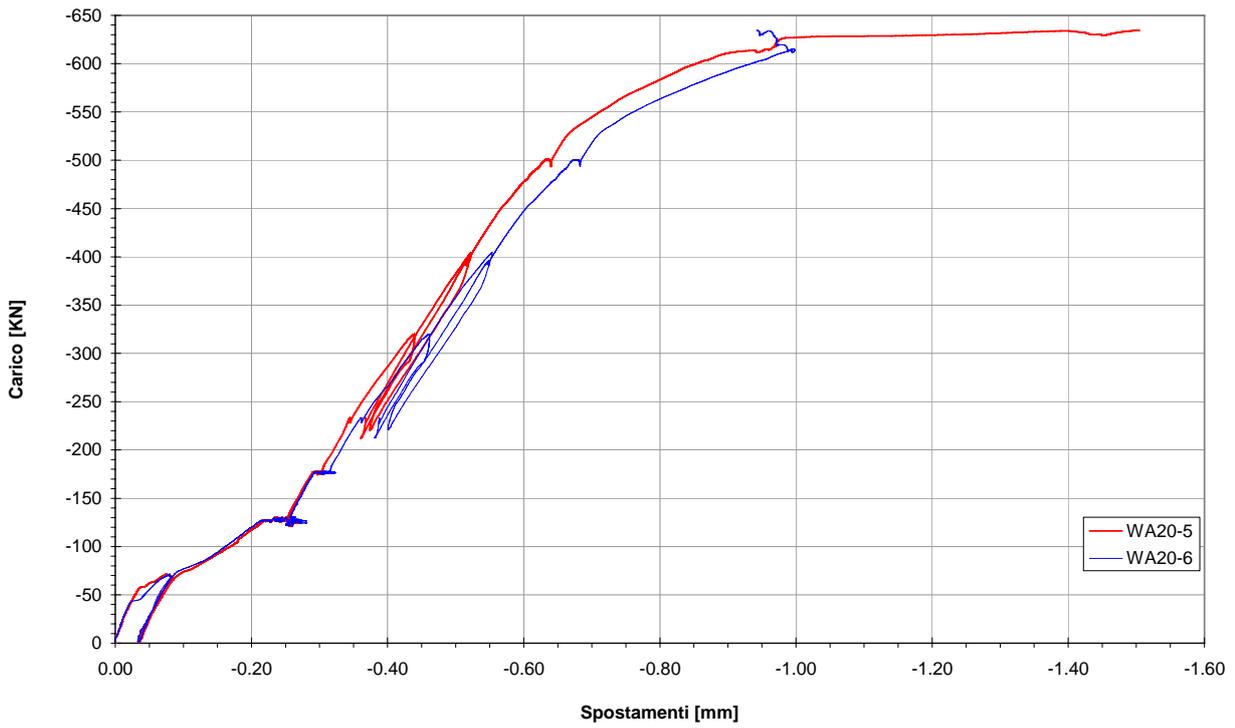


Grafico 11.42: LVDT orizzontali disposti sotto la trave

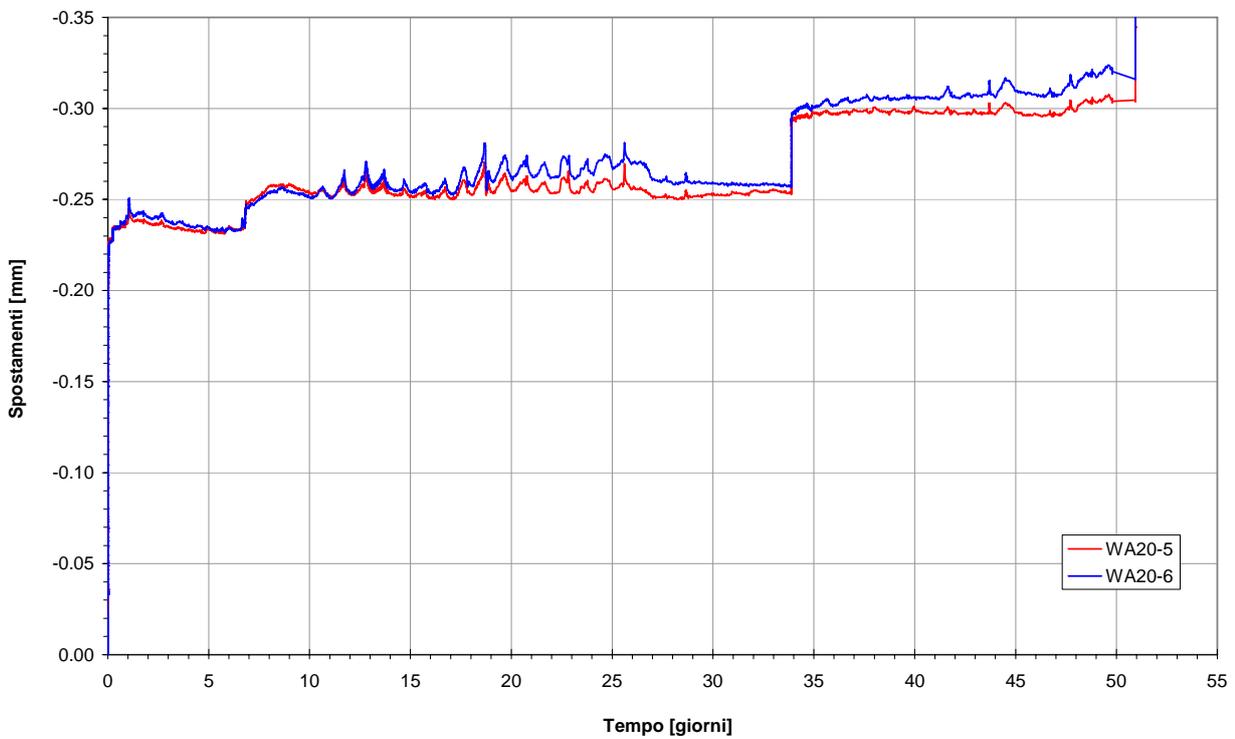


Grafico 11.43: LVDT orizzontali disposti sotto la trave

## 12 Analisi dei risultati strumentali

In questo capitolo si riportano i grafici ottenuti dall'elaborazione dei dati strumentali descritti nel capitolo precedente. Si riportano grafici del calcestruzzo depurati dalle deformazioni indotte dal ritiro termico, il diagramma momento-curvatura in cui è stato considerato il contributo del peso del getto di completamento per il calcolo del momento e della curvatura e la variazione di curvatura sviluppata nel calcestruzzo durante la fase di presa indurimento in cui gli strumenti che sono stati usati per la sua determinazione erano staccati. Inoltre, si riportano una serie di diagrammi nei quali si confrontano lo stato deformativo indotto nelle sezioni 2 e 3 risultato dai dati strumentali e raccolti nel cap.11 con quelli ottenuti da un semplice calcolo alle tensioni ammissibili. Infine si confrontano i diagrammi strumentali con quelli ottenuti mediante un modello numerico fibre.

### 12.1 Grafici ottenuti dall'elaborazione dei dati strumentali

#### 12.1.1 Grafici di freccia relativa, assoluta e momento-curvatura

Nel [grafico 12.1 e 12.2](#) si è riportato l'andamento della freccia assoluta della trave rispettivamente in funzione del carico e del tempo. La freccia assoluta è stata calcolata facendo la differenza tra il valore dello spostamento letto dal LVDT centrale WA50-3 e il valore dato dal prodotto tra la costante K e il carico applicato P.

$$K = \frac{s}{P}$$

s = abbassamento all'appoggio a fine carico;

P = valore finale del carico applicato;

$$f_{\text{assoluta}} = (WA50 - 3) - (K \cdot P)$$

Nel [grafico 12.3 e 12.4](#) è stato graficato l'andamento della freccia relativa della trave, rispettivamente in funzione del carico e del tempo. La freccia assoluta è stata determinata facendo la differenza tra il valore dello spostamento letto dall'LVDT centrale WA50-C e la media degli spostamenti letti dagli LVDT WA50-2 e WA50-4 posti sotto i punti di applicazione del carico.

La freccia relativa (fmc) è stata calcolata in tal modo:

$$f_{\text{relativa}} = (WA50 - 3) - \left[ \frac{(WA50 - 2) + (WA50 - 4)}{2} \right]$$

