

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

DISTART

*Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque,
del Rilevamento, del Territorio*

TESI DI LAUREA
in
Tecnica delle Costruzioni II

SPERIMENTAZIONE DI UN NODO A TRE VIE
APPARTENENTE AD UN SISTEMA PREFABBRICATO
IN CEMENTO ARMATO

CANDIDATO

Paolo Patrignani
Matricola n° 2142-064040

RELATORE

Chiar.mo Prof. Ing. **Claudio Mazzotti**

CORRELATORI

Dott. Ing. **Loris Vincenzi**

Prof. Ing. **Marco Savoia**

Anno Accademico 2008/09

Sessione III

Indice

Capitolo 1		
INTRODUZIONE		-1-
Capitolo 2		
DESCRIZIONE E REALIZZAZIONE DEL NODO STRUTTURALE		-5-
2.1	Generalità	-5-
2.2	Caratteristiche geometriche ed armature	-11-
2.3	Getto di prefabbricazione	-15-
2.4	Getto di completamento	-21-
Capitolo 3		
DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA DI CONTRASTO		-33-
3.1	Telai di controvento	-33-
3.2	Tipologie di vincolamento delle estremità del nodo	-38-
3.3	Fasi di collegamento del nodo ai vincoli	-46-
Capitolo 4		
STRUMENTAZIONE		-51-
4.1	Gli estensimetri	-51-
4.2	Gli LVDT (Linear Variable Differential Transformer)	-63-
4.3	Cella di carico	-69-
4.4	Pistone di spinta	-74-
4.5	Martinetti cavi	-76-
4.6	Centralina P-3500	-78-
Capitolo 5		
APPLICAZIONE DEGLI ESTENSIMETRI		-81-
5.1	Procedura d'incollaggio	-81-
5.2	Estensimetri applicati in fase di prefabbricazione	-95-
5.3	Estensimetri applicati in fase di completamento	-105-
Capitolo 6		
TRACCIATURA ED APPLICAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DI SUPERFICIE		-117-
6.1	Generalità	-117-
6.2	Predisposizione degli strumenti e tracciatura	-118-
6.3	Applicazione dei supporti e fissaggio degli strumenti a riferimento relativo	-123-
6.3.1	<i>Applicazione per incollaggio</i>	-123-
6.3.2	<i>Applicazione per tassellatura</i>	-126-

6.3.3	<i>Fissaggio degli strumenti</i>	-128-
6.4	Predisposizione dei supporti e fissaggio degli strumenti a riferimento assoluto	-133-
6.4.1	<i>Descrizione</i>	-133-
6.4.2	<i>Applicazione del filo estensibile</i>	-134-
6.4.3	<i>Applicazione dell'L8 WA50</i>	-135-
Capitolo 7		
SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI		-139-
7.1	Generalità	-139-
7.2	Apparecchiature di acquisizione dei segnali	-141-
7.2.1	<i>Vishay serie 2100</i>	-141-
7.2.2	<i>MGCplus</i>	-144-
7.2.3	<i>Morsettiera</i>	-146-
7.2.4	<i>Gruppo di continuità</i>	-147-
7.3	Software di acquisizione dati	-148-
7.3.1	<i>Descrizione di LabVIEW</i>	-148-
7.3.2	<i>Dettagli dei V.I.</i>	-149-
7.3.3	<i>Software 32-can_nodo_APE_3vie_091209.vi</i>	-151-
Capitolo 8		
MODALITÀ ESECUTIVE DI PROVA		-161-
8.1	Generalità	-161-
8.2	Valori teorici delle sollecitazioni resistenti	-162-
8.3	Definizione dei livelli di carico	-166-
8.3.1	<i>Serie di carico condotte in controllo di forza</i>	-167-
8.3.2	<i>Serie di carico condotte in controllo di spostamento</i>	-169-
Capitolo 9		-173-
ELABORAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI		
9.1	Generalità	-173-
9.2	Rappresentazioni grafiche dei risultati sperimentali	-174-
9.2.1	<i>Elaborazione dati</i>	-174-
9.2.2	<i>Grafici forza-spostamento ($F-\delta$)</i>	-176-
9.2.3	<i>Grafici momento-curvatura ($M-\chi$)</i>	-182-
9.3	Indagini sperimentali sulle caratteristiche dei materiali	-187-
9.4	Analisi locale del comportamento strutturale	-188-
9.4.1	<i>Pannello di nodo</i>	-189-
9.4.2	<i>Barre longitudinali di nodo (E15)</i>	-198-
9.4.3	<i>Interfaccia nodo-pilaastro</i>	-203-
9.4.4	<i>Interfaccia nodo-trave</i>	-211-
9.4.5	<i>Interazione ancoraggi barre integrative-nodo</i>	-243-
9.4.6	<i>Interazione trave-mensola</i>	-251-
9.5	Analisi globale del comportamento strutturale	-258-
9.5.1	<i>Variazione delle resistenze</i>	-262-
9.5.2	<i>Variazione delle rigidezze secanti</i>	-264-

	<i>Indice</i>
9.5.3 <i>Variazione delle dissipazioni energetiche</i>	-268-
Bibliografia	-271-

Capitolo 1

INTRODUZIONE

La prefabbricazione di strutture in cemento armato è il sistema costruttivo che utilizza elementi in cemento armato normale o precompresso, eseguiti a piè d'opera o in appositi stabilimenti con procedimenti industrializzati, assemblati in opera mediante unioni strutturali di vario tipo, a secco (ad attrito o a spinotto) ovvero a umido (mediante getti integrativi). Negli ultimi anni vi è stata un'ampia diffusione delle costruzioni prefabbricate, in particolar modo per determinate tipologie di edifici quali quelli industriali (l'80% di tali edifici è oggi realizzato con struttura prefabbricata) e, in maniera sempre crescente, quelli commerciali ad uno o più piani. Un dato rappresentativo, anche se parziale, della diffusione di tale sistema costruttivo è fornito dalla produzione di orizzontamenti prefabbricati, realizzati in Italia nell'anno 2002, che ha raggiunto i 20 milioni di metri quadrati. La presenza di circa 500 aziende attualmente attive nell'industria della prefabbricazione italiana, con un totale di 20.000 addetti [Capozzi, 2009], è un fattore che giustifica la rilevanza economica di una ricerca in tale settore, alla quale si affianca sicuramente una grande rilevanza sociale, riguardante la salvaguardia di vite umane in occasione di eventi sismici.

Fino ad una decina di anni fa, il dimensionamento e le verifiche in campo elasto-plastico degli elementi e dei particolari utilizzati nella prefabbricazione consideravano i carichi e sovraccarichi verticali come azione di riferimento; nelle zone dichiarate sismiche, le sollecitazioni provocate dalle azioni orizzontali di progetto venivano utilizzate al più per analisi delle resistenze in campo elastico. L'introduzione dell'ordinanza n° 3274 del 20 marzo 2003 (primo passo verso il recepimento delle direttive europee in materia) ha posto l'accento anche e soprattutto sulla resistenza, sulle risorse di duttilità, e quindi sulle capacità dissipative delle strutture prefabbricate soggette all'azione orizzontale rappresentativa di un evento sismico. Si sono quindi avviate tutta una serie di indagini teorico-sperimentali che hanno messo a punto l'analisi dell'insieme strutturale sottoposto all'azione sismica: la valutazione delle sue risorse di duttilità,

della conseguente capacità dissipativa ed il corretto calcolo dei principali elementi (travi, pilastri ecc.).

Resta invece da effettuare un'indagine approfondita e generalizzata sullo studio dei collegamenti tra elementi prefabbricati di strutture soggette a sisma, che sia in grado di condurre ad una serie di indicazioni progettuali e realizzative, scientificamente corrette, complete e sperimentalmente testate, dei nodi e delle unioni nelle strutture prefabbricate.

Uno dei criteri progettuali innovativi introdotti dalle recenti normative è il *principio della gerarchia delle resistenze*, finalizzato a garantire l'innescio dei meccanismi duttili, responsabili della dissipazione energetica, e la prevenzione dei meccanismi fragili, che possono prematuramente compromettere l'integrità strutturale durante l'azione sismica; la sua applicazione pratica, supposta la corretta progettazione di pilastri, travi e solai, dipende dal corretto funzionamento delle connessioni e dal loro efficace posizionamento.

Occorre pertanto sviluppare e validare modelli teorici, basati su approcci meccanici, del comportamento dei collegamenti di strutture sottoposte ad azioni orizzontali; vale a dire ricavare le curve forza-spostamento e/o momento-rotazione sia per carichi monotoni che ciclici.

Nell'ottica delle problematiche appena discusse, la presente tesi, di carattere eminentemente sperimentale, si prefigge l'obiettivo di descrivere la preparazione e l'esecuzione della prova di carico ciclico effettuata su un nodo strutturale a 3 vie (esterno), utilizzato in sistemi di prefabbricazione pluriplano, e di argomentarne l'analisi dei risultati. Lo scopo di questo studio è quello di rilevare, al crescere del livello di carico e quindi dello stato di sollecitazione, misurazioni puntuali dello stato deformativo della struttura mediante strumenti a comportamento resistivo, induttivo e meccanico in parte affogati nei getti (sia di prefabbricazione che di completamento) ed in parte fissati, mediante varie modalità, sulla superficie della struttura. Ad eccezione della strumentazione delle gabbie d'armatura degli elementi prefabbricati, eseguita presso gli stabilimenti della ditta APE (sita in via Leonardo da Vinci, 14 Montecchio Emilia (RE)), committente dell'indagine sperimentale, tale prova è stata interamente preparata e condotta presso il Laboratorio di Prove su Strutture (La.P.S.) dell'Università di Bologna.

La prova in esame segue in ordine cronologico altre prove eseguite sugli elementi che compongono il sistema di prefabbricazione a completamento in opera

adottato dalla suddetta ditta: sono già state svolte indagini simili su un nodo strutturale a 4 vie (interno) con modalità analoghe alla sperimentazione in esame; si sono svolte prove di ancoraggio dei pilastri alle strutture di fondazione e prove di resistenza sul complesso pilastro prefabbricato-plinto di fondazione; si sono svolte indagini sperimentali sul comportamento flessionale differito delle travi prefabbricate e completate per fasi.

Nella prima parte del presente documento verrà descritto il nodo strutturale rappresentandone geometrie ed armature di progetto; si passerà quindi a rappresentare il telaio di contrasto e le strutture di vincolamento del nodo di prova. Verrà quindi descritta la strumentazione utilizzata nel rilevamento dei dati sperimentali, nonché le modalità con le quali tale strumentazione verrà applicata alla struttura in esame; si rappresenteranno contemporaneamente le fasi di assemblaggio degli elementi prefabbricati componenti il nodo strutturale, eseguite simulando fedelmente le modalità effettivamente adottate nelle realizzazioni delle strutture prefabbricate multipiano reali.

Nella seconda parte verranno invece descritte le modalità esecutive della prova, illustrando il sistema di acquisizione dati utilizzato, il protocollo di cicli di carico applicati ed il tipo di elaborazioni eseguite sui dati rilevati. Verrà quindi effettuata una approfondita analisi dei risultati elaborati, finalizzata a descrivere il comportamento strutturale, sia locale che globale, della struttura di collegamento oggetto di prova. Il caricamento è stato eseguito per incrementi graduali, effettuando in corrispondenza di ciascun livello una serie di tre cicli completi di carico. Il livello di carico, utilizzato in ciascuna delle nove serie effettuate, è stato individuato come frazione percentuale dell'azione che induce, nella sezione d'attacco della trave, i momenti ultimi di progetto. La prova è stata condotta in controllo di forza fino al valore del carico che induce, nella sezione d'attacco della trave, il momento resistente ultimo sperimentale, quindi si è proseguito in controllo spostamento fino ai massimi livelli deformativi permessi dal fine corsa del pistone di spinta.

La realizzazione delle componenti prefabbricate dell'opera e la loro strumentazione, così come il montaggio ed il getto di completamento del nodo e la relativa strumentazione, hanno rispettato i tempi canonici di maturazione dei getti: 7 giorni di maturazione dei getti prefabbricati prima del trasporto in laboratorio; 27 giorni di maturazione del getto di completamento prima dell'esecuzione della prova. Si intuisce quindi come la strumentazione dell'opera sia stata effettuata in tre

differenti momenti: strumentazione delle gabbie nelle porzioni prefabbricate di trave e pilastro effettuata presso lo stabilimento APE in prossimità del getto di preconfezionamento; strumentazione delle armature di completamento del nodo strutturale eseguita presso il La.P.S. in fase di preparazione del getto in opera del nodo; strumentazione puntuale della superficie del nodo completato, eseguita a circa metà del periodo di maturazione del getto di completamento, come prima operazione della fase conclusiva di preparazione della prova.

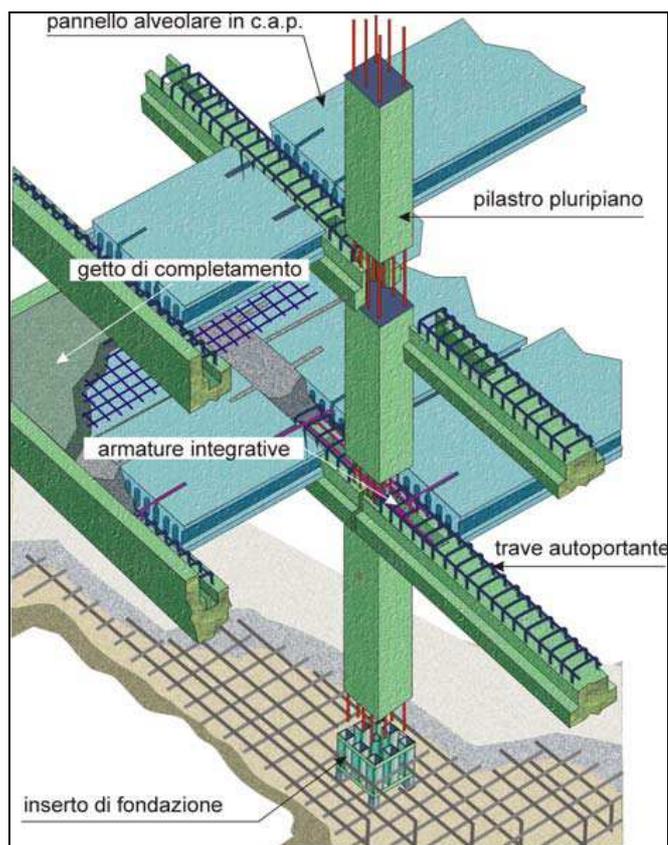
Capitolo 2

DESCRIZIONE E REALIZZAZIONE DEL NODO STRUTTURALE

In questo capitolo viene descritta la struttura oggetto di prova, particolare strutturale di collegamento d'angolo tra gli elementi costituenti l'intelaiatura portante in opere prefabbricate. Si descrive, in primo luogo, il sistema costruttivo tipico a cui la struttura di prova fa riferimento; si passa quindi a descrivere la geometria del nodo nella sua configurazione di prova, soffermandosi in particolar modo sulla descrizione delle armature integrative, applicate in opera, e di preconfezionamento, inglobate nel getto prefabbricato svolto in stabilimento. Nel paragrafo 2.3 viene descritta l'esecuzione del getto degli elementi prefabbricati, mentre nel paragrafo 2.4 si descrive l'assemblaggio di tali elementi, con la disposizione delle barre integrative, e l'esecuzione del getto di completamento; in entrambi i paragrafi, una sequenza di immagini documenta le fasi esecutive di entrambe le operazioni.

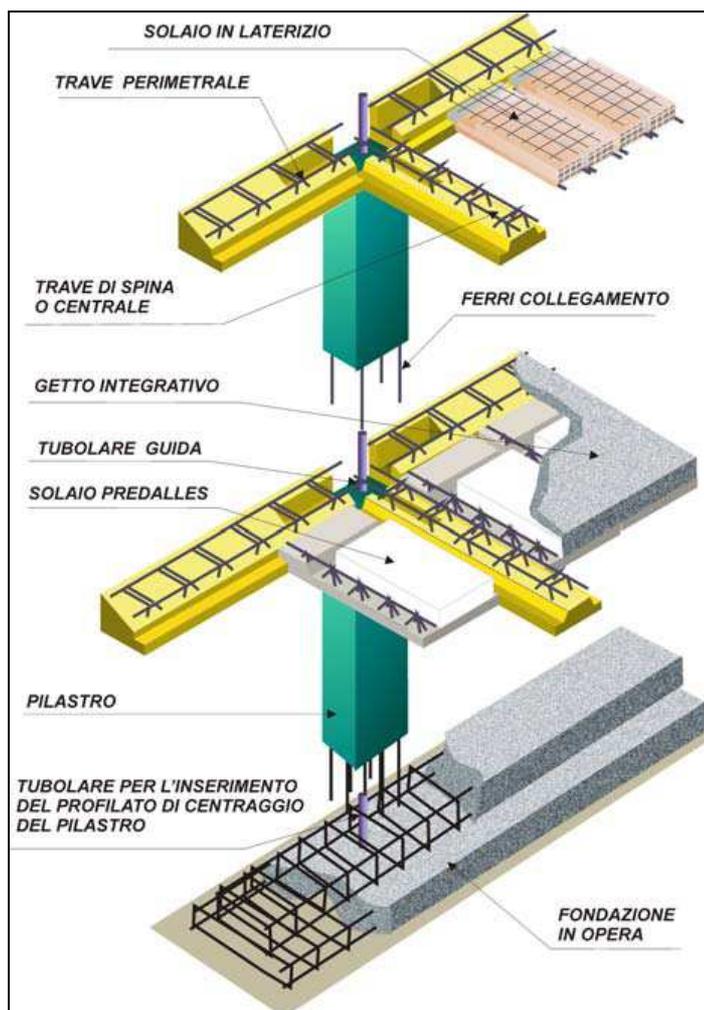
2.1 Generalità

Il nodo a tre vie oggetto d'indagine è un particolare strutturale appartenente allo schema costruttivo di prefabbricazione in cemento armato normale utilizzato dalla ditta APE s.p.a. di Montecchio (RE), denominato "SISTEMA COSTRUTTIVO INTEGRATO PLURIPIANO" (fig. 2.1), che rappresenta nel settore dell'edilizia terziaria-industriale un'alternativa alla prefabbricazione in c.a.p..



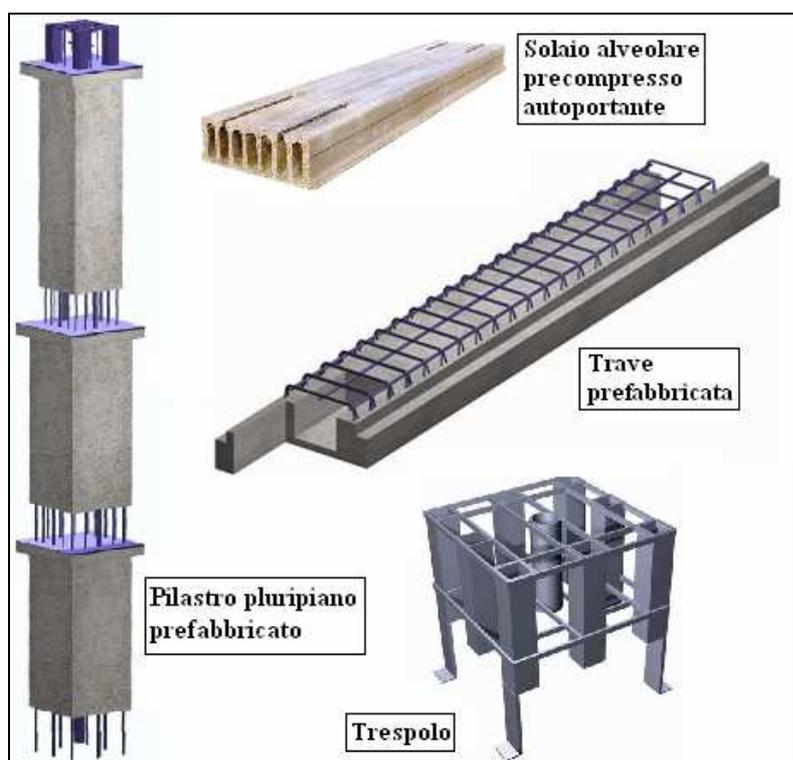
- Figura 2.1 - Schematizzazione del “SISTEMA COSTRUTTIVO INTEGRATO PLURIPIANO”.

Il sistema di prefabbricazione classico ricorre ad elementi precompressi interamente realizzati in stabilimento ed assemblati quasi esclusivamente a secco in schemi a funzionamento isostatico; si distingue quindi per le elevate capacità prestazionali dei singoli componenti, garantendo notevoli resistenze ai sovraccarichi verticali con ampie luci di carico, ma risente spesso delle problematiche connesse: alla progettazione, per sollecitazioni indotte dalle azioni orizzontali sismiche, delle connessioni di nodo; alla scelta del tipo di fondazione; alla caratterizzazione delle finiture. Introdotto nell'intento di ovviare a tali limitazioni, il “SISTEMA COSTRUTTIVO INTEGRATO” viene sviluppato come evoluzione nel settore dell'edilizia terziaria-industriale del procedimento costruttivo antecedente “K AVANZATO” (fig. 2.2), nato con l'obiettivo di realizzare strutture ad uso civile residenziale sfruttando l'assemblaggio in opera di semiprefabbricati leggeri.



- Figura 2.2 - Schematizzazione del "SISTEMA K AVANZATO".

L'obiettivo è quello di realizzare una struttura pluripiano iperstatica tradizionale dotata di "nodo di tipo umido", caratterizzata da un montaggio "tutto a secco" e da una organizzazione di cantiere tipica dei prefabbricati industriali [1]. Si progettano quindi elementi costruttivi semiprefabbricati speciali: pilastri pluripiano con interruzioni del getto; travi tralicciate di ampia luce dotate di tasche di completamento ed ali di supporto per gli orizzontamenti, pannelli alveolari precompressi autoportanti dotati di armature d'innesto o asole di alloggiamento per armature di completamento, che consentano di sfruttare a pieno i vantaggi offerti dalla prefabbricazione mediante il trasporto in cantiere ed il sollevamento in sede (figg. 2.3 e 2.4)



- Figura 2.3 - Elementi prefabbricati costituenti il SISTEMA COSTRUTTIVO INTEGRATO.



- Figura 2.4 - Montaggio delle travi prefabbricate e particolare delle asole di alloggiamento per le armature integrative.

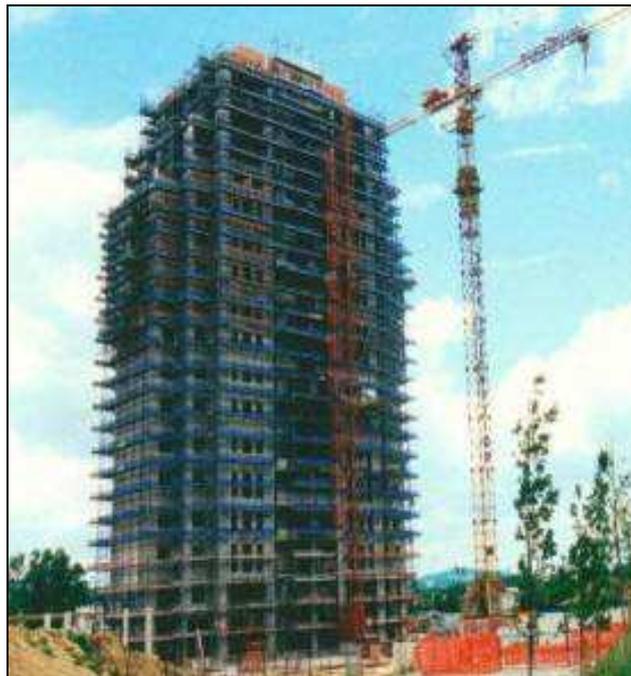
L'assemblaggio in schemi isostatici fedeli alla disposizione definitiva ed in grado di supportare il peso proprio ed il peso dei getti integrativi, fa sì che le uniche attività di getto in opera richieste siano:

- l'esecuzione della struttura di fondazione (platea, trave rovescia o a sacco, plinti), nella quale sono annegati i "TRESPOLI" (fig. 2.3), dispositivi con lo scopo di sostenere il pilastro al montaggio e di consentirne l'inghisaggio con la fondazione stessa;

- esecuzione del getto di seconda fase della fondazione mediante malte antiritiro, grazie al quale il pilastro, montato negli appositi tubolari del trespolo, centrato e piombato, viene reso solidale all'inserto di fondazione;
- disposizione delle armature integrative, fornite a corredo, di nodi strutturali e solai;
- bagnatura delle superfici ed esecuzione, in un'unica fase, del getto di completamento.

L'avvenuta maturazione dei getti integrativi conferisce al sistema la capacità portante di un sistema strutturale spaziale iperstatico.

L'area di applicazione di tale sistema costruttivo è, come detto, quella del terziario-industriale: centri commerciali, direzionali, alberghi, centri artigianali, parcheggi interrati e fuori terra, ecc; con tipologie strutturali variabili dalla piccola struttura fino a maglie di 10x10m e oltre, eventualmente caratterizzate da elevati sovraccarichi. L'altezza varia di norma da uno a quattro piani utilizzando il pilastro pluripiano unico, ma la possibilità di combinare la tecnologia di innesto in fondazione (trespolo) anche alla sommità del pilastro consente di eseguire edifici di altezze superiori, limitatamente alle possibilità dei mezzi di sollevamento (fig. 2.5). Inoltre l'utilizzo dell'innesto a "trespolo" anche in elevazione può consentire la realizzazione di sistemi di prefabbricazione multipli, frutto dell'integrazione del SISTEMA COSTRUTTIVO INTEGRATO con il SISTEMA K, che ampliano notevolmente la gamma di interventi realizzabili; ne è un esempio l'edificio di sette piani realizzato dalla ditta APE a Bardonecchia, in occasione dei 'XX Giochi Olimpici Invernali - Torino 2006', con destinazione a parcheggi, commerciale, sanitaria, per i tre piani inferiori in SISTEMA PLURIPIANO INTEGRATO, ed alberghiera, per i restanti quattro piani superiori in SISTEMA K (vedi fig. 2.6).



- **Figura 2.5** - Edificio pluriplano realizzato con innesti a trespolo in sommità dei pilastri.



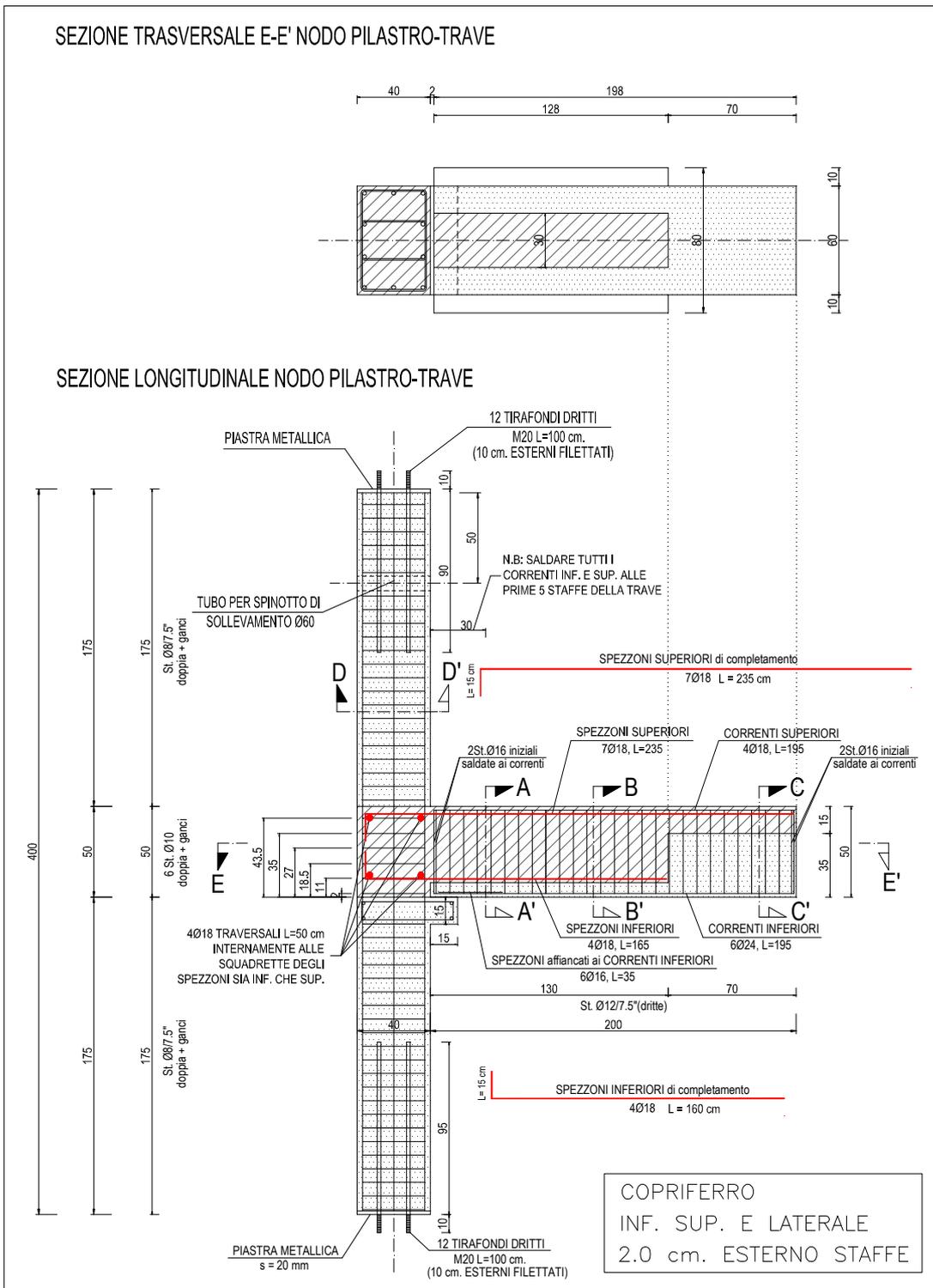
- **Figura 2.6** - Particolare dell'assemblaggio del tripiano a destinazione terziario-industriale con vista sui piani a destinazione alberghiera completati sullo sfondo.

2.2 Caratteristiche geometriche ed armature

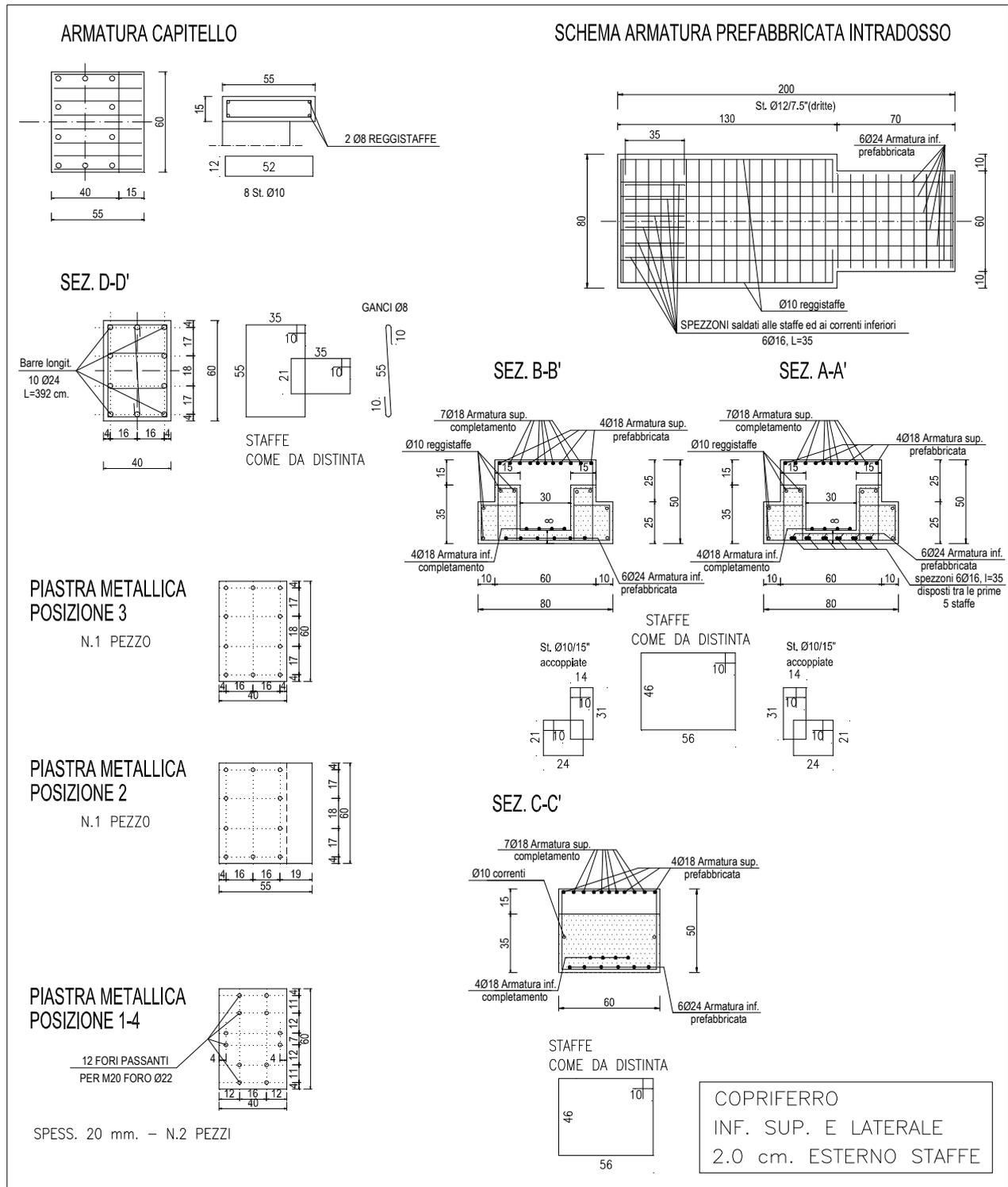
L'elemento strutturale sottoposto a prova di carico ciclica è costituito da un pilastro a sezione rettangolare ($l = 40$ cm, $b' = 60$ cm) di 4 m di altezza e da una porzione di trave di 2 m di lunghezza, avente sezione a T rovescia ($h = 50$ cm, $b = 60$ cm, $B = 80$ cm, $h' = 25$ cm). L'innesto della trave, realizzato in corrispondenza della sezione di metà altezza del pilastro, viene a costituire il nodo vero e proprio ($h = 50$ cm, $l = 40$ cm, $b' = 60$ cm). Sul lato più largo del pilastro, in corrispondenza dell'estremità inferiore dell'interruzione di nodo, è realizzata una mensola di sezione trasversale 15×15 cm atta a fornire l'appoggio provvisorio delle travi prefabbricate in fase di assemblaggio a secco. Tutte le dimensioni elencate sono riscontrabili nelle rappresentazioni grafiche riportate nelle figure 2.7 e 2.8.

Poiché l'interasse lordo di interpiano generalmente adottato per tali intelaiature è di 4 m, la scelta delle lunghezze delle due porzioni di pilastro considerate deriva dall'ideale separazione del nodo strutturale mediante sezionamento di due pilastri esterni consecutivi in corrispondenza della corrispettive sezioni di mezzeria. L'annullamento, in corrispondenza di tali sezioni, delle sollecitazioni flessionali prodotte da eventuali azioni orizzontali agenti sull'opera, convalida la scelta dello schema a cerniera cilindrica adottato in prova per il vincolo delle sezioni di estremità del pilastro prefabbricato, garantendo la fedele riproduzione in laboratorio delle sollecitazioni presenti nelle reali condizioni di esercizio.

Anche le dimensioni delle sezioni trasversali sono rappresentative di quelle generalmente adottate per le porzioni perimetrali delle strutture intelaiate realizzate in pratica; la trave prefabbricata, in particolar modo, presenta una doppia ala inferiore di 10 cm di larghezza e 25 cm di altezza, che funge d'appoggio per i pannelli di solaio in fase di assemblaggio a secco, ed una tasca $27 \times 30 \times 130$ cm di lunghezza, destinata invece ad ospitare gli spezzoni di armatura ed il getto di completamento per la realizzazione in opera del nodo di collegamento. Nella porzione di trave prefabbricata adottata nell'allestimento della prova di laboratorio le ali inferiori della trave sono presenti solo nei primi 130 cm di lunghezza, garantendone così sia la partecipazione alla diffusione dei carichi nelle sezioni d'interesse sperimentale prossime al nodo, sia la possibilità di realizzare all'estremità opposta della trave una più agevole connessione al pistone di spinta.



- Figura 2.7 - Dettagli costruttivi esecutivi Nodo Strutturale a tre vie.



- **Figura 2.8** - Particolari dei dettagli costruttivi esecutivi Nodo Strutturale a tre vie.

Le armature del nodo strutturale possono essere suddivise in armature di prefabbricazione e pezzi di completamento. Il pilastro è interamente armato in fase di prefabbricazione mediante 10 barre Ø24 longitudinali collegate

trasversalmente mediante staffe doppie e ganci $\varnothing 8$ posti ad interasse di 7,5 cm (vedi sezione D-D' in figg. 2.7 e 2.8); per motivi di praticità anche le armature trasversali previste nel successivo completamento del nodo vengono disposte nella gabbia del pilastro già all'atto della prefabbricazione.

L'estremità della trave che compone il nodo prevede invece la predisposizione di due differenti strati di barre longitudinali di intradosso: 6 barre $\varnothing 24$ vengono inglobate all'atto della prefabbricazione nella soletta inferiore della tasca di completamento, garantendo almeno 4,5 cm di copriferro computati sull'asse della barra ; 4 spezzoni di completamento $\varnothing 18$, di 165 cm di lunghezza ciascuno, vengono disposti in appoggio sulla soletta della tasca prefabbricata, determinando quindi un copriferro di circa 9 cm sull'asse della barra. L'armatura longitudinale d'estradosso viene invece disposta su un unico strato, protetto sempre da un copriferro di almeno 4,5 cm, ma in momenti differenti: 4 barre $\varnothing 18$ vengono fissate alla gabbia d'armatura già in stabilimento, pur non venendo inglobate nel getto di prefabbricazione; 7 spezzoni di completamento $\varnothing 18$, di 235 cm di lunghezza ciascuno, vengono disposti nei restanti interassi all'atto dell'assemblaggio del nodo in laboratorio. L'armatura a taglio è costituita da staffe $\varnothing 12$ diritte poste a 7,5 cm d'interasse, affiancate su ambo i lati della trave da una coppia di staffe $\varnothing 10$, disposte ad interasse di 15 cm, che fungono anche d'armatura flessionale per le ali inferiori della trave; 8 barre reggistaffe $\varnothing 10$ completano la gabbia d'armatura (vedi sezione B-B' in figg. 2.7 e 2.8).

Una serie di accorgimenti mirati a garantire l'immediato ed ottimale ancoraggio delle armature longitudinali prefabbricate della trave sono state previste nei primi 30 cm di gabbia: la prima staffa diritta $\varnothing 12$ è stata sostituita con due staffe $\varnothing 16$ affiancate; uno spezzone $\varnothing 16$ di 35 cm di lunghezza è stato affiancato all'estremità di ciascuna delle 6 barre longitudinali d'intradosso; almeno tutti i correnti superiori ed inferiori e gli spezzoni aggiuntivi devono, infine, essere collegati mediante saldatura alle prime 5 staffe (vedi sezione A-A' e sezione Nodo Pilastro Trave in figg. 2.7 e 2.8).

Trattandosi di un nodo posto all'estremità dell'ipotetico telaio strutturale l'armatura d'innesto della trave nella gabbia prefabbricata del pilastro richiede una serie di accorgimenti atti a garantire l'idoneo ancoraggio degli spezzoni di

completamento. Anzitutto si realizzano degli ancoraggi piegati a 90° alle estremità degli spezzoni, garantendo tratti rettilinei iniziali di 15 cm; si riducono in tal modo di 3 cm, per questioni pratiche legate all'assemblaggio in opera, i 10 diametri indicati in EC2 come lunghezza minima necessaria a sviluppare l'intero ancoraggio a trazione. Si prevedono inoltre 4 spezzoni trasversali Ø18, di 50 cm di lunghezza ciascuno, da affiancare agli spezzoni di completamento in corrispondenza delle piegature d'ancoraggio e dell'intersezione con le barre longitudinali del pilastro (vedi sezione Nodo Pilastro Trave in fig. 2.7); si intende in tal modo indurre la diffusione trasversale delle tensioni d'ancoraggio longitudinale sul conglomerato di nodo.

2.3 Getto di prefabbricazione

Il sistema di assemblaggio a secco prevede la prefabbricazione di pilastro e trave in stabilimento mediante calcestruzzi dotati di resistenza cubica caratteristica $R_{ck} \geq 50 \text{ N/mm}^2$ gettati in casseforme metalliche disposte su apposite tavole vibranti (la vibratura è necessaria qualora non si utilizzino calcestruzzi auto-compattanti), . La realizzazione dell'interruzione di getto prefabbricato del pilastro, destinata ad ospitare il successivo getto di completamento del nodo di collegamento, è realizzata utilizzando piastre metalliche di contenimento a perdere, forate in corrispondenza delle barre longitudinali passanti; un particolare esplicativo, fotografato prima di collocare la gabbia nelle casseforme di getto, è rappresentato in figura 2.9. La nicchia atta al contenimento del getto della mensola d'appoggio, predisposta alla base dell'interruzione di nodo, viene realizzata inferiormente mediante apposita cassaforma metallica, mentre superiormente viene prolungata la piastra a perdere della cavità di nodo (fig. 2.12). La tasca realizzata alle estremità della trave è invece ricavata mediante un cassone metallico vuoto all'interno in grado di galleggiare nel getto fresco; la sua posizione definitiva è regolata mediante battute di posizionamento (fig. 2.12), consentendo in tal modo al getto di fluirvi al di sotto e creare una soletta d'intradosso che garantisca un idoneo copriferro alle barre d'armatura.



- Figura 2.9 - Piastre che consentono l'interruzione del getto in corrispondenza del nodo.

 SISTEMA QUALITA MODULI DI CONTROLLO		NOME	REVISIONE	DATA	RIFERIM.
		RIC_011	000	06/03/1997	CQ007
SCHEDA RICETTA CALCESTRUZZI					
NUMERO DI PROTOCOLLO	UTILIZZO				
012	TUTTI I MANUFATTI DEL REPARTO CASSERI STATICI				
OPERATIVA DAL	<u>11 aprile 2007</u>	SOSTITUISCE LA	011		
SPECIFICHE					
RESISTENZA CARATTERISTICA (R _{ck})		N/mm ²	50		
RESISTENZA ALLO SCASSERO A 16 ORE (R _{bj})		N/mm ²	10		
RAPPORTO ACQUA / CEMENTO			0.47 ± 0.05		
CONSISTENZA ABBASSAMENTO AL CONO		mm.	16 ± 4		
DIAMETRO MASSIMO DELL'AGGREGATO		mm.	150		
CURVA DI RIFERIMENTO			Fuller		
REQUISITI DURABILITA' - CLASSE DI ESPOSIZIONE		UNI 9858	2 a		
COMPOSIZIONE PER METRO CUBO					
CEMENTO	TIPO 52,5 R - Prodotto dalla industria Cementi G.Rossi spa. e/o Italcementi spa.	Kg.	380		
INERTE	SABBIA TONDA - fornita dalla ditta CCPL sori. e/o Coop Muratori Reggio in ragione del : 51%	Kg.	333		
	GHIAIETTO 5/12 - fornita dalla ditta Coop Muratori Reggio : In ragione del : 49%	Kg.	310		
ADDITIVO	SUPERFLUIDIFICANTE (0.85 kg/ql.cem.) *Creative LW* di AXIM Italia Gruppo Italcementi	L.	2.8		
NOTE - le quantità di inerte sono calcolate assumendo i seguenti valori medi di umidità: sabbia : 6 % ghiaietto 2 % - il quantitativo di acqua aggiunta tabulato all'impianto di betonaggio e' calcolato sulla base del valore di umidità della sabbia rilevato dalla sonda e assunto per la ghiaia l'umidità del 2%					

- Figura 2.10 - Scheda tecnica di composizione del conglomerato utilizzato per il getto prefabbricato.

Il getto prefabbricato del pilastro e della porzione di trave utilizzati nella prova in esame è stato eseguito presso gli stabilimenti della ditta APE s.p.a. in data 22 ottobre 2009 utilizzando $1,19 \text{ m}^3$ di calcestruzzo di classe $R_{ck} \geq 500 \text{ Kg/cm}^2$ non auto-compattante, e quindi costipato mediante vibratore ad immersione (vedi la scheda riportata in fig. 2.10).

La sequenza di immagini riportata documenta le varie fasi del getto prefabbricato:

- predisposizione delle casseforme di getto: si tracciano sulle tavola metallica sede di getto gli ingombri degli elementi da gettare, quindi si dispongono apposite casseforme d'acciaio collegate a squadrette metalliche aventi le basi d'aggancio saldate alle tavole di getto; tali squadrette sono munite di un meccanismo ad asole e bietta che consente la corretta disposizione ed il serraggio dei casseri;
- trattamento mediante olio disarmante delle casseforme ed inserimento delle gabbie d'armatura al loro interno: le gabbie d'armatura, realizzate con acciaio tipo B450C saldabile, sono assemblate fissando le armature trasversali alle barre longitudinali mediante punti di saldatura, preventivamente strumentate mediante estensimetri e quindi collocate all'intero delle casseforme; centrate nel rispetto degli spessori di copriferro vengono dunque fissate alle sponde di contenimento, disponendo inoltre all'interno della gabbia d'armatura della trave la sagoma d'acciaio utile a creare la tasca per il getto di completamento (figg. 2.11 e 2.12);



- **Figura 2.11** - Preparazione del getto di prefabbricazione di trave (sinistra) e pilastro (destra).



- **Figura 2.12** - Particolari della sagoma metallica utilizzata per realizzare la tasca di completamento (sinistra) e delle piastre che conterranno il getto della mensola (destra).

- esecuzione e vibratura del getto di prefabbricazione: il calcestruzzo è miscelato dalla centrale di betonaggio dello stabilimento e trasportato alla tavola di getto all'interno di un cestello sollevato a mezzo di carro ponte; posizionato il cestello in corrispondenza delle casseforme si effettua il getto regolando manualmente la quantità di calcestruzzo mediante una saracinesca a tagliola e costipando il getto mediante un vibratore ad immersione (figg. 2.13 e 2.14);



- Figura 2.13 - Esecuzione del getto di prefabbricazione mediante cestello.



- Figura 2.14 - Costipamento mediante vibratore ad immersione di pilastro (sinistra) e trave (destra).

- prelievo di provini cubici e cilindrici: durante l'esecuzione del getto sono stati prelevati 6 provini cubici (15 x 15 x 15 cm), mediante casseforme

standardizzate, e 4 campioni cilindrici ($h = 25 \text{ cm}$, $r = 8,5 \text{ cm}$), raccolti in segmenti di tubo in PVC (fig. 2.15);



- **Figura 2.15** - Casseforme per il confezionamento dei provini di getto di prefabbricazione.

- rimozione del calcestruzzo in eccesso e lisciatura della superficie del getto: con l'ausilio di un legno squadrato si rimuove l'eccesso di calcestruzzo dalla superficie del getto provvedendo quindi, attesi alcuni minuti per consentire l'addensamento della superficie, alla lisciatura manuale del getto mediante l'ausilio di spatola e cazzuola (fig. 2.16).



- **Figura 2.16** - Operazioni di livellamento e lisciatura della superficie del getto.

2.4 Getto di completamento

In data 29 ottobre 2009, dopo 7 giorni di maturazione, pilastro e trave prefabbricati sono stati trasportati in laboratorio per effettuare dapprima la strumentazione degli spezzoni di completamento, quindi l'assemblaggio del nodo ed infine il getto integrativo.

Il getto di completamento del nodo strutturale è stato eseguito presso il La.P.S. in data 12 novembre 2009 utilizzando 0,41 m³ di calcestruzzo fornito mediante autobetoniera dalla ditta SA.PA.BA; il conglomerato, dotato di resistenza in classe $R_{ck} \geq 300 \text{ Kg/cm}^2$ e consistenza in classe S4 (ovvero abbassamento al cono di Abrams da 160 a 210 mm, UNI EN 206), non essendo auto-compattante ha richiesto un costipamento manuale mediante vibratore ad immersione.

La sequenza di immagini riportata documenta le varie fasi del getto integrativo:

- posizionamento di pilastro e trave prefabbricati in assetto definitivo: con l'ausilio del carroponete del laboratorio si è sollevato il pilastro e lo si è collegato alla struttura di contrasto, verificandone la messa in bolla verticale; si è sollevata, sempre a mezzo di carroponete, la trave e la si è collocata in appoggio sull'apposita mensola prefabbricata del pilastro e sulla piastra del pistone di spinta, quindi si è effettuata la messa in bolla orizzontale agendo sull'alzata del pistone (fig. 2.19). Occorre garantire, in fase di accostamento al filo esterno del pilastro, che la trave conservi un arretramento di circa 2 cm, garantendo in tal modo l'interstizio sufficiente alla fuoriuscita di parte del getto di completamento (fig. 2.20);
- disposizione delle armature di completamento: dopo aver strumentato le armature di nodo e prima del sollevamento del pilastro alla postazione di prova si sono fissate, mediante fil di ferro, le staffe ed i ganci di nodo nel rispetto degli intervalli di progetto (fig. 2.17); quindi ancor prima del posizionamento in sede della trave si sono ancorati alla gabbia di nodo gli spezzoni centrali d'estradosso e di intradosso, preventivamente strumentati mediante estensimetri (fig. 2.18). Posizionata la trave si sono infilati, attraverso le gabbie di nodo e trave ed all'interno della tasca di completamento, i restanti spezzoni integrativi con l'accortezza di

disporre gli ancoraggi piegati d'estremità a battuta contro l'interno dello staffaggio di nodo, allineando verticalmente i tratti rettilinei terminali (figg. 2.22). Fissati mediante fil di ferro gli spezzoni ad intervalli regolari si sono infine collegati trasversalmente, mediante i 4 spezzoni d'ancoraggio, in corrispondenza delle gole di piegatura e dell'intersezione con le barre longitudinali del pilastro (fig. 2.20 e 2.21). Le immagini 2.23 e 2.24 raffigurano la disposizione definitiva delle armature, rispettivamente, nel primo tratto di trave e del nodo di collegamento.



- Figura 2.17 - Fissaggio delle staffe di nodo con pilastro ancora coricato.



- Figura 2.18 - Disposizione delle barre strumentate prima della messa in sede della trave.



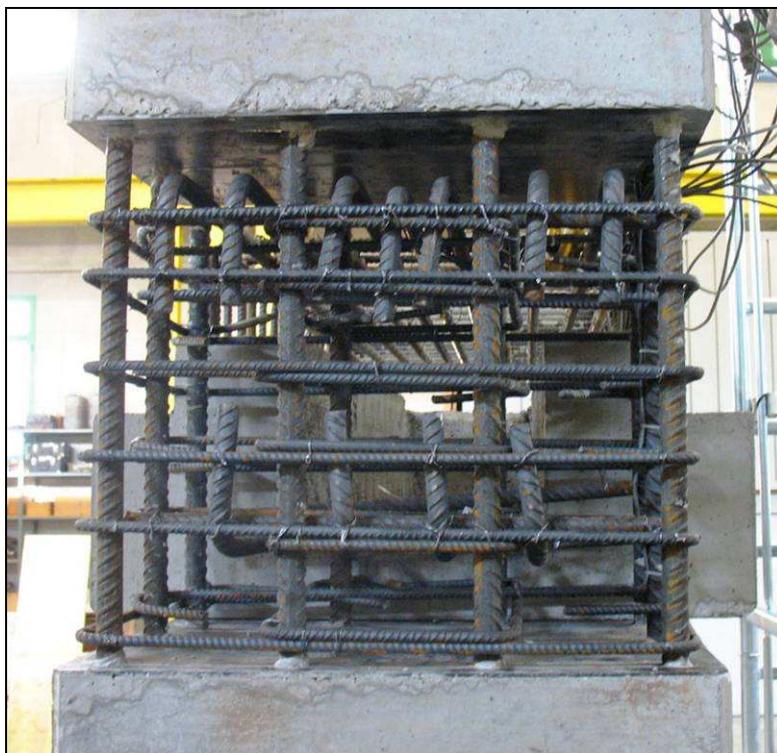
- Figura 2.19 - Posizionamento della trave nella sede definitiva di assemblaggio.



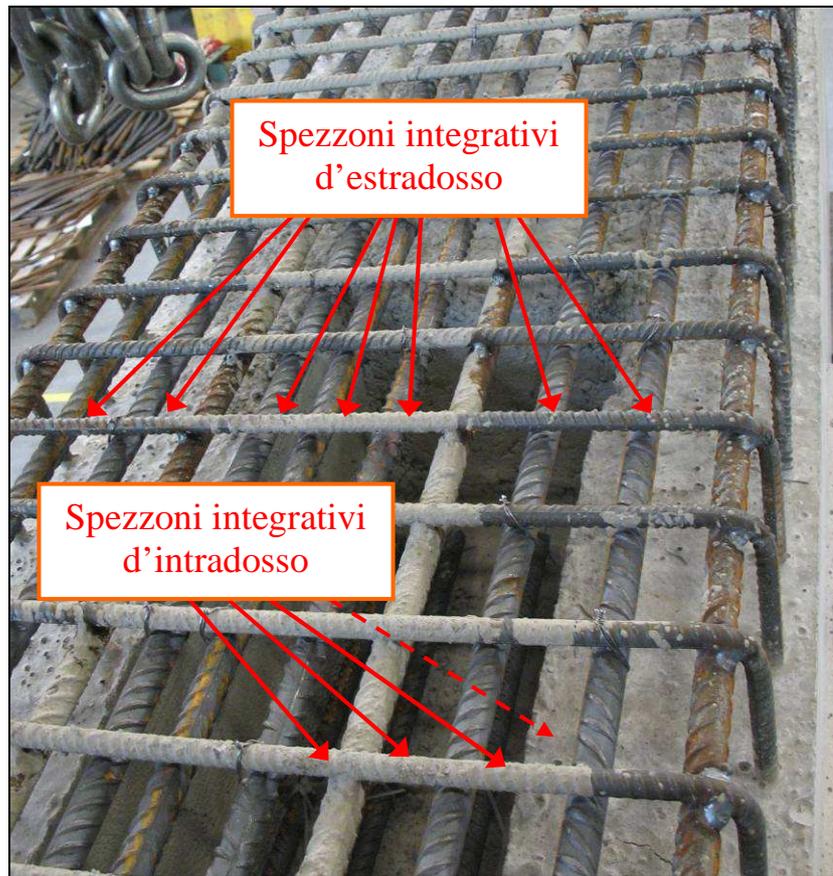
- Figura 2.20 - Particolare dell'arretramento della trave e degli spezzoni d'ancoraggio.



- Figura 2.21 - Fase di fissaggio degli spezzoni integrativi.



- Figura 2.22 - Fase di fissaggio e disposizione finale degli ancoraggi piegati degli spezzoni.



- Figura 2.23 - Disposizione degli 11 spezzoni integrativi nella trave prefabbricata.

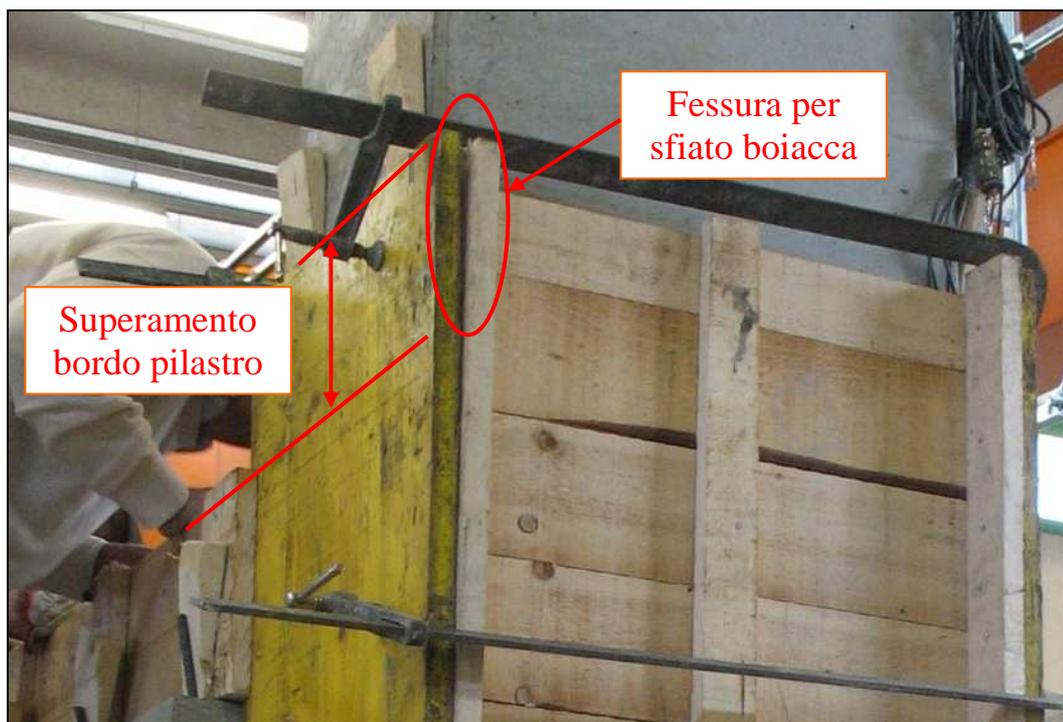


- Figura 2.24 - Particolare della disposizione definitiva delle armatura di nodo.

- diposizione delle casseforme di contenimento: operai della ditta APE hanno provveduto ad allestire, mediante sponde in legno, le casseforme di contenimento del getto integrativo. Fori preventivamente praticati sulle facce superiori delle ali laterali della trave hanno consentito di fissare, con l'ausilio di spezzoni di tondino e cunei di legno, le sponde disposte lateralmente alla trave; i pannelli di confinamento sulle tre facce esterne del nodo e la restante sponda di estremità trave sono stati invece sorretti mediante morsetti a vite (fig. 2.25). L'aspetto più delicato del getto di completamento riguarda il completo riempimento della cavità di nodo, occorre quindi disporre i pannelli laterali di nodo in maniera tale che il bordo superiore superi di qualche centimetro il foro del pilastro ed interporvi dei distanziatori; si consente in tal modo lo sfogo dell'aria ed il riscontro visivo della fuoriuscita di boiaccia ad attestare il completo riempimento, come mostrato nel particolare di figura 2.26;



- **Figura 2.25** - Particolari delle casseforme di trave e nodo.



- **Figura 2.26** - Accorgimenti adottati nella casseratura del nodo per garantirne il completo riempimento.

- esecuzione e vibratura del getto di completamento: il conglomerato viene versato, mediante apposito scivolo, dall'autobetoniera al cestello munito di gancio per il sollevamento alla quota di getto e di saracinesca a tagliola per il dosaggio manuale del getto; si posiziona quindi il cestello in prossimità del nodo, a mezzo di carroponte, e si effettua il getto integrativo avvalendosi dei due trabattelli disposti parallelamente alla trave (fig. 2.27). Si provvede innanzitutto al riempimento della cavità di nodo, operando simultaneamente la vibratura del calcestruzzo al suo interno mediante vibratore ad immersione, spostandosi quindi verso l'estremità opposta della trave, per effettuare il riempimento e la costipazione, mediante vibratura, della tasca di completamento ed infine dell'estradosso (figg. 2.28 e 2.29). Come già accennato il calcestruzzo di riempimento della cavità di nodo andrà vibrato fino alla fuoriuscita della boiaccia di cemento dalle commessure dei pannelli di contenimento (fig. 2.30).



- Figura 2.27 - Riempimento e sollevamento del cestello a saracinesca.



- Figura 2.28 - Esecuzione del getto mediante azionamento della saracinesca a tagliola.



- Figura 2.29 - Costipamento di nodo e trave mediante vibratore ad immersione.



- **Figura 2.30** - Fuoriuscita della boiaccia dalle commessure dei pannelli a garanzia del riempimento del nodo.

- prelievo di provini cubici e cilindrici: durante l'esecuzione del getto sono stati prelevati 8 provini cubici (15 x 15 x 15 cm), mediante casseforme standardizzate;
- rimozione del calcestruzzo in eccesso e lisciatura della superficie del getto: con l'ausilio di un legno squadrato si rimuove l'eccesso di calcestruzzo dalla superficie del getto provvedendo quindi, attesi alcuni minuti per consentire l'addensamento della superficie, alla lisciatura manuale del getto mediante l'ausilio di cazzuola. Si crea inoltre uno strato sovrabbondante di conglomerato all'estremità esterna della trave, ed all'atto della reazione di presa vi si poggia la piastra superiore di completamento del collegamento del pistone; si viene così a creare una modellazione ottimale della superficie di contatto, evitando successivi interventi di inspessimento mediante malta a ritiro contrastato (fig. 2.31);



- **Figura 2.31** - Alloggiamento della piastra superiore di collegamento al pistone e livellamento del getto.

- maturazione del getto e successivo scassero: al fine di limitare l'evaporazione dell'acqua d'impasto il getto viene mantenuto coperto con dei teli, oltre che con i casseri di getto, e regolarmente bagnato; venerdì 20 novembre, all'ottavo giorno di maturazione, si è provveduto a scassere la struttura per consentire le successive fasi di tracciatura (fig.2.32).



- Figura 2.32 - Aspetto del nodo strutturale all'atto della scasseratura.

Capitolo 3

DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA DI CONTRASTO

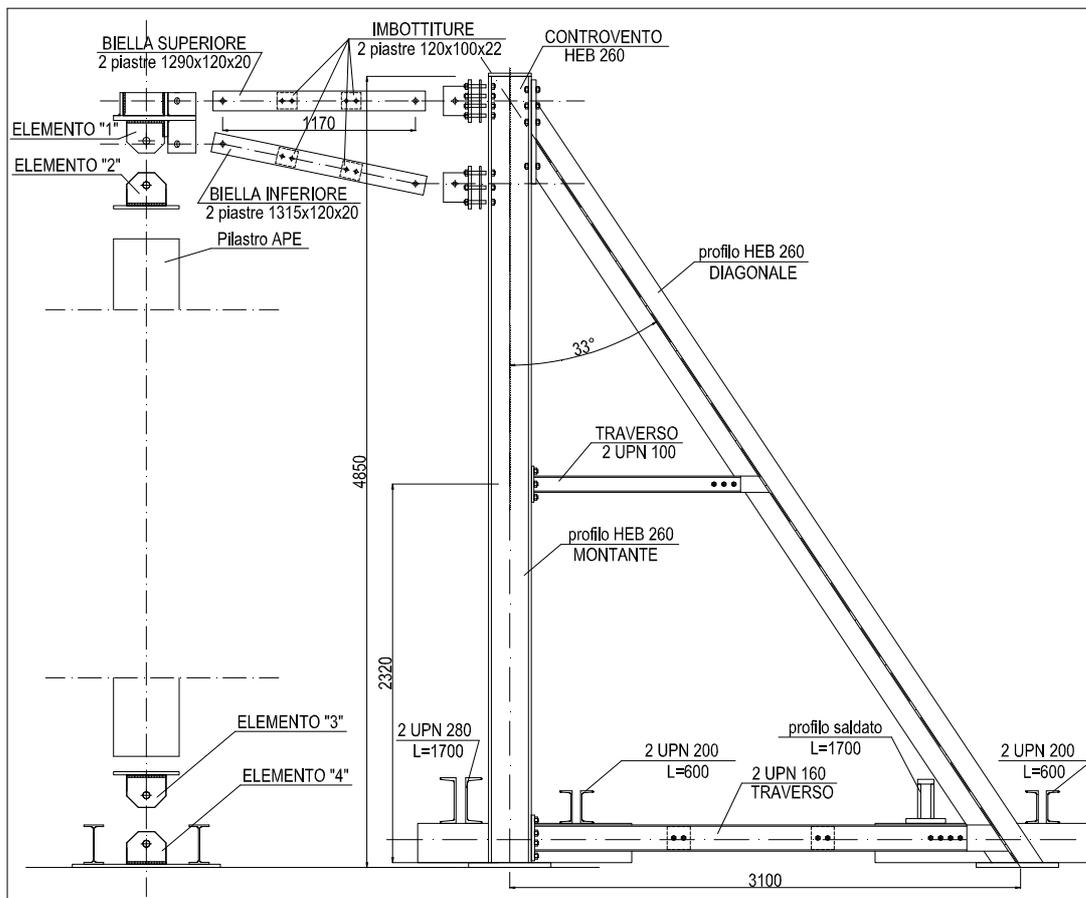
Nel presente capitolo verranno descritte le strutture accessorie predisposte in laboratorio per garantire, in fase di carico, l'efficace vincolamento del nodo d'angolo oggetto di prova. Ci si sofferma, anzitutto, sui due telai triangolari che compongono la struttura di controvento, rappresentandone gli elementi costituenti e descrivendone la disposizione; si descrivono, quindi, le strutture approntate per l'ancoraggio al suolo di tali controventi, rappresentandone lo schema di disposizione in pianta e le immagini dell'avvenuta realizzazione. Nel paragrafo 3.2 viene descritto lo schema dei vincoli applicati al nodo oggetto di prova, rappresentando e descrivendo le componenti delle strutture utilizzate per il collegamento al meccanismo di contrasto, al pistone di spinta ed al suolo. Infine, nel paragrafo 3.3, vengono descritte le fasi di collegamento di pilastro e trave di nodo ai suddetti vincoli, soffermandosi, in particolar modo, sulla serie di opere provvisorie a cui si è fatto ricorso per garantire l'allestimento ottimale della prova.

3.1 Telai di controvento

La struttura ideata per consentire l'ancoraggio in sommità del pilastro è costituita da due telai di controvento triangolari, realizzati assemblando profilati in acciaio, le cui componenti sono elencate nello schema strutturale di figura 3.1.

I timpani di controvento sono disposti a formare, in pianta, un angolo retto, mentre gli assi geometrici del nodo strutturale sono contenuti nel piano avente come traccia al suolo la bisettrice di tale angolo (vedi schema di fig. 3.2). La definizione dello schema geometrico di tale telaio è stata condizionata: in elevazione dalle dimensioni delle componenti il nodo strutturale oggetto di prova; in pianta dalla disposizione delle prese di forza presenti nel solaio del La.P.S. (distribuite secondo i vertici di maglie di 1 m di lato), le quali fungeranno da innesto per le barre "DYWIDAG" che costituiscono gli ancoraggi a terra del sistema di prova.

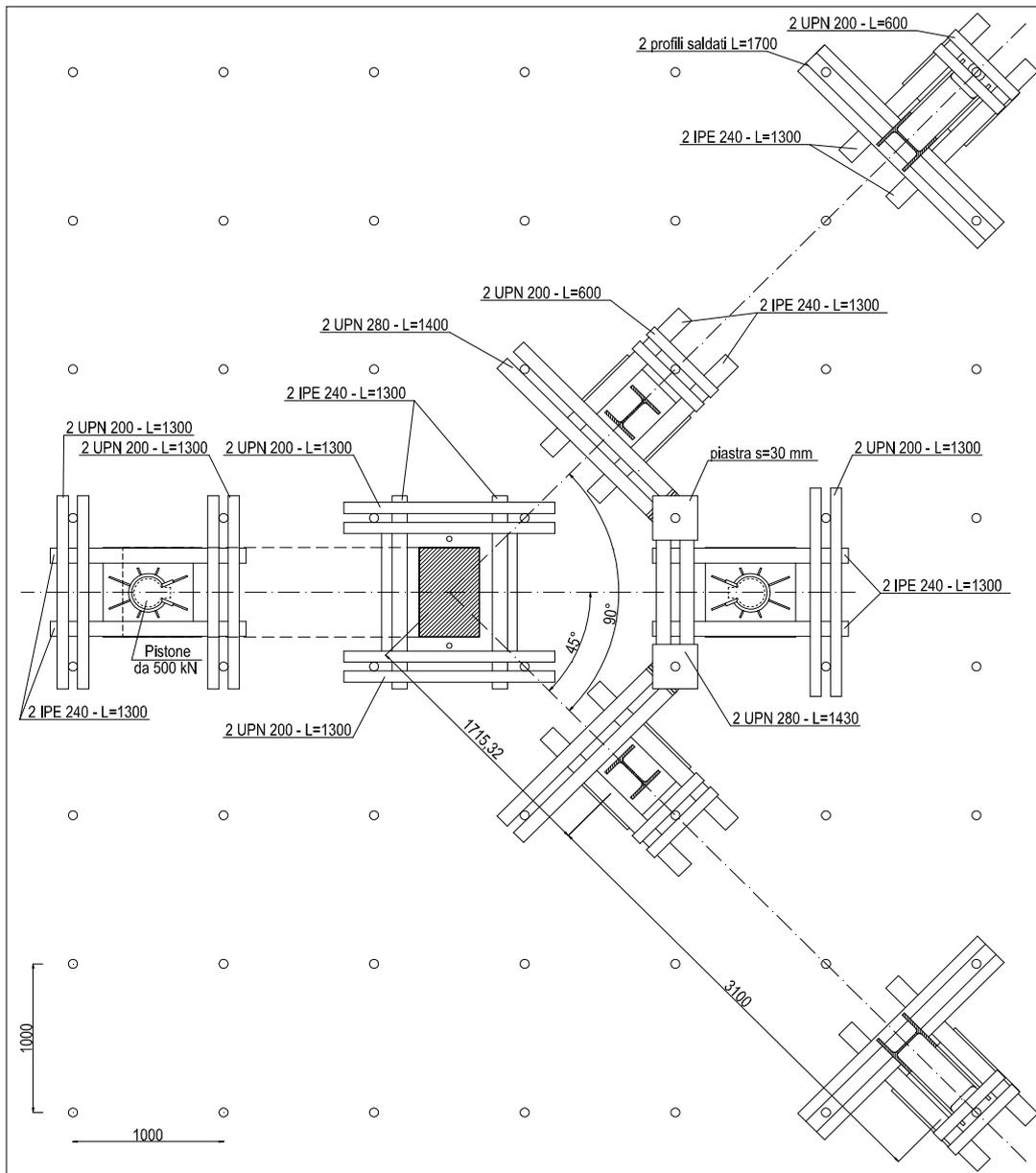
La figura 3.3 fornisce un'immagine esplicativa della disposizione dei telai di controvento.



- Figura 3.1 - Particolare costruttivo del singolo telaio di controvento.

Le barre “DYWIDAG” sono dotate di nervature continue, laminate a caldo, sincronizzate a formare una filettatura destrorsa sull’intera lunghezza della barra che le rendono particolarmente idonee all’utilizzo in sistemi di precompressione. Le barre utilizzate nella prova sono munite di idonei dadi e controdadi serrati a mano per mezzo di chiavi regolabili e tubo di prolunga; le tipologie in uso possiedono due differenti diametri nominali: $\varnothing 32$ mm per gli ancoraggi al solaio e la compressione del pilastro; $\varnothing 26,5$ mm per il collegamento del pistone alla trave [2].

Lo schema dei collegamenti a pavimento, corredato dall’indicazione dei profilati utilizzati, e riportato in figura 3.2.



- **Figura 3.2** - Schema dei collegamenti a pavimento di telaio, motori e pilastro.

Nelle figure 3.4, 3.5 e 3.6 sono invece rappresentati i dettagli al vero degli ancoraggi al suolo dei telai di contrasto; si può notare come il collegamento anteriore al suolo dei due montanti avvenga mediante un unico profilato ad asse poligonale (fig. 3.5), utilizzato anche per il serraggio a terra del secondo motore, impiegato solo in presenza di una seconda trave (nodo a quattro vie).



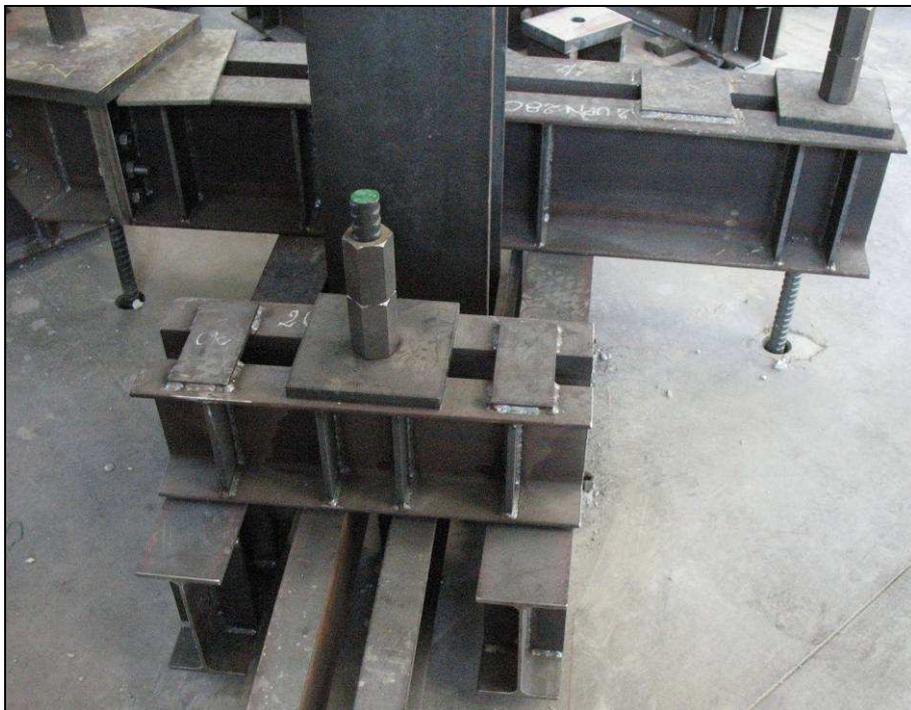
- Figura 3.3 - Vista globale della struttura di contrasto.



- Figura 3.4 - Collegamento a pavimento del diagonale di controvento.



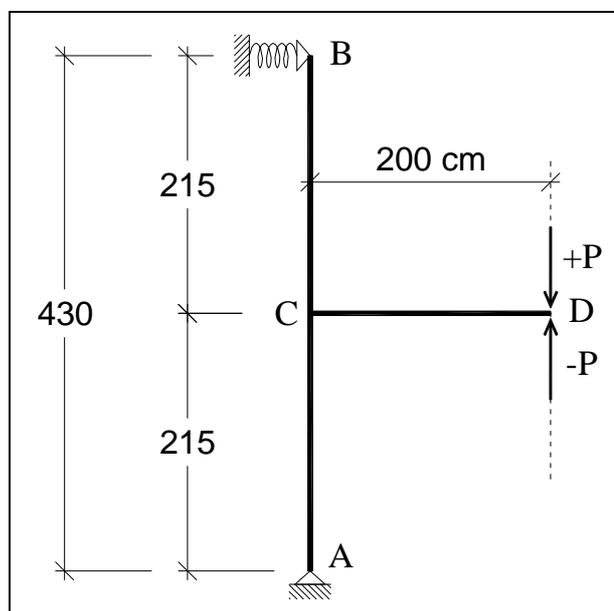
- **Figura 3.5** - Collegamento a pavimento del montante di controvento, vista frontale.



- **Figura 3.6** - Collegamento a pavimento del montante di controvento, vista posteriore.

3.2 Tipologie di vincolamento delle estremità del nodo

Con la struttura di contrasto realizzata si vuole creare un sistema di vincolamento del nodo strutturale corrispondente allo schema statico ideato per la prova in esame, rappresentato in fig. 3.7 (in figura 3.8 si evidenzia la corrispondenza con lo schema reale). L'azione P , di trazione o compressione, viene applicata da un martinetto meccanico a vite vincolato mediante perno ad un sistema di piastre, ammortate a loro volta alla trave tramite barre dywidag ($\varnothing 26,5$ mm), come illustrato in figura 3.9. Grazie al collegamento mediante biella l'azione di contrasto tra motore e trave risulta priva di componenti flessionali.



- Figura 3.7 - Schema statico di prova.



- **Figura 3.8** - Schema reale di prova.

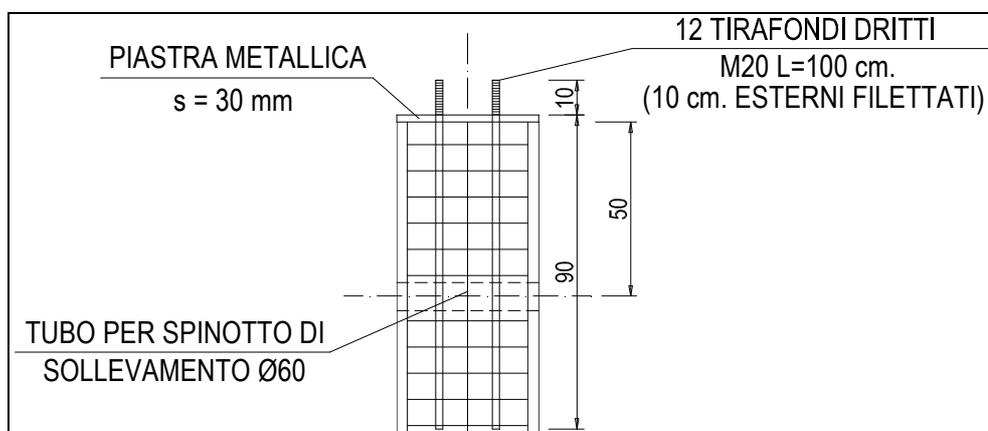


- **Figura 3.9** - Particolare del collegamento a biella tra pistone e piastre d'ancoraggio alla trave.

Per realizzare i vincoli al piede (A) ed alla sommità (B) del pilastro si sono predisposte alle due estremità, in fase di prefabbricazione, una piastra di 3 cm di spessore, che funge da battuta per il collegamento alle carpenterie del telaio di prova, e 12 tirafondi dritti M20 di 100 cm di lunghezza ciascuno (figg. 3.10 e 3.11). Progettando in tal modo le strutture di nodo da sottoporre a prova (sia a tre che a quattro vie) risulta possibile utilizzare il medesimo telaio e le medesime carpenterie per effettuare molteplici prove.



- Figura 3.10 - Particolare pre-getto di tirafondi e piastra d'estremità.

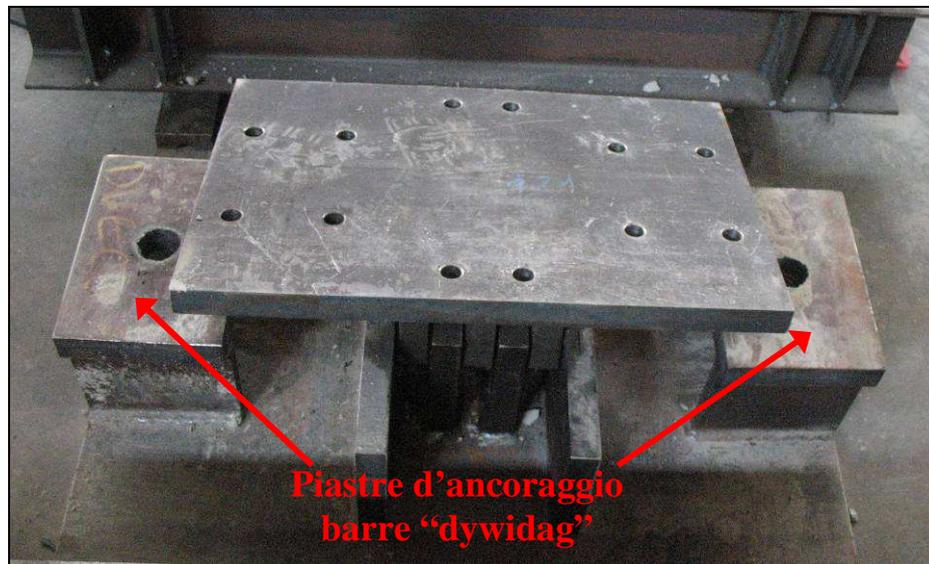


- Figura 3.11- Particolare strutturale di tirafondi e piastra d'estremità.

Le cerniere di collegamento rappresentate nello schema di fig. 3.7 sono realizzate mediante piastre munite di pettini forati, collegate a due a due mediante perno in acciaio speciale (figg. 3.12 e 3.13).

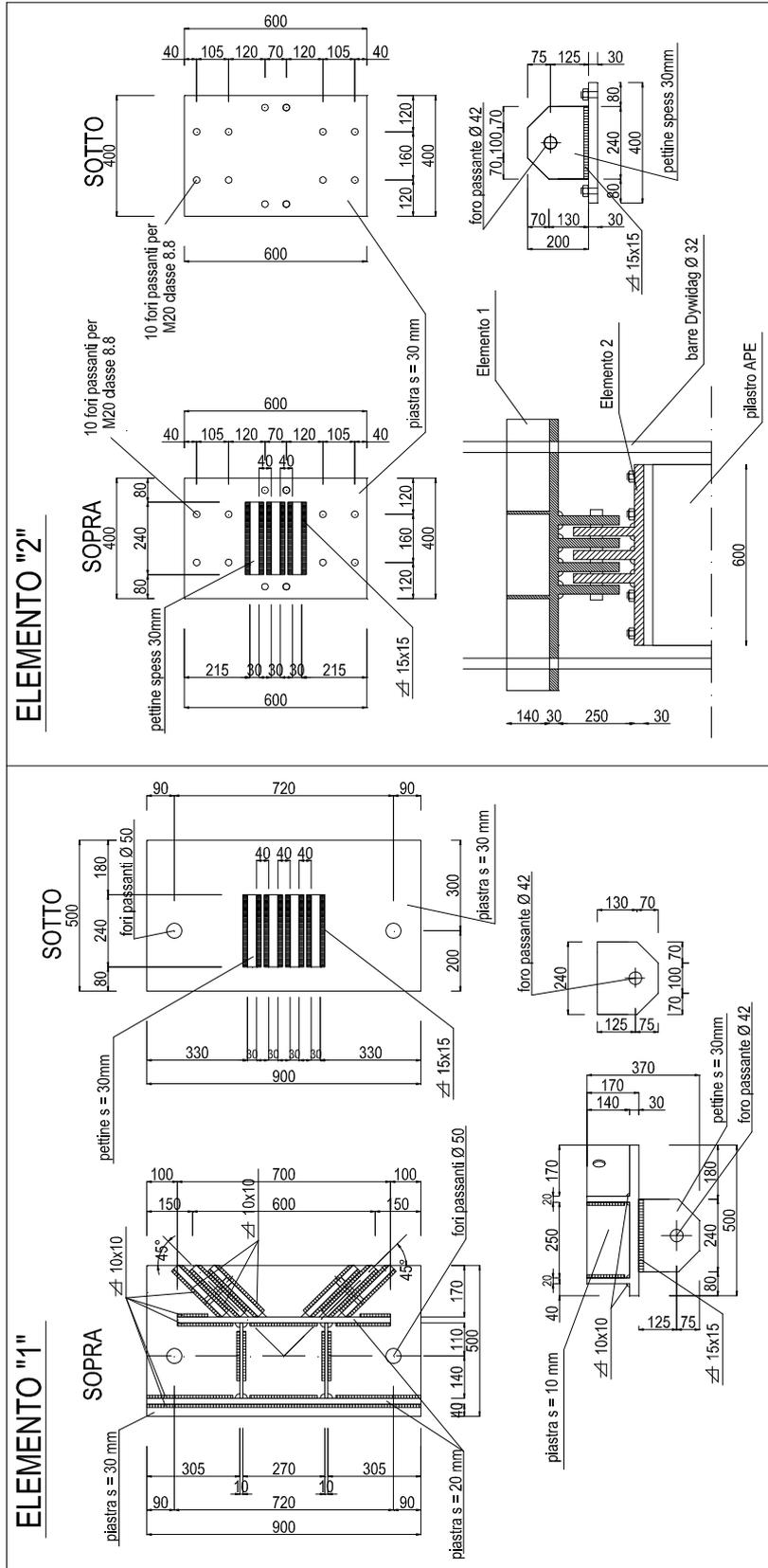


- **Figura 3.12** - Capitello superiore d'aggancio telaio-pilastro e particolare snodo a perno e pettini.

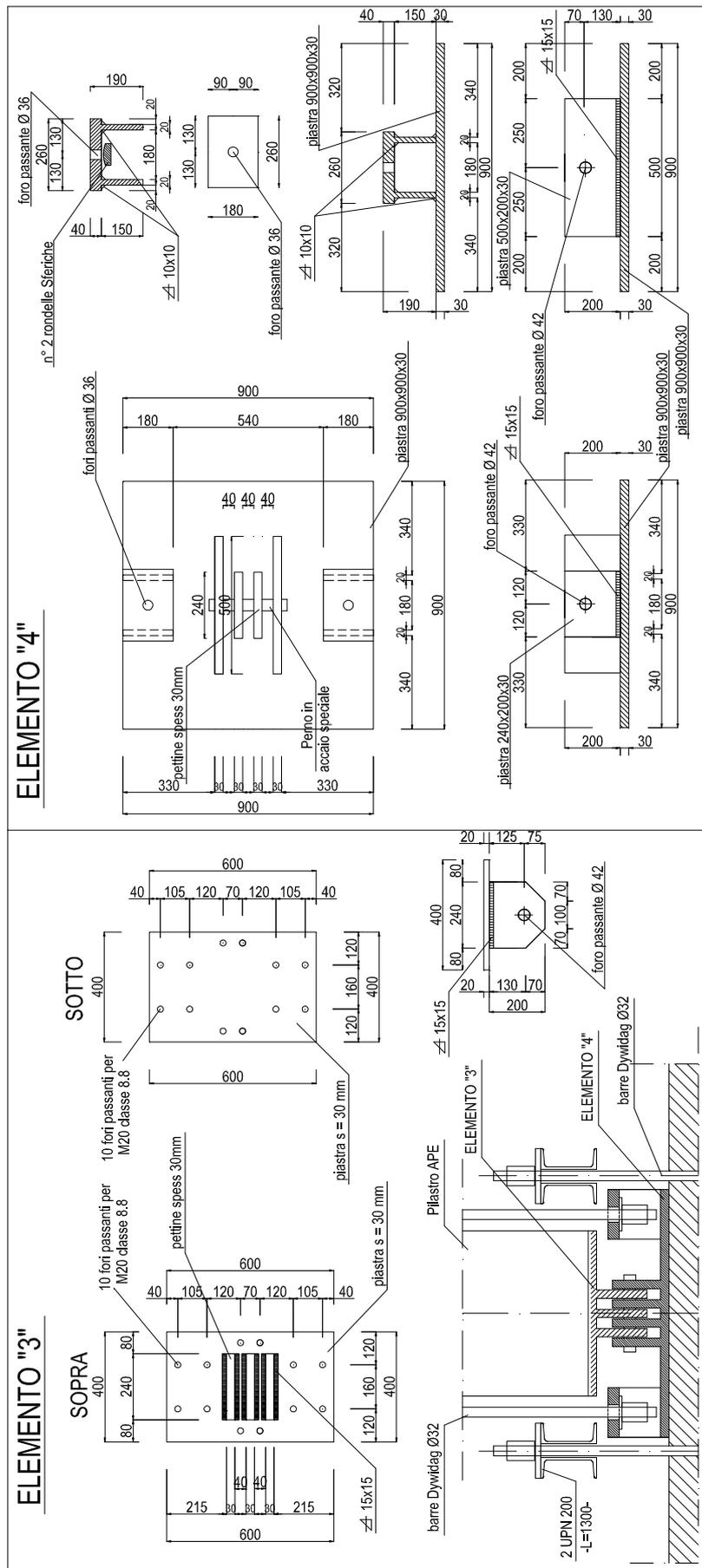


- **Figura 3.13** - Particolare del collegamento a snodo della piastra di vincolamento inferiore del pilastro.

La cerniera A è realizzata vincolando una piastra quadrata (lato = 90 cm e spessore = 3 cm) al solaio del laboratorio mediante un sistema di profilati irrigiditi (IPE 240 e UPN 200) serrati mediante barre dywidag ($\varnothing 32$ mm), e relativi bulloni, passanti nei fori predisposti nel solaio (fig. 3.17). A tale piastra sono saldati una serie di pettini ($s = 30$ cm) che consentono l'innesto, mediante perno, con i pettini saldati alla piastra imbullonata all'estremità inferiore del pilastro; si viene così a costituire un vincolo a cerniera cilindrica che consente l'applicazione della reazione vincolare del solaio senza trasmettere azioni flettenti.



- Figura 3.14 - Dettagli costruttivi piastre di collegamento superiori.



- Figura 3.15 - Dettagli costruttivi piastre di collegamento inferiori.

Alla piastra di base sono inoltre saldati due piastre forate, da 40 mm di spessore (vedi immagine di fig. 3.13 e particolari costruttivi di figg. 3.14 e 3.15), che fungono da aggancio per una coppia di barre dywidag ($\varnothing 32$ mm, $L = 5,5$ m); tali barre vengono agganciate alla piastra del capitello imperniato alla sommità del pilastro e quindi tese ciascuna di 25 KN, mediante interposizione di martinetti cavi tipo **Enerpac RCH-603** da 600 KN, per simulare la compressione che in opera il pilastro riceve dal peso delle strutture sovrastanti. Particolari esplicativi del posizionamento di tali martinetti cavi e del fissaggio delle barre dywidag sono forniti dall'immagine 3.16.



- **Figura 3.16** - Posizionamento dei martinetti cavi sul capitello e particolare del serraggio delle barre dywidag alla base.

Durante l'esecuzione della prima prova di caricamento ciclico del nodo strutturale a quattro vie tali trazioni hanno reso instabile il vincolamento alla base del pilastro a causa della deformazione della piastra di base; per ovviare a tale inconveniente si sono introdotti ulteriori profilati pieni (sezione 10x10 cm) sagomati (fig. 3.17) che hanno svolto il duplice compito di ridurre la deformabilità della piastra, grazie alla notevole rigidità flessionale, e scongiurare eventuali scorrimenti orizzontali fungendo da contrasto alle barre di ancoraggio al solaio.



- **Figura 3.17** - Ancoraggio del pilastro e particolare dell'irrigidimento mediante profilato pieno di sezione 10x10 cm sagomato.

L'appoggio cedevole B è realizzato collegando mediante perno i pettini della piastra, imbullonata alla sommità del pilastro, ai pettini del capitello di aggancio delle bielle dei timpani di contrasto (fig. 3.18).



- **Figura 3.18** - Snodo a pettini di sommità interposto tra il pilastro e le bielle di aggancio ai telai di controvento.

Il cedimento elastico del vincolo B rappresenta lo spostamento orizzontale che il telaio di contrasto subisce nel piano del nodo; teoricamente determinabile, al

variare dell'intensità della spinta di prova, come somma delle componenti di spostamento della sommità dei singoli timpani correlate ad un'azione orizzontale unitaria complanare al nodo. In realtà, dai dati di prova, risulta essere presente anche una componente di scorrimento dovuta alle tolleranze del sistema di collegamenti bullonati della struttura di contrasto (vedi fig. 9.3, par. 9.2.1.1).

3.3 Fasi di collegamento del nodo ai vincoli

La sequenza adottata per l'assemblaggio ed il collegamento del nodo al telaio di contrasto è stata dettata dai mezzi d'opera a disposizione (carroponte da 10 t, muletto e ponteggio mobile di altezza 5 m) e dall'ingombro degli elementi di carpenteria metallica di collegamento (piastra di base, capitello di sommità), preferendo collegare le piastre a pettine, di sommità e di base, al pilastro ancora coricato orizzontalmente.



- **Figura 3.19** - Fase di sollevamento del complesso colonna-piastre di snodo.

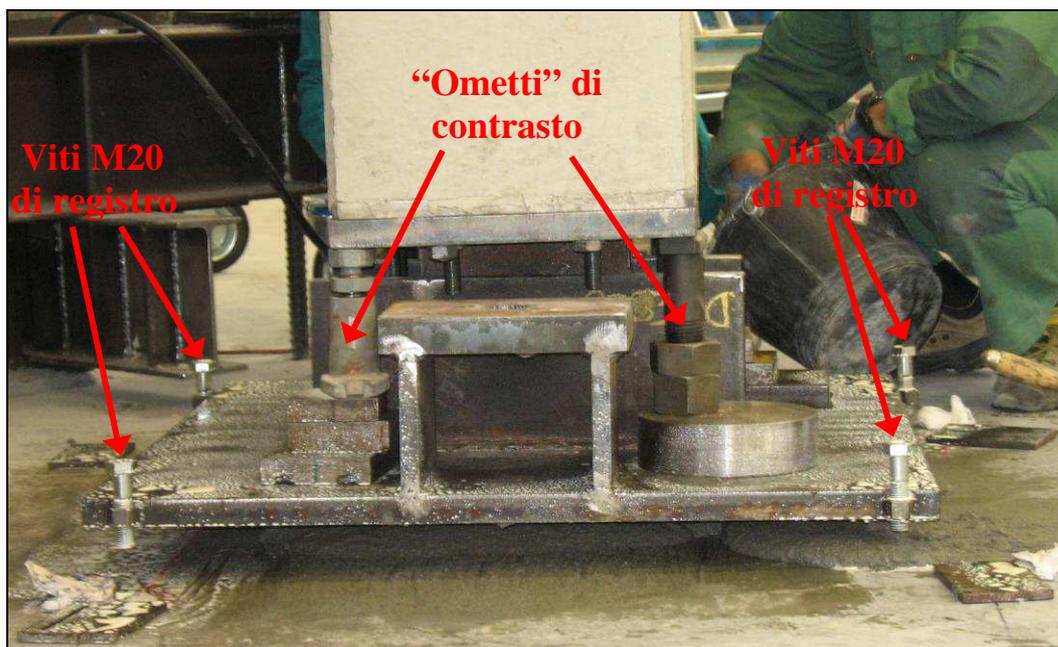
Si è quindi collegato il gancio del carroponete al capitello di sommità del pilastro mediante idonea catena (il tutto raggiunge un peso di circa 3.500 Kg), agganciata mediante un sistema di piastre e golfari alle asole predisposte all'alloggiamento delle barre dywidag di compressione (fig. 3.19) e si è provveduto al sollevamento in verticale del pilastro ed al suo collocamento in sede di prova.

A seguito dell'esecuzione di strati di malta antiritiro (Emaco di 2 cm di spessore) al di sotto dei 4 appoggi dei controventi si è provveduto (in data 6 novembre 2009) al getto di uno strato di 2 cm di Emaco anche al di sotto della piastra di base del pilastro; a tale scopo sono stati saldati alla piastra di base, in prossimità dei vertici, quattro dadi M20 che hanno consentito, mediante annesse viti di battuta, la preventiva messa in verticale del pilastro alla quota di fine getto (2 cm dal pavimento). Tale operazione ha inoltre richiesto di impedire temporaneamente la rotazione della cerniera alla base del pilastro mediante elementi di contrasto (ometti e piastre di battuta evidenziate in fig. 3.21).



- **Figura 3.20** - Fase di collegamento del capitello di sommità pilastro alle bielle del telaio di controvento.

Il pilastro, già collegato in sommità alle quattro bielle del telaio di contrasto (fig. 3.20), è stato dunque sollevato di una decina di centimetri, tramite carroponte, e si è distribuita la malta al di sotto della piastra; il consecutivo riabbassamento del pilastro nell'esatta posizione, tracciata preventivamente sul pavimento, ha determinato l'espulsione della malta in eccesso, immediatamente asportata. L'istantanea rimozione degli elementi di contrasto, a posizionamento avvenuto, ha assicurato l'appoggio esclusivo sulle viti di battuta, mantenuto per i tre giorni di maturazione successivi.



- **Figura 3.21** - Fase di applicazione dell'Emaco al di sotto della piastra di base.

Il giorno 9 novembre 2009 con la rimozione delle viti di battuta si è definitivamente trasferito il carico all'emaco, potendo quindi procedere all'assemblaggio dei profilati di ancoraggio della piastra di base (fig. 3.17).

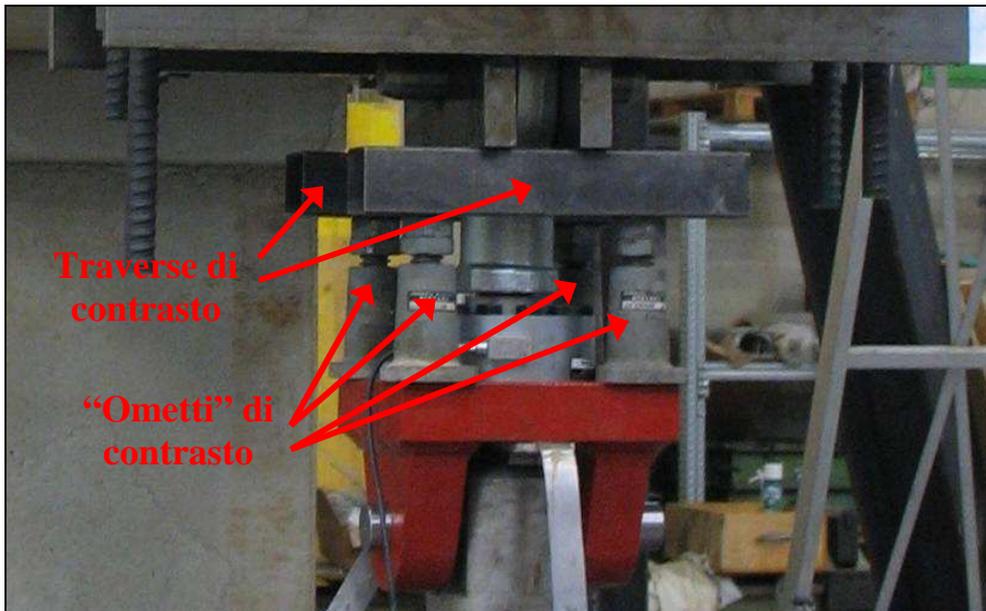
L'assemblaggio del nodo è proseguito collocando in sede il pistone di spinta da 600 KN, anch'esso ancorato ai fori del solaio per mezzo di un sistema di profilati (IPE 240 e UPN 200) serrati mediante barre dywidag ($\varnothing 32$ mm) passanti negli appositi fori (fig. 3.22); si è dunque agganciato alla sommità del pistone, mediante perno di acciaio apposito, la biella di spinta con annessa cella di carico da 500 KN, ed infine si è collegato la cerniera della cella alla piastra di appoggio della trave. Tale piastra fungerà da puntello, in fase di assemblaggio ed esecuzione del getto di

completamento, per la trave prefabbricata da collegare al nodo; l'ulteriore appoggio necessario è fornito dalla mensola predisposta nel pilastro prefabbricato.



- **Figura 3.22** - Particolare del sistema d'ancoraggio del pistone.

Per garantire l'efficacia dell'appoggio occorrerà predisporre, analogamente a quanto visto per lo snodo di base del pilastro, dei contrasti atti ad inibire temporaneamente le rotazioni della biella di spinta del pistone (fig. 3.23).



- **Figura 3.23** - Sistema di contrasto rotazionale della biella di spinta in fase di getto di completamento.

Capitolo 4

STRUMENTAZIONE

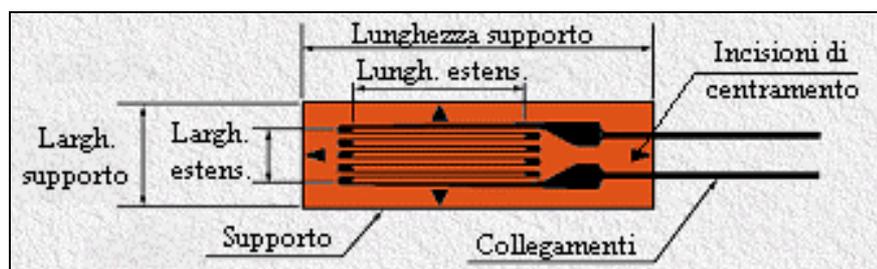
In questo capitolo vengono elencati e descritti tutti gli strumenti utilizzati nella sperimentazione in esame allo scopo di rilevare deformazioni, spostamenti e azioni esercitate, ed applicare i carichi di prova. Il primo paragrafo tratta gli estensimetri, deputati alla rilevazione delle deformazioni della armature del nodo, descrivendone le caratteristiche costitutive ed i possibili schemi applicativi. Nel paragrafo 4.2 vengono descritti i trasduttori induttivi di spostamento, rappresentandone lo schema di funzionamento e descrivendone le modalità di taratura. Il paragrafo 4.3 considera, invece, la cella di carico, disposta in asse col pistone per rilevarne l'entità della spinta applicata. Vengono quindi descritte, nel paragrafo 4.4, le componenti del meccanismo di spinta che vanno ad azionare il martinetto a vite, deputato all'applicazione del carico di prova; mentre nel paragrafo successivo si effettua una sommaria descrizione dei martinetti cavi, azionati da apposita centralina oleodinamica, che applicano la pre-sollecitazione di compressione al pilastro. Il paragrafo 4.6 si occupa, infine, della centralina portatile P3500, utilizzata per l'analisi dell'efficienza degli estensimetri applicati alla struttura oggetto di prova.

4.1 Gli Estensimetri

L'estensimetro, o *strain gauge*, è uno strumento atto a misurare la deformazione locale della superficie di un corpo al quale viene applicato. Sulla base del loro principio di funzionamento gli estensimetri possono classificarsi in varie categorie: a *resistenza elettrica*; *meccanici*; *acustici*; *pneumatici*; *ottici*.

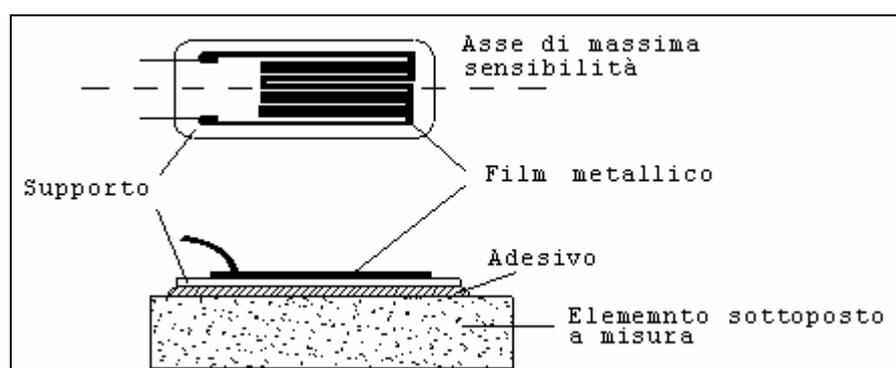
Tuttavia l'avvento degli estensimetri elettrici, quelli utilizzati nelle applicazioni di laboratorio, ha reso obsolete tutte le altre tipologie, inducendone persino alcune al disuso completo; essi si basano sull'*effetto piezoresistivo* del materiale conduttore utilizzato, ossia sulla variazione di resistenza che il materiale stesso subisce quando si deforma in seguito alla deformazione della superficie del corpo a cui è applicato. Gli estensimetri elettrici più comuni sono quelli metallici

costituiti da un filo di lega speciale, generalmente *manganina* (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni) o *costantina* (60% Cu, 40% Ni) di resistenza elettrica nota e di diametro molto piccolo (da 0,01 a 0,03 mm), disposto a serpentina su un supporto di carta o resina sintetica al quale aderisce. Le principali componenti di un estensimetro elettrico sono schematizzate nelle figure 4.1 e 4.2 mentre un esempio di applicazione effettuata durante la preparazione della prova è mostrata in figura 4.3.

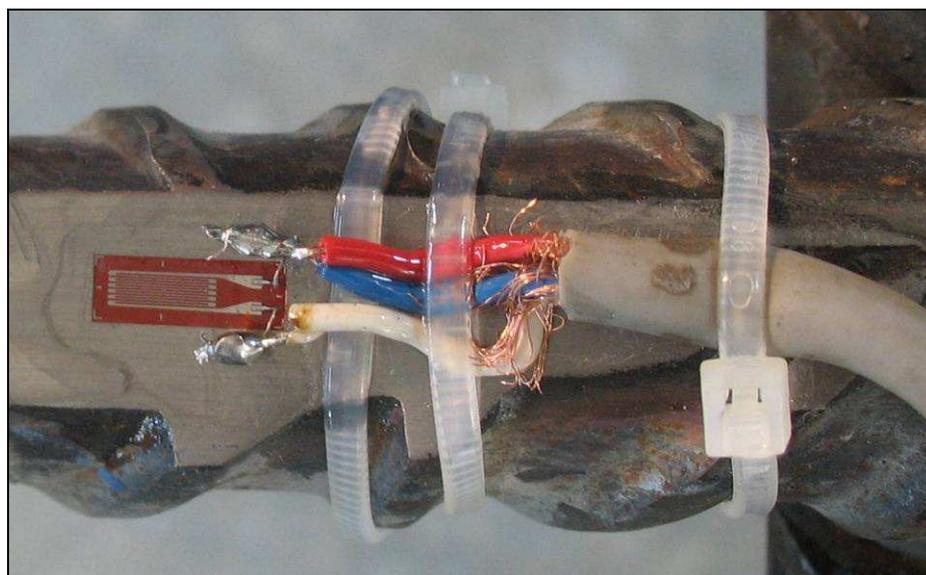


- Figura 4.1 - Componenti principali di un estensimetro.

La lunghezza del film metallico lungo la direzione principale (*gauge length*) è detta base dell'estensimetro: essa non va confusa con l'ingombro longitudinale dell'estensimetro (*backing length*) che è sempre maggiore della base a causa delle maggiori dimensioni del supporto e della presenza dei terminali di collegamento della resistenza (*gauge lead*).



- Figura 4.2 - Schema d'applicazione di un estensimetro.



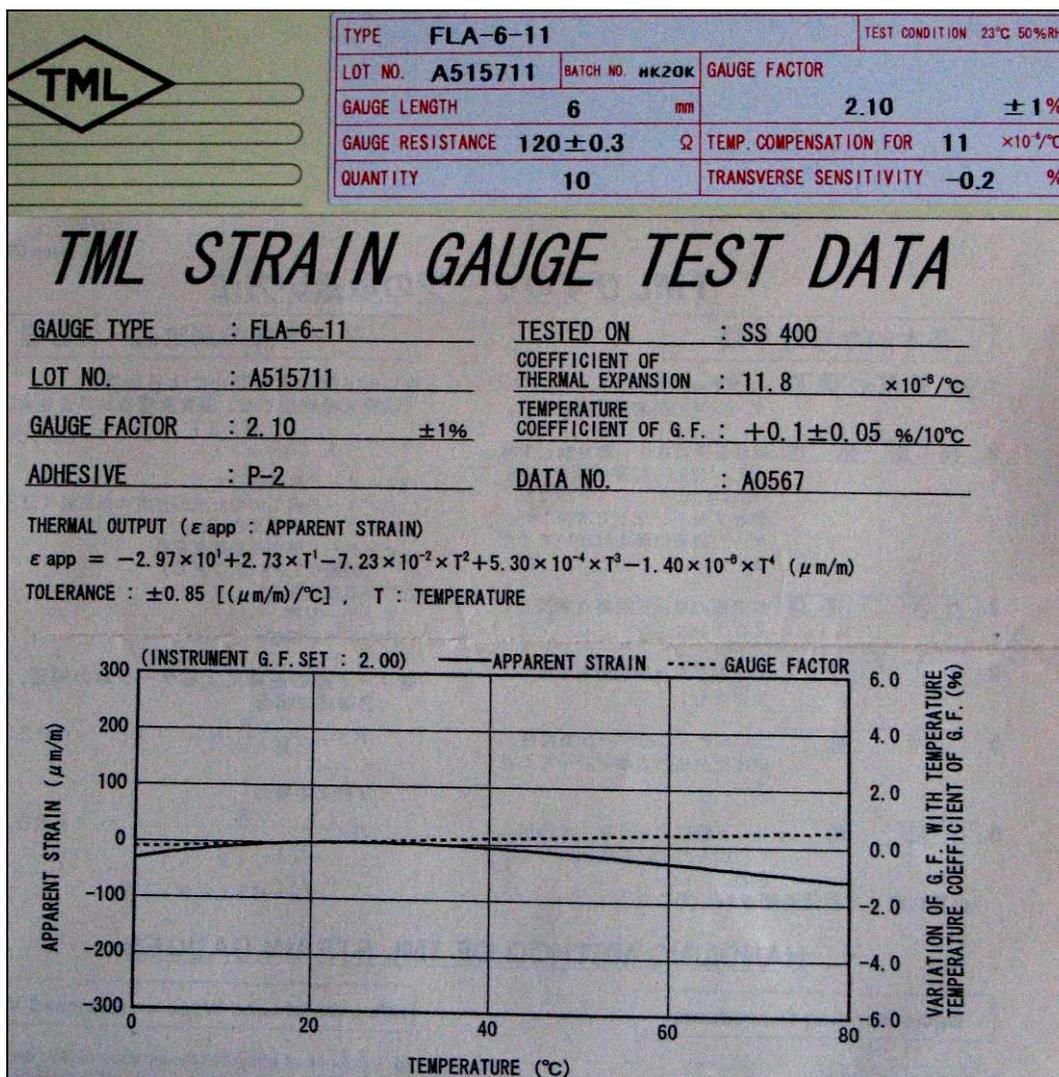
- **Figura 4.3** - Esempio di applicazione pratica su barra d'armatura preventivamente trattata.

Il supporto viene a sua volta incollato con un opportuno adesivo (**Z 70**, nel caso in esame) sulla porzione della superficie del corpo in cui si desidera misurare la deformazione. In pratica la misura che tali strumenti sono in grado di effettuare risulta essere il valore medio della deformazione $\varepsilon = \Delta l/l$ che la superficie del corpo subisce in tale zona. Qualora si preveda la concentrazione di sforzi in determinate zone risulta quindi opportuno impiegare estensimetri con una base piccola, rilevando in tal modo un valore il più prossimo possibile al reale valore della deformazione locale; tuttavia, minore risulta l'ampiezza della base, maggiore deve essere l'amplificazione necessaria per ottenere la medesima sensibilità dello strumento, col rischio di aumentare eccessivamente gli errori. In definitiva occorrerà di volta in volta scegliere l'ampiezza della base in modo da ottenere un compromesso accettabile fra le due esigenze.

Molto spesso la scelta di una maggiore o minore lunghezza della base è dettata dalle caratteristiche della superficie del corpo: nel caso del calcestruzzo, ad esempio, a causa della disomogeneità del materiale e delle frequenti irregolarità superficiali, si utilizzano estensimetri con lunghezze variabili da 5 a 15 cm; nel caso dell'acciaio e delle lamine di materiale composito, trattandosi di materiali molto omogenei, si ricorre invece a basi ben più ridotte variabili da 3 a 10 mm. Anche il tipo di adesivo utilizzato per l'incollaggio deve essere opportunamente scelto in funzione della superficie sulla quale si intende operare: per applicazioni estensimetriche su cls si utilizzano resine epossidiche (solitamente l'adesivo bi-

componente “X 60”); per le lamine di materiale composito si utilizza sempre un adesivo bi-componente, ma di altro tipo; per l'acciaio si ricorre invece ad adesivi mono-componente quali i cianoacrilati (solitamente lo “Z 70”).

I valori più comuni della resistenza vanno da 120 Ω a 1000 Ω : tale valore, fornito dal costruttore con una certa tolleranza, è riportato sulle bustine che fungono da involucro per gli estensimetri, assieme alla curva che esprime la variazione del *gauge factor* al variare della temperatura (fig. 4.4).



- Figura 4.4 - Rappresentazione delle caratteristiche presenti sulle confezioni degli estensimetri.

Se il corpo al quale l'estensimetro viene applicato si deforma, l'estensimetro subisce la stessa deformazione e si modifica il valore della resistenza elettrica del filo. Questa variazione avviene a causa di due fenomeni distinti: l'allungamento (o accorciamento) che il filo subisce, con conseguente diminuzione (o aumento) di

sezione; la variazione di resistività elettrica che si ha in un materiale conduttore al variare della sollecitazione.

Quanto fin qui affermato può essere facilmente compreso operando sull'espressione che esprime la resistenza elettrica del filo conduttore :

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

essendo : R_{filo} : resistenza; ρ : resistività elettrica;

L : lunghezza del filo; A : sezione del filo.

Andando nel dettaglio si ha che la variazione di resistenza può essere dedotta andando a differenziare la formula precedente e ottenendo dunque [3]:

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

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 ν : 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; sostituendo alle grandezze in esso contenute i valori caratteristici per le leghe metalliche solitamente in uso, se ne può fornire una valutazione approssimativa:

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

Tale espressione consente di individuare nel dettaglio i due fenomeni distinti, causa della variazione di resistenza, anticipati in precedenza: l'allungamento (o accorciamento) del filo conduttore, accompagnato da una diminuzione (o aumento)

di sezione indotta dall'“effetto Poisson” (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 [3]:

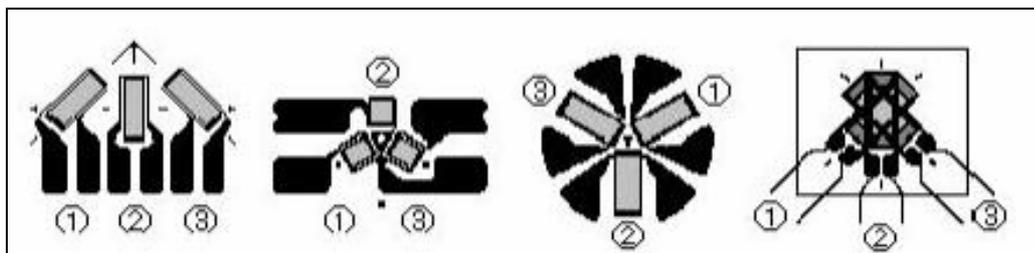
$$\epsilon_L = \frac{1}{K_G} \cdot \frac{\Delta R}{R},$$

espressione della deformazione lungo l'asse di massima sensibilità dello strumento.

Data la disposizione del filo conduttore, caratterizzata da tratti lunghi e sottili raccordati da altri ad essi perpendicolari, molto più corti e larghi, l'estensimetro non ha uguale sensibilità alle dilatazioni nelle due direzioni: esso risulta molto più sensibile alle dilatazioni lungo la direzione parallela ai tratti lunghi (*asse di massima sensibilità*) e poco alle dilatazioni in direzione perpendicolare a questa. Perciò esso andrà evidentemente montato in modo che la direzione di maggiore sensibilità coincida con quella della dilatazione da misurare (questo spiega la disposizione longitudinale all'asse della barra dell'applicazione in figura 4.3).

Il fatto che l'estensimetro sia sensibile anche alle dilatazioni che avvengono nella direzione parallela ai tratti più corti è evidentemente fonte di disturbo della misura cercata, poiché in definitiva diminuisce la sensibilità nella direzione principale; per tale ragione si preferisce realizzare tali tratti brevi di collegamento tra i tratti più lunghi con materiale di elevata conduttività elettrica (aventi cioè resistenza molto bassa) in modo tale che le variazioni di resistenza (anche percentuali) di questi tratti risultino trascurabili.

Quando si vuole misurare uno stato biassiale di sollecitazione e si conoscono le direzioni principali dello sforzo si usano le così dette “rosette” con due griglie estensimetriche disposte a 90° ; altrimenti, se non sono note a priori le direzioni principali, si devono usare rosette a tre griglie, rappresentate in fig. 4.5 nelle più comuni disposizioni:



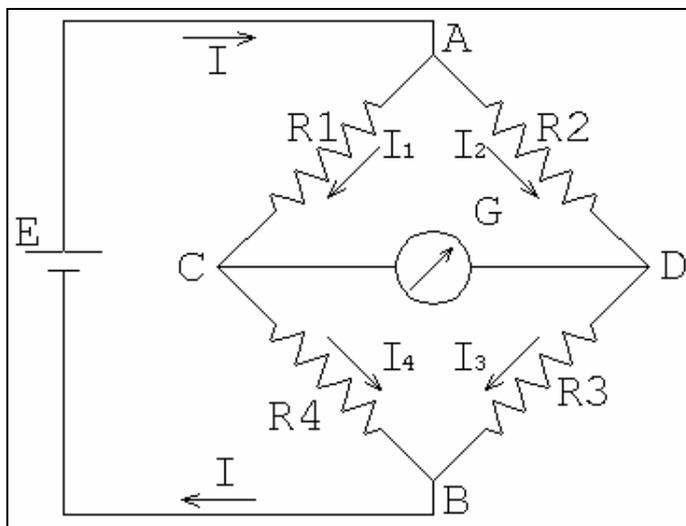
- Figura 4.5 - Rosette estensimetriche.

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 sarà dunque soggetto ad un certo stato deformativo che interesserà di conseguenza anche l'estensimetro; ciò determina una variazione di tensione d'uscita che viene percepita dall'apparecchiatura inserita nel circuito e che, grazie ad una precedente taratura, permette di risalire dalla variazione della grandezza elettrica alla deformazione che ne è stata la causa.

Uno dei problemi principali relativi all'utilizzo di strain gauges è quello di minimizzare gli effetti delle variazioni di resistenza indotte dalla temperatura (vedi curva fig. 4.4). Si ricorre pertanto a leghe a basso TCR (=coefficiente di temperatura della resistenza), quali ad esempio rame/nichel, e viene scelto un substrato avente stesso coefficiente di dilatazione termica della lega utilizzata onde evitare che, a seguito di variazioni di temperatura, venga indotto dello stress meccanico nel film metallico. I dispositivi che si trovano comunemente in commercio hanno una sensibilità alla temperatura inferiore ai $5 \mu\epsilon/C^\circ$, con un GF compreso tra 1,8 e 2,3 (gli strain gauges utilizzati nelle prove hanno un GF variabile da 2,00 a 2,13).

Una parziale compensazione degli effetti della temperatura su R e GF può essere ottenuta utilizzando 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 a variazioni 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 di uscita.

Per tale motivo e per amplificare il segnale di output di un singolo estensimetro, altrimenti estremamente piccolo, nelle rilevazioni eseguite durante le prove effettuate si sono utilizzati questi particolari tipi di reti elettriche, dette appunto ponti di Wheatstone, la cui schematizzazione è rappresentata in fig. 4.6.



- **Figura 4.6** - Schema del Ponte di Wheatstone.

Si può notare la struttura a maglia quadrata, costituita dalla connessione di quattro resistenze, a cui si aggiunge il ramo interno C-D contenente un galvanometro (G in figura) sensibile al passaggio di corrente sul ramo stesso ed alla differenza di potenziale tra i nodi C e D; il circuito così strutturato è alimentato da un generatore di tensione continua (E in figura). Generalmente in uno o più rami della rete vengono inseriti gli estensimetri aventi resistenze note (120Ω nel caso della prova oggetto di tesi), ma prima di poter utilizzare gli strain gauge occorre ricondurre il sistema alla **condizione di 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 successiva deformazione degli estensimetri comporti una variazione della configurazione d’equilibrio di partenza.

Applicando dunque i principi di Kirchoff al ponte, una volta verificata la condizione d’equilibrio di partenza, si ha:

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

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

$$\text{equazione alla maglia ACD:}$$

$$R_1 \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 = 0 \rightarrow I_1 = \frac{R_2}{R_1} \cdot I_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot I_3 ;$$

equazione alla maglia BCD:

$$R_4 \cdot I_4 - R_3 \cdot I_3 = 0 \rightarrow I_3 = \frac{R_4}{R_3} \cdot I_4 = \frac{R_4}{R_3} \cdot I_1 = \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot I_3 ,$$

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

Tale relazione va a definire la condizione di equilibrio come l'uguaglianza del prodotto delle resistenze in croce; ci consente quindi di definire, in condizioni di ponte equilibrato, il valore di una resistenza incognita una volta noto il valore delle altre tre inserite nel circuito.

La calibrazione del ponte viene effettuata variando la resistenza di uno dei suoi lati e rilevando l'indicazione del galvanometro G; si procede fino a raggiungere l'equilibrio, indicato da un segnalatore di zero, *null detector*, posto nel circuito. Nelle applicazioni 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:

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

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

ovvero, $\frac{V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4) \cdot (R_2 + R_3)}$, relazione che permette di conoscere

la tensione d'uscita V_{CD} in funzione della tensione di alimentazione V_{AB} .

Supponiamo quindi che, partendo dalla condizione di equilibrio, si verifichi un incremento della resistenza R_1 al valore $R_1' = R_1 + \Delta R_1$:

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

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:

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

ponendo: $\frac{R_3}{R_2 + R_3} = \alpha$ e $R_1 + R_4 = R_m$,

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

Visto che ΔR_1 è molto piccolo rispetto R_m 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

$R_m = 2R_1$, quindi:

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

Ripetendo l'intero ragionamento per una variazione ΔR_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** [3]:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right).$$

Supponendo che tutti gli estensimetri collegati al ponte abbiano stesso GF e

ricordando che $\epsilon_L = \frac{1}{K_G} \cdot \frac{\Delta R}{R}$, la relazione può essere riscritta come segue:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{K_G}{4} \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)$$

Da questa relazione si comprende come le deformazioni subite dagli estensimetri inducano una variazione della tensione di uscita (ΔV_{CD}) dal circuito che, misurata attraverso il galvanometro, permette di ricavare il valore delle deformazioni una volta noti i valori della tensione d'alimentazione V_{AB} e del *gauge factor* (K_G). 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

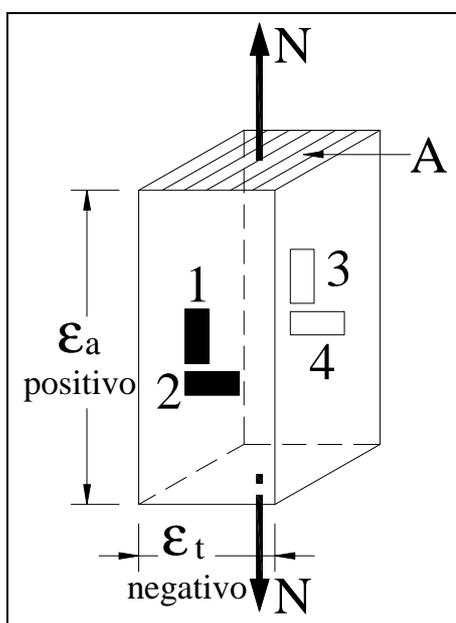
della tensione d'uscita dalla variazione di resistenza dovuta ad una variazione di temperatura.

Altra peculiarità dell'utilizzo di questo schema di connessione è quella di consentire, con la medesima struttura di rete, molteplici modalità di collegamento degli estensimetri, illustrabili mediante il seguente esempio semplificato.

Esempio applicativo

Si considera un provino, soggetto ad una sollecitazione assiale N , al quale sono collegati vari estensimetri (1, 2, 3 e 4 di fig. 4.7).

Si ha che: $\varepsilon_a = \sigma/A$; $\varepsilon_t = -\nu \cdot \varepsilon_a$.



- Figura 4.7 - Provino con estensimetri.

- Collegamento a ponte intero (4 estensimetri nei quattro lati del ponte):

Visto che $\varepsilon_2 = \varepsilon_t = -\nu \cdot \varepsilon_a = -\nu \cdot \varepsilon_1$ si ha:

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

Ponendo $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon_a = \varepsilon$ si ha:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{K_G}{4} \cdot 2\varepsilon \cdot (1 + \nu) = 2,6 \cdot \frac{K_G}{4} \cdot \varepsilon.$$

- Collegamento a quarto di ponte (un estensimetro inserito nel ponte):

Considerando l'estensimetro 1 si ha:

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

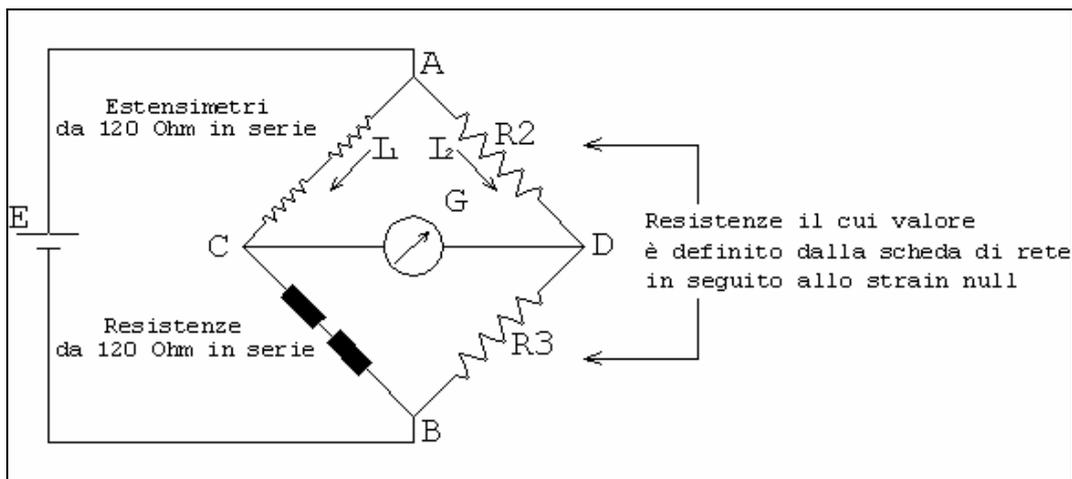
Tale tipo di collegamento è quello utilizzato per tutti gli estensimetri applicati durante la prova; esso consiste nel mettere un estensimetro (di resistenza 120Ω) in un ramo del ponte e nel “chiudere” quest’ultimo collegando il tutto al sistema d’acquisizione.