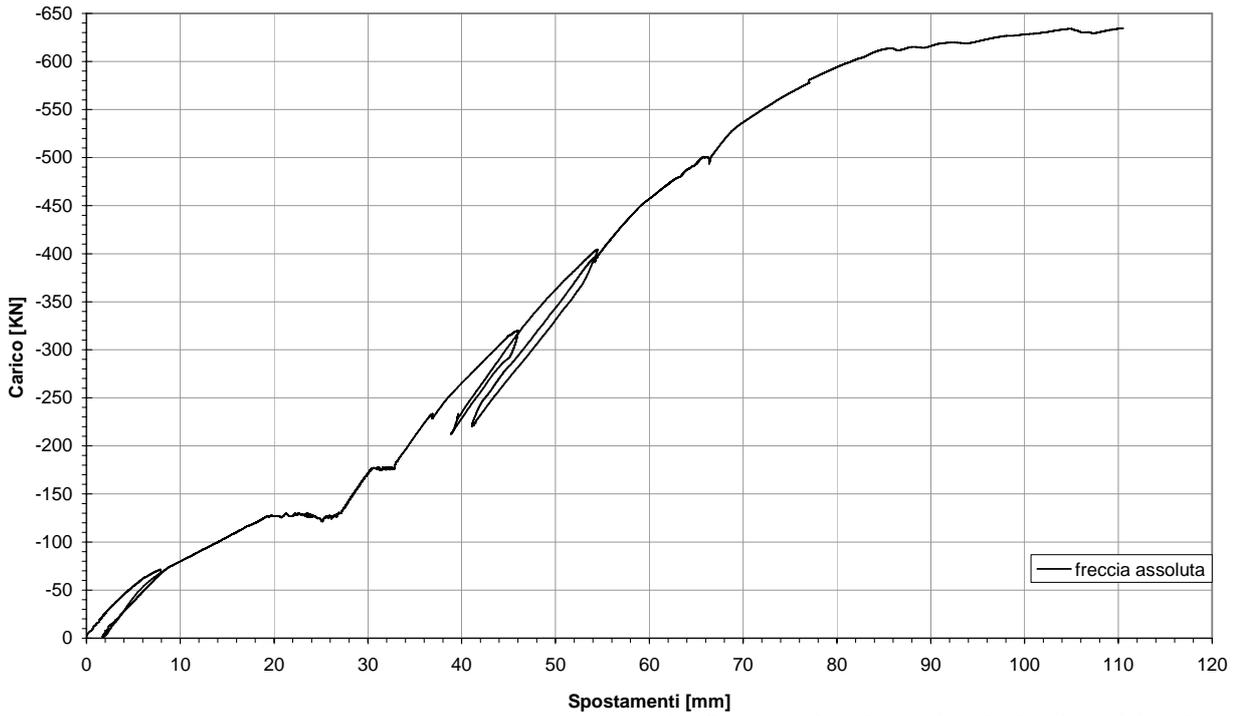


Grafico 12.1: freccia assoluta in funzione del carico

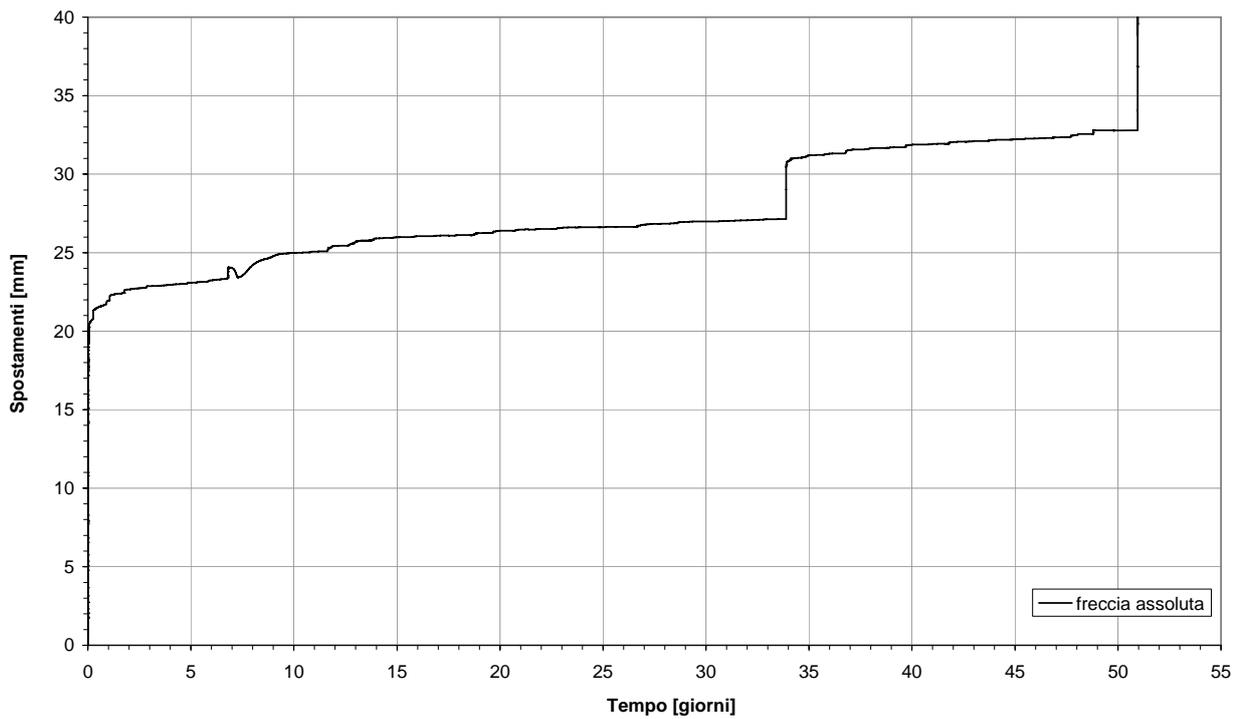


Grafico 12.2: freccia assoluta in funzione del tempo

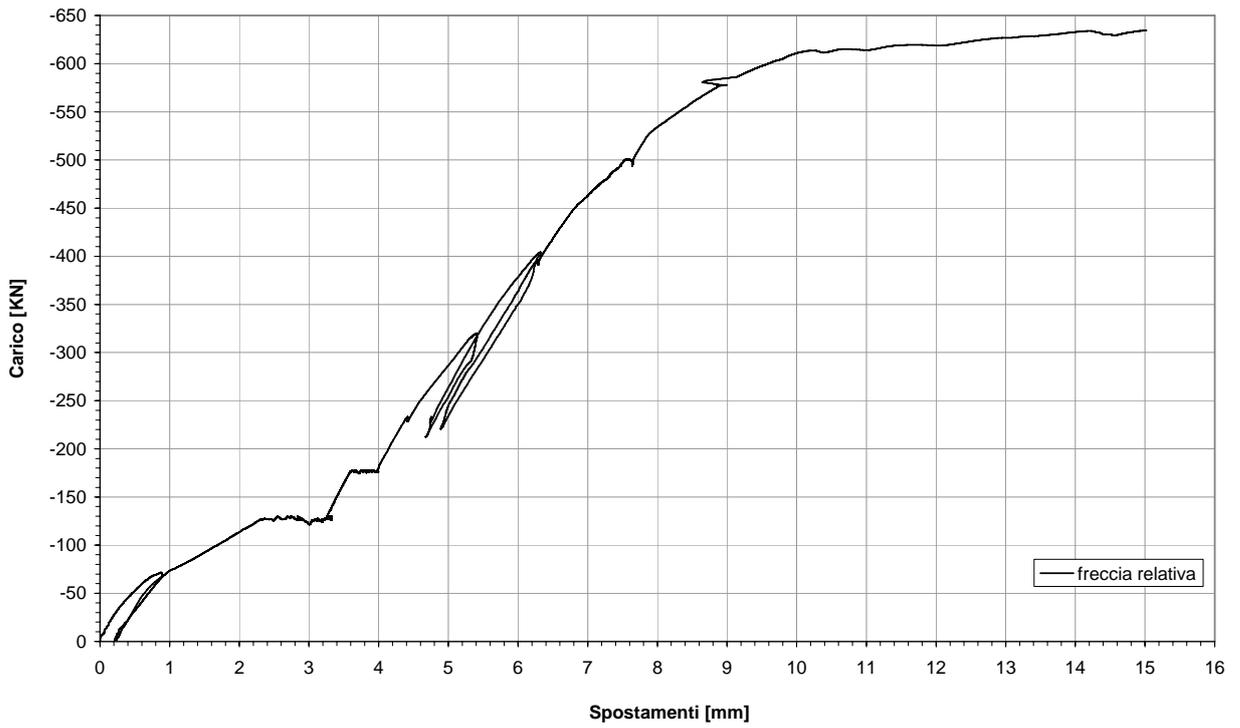


Grafico 12.3: freccia relativa in funzione del carico

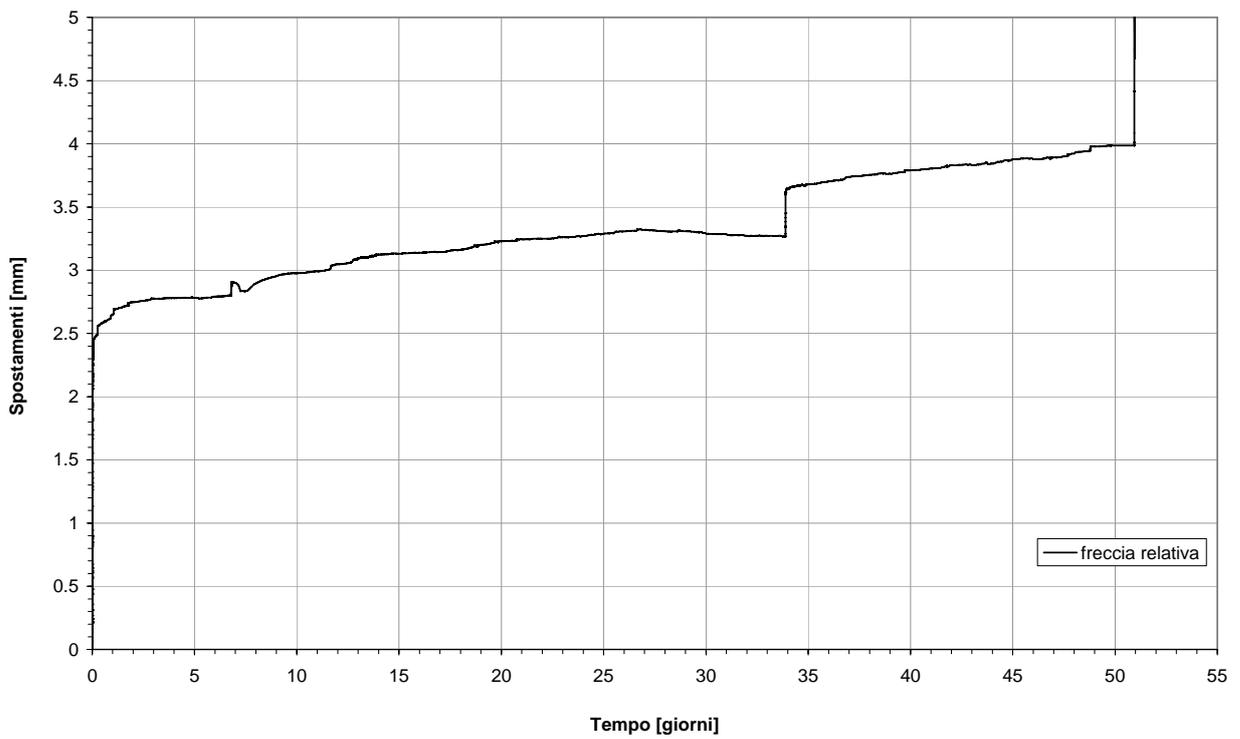


Grafico 12.4: freccia relativa in funzione del tempo

Nel grafico 12.5 e 12.6 è stato rappresentata rispettivamente la curva momento-curvatura della trave e la curvatura in funzione del tempo.

La curvatura è stata determinata andando a valutare le deformazioni a trazione e compressione che si sviluppano in corrispondenza del concio di trave monitorato attraverso gli strumenti LVDT sul lembo compresso e LVDT in quello teso, fino al giorno 6 in cui gli strumenti sono stati staccati dalla superficie di cls prefabbricato per consentire l'esecuzione del getto di completamento. In tal caso la curvatura e il momento sono stati dati da:

$$\chi = \left[ \left( \frac{(WA20-5) - (WA20-7)}{H} \right) + \left( \frac{(WA20-6) - (WA20-9)}{H} \right) \right] \cdot 10^6$$

$$M = P \cdot a \quad a = 3.075 \text{ m}$$

A questo punto è stato calcolato il  $\Delta M$  e il  $\Delta \chi$  prodotto dal peso del getto prefabbricato, facendo uso di nuovi strumenti come gli estensimetri E22 e E23 per il lembo compresso e gli LVDT precedenti per quello teso. Si sono valutati i valori della curvatura prima dell'inizio del getto  $\chi_I$  e quelli alla fine del getto  $\chi_{II}$ , circa un ora e mezza dopo, e si è fatta la differenza determinando in tal modo l'incremento di curvatura dovuto al peso del getto.

$$\chi_I = \frac{\varepsilon_I + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)_I \cdot 10^6}{H} \quad \chi_{II} = \frac{\varepsilon_{II} + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)_{II} \cdot 10^6}{H}$$

$$\Delta \chi = \chi_{II} - \chi_I$$

L'incremento di momento dovuto al solo peso del getto è dato da :

$$\Delta M = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad \text{con}$$

$$q = \text{peso del getto di completamento } 300 \text{ Kg/m}$$

$$L = \text{luce della trave } 9.15 \text{ m}$$

Tutti i valori utilizzati fanno riferimento alla media dei valori di ogni coppia di strumenti posizionata a ridosso della sezione 3.

Per il tempo seguente alla fine del getto, fino al dodicesimo giorno in cui non è stato possibile riattaccare gli LVDT sulla superficie del getto di completamento, la curvatura è stata calcolata facendo riferimento ad altri strumenti, ossia: gli estensimetri E22 e E23 per il lembo compresso e gli LVDT precedenti per quello teso ( dei valori sono state fatte le medie). In tal caso la curvatura è stata data da:

$$\chi = \frac{\varepsilon + \left( \frac{\Delta L}{L} \right) \cdot 10^6}{H}$$

dove  $H$  ha assunto un nuovo valore poiché la sezione ha un nuovo spessore (80 cm).

Il momento è pari alla somma di due contributi, quello del carico applicato per il suo braccio e quello del carico distribuito rappresentante il peso del getto:

$$M = P \cdot a + \Delta M \quad a = 3.075 \text{ m}$$

Nei giorni successivi al dodicesimo, dopo che LVDT superiore è stato riattaccato la curvatura è stata determinata andando a valutare le deformazioni a trazione e compressione che si sviluppano in corrispondenza dei conci di trave monitorati attraverso gli strumenti LVDT sui lembi compresso e LVDT in quelli tesi, come per la prima parte della prova.

Osservando il [grafico 12.5](#) si nota una sovrapposizione tra il tratto di curva (rosa) che rappresenta la fase di presa e indurimento del calcestruzzo e quella di seconda fase (blu), ciò è da attribuirsi al ritiro subito dal calcestruzzo di completamento anche dopo la fase di indurimento.

Osservando il [grafico 12.6](#) si vede che la fase di getto è rappresentata da un segmento verticale, infatti la sua durata è solo di un ora e mezza che il suo contributo all'incremento della curvatura sia di circa  $125 \text{ m}^{-1} \cdot 10^6$ .

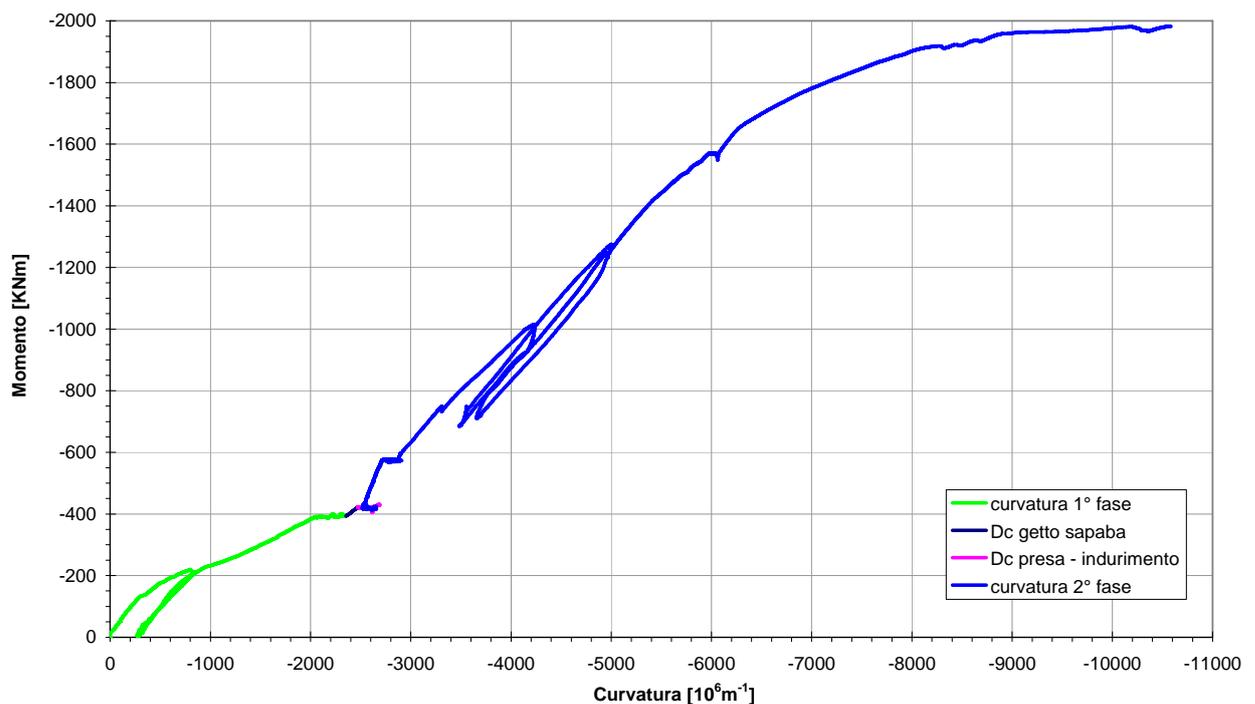


Grafico 12.5: diagramma momento-curvatura

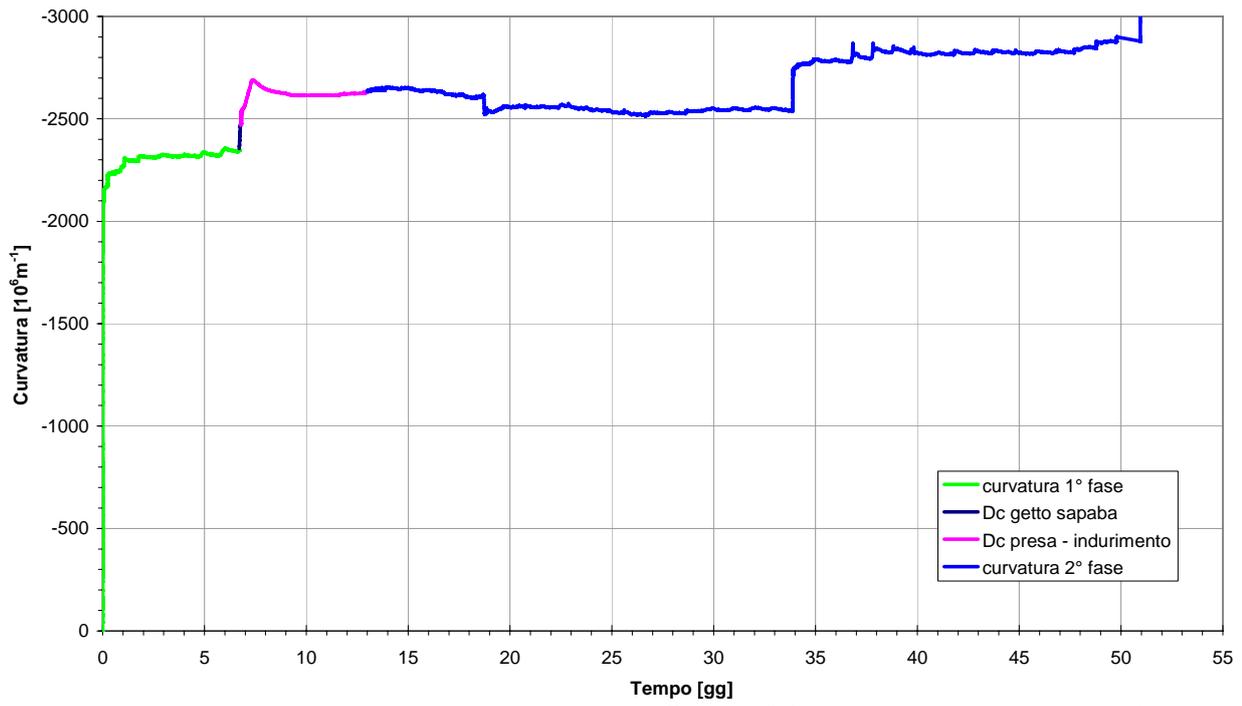


Grafico 12.6: diagramma della curvatura nel tempo

### 12.1.2 Grafici di deformazione del calcestruzzo depurati del ritiro termico

All'inizio della prova di rottura è stata contemporaneamente attivata una prova di misurazione delle deformazione del calcestruzzo dipendenti dalla sola variazione termica dell'ambiente in cui ha sede la prova.

A tale proposito si riporta nel seguito il diagramma del deformazione termica (grafico 12.7) subita da un cubo di cls abbastanza vecchio da non risentire più del fenomeno del ritiro del cls, ma solo di quello termico.

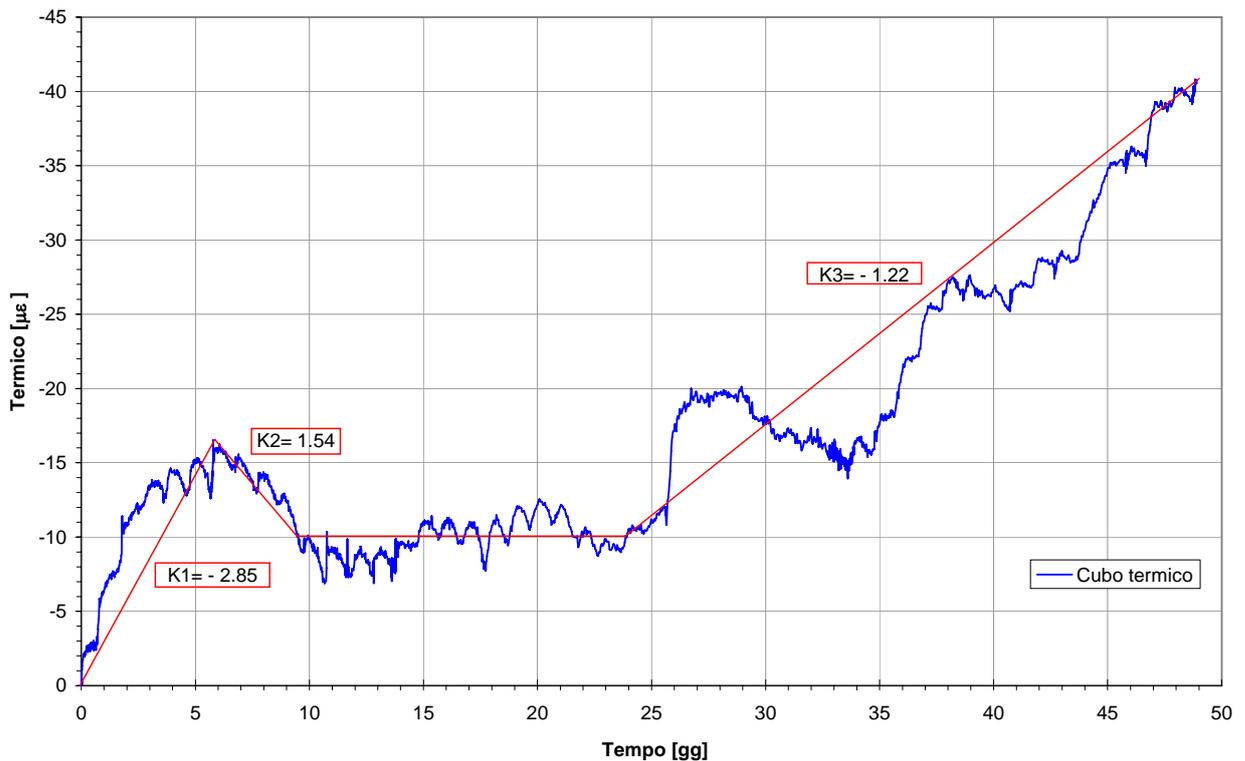


Grafico 12.7: deformazioni da ritiro termico e linea di tendenza

Dato che l'acquisizione dei dati è avvenuta con due sistemi separati e in tempi diversi è stato necessario individuare le corrispondenti deformazioni termiche della trave essendo note quelle del cubo. Per ottenere ciò si sono calcolate le pendenze dei vari segmenti che approssimano l'andamento medio del ritiro termico, in cui è stata scomposta la curva del termico (segmenti rossi), così che moltiplicando i coefficienti angolari per i valori delle deformazioni lette dagli strumenti posizionati sul calcestruzzo per i periodi corrispondenti a quelli dei segmenti, sono stati ricavati i valori delle deformazioni termiche sviluppate dalle trave per tutto il tempo della prova. In questo modo è stato il comportamento medio, tralasciando le oscillazioni giornaliere, di modesta entità.

Nei grafici che sono stati riportati di seguito sono rappresentate le curve sperimentali dedotte dalla semplice lettura degli strumenti e quelle degli stessi strumenti però depurate dalle deformazioni termiche.

Nei grafici 12.8÷13 sono rappresentate le deformazioni del calcestruzzo prefabbrico lette dai diversi estensimetri meno quelle dovute alla variazione termica in funzione del carico e del tempo. Alla fine della prova le deformazioni rilevate sono state ridotte di circa  $40 \mu\epsilon$  rispetto alla curva strumentale.