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

Considerando gli estensimetri 1 e 3 si ha:

$$\frac{\Delta V_{CD}}{V_{AB}} = \frac{K_G}{4} \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_3).$$

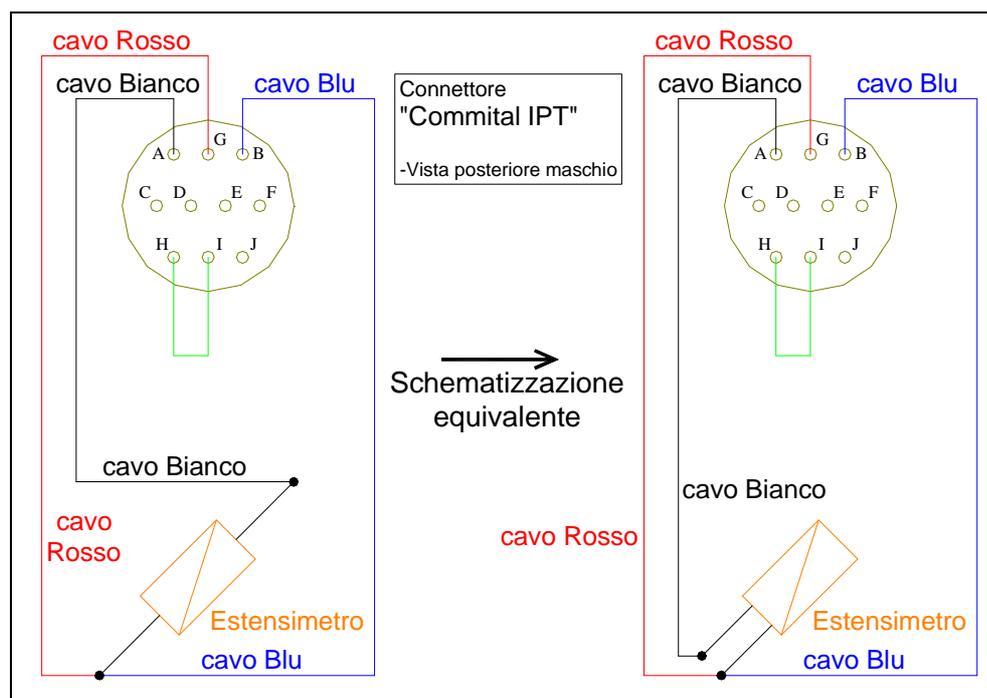
Tale collegamento viene di norma utilizzato nelle prove di creep su cilindri di cls al fine di compensare l’effetto deformativo dovuto ad eventuali deformazioni flettenti. I due estensimetri, ciascuno caratterizzato da 120Ω di resistenza, vengono posti in posizioni diametralmente opposte del cilindro e sono inseriti in serie nello stesso ramo del ponte, mentre nel ramo successivo vengono inserite due resistenze da 120Ω ; si collega quindi il tutto al sistema di acquisizione, la cui scheda di rete effettuerà la “chiusura” del ponte utilizzando le resistenze, fornite da un apposito programma, tali da garantire la configurazione di equilibrio come configurazione di partenza. Lo schema della configurazione di ponte descritta è riportato in fig. 4.8.



- **Figura 4.8** - Schema di collegamento “half bridge”.

Collegamento degli estensimetri utilizzato nella prova in esame

Tutti gli estensimetri (con resistenza di 120Ω) utilizzati nella prova oggetto di tesi sono stati collegati alla centralina di acquisizione mediante schema a quarto di ponte. Con l'ausilio dell'immagine di figura 4.3 e dello schema riportato in fig. 4.9 risulta possibile individuare in pratica i cavi di collegamento e la loro connessione al sistema di acquisizione mediante connettori *Committal IPT*.



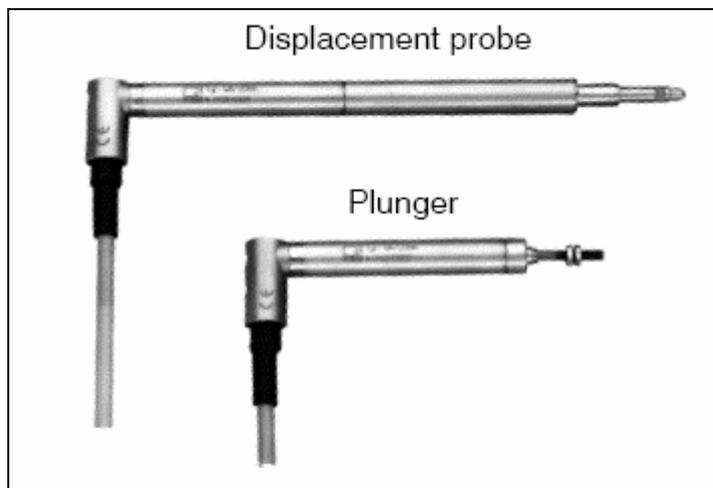
- Figura 4.9 - Schema connettore di collegamento.

Mentre i cavi bianco e blu costituiscono il circuito d'alimentazione dell'estensimetro, rispettivamente in ingresso ed in uscita, il cavo rosso ne consente il collegamento al galvanometro; alimentazione e galvanometro sono integrati nel sistema d'acquisizione (centralina pluricanale "Vishay serie 2100").

4.2 Gli LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

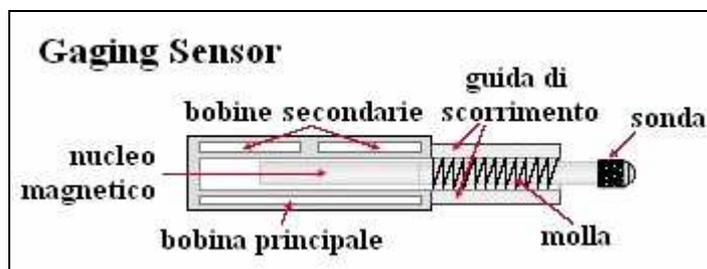
L'LVDT è un dispositivo in grado di misurare lo spostamento relativo di un punto prestabilito rispetto al punto di fissaggio della base strumentale (es. fig. 4.10). Il fenomeno fisico che sfrutta è l'induzione elettromagnetica, trattandosi di fatto di

un trasformatore a nucleo mobile; in quanto tale risulta essere in grado di elaborare solamente grandezze elettriche alternate.



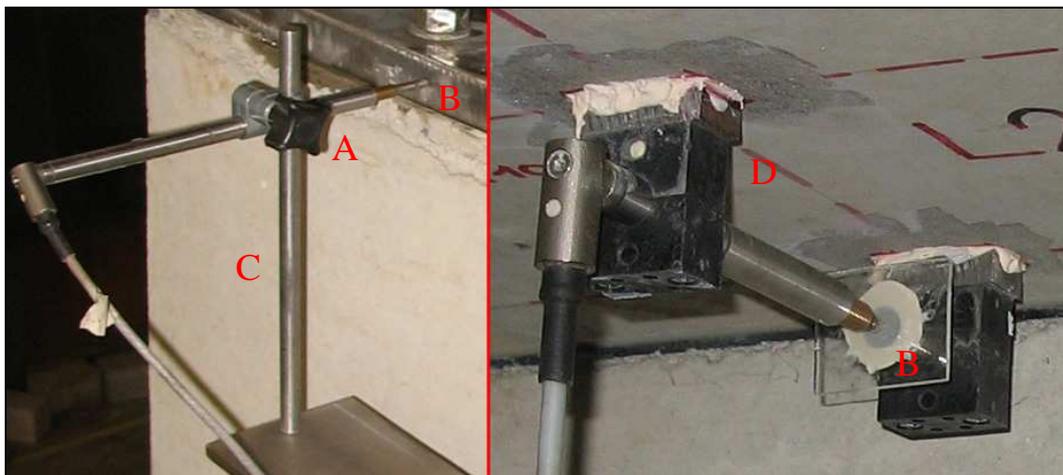
- Figura 4.10 - LVDT, esempi di tipologie.

Le componenti principali che costituiscono un LVDT sono riportate nella sezione longitudinale di fig. 4.11, mentre l'immagine di fig. 4.12 ne mostra un esempio applicativo.



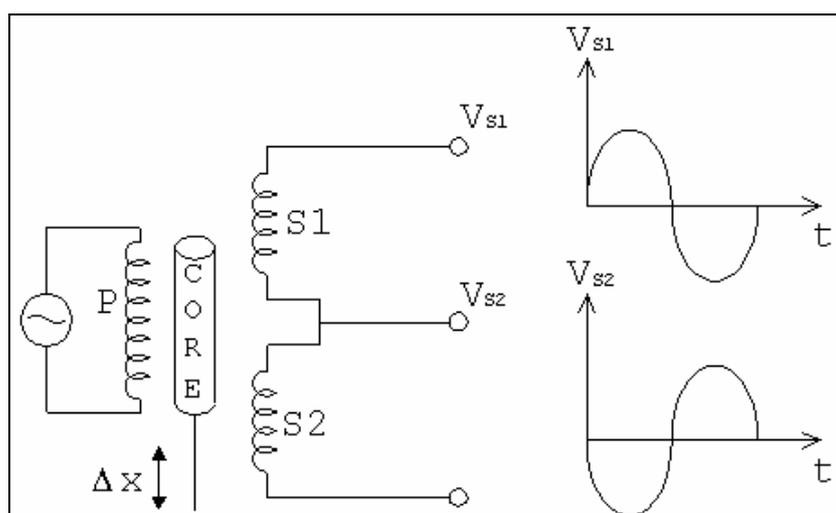
- Figura 4.11 - Sezione longitudinale di un LVDT.

Inserito lo strumento in appositi morsetti orientabili (A), collegati a loro volta ad aste di supporto (C) fissate a terra, oppure a supporti (D) incollati alle strutture, si dispone la sonda (probe) a contatto con una battuta (B) incollata alla superficie da monitorare (fig. 4.12). Nel momento in cui l'applicazione del carico di prova induce lo spostamento della superficie, e quindi della battuta B, l'azione della molla interna di richiamo (spring) fa sì che la sonda ne resti costantemente a contatto, rilevandone ogni spostamento; tale spostamento viene dunque trasformato dall'LVDT in una variazione di potenziale elettrico rilevabile dal sistema d'acquisizione.



- Figura 4.12 - Applicazioni pratiche degli LVDT.

La conversione della traslazione della sonda in variazione di potenziale elettrico è resa possibile dal circuito elettromagnetico presente all'interno del corpo dello strumento, schematizzato in fig. 4.13 nelle sue componenti principali.



- Figura 4.13 - Circuito elettromagnetico di un LVDT: schema di funzionamento.

Il circuito è costituito da un solenoide principale P (primary coil), i cui collegamenti sono chiusi sull'alimentazione in ingresso, e da due solenoidi secondari (secondary coils), S_1 ed S_2 , avvolti in contro-fase l'uno rispetto all'altro; l'asse di tali solenoidi, rappresentati in fig. 4.13 come affiancati per maggiore chiarezza, in realtà coincide con l'asse del nucleo ferromagnetico (core).

Il solenoide P, alimentato da corrente alternata modulabile in tensione dalla centralina d'acquisizione, genera dunque un campo d'induzione magnetica; tale campo, concatenato ai due solenoidi secondari, è variabile nel tempo e perciò induce

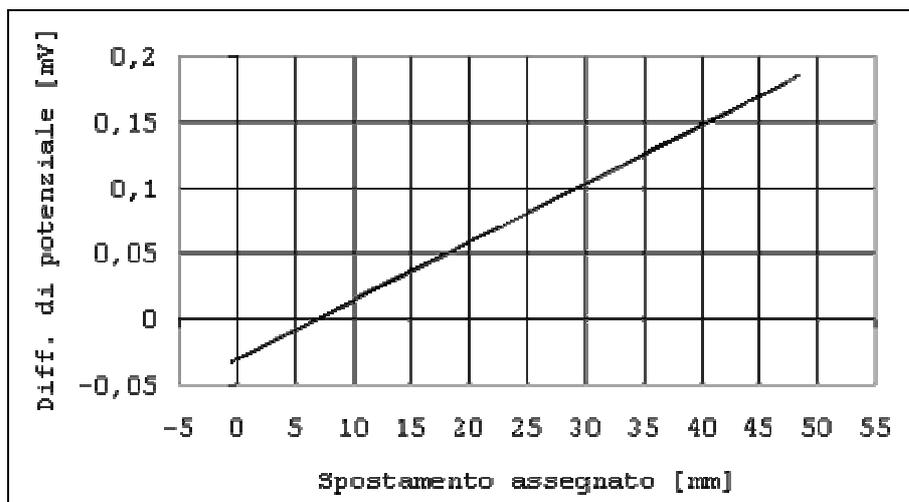
in essi correnti alternate. Il campo magnetico generato determina anche la magnetizzazione del nucleo ferromagnetico, dunque qualora esso occupi una posizione tale da conferire “simmetria” al trasformatore si viene a generare un flusso concatenato da S_1 identico a quello concatenato da S_2 ; dato l’avvolgimento in verso opposto delle bobine secondarie, opposte risulteranno anche le tensioni $V_{S1} = -V_{S2}$, ottenendo quindi una tensione agli estremi del circuito secondario, che rappresenta l’output del trasduttore, di valore nullo. Se, al contrario, il nucleo si muove dalla posizione di zero il voltaggio indotto sul solenoide del circuito secondario al quale si è avvicinato aumenta a discapito dell’altro che diminuisce, generando così un output diverso da zero e linearmente proporzionale allo spostamento del nucleo (Δx).

L’avvicinamento (o l’allontanamento) del nucleo determina l’eccitazione di un numero maggiore (o minore) di spire, appartenenti ai solenoidi, e quindi un aumento (o diminuzione) proporzionale del campo magnetico concatenato. Per correlare la differenza di potenziale in uscita (misurata in mV) con lo spostamento registrato dallo strumento occorre conoscere la costante di proporzionalità tra le due grandezze. Si procede pertanto alla taratura degli strumenti assegnando ciclicamente spostamenti noti agli LVDT (tramite lo strumento rappresentato in fig. 4.14) e rilevando le differenze di potenziale in uscita; successivamente i dati vengono interpolati ricavando la pendenza e l’intercetta della retta rappresentativa della proporzionalità tra le due grandezze in esame.

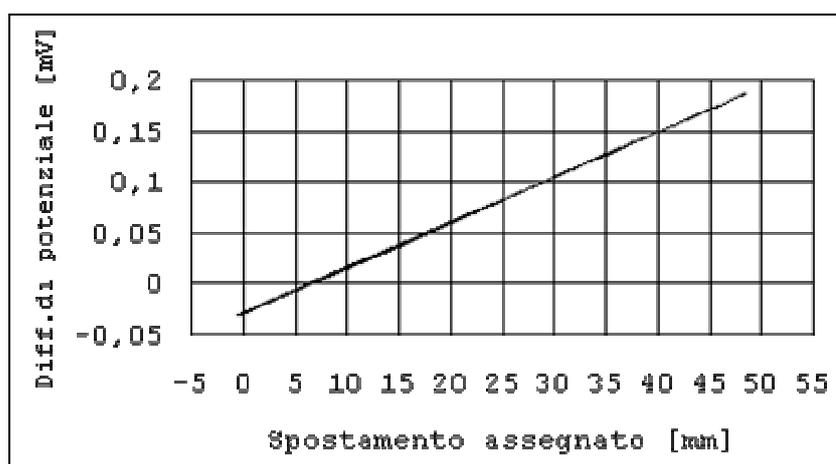


- Figura 4.14 - Taratore per LVDT.

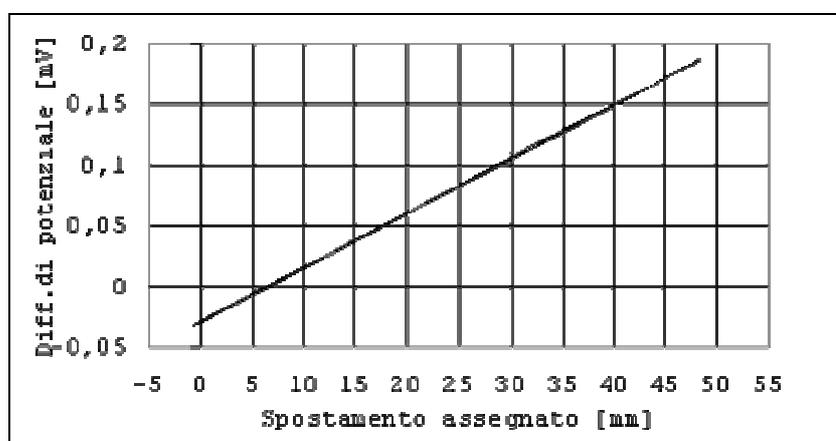
Si riportano di seguito, a titolo esplicativo, i grafici relativi alla taratura degli LVDT presenti in laboratorio.



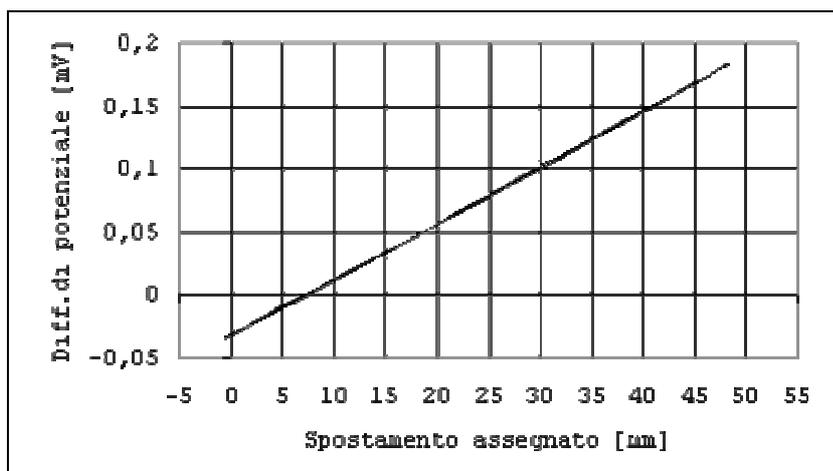
- Figura 4.15 - Taratura LVDT 1 WA50.



- Figura 4.16 - Taratura LVDT 2 WA50.



- Figura 4.17 - Taratura LVDT 3 WA50.



- Figura 4.18 - Taratura LVDT 4 WA50.

Risulta evidente la quasi perfetta linearità tra gli spostamenti assegnati e le differenze di potenziale in uscita al circuito secondario. Risulta in particolar modo interessante riassumere le costanti di proporzionalità K , indispensabile dato di input per i sistemi di acquisizione utilizzati in prova.

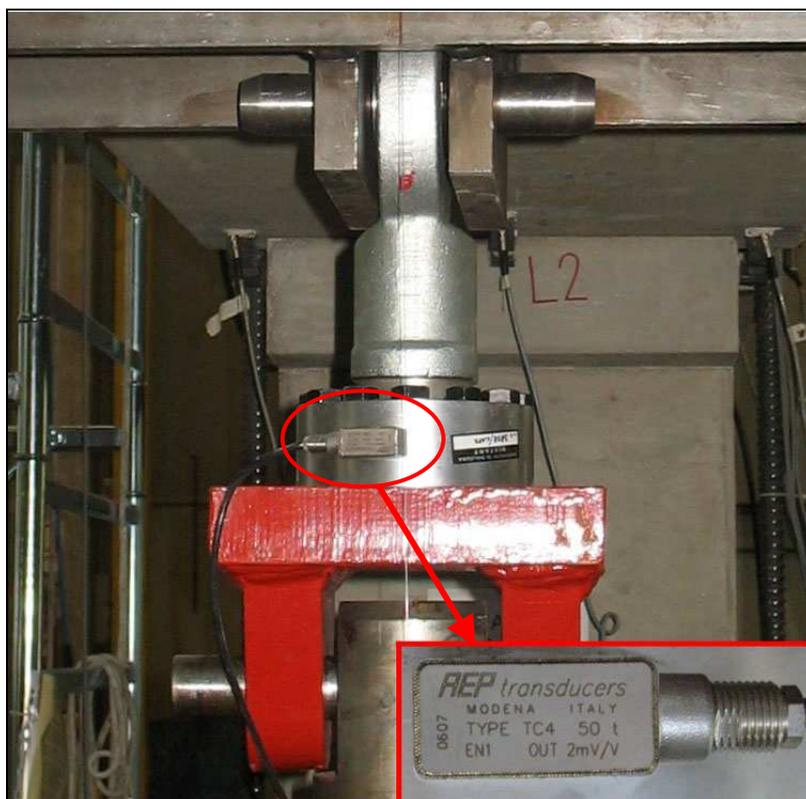
LVDT 1 (corsa da 50 mm)	$K = 224,697$
LVDT 2 (corsa da 50 mm)	$K = 223,954$
LVDT 3 (corsa da 50 mm)	$K = 224,26$
LVDT 4 (corsa da 50 mm)	$K = 225,11$

4.3 Cella di carico

La cella di carico, o dinamometro, è uno strumento in grado di misurare lo sforzo di compressione o di trazione che grava su un generico corpo. Nel caso particolare della prova in esame si utilizza una cella di portata massima di 500 KN prodotta dalla **REP Trasducers**, modello **TC4**, montata coassialmente alla biella del sistema di spinta/trazione agente all'estremità della trave (fig. 4.20). Dall'immagine di fig. 4.19, che raffigura un modello analogo a quello in uso, si può notare: la serie di fori ($\varnothing 17$ nel modello utilizzato) posti sulla corona esterna che ne consentono il serraggio, mediante bulloni, alla base filettata inferiore d'aggancio della biella alla testa del pistone; il foro filettato centrale (M42 a 3 mm di passo nel modello utilizzato) al quale si avvita l'occhiello superiore d'aggancio della biella alla piastra ammorsata alla trave (fig. 4.20). Tale posizionamento della cella consente di monitorare in tempo reale l'effettivo carico assiale applicato dal pistone e, quindi, di regolarne in conseguenza l'intensità; risulta possibile in tal modo condurre sia cicli di carico in *controllo di spostamento*, con il semplice rilevamento ed inversione della spinta in prossimità degli spostamenti prefissati, sia cicli in *controllo di forza*, modulando ed invertendo la spinta in prossimità dei valori prefissati.



- Figura 4.19 - Cella di carico.



- Figura 4.20 - Disposizione cella di carico.

La cella di carico ricade nel gruppo di strumenti a comportamento resistivo poiché presenta al suo interno degli estensimetri collegati in modo tale da formare un ponte di wheatstone intero.

In figura 4,21 si è schematizzata la base circolare della cella con annessi i 4 estensimetri, due dei quali (E1 e E2) hanno l'asse di massima sensibilità parallelo alla direzione del carico (asse z) mentre gli altri due (E3 e E4), con asse perpendicolare al carico, rilevano le deformazioni trasversali. Il carico di compressione porta a delle deformazioni assiali e trasversali date da:

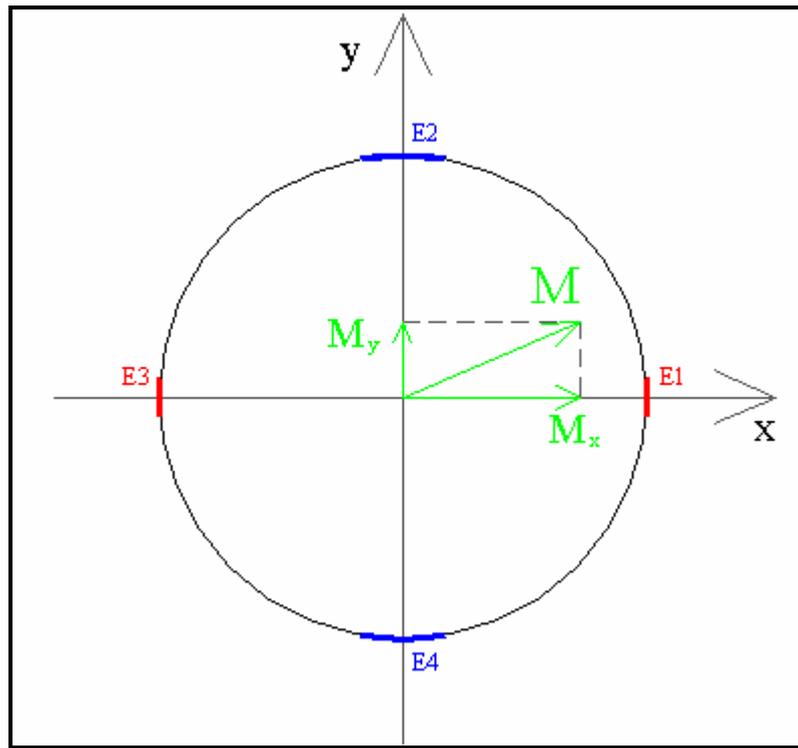
$$\varepsilon_a = \frac{F}{E \cdot A}, \quad \varepsilon_t = \frac{-\nu \cdot F}{E \cdot A},$$

essendo A la sezione della base della cella ed E il modulo elastico dell'acciaio di cui è composta.

Tenendo conto delle due equazioni fondamentali dell'estensimetria:

$$\varepsilon = \frac{1}{K_G} \cdot \frac{\Delta R}{R};$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right);$$



- Figura 4.21 - Disposizione degli estensimetri all'interno della cella di carico.

si ha che:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = K_G \cdot \varepsilon_a = \frac{K_G \cdot F}{A \cdot E};$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = K_G \cdot \varepsilon_t = \frac{-\nu \cdot K_G \cdot F}{A \cdot E};$$

perciò:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{K_G \cdot F}{2 \cdot A \cdot E} \cdot (1 + \nu).$$

Ponendo:

$$K_F = \frac{K_G}{2 \cdot A \cdot E} \cdot (1 + \nu) \cong \frac{1 + \nu}{A \cdot E},$$

si conclude che:

$$\frac{\Delta V}{V} = K_F \cdot F.$$

Si osserva dunque che la variazione di potenziale è proporzionale alla forza e perciò, una volta che la cella è stata tarata, è possibile stabilire una relazione diretta tra Volt e KN.

Il posizionamento degli estensimetri è tale da annullare l'effetto che sulla misura potrebbero avere eventuali fenomeni flettenti (dovuti ad eccentricità del carico assiale). Si ha infatti che le componenti M_X e M_Y del momento M applicato portano a variazioni di resistenza sugli estensimetri:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_3}{R_3} ; \quad \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = 0 , \text{ per effetto della componente } M_X;$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} ; \quad \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = 0 , \text{ per effetto della componente } M_Y.$$

Inserendo tali relazioni nell'equazione:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right),$$

si ottiene: $\frac{\Delta V}{V} = 0$.

La taratura della cella si rende necessaria per trovare il giusto fattore di conversione K_C che permette di trasformare i dati letti dal computer come micro-epsilon in carico applicato sulla cella, mediante la relazione :

$$\mu \varepsilon \cdot K_C = F [t].$$

Infatti poiché la cella di carico, come già detto, funziona come un ponte di Wheatstone intero ed i segnali elettrici trasmessi da essa possono essere letti esattamente come segnali estensimetrici, si rende necessario trovare il fattore di conversione tra le deformazioni in $\mu \varepsilon$ ed il carico che agisce su di essa.

La taratura si effettua sottoponendo la cella a dei carichi noti, per ognuno di questi si legge il segnale d'uscita ed interpolando i dati si trova il coefficiente cercato.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti durante la taratura della cella di carico utilizzata per le prove di creep su provini cilindrici di cls. Si è inserita la cella di carico in una pressa da 60 t (fig. 4.22) con lettura di carico mediante trasduttore di pressione; sono stati effettuati 6 cicli di carico e scarico associando a determinati valori di carico il corrispondente valore di micro-epsilon registrato dalla cella; in questo modo, eseguendo una regressione lineare dei risultati, si è potuti pervenire al fattore di conversione.

1° ciclo		2° ciclo		3° ciclo	
ton	$\mu \varepsilon$	ton	$\mu \varepsilon$	ton	$\mu \varepsilon$
0	3	0	3	0	4
3	-221	3	-222	3	-222
6	-446	6	-447	6	-446
9	-671	9	-671	9	-672
12	-896	12	-896	12	-896
15	-1121	15	-1121	15	-1120
18	-1345	18	-1345	18	-1342
21	-1569	21	-1568	21	-1566
24	-1791	24	-1791	24	-1789
27	-2015	27	-2014	27	-2013
30	-2239	30	-2237	30	-2236
0	3	0	3	0	3
4° ciclo		5° ciclo		6° ciclo	
ton	$\mu \varepsilon$	ton	$\mu \varepsilon$	ton	$\mu \varepsilon$
0	4	0	3	0	4
10	-746	10	-746	10	-745
20	-1495	20	-1495	20	-1494
30	-2243	30	-2243	30	-2242
35	-2614	35	-2614	35	-2613
40	-2986	40	-2985	40	-2984
45	-3356	45	-3356	45	-3355
50	-3727	50	-3727	50	-3726
0	4	0	3	0	3

In particolare sono stati ricavati tre diversi fattori di conversione a seconda dei diversi intervalli considerati per la regressione:

Da 0 a 30 tonnellate	$K_C = - 0,03417$
Da 0 a 30 tonnellate	$K_C = - 0,03417$
Da 0 a 30 tonnellate	$K_C = - 0,03417$



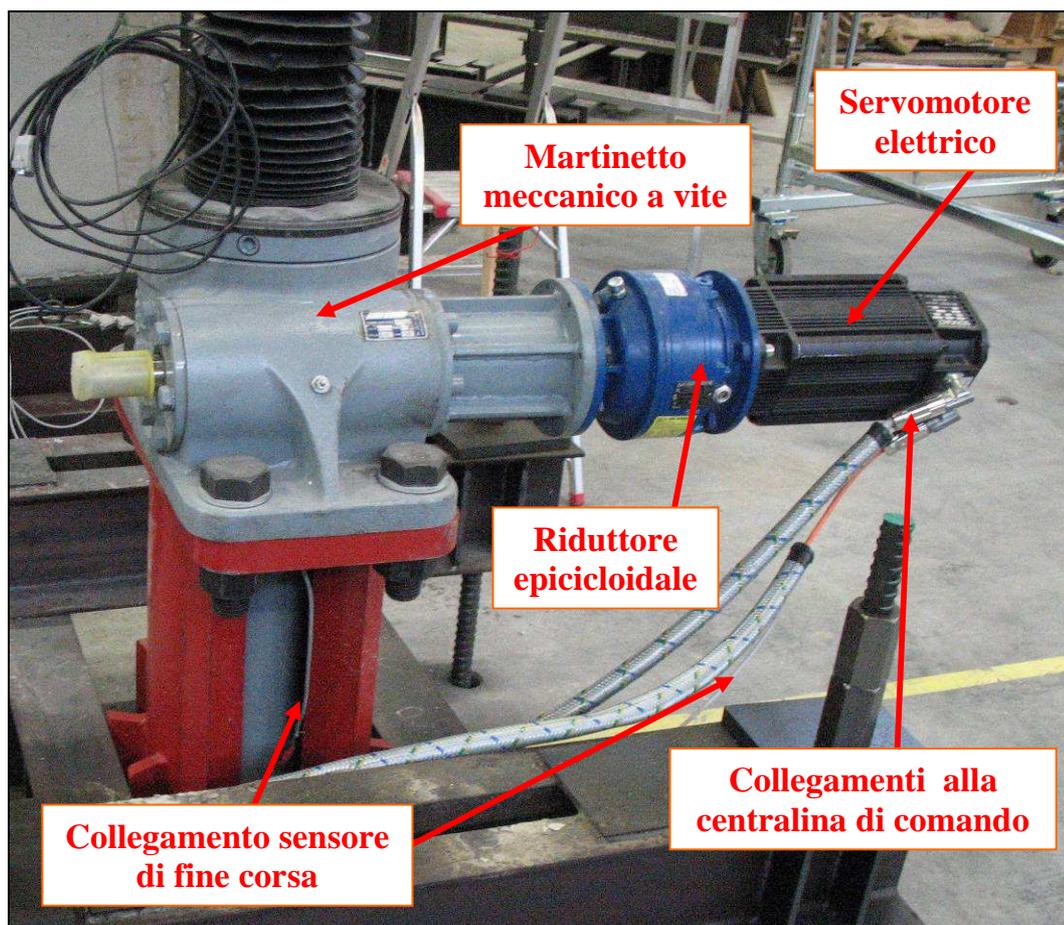
- Figura 4.22 - Pressa per la taratura della Cella di contrasto.

4.4 Pistone di spinta

Il pistone che esercita il carico di prova (sia in trazione che in compressione) è un martinetto meccanico a vite senza fine prodotto dalla **SETEC s.p.a.**, della serie europea pesante modello **S.E.P. 500**, da 500 KN di spinta massima e da 500 mm di corsa [4]. La coppia motrice è fornita tramite un servomotore rotativo elettrico brushless prodotto dalla **SERVO SYSTEM**, modello **SERVOACT**, di 4,08 KW di

potenza ed in grado di fornire una coppia massima di 78 Nm [5]; il motore non si innesta direttamente sulla vite di comando del martinetto, ma si interpone un riduttore epicicloidale con rapporto di trasmissione $i = 24,8$, prodotto dalla **ROSSI MOTORIDUTTORI**, in grado di trasmettere una potenza di 6 KW a 1400 giri/min..

In figura 4.23 è rappresentato il meccanismo nel suo complesso, evidenziando le singole componenti sopra descritte.



- Figura 4.23 - Componenti del pistone di spinta elettroattuato.

Senso e velocità di azione del martinetto sono regolati per mezzo di una centralina elettrica (fig. 4.24), alimentata a 380 V dalla rete industriale e collegata al motore elettrico; un sensore montato sul motore e collegato elettricamente alla centralina ha inoltre la funzione di tagliare l'alimentazione in caso di raggiungimento del fine corsa del martinetto.



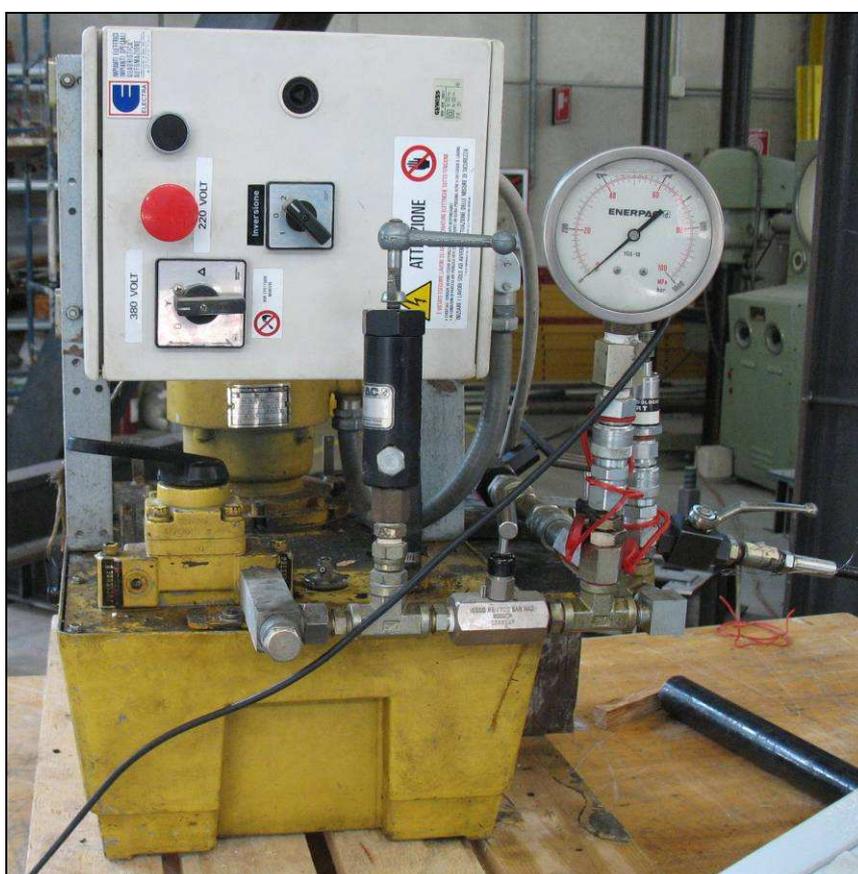
- **Figura 4.24** - Centralina di comando del pistone di spinta: vista generale e particolare della pulsantiera.

4.5 Martinetti cavi

La precompressione del pilastro, atta a simulare il carico trasmesso in esercizio dalle sovrastrutture, viene applicata mediante una coppia di pistoni idraulici prodotti dalla **ENERPAC**, modello **RCH-603** (fig. 4.25), dotati di una portata massima di 600 KN ciascuno. L'applicazione del carico può avvenire esclusivamente per espansione in contrasto tra due corpi; la presenza della cavità assiale consente inoltre di applicare risultanti di trazione a barre passate dotate di piastre di contrasto, come accade nell'applicazione alla prova in esame. La pressione idraulica è fornita, tramite tubi flessibili ad attacco rapido, da una centralina oleodinamica elettroattuata **ENERPAC** (fig. 4.26) munita di manometro; agendo manualmente mediante rubinetti risulta possibile intervenire sul circuito comune ai due pistoni per regolarne la pressione. Nella prova in esame si è mantenuta una pressione di circuito pari a circa 310 bar, ottenendo una risultante di spinta totale sul pilastro di 500 KN.



- Figura 4.25 - Martinetti cavi: elemento singolo e coppia disposta in sede e collegata al circuito.



- Figura 4.26 - Centralina oleodinamica elettroattuata ENERPAC asservita ai martinetti cavi.

La risultante di compressione, applicata dai martinetti cavi al pilastro, sarà convertita da un trasduttore di pressione in segnale elettrico e quindi acquisita e monitorata dal sistema di controllo durante la prova. Occorre pertanto effettuare la taratura della costante di conversione del segnale elettrico in pressione, mediante

l'ausilio di una pressa oleodinamica da 600 KN e l'interposizione di una cella di carico (fig. 4.27). La metodologia è la stessa vista per la taratura della cella di carico.



- Figura 4.27 - Taratura della costante di conversione del martinetto cavo mediante pressa e cella di carico.

4.6 Centralina P-3500

Si tratta di una centralina monocanale portatile alimentata a batteria, progettata dalla **VISHAY Measurements group** come indicatore di deformazioni per strumenti a funzionamento resistivo. La rete elettrica interna, con schema di collegamento a *Ponte di Wheatstone* (vedi pag. 49, paragrafo 4.1), è in grado di alimentare ed amplificarne il segnale di estensimetri collegati a ponte intero, a mezzo ponte o a quarto di ponte; è inoltre dotata di tutti i componenti utili al completamento di ponte per estensimetri da 120, 350 e 1000 ohm di resistenza.

Il collegamento strumentale avviene per mezzo di una morsettiera a spinotti e di una prolunga dotata di connettore femmina tipo *commital IPT* (vedi fig. 4.28 e schema di fig. 4.9, paragrafo 4.1); disposti gli spinotti secondo lo schema di collegamento a ponte che si vuole realizzare (sul coperchio del contenitore sono

rappresentate le disposizioni da adottare), si effettua la selezione del tipo di lettura mediante pulsantiera. La figura 4.28 mostra il settaggio degli spinotti a quarto di ponte utilizzato per la lettura degli estensimetri applicati nel corso della prova.



- Figura 4.28 - Centralina P-3500

La lettura statica della deformazione viene visualizzata direttamente sul display LCD con la precisione di $1 \mu\epsilon$, mentre un collegamento di output consente di inviare il segnale ad un sistema di acquisizione esterno per una misurazione dinamica.

La centralina è dotata inoltre di due potenziometri a manopola per la regolazione manuale della costante di conversione (*gage factor*, K_G) e del bilanciamento di ponte; selezionando il tasto corrispondente, risulta possibile visualizzare su display il valore della costante K_G impostata manualmente [6].

Nella prova in esame la centralina è stata utilizzata come strumento di controllo della funzionalità degli estensimetri, verificandone la stabilità elettrica del collegamento; per praticità e rapidità d'esecuzione tutte le letture sono state eseguite con un K_G pari a 2.

Nota la reale costante di conversione dell'estensimetro collegato, risulta comunque possibile risalire alla misura corretta della deformazione avvalendosi

della *prima relazione fondamentale dell'estensimetria*: $\Delta R/R = K_G \cdot \varepsilon_L$ (vedi paragrafo 4.1), espressione dell'indipendenza della variazione di resistenza dal valore di gage factor (K_G) impostato. Considerando ad esempio un $K_G = 2,13$ per l'estensimetro collegato alla P-3500, settata con $K_G = 2$, la relazione di cui sopra consente di scrivere:

$$\varepsilon_{P3500} \cdot 2 = \varepsilon_{\text{reale}} \cdot 2,13 \text{ e quindi } \varepsilon_{\text{reale}} = (\varepsilon_{P3500} \cdot 2) / 2,13.$$

Capitolo 5

APPLICAZIONE DEGLI ESTENSIMETRI

Nel presente capitolo si descrive dettagliatamente tutta la fase di preparazione della prova dedicata all'applicazione degli estensimetri. Nel paragrafo 5.1 si esaminano le fasi applicative del generico estensimetro, descrivendo, passo per passo, tutte le operazioni di preparazione della superficie sede di installazione, di incollaggio dell'estensimetro, di collegamento ai cavi di acquisizione del segnale e di isolamento del contatto elettrico; tale procedura sarà poi ripetuta in pratica per ciascun estensimetro utilizzato. I 18 estensimetri disposti sulle gabbie d'armatura sono stati applicati in zone differenti ed in periodi distinti: nel paragrafo 5.2 viene indicata, con l'ausilio di schemi ed immagini, l'esatta disposizione degli 8 estensimetri applicati in fase di prefabbricazione di trave e pilastro, documentando i vari stadi dell'applicazione; nel paragrafo 5.3, in maniera analoga, si descrivono disposizione ed applicazione dei 10 estensimetri installati in fase di completamento, all'atto della disposizione delle armature integrative di collegamento.

5.1 Procedura d'incollaggio

L'incollaggio degli estensimetri è effettuato con adesivo **Z 70** (fig. 5.1); si tratta di un cianoacrilato monocomponente caratterizzato da un tempo di polimerizzazione di circa 1 minuto a temperatura ambiente e da un range di temperatura d'utilizzo compreso tra -32 e +65 °C. Tale adesivo è in grado di consentire prove con allungamenti fino a 60.000 microdeformazioni (cioè $\epsilon = \Delta L/L = 6 \cdot 10^4 \times 10^{-6} = 0,06 = 6\%$), studi di fatica e prove con temperature oltre i 95°C e sotto i -185°C.

La procedura richiede anzitutto la preparazione dell'area di incollaggio allo scopo di ottenere una superficie chimicamente pulita avente una rugosità adeguata all'installazione estensimetrica richiesta (generalmente dell'ordine di 2,5 µm), una alcalinità della superficie con ph circa pari a 7, nonché una tracciatura visibile per il successivo posizionamento dell'estensimetro.

La preparazione della superficie risulta articolata nelle seguenti fasi (definite in riferimento a [7]) :

1. *smerigliatura delle barre* in corrispondenza dei punti di incollaggio mediante smerigliatrice angolare (fig. 5.2), ottenendo una superficie piana di estensione sufficiente all'applicazione dell'estensimetro;
2. *sgrassaggio delle superfici sede di incollaggio* mediante sgrassante spray **CSM-1A**, a base di clorotene (fig. 5.3); l'utilizzo di applicatori spray è preferibile in quanto esclude il pericolo di contaminazione del solvente confezionato;
3. un primo *carteggio a secco dell'area di incollaggio* mediante carta abrasiva al carburo di silicio con grana 120 (fig. 5.4);
4. *condizionamento della superficie* mediante un ulteriore *carteggio umido* con carta abrasiva bagnata con **M-Prep Conditioner A** (condizionatore in flacone con tappo rosso in fig. 5.1), soluzione leggermente acida, costituita da acido fosforico ($\text{ph} = 1$) diluito all'1‰, in grado di accelerare il processo di pulitura, inducendo una leggera corrosione della superficie metallica (vedi particolare di figura 5.7) e permettendo quindi di ottenere una micro rugosità superficiale ottimale per l'incollaggio. Si procede bagnando con abbondanti quantità di prodotto sia la superficie da trattare che la carta abrasiva, carteggiando quindi la superficie ed asportando periodicamente con garze il residuo prodotto (figg. 5.5 e 5.6), senza consentire però l'essiccazione di alcuna sostanza sulla superficie, la quale lascerebbe uno strato di contaminazione che andrebbe a ridurre la qualità dell'incollaggio. In ultimo per ottenere una levigatura ottimale della superficie si utilizza carta abrasiva di grana 150; quindi ad operazione conclusa si asciuga la superficie con una o più garze pulite passate lentamente ed in un'unica direzione, evitando in tal modo che la soluzione evapori sulla superficie contaminandola;
5. *tracciatura delle linee di riferimento* che fungeranno, in fase di posizionamento, da allineamento per la griglia dell'estensimetro. Mediante matita si effettua nel punto prescelto il crocicchio di centraggio che individui l'asse della barra e la direzione ad esso ortogonale; poi con l'ausilio di una lametta si incideranno leggermente gli estremi delle tracciature, mantenendosi al di fuori della sagoma d'ingombro

dell'estensimetro, in modo tale da ottenere riferimenti visibili una volta rimossi mediante condizionatore le tracce di grafite;

6. *neutralizzazione della superficie* mediante ripetute applicazioni di un buon quantitativo di **M-Prep Neutralizer 5A** (neutralizzatore in flacone con tappo blu in fig. 5.1), strofinando più volte con l'ausilio di garze la superficie di incollaggio. Tale prodotto è una soluzione leggermente alcalina, a base di ammoniaca (ph = 10) diluita all'1‰, in grado dunque di riportare il ph della superficie a valori pressoché neutrali compatibili con quelli dell'adesivo. Si asciuga quindi la superficie mediante una o più garze pulite passate in un'unica direzione (fig. 5.8), evitando il contatto della superficie con le dita ed il trasporto di contaminanti dalle zone adiacenti non pulite.

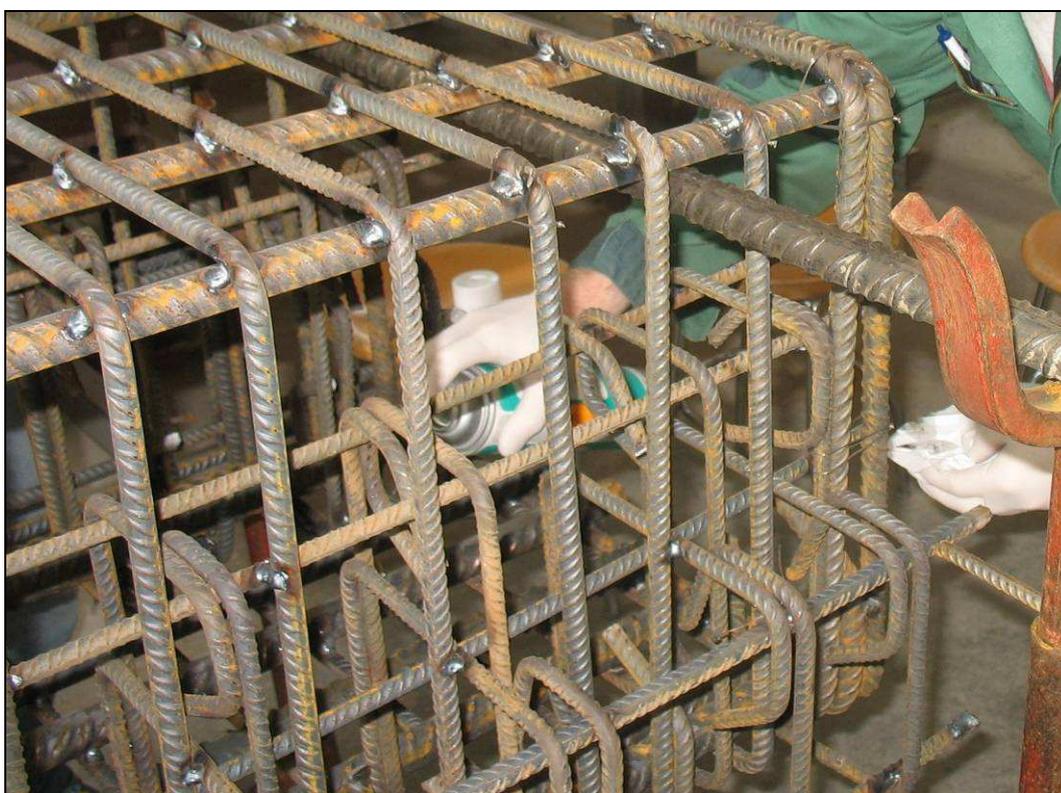
Nell'immagine 5.1 è rappresentata l'intera gamma di prodotti utilizzati nelle applicazioni estensimetriche, mentre la sequenza di immagini che segue fornisce una rappresentazione delle operazioni fin qui descritte.



- Figura 5.1 - Gamma di prodotti utilizzati per la l'applicazione di estensimetri sull'acciaio.



- **Figura 5.2** - Smerigliatura della superficie di incollaggio mediante smerigliatrice angolare.



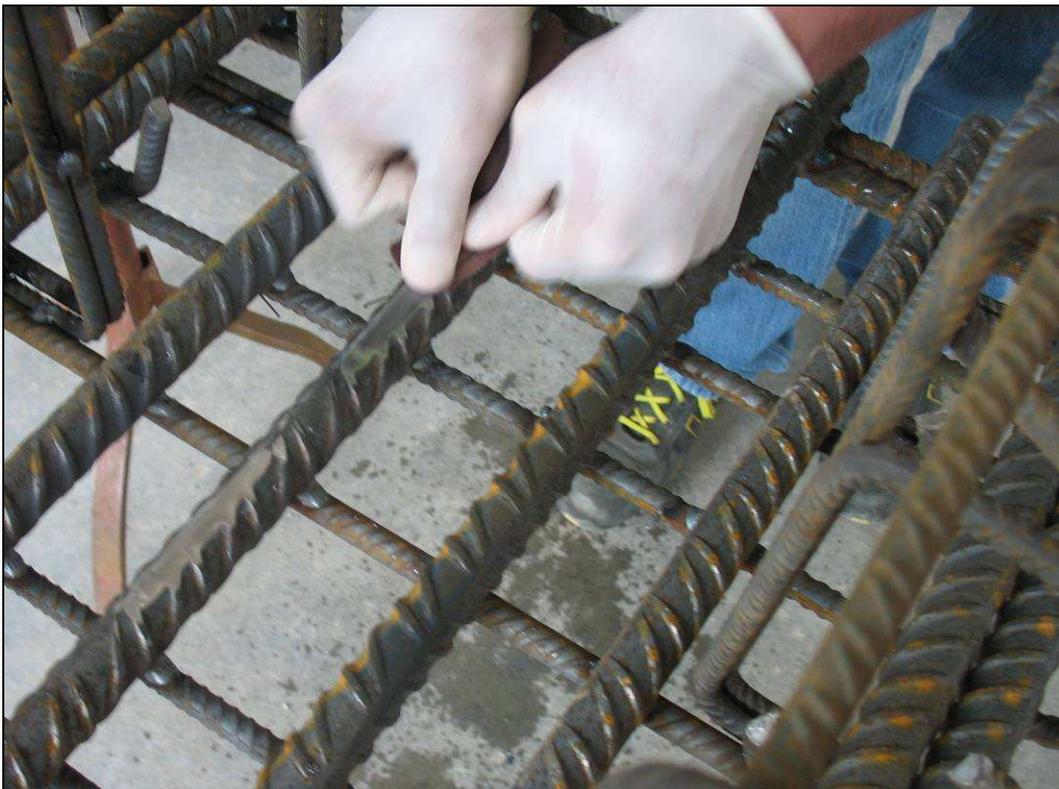
- **Figura 5.3** - Sgrassatura delle superfici mediante applicatore spray.



- Figura 5.4 - Carteggio a secco della superficie.



- Figura 5.5 - Applicazione del condizionatore a pH acido.



- Figura 5.6 - Carteggio umido con l'ausilio di condizionatore.



- Figura 5.7 - Particolare della corrosione indotta dal condizionatore nelle zone trattate e non pulite.



- **Figura 5.8** - Neutralizzazione della superficie mediante soluzione basica ed asciugatura con garza.

La corretta esecuzione delle operazioni fin qui elencate assicura l'ottenimento di una superficie ottimamente trattata per accettare l'incollaggio; onde evitare una ricontaminazione dell'area trattata è bene procedere il prima possibile all'operazione d'incollaggio dell'estensimetro, articolata nelle seguenti fasi (definite in riferimento a [8]):

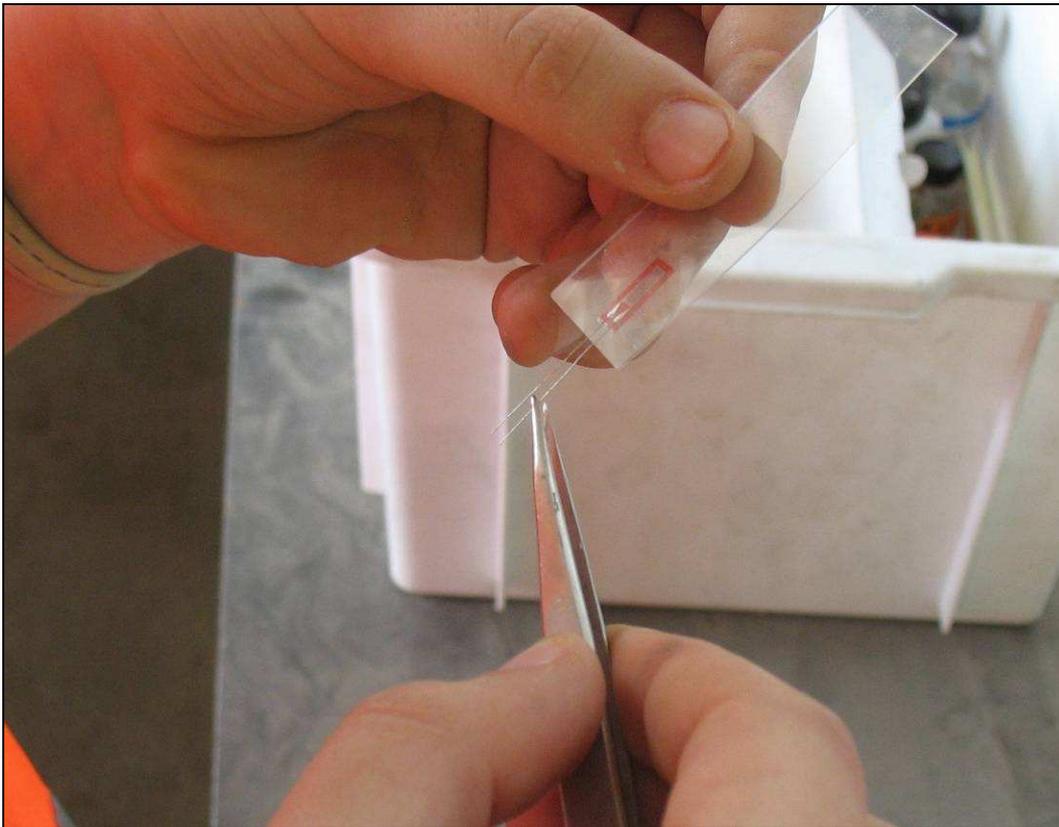
1. *pulitura di tutti gli utensili necessari alla fase di incollaggio e dei ripiani di lavoro mediante **alcool isopropilico GC-6** (fig. 5.1), onde evitare rischi di contaminazione delle superfici di incollaggio;*
2. *estrarre l'estensimetro dalla bustina protettiva mediante pinzette, onde evitarne la contaminazione con le dita (fig. 5.9), previa piegatura laterale dei zampini di contatto, ed appoggiarlo con la superficie di incollaggio a contatto col ripiano di lavoro;*
3. *ricoprire l'estensimetro con una striscia di circa 10 cm di nastro adesivo apposito, tipo **PCT-2A**, previo risvolto di una porzione per il successivo riposizionamento (fig. 5.10);*
4. *sollevato il nastro con l'estensimetro attaccatovi riposizionarlo sulla superficie preventivamente preparata, cercando l'allineamento tra il reticolo di posizionamento e la tracciatura precedentemente effettuata (fig. 5.11). Eseguire quindi con l'ausilio di pennarello dei segni a cavallo di*

nastro e barra al fine di riposizionare poi il nastro nella medesima posizione una volta applicatovi l'adesivo;

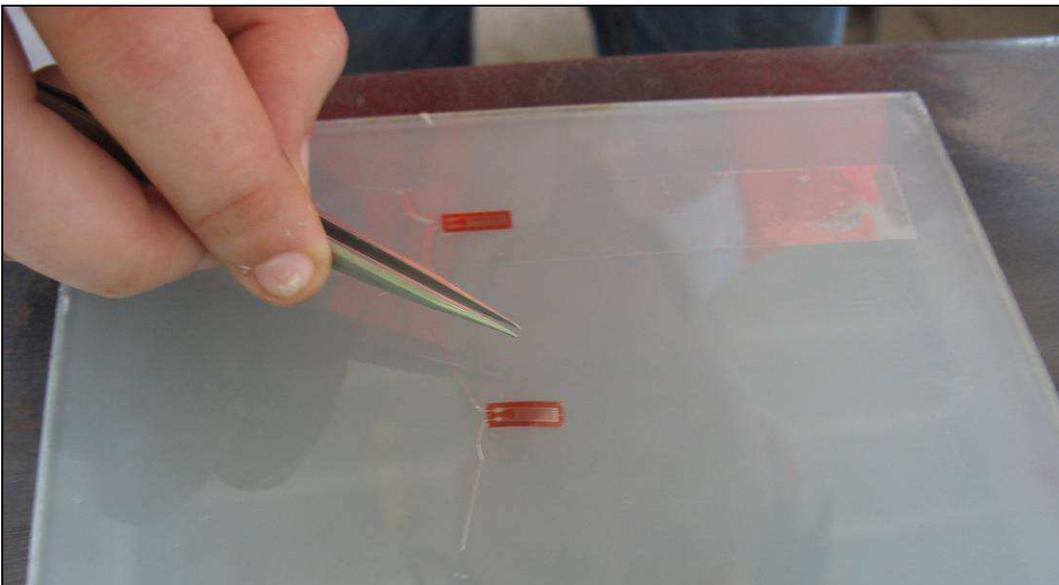
5. *sollevare il nastro e ruotarlo fino a disporre l'estensimetro parallelamente alla superficie da incollare*, facendo attenzione a non imprimere piegature alla griglia estensimetrica;
6. *applicare una goccia di adesivo Z 70 sulla superficie di incollaggio dell'estensimetro spandendola con l'ausilio di una lametta fino ad ottenerne uno strato sottile* (figg. 5.12 e 5.13), trasferendo sul nastro l'eventuale eccesso. Inclinare dunque il nastro sulla superficie ed esercitare, con l'ausilio di una garza e l'interposizione di una velina di teflon, una pressione atta a far fuoriuscire l'eventuale eccesso di adesivo (fig. 5.14), poiché il migliore incollaggio si ottiene in presenza di uno strato di adesivo molto sottile;
7. *applicare dunque una pressione con un dito sull'estensimetro*, fornendogli il calore utile ad aumentare la velocità di polimerizzazione, per un tempo di 1 minuto circa, ampliabile ad alcuni minuti nel caso di ambienti a bassa umidità (sotto il 30 %) e/o a bassa temperatura (sotto i 20 °C). Nell'eventualità di incollaggio su superfici non perfettamente piane applicare la pressione con l'ausilio di una righetta metallica o spessore in neoprene, in grado di imprimere all'adesivo essiccato il piano utile all'incollaggio dell'estensimetro. Attendere dunque da 2 a 5 minuti prima di rimuovere il nastro, tirandolo indietro lentamente su se stesso onde evitare il sollevamento della griglia.
8. *fissare il cavo di collegamento alla barra mediante due fascette* onde evitare che l'accidentale trazione, nelle fasi successive di intervento, provochi il distacco dell'installazione (fig. 5.15). *Due ulteriori fascette vengono applicate al tratto terminale del cavo*, preventivamente privato della guaina di protezione, allo scopo di mantenere i contatti dei tre fili di collegamento sollevati al di sopra dell'estensimetro; si facilitano in tal modo le successive operazioni di collegamento elettrico e si consente una migliore distribuzione sia del protettivo che del mastice isolante (fig. 5.18);

9. *avvolgere mediante pinzette i zampini dell'estensimetro attorno ai corrispondenti collegamenti ed effettuare dunque la stagnatura dei contatti* (figg. 5.16 e 5.17);
10. risulta quindi possibile una *verifica della stabilità del contatto elettrico* mediante centralina **P-3500** (figura 4.28, capitolo 4.6), in grado di leggere il valore resistivo trasmesso dal generico estensimetro, tradotto già in microepsilon, con l'ausilio di contatto mediante schema di circuito ad 1/4 di ponte di *Wheatstone* (vedi capitolo 4.1);
11. *rimuovere dall'installazione i flussanti ed altri residui delle precedenti operazioni* mediante solvente **M-line Rosin Solvent RSK-1** (fig. 5.1);
12. *applicare il protettivo poliuretano ad essiccamento* tipo **Coat A - air-drying Polyurethane coating** (fig. 5.18);
13. ad essiccazione avvenuta *applicare uno strato di mastice isolante su estensimetro e contatti* (fig. 5.19) onde evitare, durante il getto, l'infiltrazione dell'acqua di impasto con il rischio di conseguente alterazione della resistività del sistema;
14. *effettuare un'ulteriore verifica mediante centralina della stabilità della resistività elettrica delle singole installazioni.*

La sequenza delle fasi d'incollaggio viene rappresentata dalla seguente serie di immagini.



- **Figura 5.9** - Estrazione dell'estensimetro dalla bustina protettiva mediante pinzette.



- **Figura 5.10** - Posizionamento dell'estensimetro sul ripiano di lavoro ed applicazione del nastro adesivo.



- **Figura 5.11** - Riposizionamento dell'estensimetro sull'area di incollaggio con l'ausilio del nastro adesivo.



- **Figura 5.12** - Sollevamento del nastro ed applicazione dell'adesivo monocomponente all'estensimetro.



- Figura 5.13 - Rimozione dell'eccesso di adesivo mediante lametta.



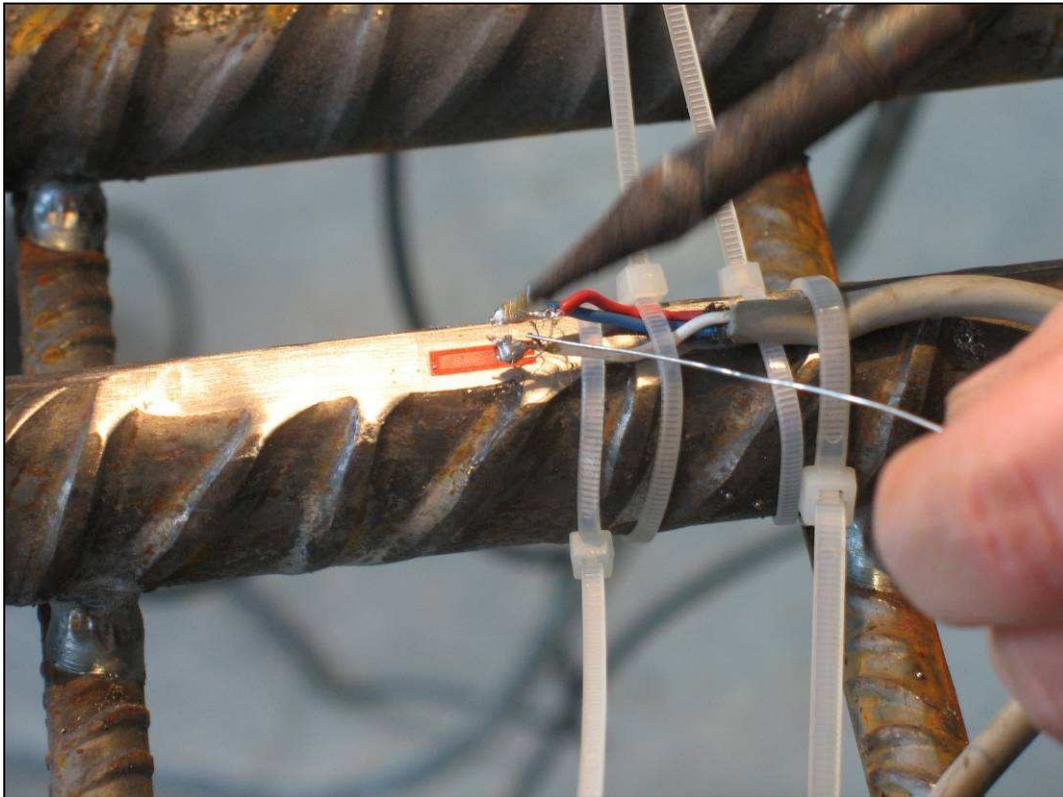
- Figura 5.14 - Applicazione manuale della pressione previa interposizione di veletta di teflon.



- Figura 5.15 - Applicazione delle fascette di fissaggio del cavo di collegamento .



- Figura 5.16 - Avvolgimento dei filamenti dell'estensimetro attorno ai contatti del cavo.



- Figura 5.17 - Stagnatura dei collegamenti elettrici.



- Figura 5.18 - Applicazione a pennello del protettivo poliuretano.



- Figura 5.19 - Isolamento mediante distribuzione di mastice silconico.

L'intera procedura appena descritta verrà ripetuta per ciascuno degli estensimetri incollati alle gabbie d'armatura. La prova ciclica eseguita sul nodo d'angolo prevede l'utilizzo, tra le varie strumentazioni adottate, di **18** estensimetri applicati in due differenti istanti: in fase di prefabbricazione **8** estensimetri verranno incollati alle gabbie di trave e pilastro inglobate nel *getto prefabbricato*; in fase di completamento i restanti **10** estensimetri verranno incollati alle gabbie di nodo ed agli spezzoni aggiuntivi inglobati nel *getto integrativo*.

5.2 Estensimetri applicati in fase di prefabbricazione

Il giorno 20 ottobre 2009 ci si è recati presso lo stabilimento della ditta APE s.p.a., sito in via Leonardo da Vinci n°14, Montecchio (RE), per l'applicazione degli estensimetri sulle barre d'armatura che andranno poi incluse nel getto prefabbricato.

Gli **8** estensimetri, tutti applicati sul lato delle barre rivolto verso l'interno del getto, sono così distribuiti :

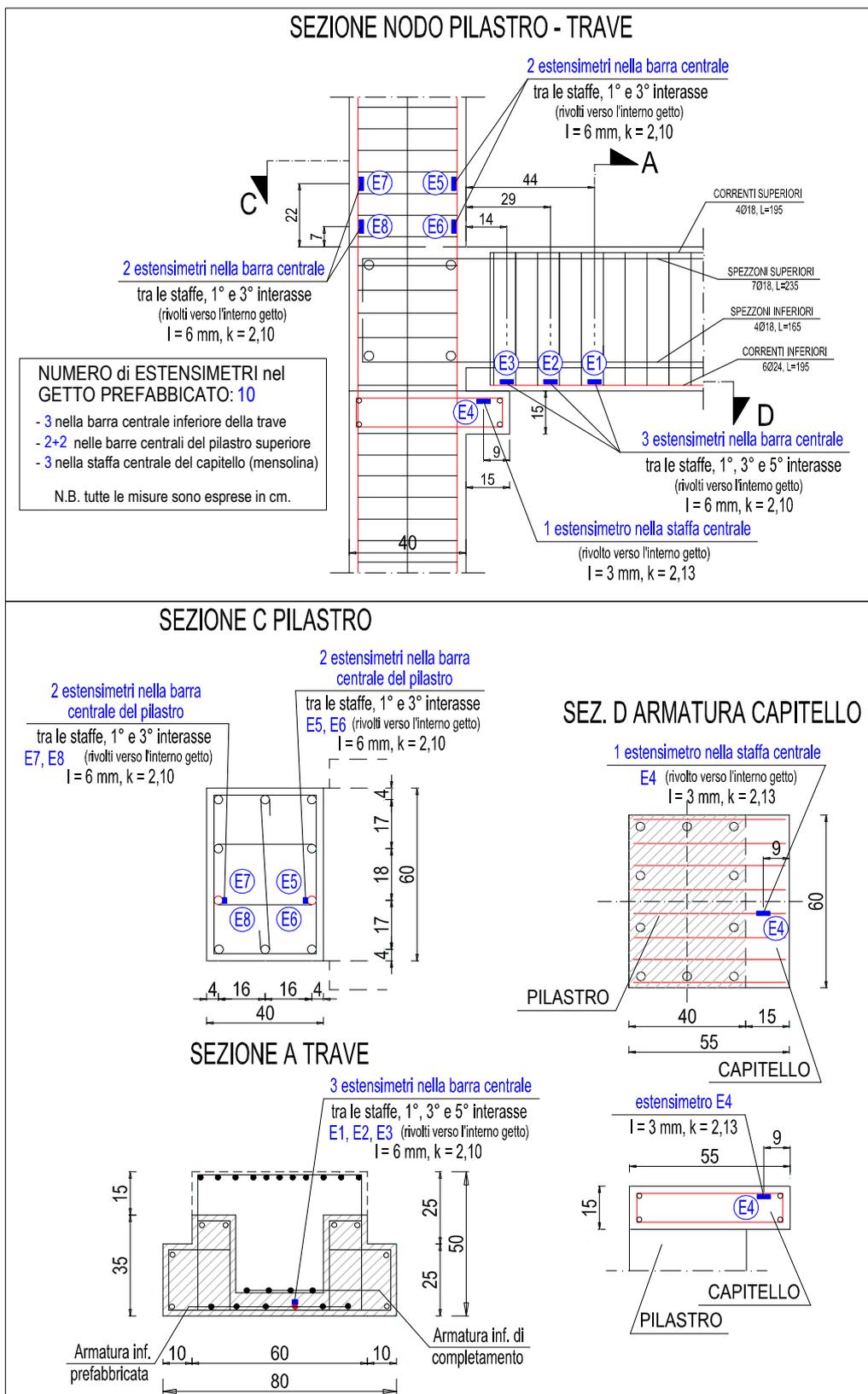
- **3 estensimetri** ($l = 6$ mm, $K_G = 2,10$) applicati alla *barra $\varnothing 24$ centrale dell'intradosso della trave*, incollati nei tratti compresi all'interno degli intervalli 1° , 3° e 5° di staffaggio (fig. 5.27);

- **4 estensimetri** ($l = 6$ mm, $K_G = 2,10$) applicati a 2 a 2, simmetricamente, sulle *barre $\varnothing 24$ centrali delle facce del pilastro* disposte trasversalmente rispetto all'asse della trave, incollati all'interno del 1° e 3° tratto delimitati dallo staffaggio (fig. 5.35);
- **1 estensimetro** ($l = 3$ mm, $K_G = 2,13$) applicato al *braccio superiore della staffa $\varnothing 8$ centrale*, costituente armatura flessionale del capitelto d'appoggio del pilastro (mensola prefabbricata) (fig. 5.34).

Per meglio comprendere l'esatta distribuzione degli estensimetri ci si avvale dello schema quotato rappresentato in figura 5.21, mentre la sequenza di immagini che segue consente una reale testimonianza delle strumentazioni eseguite.



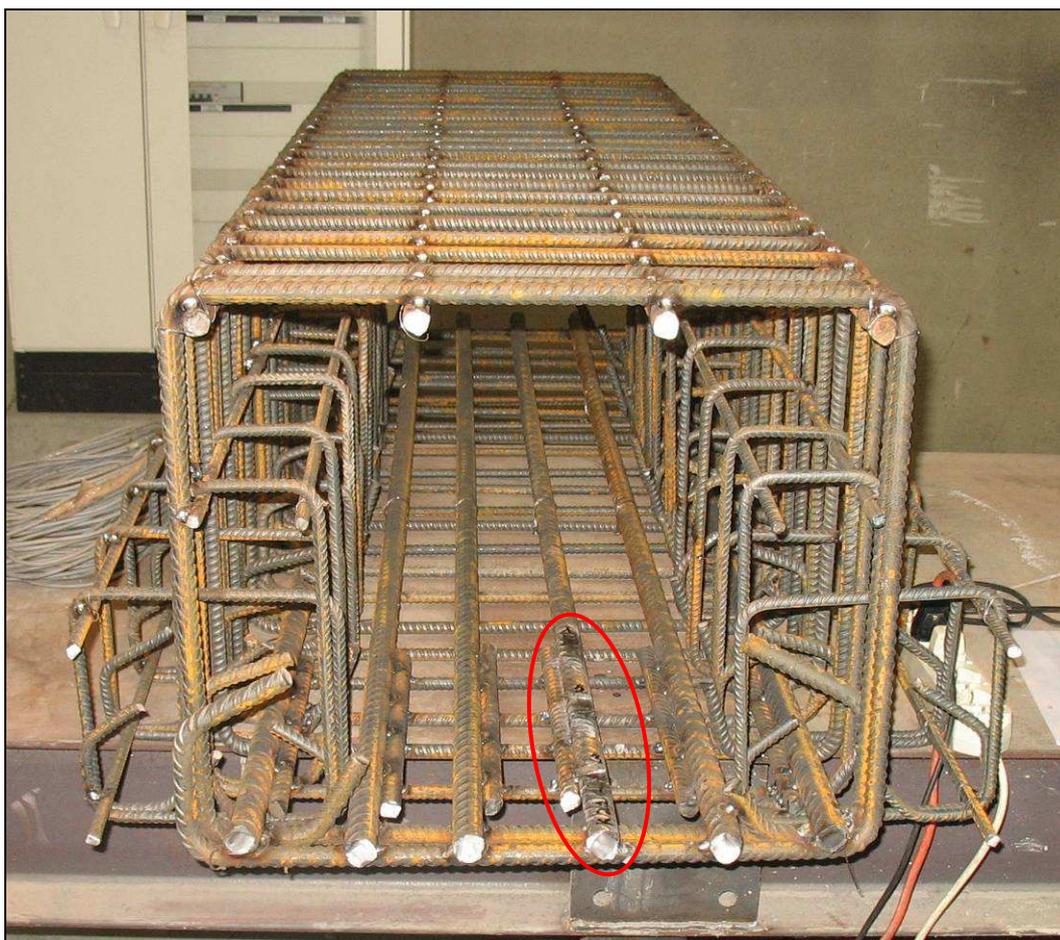
- **Figura 5.20** - Disposizione della gabbia del pilastro per l'intervento di strumentazione (vista d'insieme).



- Figura 5.21 - Disposizione degli estensimetri applicati in fase di prefabbricazione.



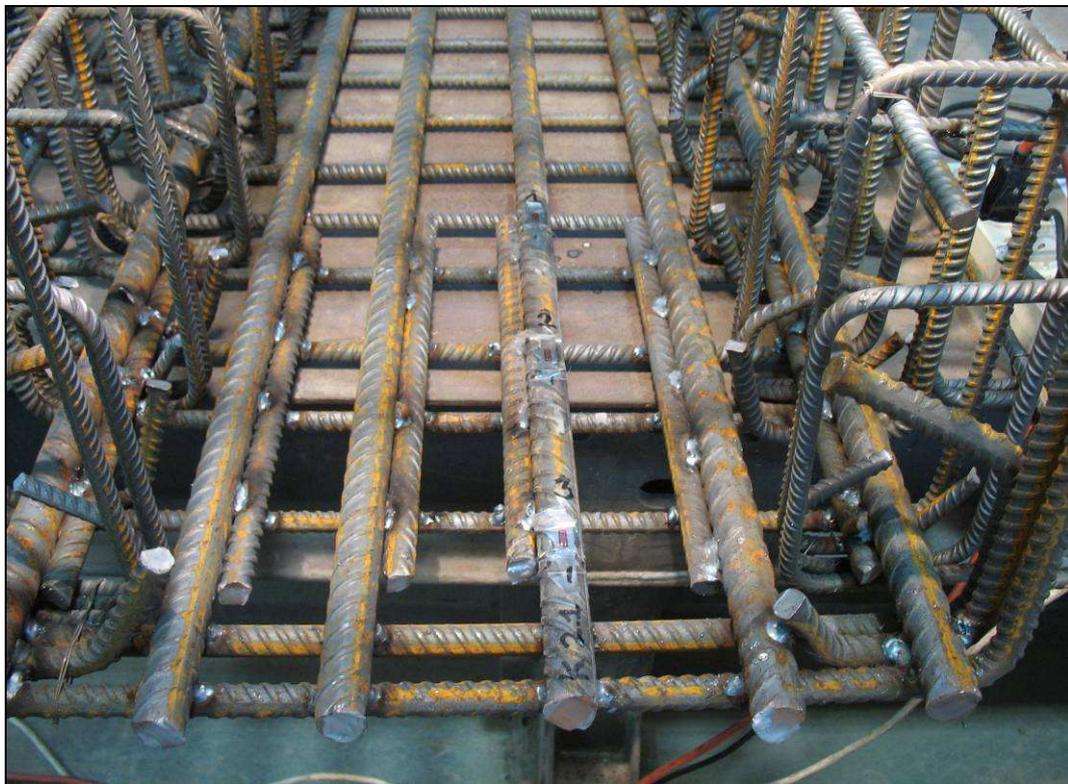
- Figura 5.22 - Disposizione della gabbia della trave per l'intervento di strumentazione (vista d'insieme).



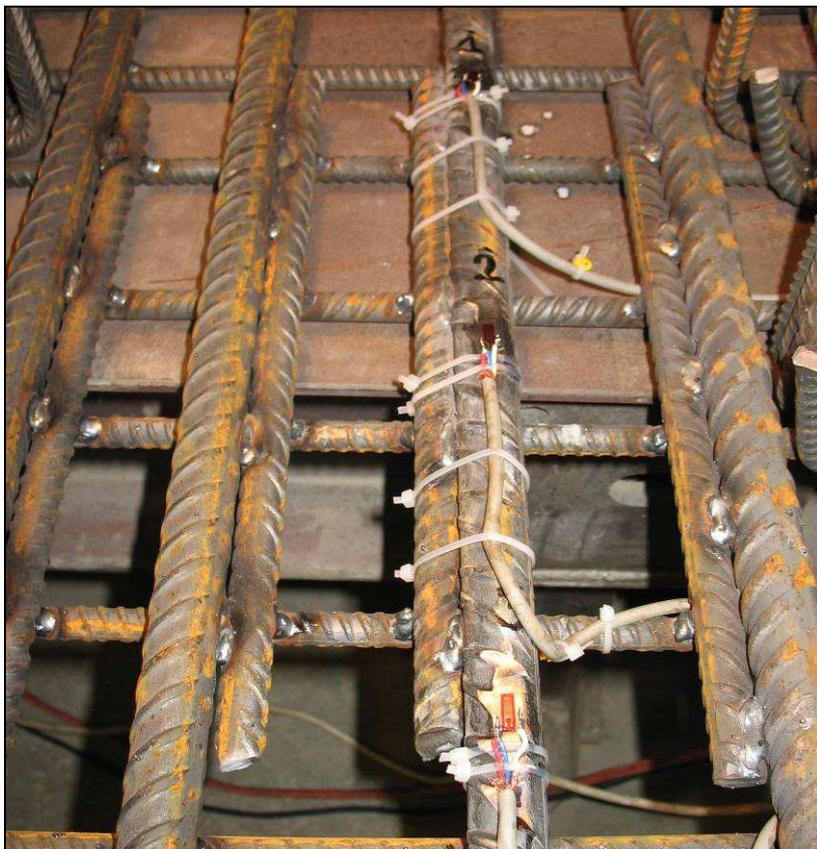
- Figura 5.23 - Messa in evidenza del tratto d'intervento sulla barra centrale della trave.



- **Figura 5.24** - Fase di incollaggio degli estensimetri sull'intradosso della trave.



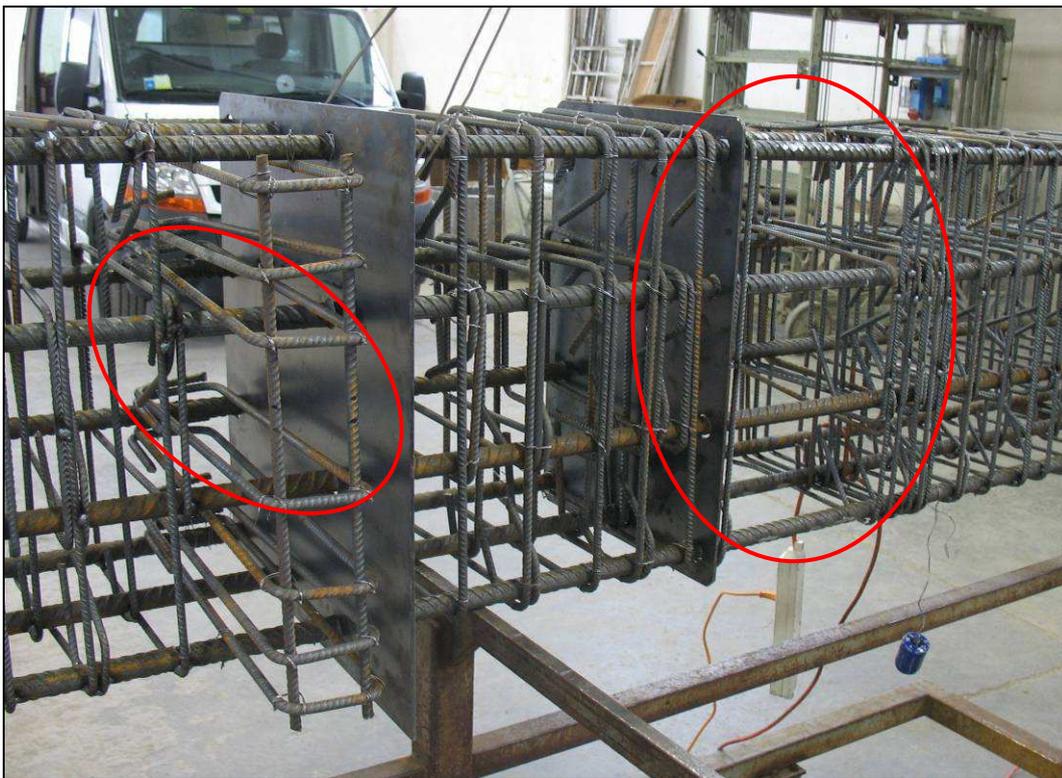
- **Figura 5.25** - Completamento dell'incollaggio degli estensimetri E1, E2 e E3.



- Figura 5.26 - Collegamento degli estensimetri E1, E2 e E3 ai cavi di acquisizione del segnale.



- Figura 5.27 - Schema definitivo dell'installazione degli estensimetri E1, E2 e E3.



- Figura 5.28 - Fasi preliminari di strumentazione: scostamento delle staffe del pilastro ed asportazione della staffa centrale della mensola.



- Figura 5.29 - Incollaggio degli estensimetri E5 e E6.



- Figura 5.30 - Incollaggio degli estensimetri E7 e E8.



- Figura 5.31 - Fase di stagnatura dei collegamenti degli estensimetri applicati alle barre del pilastro.



- Figura 5.32 - Collegamento degli estensimetri E7 e E8 ai cavi di acquisizione del segnale.



- Figura 5.33 - Installazione definitiva degli estensimetri E7 e E8.



- Figura 5.34 - Applicazione dell'estensimetro E4 alla staffa della mensola precedentemente sfilata.



- Figura 5.35 - Risistemazione delle staffe all'interasse di progetto.

Sia in fase di applicazione che nella successiva fase di getto si è continuamente monitorata la funzionalità degli estensimetri mediante la lettura manuale, tramite *centralina P-3500*, dei valori di deformazione. Nelle tabelle 5.1 si riportano le letture (tutte espresse in $\mu\epsilon$) eseguite prima e dopo il getto di prefabbricazione (effettuato in data 22/10/2009) ed al termine dell'applicazione della strumentazione superficiale del nodo strutturale (in data 25/11/2009).

Lettura pre-getto

DATA	ORA	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
22/10/2009	10:15	391	244	622	-1428	550	60	127	-68

Lettura dopo getto

DATA	ORA	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
22/10/2009	11:30	395	203	637	-1434	607	55	503	170

Lettura al termine dell'applicazione della strumentazione di superficie

DATA	ORA	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
25/11/2009	10:00	543	206	777	-1543	344	94	-10	-26

- **Tabelle 5.1** - Letture delle deformazioni estensimetriche effettuata tramite centralina P-3500.

Tali letture vengono effettuate mantenendo il contatto per alcuni secondi e verificando la stazionarietà del valore rilevato. Di particolare interesse risulta anche il confronto tra i valori registrati prima e dopo l'esecuzione del getto, in quanto l'eventuale infiltrazione dell'acqua d'impasto può provocare la dispersione del segnale elettrico e la conseguente "deriva" del valore rilevato. Qualora si presentasse un'anomalia del genere occorre verificarne l'eventuale persistenza a distanza di giorni. Nel caso in esame l'unica anomalia osservata è una sensibile deriva del segnale rilevato dall'estensimetro E8 nella fase successiva al getto; fenomeno non più rilevato già sette giorni dopo, alla consegna in laboratorio degli elementi prefabbricati.

Risulta interessante notare gli effetti che la movimentazione e l'assemblaggio degli elementi prefabbricati hanno prodotto sulle deformazioni degli estensimetri, confrontando le letture medie di getto con quelle del 25 novembre. Si può osservare, a tal proposito, un allungamento della staffa superiore della mensola, caricata dall'appoggio della trave, ed un accorciamento delle barre del pilastro, conseguente alla disposizione verticale, registrato negli estensimetri superiori (E5 e E7); gli estensimetri del pilastro prossimi al nodo registrano invece un sorta di rotazione oraria della sezione d'innesto al nodo, poiché si ha un allungamento in E6 ed una compressione in E8.

5.3 Estensimetri applicati in fase di completamento

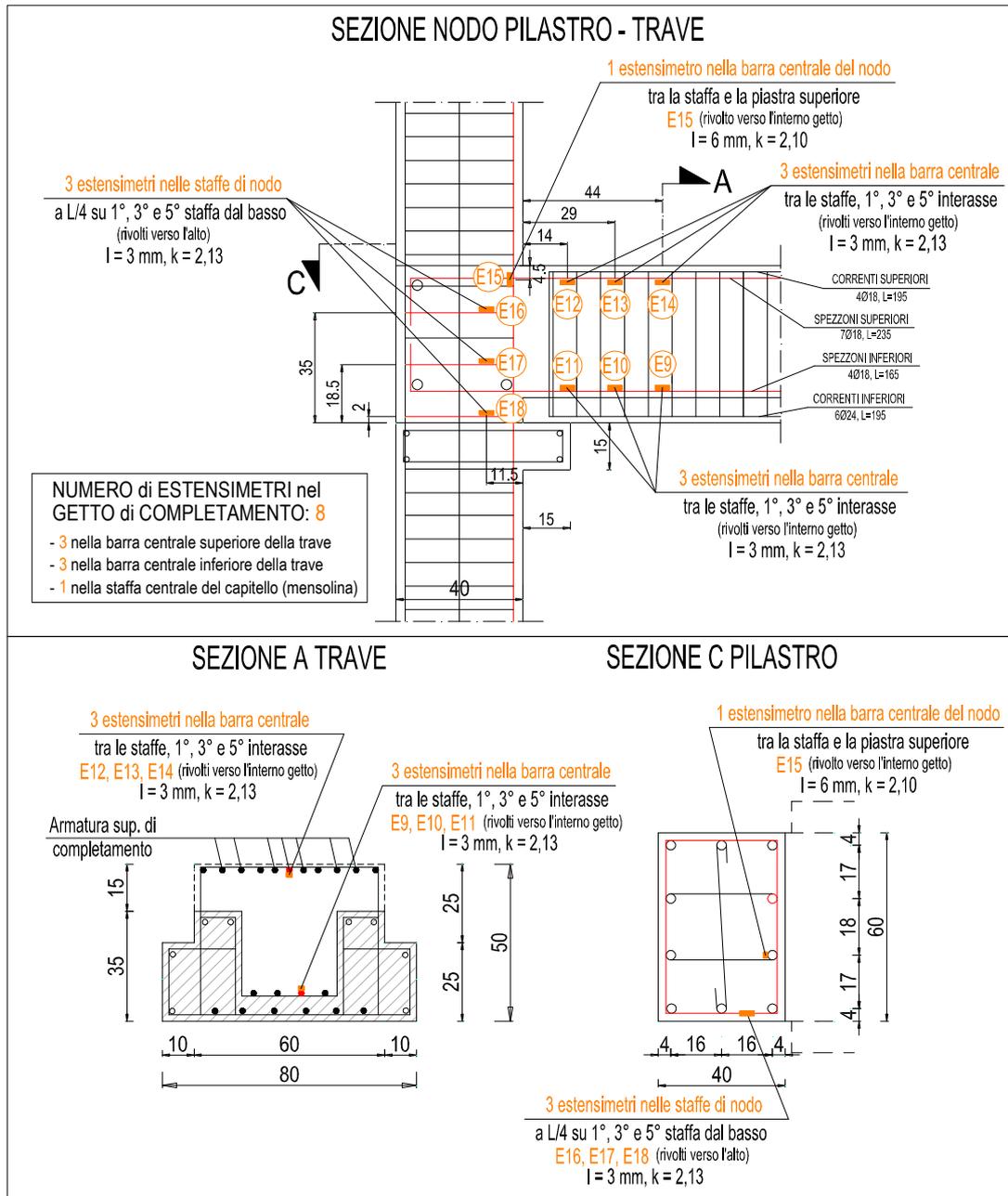
Il giorno 29 ottobre 2009 pilastro e trave prefabbricati sono stati trasportati in laboratorio assieme al corredo di armature di completamento; si è quindi potuta

avviare la strumentazione delle barre d'armatura che andranno poi incluse nel getto di completamento.

I **10** estensimetri sono così distribuiti :

- **3 estensimetri** ($l = 3$ mm, $K_G = 2,13$) applicati allo *spezzone integrativo $\varnothing 24$ centrale alloggiato nella tasca di completamento della trave*; incollati sul lato della barra rivolto verso l'interno del getto, nei tratti corrispondenti agli intervalli 1° , 3° e 5° di staffaggio (fig. 5.40);
- **3 estensimetri** ($l = 3$ mm, $K_G = 2,13$) applicati allo *spezzone integrativo $\varnothing 24$ centrale dell'estradosso della trave*; incollati sul lato della barra rivolto verso l'interno del getto, nei tratti compresi all'interno degli intervalli 1° , 3° e 5° di staffaggio (fig. 5.40);
- **3 estensimetri** ($l = 3$ mm, $K_G = 2,13$) applicati singolarmente al *braccio, parallelo all'asse della trave, della 1° , 3° e 5° staffa $\varnothing 10$ di nodo*, computate dal basso; incollati sulla faccia superiore della staffa, a circa un quarto del braccio misurato dal lato trave (fig. 5.49);
- **1 estensimetri** ($l = 6$ mm, $K_G = 2,10$) applicato sul *tratto di nodo della barra $\varnothing 24$ centrale della faccia del pilastro* prospiciente la trave, proseguimento di una delle barre già strumentate in fase di prefabbricazione; incollato sul lato della barra rivolto verso l'interno del getto, nel tratto di nodo compreso tra la piastra superiore e la 1° staffa computata dall'alto (fig. 5.49);

Per meglio comprendere l'esatta distribuzione degli estensimetri ci si avvale dello schema quotato rappresentato in figura 5.36. La sequenza di immagini che segue consente invece una reale testimonianza delle strumentazioni eseguite.



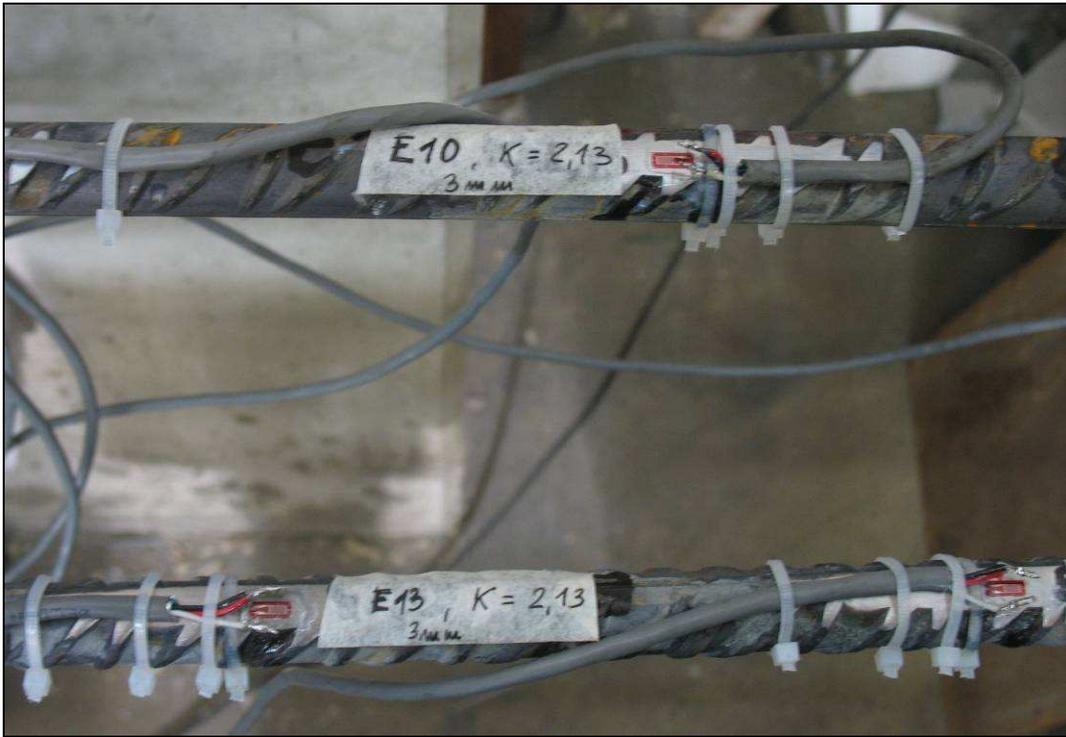
- **Figura 5.36** - Disposizione degli estensimetri applicati in fase di completamento.



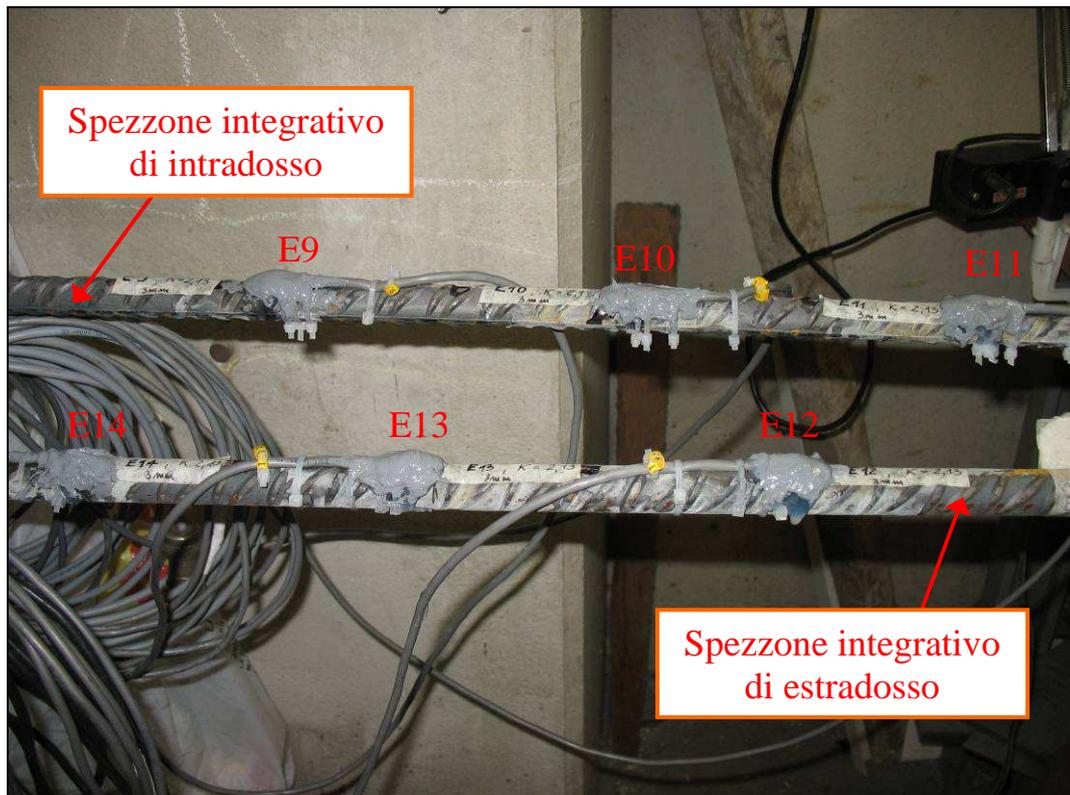
- Figura 5.37 - Disposizione degli spezzoni integrativi della trave per l'intervento di strumentazione (vista d'insieme).



- Figura 5.38 - Incollaggio degli estensimetri E10, E11, E13 e E14.



- Figura 5.39 - Particolare del collegamento degli estensimetri E10, E13 e E14.



- Figura 5.40 - Strumentazione completa degli spezzoni integrativi.



- Figura 5.41 - Particolare ad installazione terminata dell'estensimetro 10 (barra integrativa d'intradosso).



- Figura 5.42 - Disposizione degli spezzoni integrativi strumentati nella struttura di nodo.



- Figura 5.43 - Fase d'incollaggio dell'estensimetro E15.



- Figura 5.44 - Fissaggio del cavo per il collegamento dei contatti dell'estensimetro E15.



- **Figura 5.45** - Incollaggio estensimetri E16, E17 e E18 sulle staffe di nodo e successivo scorrimento.



- **Figura 5.46** - Particolare d'incollaggio dell'estensimetro E17.



- Figura 5.47 - Fissaggio del cavo per il collegamento dei contatti dell'estensimetro E18.



- Figura 5.48 - Installazione completata degli estensimetri E17 e E18.



- **Figura 5.49** - Completamento della strumentazione di nodo e riposizionamento delle staffe all'interasse di progetto.

Anche per gli estensimetri applicati in fase di completamento si è effettuato monitoraggio della funzionalità *centralina P-3500*. Nelle tabelle 5.2 si riportano le letture (tutte espresse in $\mu\epsilon$) effettuate al termine dell'applicazione degli estensimetri, prima della realizzazione del getto di completamento (effettuato in data 12/11/2009), ed al termine dell'applicazione della strumentazione superficiale del nodo strutturale (in data 25/11/2009).

Lettura pre-getto

DATA	ORA	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
4/11/2009	10:15	2116	651	1827	1763	1360	1123	2621	1340
		E17	E18						
		3157	1486						

Lettura al termine dell'applicazione della strumentazione di superficie

DATA	ORA	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
25/11/2009	10:00	2149	621	1897	1530	1009	786	2691	1241
		E17	E18						
		3150	1560						

- **Tabelle 5.2** - Letture delle deformazioni estensimetriche tramite centralina P-3500.

Non è stata riscontrata alcuna anomalia, rilevando per ogni estensimetro un segnale stabile ed uniforme nel tempo.

Capitolo 6

TRACCIATURA ED APPLICAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DI SUPERFICIE

In questo capitolo verrà descritta la fase di allestimento della prova dedicata alla tracciatura, sulla superficie del nodo d'angolo, della posizione di applicazione degli strumenti deputati al rilevamento degli spostamenti, assoluti e relativi; si descriveranno quindi tutte le operazioni necessarie alla loro applicazione. Nel paragrafo 6.2 vengono descritte, con l'ausilio di uno schema quotato, le posizioni di applicazione dei supporti strumentali, quindi si descrivono le operazioni di tracciatura dei riferimenti per il relativo posizionamento. Nel paragrafo 6.3 vengono argomentate le fasi applicative dei supporti predisposti per gli strumenti a riferimento relativo, descrivendo le operazioni di applicazione dei supporti applicati per incollaggio e per tassellatura; si descrivono quindi le tipologie di trasduttori induttivi utilizzate ed il loro fissaggio ai supporti. Il paragrafo 6.4 si occupa invece della disposizione del trasduttore applicato alla sommità del pilastro e del filo estensibile applicato all'estremità della trave; entrambi gli strumenti sono muniti di supporti di fissaggio collegati al pavimento, risultando quindi caratterizzati da riferimento di lettura assoluto.

6.1 Generalità

L'indagine sperimentale di caricamento ciclico sul nodo d'angolo richiede il rilievo strumentale degli spostamenti, relativi ed assoluti, di prestabiliti riferimenti superficiali. Dall'elaborazione delle misure effettuate si definiranno una serie di parametri che, unitamente alle letture ricavate dalle applicazioni estensimetriche descritte nei precedenti capitoli, consentiranno un'interpretazione del comportamento strutturale ai vari livelli di carico.

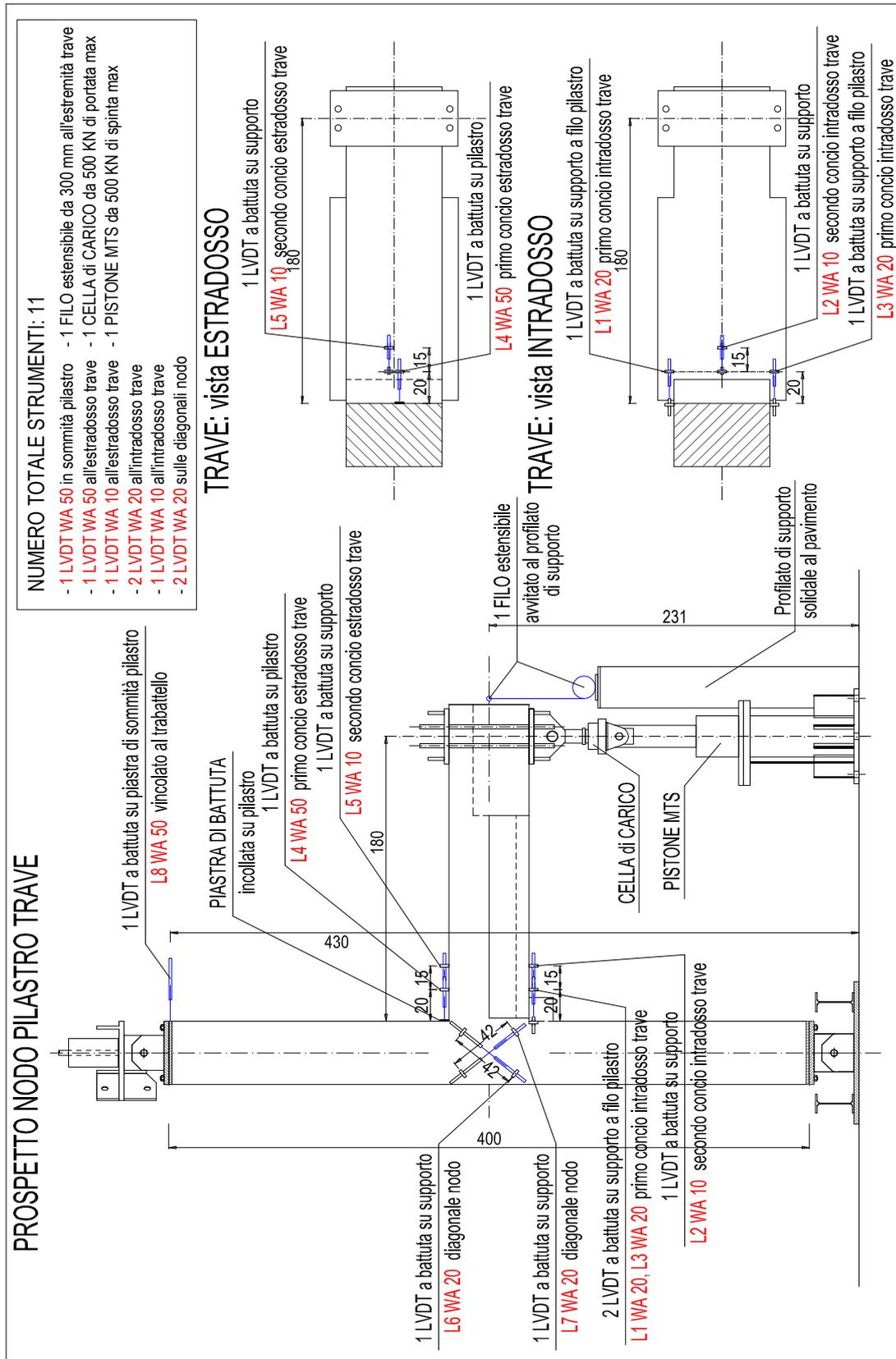
Come lettura assoluta di riferimento si è scelto di misurare lo spostamento dell'estremità della trave rispetto al pavimento del laboratorio in funzione del carico,

a tal scopo si è quindi utilizzato un filo estensibile avente il basamento solidale al pavimento e l'estremità collegata alla sezione estrema della trave. Le rilevazioni relative che si è deciso di eseguire, tutte effettuate con l'ausilio di trasduttori induttivi di spostamenti (LVDT), riguardano invece l'estradosso e l'intradosso di due conci di trave prossimi alla sezione d'innesto al pilastro, e le diagonali del pannello di nodo.

Risulta fondamentale, ai fini della scelta del tipo di strumenti utilizzati e della regolazione della corsa iniziale (valore dell'escursione strumentale iniziale a carico e spostamento nullo), avere a priori un'idea di massima di quale sarà l'entità degli spostamenti, assoluti e relativi, che la struttura oggetto di indagine subirà in prossimità dei carichi limite di prova. Si vuole infatti evitare che gli strumenti giungano a fine scala in fase di rilevazione, richiedendo la sospensione dell'acquisizione per il riposizionamento dello strumento e la necessità di successive depurazioni dei dati in fase di elaborazione, oppure, nella peggiore delle ipotesi, richiedendo la sostituzione dello strumento dotato di valori di corsa massima rivelatisi inferiori all'entità dell'escursione deformativa oggetto di misura.

6.2 Predisposizione degli strumenti e tracciatura

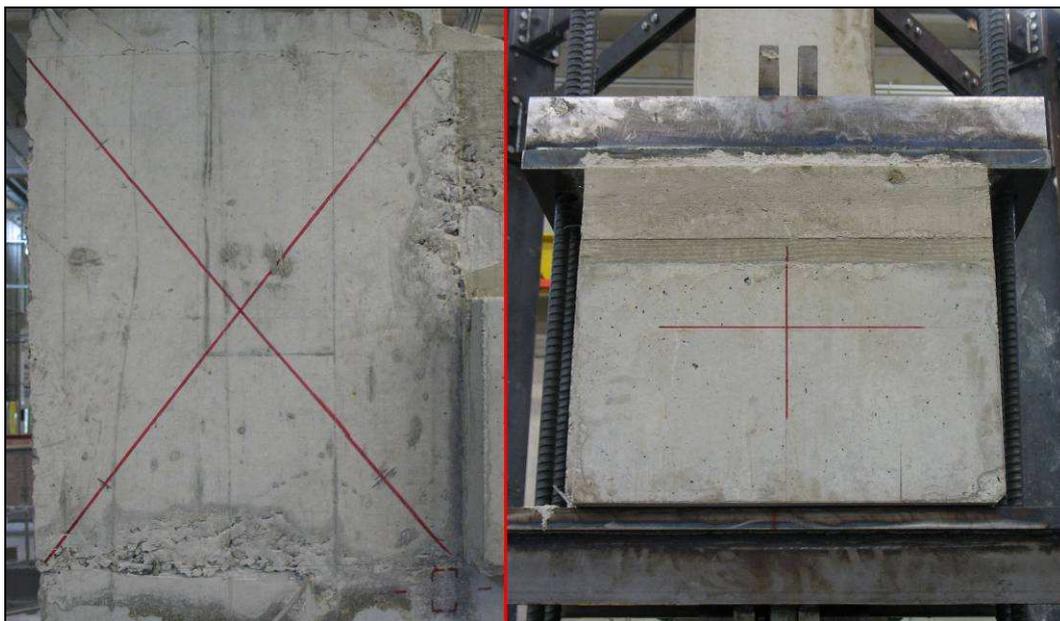
Terminata la strumentazione delle armature integrative ed eseguito il getto di completamento, venerdì 20 novembre 2009 si è provveduto, dopo otto giorni di maturazione, alla rimozione dei casseri di contenimento; trascorsi due ulteriori giorni per consentire l'evaporazione dell'umidità esteriore del getto, lunedì 23 novembre 2009 si sono avviate le operazioni di applicazione della strumentazione superficiale. Il numero, il tipo e la disposizione degli strumenti che si intende utilizzare sono rappresentati nello schema quotato di figura 6.1. Come si può notare gli induttivi applicati alla trave vanno a presidiare le sezioni di estremità dei due conci successivi individuati a partire dalla sezione d'innesto nel pilastro, di lunghezza pari a 20 cm e 15 cm rispettivamente. Ne deriva che dagli spostamenti relativi registrati al variare del carico, risulterà possibile risalire, in fase di elaborazione dei dati, alle deformazioni medie dei conci, e quindi ai valori di curvatura media; si disporrà in tal modo del diagramma momento-curvatura di tali conci, da affiancare al diagramma forza-spostamento, tracciabile grazie all'applicazione del filo estensibile all'estremità della trave.



- **Figura 6.1** - Disposizione degli strumenti applicati alla superficie della struttura (la sigla LX WA Y individua l'induttivo denominato col numero progressivo X e di corsa massima, espressa in mm, Y)

Prefissata l'esatta disposizione degli strumenti non resta che effettuare la tracciatura dell'opera.

Con l'ausilio di matita, pennarello, rigchette e squadrette metalliche si sono appunto tracciate una serie di linee utili a definire i riferimenti di misura e le posizioni esatte di applicazione dei supporti strumentali, riportando anzitutto: le diagonali del pannello di nodo, il centro della sezione d'estremità della trave (fig. 6.2), gli assi longitudinali di trave e pilastro e gli assi trasversali che delimitano i due concetti di riferimento; dalle intersezioni tra i suddetti assi si ottengono i riferimenti baricentrici delle basette di supporto degli LVDT.



- **Figura 6.2** - Tracciatura della diagonale di nodo e del centro della sezione estrema della trave.

Il successivo incollaggio prevede la rimozione di ogni traccia di contaminazione dalla superficie, compresi i tratti di pennarello; si procede quindi alla levigatura superficiale, mediante smerigliatrice angolare, ed allo sgrassaggio, mediante **alcool isopropilico GC-6**, delle superfici sede di incollaggio. Facendo attenzione a non ricontaminare la zona trattata si vanno a realizzare nuovi tracciati di riferimento per l'incollaggio dei supporti, rappresentando la sagoma d'ingombro dei rettangoli di base dei supporti. Si noti in figura 6.3 la tracciatura in rosso degli assi strumentali collocati simmetricamente rispetto all'asse della trave, tracciato a matita. Nelle figure 6.4 e 6.5 è possibile notare l'avvenuta preparazione delle superfici d'incollaggio poste all'intradosso della trave ed il tracciamento della sagoma d'ingombro dei supporti dell'L1 WA 20.



- **Figura 6.3** - Tracciatura e trattamento superficiale pre-incollaggio dell'estradosso trave.



- **Figura 6.4** - Tracciatura e trattamento superficiale dell'intradosso della trave.



- **Figura 6.5** - Tracciatura degl'assi strumentali sull'intradosso della trave e sul pilastro, avvenuto trattamento superficiale pre-incollaggio e tracciatura della sagoma d'ingombro in posizione L1.

Per il fissaggio della strumentazione del pannello di nodo si preferisce ricorrere all'utilizzo di otto tasselli ad espansione M6, onde evitare il rischio che lo stato fessurativo indotto dalle sollecitazioni di nodo determini il distacco degli incollaggi superficiali in fase di rilevamento. Poiché la lunghezza d'ancoraggio dei tasselli risulta superiore al copriferro delle barre, occorre anzitutto rappresentare a matita la disposizione delle armature di nodo (come evidenziato in fig. 6.11), quindi individuare la più agevole disposizione dei fori in modo tale che ricadano in zone prive d'acciaio, garantendo comunque l'allineamento dei supporti sulle diagonali. Tutto ciò si è tradotto in una disposizione simmetrica dei supporti rispetto all'intersezione delle diagonali con un interasse di 42 cm (fig. 6.11).

La strumentazione mediante induttivi prevede l'applicazione di due supporti per ogni strumento: un primo a cui fissare l'LVDT; un secondo a cui fissare la battuta d'appoggio per la sonda, disposti per quanto possibile in reciproco allineamento. Il tracciamento delle sagome di applicazione prevede quindi che i relativi supporti vengano provvisoriamente fissati ad un'unica asta, disposti

all'interasse prefissato ed infine avvicinati ai punti di applicazione per tracciarne i contorni; la stessa procedura verrà poi ripetuta anche in fase di incollaggio (fig. 6.7).

6.3 Applicazione dei supporti e fissaggio degli strumenti a riferimento relativo

Effettuata la tracciatura di riferimento e trattate le superfici destinate agli incollaggi si procede all'applicazione dei supporti. Poiché la polvere prodotta dall'esecuzione dei fori d'innesto dei tasselli rischierebbe di contaminare le superfici trattate, si è deciso di eseguire prima tutti gli incollaggi.

6.3.1 Applicazioni per incollaggio

L'adesivo utilizzato, tipo **X 60**, è una resina epossidica bi-componente attivata all'istante dell'applicazione mediante catalizzatore ed a rapido essiccamento (fig. 6.6); viene miscelato con una consistenza non eccessivamente fluida e cosparso sulle basi dei supporti, preventivamente allineati ad interasse su un'asta (così come descritto in fase di tracciatura), quindi il tutto viene applicato alla superficie dell'opera in corrispondenza dei riferimenti e mantenuto in pressione fino all'avvenuta essiccazione (fig. 6.7).

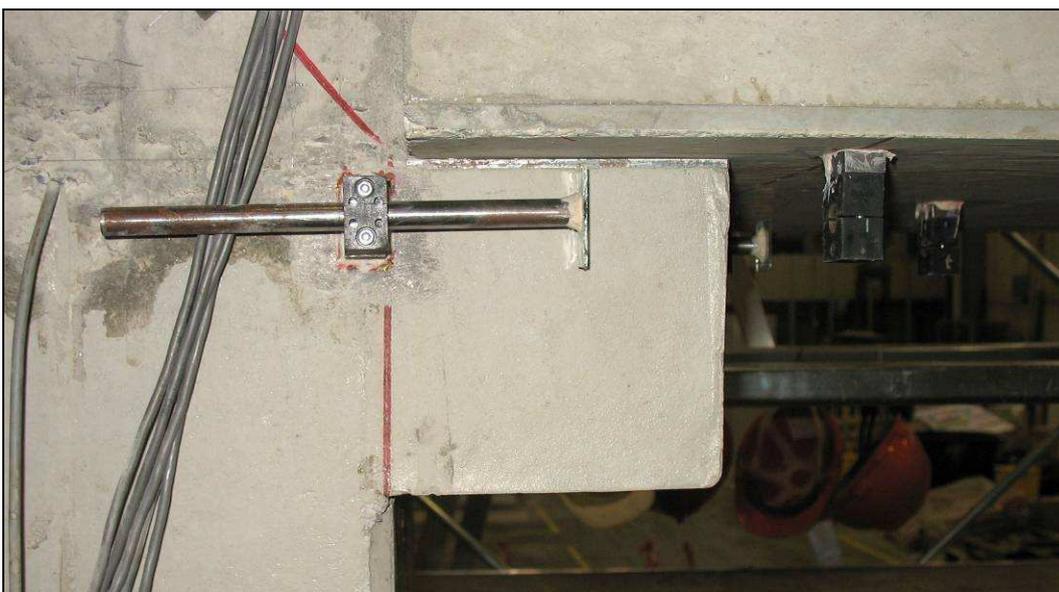


- **Figura 6.6** - Adesivo X 60: contenitore della resina (a sinistra) e bottiglietta di catalizzatore (a destra) .

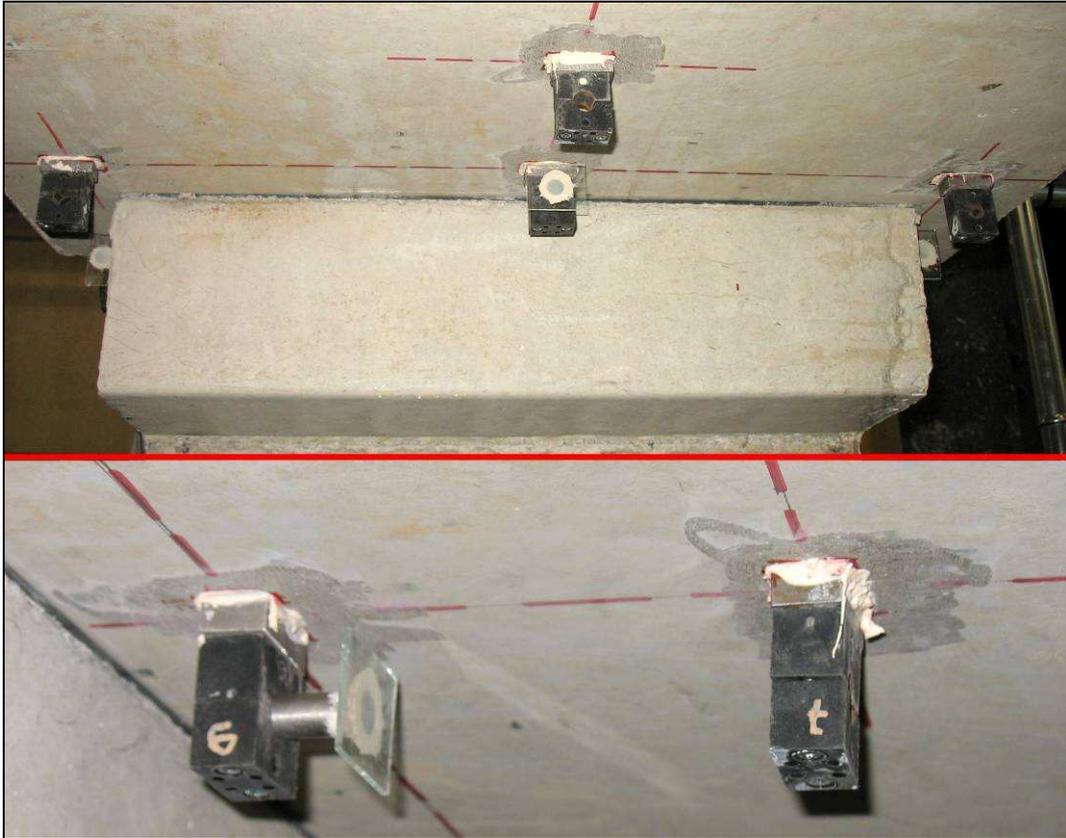


- **Figura 6.7** - Allineamento ed incollaggio dei supporti in posizione L3.

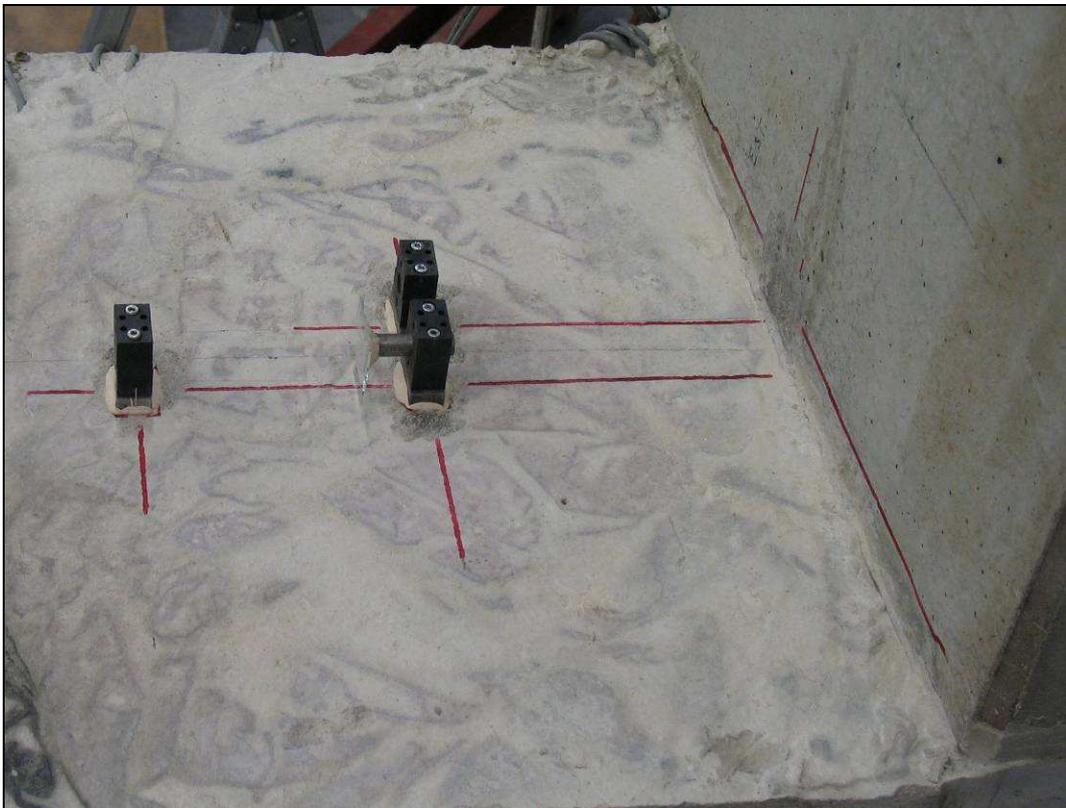
Ripetuta l'operazione per tutte quattro le coppie di supporti, in L1, L2, L3 ed L5, e per il supporto in L4, si procede all'incollaggio al pilastro della piastra in L4 ed al fissaggio delle aste di battuta. All'estremità delle aste vengono incollati, sempre mediante adesivo X 60, dei vetrini (fig. 6.8); si amplia in tal modo la superficie di contatto evitando che le rotazioni rigide degli induttivi, generate dalle deformazioni strutturali, provochino la perdita del riferimento in battuta delle sonde.



- **Figura 6.8** - Particolare dell'asta con vetrino di battuta in posizione L1.



- **Figura 6.9** - Supporti d'intradosso e particolare dell'asta con vetrino di battuta in posizione L2.

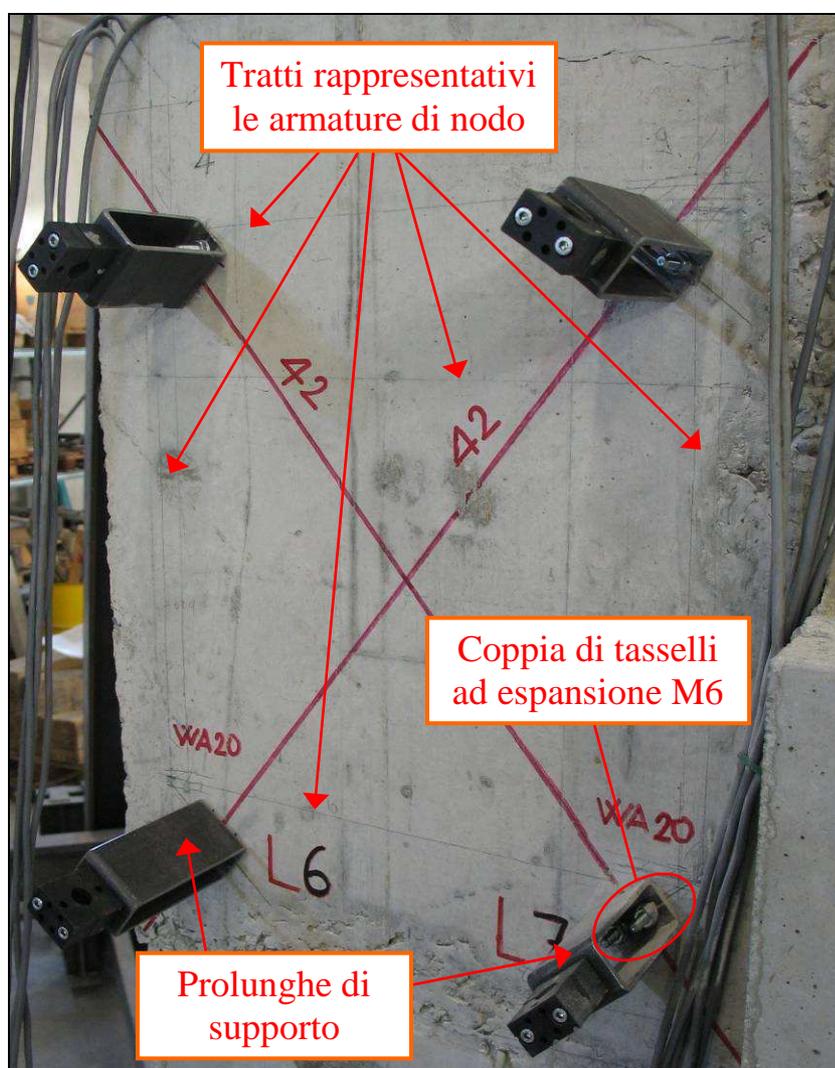


- **Figura 6.10** - Supporti d'estradosso ed asta con vetrino di battuta in posizione L4.