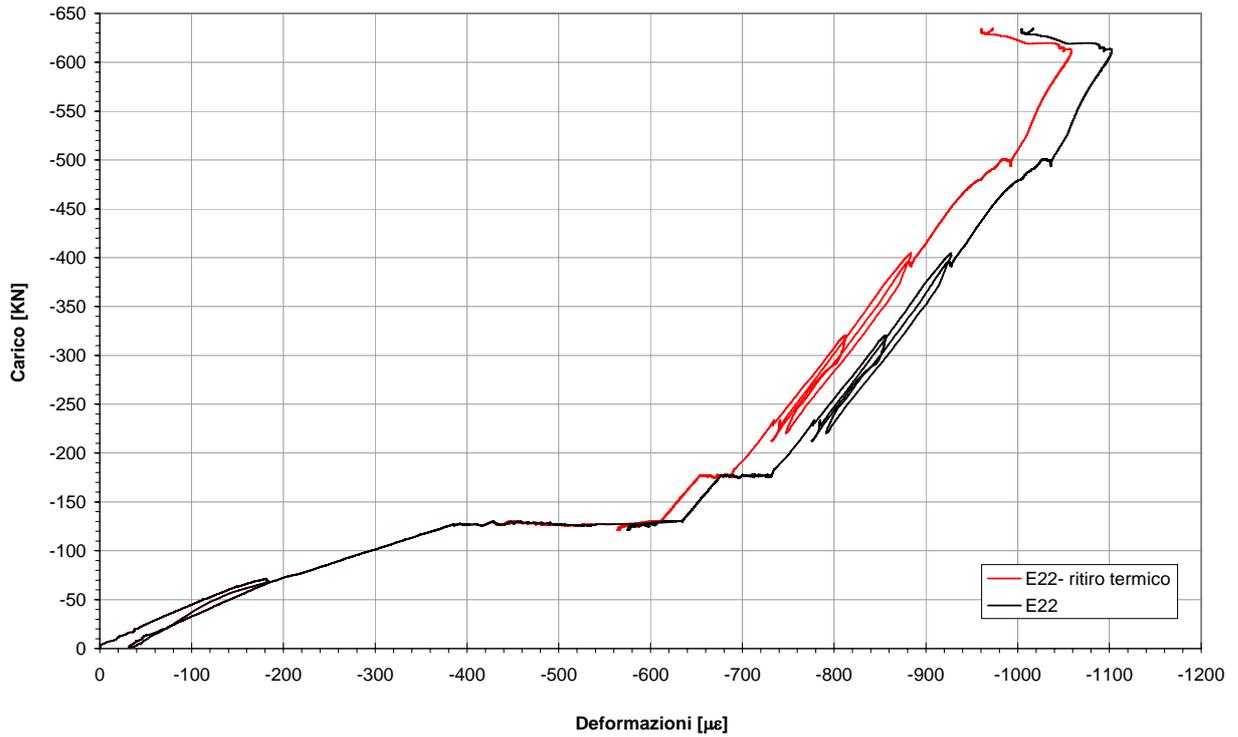


Grafico 12.8: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 3

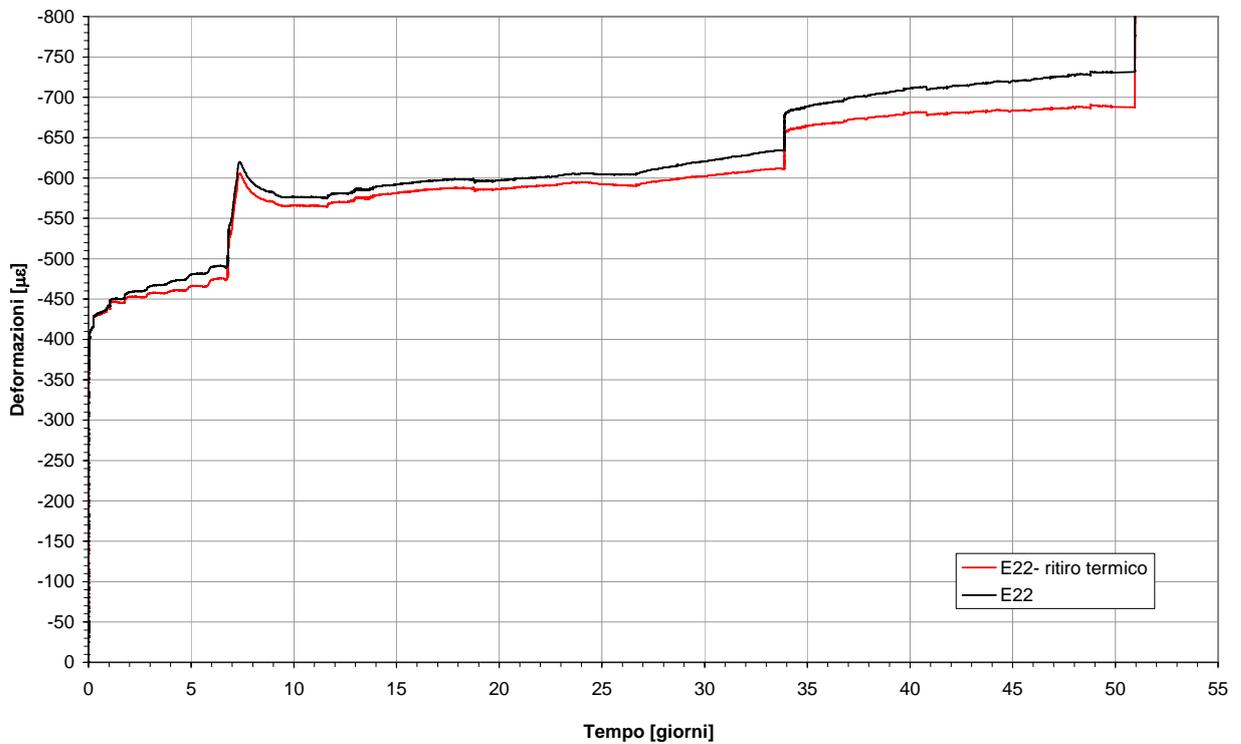


Grafico 12.9: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 3

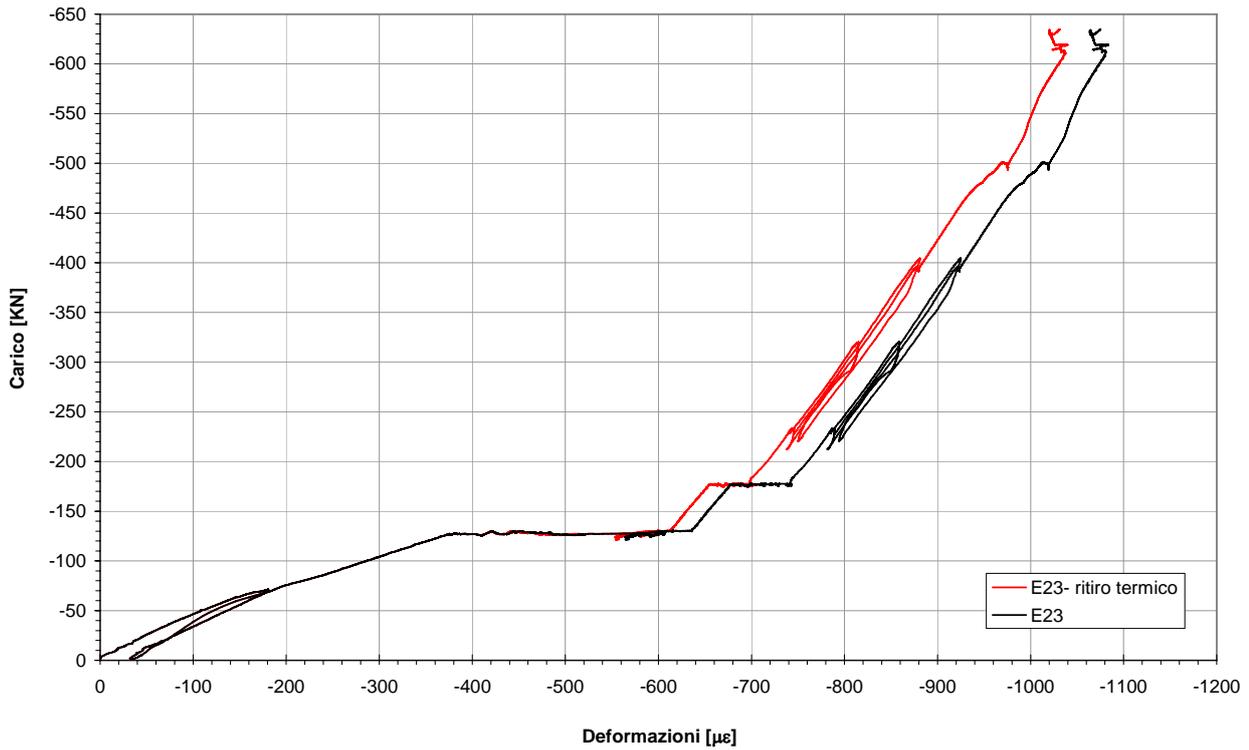


Grafico 12.10: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 3

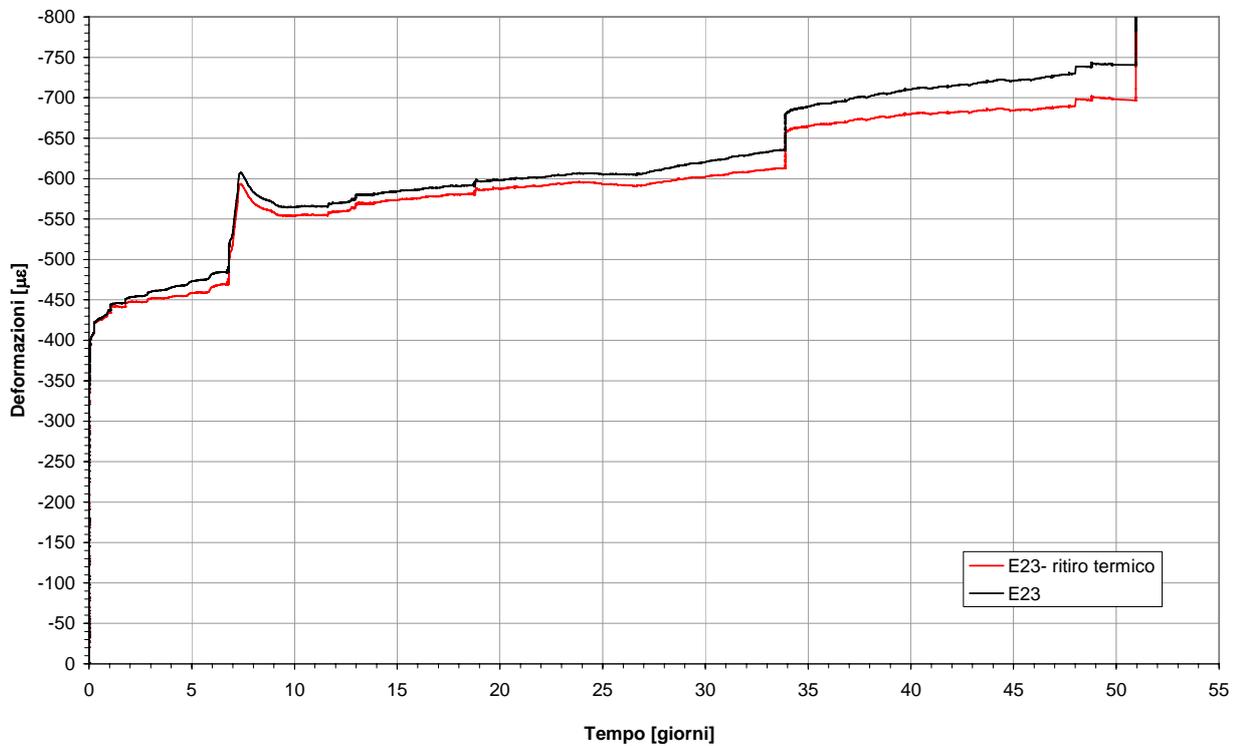


Grafico 12.11: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 3

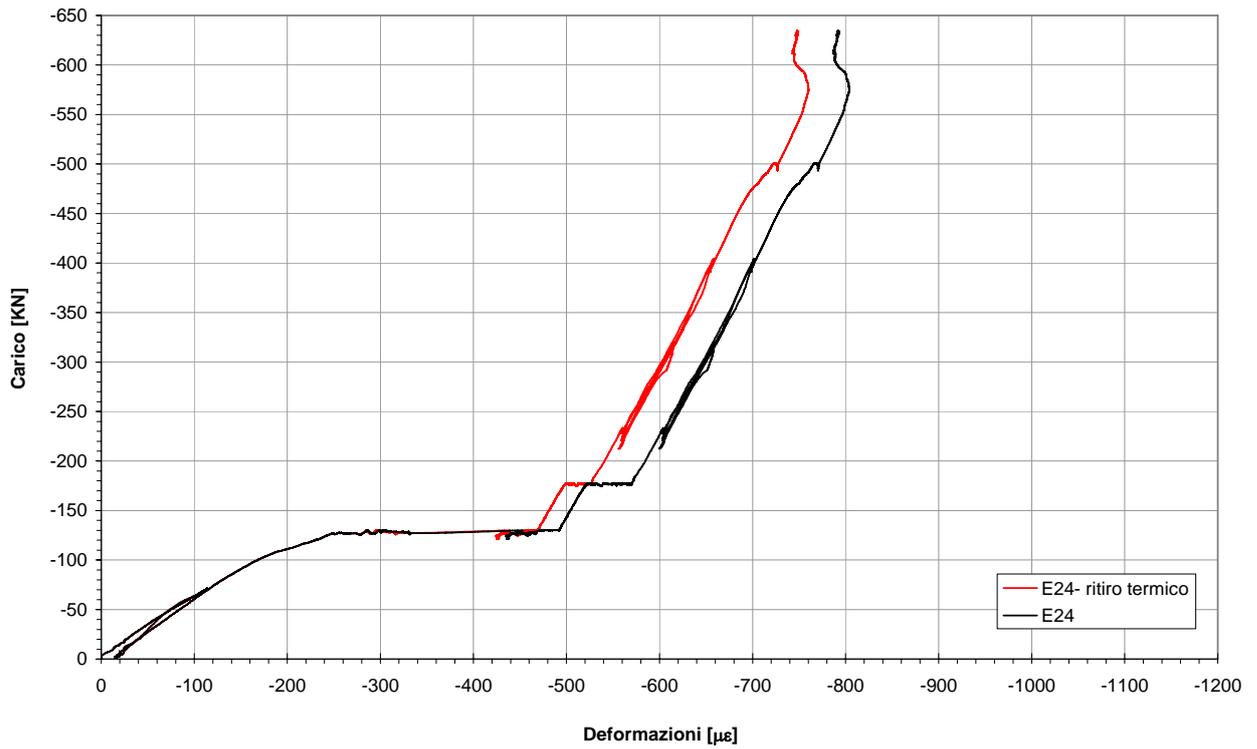


Grafico 12.12: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 2

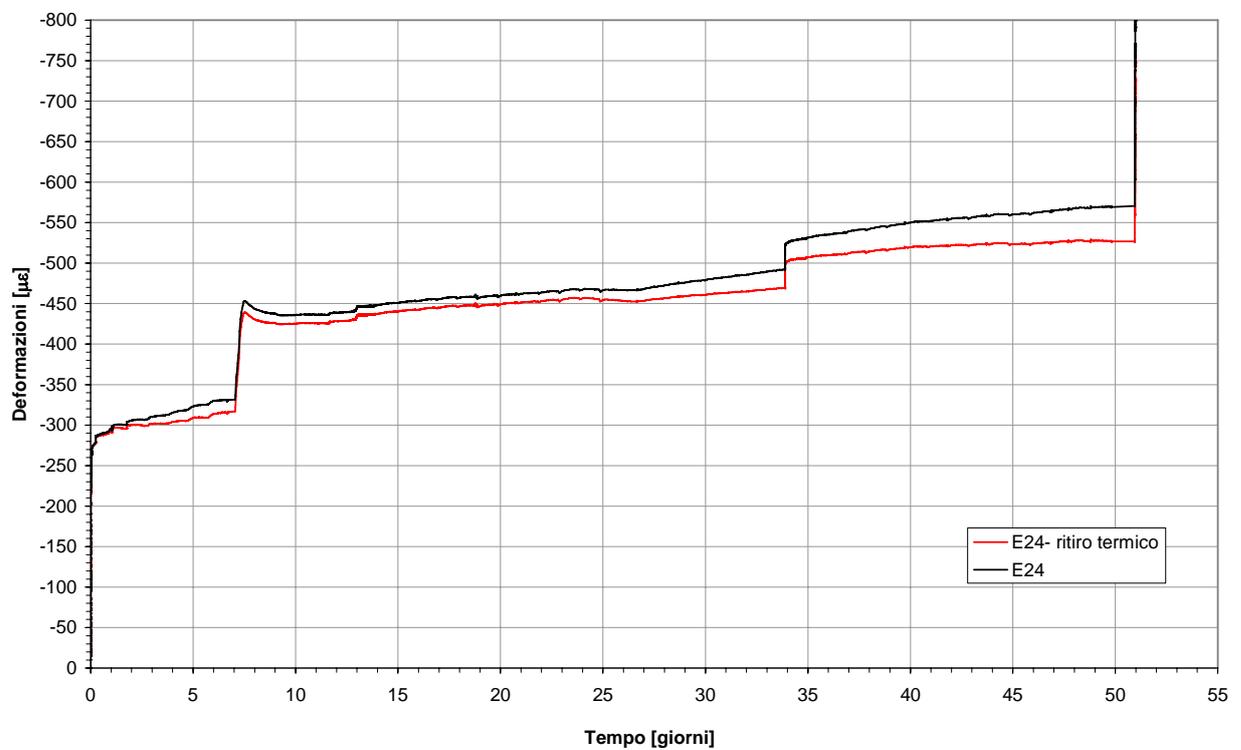


Grafico 12.13: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 2

Nei grafici 12.14÷19 sono rappresentate le deformazioni del calcestruzzo di completo lette dai diversi estensimetri meno quelle dovute alla variazione termica in funzione del carico e del tempo. Alla fine della prova le deformazioni rilevate sono state ridotte di circa 30  $\mu\epsilon$  rispetto alla curva strumentale.