6.3.2 Applicazioni per tassellatura

La strumentazione del pannello di nodo e l'occhiello di aggancio per il filo inestensibile sono applicati alla superficie mediante tassellatura, prevedono quindi la realizzazione, mediante trapano a percussione, di un foro di idoneo diametro e l'applicazione dei relativi tasselli ad espansione.

I supporti della strumentazione di nodo hanno richiesto l'applicazione di quattro profilati di prolungamento (fig. 6.11), aventi lunghezze a due a due differenti, al fine di consentire la disposizione incrociata degli induttivi e di garantire un interasse di circa 10 cm tra le aste di battuta e la superficie di nodo, sufficiente a garantire il passaggio delle barre dywidag, predisposte al fine di applicare la precompressione assiale del pilastro (vedi figura 6.15).



- Figura 6.11 - Fissaggio dei supporti previa tracciatura di diagonali ed ingombro armature di nodo.

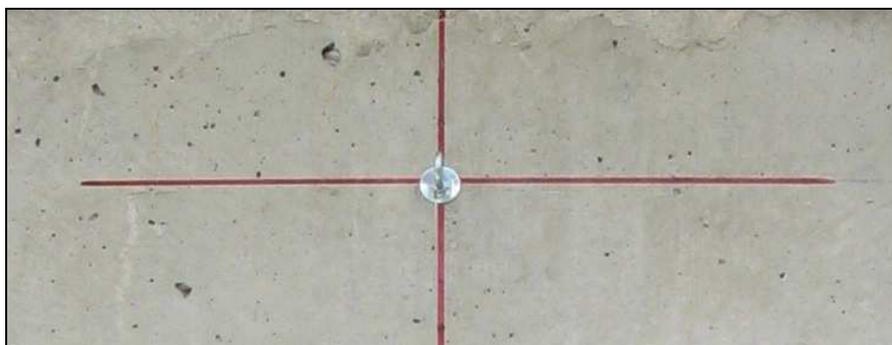
Tracciatura ed applicazione della strumentazione di superficie

Inserite le viti M6 di fissaggio nelle apposite asole ricavate alla base delle prolunghe ed applicati i tasselli ad espansione, si è proceduto all'innesto, nei fori realizzati in precedenza nel conglomerato, ed al serraggio dei tasselli fino a realizzarne il completo fissaggio per attrito. Si sono quindi fissate ai supporti le aste di riferimento munite all'estremità, mediante incollaggio, dei vetrini di battuta (fig. 6.12).



- **Figura 6.12** - Fase di fissaggio delle aste di battuta sulle diagonali di nodo.

Il tassello ad espansione M4, munito di occhiello per il collegamento del filo estensibile all'estremità della trave, viene applicato con le stesse modalità descritte per i tasselli di nodo (fig. 6.13).

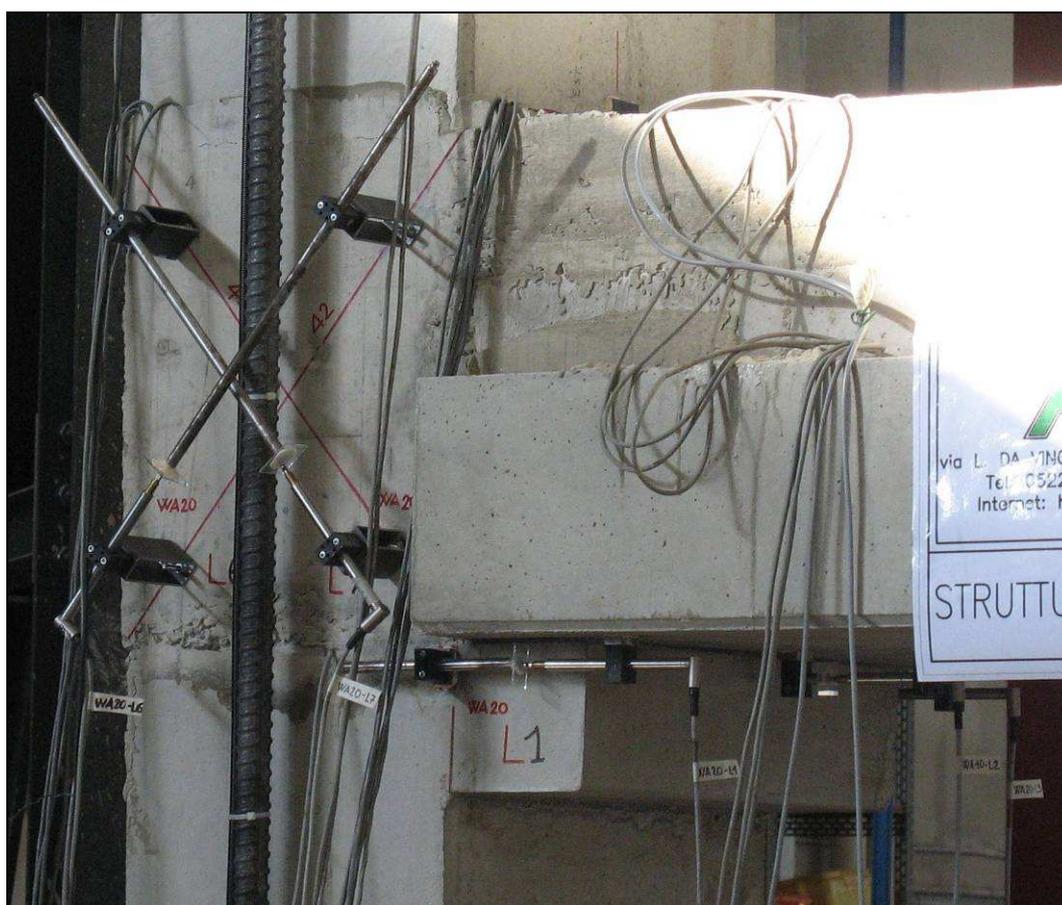


- **Figura 6.13** - Fissaggio dell'occhiello di aggancio per il filo estensibile.

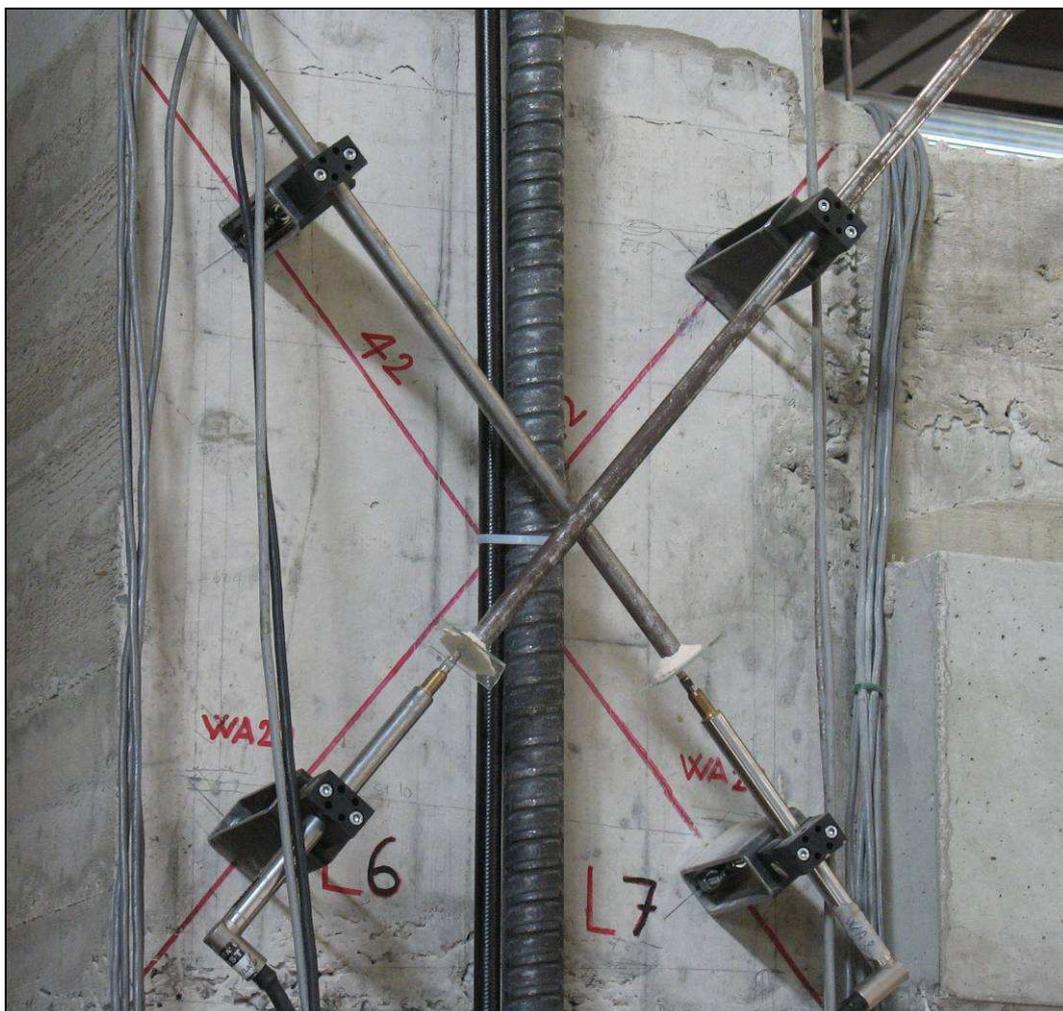
6.3.3 Fissaggio degli strumenti

Applicati i supporti alla struttura e fissate le aste di battuta non resta che etichettare gli strumenti ed inserirli negli appositi supporti. Si va a regolare sommariamente la disposizione degli LVDT cercando, dove è possibile, di centrare la posizione del fusto rispetto al supporto, quindi agendo anche sui supporti delle aste di battuta si cerca di collocare la sonda a metà corsa. Al termine della procedura si serrano, per mezzo di due viti a brugola, le ganasce dei supporti che bloccando per attrito strumenti ed aste, rendendoli solidali alla superficie del getto nel punto di applicazione. Successivamente, collegati gli strumenti al sistema di acquisizione, verrà effettuata la regolazione definitiva verificando in tempo reale la lettura digitale della corsa.

La serie di immagini che seguono rappresenta la disposizione dei 7 trasduttori di spostamento applicati direttamente alla superficie della struttura di nodo.



- Figura 6.14 - Strumentazione superficiale di nodo (vista generale).



- Figura 6.15 - Disposizione definitiva degli induttivi L6 e L7 sulle diagonali del pannello di nodo.

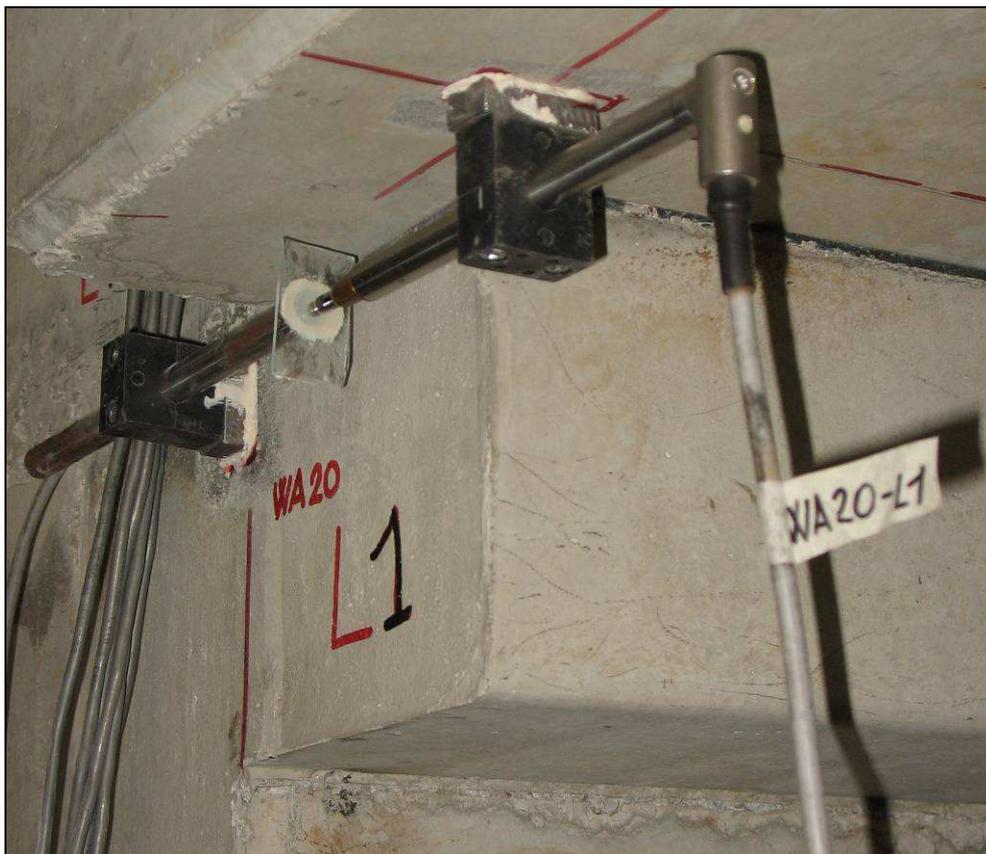
Le tipologie di induttivi utilizzati, distinguibili dal valore di corsa massima (vedi schema generale di figura 6.1), sono state scelte in base all'entità degli spostamenti relativi attesi tra i punti di applicazione alla struttura; si è fatto inoltre tesoro delle letture eseguite nel corso della prova sul nodo strutturale a quattro vie, modificando a tal proposito anche particolari applicativi delle battute di sonda.

Si spiega quindi l'utilizzo di LVDT con 20 mm di corsa massima sulle diagonali di nodo, nelle posizioni L1 ed L3 di intradosso ed in L5 all'estradosso. Per la lettura dello spostamento relativo tra la sezione del primo concio di trave ed il pilastro si è invece optato per un LVDT da 50 mm di corsa massima; considerato infatti che all'estradosso vi è una preponderanza di spezzoni tesi ed un braccio della coppia interna maggiore, si prevedono deformazioni superiori a quelle d'intradosso. Per quanto riguarda lo spostamento relativo tra la sezione estreme del secondo concio di trave ci si attendono viceversa valori ridotti; sia in L2 che in L4 si ricorre

quindi ad LVDT da 10 mm di corsa massima, dotati di una minor costante di conversione e quindi di una maggiore precisione.



- Figura 6.16 - Disposizione definitiva degli induttivi all'intradosso (vista generale).



- Figura 6.17 - Particolare dell'induttivo WA 20 applicato in L1.



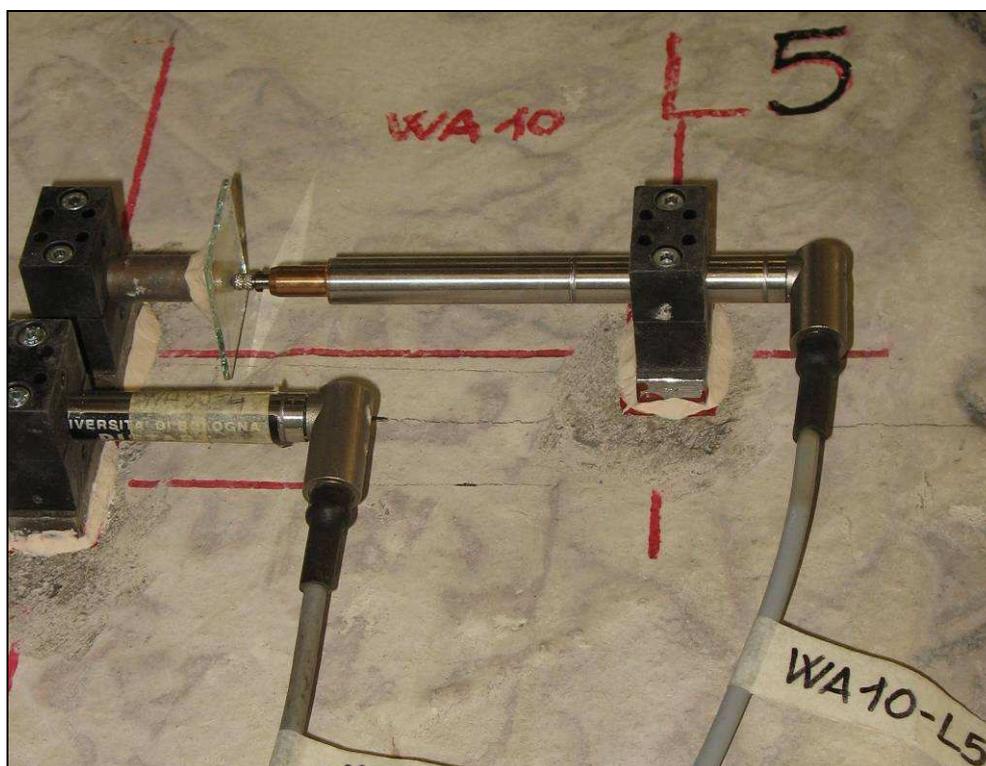
- Figura 6.18 - Particolare dell'induttivo WA 20 applicato in L3.



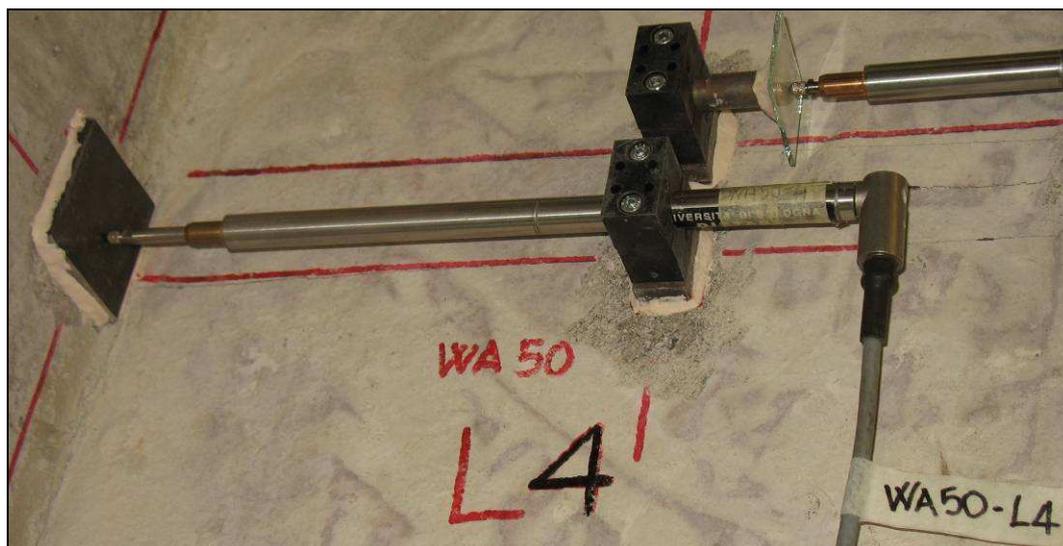
- Figura 6.19 - Particolare dell'induttivo WA 10 applicato in L2.



- Figura 6.20 - Disposizione definitiva degli induttivi all'estradosso (vista generale).



- Figura 6.21 - Particolare dell'induttivo WA 10 applicato in L5.



- Figura 6.22 - Particolare dell'induttivo WA 50 applicato in L4.

6.4 Predisposizione dei supporti e fissaggio degli strumenti a riferimento assoluto

6.4.1 Descrizione

Per completare il sistema di rilevamento degli spostamenti dell'opera prestabilito (vedi schema generale di figura 6.1) occorre installare la bobina di filo estensibile, agganciandone il capo del filo all'occhiello predisposto all'estremità della trave, e posizionare l'induttivo L8 WA 50 che andrà a battuta sulla sommità del pilastro. Questi due strumenti, a differenza dei precedenti, consentono di rilevare componenti di spostamento assolute in determinate zone dell'opera, poiché fissati a supporti solidali al pavimento del laboratorio.

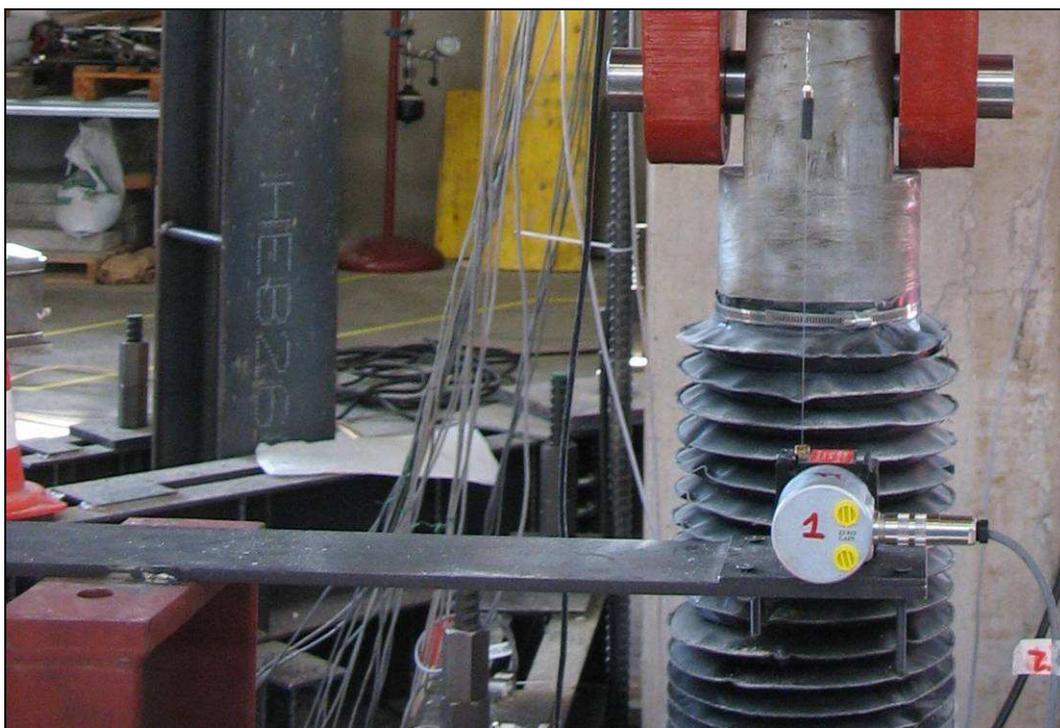
La bobina di filo estensibile è prodotta dalla **MICRO-EPSILON**, modello **WDS-300-P60** (fig. 6.23), ha un intervallo di misurazione di 300 mm ed è dotata all'estremità del filo di uno spillo di sicurezza munito di snodo per il fissaggio.

La rilevazione dello spostamento che l'estremità della trave subisce al variare del carico di prova è un dato importante che consente di quantificare la rotazione indotta dalla deformazione del complesso nodo-trave. Poiché l'applicazione del carico induce inevitabili cedimenti pseudo elastici della struttura di contrasto, e quindi una rotazione rigida del complesso trave-pilastro, anche l'estremità della trave subirà spostamenti rigidi che vanno ad "inquinare" la lettura a filo.

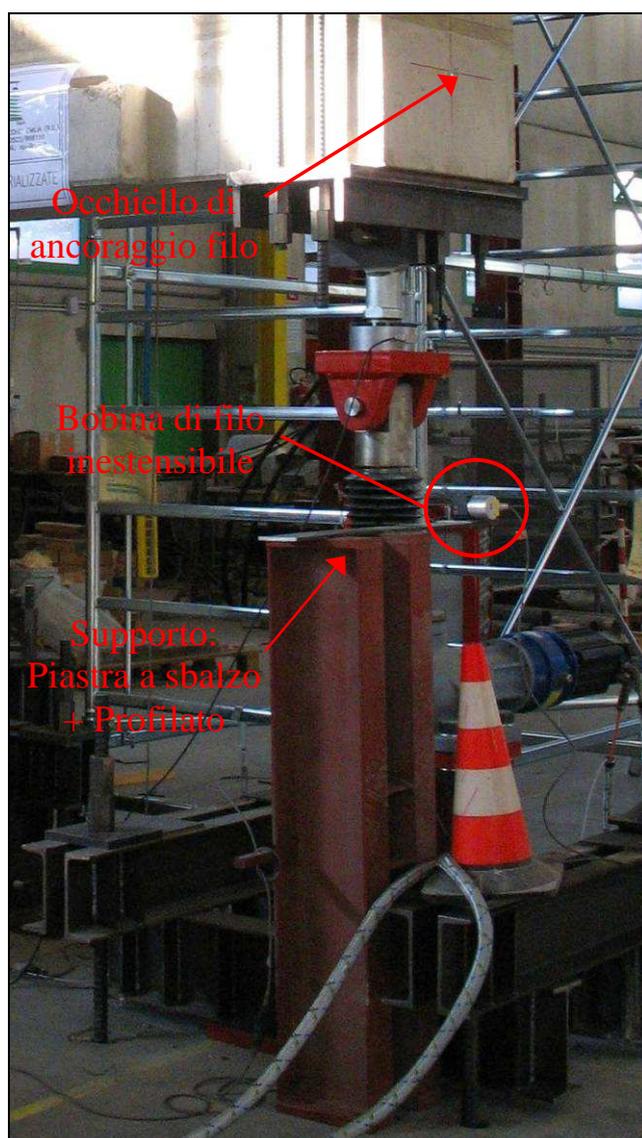
L'applicazione dell'induttivo L8 WA 50 serve a rilevare lo spostamento della sommità del pilastro ed a ricavare quindi, mediante semplice proporzione, lo spostamento rigido dell'estremità della trave (vedi dettagli riportati al par. 9.2.2). Risulta chiaro quindi che *l'utilizzo abbinato dei due strumenti consente di risalire al valore di spostamento d'estremità della trave al netto delle rotazioni rigide.*

6.4.2 Applicazione del filo estensibile

La bobina di filo estensibile viene disposta sulla verticale passante per l'occhiello di fissaggio, a circa 110 cm di distanza, per mezzo di una piastra a sbalzo saldata alla sommità di un profilato d'acciaio (fig. 6.24). Il profilato di supporto, collocato all'interno degli ancoraggi a terra del pistone di spinta, viene posato stabilmente al pavimento del laboratorio grazie alla realizzazione di tre battute, ricavate sulla base di appoggio mediante punti di saldatura livellati per smerigliatura. La bobina è munita di una base d'appoggio che viene serrata alla piastra di supporto mediante quattro viti (fig. 6.23).



- **Figura 6.23** - Particolare della bobina estensibile: collegamento alla mensola di supporto mediante viti.



- Figura 6.24 - Profilato di supporto al filo estensibile poggiato direttamente a pavimento.

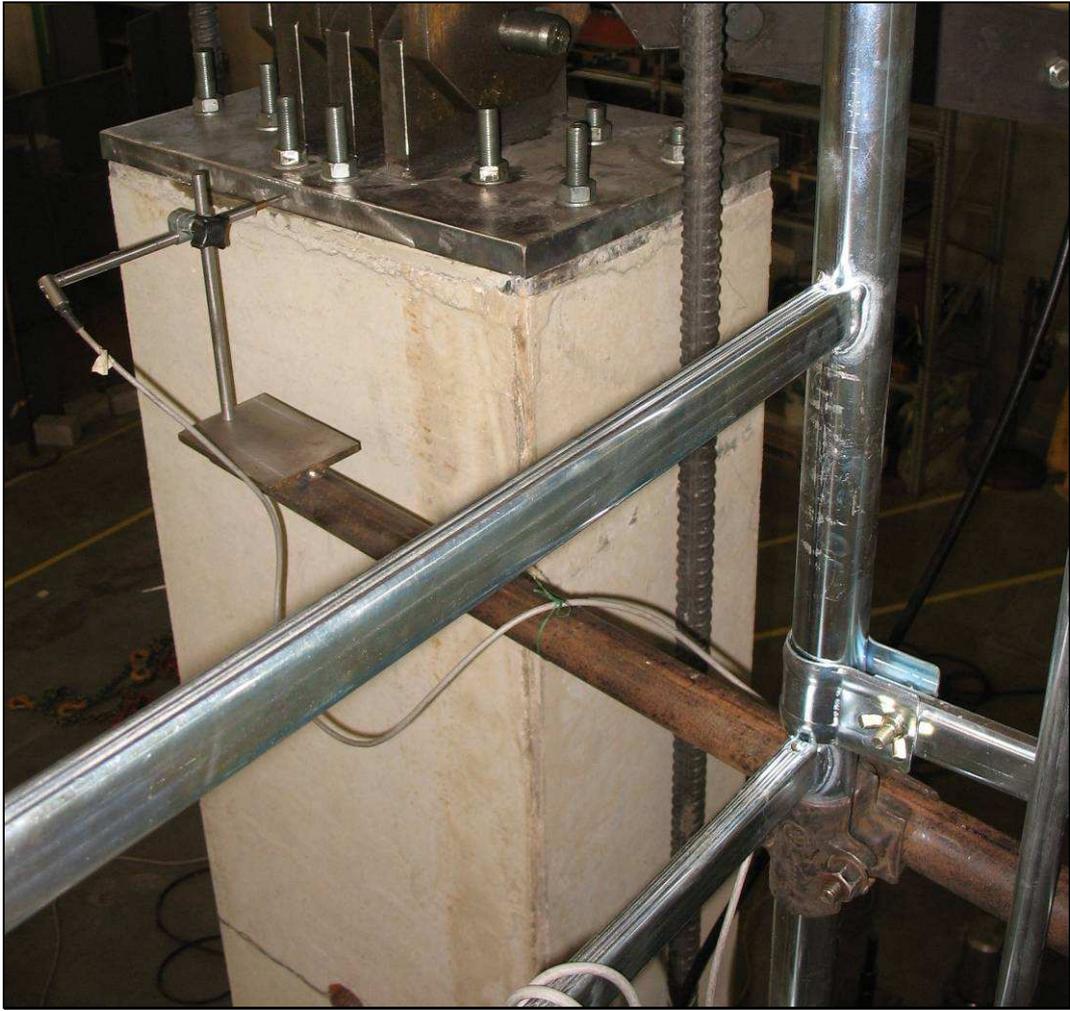
6.4.3 Applicazione dell'L8 WA 50

Il punto di rilevazione dell'induttivo L8 è stato fissato in corrispondenza del centro della piastra di base dello snodo cilindrico di sommità, imbullonata al pilastro (fig. 6.26), posto a 430 cm di altezza dal pavimento. Il sistema di supporto in grado di fissare la battuta dello strumento a tale quota è composto da una prolunga di sostegno fissata, per mezzo di morsetto a vite, al montante del trabattello in dotazione al laboratorio (fig.6.25); la prolunga di sostegno è composta da un'asta con supporto a morsetto innestata in una piastra saldata all'estremità del tubo ammorsato al tra battello (fig. 6.26).

Onde evitare accidentali spostamenti in corso di rilevazione, il tra battello è stato sospeso sugli appositi appoggi a vite.



- Figura 6.25 - Posizionamento dell'induttivo in L8 mediante trabattello e prolunga di supporto .



- **Figura 6.26** - Induttivo L8 WA 50: Particolare della prolunga di supporto ammorsata al trabattello.

Capitolo 7

SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI

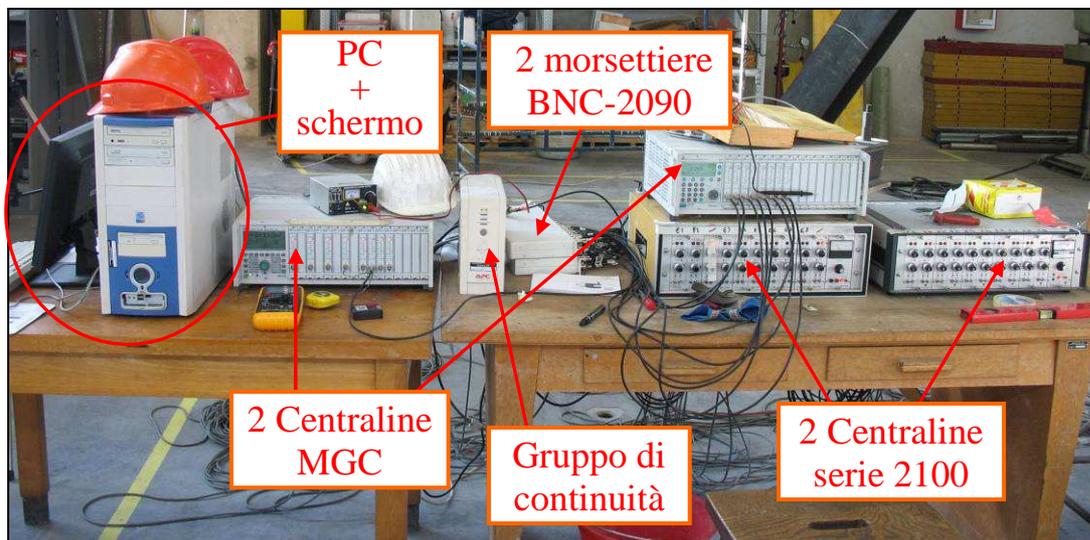
In questo capitolo viene descritto il sistema di acquisizione dati, grazie al quale il segnale degli strumenti, una volta rilevato ed alimentato, viene convertito in misura fisicamente significativa e quindi registrato in un file dati con prefissata frequenza. Nel paragrafo 7.2 vengono descritte tutte le apparecchiature atte all'acquisizione ed alla tutela della continuità del segnale elettrico proveniente dagli strumenti di misura, elencandone le caratteristiche distintive e descrivendone, nel caso delle centraline, le modalità di settaggio. Il paragrafo 7.3 si occupa, invece, del software di acquisizione, descrivendo, anzitutto, l'ambiente di sviluppo in cui è stato compilato (LabVIEW); si sono quindi delineati i dettagli costitutivi dei programmi (ovvero sottoprogrammi) realizzabili in LabVIEW, denominati strumenti virtuali (V.I.). Si è infine descritto il programma realizzato per l'acquisizione dati della prova in esame, approfondendone le modalità di impostazione e l'interfaccia delle rilevazioni, grazie all'ausilio di schermate rappresentanti lo schema a blocchi di compilazione.

7.1 Generalità

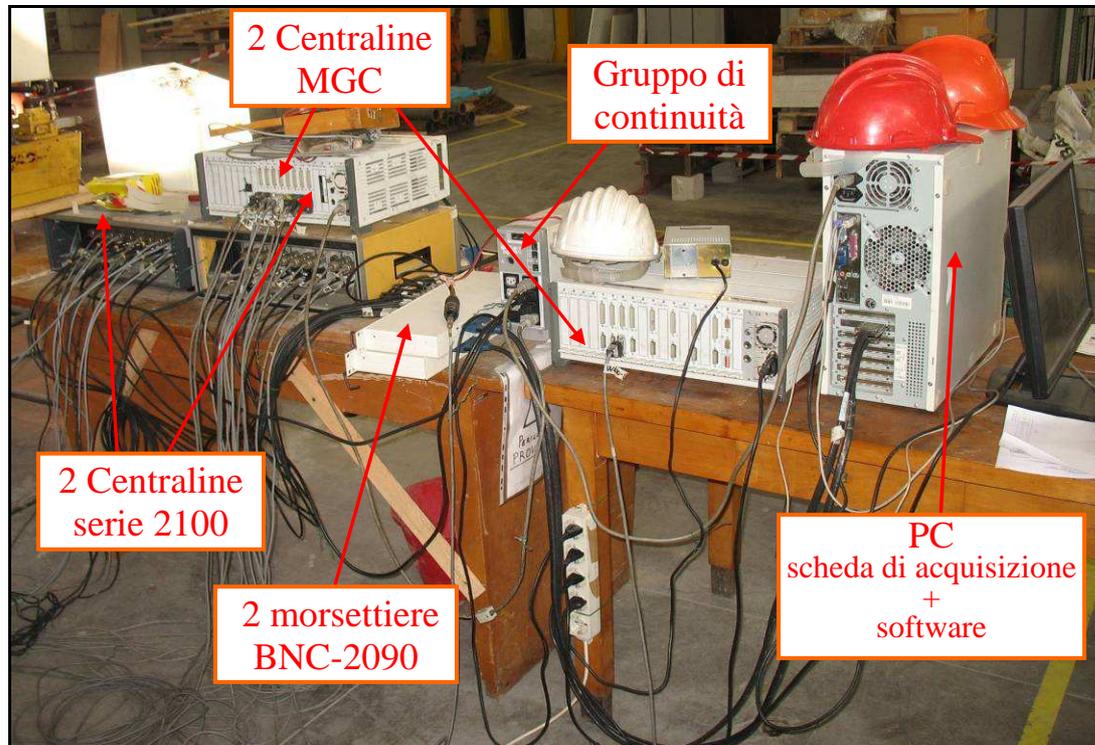
Al termine delle fasi preparatorie descritte nei precedenti capitoli, gli strumenti installati a monitoraggio di forze, deformazioni e spostamenti applicati al nodo strutturale risulteranno nel complesso **29**: **1** cella di carico, **1** filo estendibile, **1** coppia di martinetti cavi, **18** estensimetri e **8** LVDT. Occorrerà quindi approntare un sistema in grado di alimentare tali strumenti, condizionarne il segnale elettrico acquisito e registrare i dati ottenuti dalle opportune conversioni di tali segnali in grandezze fisiche.

La prova di caricamento ciclico in esame, di tipo istantaneo, prevede una frequenza di rilevazione delle letture tale da escluderne la registrazione manuale; il sistema di acquisizione dei dati dovrà risultare pertanto totalmente automatizzato, tramite la gestione di un software appositamente programmato, limitando l'intervento manuale alla sola regolazione dei parametri di acquisizione.

L'insieme delle apparecchiature necessarie a realizzare l'intero sistema di acquisizione è rappresentato, nelle viste frontale e posteriore, dalle figure 7.1 e 7.2; l'immagine 7.2, in particolare, evidenzia il notevole numero di cavi (e quindi strumenti) collegati in input alle centraline, e mostra inoltre come i segnali rilevati siano poi fisicamente convertiti in due soli ingressi al PC di acquisizione.



- Figura 7.1 - Sistema di acquisizione: vista frontale.



- Figura 7.2 - Sistema di acquisizione: vista posteriore.

7.2 Apparecchiature di acquisizione dei segnali

7.2.1 VISHAY serie 2100

Si tratta di una centralina analogica multi-canale (al massimo 10), prodotta dalla **VISHAY Measurements group**, in grado di condizionare ed amplificare il segnale di strumenti a funzionamento esclusivamente resistivo [9]. Nella prova in esame sono state utilizzate due centraline della serie 2100 ma di differente modello :

1. Centralina con *modulo di alimentazione* modello **2110A** e *10 canali di acquisizione*, suddivisi in: *4 moduli di amplificazione* modello **2120A**, a 2 canali di acquisizione ciascuno; *1 moduli di amplificazione* modello **2120B**, a 2 canali di acquisizione (fig. 7.3);
2. Centralina con *modulo di alimentazione* modello **2110B** e *10 canali di acquisizione*, suddivisi in *4 moduli di amplificazione* modello **2120B**, a 2 canali di acquisizione ciascuno (fig. 7.4).



- Figura 7.3 - Vista frontale e posteriore della centralina 2110A.



- Figura 7.4 - Vista frontale e posteriore della centralina 2110B.

I moduli di alimentazione sono muniti di un interruttore di alimentazione dell'intera centralina e di un sistema di monitoraggio delle tensioni presenti su ciascun canale alimentato, costituito da una manopola di selezione del circuito monitorato e da un voltmetro analogico che ne fornisce la tensione (con scala da 0 a 12 Volt). La manopola ha 12 selezioni possibili: una per monitorare l'eccitazione al ponte in ognuno dei 10 canali disponibili (selezioni 1-10), una per monitorare la tensione della corrente continua di input (DC) e l'ultima posizione legge invece la tensione della corrente alternata che alimenta la centralina (AC) (fig. 7.5).



- **Figura 7.5** - Modulo di amplificazione (sinistra) e modulo di alimentazione (destra).

La parte frontale dei *moduli di amplificazione* è munita, per ciascuno dei due canali ospitati, di (vedi fig. 7.5):

- una manopola di bilanciamento resistivo del ponte, dotata di sistema di bloccaggio, con un intervallo di regolazione di $\pm 2.000 \mu\epsilon$, incrementabile, mediante un commutatore interno, a $\pm 4.000 \mu\epsilon$ o $\pm 6.000 \mu\epsilon$;
- una coppia di led di segnalazione per il bilanciamento all'amplificatore, il bilanciamento al ponte ed il segno della deformazione letta (trazione o compressione);
- una manopola di regolazione del guadagno all'amplificatore che, associata ad una vite di regolazione del moltiplicatore di guadagno, consente una variazione tra 1 e 2100 volte;

- due viti di regolazione: una agisce sulla tensione di eccitazione al ponte, l'altra sullo zero dell'amplificatore. La lettura del valore di tensione viene effettuata sul voltmetro del modulo di alimentazione, previo posizionamento della manopola di selezione sul canale in esame; la regolazione dello zero all'amplificatore fa riferimento ai led di bilanciamento;
- un interruttore di on-off dell'eccitazione al ponte del canale corrispondente;
- un interruttore di calibrazione a tre posizioni in grado di far slittare il riferimento al bilanciamento di ponte. Si va ad alterare il valore delle resistenze installate, simulando deformazioni impresse di $\pm 1.000 \mu\epsilon$ con $K_G = 2$.

Sulla parte posteriore dei *moduli di amplificazione* sono presenti le connessioni di ingresso ed uscita del segnale di ciascuno dei due canali ospitati. La connessione d'ingresso, realizzata con connettori del tipo *commital IPT*, riceve l'estremità del cavo di collegamento del generico strumento. La connessione in uscita è realizzata con connettori a *piattine* sui moduli **2120A**, e con connettori *BNC* sui moduli **2120B**; ad essa viene collegato il cavo che trasferisce il segnale condizionato alla MORSETTIERA (figg. 7.3 e 7.4).

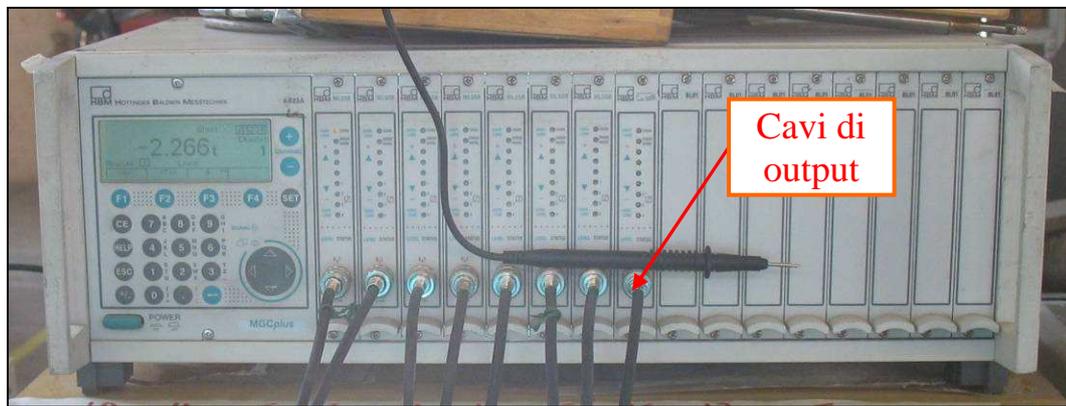
7.2.2 MGCplus

Si tratta di una centralina digitale multi-canale (al massimo 8), prodotta dalla **HBM**, in grado di amplificare e condizionare il segnale di strumenti a funzionamento sia resistivo che induttivo [10]. Nella prova in esame sono state utilizzate due centraline della serie **MGCplus**: modello **AB12** la prima, modello **AB22A** la seconda; entrambe risultano praticamente munite delle medesime caratteristiche.

Analogamente a quanto visto per le 2100, anche la MGCplus è costituita da 16 *moduli di misura monocanale*, un modulo di acquisizione ed uno di uscita per ogni canale, collegati ad un *modulo di alimentazione e gestione*; la massima frequenza di rilevazione è di 19,2 KHz per ogni canale, con una risoluzione di 20 bit.

Le regolazioni possibili sono analoghe a quelle descritte per le 2100, nel caso delle MGC risultano però tutte digitalizzate; una tastiera di selezione consente di

selezionare il modulo in esame e di variarne i parametri, mentre uno schermo LCD consente di visualizzare le digitalizzazioni effettuate ed i valori letti. La possibilità di introdurre la costante di conversione e l'unità di misura relativa consente di visualizzare il valore definitivo della grandezza letta (es. carico in tonnellate per l'acquisizione da una cella di carico) (fig. 7.6).



- Figura 7.6 - Centralina MGCplus.

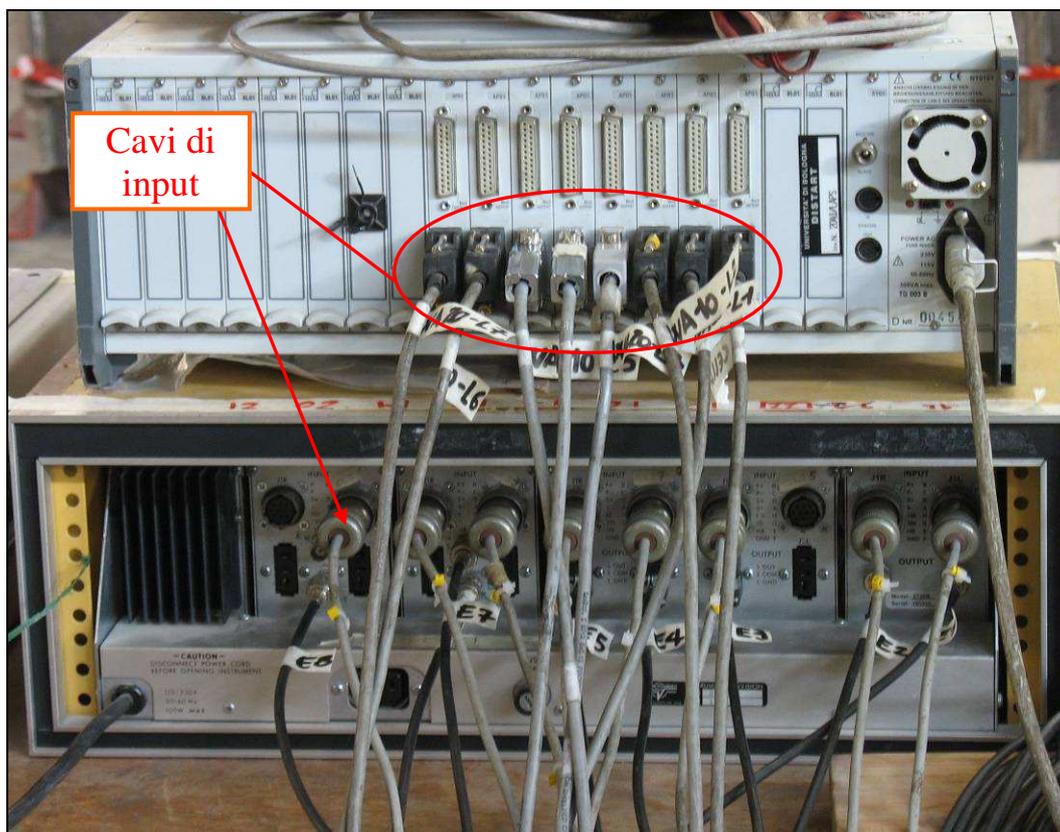
Le potenzialità offerte dalla digitalizzazione del segnale consentono inoltre il potenziamento degli interventi di condizionamento del segnale (filtraggio, commutazione, multiplexing ecc).



- Figura 7.7 - Connessione degli strumenti alla centralina 2110B.

L'ingresso del segnale avviene nella parte frontale del modulo di acquisizione, con la connessione dell'estremità del cavo di collegamento del generico strumento, mediante connettori *BNC*, mentre dalla parte posteriore del modulo di uscita si ha la connessione del cavo che trasferisce il segnale alla MORSETTIERA.

Le immagini 7.7 e 7.8 rappresenta il particolare delle connessioni di input ed output delle centraline, realizzate nella configurazione di prova.



- Figura 7.8 - Connessione degli strumenti alle centraline MGC (sopra) e 2110A (sotto).

7.2.3 Morsettiera

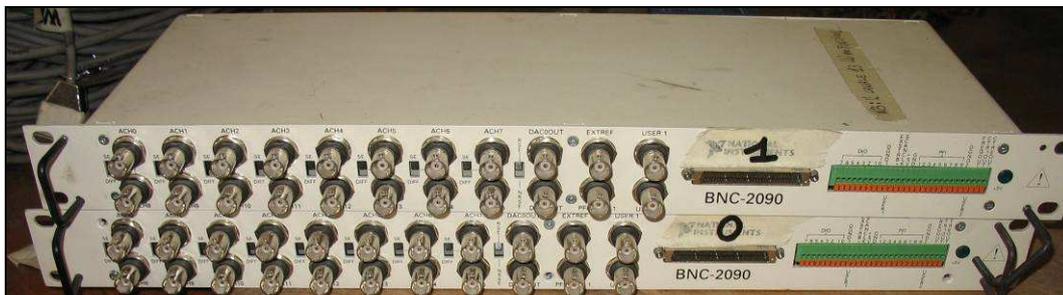
Tutti i segnali, rilevati dagli strumenti ed in uscita dalle centraline di condizionamento, devono giungere alla scheda di acquisizione del PC sul quale è installato il software di acquisizione e gestione dei dati. La morsettiera ha la funzione di ricevere in input i cablaggi provenienti dalle centraline e di convogliarne i dati in un'unica uscita, collegata a sua volta al PC.

Nella prova ciclica si sono utilizzate due morsettiera modello **BNC- 2090**, prodotte dalla **National Instruments** (fig.7.9) [11], ognuna delle quali è dotata:

- nella parte frontale, di *16 canali in ingresso* e *6 canali in uscita* (per l'eventuale deviazione del segnale);
- nella parte posteriore, di *1 connessione di uscita* di sintesi dei segnali acquisiti.

Il cavo seriale che convoglia le letture sintetizzate al PC è del tipo *NI SHC68*, mentre i connettori frontali sono del tipo *BNC*. Risulta importante chiudere,

mediante appositi tappi di isolamento, i connettori di input non utilizzati, onde evitare che il rischio dell'”effetto antenna” vada ad inquinare il segnale dei canali in connessione.



- Figura 7.9 - Coppia di morsettiere BNC-2090 utilizzate.

7.2.4 Gruppo di continuità

Le strumentazioni elettroniche, componenti il sistema di acquisizione, vengono collegate alla rete di alimentazione tramite un gruppo di continuità; si evita in tal modo il rischio di interruzione nell'acquisizione dei dati o di danneggiamento delle strumentazioni a causa di interruzioni o sbalzi di tensione.

Il gruppo di continuità utilizzato, prodotto dalla **APC** modello **Back-UPS RS 800**, è caratterizzato da: 4 prese di alimentazione in uscita; una tensione, sia in ingresso che in uscita, di 230 V; una potenza reattiva di 540 W ed una potenza apparente di 800 VA (fig. 7.10) [12].

Poiché le prese di alimentazione disponibili non sono sufficienti al collegamento di tutte le apparecchiature, si è pertanto preferito collegarvi il PC, le due centraline 2100 e la centralina MGC avente la preponderanza degli LVDT collegati; si è inteso preservare in tal modo la continuità nell'acquisizione dei dati di maggior interesse.



- Figura 7.10 - Gruppo di continuità Back-UPS RS 800: vista frontale e posteriore.

7.3 Software di acquisizione dati

Le letture strumentali, condizionate dalle centraline di acquisizione e convogliate dalle morsettiere, giungono alla scheda di acquisizione del calcolatore per essere convertite in dati e registrate su apposito file di output; il software di acquisizione dati utilizzato nella prova di caricamento ciclico del nodo d'angolo, denominato 32-can nodo APE 3vie 091209.vi, è stato sviluppato nell'ambiente di programmazione denominato **LabVIEW 8.2**.

7.3.1 Descrizione di LabVIEW

LabVIEW (abbreviazione di *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) è l'ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione visuale di **National Instruments**; tale linguaggio di programmazione si distingue dai linguaggi tradizionali in quanto grafico, ed è per tale motivo denominato *G-Language* (Graphic Language). Un programma o sottoprogramma G, definito **V.I.** (*Virtual Instrument*), non esiste sotto forma di testo, ma può essere salvato solo sottoforma di file binario, visualizzabile e compilabile esclusivamente da LabVIEW.

La definizione di strutture dati ed algoritmi avviene mediante icone ed altri oggetti grafici, ognuno dei quali incorpora determinate funzioni, uniti da linee di collegamento (*wire*). Si viene in tal modo a formare una sorta di diagramma di

flusso; una rappresentazione logica in cui la sequenza di esecuzione è definita e rappresentata dal flusso dei dati stessi attraverso i fili monodirezionali che collegano i blocchi funzionali, e che viene denominata quindi *dataflow* (flusso di dati). Poiché i dati possono anche scorrere in parallelo, attraverso blocchi e fili non consecutivi, il linguaggio realizza spontaneamente il multithreading senza bisogno di richiedere esplicita gestione da parte del programmatore.

Altra caratteristica distintiva è la velocità nella realizzazione del software, limitandosi spesso al semplice collegamento di blocchi già pronti, grazie alla vasta libreria di funzioni predefinite e driver di gestione dell'hardware; inoltre, la completa compatibilità con i modelli dei più importanti costruttori di strumenti programmabili e schede di acquisizione, garantisce l'ottima versatilità di utilizzo dei programmi realizzati in LabVIEW.

7.3.2 Dettagli dei V.I.

Nell'ambiente di sviluppo, il Virtual Instrument risulta costituito da tre componenti principali:

- il *pannello frontale*;
- lo *schema a blocchi*;
- il *riquadro connettori*.

7.3.2.1 Pannello Frontale

Il pannello frontale è l'interfaccia utente del V.I.. Viene realizzato per mezzo di *controlli e indicatori* che costituiscono i terminali interattivi d'ingresso e d'uscita, rispettivamente; tali componenti sono ben più numerosi e complessi dei widget normalmente forniti dal sistema operativo.

I controlli sono matrici, manopole, potenziometri, pulsanti, quadranti e molti altri ancora; simulano i dispositivi d'ingresso degli strumenti e forniscono dati allo schema a blocchi del V.I..

Gli indicatori sono grafici, tabelle, LED, termometri e molti altri; simulano i dispositivi d'uscita degli strumenti e visualizzano i dati che lo schema a blocchi acquisisce o genera.

7.3.2.2 Schema a blocchi

Lo schema a blocchi è il diagramma di flusso che rappresenta il codice sorgente in formato grafico. Gli oggetti del pannello frontale, visti in precedenza, appaiono come *terminali* di ingresso o uscita nello schema a blocchi.

Gli oggetti dello schema a blocchi comprendono:

- *terminali*;
- *funzioni*;
- *costanti*;
- *strutture*;
- chiamate ad altri V.I. (*sub V.I.*);
- *fili* di collegamento;
- *commenti testuali*.

Le *funzioni* sono chiamate esse stesse V.I., anche se non hanno un loro pannello e un loro schema a blocchi. Possono avere un numero indefinito di ingressi e di uscite, come ogni V.I..

Le *strutture* eseguono il controllo di flusso di base; ad esempio il *ciclo for* è rappresentato da un contenitore quadrato che ripete N volte la porzione di schema a blocchi che si trova al suo interno (vedi particolare fig. 7.15).

I *fili* di collegamento possono trasportare teoricamente qualunque mole di dati di qualunque tipo, anche aggregati (*bundle*) definiti dal programmatore. Il colore e lo spessore del filo cambia di conseguenza per permetterne una facile identificazione; ad esempio gli interi scorrono su fili *blu* e le stringhe su fili *rosa*.

Lo schema a blocchi può essere reso visibile anche durante l'esecuzione del programma; aspetto molto utile in fase di debug, poiché a richiesta risulta possibile visualizzare con un'animazione al rallentatore il movimento dei dati lungo i fili ed il loro valore momentaneo.

7.3.2.3 Riquadro connettori

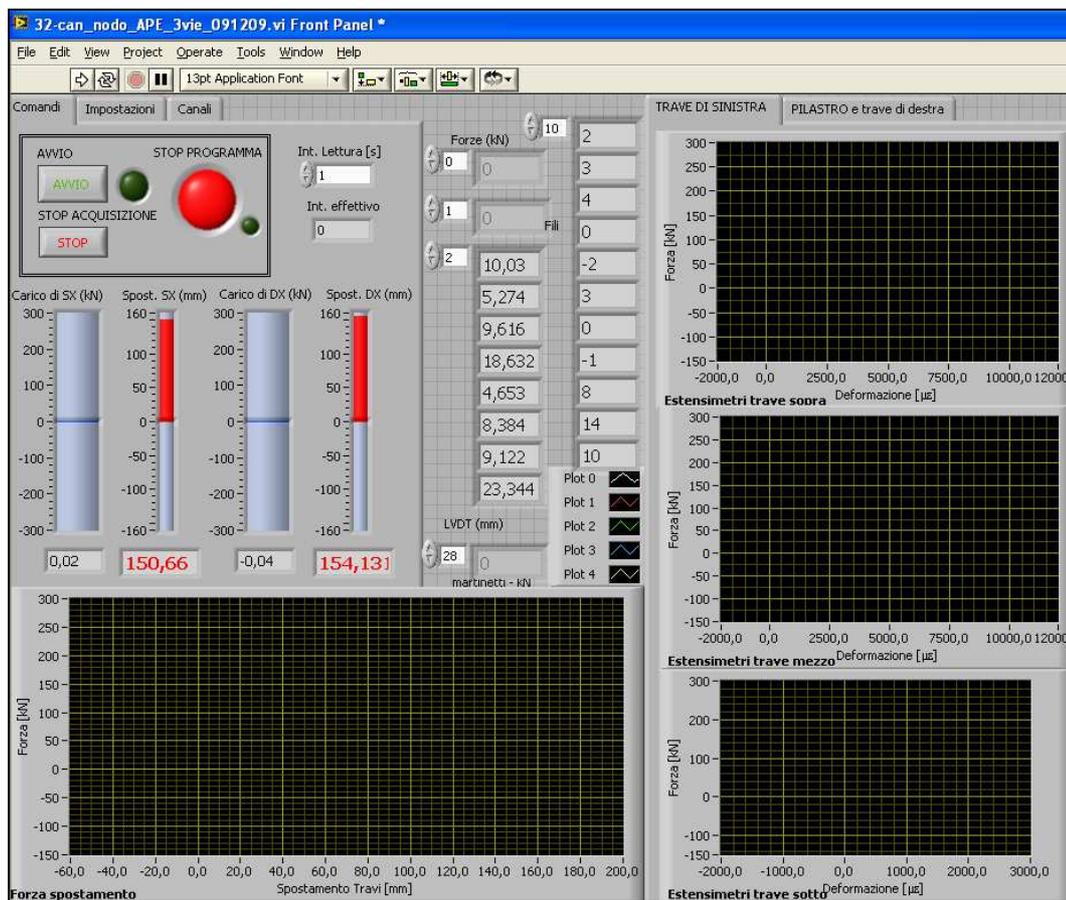
Ogni V.I. può essere a sua volta utilizzato come *sub V.I.* (o sotto V.I.) e comparire all'interno dello schema a blocchi di altri V.I., proprio come una qualsiasi funzione, e come tale può avere ingressi ed uscite a cui collegare le linee di flusso. Il riquadro connettori serve appunto a definire qual è l'aspetto del V.I. quando appare come subV.I. in uno schema a blocchi: che grafica di rappresentazione ha l'icona, ma soprattutto come e dove vanno collegate le linee per permettere il passaggio dei

dati. In genere con pochi click ogni controllo può essere associato ad un ingresso e ogni indicatore può essere associato ad un'uscita.

7.3.3 Software 32-can_nodo_APE_3vie_091209.vi

Il programma utilizzato nell'acquisizione dati delle prova ciclica in esame, denominato 32-can_nodo_APE_3vie_091209, ha un'impostazione di base a 32 canali di acquisizione, realizzata per gestire le strumentazioni necessarie alla realizzazione di prove su nodi a tre e quattro vie.

Il pannello frontale del Virtual Instrument realizzato contiene una serie di caselle di input e di indicatori, raggruppati in tre cartelle (*Comandi*, *Impostazioni*, *Canali*), che consentono l'interfaccia con lo schema a blocchi (figg. 7.11, 7.13 e 7.14).

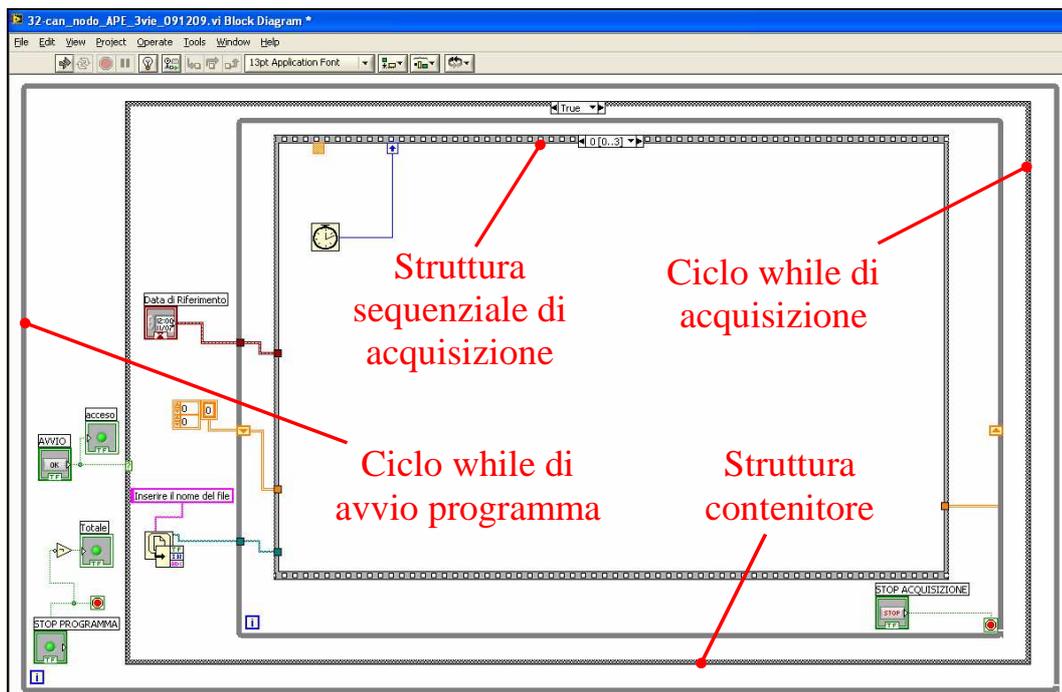


- **Figura 7.11** - Schermata della cartella Comandi del Pannello frontale contenente le caselle di input per le costanti di conversione e le rappresentazioni grafiche dinamiche delle misure rilevate.

Lo schema a blocchi, rappresentativo del codice binario di programmazione, ha un'organizzazione di controllo del flusso di base suddivisa in quattro strutture, rappresentate in figura 7.12:

- una prima struttura è costituita da un *ciclo while* che viene avviato all'apertura del file di codice, dando inizio al programma ma non all'acquisizione, e bloccato tramite la condizione di loop interfacciata dal tasto rosso di "STOP PROGRAMMA" posto nella cartella *comandi* del pannello di controllo (fig. 7.11).;
- una seconda struttura (*Case Structure*), inclusa nel ciclo while di avvio, racchiude due contenitori: nel primo, corrispondente alla selezione "true", vi è il vero e proprio ciclo di acquisizione; mentre il secondo, corrispondente alla selezione "false", è vuoto. All'avvio del programma la selezione è automaticamente impostata su false, quindi il programma esegue il *ciclo while* senza compiere nessuna istruzione; agendo sul tasto "AVVIO" del pannello di controllo, interfacciato alla selezione true, si attiva di fatto l'acquisizione dati, attribuendo un nome al file d'acquisizione ed impostando lo zero come registrazione di partenza;
- una terza struttura è costituita dal *ciclo while* che gestisce l'acquisizione dati; attivato, come visto in precedenza, dal tasto "AVVIO" ed interrotto dal tasto "STOP ACQUISIZIONE", entrambi interfacce grafiche del pannello di controllo. Il file di registrazione dati ha una struttura matriciale, con una colonna per ogni tipologia di lettura effettuata ed una riga per ogni ciclo di registrazione. Il primo ciclo parte con matrice di default nulla, e termina con la registrazione del vettore di dati acquisiti come prima riga di registrazione; al completamento di ogni ciclo while successivo, il corrispondente vettore di valori acquisito verrà registrato come riga aggiuntiva nella matrice dei dati;
- una quarta struttura (*Stacked sequence structure*), interamente contenuta all'interno del *ciclo while* di acquisizione, ha una funzione esclusivamente grafica, permettendo infatti di rappresentare lo schema a blocchi su quattro differenti schermate numerate e disposte in

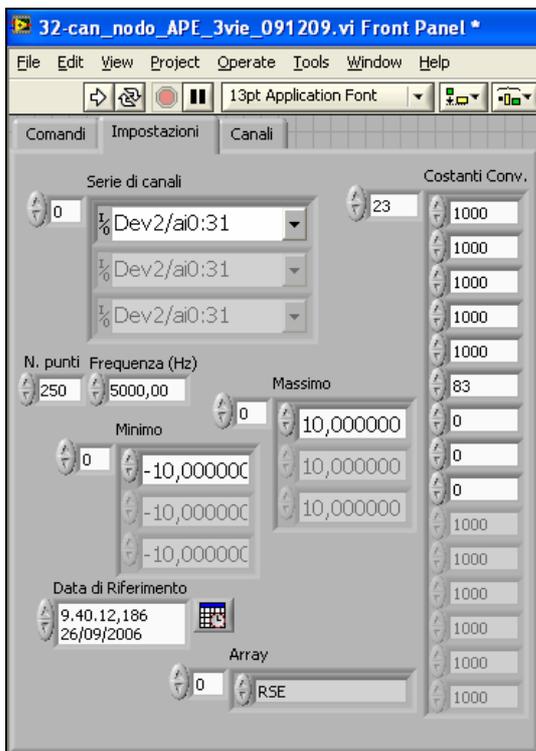
sequenza. Ogni ciclo di acquisizione esegue le funzioni dello schema a blocchi rispettando l'ordine crescente della sequenza (0,1,2,3).



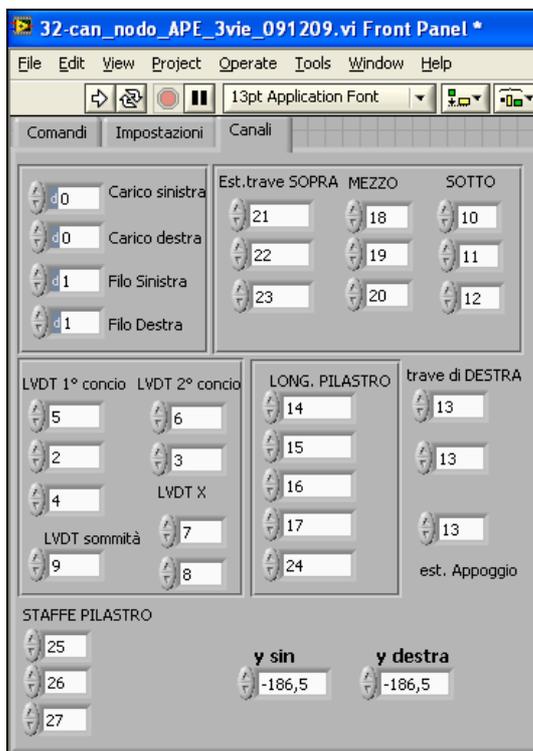
- **Figura 7.12** - Suddivisione in Strutture dello Schema a Blocchi del codice sorgente.

Gli input digitati dall'interfaccia delle cartelle *Impostazioni* e *Canali* (figg. 7.13 e 7.14), presenti nel pannello frontale, vanno a settare i subV.I. che compongono lo schema a blocchi.

In particolar modo i valori introdotti nella cartella *Impostazioni* vanno a settare la porzione nevralgica del diagramma che si occupa della definizione dell'intensità di voltaggio del segnale analogico e della sua digitalizzazione. Occorre anzitutto indicare il percorso sorgente della serie di segnali in lettura (ovvero la scheda di acquisizione dati collegata all'output della morsettiera), quindi la frequenza di acquisizione ed il numero di letture su cui eseguire la media in acquisizione (rispettivamente 5 KHz e 250 punti, fig. 7.13). Si indica dunque il valore massimo e minimo che ci si attende come voltaggio dei segnali in ingresso (espresso in Volts) e si seleziona il tipo di array (lista), ovvero la modalità di acquisizione dell'input strumentale; nel caso in esame la selezione RSE (Referenced Single-Ended mode) corrisponde a mettere a massa il segnale analogico rilevato ed amplificato.

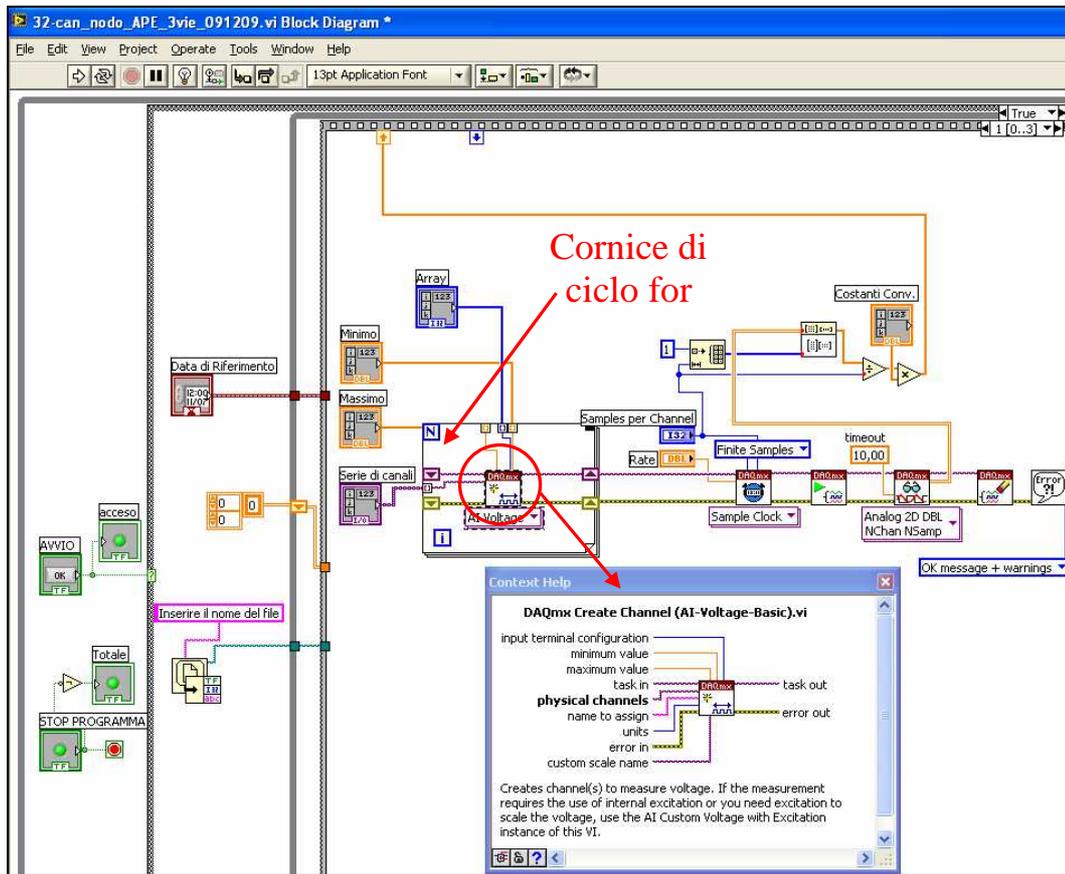


- Figura 7.13 - Pannello frontale: Impostazioni.



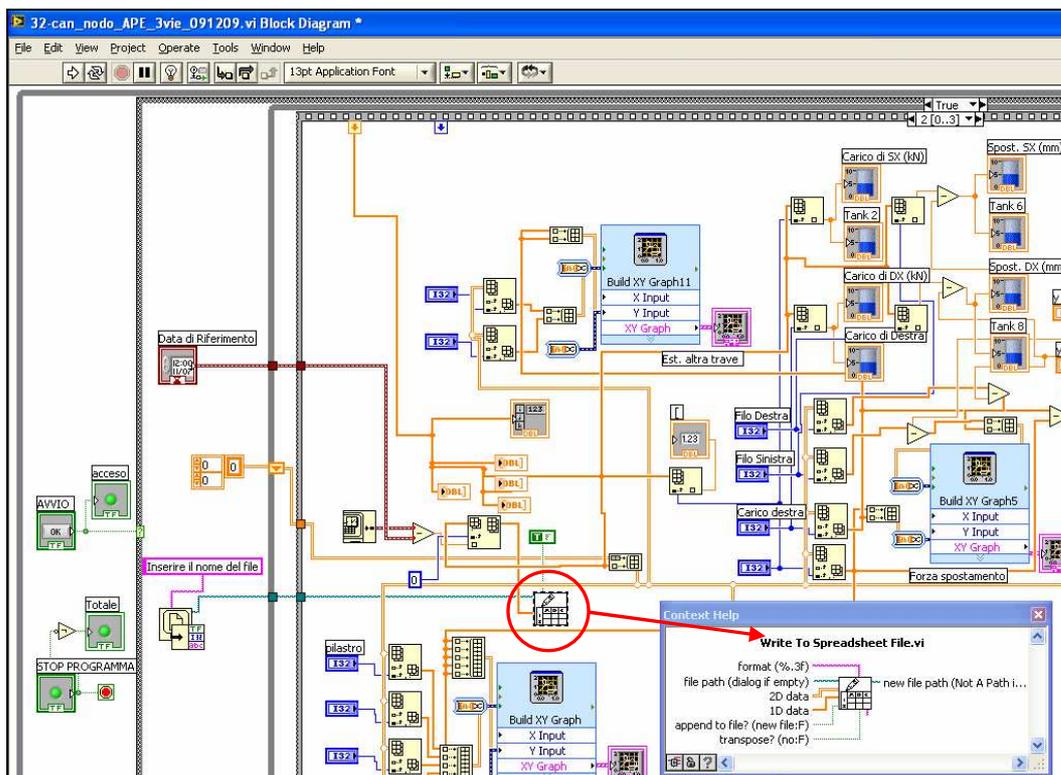
- Figura 7.14 - Pannello frontale: Canali.

Ultima impostazione riguarda l'introduzione delle costanti di amplificazione dei segnali letti. La porzione di schema a blocchi riguardante l'assegnazione dell'intensità di voltaggio del segnale analogico (filo viola in ingresso dall'icona *serie di canali*) e la sua digitalizzazione è rappresentata in figura 7.15; si è inoltre messo in evidenza il riquadro connettori relativo al V.I. di creazione del canale di misurazione del voltaggio (*DAQmx Create Channel.vi*), inserito nello schema a blocchi all'interno di una struttura a *ciclo for* ripetuta per ogni canale acquisito. La sequenza dei primi quattro V.I. rappresentati, indicati con la cornice *DAQmx (Data Acquisition)*, corrispondono alla serie di operazioni necessarie ad impostare intensità di alimentazione, frequenza ed intensità di campionamento, inizio misurazione e digitalizzazione del segnale analogico in ingresso.



- **Figura 7.15** - Schema a blocchi, sequenza 1: impostazione intensità di voltaggio e digitalizzazione.

Il segnale prosegue nello schema a blocchi sottoforma di vettore dati, passando dalla sequenza di rappresentazione 1 alla 2 (filo arancione a tratto singolo in uscita dalla fig. 7.15 ed in ingresso in fig. 7.16). La schermata raffigurante la sequenza 2 riporta l'intera porzione di schema a blocchi relativa: all'applicazione delle costanti di conversione dei segnali in misure fisiche; alla visualizzazione, mediante le taniche riportate in pannello di controllo, dei livelli di carico e spostamento; all'assegnazione dei canali strumentali ed all'estrazione delle relative misure, dal record dei dati, per la rappresentazione grafica in pannello di controllo; all'aggiornamento della matrice dei dati mediante l'aggiunta dei vettori riga acquisiti ad ogni ciclo (filo arancione a tratto doppio); all'aggiornamento automatico del file dati. In figura 7.16 viene rappresentata la porzione iniziale del diagramma riportato nella sequenza 2, evidenziando il riquadro connettori che definisce il V.I. di aggiornamento del file dati (*Write To Spreadsheet File.vi*).



- **Figura 7.16** - Schema a blocchi, sequenza 2: conversione segnale, costruzione e registrazione della matrice di dati, realizzazione dei grafici.

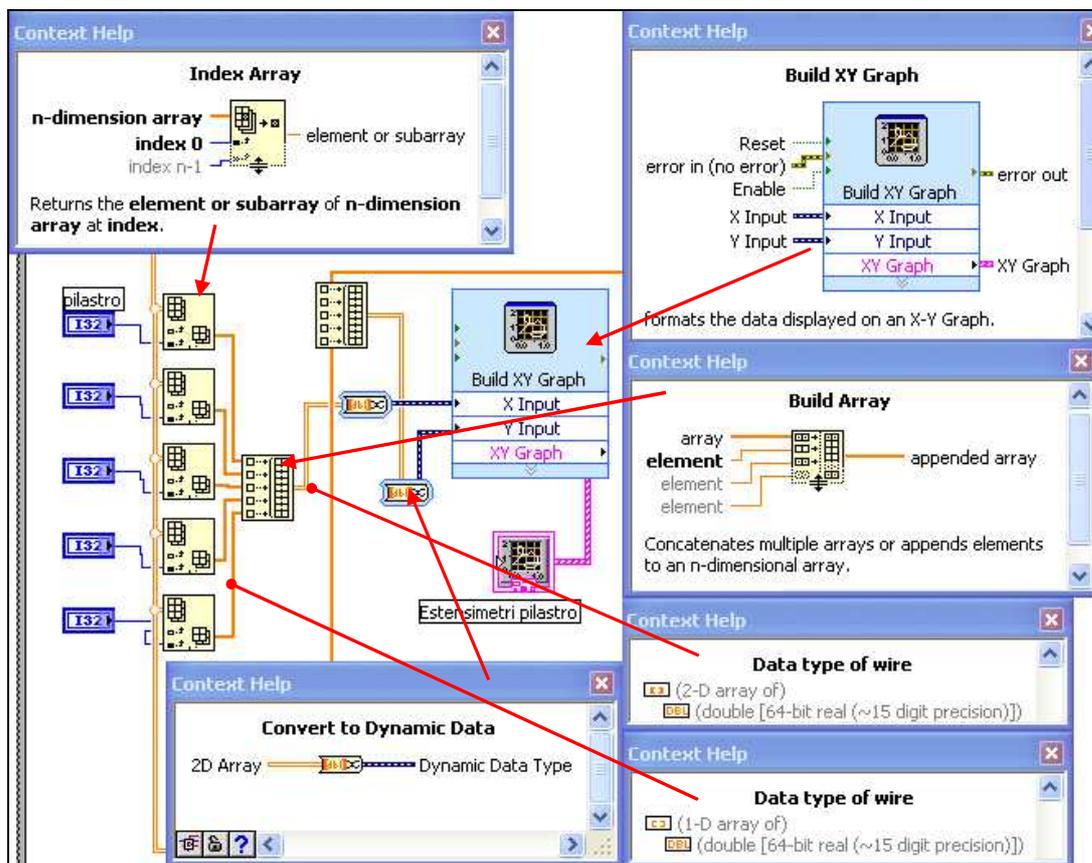
L'intera cartella *Canali* del pannello di controllo è dedicata all'interfaccia di assegnazione dei canali di acquisizione del segnale (fig. 7.14). Il segnale di ogni strumento di rilevazione viene contraddistinto da un numero variabile da 0 a 27, ed il relativo ordine di numerazione risulterà rispettato anche per gli indici di colonna nella matrice del file dati, a meno della prima, dedicata al tempo. Nelle tabelle 7.1 sono elencati i canali assegnati ai vari strumenti; vengono indicati, inoltre, il modello di centralina di alimentazione a cui ciascuno strumento è collegato, la morsettiera a cui ciascuno dei due gruppi di strumenti fa capo e le costanti di conversione del segnale introdotte nel programma di acquisizione.

Apparecchiatura di acquisizione	MORSETTIERA 0														
	MGC AB12	MGC AB22A	MGC AB12								MGC AB22A	2110A			
Canale	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Strumento collegato	CELLA	FILO	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	E1	E2	E3	E4	E5
Descrizione posizione	In asse pistone	Estremità trave	Trave sotto 1° concio	Trave sotto 2° concio	Trave sotto 1° concio	Trave sopra 1° concio	Trave sopra 2° concio	Diagon. nodo	Diagon. nodo	Sommità pilastro	Estensimetri barra centrale intradosso getto prefabbricato			Estens. mensola	Estens. pilastro lato trave
Tipo strumento	500 KN	300 mm	WA 20	WA 10	WA 20	WA 50	WA10	WA 20	WA 20	WA 50	l = 6 mm	l = 6 mm	l = 6 mm	l = 3 mm	l = 6 mm
Costante di conversione	//	//	10,03	5,274	9,616	18,632	4,653	8,384	9,122	23,344	2,10	2,10	2,10	2,13	2,10

Apparecchiatura di acquisizione	M. 0	MORSETTIERA 1												
	2110A			2110B										MGC AB22A
Canale	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Strumento collegato	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	Martinetti cavi
Descrizione posizione	Estens. pilastro lato trave	Estens. pilastro l. telaio	Estens. pilastro l. telaio	Estensimetri barra centrale intradosso getto integrativo			Estensimetri barra centrale estradosso getto prefabbricato			Estens. pilastro lato trave	Estensimetri staffe di nodo			Precompr. sommità pilastro
Tipo strumento	l = 6 mm	l = 6 mm	l = 6 mm	l = 3 mm	l = 3 mm	l = 3 mm	l = 3 mm	l = 3 mm	l = 3 mm	l = 6 mm	l = 3 mm	l = 3 mm	l = 3 mm	600 KN
Costante di conversione	2,10	2,10	2,10	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,10	2,13	2,13	2,13	//

- Tabelle 7.1 - Assegnazione dei canali di acquisizione agli strumenti di rilevazione.

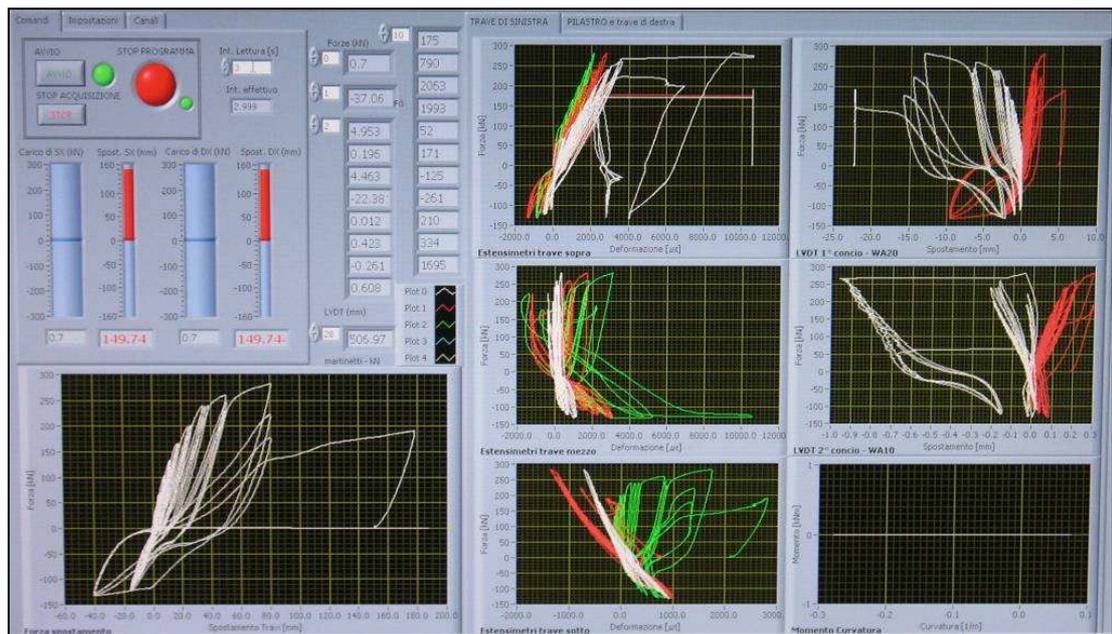
La numerazione dei canali risulterà inoltre utile alla creazione, in tempo reale, dei grafici che rappresentano l'andamento dinamico delle varie rilevazioni in funzione del carico applicato; tali grafici sono realizzati per mezzo della funzione *Index Array*, in grado di estrarre dalla matrice delle letture i valori corrispondenti agli indici dei canali graficati. In figura 7.17, ad esempio, è riportata la porzione di schema a blocchi che realizza il grafico delle deformazioni lette sui quattro estensimetri applicati al pilastro, completa della descrizione delle funzioni utilizzate; mentre in figura 7.18 è rappresentata la schermata dei grafici visualizzati in fase di prova.



- Figura 7.17 - Schema a blocchi e funzioni di realizzazione dei grafici dinamici.

Lo schema a blocchi in esame ha la possibilità, inoltre, di impostare l'intervallo (espresso in sec.) che intercorre tra una registrazione dati e la successiva, mediante una casella di input interfacciata posta nel pannello di controllo (denominata "Int. Lettura. [s]", vedi fig. 7.11). Poiché, per svariati motivi, possono verificarsi dei ritardi di registrazione dati, all'interno del ciclo while di acquisizione vi è un timer che rileva l'effettivo intervallo che si realizza tra una registrazione e la

successiva (misurato in msec.), e lo ripete (tradotto in sec.) in un indicatore posto sempre in pannello di controllo (denominata “Int. effettivo”, vedi fig. 7.11); in tal modo risulta possibile verificare in tempo reale la corrispondenza tra valore impostato e valore effettivo, bloccando la registrazione in caso di eccessiva discrepanza. In condizioni normali la differenza tra i due valori è irrilevante, come si può osservare dalla schermata riprodotta in fig. 7.18



- Figura 7.18 - Foto del pannello di controllo scattata a fine prova.

Capitolo 8

MODALITÀ ESECUTIVE DI PROVA

Il presente capitolo si occupa della descrizione del protocollo di prova, elencando le modalità applicative ed i livelli prefissati per i carichi sperimentali adottati. Si intende inoltre avvalorare le scelte effettuate, descrivendone i principi che ne sono alla base e prefigurandone gli obiettivi che si vogliono perseguire. Nel paragrafo 8.2 vengono introdotte le caratteristiche dei materiali utilizzati, le geometrie di applicazione del carico ed infine i valori teorici delle sollecitazioni resistenti, fornite dai progettisti dell'opera oggetto d'indagine. Nel paragrafo 8.3 vengono illustrate le modalità applicative dei carichi e le convenzioni adottate nel corso della prova; vengono inoltre descritte nel dettaglio le relazioni che intercorrono tra i valori di carico prefissati ed i valori teorici di calcolo relativi alle sollecitazioni di progetto e di resistenza ultima. Al termine del capitolo viene riportata una tabella riassuntiva rappresentativa delle modalità e dei valori adottati nell'applicazione ciclica delle serie di carico di prova; inoltre si rappresenta, mediante dei grafici, la storia di carico e la storia di spostamento registrate durante la prova.

8.1 Generalità

Effettuati i collegamenti dei cablaggi necessari a trasmettere il segnale di lettura degli strumenti tra le apparecchiature di acquisizione, e messi in pressione i martinetti cavi che simulano la compressione di esercizio del pilastro, le ultime operazioni di preparazione alla prova hanno riguardato il settaggio dei parametri di acquisizione, digitati dal pannello frontale del programma di gestione dei dati, e la regolazione della corsa iniziale di induttivi e filo estensibile, effettuata con l'ausilio della lettura digitale fornita dalla centralina di alimentazione (MGC).

La prova di carico ciclico sul nodo d'angolo è stata effettuata il 9 dicembre 2009, terminato il periodo di stagionatura canonico del getto integrativo. La sollecitazione ciclica del nodo è stata suddivisa in 9 serie progressive di caricamento; all'interno di ciascuna delle prime 8 serie il ciclo di applicazione dei

valori massimi di spinta e trazione prefissati è stato ripetuto per 3 volte, mentre nell'ultima serie si è eseguito solamente metà ciclo.

Poiché l'indagine sperimentale è focalizzata su ciò che accade in prossimità della connessione strutturale, le modalità applicative del carico di prova sono tali da massimizzare le sollecitazioni in corrispondenza delle sezioni estreme di trave e pilastro che si innestano nel nodo. Per ottenere un riscontro teorico del comportamento sperimentale della struttura, il protocollo dei massimi valori di trazione e compressione, da raggiungere in ogni serie di carico, è stato fissato in funzione delle sollecitazioni resistenti ultime di progetto determinate in corrispondenza della sezione d'innesto della trave; tali valori di progetto sono stati desunti dalla documentazione esecutiva fornita dai tecnici della ditta APE, realizzatrice dell'opera e committente dell'indagine sperimentale.

8.2 Valori teorici delle sollecitazioni resistenti

Il nodo di estremità oggetto di prova, così come l'intera struttura prefabbricata a cui appartiene, è stato progettato nel rispetto delle prescrizioni di norma riguardanti la resistenza alle azioni sismiche, garantendone un comportamento dissipativo che rispetti le indicazioni relative alla classe di duttilità bassa (CD''B''), riportate al paragrafo 7.4 della normativa [13].

I *materiali* utilizzati sono:

- calcestruzzo per getti prefabbricati avente classe di resistenza $R_{ck} \geq 50 \text{N/mm}^2$ (C40/50 secondo quanto riportato al paragrafo 4.1 della norma [13]);
- calcestruzzo per getti integrativi avente classe di resistenza $R_{ck} \geq 30 \text{N/mm}^2$ (C25/30 secondo quanto riportato al paragrafo 4.1 della norma [13]);
- acciaio per cemento armato B450C saldabile.

I *valori delle resistenze caratteristiche di progetto* utilizzati nei calcoli sono:

- resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo C40/50, utilizzato per i getti prefabbricati: $f_{ck,d[\text{pref.}]} = 45,3 \text{N/mm}^2$;

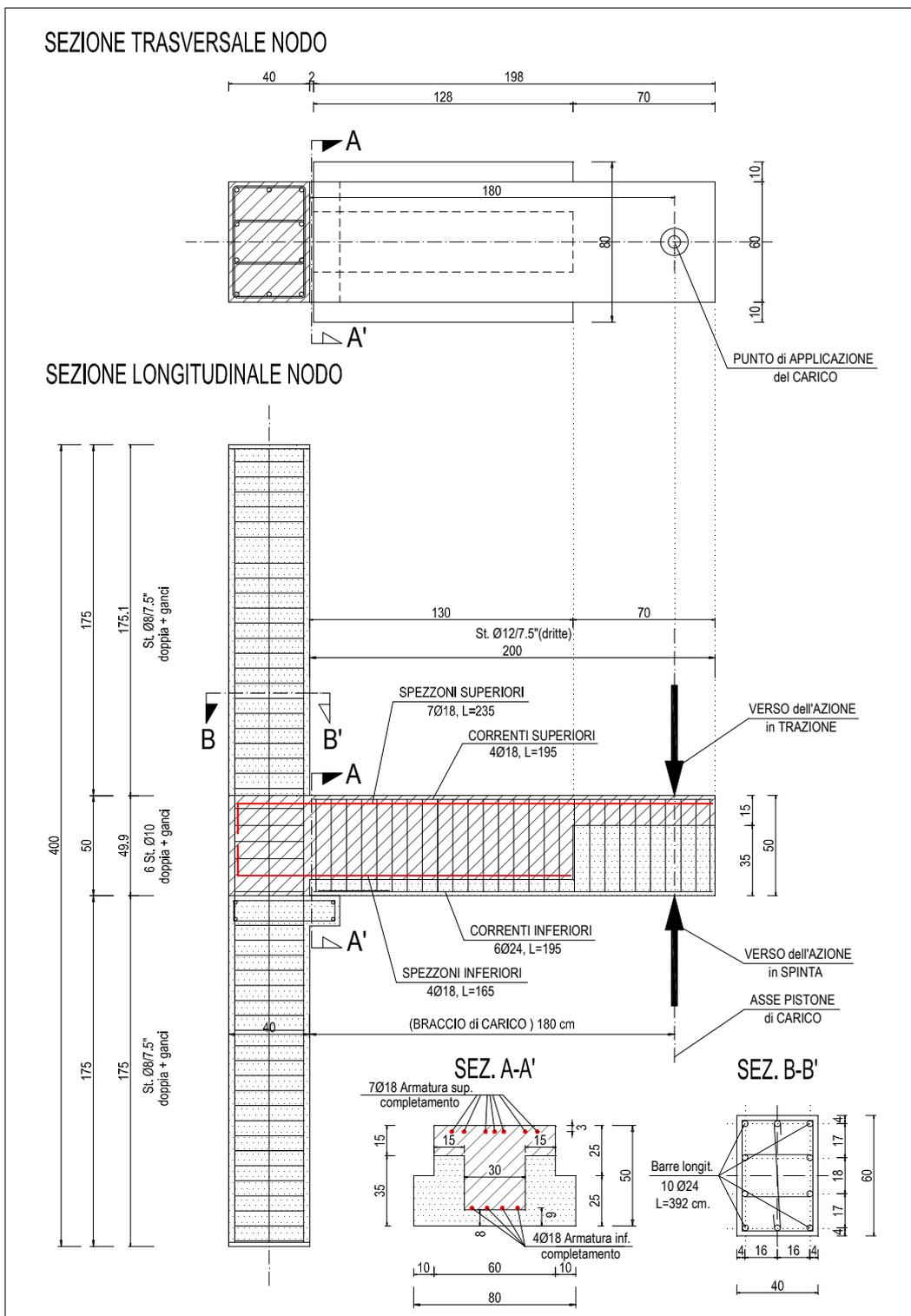
- resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo C25/30, utilizzato per i getti integrativi: $f_{ck,d[operai]} = 33,0 \text{ N/mm}^2$;
- tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio B450C: $f_{yk,d} = 490 \text{ N/mm}^2$.

La sollecitazione dell'elemento prefabbricato sottoposto a prova viene aumentata fino a rottura, in ottemperanza alle indicazioni di norma (vedi punto 4.1.10.4 delle [13]), registrando il corrispondente carico di collasso. Un valore teorico di confronto con la rilevazione sperimentale può essere dedotto dalle *sollecitazioni resistenti sperimentali di calcolo*, valutate in corrispondenza delle sezioni di collegamento di trave e pilastro al nodo d'angolo, determinate utilizzando i valori caratteristici delle resistenze dei materiali; momenti e tagli resistenti ultimi vengono determinati senza applicare i coefficienti riduttivi per le resistenze di lunga durata ed i coefficienti parziali di sicurezza.

Tuttavia, anche i *valori fattorizzati delle sollecitazioni resistenti*, determinate con il consueto metodo di progetto agli stati limite, risultano significative ai fini del raffronto con i dati sperimentali. le modalità di applicazione del carico consentono, infatti, di giungere al collasso strutturale per mezzo di una sequenza di incrementi graduali; si ha pertanto l'opportunità di analizzare il comportamento della struttura soggetta anche ai carichi che inducono, nella sezione estrema della trave, le sollecitazioni prossime ai valori di progetto.

Inoltre, come si vedrà in dettaglio nel paragrafo successivo, i livelli di carico fissati per ogni serie vengono dedotti come frazione percentuale dell'azione in grado di generare, nella sezione d'estremità della trave (sezione A-A' in fig. 8.1), proprio la sollecitazione flessionale di progetto agli SLU.

Nello schema di figura 8.1 si sono evidenziate le sezioni di riferimento per il calcolo delle sollecitazioni, assieme all'indicazione delle armature considerate a flessione ed a taglio; si è inoltre rappresentato l'asse del pistone di carico, indicandone l'eccentricità rispetto alla sezione di riferimento posta all'estremità della trave.



- **Figura 8.1** - Schema delle geometrie di applicazione del carico e delle sezioni di progetto.

I valori riportati di seguito rappresentano le sollecitazioni resistenti determinate dai progettisti dell'opera oggetto di prova, riferite alle sezioni schematizzate in figura 8.1 (*sezione A-A'* all'estremità della trave e generica *sezione B-B'* del pilastro).

Trave:

Momento resistente di progetto agli SLE che tende le fibre superiori:

$$M_{rd,SLE} = 200.000 \text{ Nm} ;$$

Momento resistente di progetto agli SLU che tende le fibre superiori:

$$M_{rd,SLU} = 301.330 \text{ Nm} ; \quad (1)$$

Momento resistente ultimo sperimentale teorico che tende le fibre superiori:

$$M_{r,estr.(ult.)} = 433.000 \text{ Nm} , \left(\frac{x}{d} \right)_{ult.,estr.} = 0,10 ; \quad (2)$$

Momento resistente ultimo sperimentale teorico che tende le fibre inferiori:

$$M_{r,intr.(ult.)} = 195.000 \text{ Nm} , \left(\frac{x}{d} \right)_{ult.,intr.} = 0,08 ; \quad (3)$$

Taglio resistente ultimo sperimentale teorico con riferimento al calcestruzzo:

$$V_{r,max(ult.)} = 1.688 \text{ KN} , (\cotg\theta = 2) ;$$

Taglio resistente ultimo sperimentale teorico con riferimento all'acciaio:

$$V_{r,S(ult.)} = 1.252 \text{ KN} , (\cotg\theta = 2) .$$

Pilastro:

Momento resistente ultimo sperimentale teorico a carico assiale $N = \text{cost.}$:

$$M_{r(ult.)} = 475.000 \text{ Nm} ;$$

Sforzo assiale resistente ultimo sperimentale teorico:

$$N_{r(ult.)} = 614 \text{ KN} ;$$

Taglio resistente ultimo sperimentale teorico con riferimento al calcestruzzo:

$$V_{r,max(ult.)} = 848 \text{ KN} , (\cotg\theta = 2) ;$$

Taglio resistente ultimo sperimentale teorico con riferimento all'acciaio:

$$V_{r,S(ult.)} = 701 \text{ KN} , (\cotg\theta = 2) .$$

La normativa attualmente in vigore prevede, in fase di progettazione ai fini della resistenza ad azioni sismiche di strutture dotate di comportamento dissipativo (vedi cap. 7 della normativa [13]), che le parti strutturali non dissipative ed i collegamenti delle parti dissipative al resto della struttura possiedano, nei riguardi delle zone sede di cerniere plastiche, una sovrarresistenza sufficiente a consentire lo sviluppo in esse della plasticizzazione ciclica. Tutto ciò è alla base del *criterio della*

gerarchia delle resistenze (capacity design) e si traduce, nel caso pratico in esame, nel tutelare il pilastro del nodo d'angolo dalla palsticizzazione prematura; si procede quindi nel verificare che la sua resistenza complessiva sia maggiore della resistenza complessiva della trave, garantendo inoltre un idoneo coefficiente di sicurezza. Assumendo come momenti resistenti di progetto del pilastro i valori calcolati in corrispondenza delle sollecitazioni assiali prodotte dalle combinazioni sismiche delle azioni, e considerato che per le strutture realizzate in CD"B" occorre garantire almeno il 10% di sovreresistenza ($\gamma_{Rd} = 1,10$), si è potuto verificare che:

$$\text{sovreresistenza pilastro- trave} = \sum M_{rd,PIL} / \sum M_{rd,TR} = 2,2 > 1,1.$$

Onde evitare che il criterio di verifica flessionale appena argomentato venga reso vano dalla formazione di meccanismi inelastici dovuti al taglio, si rende necessario effettuare un'ulteriore verifica. Applicati alle estremità del pilastro i corrispondenti momenti resistenti di progetto, si va ad individuare la sollecitazione tagliante simmetrica in grado di soddisfare l'equilibrio alla rotazione; basterà quindi verificare che tale sollecitazione risulti inferiore al più basso dei valore dei tagli resistenti di progetto, valutati in corrispondenza delle sezioni estreme del pilastro. Garantendo, al solito, una sovra resistenza del 10 %, si è verificato quanto segue:

$$\text{sovreresistenza taglio pilastro} = V_{rd,Spil} / \left[\left(\sum M_{rd,inf} / \sum M_{rd,sup} \right) / L_p \right] = 2,3 > 1,1.$$

8.3 Definizione dei livelli di carico

La prova di carico effettuata sulla struttura di nodo ha come obiettivo primario quello di simulare, seppur con velocità molto più ridotte, gli effetti dell'azione orizzontale alternata prodotta dall'azione sismica. Dovrà trattarsi pertanto di un caricamento di tipo ciclico; ovvero l'azione trasversale, applicata all'estremità della trave mediante pistone, viene ad assumere alternativamente determinati valori in spinta e trazione, completando ogni ciclo al terzo passaggio per il livello nullo di carico. Inoltre il carico viene aumentato per step successivi, realizzando delle serie di applicazioni, ciascuna delle quali costituita da un certo numero di cicli di ripetizione. Risulta possibile, in tal modo, rilevare sia il comportamento della struttura di nodo al crescere delle sollecitazioni di segno opposto, valutandone in ultimo anche la resistenza del collegamento, sia apprezzare l'entità della dissipazione energetica che si manifestano nell'isteresi ciclica; si

soddisfano pertanto anche le indicazioni riportate, in merito ai collegamenti di elementi prefabbricati, ai punti 5.11.2.1.3 e 5.11.2.2 della normativa europea [14].

La prova di carico prevede una fase iniziale in *controllo di forza*, nella quale, una volta fissati i livelli di carico a cui giungere per ciascuna delle serie cicliche, si procede analizzando l'azione rilevata dalla cella di carico ed operando di conseguenza sulla centralina di comando del pistone. Per carichi superiori ai valori teorici di rottura, la prova procede in *controllo di spostamento*, con l'assegnazione di spostamenti limite a cui giungere per ciascuna ulteriore fase di carico; agendo sempre sulla centralina di comando del pistone, si procede monitorando la lettura effettuata dal filo estensibile posto all'estremità della trave ed invertendo la direzione di spinta in prossimità dei valori limite di spostamento.

Per comprendere meglio i chiarimenti riportati di seguito, si tenga conto che il pistone di carico:

- lavora in trazione applicando azioni rivolte verso il basso, rilevate dalla cella con segno +, che inducono abbassamenti dell'estremità della trave ad esso collegata, rilevati dal filo estensibile col segno + (le fibre d'estradosso della trave risultano tese);
- lavora in compressione applicando azioni rivolte verso l'alto, rilevate dalla cella con segno -, che inducono sollevamenti dell'estremità della trave ad esso collegata, rilevati dal filo estensibile col segno - (le fibre d'intradosso della trave risultano tese).

8.3.1 Serie di carico condotte in controllo di forza

Come già argomentato nel paragrafo precedente, la struttura di nodo è stata realizzata con l'intento progettuale di favorire, in occasione di eventi sismici di determinata entità, la plasticizzazione del concio di trave di collegamento al nodo, preservando l'integrità del pilastro; risulta quindi logico relazionare la scelta dei livelli di carico, utilizzati per ogni serie di applicazioni cicliche, al valore delle sollecitazioni resistenti calcolate in corrispondenza della sezione di collegamento della trave. Poiché tale sezione risulta non simmetrica per quanto riguarda la disposizione delle armature, e disomogenea per la presenza di differenti qualità di calcestruzzo, occorre anzitutto determinare una proporzione tra l'entità dei carichi in compressione ed in trazione, in modo tale da indurre livelli tensionali simili nelle

fibre d'intradosso ed estradosso della sezione. Si considera, a tale scopo, il rapporto tra le relazioni (3) e (2) di pagina 160:

$$M_{r,intr.(ult.)}/M_{r,estr.(ult.)} = 195.000/433.000 = 0,45 \quad (4)$$

Le serie di carico condotte in controllo di forza sono **6**, ciascuna delle quali costituita da **3** cicli di ripetizione dei livelli di carico (in base a quanto indicato al punto 5.11.2 della normativa europea [14]). Si è scelto di definire i livelli di carico massimi raggiunti in corrispondenza di ogni serie ciclica, condotta in controllo di forza, come frazione percentuale del valore di carico in trazione (il carico è rivolto verso il basso tendendole fibre superiori della trave) che risulta in grado di generare, nella sezione di estremità trave, una sollecitazione flessionale pari al momento resistente di progetto agli SLU, espresso dalla relazione (1) di pagina 160.

Basta pertanto dividere il momento resistente di progetto agli SLU per il braccio d'azione dell'asse del pistone (vedi schema fig. 8.1), riferiti entrambi alla sezione della trave che si collega al nodo, per ottenere il carico in trazione di riferimento:

$$F_{rd,SLU} = M_{rd,SLU} / b_p = 301.330 / 1,8 \cong 166 \text{ KN} . \quad (5)$$

Moltiplicando tale azione per la percentuale fissata, si ottiene il carico massimo a cui giungere, in trazione, nella fase considerata; moltiplicando ulteriormente il valore così ottenuto per il rapporto fornito dalla (4), si ottiene il carico massimo a cui giungere, in compressione, nella medesima fase.

Si effettua a titolo esplicativo il calcolo dei livelli di carico massimi a cui giungere in prima serie, denominata AA, fissando una percentuale del 40%:

$$\text{serie AA} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{AA,traz.} = F_{rd,SLU} \cdot 0,4 \cong 66 \text{ KN} \\ \uparrow F_{AA,compr.} = -F_{rd,SLU} \cdot 0,4 \cdot 0,45 \cong -30 \text{ KN} \end{array} \right.$$

Si procede in maniera analoga per le ulteriori 5 serie di carico, condotte sempre in controllo di forza, fissando delle quote percentuali del carico in trazione di riferimento pari al 60%, 80%, 100%, 120% e 145%. Si riportano di seguito i valori ottenuti:

$$\text{serie BB} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{BB,traz.} = 100 \text{ KN} \\ \uparrow F_{BB,compr.} = -45 \text{ KN} \end{array} \right. ;$$

$$\text{serie CC} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{CC,traz.} = 133 \text{ KN} \\ \uparrow F_{CC,compr.} = -60 \text{ KN} \end{array} \right. ;$$

$$\text{serie DD} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{DD, \text{traz.}} = 166 \text{ KN} \\ \uparrow F_{DD, \text{compr.}} = -75 \text{ KN} \end{array} \right. ;$$

$$\text{serie EE} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{EE, \text{traz.}} = 200 \text{ KN} \\ \uparrow F_{EE, \text{compr.}} = -90 \text{ KN} \end{array} \right. ;$$

$$\text{serie FF} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{FF, \text{traz.}} = 240 \text{ KN} \\ \uparrow F_{FF, \text{compr.}} = -108 \text{ KN} \end{array} \right. .$$

Poiché l'ultima percentuale scelta è fornita dal rapporto tra il momento resistente ultimo sperimentale teorico ed il momento resistente di progetto agli SLU ($M_{r, \text{estr. (ult.)}} / M_{rd, \text{SLU}} \cong 1,45$), forniti rispettivamente dalle relazioni (1) e (2), i corrispondenti valori limite di carico relativi alla serie FF corrispondono alle azioni in grado di generare, nella sezione di estremità della trave, la *sollecitazione flessionale di rottura teorica*.

8.3.2 Serie di carico condotte in controllo di spostamento

Completate le 6 fasi di carico condotte in controllo di forza ci si è riservati l'opportunità di scegliere, a prova in corso, le modalità operative con cui procedere nell'applicazione del carico. Poiché al termine della serie di carico FF l'avanzato stato deformativo, localizzato prevalentemente in corrispondenza della sezione di collegamento della trave al pilastro, preannunciava il verificarsi di deformazioni elevate anche per piccoli incrementi di carico, si è deciso di assumere lo spostamento all'estremità della trave come nuova variabile di controllo.

Si è quindi deciso di fissare **3** ulteriori serie, tutte condotte in controllo di spostamento. Per le *prime due*, sempre costituite da **3** ripetizioni cicliche del carico, si sono fissati degli spostamenti limite rispettivamente di: 50 mm in abbassamento e 15 mm in sollevamento; 80 mm in abbassamento e 40 mm in sollevamento. Per l'ultima serie di carico si è invece realizzato metà ciclo di carico, effettuato un'unica trazione della trave fino ad indurre un abbassamento dell'estremità pari a 178 mm, pari praticamente il fine corsa del filo estensibile, ed annullando quindi il carico al pistone. Riassumendo quindi si ha:

$$\text{serie GG} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow s_{GG, \text{traz.}} = 50 \text{ mm} \\ \uparrow s_{GG, \text{compr.}} = -15 \text{ mm} \end{array} \right.$$

$$\text{serie HH} \begin{cases} \downarrow s_{\text{HH, traz.}} = 80 \text{ mm} \\ \uparrow s_{\text{HH, compr.}} = -40 \text{ mm} \end{cases}$$

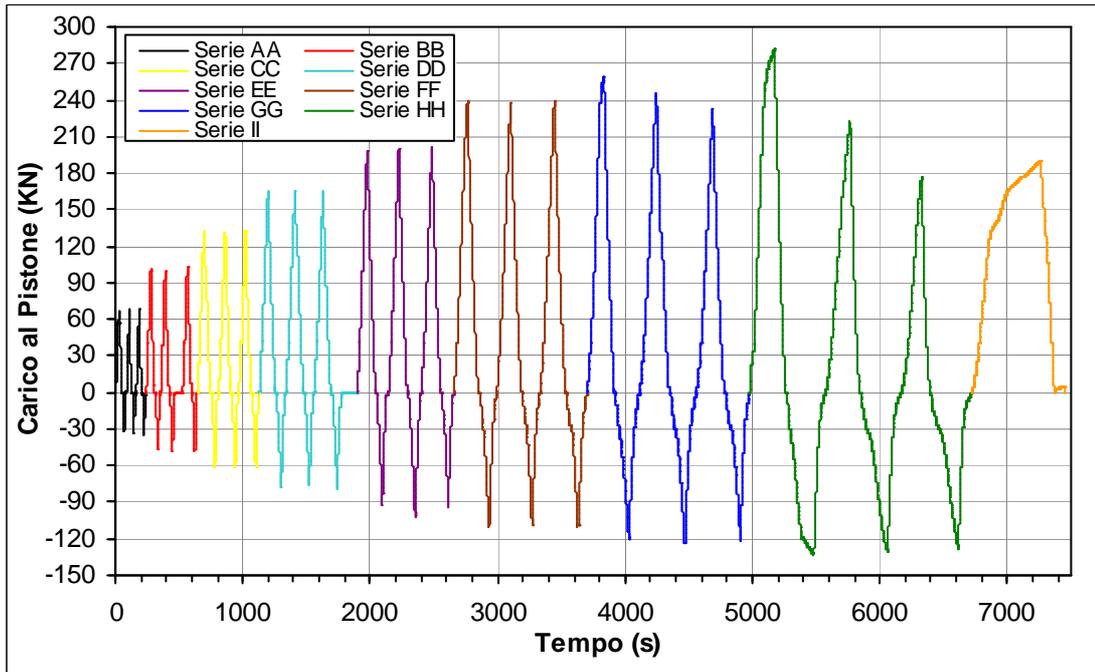
$$\text{serie II} \begin{cases} \downarrow s_{\text{II, traz.}} = 178 \text{ mm} \end{cases}$$

La tabella 8.1 riassume tutte le informazioni relative alle modalità applicative del carico adottate, sia in fase di controllo di forza che in fase di controllo di spostamento. Assieme all'indicazione dei valori estremi di carico, prefissati per la fase in controllo di forza, si indicano anche le rispettive frazioni percentuali relative al carico che induce, nella sezione di collegamento della trave, la coppia resistente di progetto agli SLU; mentre unitamente all'indicazione dei valori estremi di deformazione, prefissati per la fase in controllo di spostamento, si indicano anche i valori estremi di carico raggiunti nell'arco della singola serie di cicli.

Serie di carico	n° Cicli	Note	Tipo di controllo	Limiti di carico (KN) (% carico agli SLU)		Limiti di spostamento (mm) (valori estremi di carico raggiunti nella serie)	
				↓ traz. ^{ne}	↑ comp. ^{ne}	↓ abb. ^{nto}	↑ soll. ^{nto}
AA	3	/	forza	66 (40%)	-30	/	/
BB	3	/	forza	100 (60%)	-45	/	/
CC	3	/	forza	133 (80%)	-60	/	/
DD	3	Carico di progetto agli SLU	forza	166 (100%)	-75	/	/
EE	3	/	forza	200 (120%)	-90	/	/
FF	3	Carico di rottura sperimentale teorico	forza	240 (145%)	-108	/	/
GG	3	/	spostamento	/	/	50 (175/280 KN)	-15 (-120/-124 KN)
HH	3	/	spostamento	/	/	80 (230/260 KN)	-40 (-128/-132 KN)
II	1/2	Raggiungimento del fine corsa filo estensibile	spostamento	/	/	178 (190 KN)	//

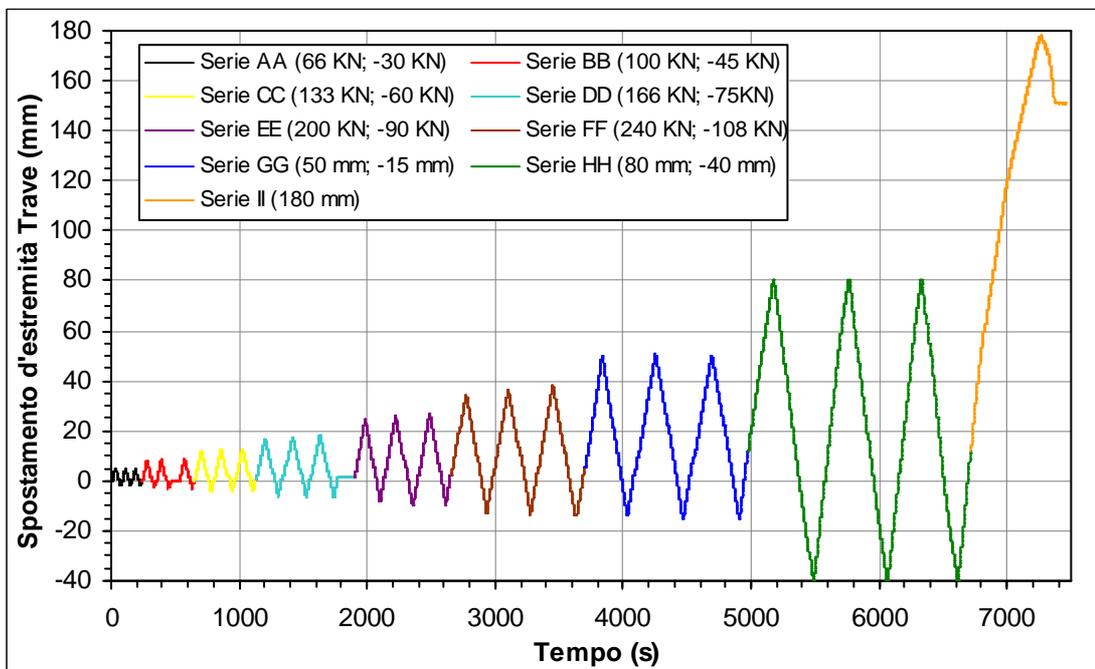
- Tabella 8.1 - Descrizioni ed indicazione dei valori relativi alle modalità applicative dei carichi.

Nel grafico riportato in figura 8.2 si è rappresentata la *storia di carico*, ottenuta rilevando, a mezzo della cella di carico posta in asse al pistone, l'azione applicata in funzione del tempo.



- **Figura 8.2** - Storia di carico: andamento del carico applicato in funzione del tempo.

Nel grafico riportato in figura 8.3 si è invece rappresentata la *storia di spostamento*, ottenuta rappresentando gli spostamenti dell'estremità della trave, rilevati mediante filo estensibile, in funzione del tempo.



- **Figura 8.3** - Storia di spostamento: spostamento dell'estremità trave rilevato in funzione del tempo.

Capitolo 9

ELABORAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

Il presente capitolo rappresenta l'elemento fondamentale nell'ambito descrittivo dell'indagine sperimentale svolta, trattando la descrizione e l'argomentazione dei risultati forniti dalla prova ciclica sul collegamento strutturale in esame. Il paragrafo 9.2 è dedicato alla descrizione delle principali elaborazioni dati necessarie ad ottenere le più significative rappresentazioni dei risultati rilevati. Nel paragrafo 9.3 viene fornito un rapido cenno alle caratterizzazioni sperimentali ottenute per i materiali utilizzati nel confezionamento della struttura oggetto di prova, valutandone il rispetto dei criteri di accettazione imposti dalla normativa vigente. Nel paragrafo 9.4 si effettua un articolato ed esteso esame dei meccanismi resistenti locali attivati dal carico di prova, avvalendosi delle osservazioni macroscopiche e delle immagini raccolte nel corso della prova per argomentare l'analisi delle rilevazioni strumentali effettuate. Nel paragrafo 9.5 si passa quindi ad esaminare il comportamento globale della struttura alla luce delle indagini locali svolte. Avvalendosi sempre dei dati sperimentali raccolti si quantifica il degrado delle resistenze e delle rigidità complessive subite dalla struttura sia in virtù dell'incremento seriale del carico, sia a seguito della sua ripetizione ciclica; si valuterà inoltre la tendenza della struttura alla dissipazione energetica.

9.1 Generalità

L'indagine sui meccanismi resistenti che si sono istaurati nel nodo strutturale e nelle sezioni limitrofe degli elementi ad esso collegati viene svolta mediante il raffronto tra gli effetti esteriori macroscopici (fessurazioni, spostamenti, espulsioni di copri ferro, ecc), rilevati in corrispondenza dei vari cicli di carico, ed i dati registrati dalle letture strumentali. Per rendere di facile comprensione l'enorme quantità di registrazioni effettuate (circa 7.500 registrazioni per ognuno dei 29 strumenti rilevati in funzione del tempo) si effettua un'elaborazione dei dati forniti dal software di acquisizione al fine di ricavarne una rappresentazione grafica.

Risulta in tal modo possibile ottenere grafici dell'andamento dei parametri globali, quali forza-spostamento e momento-curvatura, e locali, quali le singole letture di estensimetri e trasduttori induttivi di spostamento, grazie ai quali indagare nel dettaglio il comportamento della struttura oggetto di prova.

9.2 Rappresentazioni grafiche dei risultati sperimentali

Le rappresentazioni grafiche dei risultati sperimentali richiedono una preventiva elaborazione dei dati registrati, finalizzata alla conversione del formato numerico ed alla precisa impostazione dello zero iniziale delle rilevazioni strumentali. Quindi le letture così rettificate possono venir singolarmente rappresentate in funzione del carico di prova, oppure relazionate tra loro al fine di costituire una rappresentazione di grandezze composte, quali momenti, curvature o componenti di spostamento depurate.

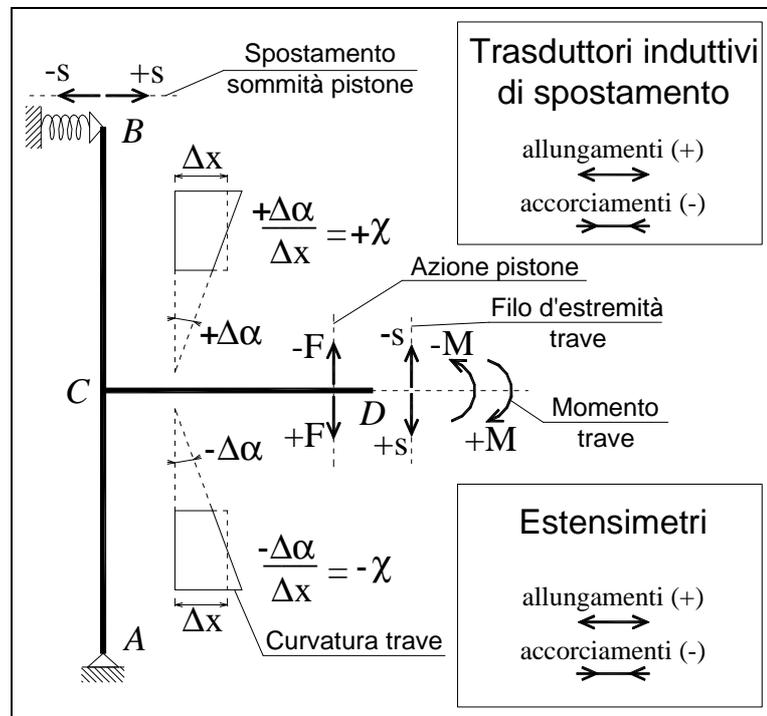
9.2.1 Elaborazione dati

Il software di acquisizione dati *32-can_nodo_APE_3vie_091209.vi* fornisce un file di registrazione delle letture eseguite, denominato *nodo_ape_9dic09_3vie.dat*, visualizzabile con applicazioni quali WORD PAD o similari. Tale file è strutturato, come spiegato nel paragrafo 7.3.3, in forma matriciale; si hanno 33 colonne, la prima delle quali viene assegnata alla registrazione del tempo in secondi, mentre le rimanenti 32 sono destinate alla registrazione dei dati acquisiti. L'indice di colonna, delle 32 dedicate all'acquisizione dati vera e propria, viene assegnato alla registrazione dell'output del singolo strumento in ordine crescente ed in base al numero del canale di acquisizione a cui tale strumento è stato assegnato in fase di settaggio del software. Nel caso in esame le colonne di dati utilizzate saranno nel complesso 1 + 29, le restanti 3 colonne saranno costituite da termini nulli, poiché non assegnate ad alcun strumento. Il file richiede anzitutto la conversione della formattazione numerica da inglese[stati uniti] (quella adottata di default da LabVIEW) ad italiana, quindi risulterà sufficiente salvarlo con l'estensione *xls* per renderlo eseguibile in EXCEL, programma utilizzato per l'elaborazione numerica e grafica dei dati.

Prima elaborazione da effettuare risulta l'impostazione dello zero in lettura iniziale di ogni canale acquisito. A tale scopo l'acquisizione dati è stata avviata qualche istante prima della prova, generando una serie di registrazioni delle deformazioni dell'opera oggetto d'indagine soggetta a valore nullo del carico applicato; la depurazione delle letture relative ai singoli canali (e riportate nella generica colonna dati) viene quindi effettuata sottraendo ai relativi dati significativi una media di tali registrazioni iniziali.

A questo punto i dati risultano disponibili alla rappresentazione grafica, preve eventuali elaborazioni numeriche. La realizzazione dei diagrammi relativi alle letture effettuate dai vari strumenti, quali estensimetri e trasduttori induttivi, risulta immediata; nei capitoli successivi ne vengono riportati alcuni esempi. Nei paragrafi successivi verranno invece argomentate le realizzazioni dei diagrammi *forza-spostamento* e *momento-curvatura*, definite con il contributo di differenti letture strumentali.