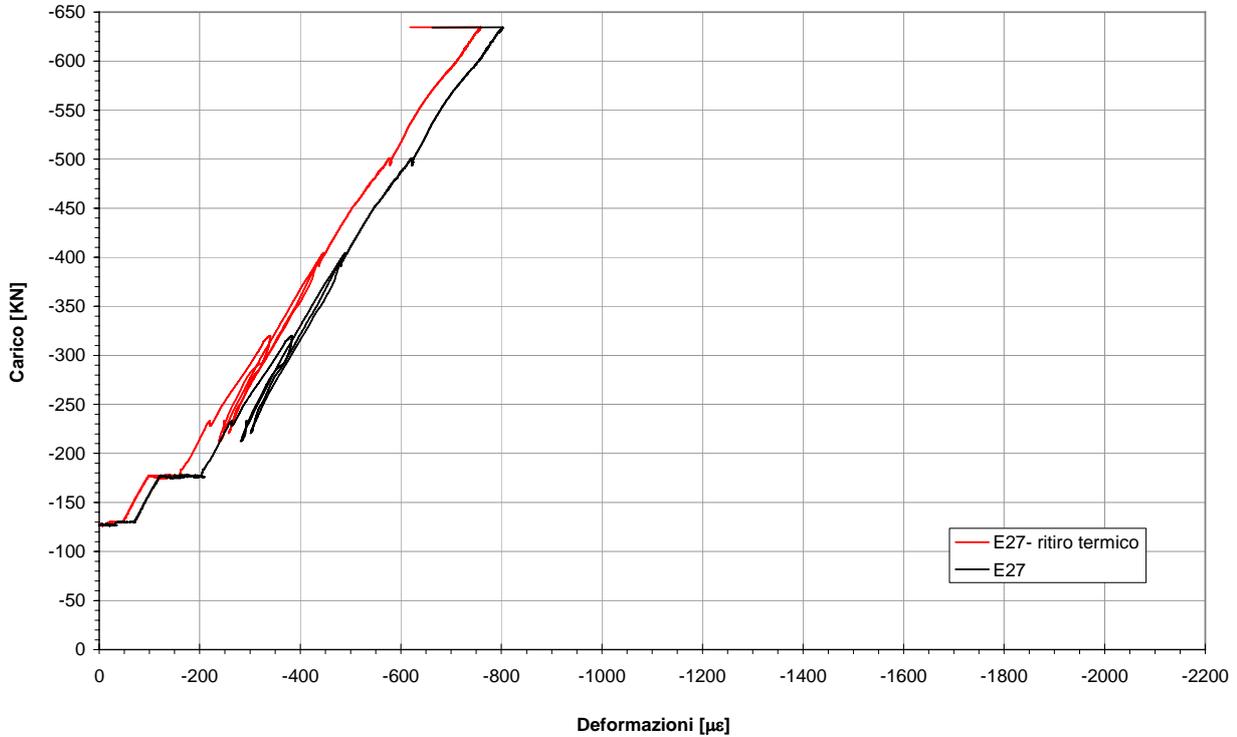


Grafico 12.14: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 2

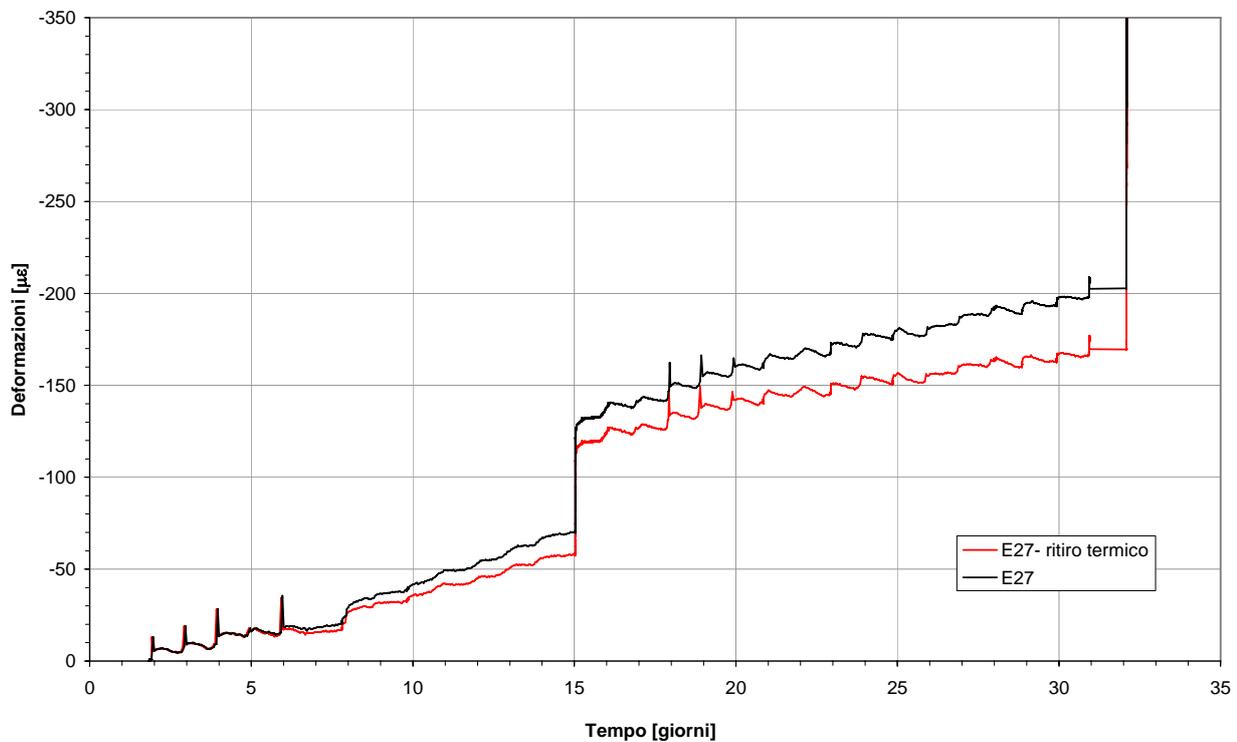


Grafico 12.15: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 2

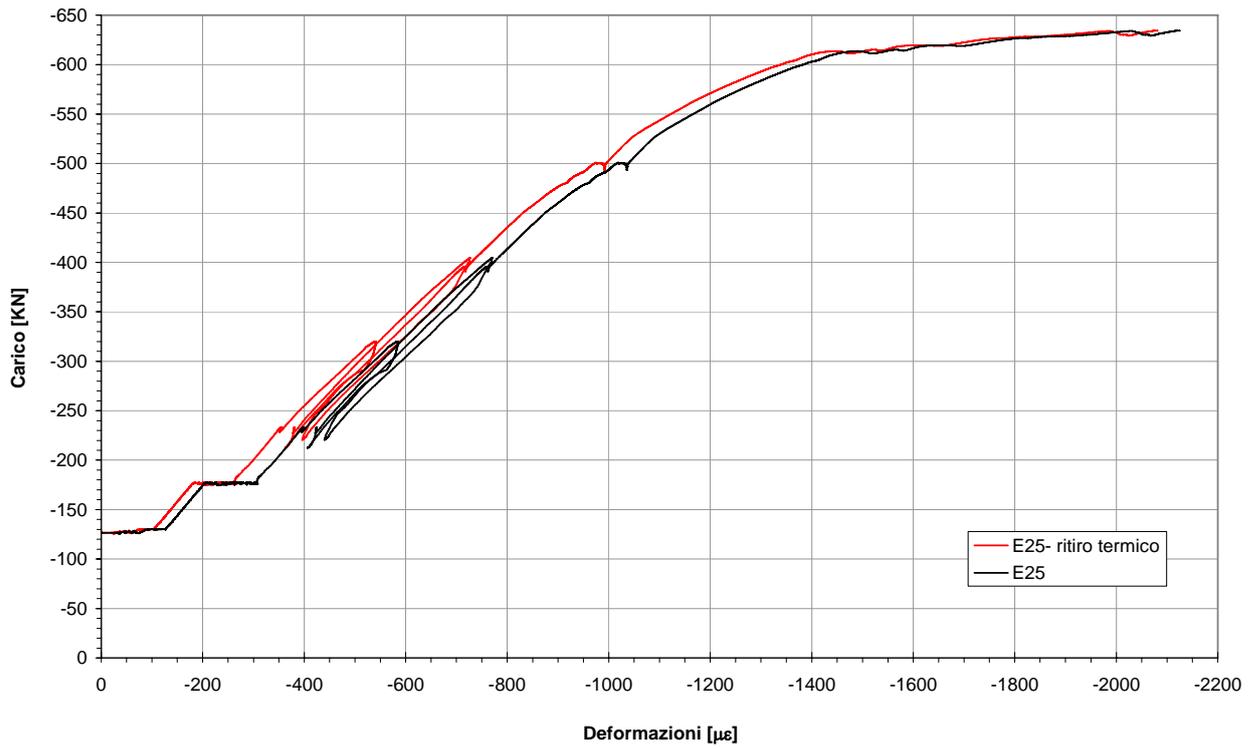


Grafico 12.16: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 3

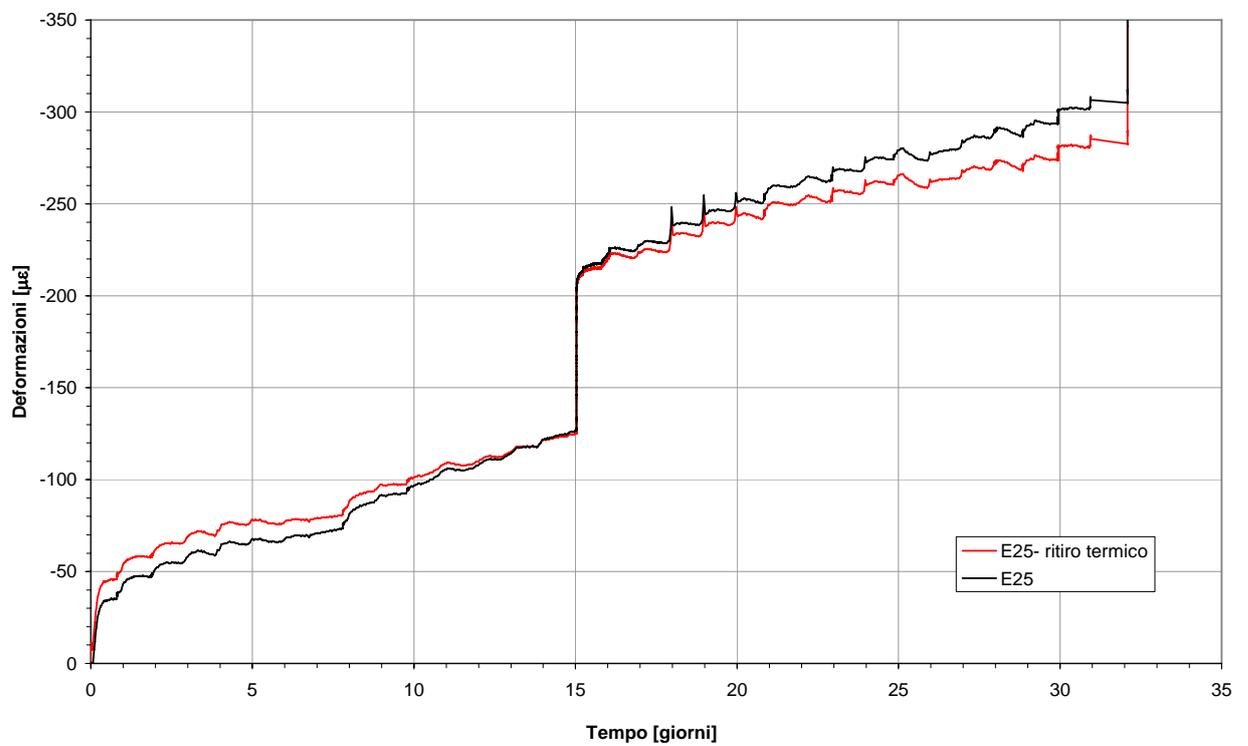


Grafico 12.17: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 3

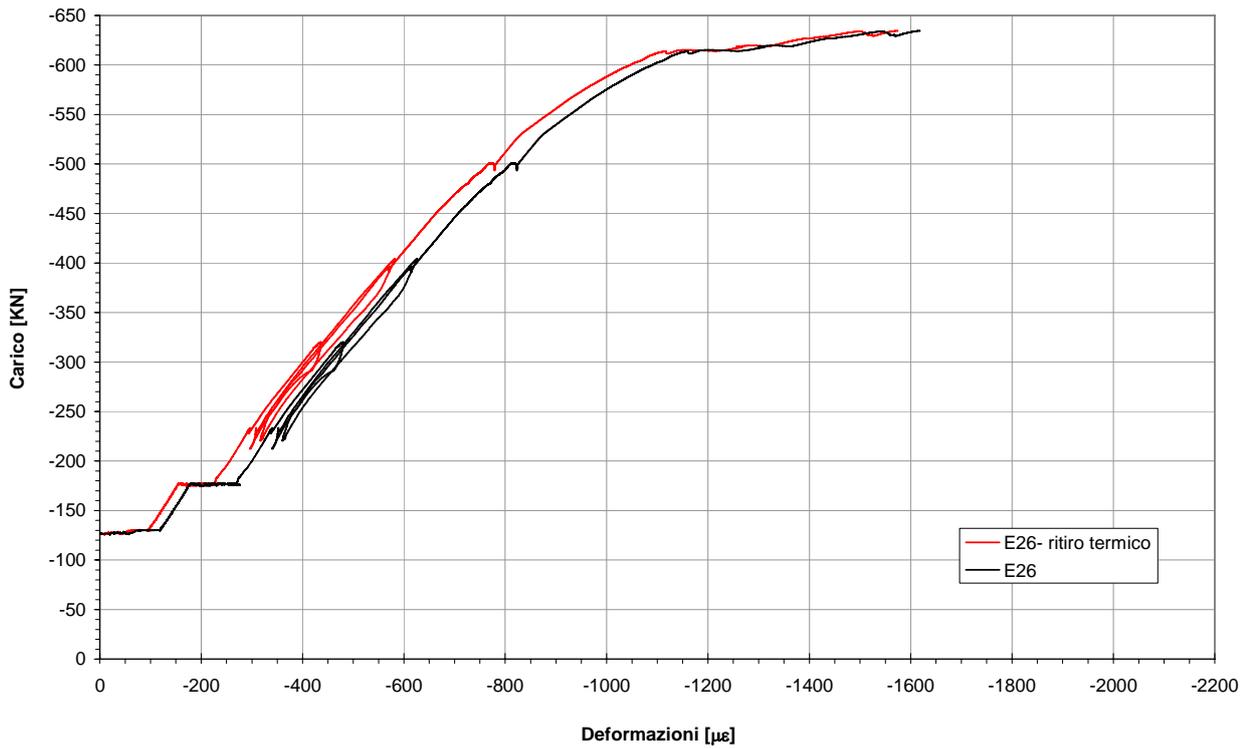


Grafico 12.18: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 3

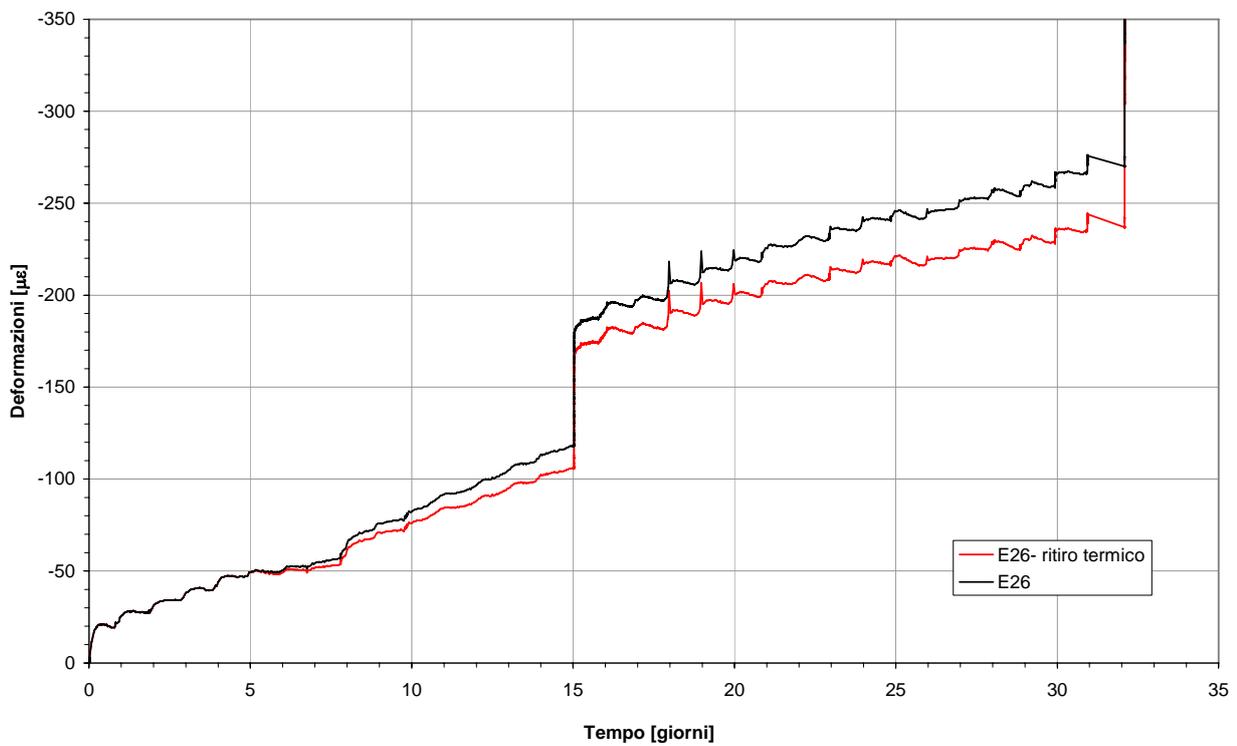


Grafico 12.19: curva strumentale (nera) e curva depurata dal ritiro termico(rosso); sezione 3

### 12.1.3 Calcolo teorico

Dopo aver sviluppato tutti i grafici relativi alle deformazioni delle varie parti strumentate della trave si è voluto costruire una serie di diagrammi rappresentati lo stato deformativo delle sezioni oggetto di studio per ogni incremento di carico, quindi si sono recuperati i valori delle deformazioni corrispondenti ad ogni caricamento dai grafici riportati nel capitolo precedente escludendo in questo modo tutte le deformazioni viscosse. Tali diagrammi sono stati confrontati per sovrapposizione con altri diagrammi, questi ultimi sono stati ottenuti facendo un semplice calcolo alle tensioni ammissibili e quindi ipotizzando il comportamento elastico lineare del materiale.