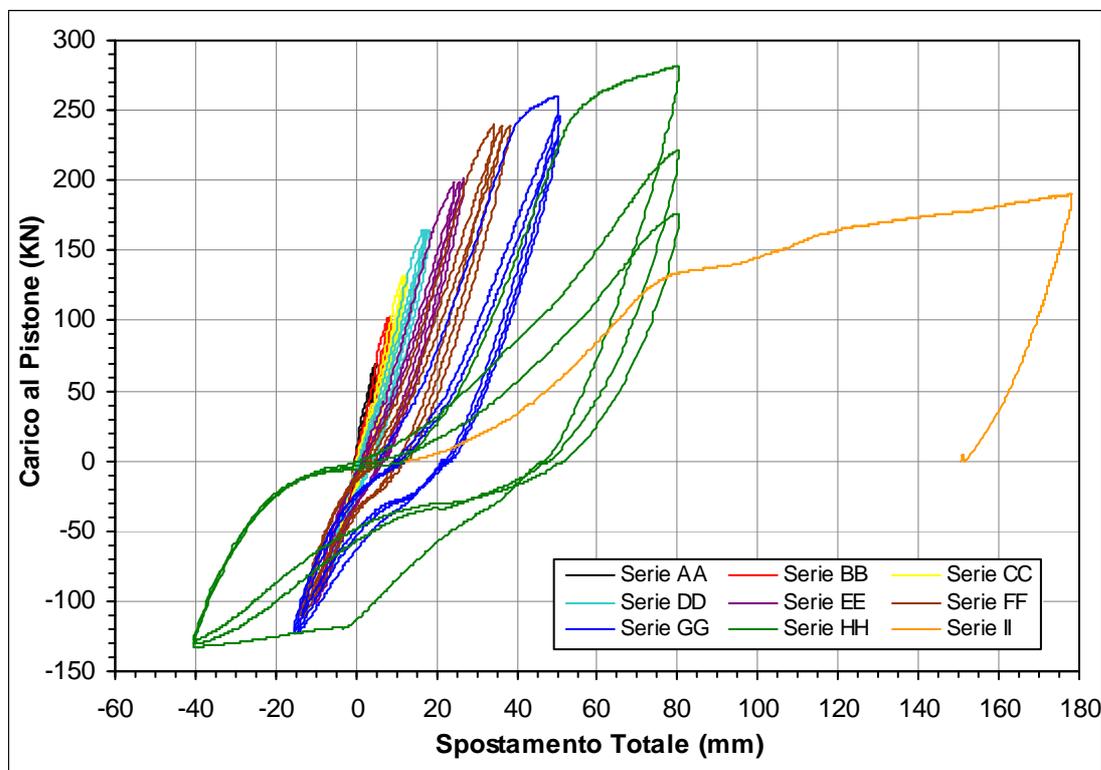
Per i grafici riportati nel presente capitolo, a meno di differenti indicazioni, si fa riferimento alle convenzioni relative al segno delle azioni e degli spostamenti di nodo riportate in figura 9.1.



- Figura 9.1 - Convenzioni sui segni di sollecitazioni e spostamenti.

9.2.2 Grafici forza-spostamento ($F-\delta$)

Il grafico *forza-spostamento totale* rappresenta l'andamento dei movimenti registrati dal filo estensibile, collegato all'estremità libera della trave, in funzione dei valori di carico applicati durante la prova. Tale diagramma, riportato in figura 9.2, costituisce una rappresentazione del comportamento globale del nodo d'angolo in grado di fornire informazioni sulla *resistenza*, la *rigidezza* e la *capacità dissipativa* che la struttura è in grado di fornire ad ogni ciclo di carico. Le convenzioni adottate, in accordo con lo schema 9.1, assegnano valori positivi alle azioni, applicate dal pistone, ed agli spostamenti, rilevati dal filo, rivolti verso il basso; l'adozione di differenti colorazioni permette, inoltre, di evidenziare le curve relative a ciascuna delle 9 serie di carico.

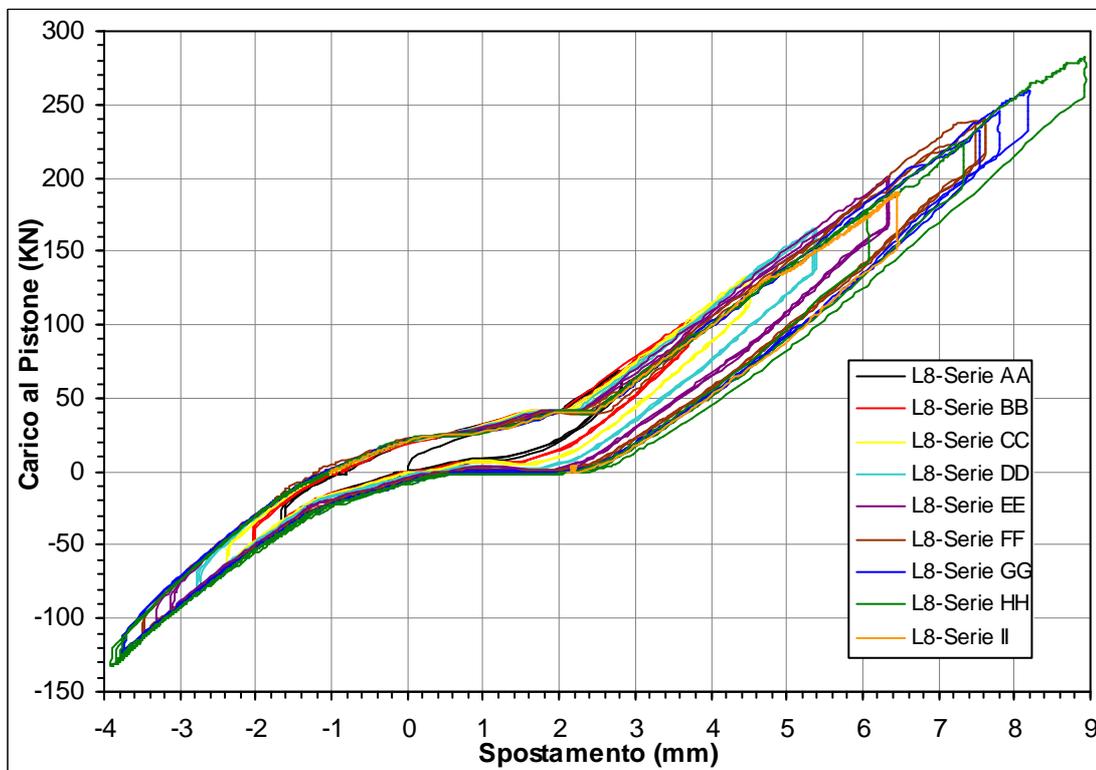


- Figura 9.2 - Grafico dello spostamento totale di estremità trave in funzione del carico ciclico di prova.

Le rilevazioni effettuate dal filo estensibile posto all'estremità della trave risultano tuttavia "inquinata" dagli effetti delle rotazioni rigide prodotte dai cedimenti della struttura di contrasto. Le azioni cicliche indotte dal carico di prova sulla struttura di contrasto inducono, infatti, degli spostamenti dovuti in parte ai cedimenti elastici relativi ai telai di controvento in acciaio, ed in parte generati dal

recupero delle tolleranze di accoppiamento dei collegamenti; tali spostamenti, trasmessi alla sommità del pilastro, inducono una rotazione rigida dell'intera struttura di nodo attorno alla cerniera di base del pilastro.

Al fine di depurare la lettura del filo estensibile dalle componenti di spostamento indotte dalla rotazione rigida, ci si avvale della rilevazione effettuata dal trasduttore induttivo L8 WA50, posto a battuta sulla sommità del pilastro (vedi schema di fig. 6.1, paragrafo 6.2); la cui rappresentazione grafica è riportata in figura 9.3. La convenzione utilizzata per la rappresentazione delle forze risulta la stessa vista per il diagramma F-s, mentre gli spostamenti orizzontali, in accordo con lo schema 9.1, sono assunti positivi se diretti verso il pistone, e quindi se indotti da trazioni del pistone



- **Figura 9.3** - Grafico della proiezione orizzontale dello spostamento indotto in sommità del pilastro.

Dall'analisi delle curve in fig. 9.3 risulta evidente come, per azioni di trazione superiori a 40 KN e di compressione inferiori a -20 KN , vi sia un legame di linearità tra la variazione del carico e la corrispondente variazione dello spostamento; le inclinazioni delle linee di carico e scarico, sia per azione in trazione che in spinta del pistone, risultano praticamente uguali tra loro e pari, in valore, alla rigidezza alla traslazione verticale del sistema costituito dai telai di contrasto. Il

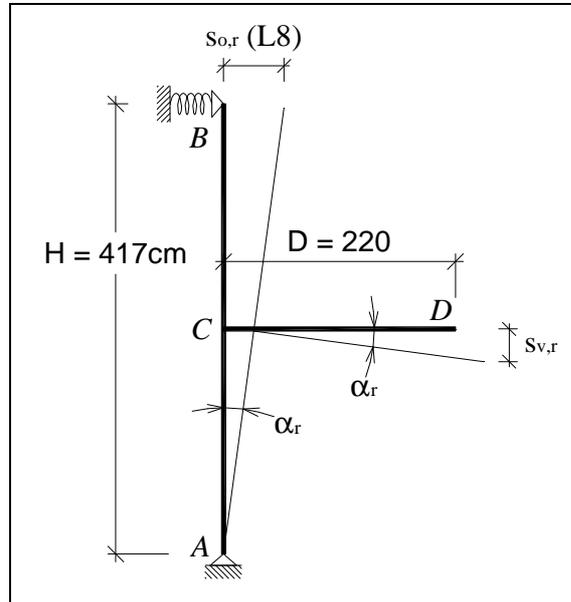
plateau pressoché orizzontale che si verifica nella zona di inversione del segno del carico di prova ($40\text{KN} \div -20\text{KN}$) è il frutto di due concause: in parte è dovuto dall'annullamento delle tolleranze di accoppiamento presenti nei vari collegamenti a bullone della struttura di contrasto; in parte è il frutto della roto-traslazio del sistema di collegamento del pilastro ai telai di contrasto, realizzato per mezzo di due coppie di bielle che convergono nella piastra incernierata alla sommità del pilastro (vedi figure 3.8, 3.16 e 3.18 del cap. 3). Si viene quindi a creare un momentanea e ridotta labilità che consente spostamenti della sommità del pilastro corrispondenti ad abbassamenti e sollevamenti del pistone, senza tuttavia produrre rilevanti reazioni sulla cella di carico.

Analogo discorso vale anche per i tratti verticali rilevati all'atto dell'inversione del moto del pistone, effettuata allo scopo di ridurre il carico dopo il raggiungimento del valore massimo, sia positivo che negativo. Probabilmente in tal caso l'istantaneità del richiamo elastico del telaio d'acciaio che costituisce la struttura di contrasto, contrapposta al più lento recupero delle deformazioni visco-elastiche generatesi nella struttura in cemento armato, consente nuovamente alle tolleranze dei collegamenti di entrare in gioco; viene quindi a generarsi una riduzione del carico, dell'ordine, in valore assoluto, di $10 \div 15\text{KN}$, che si realizza a spostamento costante.

Il valore massimo dello spostamento orizzontale della sommità del pilastro, corrispondente alla trazione verso il basso del pistone, è di $8,94\text{ mm}$, mentre il valore minimo, corrispondente alla spinta verso l'alto del pistone, è di $-3,91\text{ mm}$; entrambe le letture sono state realizzate durante il 1° ciclo di carico della *serie HH*, effettuata in controllo di spostamento.

Nota la distanza tra la battuta dell'induttivo in L8, realizzata in corrispondenza del piano medio della piastra di sommità del pilastro, e l'asse del perno di snodo posto alla base del pilastro, risulta possibile determinare, con buona approssimazione, la *rotazione rigida della struttura* come rapporto tra la lettura fornita dal trasduttore di sommità e detta distanza. La componente verticale dello spostamento indotto all'estremità della trave risulta pertanto definito dal prodotto della rotazione rigida determinata per la distanza tra l'asse del pilastro e l'estremità della trave. Con riferimento ai simboli ed ai valori riportati nello schema di figura 9.4 risulta pertanto possibile scrivere le relazioni seguenti:

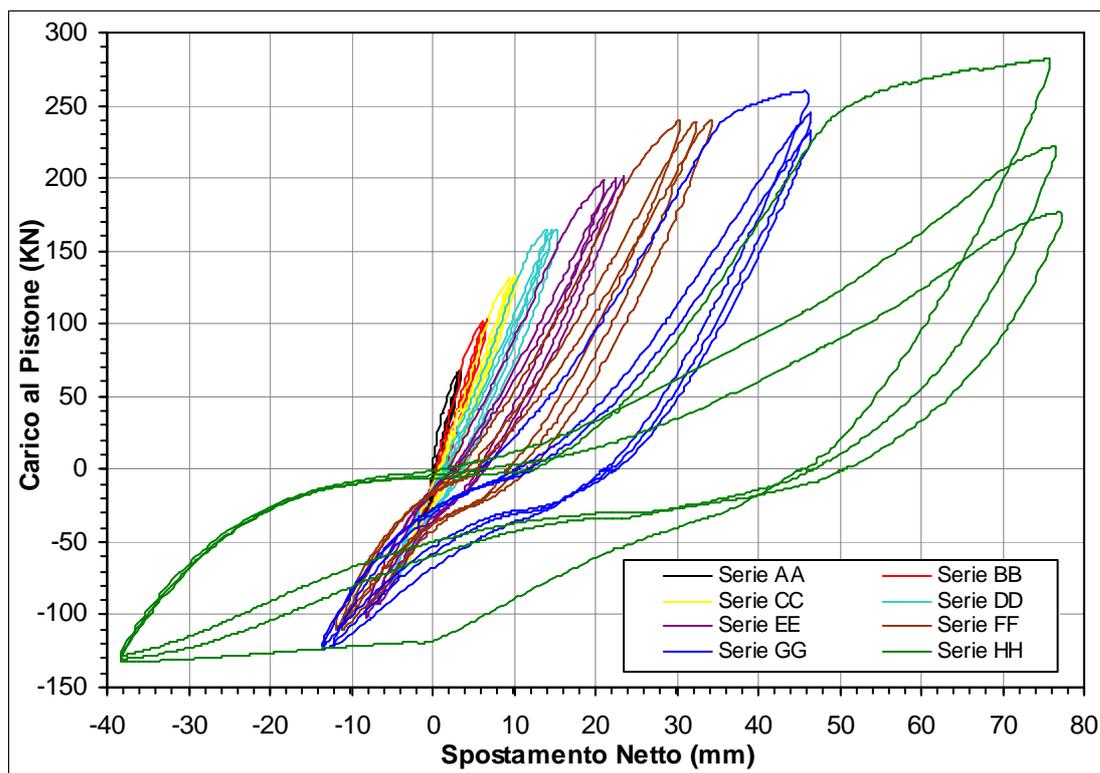
- rotazione rigida (espressa in rad.): $\alpha_r = \frac{s_{o,r}}{H} = \frac{L8}{H}$ ⁽¹⁾;
- spostamento verticale rigido d'estremità trave: $s_{v,r} = \alpha_r \cdot D = \frac{L8}{H} \cdot D$.



- **Figura 9.4** - Schema delle rotazioni e componenti di spostamento rigide.

Lo spostamento rigido verticale così definito segue le medesime convenzioni fissate per la lettura L8, quindi risulta sempre concorde allo spostamento rilevato dal filo estensibile; basta pertanto sottrarre tale valore dalla lettura effettuata dal filo estensibile per ottenere il valore dello *spostamento netto di estremità trave* indotto dalle sole deformazioni elastiche e plastiche della struttura. L'andamento dello spostamento netto in funzione del carico di prova è rappresentato in figura 9.5; per consentire una migliore rappresentazione delle curve di caricamento ciclico si è trascurata la linea relativa alla serie II.

⁽¹⁾ Nelle relazioni in esame l'indicazione dello spostamento rilevato dallo strumento viene indicata con la sigla distintiva dello strumento stesso.



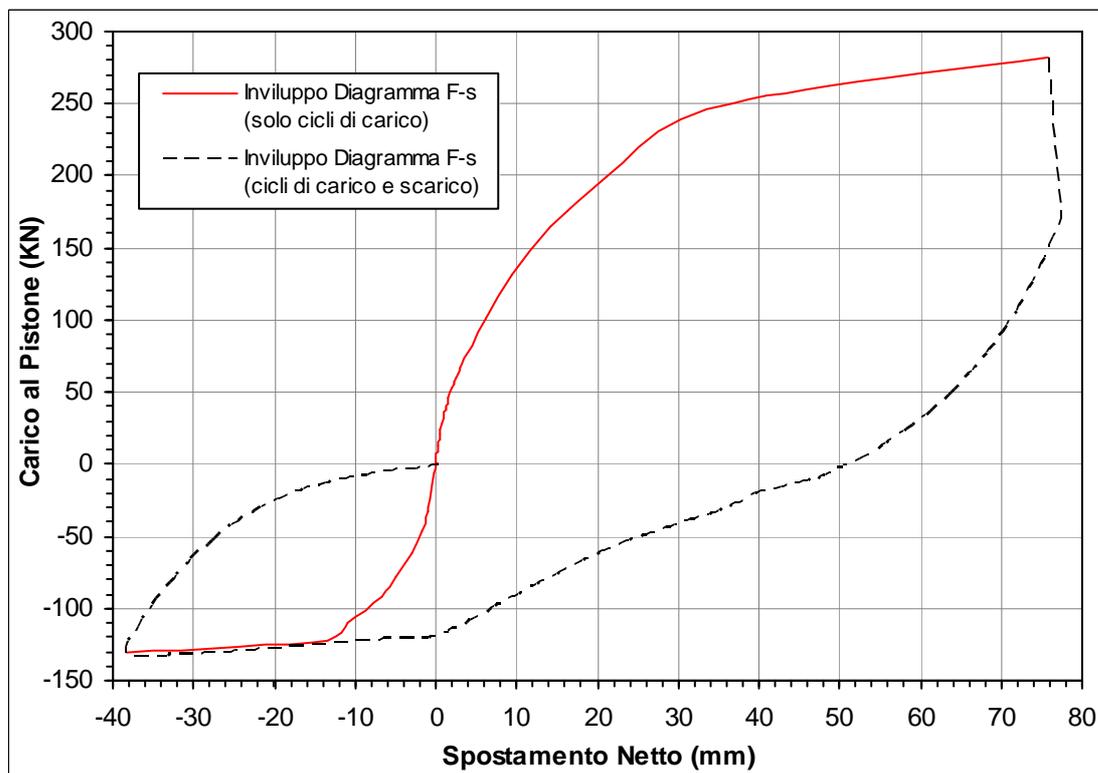
- **Figura 9.5** - Grafico dello spostamento netto di estremità trave in funzione del carico ciclico di prova.

In tabella 9.1 sono riportati i valori massimi e minimi relativi: alla componente verticale di spostamento dell'estremità della trave, totale ed al netto degli spostamenti rigidi; alla componente orizzontale di spostamento rigido della sommità del pilastro; alla componente verticale di spostamento rigido dell'estremità della trave. I valori massimi di spostamento sono stati valutati sia considerando che trascurano la serie II; si noti che le componenti di spostamento rigido (L_8 e $s_{r,v}$), dipendenti soprattutto dal valore di carico applicato, si sono comunque registrate in corrispondenza del 1° ciclo della serie di carico HH. Questo accade poiché le ultime tre serie di carico sono condotte in *controllo di spostamento* ($80\text{mm} \div -40\text{mm}$ per la serie HH) e quindi, per il degrado ciclico delle resistenze, i valori massimo e minimo del carico vengono raggiunti sempre entro il 1° ciclo di ripetizioni (vedi punto 9.5.1); inoltre la serie II, costituita dalla sola trazione fino a 180 mm di abbassamento totale ed effettuata in avanzato stato di fessurazione dell'opera, ha raggiunto valori di carico ridotti rispetto alle due precedenti serie.

s totale max (mm) con serie II	L8 max (mm) con serie II	s_{r,v} max (mm) con serie II	s netto. max (mm) con serie II
178,02 (serie II)	8,94 (1°ciclo-serie HH)	4,71 (1°ciclo-serie HH)	174,62 (serie II)
s totale max (mm) senza serie II	L8 max (mm) senza serie II	s_{r,v} max (mm) senza serie II	s netto max (mm) senza serie II
80,47 (serie HH)	8,94 (1°ciclo-serie HH)	4,71 (1°ciclo-serie HH)	75,76 (serie HH)
s totale min (mm)	L8 min (mm)	s_{r,v} min (mm)	s netto min (mm)
-40,38 (serie HH)	-3,91 (1°ciclo-serie HH)	-2,06 (1°ciclo-serie HH)	-38,31 (serie HH)

- **Tabella 9.1** - Valori estremi, totali e netti, degli spostamenti di estremità trave.

Ottenuta quindi la rappresentazione dell'andamento degli spostamenti netti dell'estremità della trave, conseguenti ai caricamenti ciclici di prova, un'ulteriore elaborazione riguarda la realizzazione della curva d'involuppo dei valori estremi. In figura 9.6 vengono rappresentate due curve di involuppo: la prima unisce tutti i valori estremi del diagramma forza-spostamento netto, considerando sia le fasi di carico che di scarico dell'opera (curva nera tratteggiata + tratto positivo curva rossa), la seconda unisce tutti i valori estremi relativi alle sole fasi di carico (curva rossa continua). Il secondo tipo di involuppo (curva rossa) esprime l'andamento degli spostamenti netti in funzione di un ideale azione crescente monotona del pistone di carico, sia in trazione che in spinta.



- **Figura 9.6** - Curve di Inviluppo dello spostamento netto di estremità trave in funzione del carico di prova.

9.2.3 Grafici momento-curvatura ($M-\chi$)

L'opera soggetta a prova è stata progettata con l'intento di resistere alle azioni sismiche orizzontali preservando l'integrità del pilastro e favorendo l'eventuale plasticizzazione della trave in prossimità del collegamento al pilastro. Per tale ragione i primi due conci consecutivi di trave, di lunghezza pari a 20 cm e 15 cm rispettivamente, computati a partire dalla sezione di collegamento al pilastro, sono stati strumentati con trasduttori induttivi di spostamento. Ripartendo gli spostamenti relativi misurati dagli induttivi sull'intera lunghezza del concio di competenza, sia all'intradosso che all'estradosso, risulta possibile ottenere l'andamento della curvatura media di detti conci in funzione della coppia flettente indotta dal pistone.

Per quanto riguarda il *primo concio*, rappresentato dai primi 20 cm di trave computati dalla faccia esterna del pilastro, gli induttivi a cui fare riferimento sono (vedi schema di fig. 6.1, paragrafo 6.2):

- L4 WA50: posto all'estradosso, in corrispondenza dell'asse della trave, a battuta sul pilastro;

- L1 WA20 ed L3 WA20: posti all'intradosso della trave, in corrispondenza delle ali laterali, entrambi a battuta sullo spigolo del pilastro.

Le deformazioni medie d'intradosso ed estradosso risultano esplicitabili, in funzione delle letture rilevate dagli induttivi, come segue:

- deformazione media dell'estradosso del primo concio:

$$\varepsilon_{m1^{\circ},e} = \frac{L4}{l_1} = \frac{L4(\text{mm})}{200 \text{ mm}} \quad (2);$$

- deformazione media dell'intradosso del primo concio:

$$\varepsilon_{m1^{\circ},i} = \frac{(L1+L3)/2}{l_1} = \frac{[(L1+L3)/2](\text{mm})}{200 \text{ mm}}.$$

Ricordando che la trave ha un'altezza $h = 50 \text{ cm}$ si passa a definire la *curvatura media del primo concio di trave*, nel rispetto delle convenzioni riportate nello schema 9.1, come segue:

$$\chi_{m1^{\circ}} = \frac{(\varepsilon_{m1^{\circ},e} - \varepsilon_{m1^{\circ},i})}{h} = \frac{[L4 - ((L1+L3)/2)](\text{mm})}{200 \cdot 500} \quad [mm^{-1}].$$

Per quanto riguarda il *secondo concio*, rappresentato dai successivi *15 cm* di trave computati dalla sezione terminale del primo concio, gli induttivi a cui fare riferimento sono (vedi schema di fig. 6.1, paragrafo 6.2):

- L5 WA10: posto all'estradosso, in corrispondenza dell'asse della trave, a battuta sulla sezione terminale del primo concio;
- L2 WA10: posto all'intradosso della trave, in corrispondenza dell'asse della trave, a battuta sulla sezione terminale del primo concio.

In analogia con quanto detto per il primo concio, si ha quindi:

- deformazione media dell'estradosso del secondo concio:

$$\varepsilon_{m2^{\circ},e} = \frac{L5}{l_2} = \frac{L5(\text{mm})}{150 \text{ mm}};$$

- deformazione media dell'intradosso del secondo concio:

$$\varepsilon_{m2^{\circ},i} = \frac{L2}{l_2} = \frac{L2(\text{mm})}{150 \text{ mm}};$$

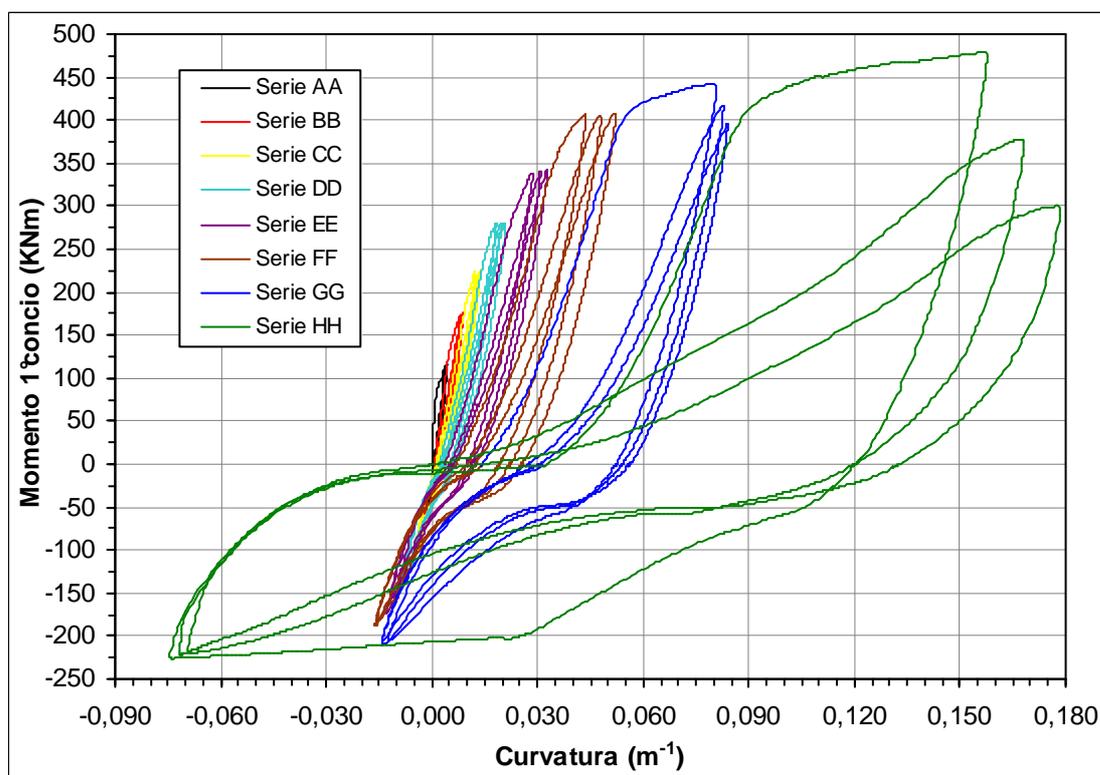
⁽²⁾ Nelle relazioni in esame l'indicazione dello spostamento relativo rilevato dallo strumento viene indicata con la sigla distintiva dello strumento stesso.

– curvatura media del secondo concio di trave:

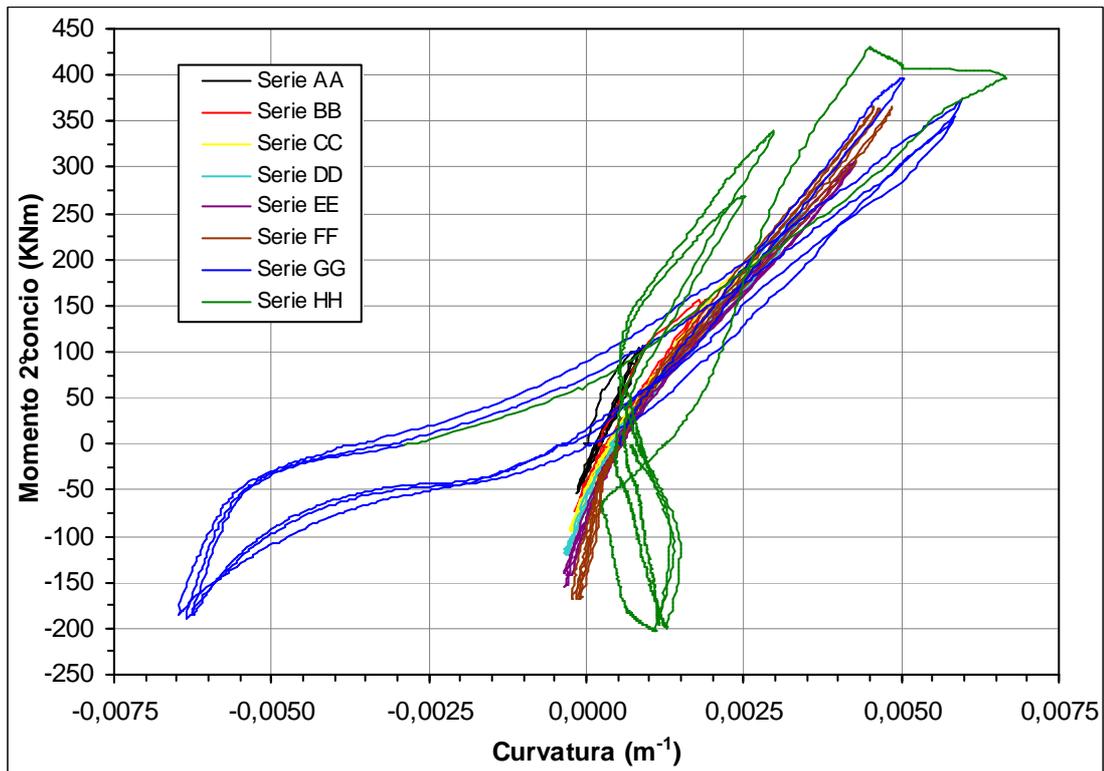
$$\chi_{m2^\circ} = \frac{(\varepsilon_{m2^\circ,e} - \varepsilon_{m2^\circ,i})}{h} = \frac{(L2 - L5)(\text{mm})}{150 \cdot 500} \quad [\text{mm}^{-1}].$$

La sollecitazione di riferimento verrà convenzionalmente assunta pari al momento flettente che l'azione di carico genera in corrispondenza della sezione media di ciascun concio; poiché l'asse di carico è posto ad una distanza $b = 180$ cm dalla sezione di collegamento della trave al pilastro, i due bracci d'azione del pistone rispetto alle sezioni medie del primo e del secondo concio di trave risulteranno pari a $b_{1^\circ} = 170$ cm e $b_{2^\circ} = 152,5$ cm rispettivamente. Avvalendosi pertanto della lettura F della reazione applicata alla cella di carico e rispettando le convenzioni riportate nello schema 9.1, le sollecitazioni flettenti risulteranno rispettivamente $M_{1^\circ} = F \cdot b_{1^\circ} = F(\text{KN}) \cdot 1700$ mm e $M_{2^\circ} = F \cdot b_{2^\circ} = F(\text{KN}) \cdot 1525$ mm.

I diagrammi così definiti sono rappresentati nelle figure 9.7 e 9.8; in entrambi i grafici si è trascurata la serie II di carico, mentre le curve relative alle restanti serie sono state, al solito, distinte mediante una differente colorazione.



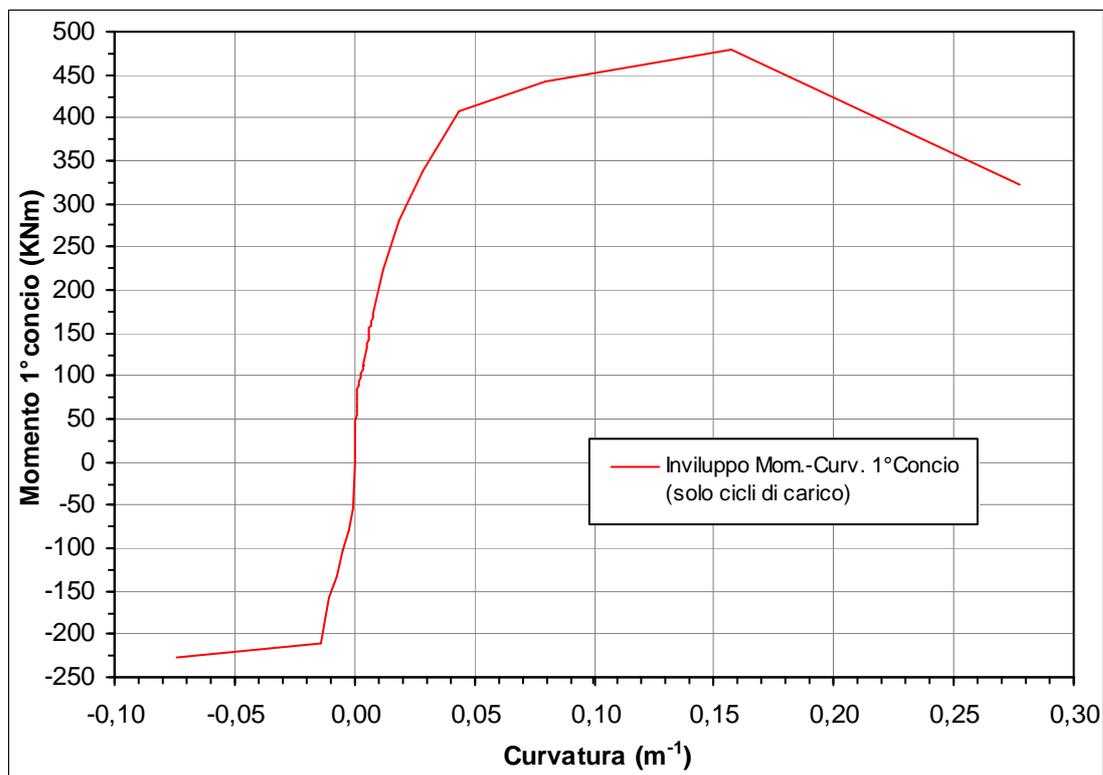
- **Figura 9.7** - Grafico della curvatura media del primo concio di trave in funzione della coppia di carico ciclico di prova.



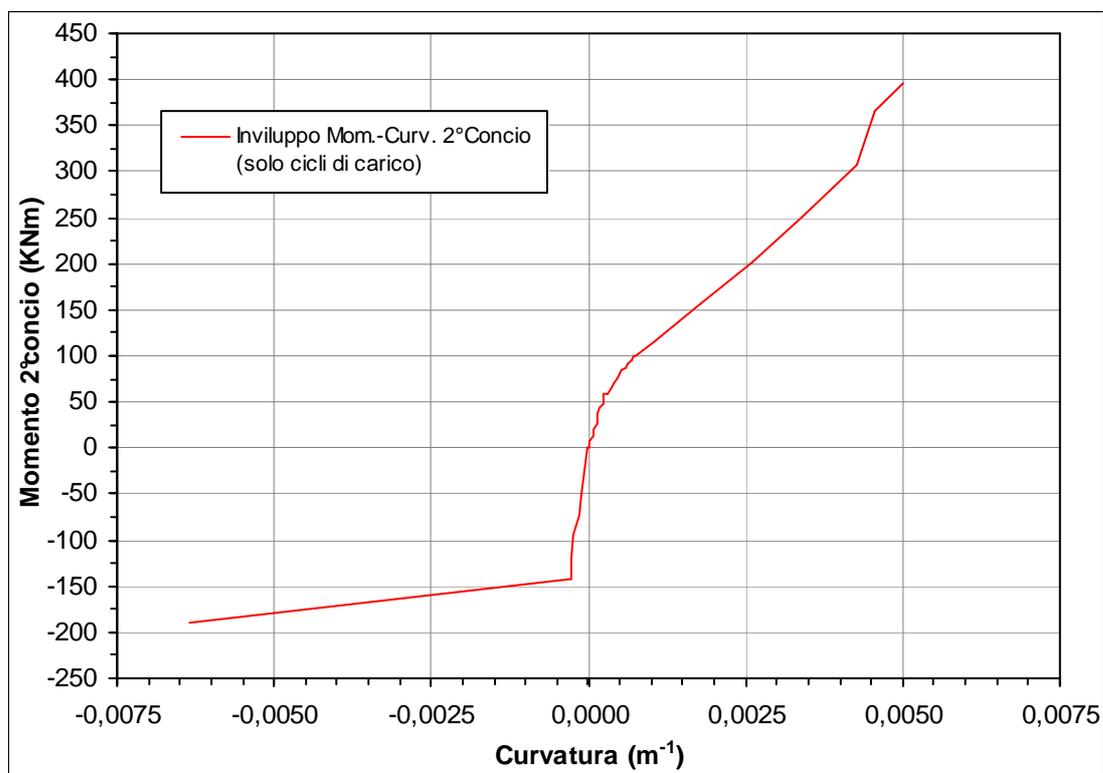
- **Figura 9.8** - Grafico della curvatura media del secondo concio di trave in funzione della coppia di carico ciclico di prova.

Così come si è fatto nel caso del diagramma forza-spostamento, anche per la rappresentazione delle variazioni cicliche della curvatura in funzione del momento applicato risulta interessante, ai fini delle considerazioni successive, definire le curve che collegano tutti i valori estremi raggiunti all'interno delle varie serie di carico. Le figure 9.9 e 9.10 rappresentano le curve d'involucro del legame momento-curvatura ottenute trascurando i rami di scarico:

- nel diagramma di fig. 9.9, relativo al primo concio di trave, l'involucro tiene in considerazione anche la serie II, precedentemente tralasciata per esigenze rappresentative;
- nel diagramma di fig. 9.10, relativo al secondo concio, l'involucro non prende in considerazione la serie di carico HH, in quanto uno scorrimento a carico costante rilevato in L5, probabilmente dovuto a micro fessurazioni nell'interfaccia tra acciaio d'armatura e calcestruzzo, determina un'inversione della curvatura per momenti negativi, come si può notare in figura 9.8.



- **Figura 9.9** - Involuppo delle curvature medie del 1° concio di trave in funzione del momento di prova.



- **Figura 9.10** - Involuppo delle curvature medie del 2° concio di trave in funzione del momento di prova.

In ambo i casi le rappresentazioni della variazione di curvatura media dei conci di trave appaiono come fossero prodotte da una sollecitazione flessionale crescente in maniera monotona, sia in verso positivo che negativo.

9.3 Indagini sperimentali sulle caratteristiche dei materiali

Prima di affrontare la descrizione del comportamento strutturale si analizzano rapidamente le caratteristiche meccaniche sperimentali dei materiali utilizzati nella realizzazione del nodo a tre vie. La loro determinazione è stata effettuata mediante prove a rottura effettuate, presso il laboratorio di dipartimento (LaPS), su appositi provini aventi dimensioni normalizzate.

Le modalità di confezionamento e stagionatura, ed i risultati ottenuti dalle prove di resistenza, sono i seguenti:

- la prova di trazione sull'acciaio per cemento armato tipo *B450C* saldabile, ha fatto registrare, con particolare riferimento alle barre di diametro pari a 18 mm (utilizzate per gli spezzoni integrativi), una tensione di snervamento $f_{y,18} = 490 \text{ N/mm}^2$ ed una tensione a rottura pari a $f_{t,18} = 610 \text{ N/mm}^2$;
- i 4 provini cubici di calcestruzzo tipo *C40/50*, prelevati contestualmente all'esecuzione del getto di prefabbricazione e costipati senza vibratura, hanno subito una stagionatura in cella ad umidità controllata: 2 a secco, 2 in immersione; la prova di compressione uniassiale ha evidenziato una resistenza media a rottura pari a $R_{cm,40/50} = 58,8 \text{ N/mm}^2$, con un valore minimo pari a $R_{1,40/50} = 53,3 \text{ N/mm}^2$;
- i 2 provini cubici di calcestruzzo tipo *C25/30*, prelevati contestualmente all'esecuzione del getto di completamento e costipati senza vibratura, hanno subito una stagionatura in cella ad umidità controllata ed in immersione. la prova di compressione uniassiale ha evidenziato una resistenza media a rottura pari a $R_{cm,25/30} = 31,3 \text{ N/mm}^2$, con un valore minimo pari a $R_{1,25/30} = 31,2 \text{ N/mm}^2$.

Le indicazioni di accettazione relative all'*acciaio* per cemento armato, riportate al punto 11.3.2.10 della normativa attualmente in vigore [13], indicano un limite minimo per la tensione di snervamento pari a $f_{y,min} = 425 \text{ N/mm}^2$, rispettato

dal valore rilevato, ed un intervallo di variazione per il rapporto tra i valori delle tensioni di rottura e snervamento pari a $1,13 < f_t/f_y < 1,37$, anch'esso rispettato, poiché i valori rilevati forniscono un rapporto pari a $610/490 = 1,24$.

Un interessante parametro che si rivelerà utile nell'interpretazione delle rilevazioni estensimetriche risulta essere la *deformazione sperimentale a snervamento dell'acciaio*; considerando per il modulo elastico dell'acciaio il valore di riferimento $E_s = 210.000 \text{ N/mm}^2$, il valore di tale deformazione risulta:

$$\varepsilon_{s,y} = \frac{f_{y,18}}{E_s} = \frac{490}{210.000} \approx 2,3\% = 2.300 \mu\varepsilon.$$

Le indicazioni di accettazione relative al *calcestruzzo*, riportate al punto 11.2.5 della normativa attualmente in vigore [13], prevedono la verifica di due disuguaglianze: la prima relativa al minore dei valori di resistenza rilevati sui campioni prelevati è $R_1 \geq R_{ck} - 3,5$, la seconda relativa alla resistenza media dei prelievi è $R_m \geq R_{ck} + 3,5$.

Il calcestruzzo utilizzato per il confezionamento dei getti prefabbricati ha ampiamente rispettato tali limitazioni, risultando $R_{1,40/50} = 53,3 > 50 - 3,5$ e $R_{cm,40/50} = 58,8 > 50 + 3,5$.

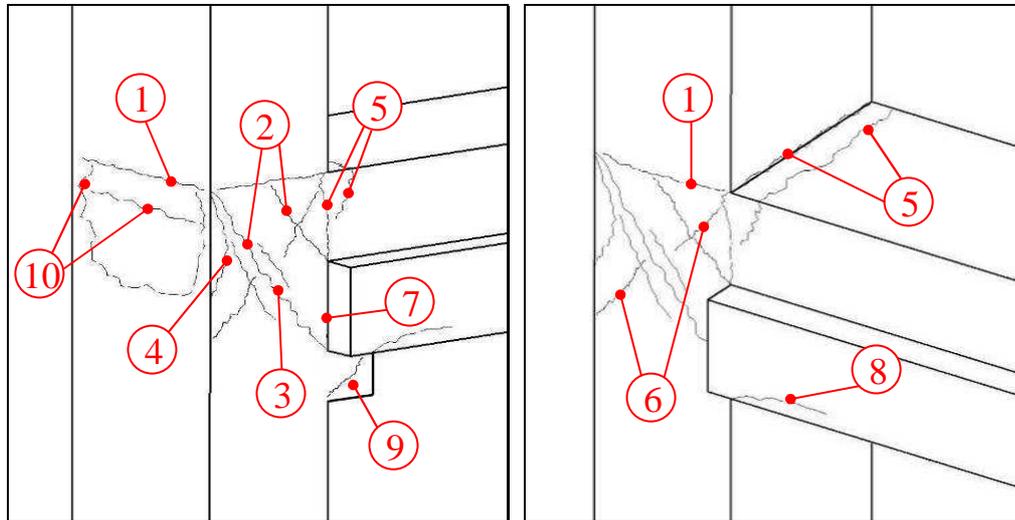
Il calcestruzzo utilizzato nell'esecuzione del getto di completamento ha invece evidenziato livelli di resistenza non propriamente idonei alla classe richiesta; risultando infatti $R_{1,25/30} = 31,2 > 30 - 3,5$ e $R_{cm,25/30} = 31,3 < 30 + 3,5$, si nota come non venga garantito il rispetto della resistenza caratteristica ($R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$) corrispondente al frattile inferiore al 5%.

9.4 Analisi locale del comportamento strutturale

Nel presente paragrafo si utilizzeranno i dati di prova, registrati ed elaborati, e le relative rappresentazioni grafiche realizzate al fine di analizzare, nel dettaglio, il comportamento strutturale del nodo a tre vie sottoposto a prova di carico ciclico; si effettuerà inoltre un loro raffronto con le osservazioni macroscopiche e le immagini raccolte durante la prova al fine di confermare od approfondire i differenti meccanismi resistenti posti in evidenza.

L'ordine logico che si è scelto di seguire nell'analizzare il comportamento dei vari elementi, componenti la struttura oggetto di prova, rispetta la cronologia

delle osservazioni che è stato possibile effettuare ad occhio nudo durante l'applicazione dei cicli di carico. Lo schema semplificato riportato in figura 9.11 consente di evidenziare ed enumerare la sequenza delle fessurazioni generate a seguito dell'applicazione delle serie di carico.



- **Figura 9.11** - Schematizzazione della posizione delle fessure e numerazione in ordine cronologico di apparizione.

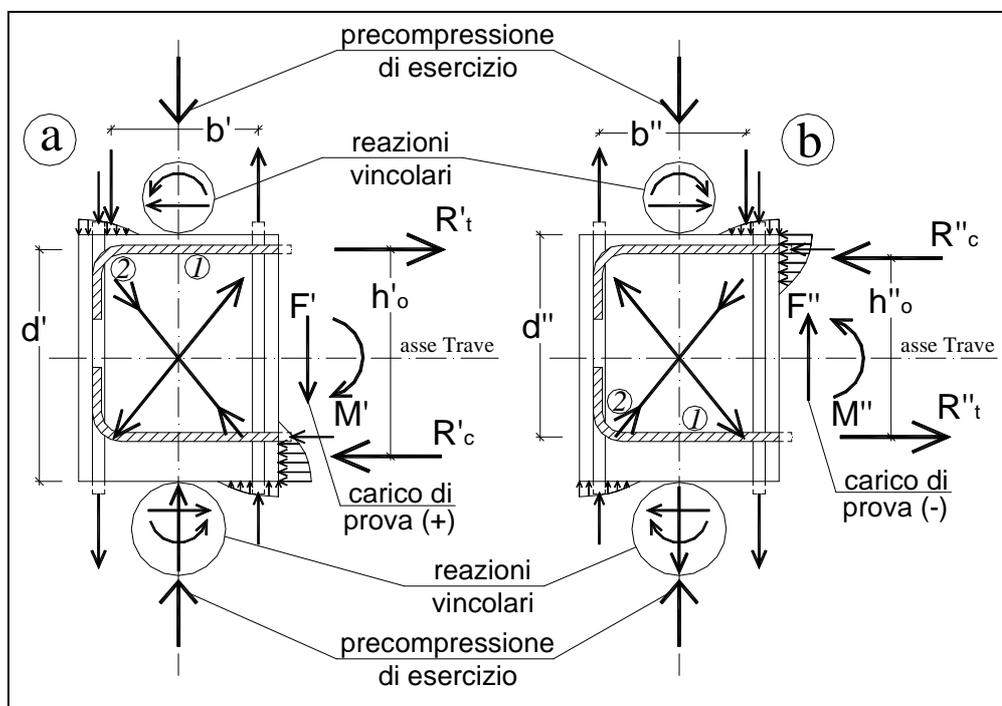
9.4.1 Pannello di nodo

Il nodo di collegamento è una zona diffusiva di carico attraverso la quale le sollecitazioni, che la trave riceve dal pistone, vengono trasmesse alle porzioni superiore ed inferiore del pilastro; queste ultime, a loro volta, restituiscono al nodo le reazioni vincolari esercitate dalle strutture di contrasto, responsabili dell'equilibrio globale della struttura. Inoltre, nel caso in esame di collegamento d'estremità tra trave e pilastro, il nodo risulta essere anche sede dell'intero ancoraggio degli spezzoni integrativi di collegamento della trave, superiori ed inferiori. Il complesso delle sollecitazioni agenti sull'elemento di nodo risulta pertanto quello schematizzato in figura 9.12, dove la coppia trasmessa dalla trave al nodo di collegamento risulta $M'=F'\cdot b$, nel caso di azione di carico positiva, e $M''=F''\cdot b$, nel caso di azione di carico negativa, essendo $b = 180$ cm il braccio d'azione dell'asse del pistone rispetto alla sezione di collegamento della trave.

Le risultanti di trazione e compressione, relative alla sezione di collegamento alla trave (R'_t , R''_t ed R'_c , R''_c in fig. 9.12), risultano essere le sollecitazioni più incisive sullo stato tensionale del nodo, sia perché dovendo equilibrare la coppia

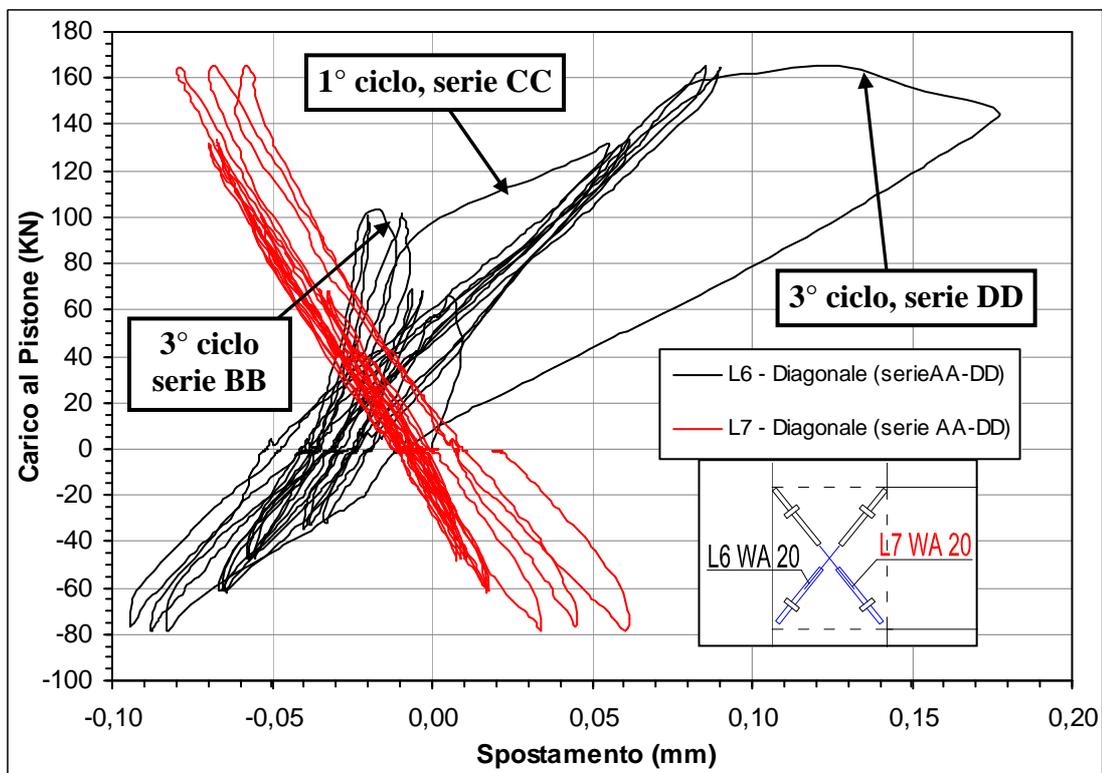
generata dal pistone di spinta, disponendo di un braccio di coppia interna ridottissimo, assumono valori rilevanti, sia perché il nodo di collegamento, in quanto elemento tozzo, risulta maggiormente vulnerabile alle sollecitazioni taglianti. Le risultanti di trazione, in modo particolare, vengono equilibrate dall'ancoraggio d'estremità delle barre integrative realizzato sul lato esterno del nodo mediante piegature a 90° e spezzoni trasversali di contrasto (vedi dettagli costruttivi in fig. 2.7, par. 2.2), generando importanti trasferimenti di tensioni di trazione per aderenza al conglomerato circostante al tratto orizzontale dell'ancoraggio (*zona 1* nello schema di fig.9.12), e di compressione alla sommità del puntone diagonale di conglomerato che fa capo alle piegature d'ancoraggio delle barre (*zona 2* nello schema di fig.9.12).

Dato che il valore massimo del carico di prova applicato dal pistone in fase spinta (*schema b* di fig. 9.12) risulta essere 0,45 volte (vedi par. 8.3.1) quello applicato in fase di trazione (*schema a* di fig. 9.12), la condizione di carico relativa allo *schema a* di fig. 9.12 risulterà la più sfavorevole per il nodo in esame; in particolar modo la trazione diagonale indotta nel pannello di nodo nel caso dello *schema a*, con carico positivo (vedi convenzioni fig. 9.1), risulterà preponderante rispetto alla trazione relativa allo *schema b*, con carico di segno negativo.



- Figura 9.12 - Schematizzazione delle risultanti di carico agenti sul nodo.

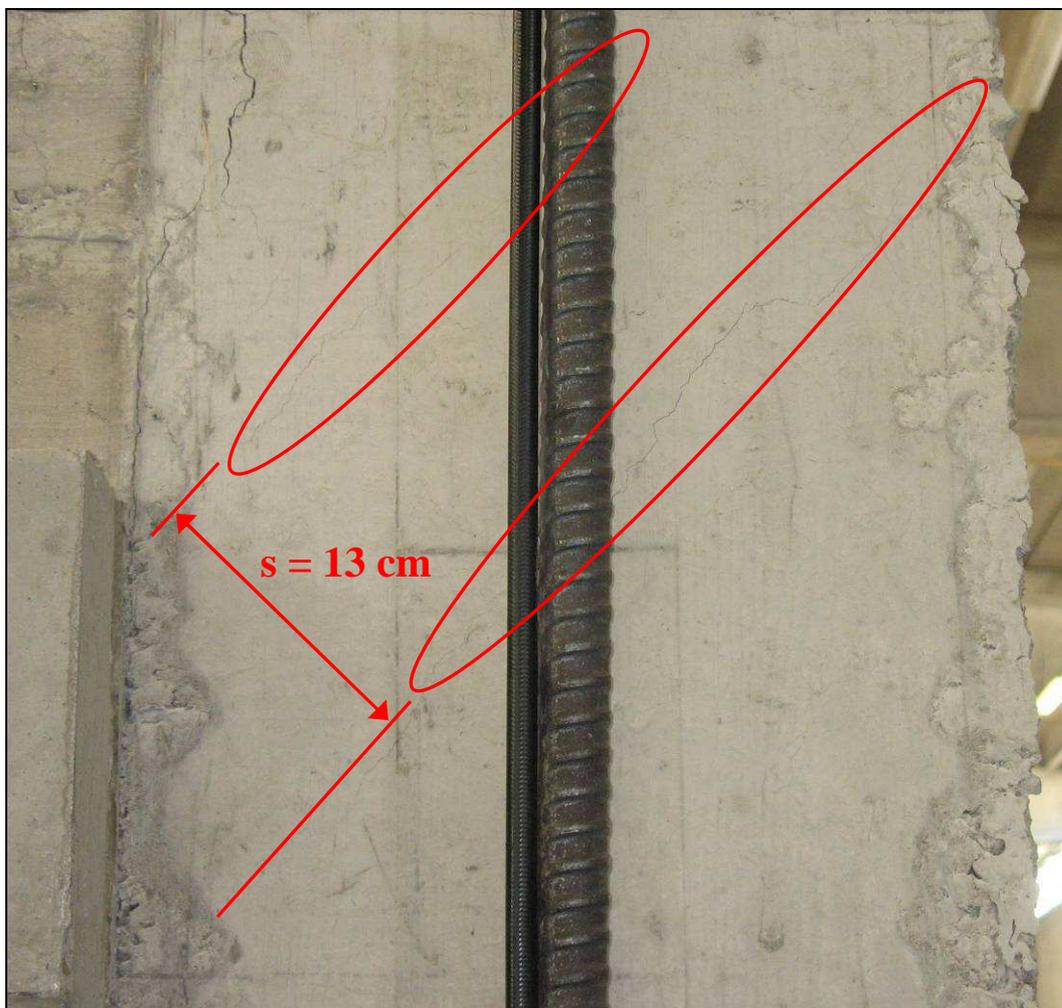
In figura 9.13 vengono riportate le letture effettuate dai due trasduttori induttivi, L6 ed L7, posti sulle diagonali di nodo (vedi schema di fig. 6.1, par. 6.2); tali letture vengono rappresentate in funzione dell'azione applicata dal pistone nell'arco delle prime quattro serie di carico, e nel rispetto delle convenzioni di figura 9.1. Si può notare, a conferma delle riflessioni teoriche effettuate, che le deformazioni maggiori si sono verificate in corrispondenza dei carichi di segno positivo, evidenziando tre scorrimenti in corrispondenza della diagonale tesa (vedi frecce in fig. 9.13); il terzo di tali scorrimenti ha prodotto, su entrambi i pannelli di nodo, due fessure parallele apprezzabili anche ad occhio nudo, rappresentate nello schema di figura 9.11 con il numero 2 e visibili anche dall'immagine di figura 9.14.



- Figura 9.13 - Grafico delle deformazioni diagonali del pannello di nodo rilevate dagli induttivi L6 ed L7 in funzione del carico di prova: prime quattro serie di carico.

Le fessure diagonali delimitano la biella compressa di calcestruzzo che funge da puntone per il traliccio resistente di nodo sotto l'azione dei carichi con segno positivo; le linee rosse rappresentate in figura 9.14, che ne rappresentano il prolungamento, delimitano lo spessore s di tale biella (pari a circa 13 cm). Risulta evidente inoltre come la sezione verticale della porzione terminale della biella risulti praticamente coincidente all'altezza dell'ala prefabbricata della trave, a

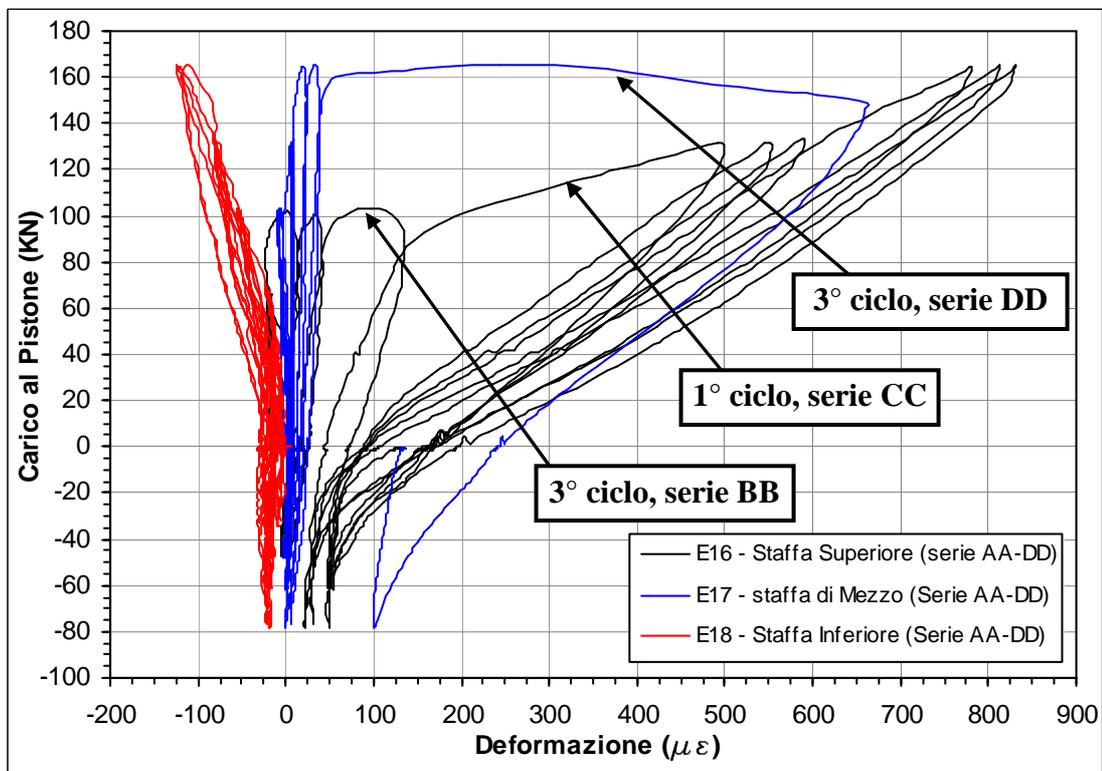
dimostrazione del fatto che l'elevata resistenza del calcestruzzo impiegato nelle porzioni prefabbricate offre una buona base d'appoggio per il conglomerato di nodo, molto più comprimibile.



- Figura 9.14 - Particolare delle fessurazioni presenti sul pannello di nodo (3° ciclo-serie EE).

Il processo di fessurazione del nodo, iniziato con lo scorrimento registrato in L6 in corrispondenza del 3° ciclo di carico della serie BB e proseguito in corrispondenza del 1° ciclo della serie CC e del 3° ciclo della serie DD (vedi fig. 9.13), si ripercuote anche sullo stato deformativo delle staffe di nodo, denotando un parziale trasferimento di tensione dal calcestruzzo alle suddette staffe. Ne è conferma la registrazione effettuata dagli estensimetri posti sulla 3° e 5° staffa di nodo, riportata nel diagramma di figura 9.15; la reale disposizione delle staffe è tracciata nelle figure 9.18 e 9.19, mentre per quanto riguarda la disposizione degli estensimetri si fa riferimento allo schema di figura 5.36, riportato al paragrafo 5.3. La 5° staffa superiore di nodo (a cui è applicato l'E16), risultata praticamente scarica

per quasi tutte le prime due serie di carico, è soggetta ad un primo lieve incremento di deformazione (rilevato dall'E16 in fig. 9.15) in corrispondenza del primo scorrimento registrato dall'induttivo L6 (3° ciclo, serie BB); quindi, all'atto della fessurazione iniziale del tratto superiore della diagonale di nodo (1° ciclo, serie CC), subisce un incremento istantaneo di deformazione che testimonia l'avvenuto trasferimento di una quota parte del carico totale di prova alle staffe superiori di nodo. Successivamente il propagarsi della fessura (3° ciclo, serie DD) genera un repentino aumento di deformazione anche nella 3° staffa di nodo (a cui è applicato l'E17), con un'inclinazione delle successive curve rappresentative delle deformazioni rilevate dall'estensimetro E17 che vanno ad allinearsi alle curve rilevate dall'estensimetro E16, applicato alla 5° barra superiore.