#### DEFORMAZIONI TEORICHE:

Per il calcolo delle reazioni vincolari, del momento delle sezioni si è fatto riferimento allo schema statico riportato in figura 12.1. Per il calcolo del momento d'inerzia e della posizione dell'asse neutro si è considerata la sezione riportata in figura 12.2.

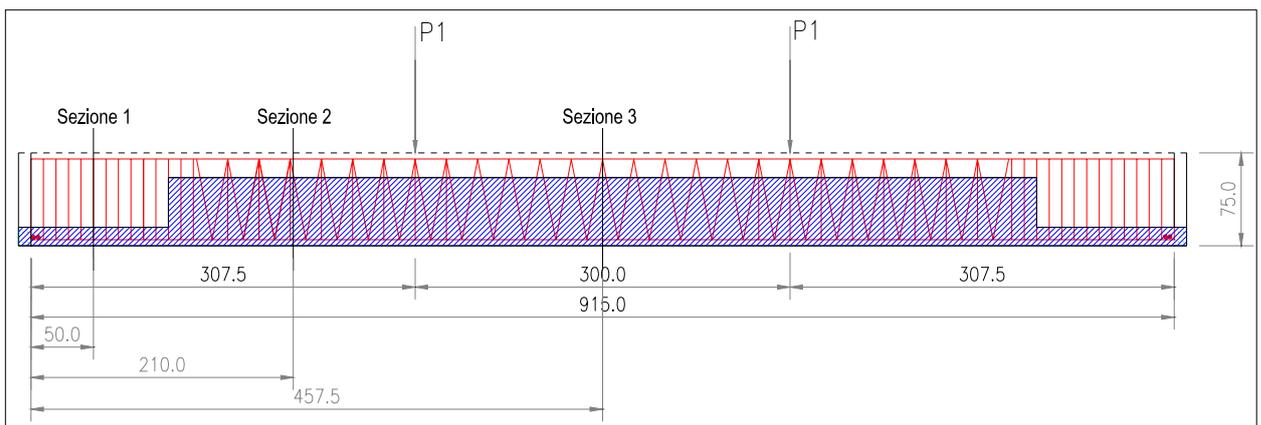


Figura 12.1: schema statico utilizzato, posizione sezioni oggetto studio

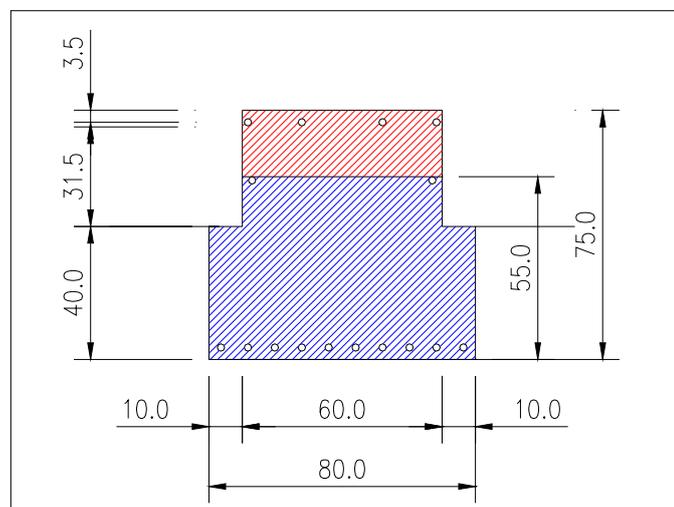


Figura 12.2: sezione trasversale della trave

Note le dimensioni caratteristiche della trave, in parte visibili in figura 12.1 e 12.2 si è calcolata la posizione dell'asse neutro rispetto al lembo compresso:

$$x = \frac{n \cdot (A_f + A'_f)}{b} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot (A_f \cdot h + A'_f \cdot c)}{n \cdot (A_f + A'_f)^2}} \right)$$

Nota la posizione dell'asse neutro si è calcolato il momento d'inerzia della sezione parzializzata:

$$I_n = \left( \frac{b \cdot s^3}{12} \right) \cdot n_1 + b \cdot s \cdot \left( x - \frac{s}{2} \right) + \frac{b \cdot (x - s)^3}{3} + n \cdot A'_f \cdot (x - c)^2 + n \cdot A_f \cdot (h - x)^2$$

Il valore delle tensioni nelle fibre sono date da:

$$\sigma_{cg} = \frac{M}{I_n} \cdot x \text{ tensione sul cls di completamento}$$

$$\sigma_c = \frac{M}{I_n} \cdot x \text{ tensione sul cls prefabbricato}$$

$$\sigma'_f = \frac{M}{I_n} \cdot n \cdot (h - x) \text{ tensione nell'armatura compressa}$$

$$\sigma_f = \frac{M}{I_n} \cdot n \cdot (x - c) \text{ tensione nell'armatura tesa}$$

Il valore delle deformazioni nelle fibre sono date da:

$$\varepsilon_{cg} = \frac{\sigma_{cg}}{E_g} \text{ deformazioni sul cls di completamento}$$

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} \text{ deformazioni sul cls prefabbricato}$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \text{ deformazioni sull'armatura tesa}$$

$$\varepsilon'_f = \frac{\sigma'_f}{E_f} \text{ deformazioni sull'armatura compressa}$$

I coefficienti di omogeneizzazione sono:

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$n_1 = \frac{E_{cg}}{E_c}$$

Nella tabella 12-1 vengono riportati i valori utilizzati nei calcoli descritti precedentemente per tutti i casi analizzati.

CARICO (N)	$E_s$ (N/mm)	$E_c$ (N/mm)	$E_{cg}$ (N/mm)	n	$n_1$	sez.2 (mm)	sez.3 (mm)	$L_p$	d	L (mm)	P (N)
127000	206000	36022	0	5.72	0.00	2200	4575	3075	1500	9150	127000
177000	206000	38000	26030	5.42	0.69	2200	4575	3075	1500	9150	50000
230000	206000	39000	26030	5.28	0.67	2200	4575	3075	1500	9150	53000
500000	206000	39000	26030	5.28	0.67	2200	4575	3075	1500	9150	270000
635000	206000	39000	26030	5.28	0.67	2200	4575	3075	1500	9150	135000

qp (N/mm)	$V_a$ (N)	M2 (Nmm)	M3 (Nmm)	Af (mmq)	A'f (mmq)	b (mm)	s pref.	h (mm)	c (mm)	x (mm)	$I_n$
0	127000	3E+08	4E+08	5840	1810	600	0	525	-175	167.3	6.4E+09
3	63725	1E+08	2E+08	5840	1810	600	200	725	25	217.4	9.6E+09
3	66725	1E+08	2E+08	5840	1810	600	200	725	25	215.3	9.4E+09
3	283725	6E+08	9E+08	5840	1810	600	200	725	25	215.3	9.4E+09
3	148725	3E+08	4E+08	5840	1810	600	200	725	25	215.3	9.4E+09

Tabella 12-1: valori caratteristici utilizzati nel calcolo teorico

Nei successivi diagrammi riportiamo per le sezioni 2 e 3 e per ogni incremento di carico fatto nella prova di rottura i valori delle deformazioni ottenute dai calcoli precedenti e dalle osservazioni sperimentali, si ricorda che non è stato preso in considerazione il peso della parte prefabbricata invece è stato computato quello del getto di completamento.

Osservando la figura 12.3 si nota che le deformazioni sperimentali (in rosso) presentano valori dell'ordine di quelli calcolati con il metodo delle tensioni ammissibili (in blu). Tale considerazione non sono più vere per i diagrammi successivi (figura 12.4÷12.7), infatti in questi casi successivi, si è continuato a calcolare le deformazioni pensando al comportamento elastico lineare del materiale, ma in realtà il materiale è già entrata in campo elasto-plastico avendo subito notevoli incrementi di carico e deformazioni viscosi. Pensando al diagramma parabola rettangolo del calcestruzzo è necessario considerare il tratto plastico dove a piccoli incrementi di tensione corrispondono grandi deformazioni e quindi l'ipotesi lineare supposta nel calcolo alle tensioni ammissibili non è più adeguata. In tutti i diagrammi riportati nelle figure suddette si osserva che le deformazioni sperimentali del calcestruzzo in zona compressa sono inferiori a quelle rilevate per l'armatura immediatamente adiacente, tale risultato è in controtendenza con quanto calcolato mediante il metodo alle tensioni ammissibili, ed infine si rileva che le deformazioni rilevate sperimentalmente sono superiori a quelle calcolate con il

metodo lineare. Da tali considerazioni deduciamo che il metodo di calcolo alle tensioni ammissibili abitualmente usato non rispecchia il comportamento effettivo della sezione di trave prefabbricata su cui è stato eseguito un getto di completamento e che stata caricata in più fasi differite nel tempo che hanno indotto deformazioni viscose e di ritiro sull'intero elemento strutturale.

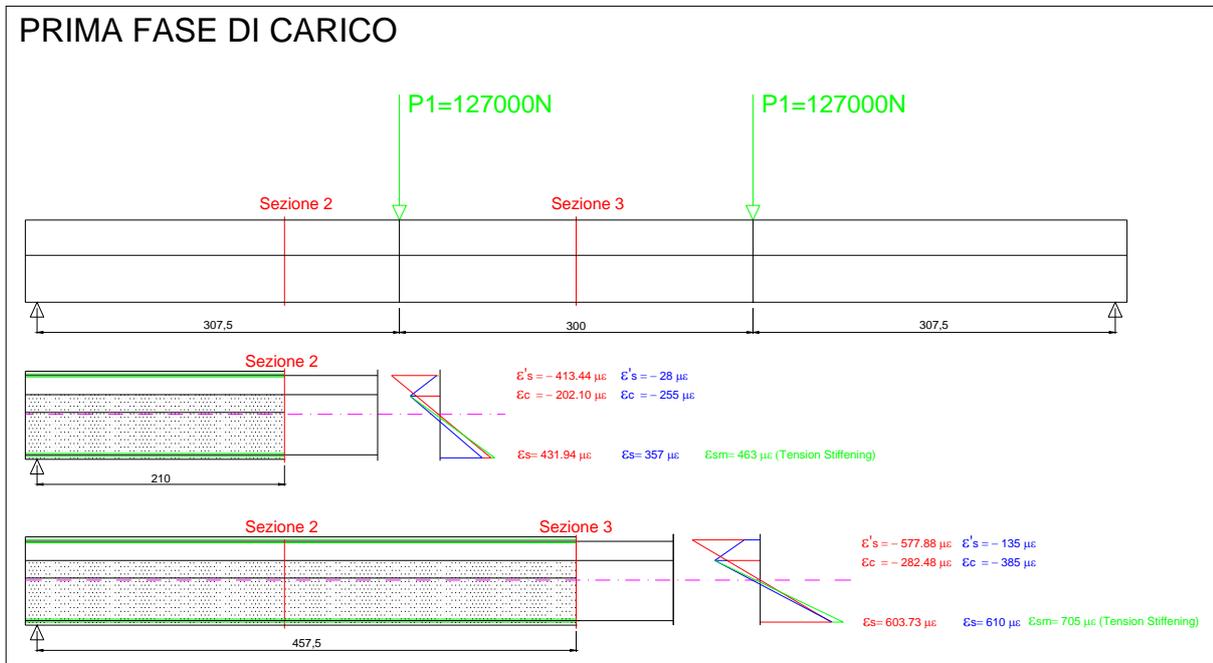


Figura 12.3: confronto stato deformativo teorico con quello sperimentale

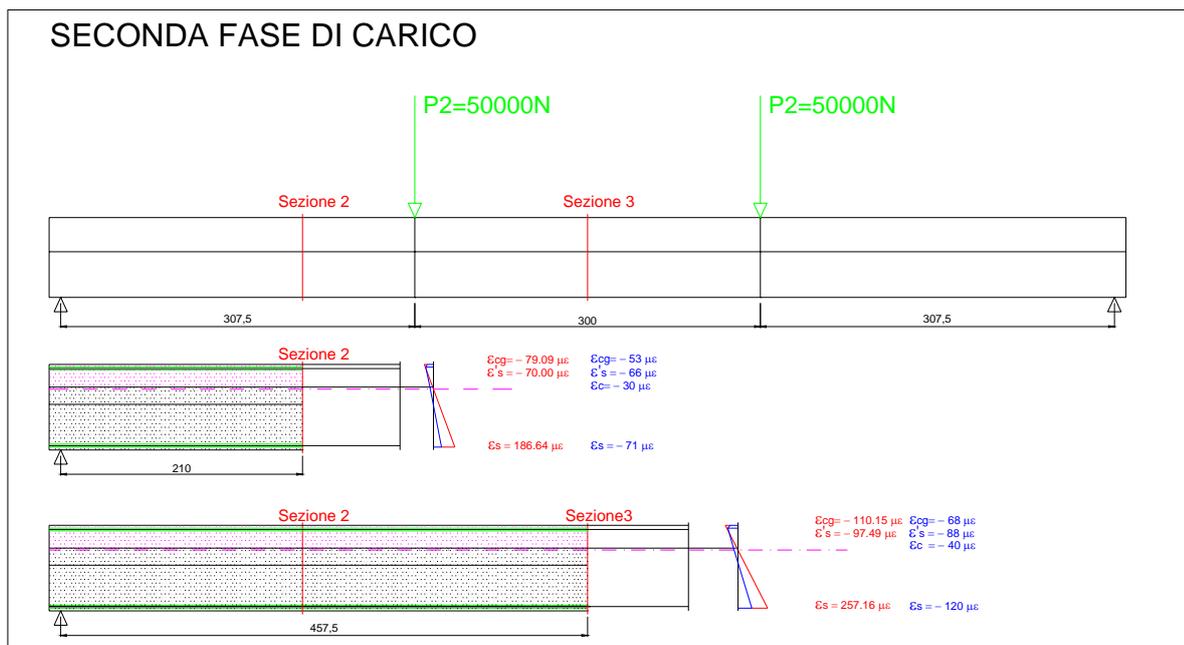


Figura 12.4: confronto stato deformativo teorico con quello sperimentale

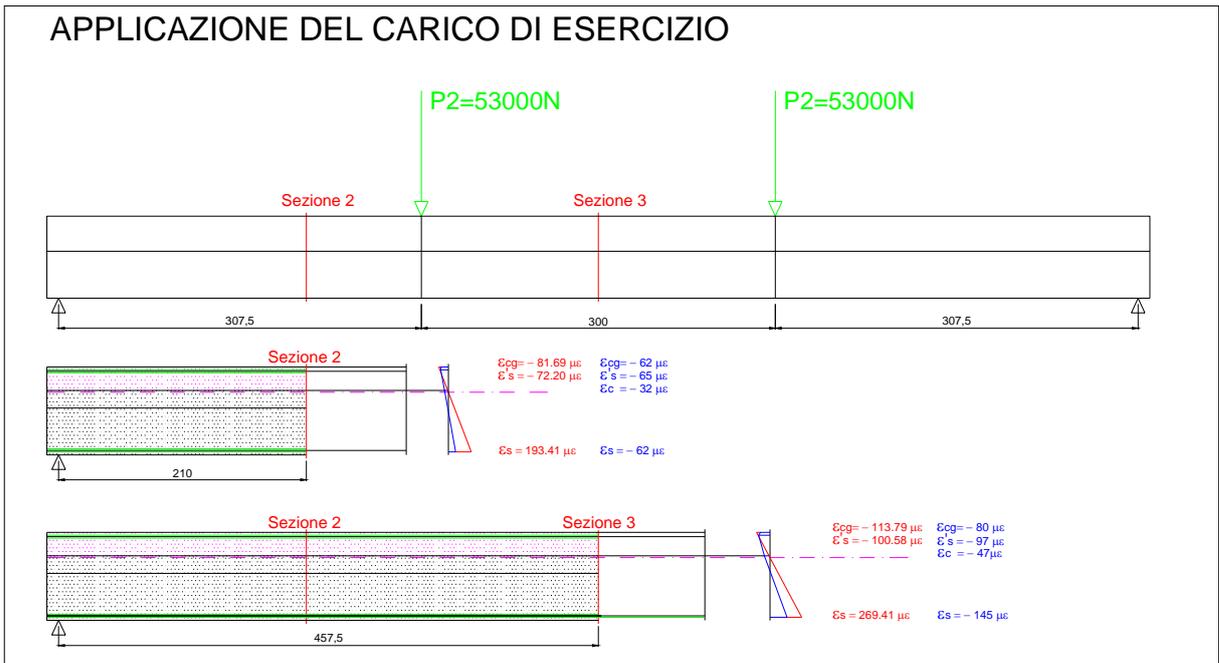


Figura 12.5: confronto stato deformativo teorico con quello sperimentale

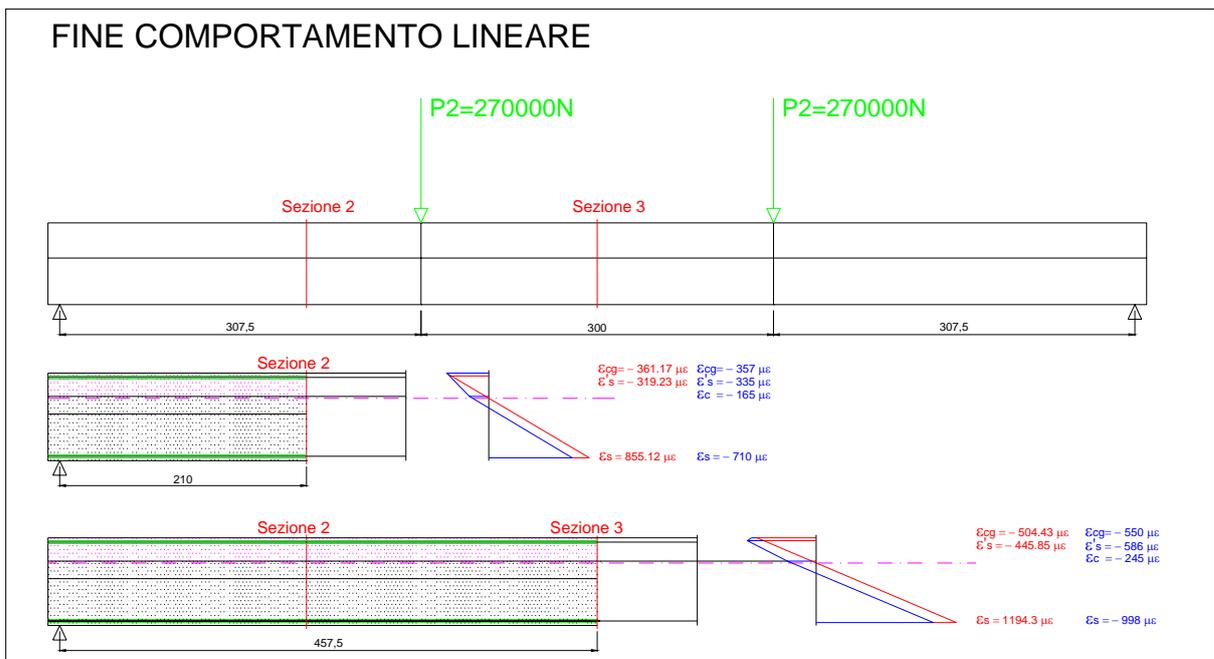


Figura 12.6: confronto stato deformativo teorico con quello sperimentale

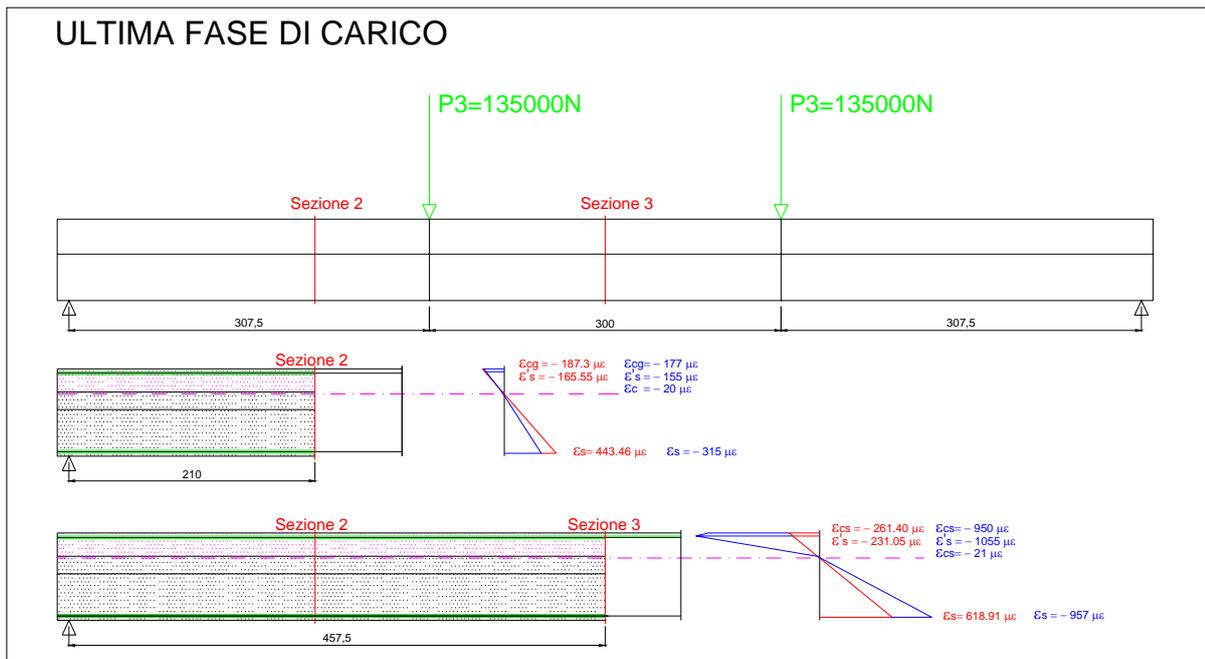


Figura 12.7: confronto stato deformativo teorico con quello sperimentale

## 12.2 Modello a fibre

### 12.2.1 Legami costitutivi dei materiali

Il riferimento alla legge di Hooke, adottato nel seguente elaborato, è in genere legittimo per determinare gli stati tensionali e deformativi delle strutture in esercizio, poiché i valori delle tensioni sono, di norma, inferiori al valore di proporzionalità effettivo o convenzionale. Questo metodo di calcolo “lineare” perde però la sua attendibilità qualora si vogliano determinare i valori ultimi delle sollecitazioni resistenti o quelli dei relativi carichi. Conviene poi osservare che anche alla soglia della rottura l’esperienza ha mostrato che risulta in genere ammissibile l’ipotesi della conservazione delle sezioni piane per sezioni soggette a tensioni normali  $\sigma$ ; inoltre, l’intervento della plasticità comporta ripercussioni favorevoli sulla sicurezza, nei problemi che coinvolgono la resistenza dei materiali (non la stabilità dell’equilibrio).

#### ACCIAIO

Nei calcoli, per l’acciaio teso, si considera come deformazione limite il valore pari a 1%, che in realtà non corrisponde al limite dello snervamento. Questo è dovuto in gran parte alla circostanza che, per deformazioni dell’acciaio superiori a tale limite la strizione aumenta e si accrescono considerevolmente le fessurazioni del calcestruzzo che circondano le barre, di modo che risulta compromessa l’aderenza tra l’acciaio e il calcestruzzo stesso.

Nei calcoli viene comunque utilizzato per qualsiasi tipo di acciaio, il semplice diagramma bilineare convenzionale  $\sigma$ - $\epsilon$  della figura 12.8, detto “di Prandtl”, con la limitazione dell’1% della deformazione.

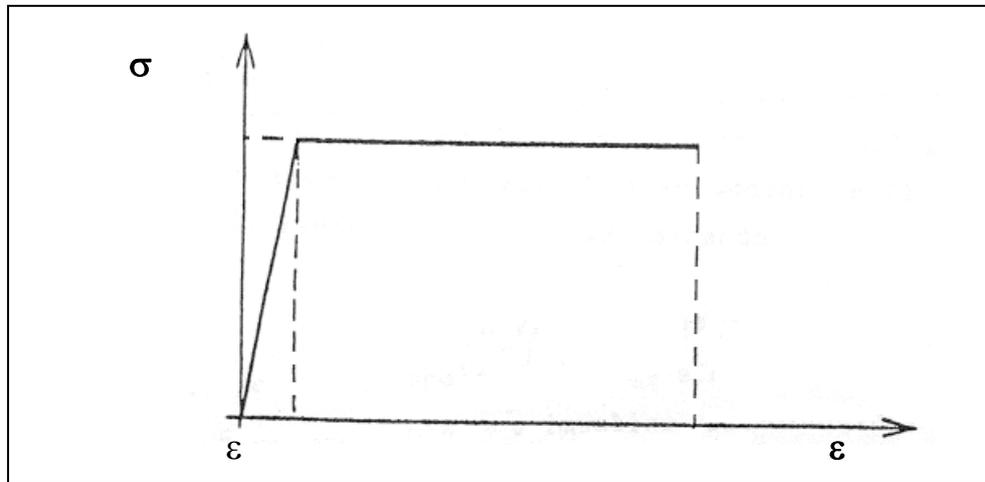


Figura 12.8: Diagramma di Prandtl

$\epsilon_{yd}$  è la deformazione di snervamento,  $\epsilon_u$  è la deformazione ultima,  $f_{yd}$  indica la tensione di snervamento.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

dove:

$f_{yk}$  è la resistenza caratteristica dell'acciaio;

$\gamma_s$  è il coefficiente di sicurezza dell'acciaio che si assume pari a 1,15.

## CALCESTRUZZO

Le caratteristiche di resistenza di un calcestruzzo sono individuate mediante prove di schiacciamento di provini cilindrici; lo sforzo totale, misurato alla pressa, diviso per l'area della sezione del provino, fornisce il valore medio della tensione di rottura. Per valori minori si hanno per quelli cilindrici ( $f_{ck}$ ), e tale riduzione è tanto più accentuata quanto maggiore è il rapporto tra l'altezza e il diametro del provino stesso. Esperienze da tempo condotte su travi di calcestruzzo inflesse e su pilastri in vera grandezza hanno mostrato che valori più attendibili della resistenza si ottengono dai provini cilindrici:

$$f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck}$$

dove:

$f_{ck}$  è la resistenza cilindrica caratteristica a compressione del calcestruzzo;

$R_{ck}$  è la resistenza cubica caratteristica a compressione del calcestruzzo.

In realtà il diagramma costitutivo del calcestruzzo risulta poco attendibile se ottenuto mediante provini di dimensioni limitate per cui si è ritenuto opportuno condurre indagini su modelli di travi in vera grandezza. Si riporta quindi in figura 12.9 il legame  $\sigma$ - $\epsilon$  fornito dalla normativa ed utilizzato nei calcoli del programma.

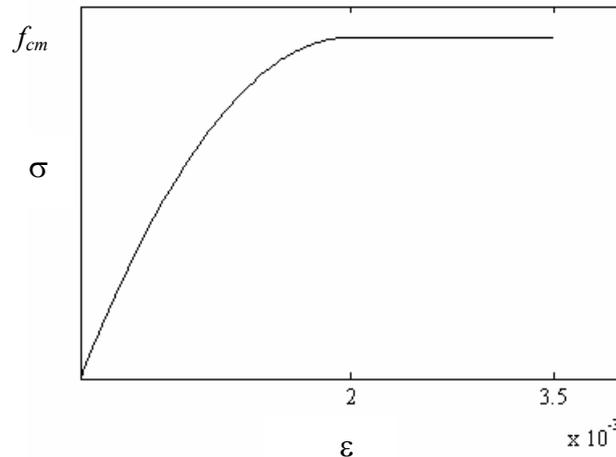


Figura 12.9: Diagramma tensione-deformazione semplificato del calcestruzzo

L'andamento del diagramma è parabolico sino a raggiungere l'ordinata massima  $\sigma_{oc}$  cui corrisponde il valore della dilatazione  $2 \cdot 10^{-3}$  ( $\epsilon_0$ ); la rottura sopraggiunge quando la deformazione, con  $\sigma = \sigma_{oc}$ , attinge il valore limite (convenzionale)  $\epsilon_u = 3,5 \cdot 10^{-3}$ .

In merito alla tensione ultima convenzionale  $\sigma_{oc}$ , va osservato che è stata utilizzata la resistenza media, al giorno della prova.

## 12.2.2 Descrizione del modello

L'analisi a flessione della sezione di una trave prefabbricata su cui è stato eseguito un successivo getto di completamento viene effettuata mediante un "modello a fibre". Questo modello è di tipo sezionale. Nelle applicazioni descritte si considereranno, quindi, sempre le sezioni in prossimità della mezzeria poiché si suppongono le sezioni maggiormente sollecitate.

Il modello a fibre consiste nel suddividere la sezione in un numero opportuno di strisce (150) di uguale spessore. Lo spessore di ciascuna striscia è indice del grado di approssimazione che si vuole ottenere: minore è lo spessore, maggiore è il numero di strisce considerate,

minore sarà il grado di approssimazione del modello. Per ogni striscia viene valutata l'area  $A_c^i$  e la distanza  $y_c^i$  del proprio baricentro dall'asse rispetto al quale si vuole calcolare il momento. Lo stesso procedimento viene seguito per l'armatura tesa e compressa, calcolando quindi l'area  $A_s^j$  e la distanza  $y_s^j$  dallo stesso asse.

In figura 12.10 è riportato un esempio di discretizzazione per una sezione rettangolare.

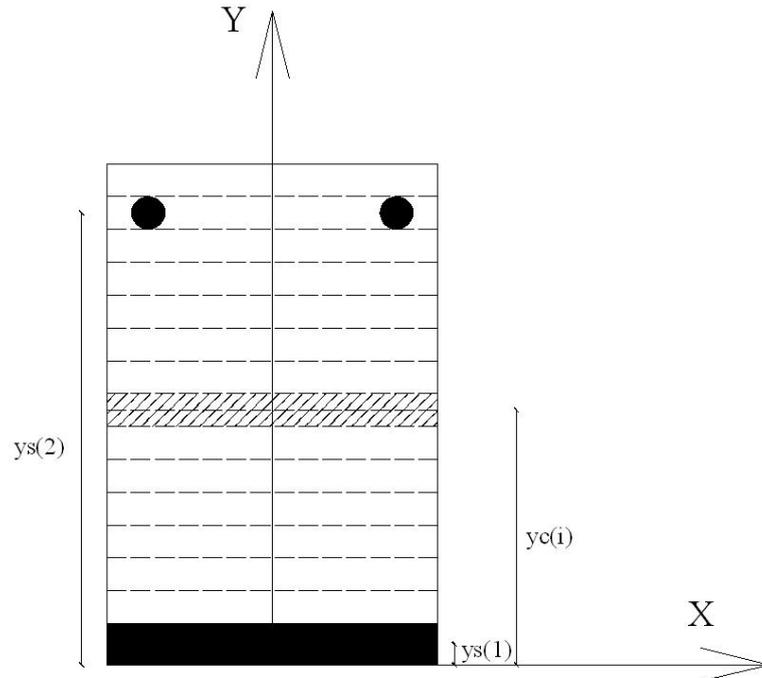


Figura 12.10: Esempio di discretizzazione

La sezione rettangolare di calcestruzzo è suddivisa in tante strisce di uguale spessore e  $y_c(i)$  indica la distanza del baricentro della  $i$ -esima striscia dall'asse  $x$ .  $y_s(1)$ ,  $y_s(2)$  e  $y_c(i)$  indicano la distanza dall'asse  $x$  del baricentro delle fibre rispettivamente di acciaio teso e compresso.

Se si ipotizza che su ogni striscia tensioni e deformazioni siano costanti e le sezioni restino piane, si possono scrivere le equazioni di equilibrio e di compatibilità in questo modo:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & \sum_{i=1}^n \sigma_c(i) \cdot A_c(i) + \sum_{i=1}^m \sigma_s(i) \cdot A_s(i) = 0 \\
 2) \quad & \sum_{i=1}^n \sigma_c(i) \cdot y_c(i) \cdot A_c(i) + \sum_{i=1}^m \sigma_s(i) \cdot y_s(i) \cdot A_s(i) = M \\
 3) \quad & \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_i}{y_c^i} = \chi
 \end{aligned}$$

dove:

$\sigma_c$  è la tensione del calcestruzzo

$\sigma_s$  è la tensione dell'acciaio

$\varepsilon_k$  è la deformazione del baricentro della sezione

$\varepsilon_i$  è la deformazione dell' $i$ -sima striscia

Questo sistema non è lineare. E' quindi possibile costruire la curva  $M$ - $\chi$  partendo da una certa distribuzione delle deformazioni  $\varepsilon$  lineare di tentativo, corrispondente ad una certa curvatura  $\chi$ .

L'equazione di equilibrio alla traslazione (1) non risulta generalmente soddisfatta: l'uguaglianza dei due membri dovrà essere ricercata attraverso un'opportuna traslazione del diagramma delle deformazioni  $\varepsilon$ , mantenendo in tal modo costante la curvatura  $\chi$ , ma verificando sempre che la deformazione massima di ogni materiale sia minore della rispettiva deformazione ultima. Il modello è quindi iterativo: ad ogni iterazione l'asse neutro viene spostato o verso l'alto o verso il basso. Nel caso in cui l'asse neutro sia stato spostato sia verso l'alto che verso il basso senza che sia stato raggiunto l'equilibrio, si aumenta la precisione riducendo il passo con cui si sposta l'asse neutro.

Una volta che è stato raggiunto l'equilibrio alla traslazione tramite l'equazione di equilibrio alla rotazione, è possibile calcolare il momento  $M$  a cui corrisponde un determinato valore di curvatura  $\chi$ . In questo modo si ottiene un diagramma momento-curvatura.

### 12.2.3 Schema generale

I modelli a fibre sono particolarmente adatti all'analisi flessionale. Lo studio è più realistico, perchè vi è la possibilità di valutare la risposta dei materiali fibra per fibra. Con le leggi empiriche, più complesse e sviluppate con leggi sperimentali, lo studio è più generale e il grado di approssimazione più alto poiché si prende in considerazione l'intera sezione e non il comportamento di ogni singola striscia di materiale. Il modello a fibre, però, risulta essere molto più oneroso dal punto di vista computazionale, in modo particolare nei casi in cui il numero di strisce utilizzate sia molto elevato.

Gli INPUT sono i dati in ingresso che vengono forniti inizialmente al programma:

- Caratteristiche geometriche della sezione: larghezza della base, altezza, dimensioni del fondello inferiore teso, numero e diametro dei ferri di armatura superiori compressi, copriferro inferiore che sarà sempre uguale a zero, copriferro superiore.
- Caratteristiche del cls prefabbricato: resistenza media caratteristica  $f_{cm} = 57.79 \text{ N/mm}^2$
- Caratteristiche del cls di completamento: resistenza media caratteristica  $f_{cm} = 32.38 \text{ N/mm}^2$
- Caratteristiche dell'acciaio: tensione di snervamento media  $f_{ym} = 490 \text{ N/mm}^2$ .
- Momento sollecitante: il momento fornito in ingresso al programma per la fase 1 è il momento corrispondente a quello indotto dal carico di prima fase ossia 127 kN, mentre il quello di seconda fase è dato dal carico di seconda fase (177 kN) più il peso del getto di completamento.

Il programma elabora i dati e restituisce in uscita (OUTPUT) i diagrammi che mettono in relazione momento e curvatura, tensione e deformazione delle strisce di calcestruzzo e acciaio (teso e compresso).

Riportiamo di seguito nella figura 12.11 la maschera iniziale del programma da cui sono visibili le caratteristiche geometriche della trave e il momento di prima fase e quello di seconda, si ricorda che i moduli elastici adottati per il cls prefabbricato è  $E_c = 36022 \text{ N/mm}^2$  mentre per il getto di completamento assumiamo  $E_{cg} = 26029 \text{ N/mm}^2$ .

**STUDIO DI UNA TRAVE APE + GETTO COMPLETAMENTO AGLI STATI LIMITE**

<div style="text-align: center;">B2</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">copriferro4</div> <div style="text-align: center;">A4</div> <div style="text-align: center;">H3</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">copriferro3</div> <div style="text-align: center;">A3</div> <div style="text-align: center;">H2</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">copriferro2</div> <div style="text-align: center;">A2</div> <div style="text-align: center;">H1</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">copriferro1</div> <div style="text-align: center;">A1</div> <div style="text-align: center;">H1</div> </div> <div style="text-align: center;">B1</div>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="3">CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE</th> </tr> <tr> <td>B1 = 800 mm</td> <td>copriferro1 = 30 mm</td> <td>copriferro3 = 10 mm</td> </tr> <tr> <td>B2 = 600 mm</td> <td>copriferro2 = 30 mm</td> <td>copriferro4 = 30 mm</td> </tr> <tr> <td>H1 = 400 mm</td> <td>Af1: n 11 <math>\phi</math> 26</td> <td>Af3: n 2 <math>\phi</math> 26</td> </tr> <tr> <td>H2 = 150 mm</td> <td>Af2: n 4 <math>\phi</math> 12</td> <td>Af4: n 4 <math>\phi</math> 24</td> </tr> <tr> <td>H3 = 200 mm</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2">CARATTERISTICHE DEI MATERIALI</th> </tr> <tr> <td>Rck della trave [Kg/cmq] =</td> <td>550</td> </tr> <tr> <td>Rck del getto di completamento [Kg/cmq] =</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>fyk dell'acciaio [Kg/cmq] =</td> <td>4300</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="3">SOLLECITAZIONI</th> </tr> <tr> <td></td> <td><input checked="" type="radio"/> Stato Limite Ultimo</td> <td><input type="radio"/> Verifica Tensioni Esercizio</td> </tr> <tr> <td>Valore del MOMENTO FASE 1 (fattorizzato)</td> <td>391 KN m</td> <td>KN m</td> </tr> <tr> <td>Valore del MOMENTO FASE 2 (fattorizzato)</td> <td>576 KN m</td> <td>KN m</td> </tr> </table> <p><input type="checkbox"/> Visualizza comportamenti limite</p> <p style="text-align: right;"><b>ANALISI</b></p>	CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE			B1 = 800 mm	copriferro1 = 30 mm	copriferro3 = 10 mm	B2 = 600 mm	copriferro2 = 30 mm	copriferro4 = 30 mm	H1 = 400 mm	Af1: n 11 $\phi$ 26	Af3: n 2 $\phi$ 26	H2 = 150 mm	Af2: n 4 $\phi$ 12	Af4: n 4 $\phi$ 24	H3 = 200 mm			CARATTERISTICHE DEI MATERIALI		Rck della trave [Kg/cmq] =	550	Rck del getto di completamento [Kg/cmq] =	300	fyk dell'acciaio [Kg/cmq] =	4300	SOLLECITAZIONI				<input checked="" type="radio"/> Stato Limite Ultimo	<input type="radio"/> Verifica Tensioni Esercizio	Valore del MOMENTO FASE 1 (fattorizzato)	391 KN m	KN m	Valore del MOMENTO FASE 2 (fattorizzato)	576 KN m	KN m
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE																																							
B1 = 800 mm	copriferro1 = 30 mm	copriferro3 = 10 mm																																					
B2 = 600 mm	copriferro2 = 30 mm	copriferro4 = 30 mm																																					
H1 = 400 mm	Af1: n 11 $\phi$ 26	Af3: n 2 $\phi$ 26																																					
H2 = 150 mm	Af2: n 4 $\phi$ 12	Af4: n 4 $\phi$ 24																																					
H3 = 200 mm																																							
CARATTERISTICHE DEI MATERIALI																																							
Rck della trave [Kg/cmq] =	550																																						
Rck del getto di completamento [Kg/cmq] =	300																																						
fyk dell'acciaio [Kg/cmq] =	4300																																						
SOLLECITAZIONI																																							
	<input checked="" type="radio"/> Stato Limite Ultimo	<input type="radio"/> Verifica Tensioni Esercizio																																					
Valore del MOMENTO FASE 1 (fattorizzato)	391 KN m	KN m																																					
Valore del MOMENTO FASE 2 (fattorizzato)	576 KN m	KN m																																					

VALORI LIMITE DI TENSIONE IN ESERCIZIO	
Valore tensione limite per il cls della trave	c1 0.6 fck
Valore tensione limite per il cls di completamento	c2 0.6 fck
Valore tensione limite per l'acciaio	s1 0.7 fyk
dove: $f_{ck} = 0.83 * 0.85 * R_{ck}$	
Valori coefficienti:	
- Combinazione RARA: c1=0.6; c2=0.6; s1=0.7	
- Combinazione SEMI-PERMANENTE: c1=0.45; c2=0.45; s1=0.7	
<input checked="" type="radio"/> RARA	
<input type="radio"/> SEMI-PERMANENTE $\varphi = 2$ Esempio: ( $\varphi = 2$ )	

Figura 12.11: dati input inseriti nel modello a fibre

Tale modello numerico ha fornito come risultati dei grafici relativi alle deformazioni del cls, dell'acciaio e della curva momento-curvatura che sono stati confrontati con quelli corrispondenti ottenuti sperimentalmente.

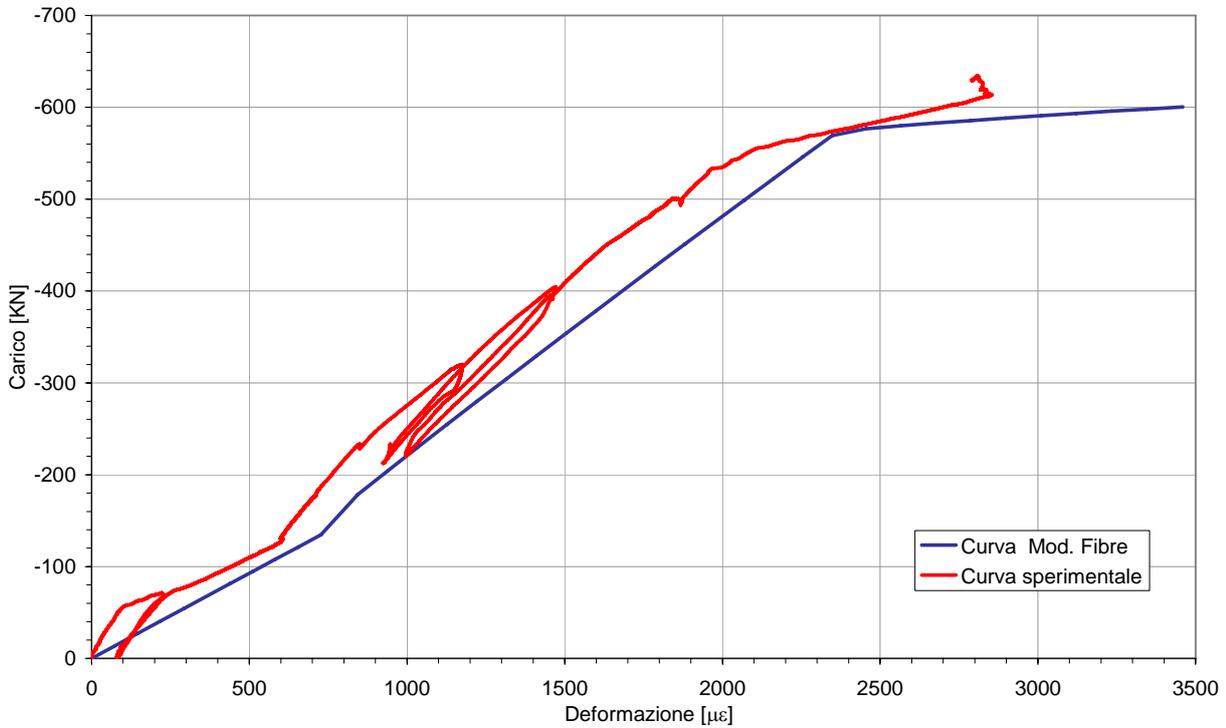


Grafico 12.20: sovrapposizione delle curve relative all'armatura tesa, Af1

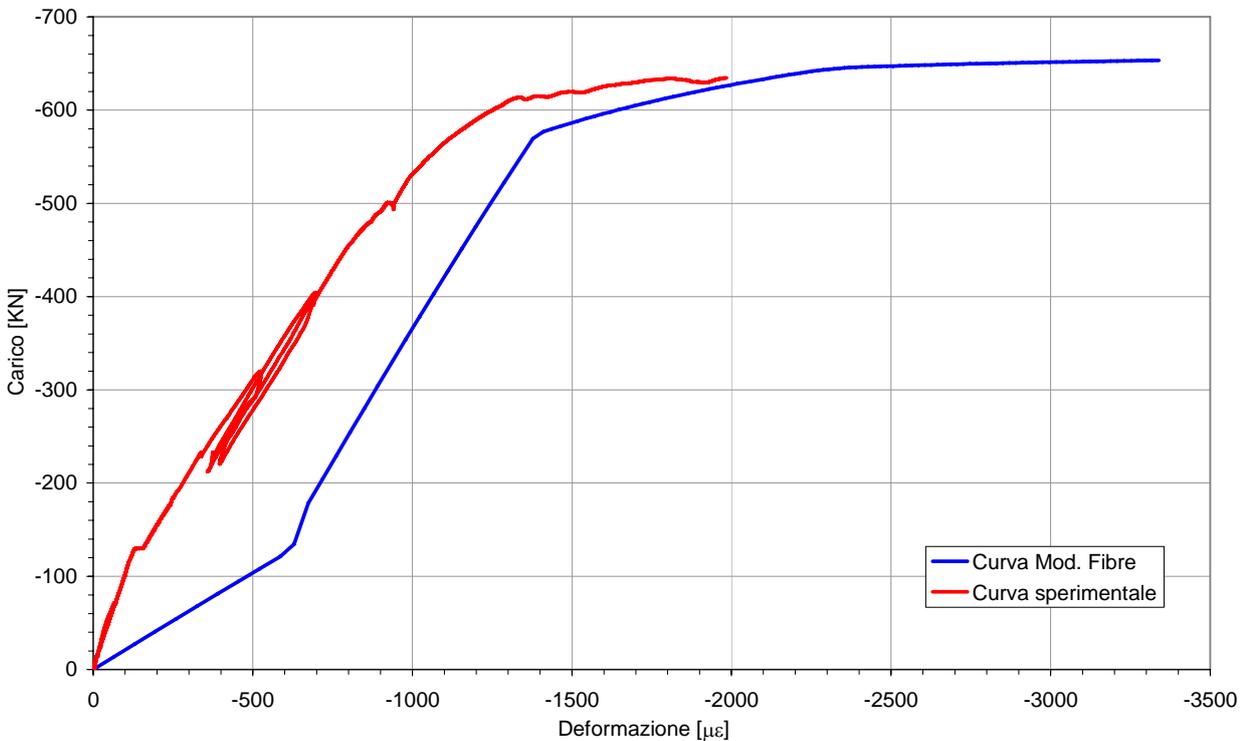


Grafico 12.21: sovrapposizione delle curve relative all'armatura compressa, Af4

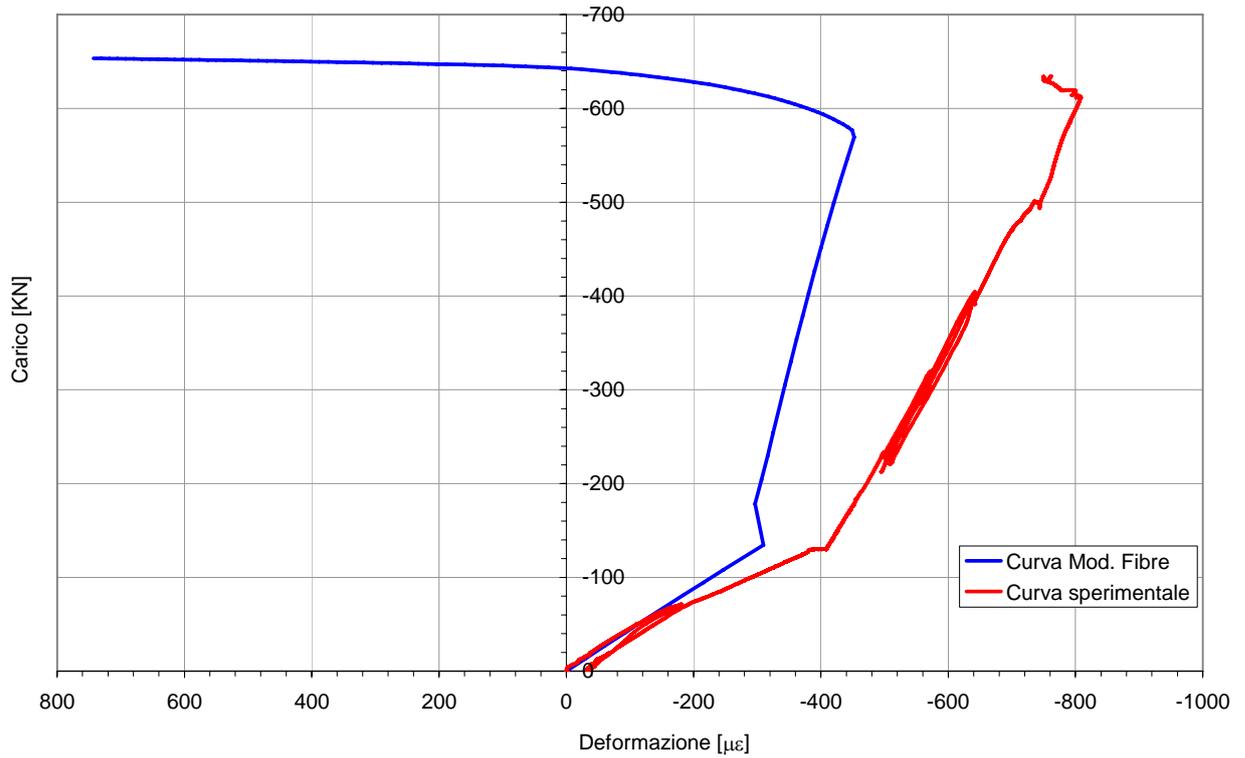


Grafico 12.22: sovrapposizione delle curve relative al cls prefabbricato, fibra 100

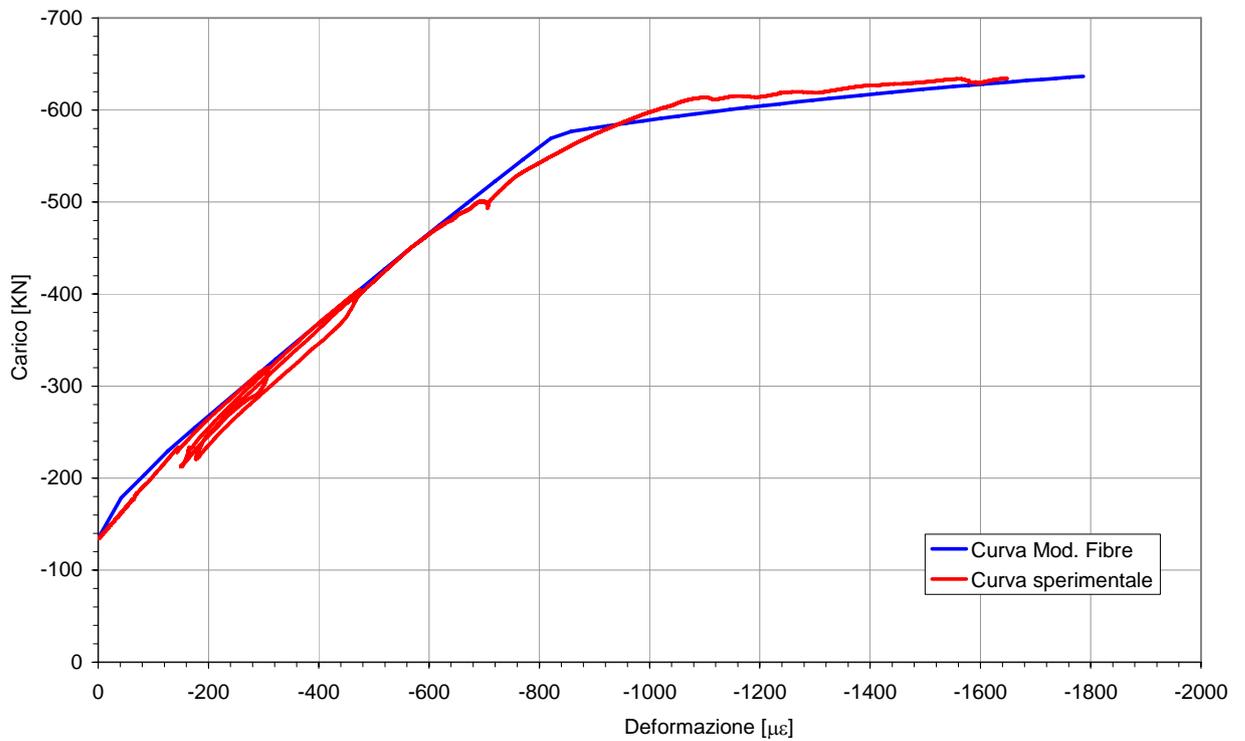


Grafico 12.23: sovrapposizione delle curve relative al cls di completamento, fibra 150

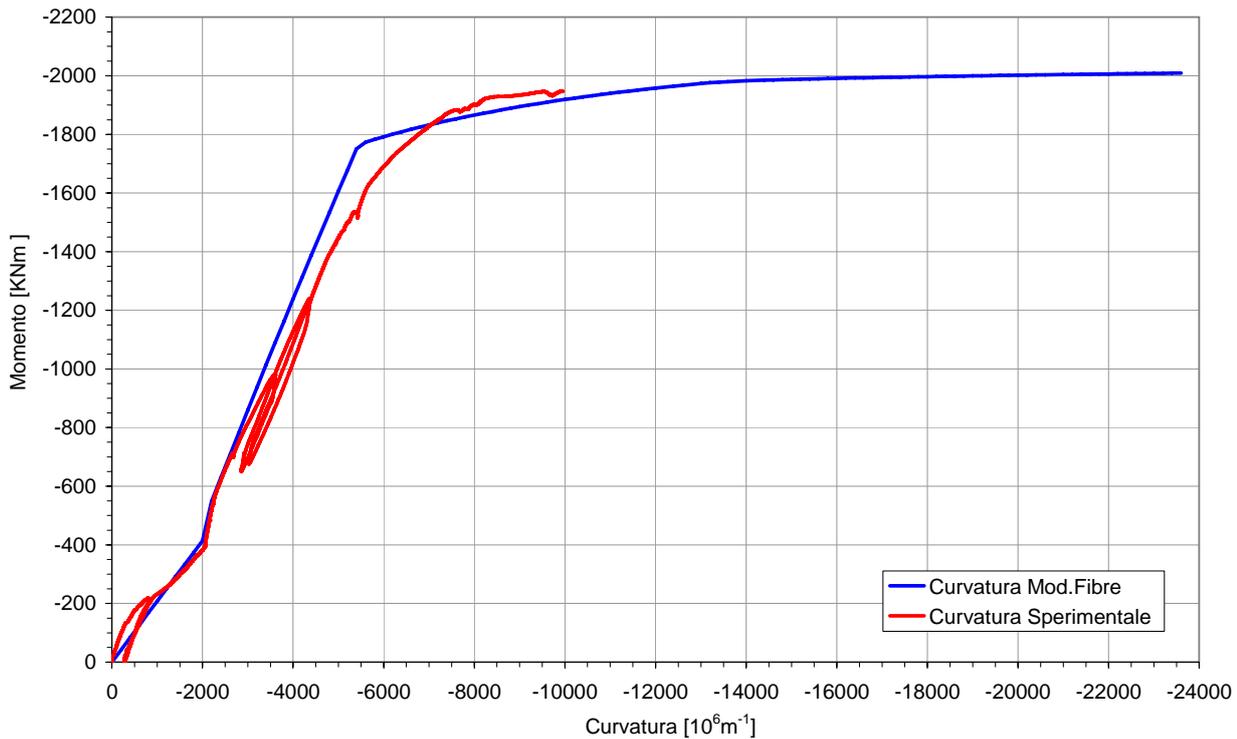


Grafico 12.24: sovrapposizione delle curve momento-curvatura

Nei grafici riportati precedentemente le curve di tipo sperimentale sono segnate in rosso, mentre quelle derivate dall'analisi con modello fibre sono riportate in blu. Ai fini di un più efficace confronto, le curve sperimentali sono state ottenute dalla media dei valori letti dalla coppia di estensimetri disposte a cavallo della sezione 3 presa in esame, essendo la maggiormente sollecitata ed in oltre sono state sottratte anche tutte le deformazioni di origine viscosa, in quanto, nel modello numerico l'analisi viene fatta pensando il carico applicato istantaneamente e non per lungo tempo come nel caso della prova svolta. Tutte le curve del modello a fibre sono state interrotte prima della fine dell'analisi, poiché i dati ottenuti con la prova sperimentale non arrivano alla crisi della sezione.

Nei grafici 12.20 è rappresentata la sovrapposizione delle curve relative alle deformazioni dell'armatura tesa in funzione del carico applicato, si nota una maggiore rigidità iniziale per le curve sperimentali fino alla fessurazione, avvenuta per 60 kN di carico applicato, dopo di che gli andamenti diventano pressoché paralleli fino a quando non è stato eseguito il getto di completamento. Da tale punto in poi la curva sperimentale assume rispetto a quella numerica una rigidità lievemente maggiore e manifesta il fenomeno di snervamento prima dell'altra. Tale fenomeno può essere dovuto al fatto che è stato introdotto un valore di tensione  $f_{ym} = 490 \text{ N/mm}^2$ , probabilmente inferiore a quello reale poiché non si sono eseguite prove di rottura sulle barre di acciaio che hanno costituito l'armatura della trave. Per concludere il modello

presenta una deformazione elasto-plastica dopo lo snervamento, come è ovvio, che non ci permette di giustificare la diminuzione di deformazioni avvenuta a carico crescente evidenziata dalla curva sperimentale.

Nei grafici 12.21 è rappresentata la sovrapposizione delle curve relative alle deformazioni dell'armatura tesa in funzione del carico applicato. Si nota che prima del getto di completamento il modello presuppone una deformazione del corrente, che sperimentalmente non è confermata, dopo invece le curve presentano un andamento pressoché parallelo e raggiungono lo snervamento in momenti diversi per le stesse considerazioni fatte per il grafico 12.20.

Nei grafici 12.22 è rappresentata la sovrapposizione delle curve relative alle deformazioni del calcestruzzo prefabbricato in funzione del carico applicato. Le curve presentano lo stesso andamento prima dell'esecuzione del getto di completamento, in seguito il diagramma sperimentale registra deformazioni minori di quelle evidenziate con il modello numerico e in oltre per entrambi si ha una diminuzione di deformazione al raggiungimento di 610 kN di carico dovuta all'innalzamento dell'asse neutro a cui consegue ovviamente una diminuzione delle deformazioni in zona compressa.

Nei grafici 12.23 è rappresentata la sovrapposizione delle curve relative alle deformazioni del calcestruzzo gettato in opera, dopo l'inizio della prova, in funzione del carico applicato. Le curve sono praticamente sovrapposte e quindi le rilevazioni fatte strumentalmente sono supportate dall'analisi fatta con il modello a fibre e quindi possiamo ulteriormente dire che il metodo alle tensioni ammissibili non rappresenta correttamente il comportamento di una trave prefabbricata caricata, sui cui è stato eseguito un getto di completamento e nuovamente caricata e poi portata a rottura.

Nei grafici 12.24 è rappresentata la sovrapposizione delle curve momento-curvatura ottenute per via sperimentale e per via numerica. La curva sperimentale presenta una maggiore rigidità fino alla fessurazione, avvenuta in corrispondenza di un momento pari a 190 kNm, successivamente le curve si sovrappongono fino a 700 kNm di momento applicato. Oltre questo punto la curvatura sperimentale cresce più rapidamente di quella teorica e raggiunge lo snervamento per un valore del momento applicato di 1950 kNm rispetto ai 1800 kNm della curva numerica. Tale aspetto è giustificato dal fatto, come già detto precedentemente, dal valore di  $f_{yd}$  ipotizzato che è stato introdotto nel modello di calcolo.



# Indice

1. INTRODUZIONE.....	1
2. CREEP E RITIRO	
2.1 Generalità.....	7
2.2 Ritiro.....	8
2.3 Creep.....	9
3. STRUMENTAZIONE	
3.1 Gli estensimetri.....	17
3.2 Trasduttori di spostamento resistivi.....	29
3.3 Gli LVDT (Linear Variable Differential Transformer).....	31
3.4 Sistema e apparecchiature di acquisizione.....	33
4. IL CALCESTRUZZO AUTOCOMPATTANTE	
4.1 Cenni sul calcestruzzo autocompattante.....	37
4.2 Componenti e caratteristiche del getto.....	41
4.3 Getto dei cilindri.....	41
4.4 Getto delle travi.....	42
5. PROVE DI ROTTURA SU TRAVI IN SCC	
5.1 Generalità .....	43
5.2 Preparazione della prova di rottura .....	45
5.2.1 Tracciatura della trave.....	45
5.2.2 Strumenti utilizzati nella prova.....	47
5.3 Svolgimento della prova di rottura .....	50
5.4 Rottura travi TS1-TS2: risultati ottenuti.....	60
5.4.1 Valutazione dello Stadio I, II e dello Tension Stiffening .....	69
5.5 Preparazione della prova di rottura TS5-TS6.....	77
5.5.1 Tracciatura della trave.....	77
5.5.2 Strumenti utilizzati nella prova.....	77
5.6 Svolgimento della prova di rottura .....	81
5.7 Rottura travi TS5-TS6: risultati ottenuti.....	90

5.7.1	Valutazione dello Stadio I, II e dello Tension Stiffening .....	99
<b>6.</b>	<b>ANALISI DEI RISULTATI</b>	
6.1	Generalità .....	109
6.2	Confronto tra i dati relativi alle rotture.....	109
<b>7.</b>	<b>STRUMENTAZIONE</b>	
7.1	Gli estensimetri da calcestruzzo.....	117
7.2	Gli estensimetri da acciaio .....	123
7.3	Misura del carico e modalita' applicativa.....	130
7.4	Gli LVDT.....	137
7.5	Il sistema di acquisizione.....	138
<b>8.</b>	<b>GETTO DELLA TRAVE E DEI CILINDRI</b>	
8.1	Componenti e caratteristiche del getto.....	141
8.2	Getto dei cilindri.....	142
8.3	Getto delle travi .....	144
<b>9.</b>	<b>PROVE PER DETERMINARE LA RESISTENZA E I MODULI DEI CALCESTRUZZI</b>	
9.1	Dimensione dei provini cilindrici.....	155
9.2	Prove di rottura dei provini cilindrici.....	157
9.3	Prove per la determinazione del modulo elastico.....	158
9.3.1	Descrizione della prova .....	158
9.3.2	Diagramma delle $\sigma$ - $\epsilon$ per provini in cls prefabbricato.....	160
9.3.3	Diagramma delle $\sigma$ - $\epsilon$ per provini in cls gettato il 03-10-07.....	162
9.3.3	Sviluppo nel tempo del modulo elastico.....	164
<b>10.</b>	<b>PROVE PER LA VALUTAZIONE DEL RITIRO E DEL CREEP DEL CLS</b>	
10.1	Dimensione dei provini cilindrici .....	165
10.2	Prove di ritiro su provini cilindrici.....	165
10.2.1	Ritiro nei provini cilindrici di cls prefabbricato.....	166
10.2.2	Ritiro termico del cubo di calcestruzzo tradizionale.....	168
10.2.3	Ritiro nei provini cilindrici di cls di completamento .....	170
10.2.4	Ritiro termico del cubo di calcestruzzo tradizionale.....	172

10.3	Prove di creep su provini cilindrici .....	173
10.3.1	Considerazioni sulla prova e modalità di esecuzione.....	173
10.3.2	Prova di creep su provini cilindrici in cls prefabbricato.....	177
10.3.3	Prova di creep su provini cilindrici in cls di completamento.....	181
11.	<b>PROVA DI ROTTURA DELLA TRAVE APE</b>	
11.1	Generalita' .....	185
11.2	Tracciatura della trave.....	187
11.3	Preparazione della prova.....	192
11.3.1	Strumenti utilizzati nella prova.....	192
11.4	Svolgimento della prova di rottura.....	204
11.5	Risultati della prova di sollevamento.....	214
11.5.1	Grafici relativi agli strumenti della sezione 1.....	214
11.5.2	Grafici relativi agli strumenti della sezione 2.....	216
11.5.3	Grafici relativi agli strumenti della sezione 3.....	220
11.6	Risultati della prova di rottura.....	222
11.6.1	Grafici relativi agli strumenti della sezione 1.....	222
11.6.2	Grafici relativi agli strumenti della sezione 2.....	226
11.6.3	Grafici relativi agli strumenti della sezione 3.....	233
12.	<b>ELABORAZIONE DEI RISULTATI</b>	
12.1	Grafici ottenuti dall'elaborazione dei dati strumentali.....	241
12.1.1	Grafici di freccia relativa , assoluta e momento curvatura.....	241
12.1.2	Grafici di deformazione del calcestruzzo depurati dal ritiro termico.....	247
12.1.3	Calcolo teorico.....	255
12.2	Modello a fibre.....	260
12.2.1	Legami costitutivi dei materiali.....	260
12.2.2	Descrizione del modello.....	262
12.2.3	Schema generale.....	264

## BIBLIOGRAFIA

# Bibliografia

- Aitcin, A.M: Neville e P. Acke (1997), Integrated View of Shrinkage Deformation, Concrete International, 35-41.
- Atecap (2004), Linee guida per la produzione del calcestruzzo autocompattante SCC.
- Pritoni Mirco(2005), Tesi di laurea – Effetti dell’ invecchiamento sulle proprietà differite del calcestruzzo autocompattante
- BOLLETTINO TECNICO C o d . B - 1 2 9 - I T R e v. 2 del 07/05/99*, “Preparazione della superficie per l’incollaggio degli estensimetri”,
- “Manual on cracking and deformation, Bollettino CEB n° 158-E- Euro-International Du Beton”
- Bisio G.M. (2002), “Appunti alle lezioni”; *Università degli studi di Genova, Ingegneria Biofisica ed Elettronica, Corso di Misure Elettroniche, Sensori e Trasduttori 1.*
- CEB-FIP (1990), *Model Code 1990* – Paragrafi 2.1.4–2.1.6.

Desidero ringraziare Prof. Claudio Mazzotti per l'aiuto e l'assistenza fornitami in tutti questi mesi e per tutto il tempo che mi ha dedicato nel tentativo di interpretare gli innumerevoli dati derivanti dalle prove seguite.

Ringrazio il Prof. Marco Savoia per la sua supervisione e la sua disponibilità.

Ringrazio i due tecnici del laboratorio Roberto e Loreto, con i quali ho trascorso parecchie giornate, per la loro assistenza continua, per i loro insegnamenti e per la fiducia e familiarità che mi hanno manifestato.

Ringrazio Loris, Giovanni e Fabio per il sostegno, l'aiuto continuo e l'amicizia che mi hanno dimostrato durante tutti questi anni dentro e fuori l'ambiente universitario.

Ringrazio i miei genitori, mia sorella e il mio ragazzo, Fabio, per la vicinanza, la tranquillità e il calore che mi hanno conferito in tutti questi lunghi anni di studio.