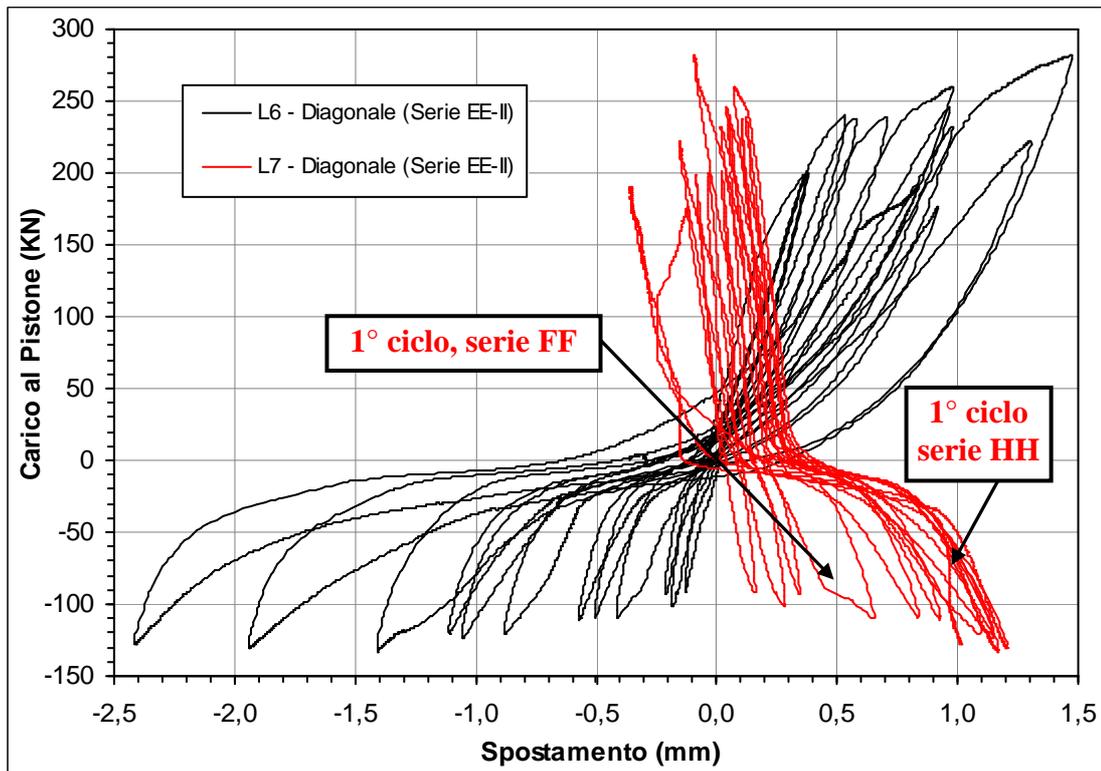
- **Figura 9.15** - Grafico delle deformazioni assiali delle staffe di nodo rilevate dagli estensimetri E16, E17 ed E18 in funzione del carico di prova: prime quattro serie di carico.

Al crescere del carico, e quindi all'aumentare delle sollecitazioni agenti sulle diagonali di nodo, le letture effettuate dagli induttivi evidenziano forti incrementi deformativi. Sulla diagonale parallela all'induttivo L7, al crescere del carico di segno positivo, si creano nuove fessurazioni sempre parallele alla biella compressa del traliccio di nodo (rappresentate con il numero 4 nello schema di fig. 9.11),

mentre le fessure già formatesi si ampliano. Sulla diagonale parallela all'induttivo L6, al crescere del carico di segno negativo, appare la prima fessura (rappresentata con il numero 6 nello schema di fig. 9.11), che tende ad ampliarsi, nell'arco dei cicli successivi, fino al centro del pannello.

Tali fenomeni risultano ben visibili dal diagramma rappresentato in figura 9.16, relativo alle rilevazioni effettuate dagli induttivi di nodo nel corso delle ultime cinque serie di carico. Le curve relative ad L6 evidenziano l'ampliarsi delle fessurazioni prodotte dal carico di segno positivo, mentre in corrispondenza dell'inversione del carico, e quindi dell'inversione delle sollecitazioni applicate sulle diagonali, i plateau deformativi, presenti sia in L6 che L7, denotano gli scorrimenti relativi alla chiusura di tali fessure; queste deformazioni si verificano sia in accorciamento sulla diagonale compressa (parallela ad L6), sia in allungamento su quella tesa (parallela ad L7), provocando nel complesso uno scorrimento orizzontale della sommità del pannello di nodo. Le curve relative ad L7 evidenziano invece gli scorrimenti, indotti dal carico di segno negativo, relativi al 1° ciclo della serie FF ed al 1° ciclo della serie HH (vedi frecce in fig. 9.16), corrispondenti all'apparizione delle fessurazioni parallele all'induttivo L6.

Nel corso della serie di carico HH l'elevato degrado del collegamento di nodo, testimoniato soprattutto dallo scorrimento degli ancoraggi delle barre integrative superiori e generato in parte dalle diffuse plasticizzazioni delle barre integrative, sia superiori che inferiori (vedi punto 9.4.4), genera un notevole ampliarsi delle deformazioni diagonali; le tre compressioni cicliche della diagonale parallela ad L6, relative ai carichi negativi della serie HH, producono degli accorciamenti di 1,4 mm, 1,95 mm e 2,4 mm, doppi rispetto ai valori registrati nell'arco delle serie precedenti.

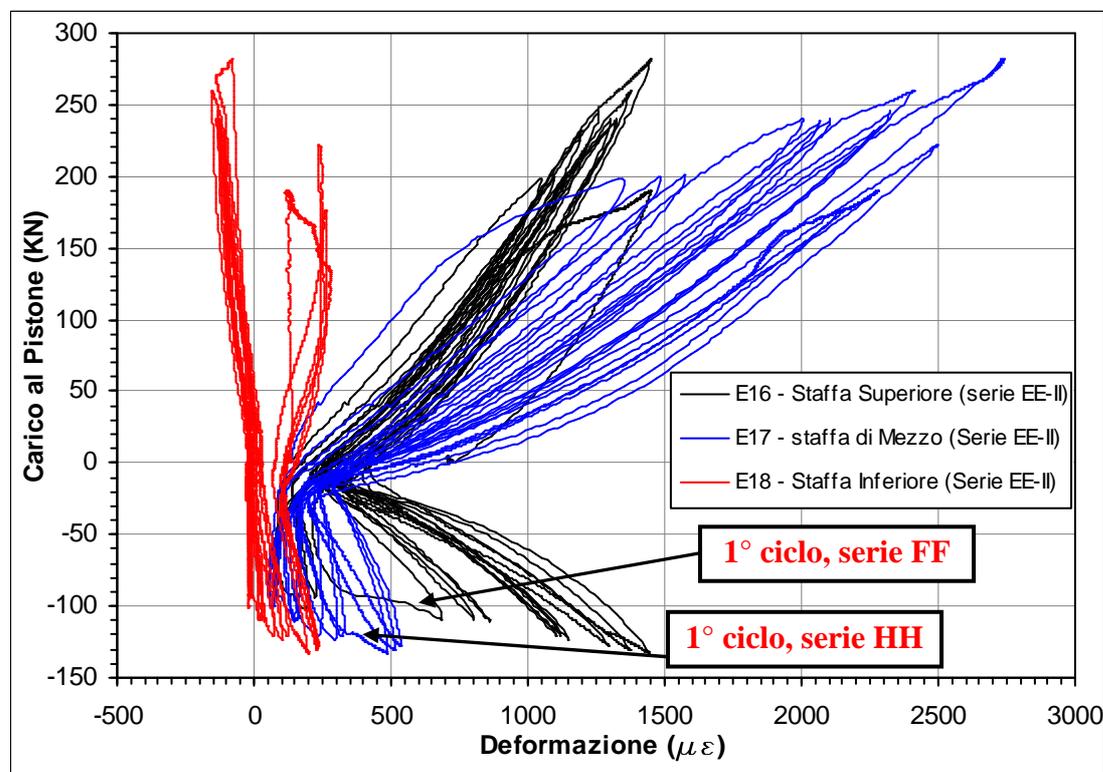


- **Figura 9.16** - Grafico delle deformazioni diagonali del pannello di nodo rilevate dagli induttivi L6 ed L7 in funzione del carico di prova: ultime cinque serie di carico.

Anche l'analisi delle deformazioni assiali rilevate sulle staffe di nodo nel corso delle ultime cinque serie di carico, rappresentate dal diagramma di figura 9.17, conferma l'amplificarsi del quadro fessurativo descritto in precedenza.

L'ulteriore trasferimento di trazioni sulle staffe di nodo, provocato dall'amplificarsi delle fessure indotte dal carico di segno positivo, risulta rilevante soprattutto in corrispondenza della 3° staffa (a cui è applicato l'E17); l'andamento delle curve relative alle rilevazioni effettuate dall'estensimetro E17, in corrispondenza dei valori positivi di carico, mostra infatti un progressivo incremento d'inclinazione, accompagnato da notevoli escursioni deformative che si spingono oltre il limite di snervamento del $2,3\%$ ($2.300 \mu\epsilon$). La formazione delle nuove fessurazioni in corrispondenza dei carichi di segno negativo produce un incremento deformativo sulle staffe centrali di nodo, risultate praticamente scariche nell'arco delle precedenti fasi cicliche di caricamento a segno negativo. Gli scorrimenti, registrati dagli induttivi in corrispondenza dei massimi valori negativi di carico, producono concomitanti e repentini aumenti di deformazione rilevati dall'estensimetro E16, applicato sulla 5° staffa, in corrispondenza del 1° ciclo della serie FF, e dall'estensimetro E17, posto sulla 3° staffa, in corrispondenza del 1°

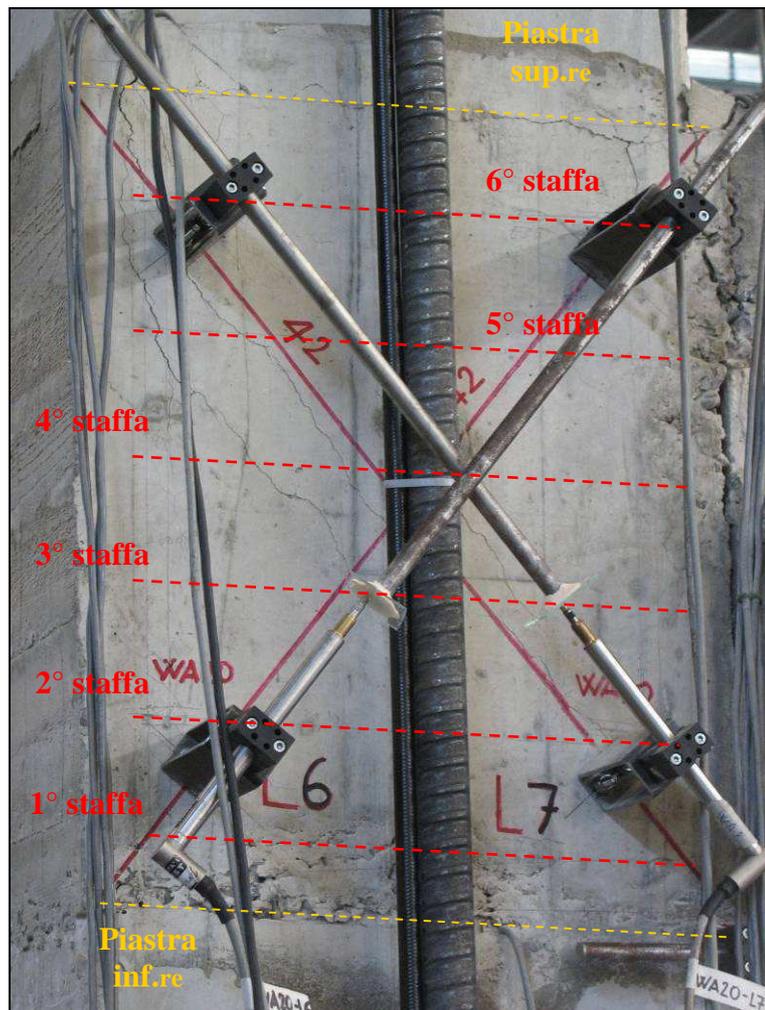
ciclo della *serie HH* (vedi frecce in fig. 9.17). Per i restanti cicli di carico previsti nelle *serie HH* ed *II* le staffe partecipano attivamente al meccanismo resistente del traliccio di nodo per l'intera escursione del carico di prova, evidenziano esclusivamente deformazioni di trazione che crescono al crescere del modulo dell'azione di prova.



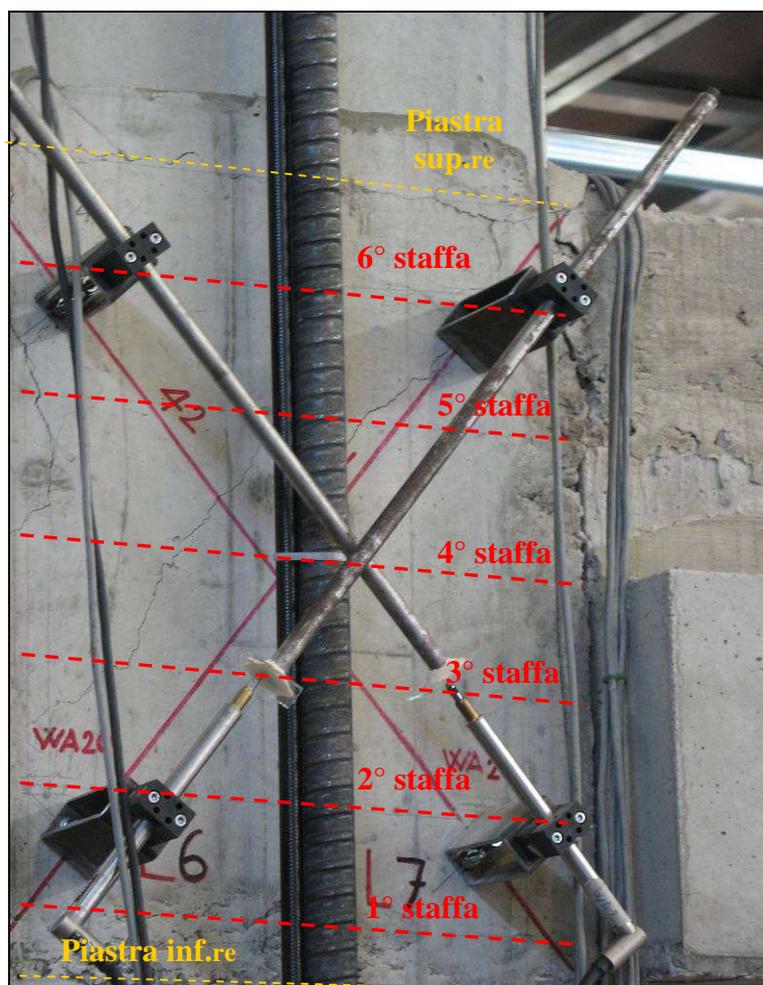
- **Figura 9.17** - Grafico delle deformazioni assiali delle staffe di nodo rilevate dagli estensimetri E16, E17 ed E18 in funzione del carico di prova: ultime cinque serie di carico.

Le immagini riportate nelle figure 9.18 e 9.19 mostrano l'apertura delle fessure del pannello di nodo in corrispondenza, rispettivamente, del massimo valore positivo e del minimo valore negativo del carico applicato al 2° ciclo della *serie HH*. La tracciatura degli assi delle staffe di nodo (linee rosse tratteggiate) consente di evidenziare la reale disposizione di quelle strumentate, comprendendo ancora meglio il coinvolgimento della 3° e 5° staffa nel meccanismo resistente a taglio del pannello di nodo. Si noti inoltre che la 1° staffa (a cui è applicato l'E18) ricade in una zona marginale del nodo, in cui è presente anche il contributo a trazione fornito dalla piastra inferiore di contenimento del getto di prefabbricazione (rappresentata dalle linee color oro tratteggiate), avente uno spessore di 5 mm e posta a circa 2 cm più in basso; risultano pertanto giustificabili le ridotte deformazioni assiali, rilevate

dall'estensimetro E18 applicato a tale staffa ed evidenziate nei grafici delle figure 9.15 e 9.17.



- **Figura 9.18** - Fessurazione del pannello di nodo in corrispondenza del carico massimo positivo (2° ciclo-serie HH).



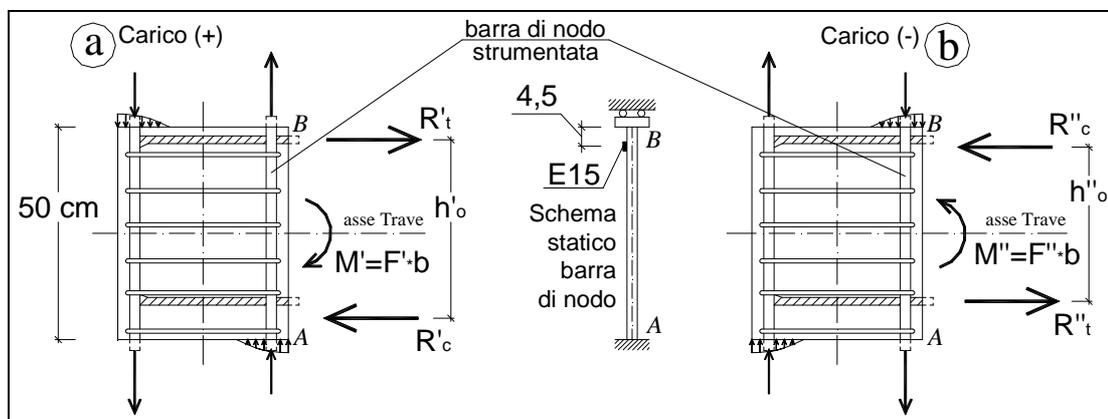
- Figura 9.19 - Fessurazione del pannello di nodo in corrispondenza del carico massimo negativo (2° ciclo-serie HH).

9.4.2 Barre longitudinali di nodo (E15)

Allo scopo di completare il quadro descrittivo dei meccanismi resistenti innescati, dall'applicazione del carico di prova, all'interno del nodo di collegamento e di trovare ulteriori conferme alle riflessioni fin'ora svolte, si procede analizzando lo stato deformativo relativo alle porzioni di barre longitudinali del pilastro interessate dall'innesto di collegamento della trave.

La rilevazione di cui si dispone è stata effettuata dall'estensimetro E15, applicato sulla barra longitudinale centrale del pilastro, disposta sul lato prospiciente la trave; lo strumento, incollato alla sommità del tratto di tale barra che attraversa il nodo di collegamento (vedi schema di fig. 5.36 ed immagine 5.49, par. 5.3), va a completare, assieme a quelli analizzati in precedenza, la gamma di strumenti predisposti al monitoraggio del nodo di collegamento.

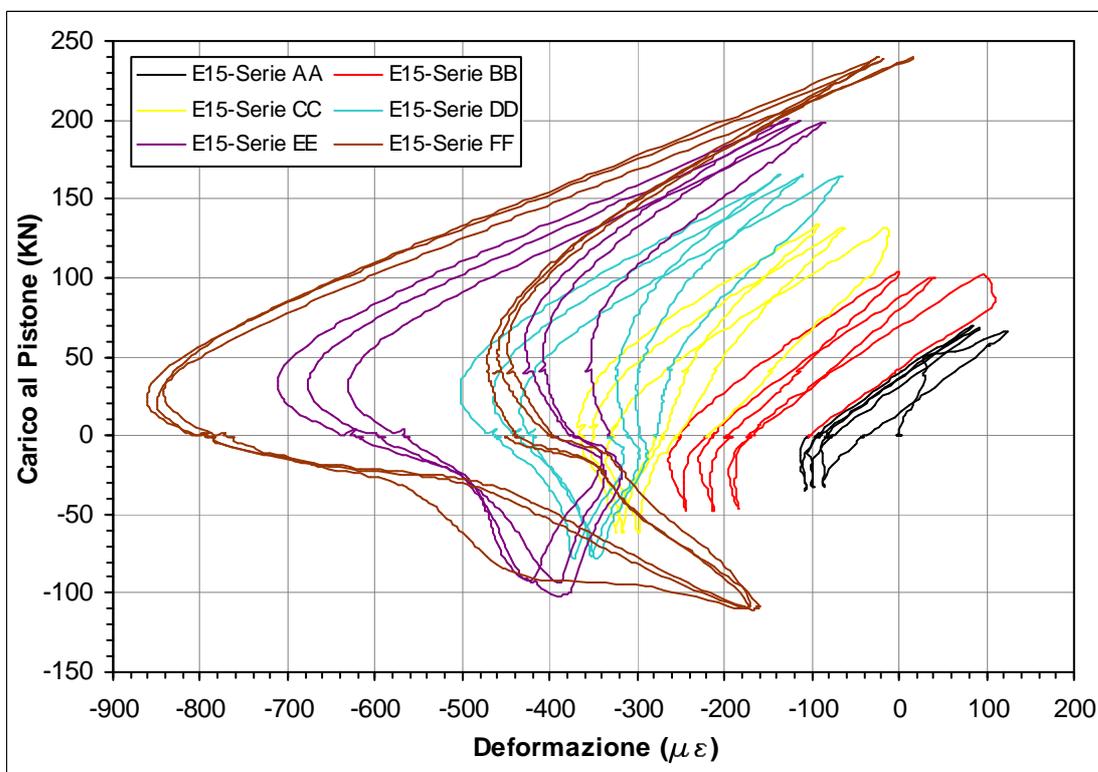
Il sistema di connessione in esame prevede, come ampiamente descritto al capitolo 2, la prefabbricazione del pilastro con la creazione di un'interruzione di getto in grado di accogliere le armature ed il conglomerato di completamento; le barre longitudinali $\varnothing 24$ del pilastro risultano pertanto ancorate, nei tratti superiori ed inferiori di 175 cm di lunghezza ciascuno, nel calcestruzzo di prefabbricazione, avente classe di resistenza $C40/50$, mentre per i restanti 50 cm, relativi al nodo di collegamento, vengono inglobate nel conglomerato integrativo (di classe $C25/30$), avente caratteristiche meccaniche inferiori. La barra di nodo risulta pertanto schematizzabile, come rappresentato in figura 9.20, mediante un sistema di vincolo a doppio incastro scorrevole ed un sistema di carico costituito da azioni assiali, derivanti dalle sollecitazioni flessionali trasmesse dalle due porzioni di pilastro, e da azioni trasversali, frutto delle ripartizione delle azioni taglianti di nodo. La deformazione della singola barra longitudinale risulterà quindi caratterizzata da: *spostamenti trasversali e deformazioni assiali*, frutto dello scorrimento a taglio del pannello di nodo; *deformazioni assiali*, prodotte dalle risultanti derivanti dalle sollecitazioni flessionali trasmesse dal pilastro; *rotazioni d'estremità*, indotte dalla deformazione flessionale delle sezioni estreme di collegamento del pilastro al nodo.



- Figura 9.20 - Schema statico delle barre longitudinali di nodo e rappresentazione delle sollecitazioni ad esse applicate.

Avvalendosi dei diagrammi rappresentativi delle deformazioni assiali rilevate dall'estensimetro E 15, posto sulla faccia interna della barra longitudinale di nodo a 4,5 cm dalla piastra superiore di interruzione del getto, si cerca di ricostruire la deformata tipo della barra al variare del segno e del modulo massimo (quindi della serie di appartenenza) del carico di prova.

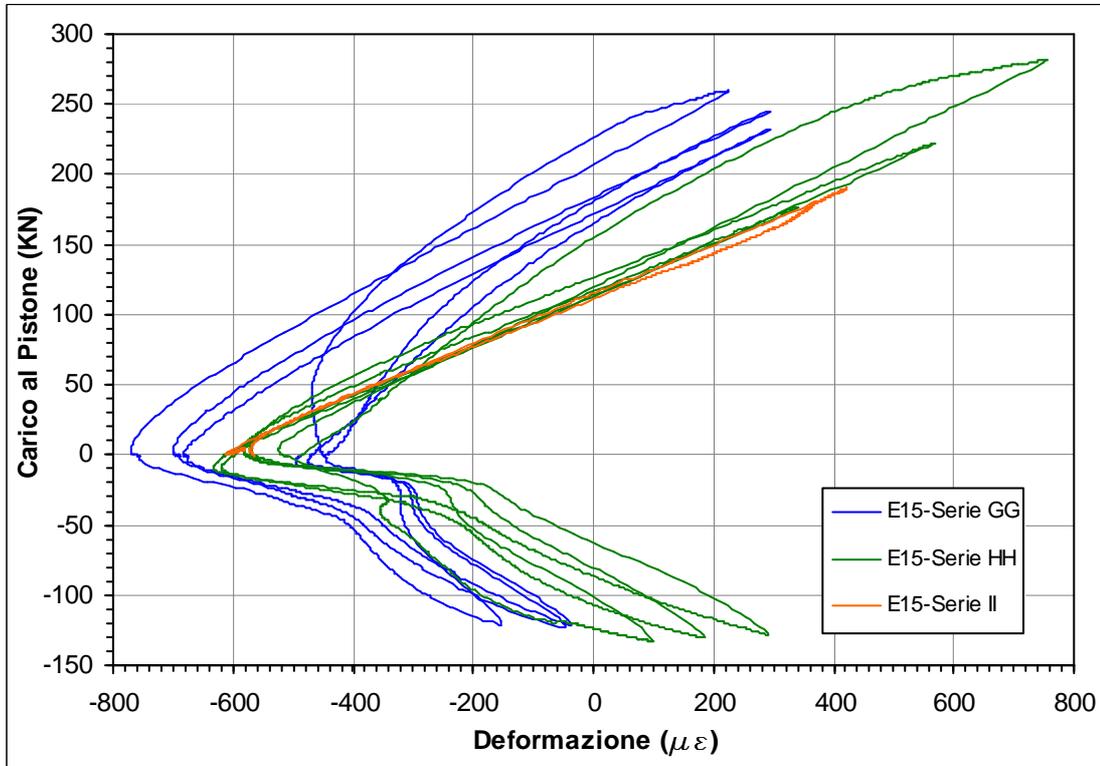
Nel diagramma di figura 9.21 viene rappresentata la variazione della deformazione assiale in funzione dell'azione di prova relativa alle prime sei serie di carico. Risulta immediato osservare come, già in corrispondenza del primo ramo di scarico della *serie AA*, l'estensimetro rilevi degli accorciamenti a carico nullo sulla superficie della barra; tale fenomeno si ripete regolarmente per tutti i cicli successivi, incrementando di volta in volta la deformazione impressa a carico nullo. Si osserva inoltre che il divario tra le deformazioni impresse a carico nullo, rilevate al termine dei rami di scarico relativi all'azione positiva e negativa del pistone, risulta sempre più ampio, specialmente in corrispondenza delle serie di carico *DD*, *EE* ed *FF*.



- **Figura 9.21** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale di nodo rilevate dall'estensimetro E15 in funzione del carico di prova: prime sei serie di carico.

Analizzando le curve relative alle ultime tre serie di carico, rappresentate nel diagramma di figura 9.21, si nota come il valore medio degli accorciamenti a carico nullo resti pressoché invariato, mentre il divario tra le deformazioni impresse, registrate in corrispondenza delle inversioni di segno del carico, si riduca sempre più col procedere delle serie di carico. Occorre notare inoltre che, nel corso delle prime sei serie di carico (fig. 9.21), solo in corrispondenza della prima serie e dei primi due

cicli della seconda vengono registrate delle dilatazioni; significativi allungamenti vengono nuovamente rilevati soltanto in corrispondenza delle ultime tre serie di carico (fig. 9.22), e soprattutto in corrispondenza dell'applicazione dei carichi di segno positivo.

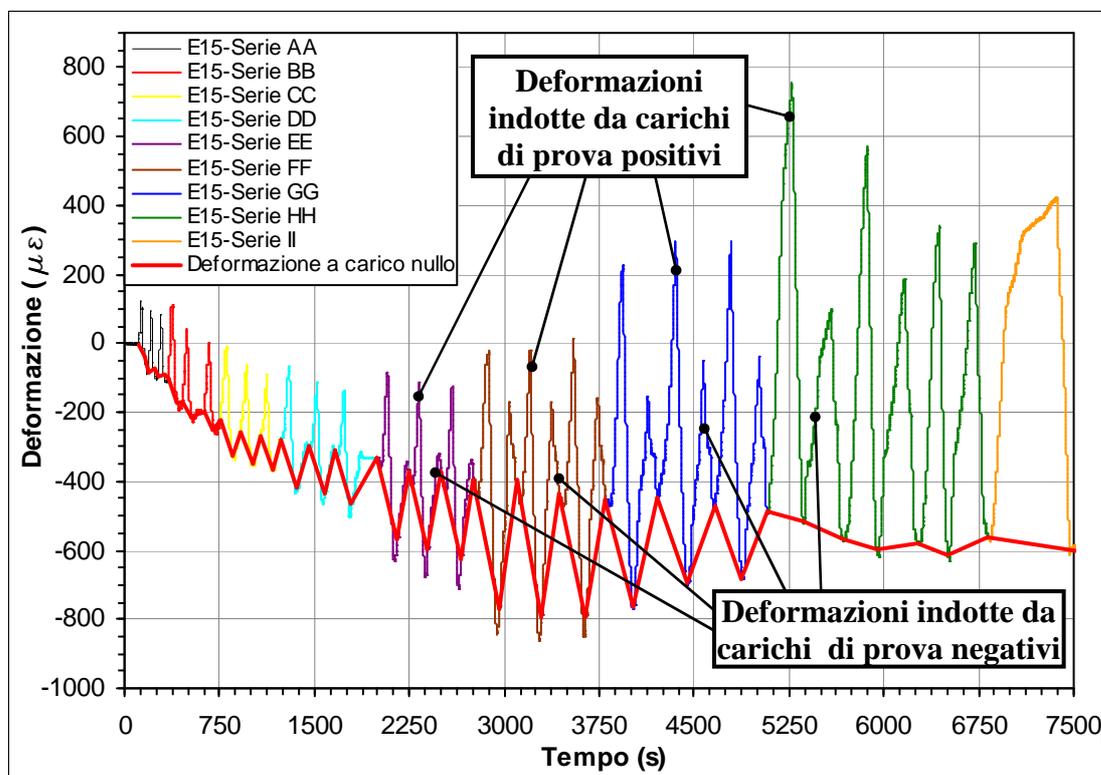


- **Figura 9.22** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale di nodo rilevate dall'estensimetro E15 in funzione del carico di prova: ultime tre serie di carico.

Le osservazioni fin qui effettuate risultano molto più evidenti se si analizza il diagramma di figura 9.23, rappresentante l'andamento delle deformazioni rilevate dall'estensimetro E15 in funzione del tempo trascorso dall'inizio della prova; per meglio comprendere la rappresentazione grafica di figura 9.23 può essere utile osservare che, in analogia con quanto rappresentato nei diagrammi delle figure 9.21 e 9.22, i picchi di deformazione relativamente più elevati corrispondono all'applicazione di azioni positive del pistone di carico (azioni del pistone rivolte verso il basso).

La rappresentazione, in figura 9.23, della la linea rossa ispessita, congiungente tutte le rilevazioni effettuate a carico nullo, evidenzia nitidamente come nel corso delle serie *EE*, *FF* e *GG* il divario ciclico tra le deformazioni impresse a carico nullo risulti notevolmente amplificato; considerando, inoltre, la

spezzata di deformazione a carico nullo come nuovo “zero” di riferimento per la valutazione delle deformazioni, risulta possibile osservare che in corrispondenza delle escursioni cicliche di carico (ovvero sequenze di carico e scarico), sia di segno positivo che negativo, la deformazione rilevata risulta quasi esclusivamente di allungamento.



- **Figura 9.22** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale di nodo rilevate dall'estensimetro E15 in funzione del tempo.

Le possibili cause delle deformazioni impresse a carico nullo, poste in evidenza dalle rilevazioni effettuate, risultano molteplici; si può pensare all'effetto del confinamento del calcestruzzo all'interfaccia d'aderenza con la barra longitudinale d'armatura oppure ad una deformazione trasversale a taglio della barra, indotta dallo scorrimento superiore orizzontale del pannello di nodo ed impressa, anche a carico nullo, dalle deformazioni degli elementi di nodo circostanti (fessurazioni diagonali del pannello di nodo non completamente richiuse, scorrimenti più o meno accentuati del tratto di barre integrative ancorate nel nodo, ecc.).

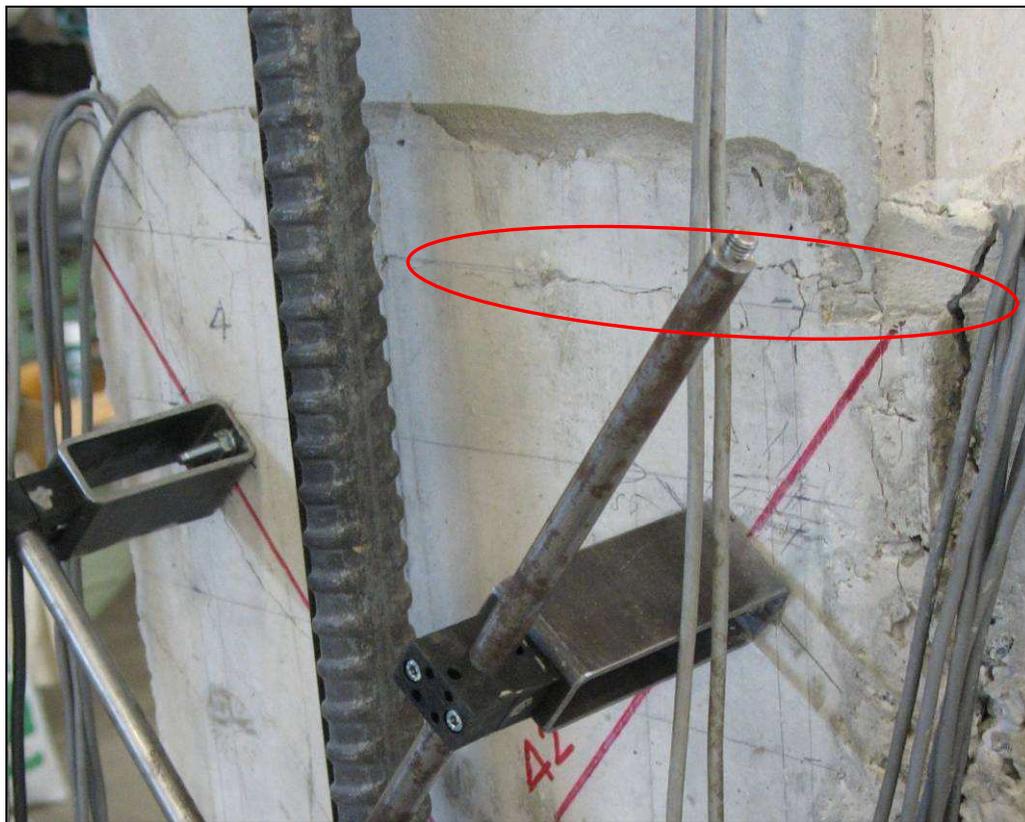
Le rilevazioni strumentali effettuate risultano insufficienti ad indagare in maniera approfondita sulle cause di tali fenomeni. La disposizione di due

estensimetri diametralmente opposti sulla barra longitudinale d'armatura (uno rivolto all'interno del getto di nodo e l'altro all'esterno) potrebbe fornire un'indicazione più completa dello stato deformativo locale, consentendo di risalire alle componenti deformative locali, sia flessionali che assiali, della barra; si potrebbero in tal modo quantificare gli effetti locali indotti sulla barra dalla deformazione trasversale a taglio (scindibili in deformazione assiale di allungamento della barra e deformazione superficiale, di natura flessionale, indotta dalla curvatura della barra), e confrontarli con le deformazioni assiali indotte dalle sollecitazioni flessionali trasmesse dal pilastro.

Tuttavia la congestione causata dalla complessità realizzativa della zona di nodo non rende agevole l'introduzione di un ulteriore estensimetro e del relativo cavo di collegamento; risulterebbe quindi preferibile modificare la disposizione dell'estensimetro E15 sulla barra, applicandolo sulla faccia parallela al piano di scorrimento del pannello di nodo (contenente gli assi di trave e pilastro costituenti la struttura di nodo); si verrebbero in tal modo ad eliminare del tutto gli effetti flessionali prodotti sulla superficie della barra dalle curvature locali.

9.4.3 Interfaccia nodo-pilastro

L'interfaccia tra nodo e pilastro, sia superiore che inferiore, risulta essere una zona di discontinuità tra il conglomerato utilizzato nella prefabbricazione del pilastro ed il calcestruzzo gettato in opera per la realizzazione del collegamento; tale discontinuità è resa ancora più netta dall'interposizione delle piastre, da 5 mm di spessore, utilizzate in fase di prefabbricazione del pilastro come contenimento del getto. Ne consegue che, sin dai primi livelli di carico, è risultato possibile rilevare ad occhio nudo la fessurazione del perimetro della sezione di collegamento del pilastro superiore al nodo d'estremità (indicata con il numero **1** nello schema di fig. 9.11). Tale fessura ha mostrato lievi variazioni a partire dal 2° ciclo della serie GG: la fessura orizzontale superiore del pannello posteriore di nodo ha evidenziato un lieve ampliamento, a seguito delle azioni negative del pistone, mentre le estremità delle fessure orizzontali superiori dei pannelli laterali di nodo hanno evidenziato un percettibile alternarsi ciclico di aperture e chiusure al variare del segno del carico di prova (vedi figg. 9.24 e 9.25).



- **Figura 9.24** - Fessurazione dell'interfaccia pilastro-nodo durante l'applicazione del carico di segno positivo (2° ciclo-serie GG).



- **Figura 9.25** - Fessurazione dell'interfaccia pilastro-nodo durante l'applicazione del carico di segno negativo (3° ciclo-serie HH).

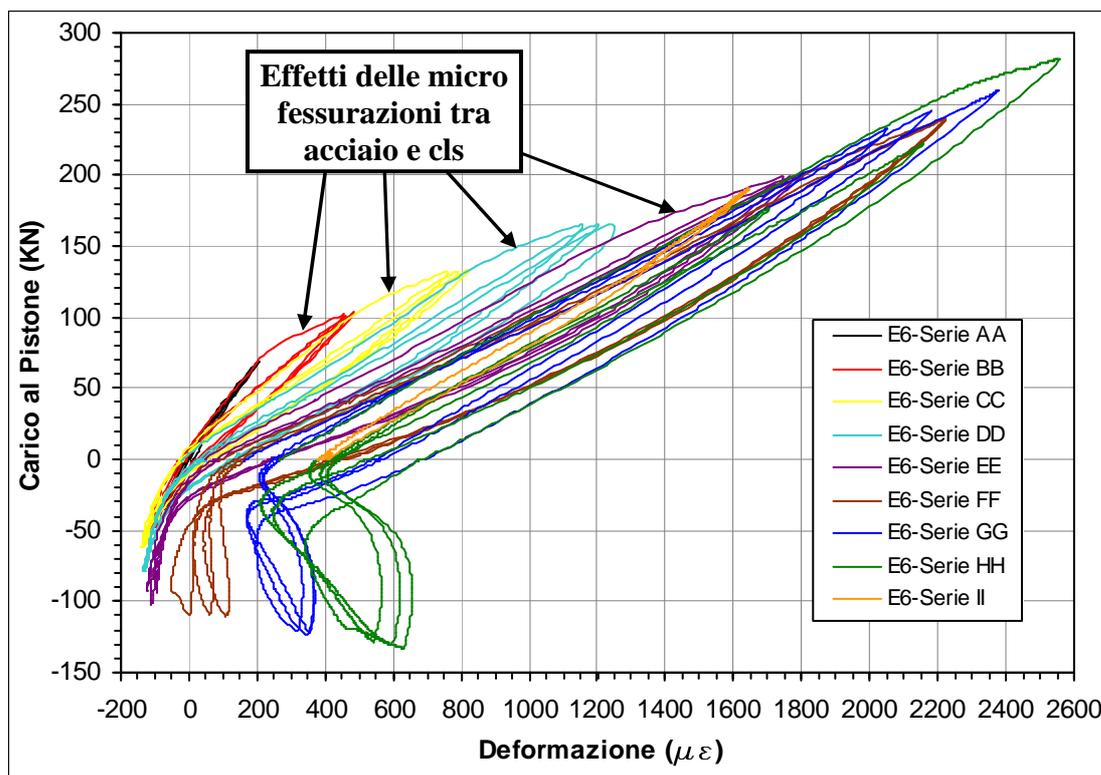
Per comprendere nel dettaglio cosa sia accaduto negli elementi di collegamento che attraversano tale interfaccia, alla luce delle riflessioni effettuate in relazione al comportamento dei tratti di barre longitudinali inclusi nel nodo, non resta che analizzare le rilevazioni effettuate dalle due coppie di estensimetri applicati alle barre longitudinali del pilastro (E5, E6, E7 ed E8).

I due estensimetri E5 ed E6 sono applicati sulla medesima barra già strumentata, nel tratto di nodo, con E15: E6 è incollato sulla faccia interna della barra, a circa 7 cm al di sopra della piastra superiore di nodo, mentre E5 è applicato a 22 cm al di sopra di tale piastra, sempre rivolto verso l'interno del getto.

I due estensimetri E7 ed E8, applicati sulla barra longitudinale centrale disposta sul lato del pilastro opposto alla trave, sono posizionati in maniera del tutto speculare a E5 ed E6 (vedi schema di fig. 5.21, par. 5.2) .

L'analisi delle rilevazioni effettuate dall'estensimetro E6, rappresentate nel diagramma di figura 9.24, evidenzia come, nell'arco delle prime quattro serie di carico (*AA-EE*), la deformazione sia condizionata dalle sollecitazioni flessionali presenti nella sezione prossima al nodo di collegamento (vedi schema di fig. 9.25). Si nota come al crescere del livello positivo di carico vi siano, in corrispondenza dei primi cicli di ogni serie, delle diminuzioni di pendenza delle curve rilevate; tale aspetto è sintomo del trasferimento di carico, da parte del calcestruzzo circostante, alla barra d'armatura, causato probabilmente dalle micro fessurazioni del calcestruzzo generatesi nell'interfaccia di aderenza all'acciaio. Osservando le curve di deformazione in compressione si notano viceversa accorciamenti massimi ridotti ed elevate pendenze; aspetti in parte dovuti al livello contenuto dei carichi negativi, determinato in base alla solita proporzione che sussiste con i valori positivi, ed in parte frutto del notevole contributo resistente fornito dal calcestruzzo compresso.

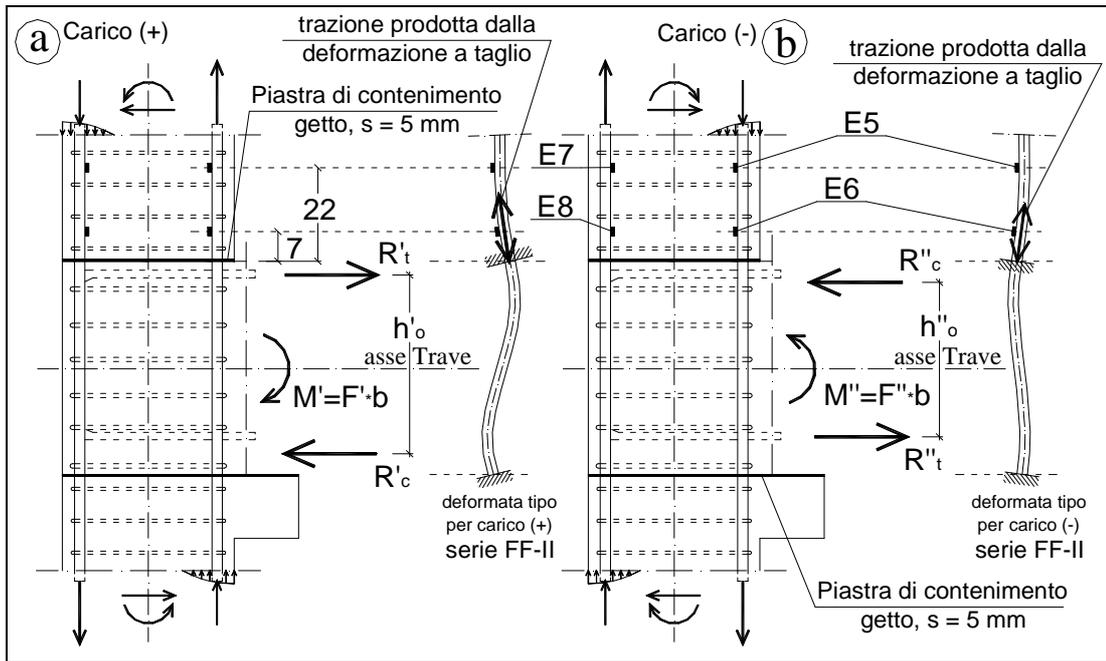
Nell'arco delle successive tre serie di carico (*FF-HH*), l'incremento ciclico dell'azione di prova evidenzia l'inversione di segno delle deformazioni indotte dai carichi negativi e la registrazione di deformazioni residue di trazione, all'atto dell'annullamento delle applicazioni positive di carico, sempre maggiori. Tali fenomeni risultano simili a quelli rilevati (mediante l'estensimetro E15) sul tratto di barra interessato dal collegamento di nodo; risulta pertanto lecito supporre che, data la vicinanza del punto di applicazione dell'E6 alla zona diffusiva di nodo, gli effetti della deformazione a taglio impressa dagli scorrimenti del pannello di collegamento si ripercuotano anche sul primo tratto del pilastro.



- **Figura 9.24** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale centrale del pilastro disposta lato trave, rilevate dall'estensimetro E6 posto a 7 cm dalla piastra superiore di nodo.

Negli schemi rappresentati in figura 9.25 si evidenzia come, per i livelli di carico relativi alle ultime quattro serie (*FF-II*), il tratto iniziale della barra del pilastro subisca il propagarsi degli incrementi di trazione assiale prodotti, nel tratto di nodo sottostante, dagli scorrimenti a taglio del pannello di nodo. Si nota pertanto, dallo *schema a* di fig. 9.25, che per carichi di prova positivi l'allungamento indotto dalla deformazione a taglio va ad amplificare la deformazione prodotta dalla trazione di natura flessionale; le rilevazioni effettuate dall'E6 evidenziano infatti picchi deformativi pari a circa $2.600 \mu\epsilon$, di poco superiori al limite di snervamento pari a circa $2.300 \mu\epsilon$ (vedi fig. 9.24). Occorre inoltre osservare che, durante le fasi di scarico delle azioni positive applicate nelle ultime quattro serie, la trazione assiale aggiuntiva, così come la deformazione a taglio che l'ha generata, viene recuperata più lentamente, producendo degli allungamenti residui a carico nullo (vedi grafico di fig. 9.24). Dallo *schema b* di fig. 9.25 si nota invece che, applicando carichi di prova negativi, l'allungamento indotto dalla deformazione a taglio va a contrastare la deformazione prodotta dalla compressione di natura flessionale ed a recuperare parte della trazione residua; le rilevazioni effettuate dall'E6 evidenziano infatti

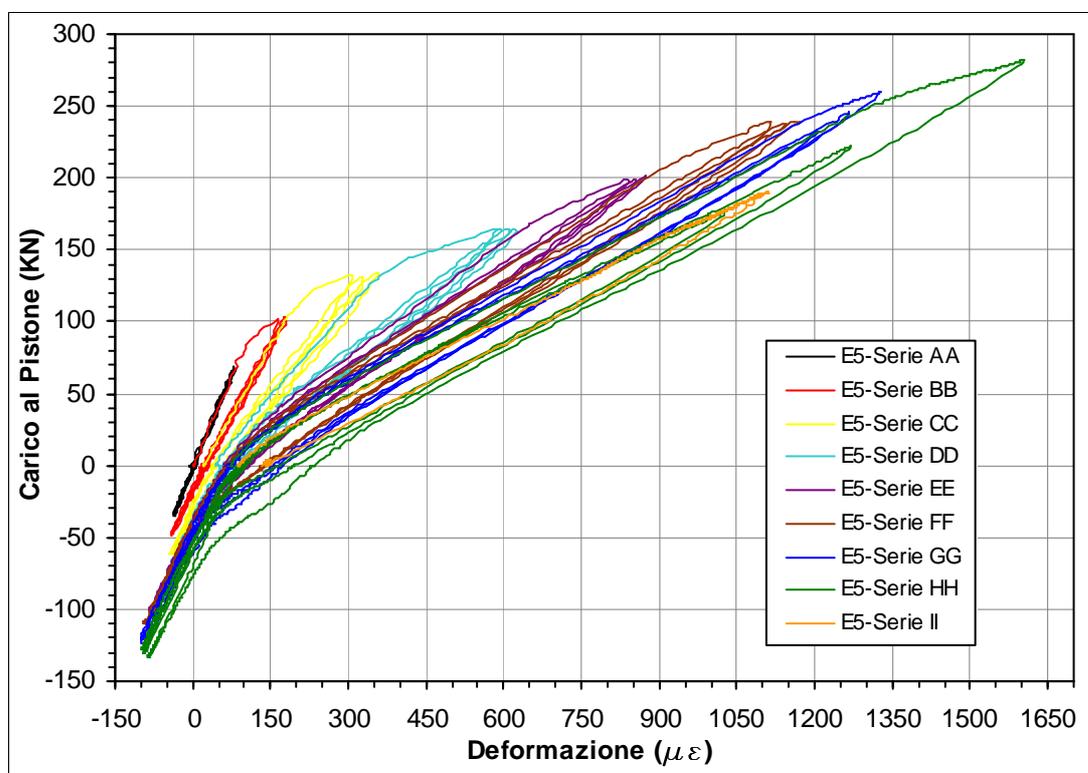
l'inversione del segno delle deformazioni in corrispondenza dei valori negativi del carico, con picchi superiori alle $600 \mu\epsilon$.



- Figura 9.25 - Schematizzazioni delle deformate delle barre longitudinali del pilastro.

Il comportamento del tratto superiore delle barre longitudinali del pilastro disposte sul lato parallelo alla trave può essere descritto avvalendosi delle rilevazioni effettuate dall'estensimetro E5, posto come detto a 22 cm dalla piastra superiore di nodo. L'andamento di tali rilevazioni in funzione del carico di prova, rappresentato graficamente in figura 9.26, evidenzia, in corrispondenza dei primi cicli di caricamento positivo di ogni serie, le stesse diminuzioni di pendenza evidenziate dall'E6; si può quindi affermare che le micro fessurazioni del calcestruzzo all'interfaccia di aderenza con l'acciaio si protraggono almeno per i primi 22 cm del pilastro, inducendo trasferimenti di tensione alle barre d'armatura tese. Avvenuto l'assestamento di tali scorrimenti d'aderenza, localizzati nell'ultimo tratto del ramo di carico del primo ciclo di ogni serie, il successivo comportamento ciclico delle deformazioni risulta lineare e fedele alla distribuzione delle sollecitazioni flessionali previste per i vari livelli di carico, sia di segno positivo che negativo (vedi *schemi a e b* di fig. 9.25); si può pertanto affermare che gli effetti delle deformazioni a taglio indotte dagli scorrimenti del pannello di nodo restano confinati nei primi 20 cm di pilastro. La preponderanza dei carichi positivi e l'incidenza del contributo fornito dal conglomerato compresso vengono nuovamente confermate dal confronto dei

livelli deformativi massimi in trazione, indotti sulle barre disposte sul lato prospiciente la trave, con le ben più contenute contrazioni indotte dai carichi negativi.

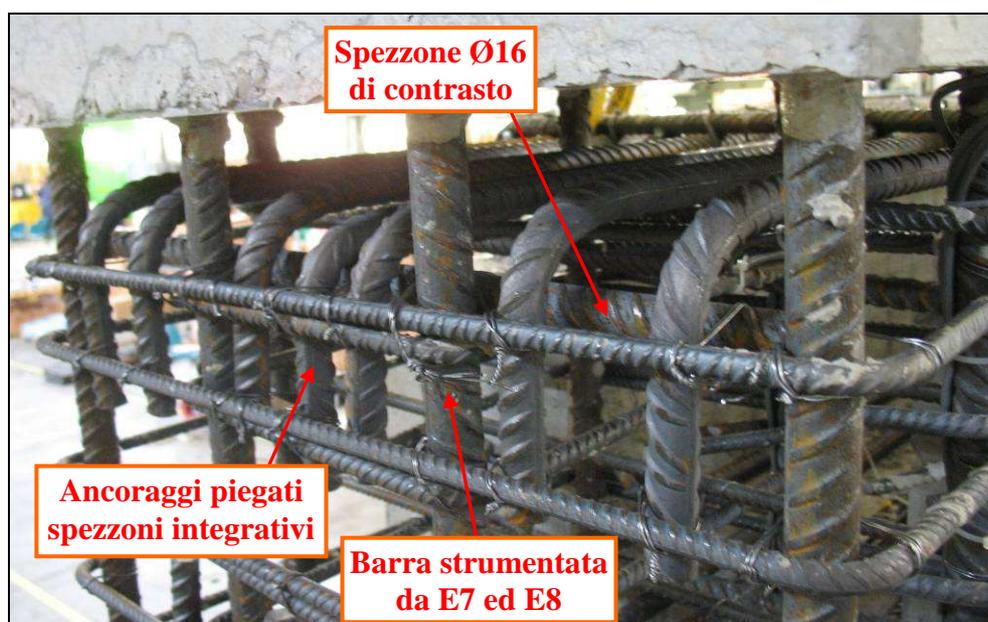


- **Figura 9.26** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale centrale del pilastro disposta lato trave, rilevate dall'estensimetro E5 posto a 22 cm dalla piastra superiore di nodo.

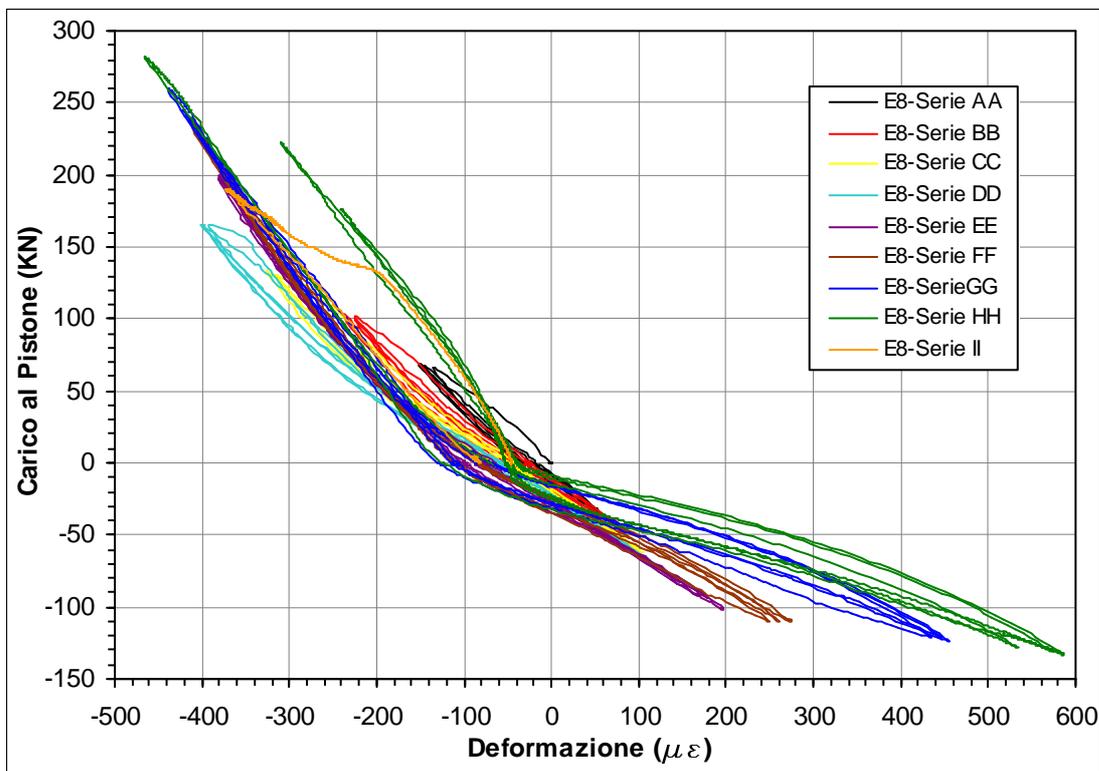
Si passa ora ad esaminare il comportamento delle barre longitudinali del pilastro disposte sul lato opposto alla trave, analizzando le rilevazioni rappresentate nel diagramma di figura 9.28, effettuate dall'estensimetro E8 posto a 7 cm al di sopra della piastra di nodo. Si nota come nell'arco delle prime cinque serie di carico (AA-EE) l'andamento ciclico delle deformazioni risulta abbastanza lineare e fedele alla distribuzione delle sollecitazioni flessionali previste (vedi *schemi a e b* di fig. 9.25); le elevate compressioni indotte dalla preponderanza dei livelli positivi di carico inducono nelle barre, nonostante il favorevole contributo del calcestruzzo compresso, delle contrazioni paragonabili alle dilatazioni indotte dai carichi negativi. L'incremento di schiacciamento della sottostante biella compressa del pannello di nodo, provocato dal crescere del livello di carico, induce delle leggere contrazioni residue nelle barre in esame che si assestano su valori di 100 $\mu\epsilon$.

Nell'arco delle ultime quattro serie di carico (*FF-II*) l'incremento degli scorrimenti del pannello di nodo genera, come detto in precedenza, delle crescenti deformazioni a taglio dei tratti di barre coinvolti nel meccanismo resistente di nodo. Le trazioni assiali che ne derivano, sia per carichi di segno positivo che negativo, raggiungono intensità tali da propagarsi anche nei primi tratti delle barre del pilastro, provocando la riduzione, in valore assoluto, delle deformazioni in compressione e l'amplificazione di quelle in trazione. Tale fenomeno, particolarmente evidente nel corso della serie di carico *HH*, ha un'incidenza inferiore rispetto a quella registrata dall'E6 sulle barre del pilastro disposte sul lato opposto (fig. 9.24); aspetto, quest'ultimo, che denota un maggior coinvolgimento nel meccanismo resistente di nodo da parte delle barre disposte sul lato prospiciente la trave.

La causa di tali differenze di comportamento è da ricercare nelle modalità di realizzazione dell'ancoraggio degli spezzoni orizzontali integrativi di nodo. I tratti piegati d'estremità di tali barre e gli spezzoni trasversali di contrasto vengono semplicemente accostati alle barre longitudinali di nodo disposte sul lato opposto alla trave (vedi particolare di fig. 9.27); le notevoli risultanti di trazione indotte, dai carichi positivi di prova, determinano delle sollecitazioni e degli scorrimenti su tali ancoraggi che coinvolgono direttamente le barre longitudinali di nodo prospicienti la trave, mentre le barre longitudinali disposte sul lato opposto alla trave vengono coinvolte solo indirettamente dall'azione trasversale delle staffe di nodo.

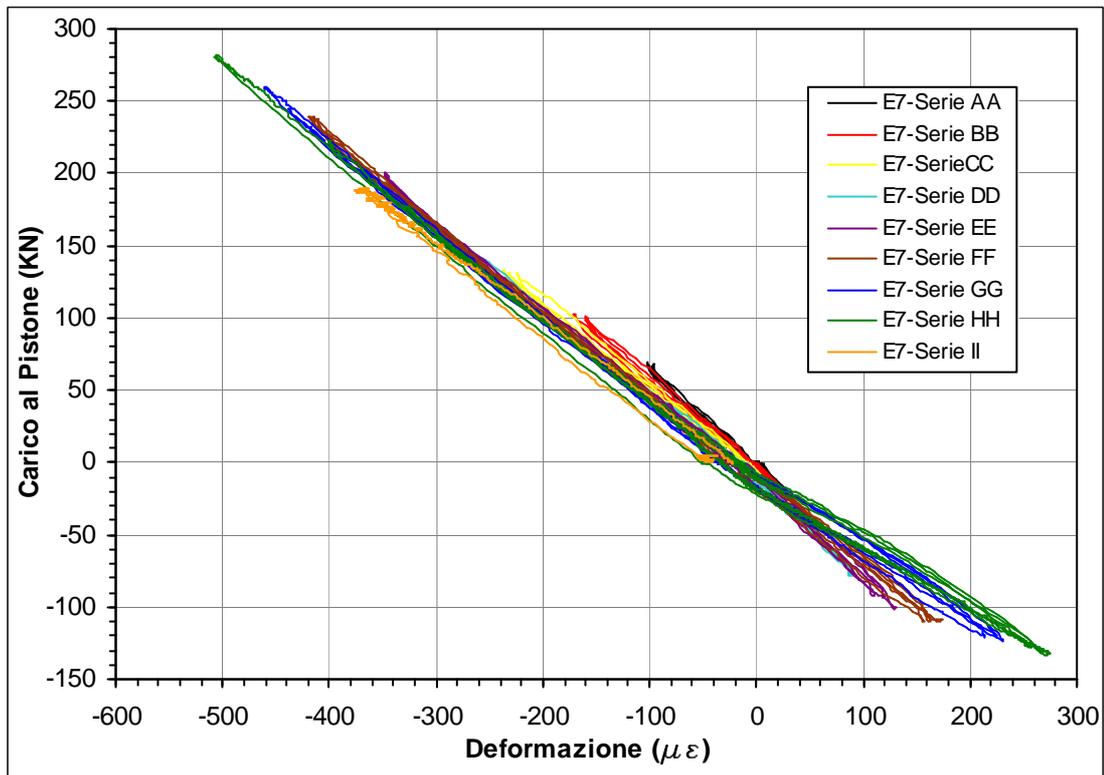


- **Figura 9.27** - Particolare realizzativo: ancoraggi delle barre integrative sul lato del pilastro opposto alla trave.



- **Figura 9.28** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale centrale del pilastro disposta sul lato opposto alla trave, rilevate da E8 posto a 7 cm dalla piastra superiore di nodo.

La rappresentazione grafica delle rilevazioni effettuate dall'estensimetro E7, riportata in figura 9.29, evidenzia come già a 22 cm di distanza dalla piastra superiore di nodo, lo stato deformativo delle barre longitudinali del pilastro, poste sul lato opposto alla trave, non risenta delle deformazioni a taglio del nodo di collegamento. Tutte le serie di carico evidenziano un andamento lineare delle deformazioni con preponderanti valori massimi di compressione; in corrispondenza delle sollecitazioni flessionali di trazione si evidenziano lievi scorrimenti di aderenza.



- **Figura 9.29** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale centrale del pilastro disposta sul lato opposto alla trave, rilevate da E7 posto a 22 cm dalla piastra superiore di nodo.

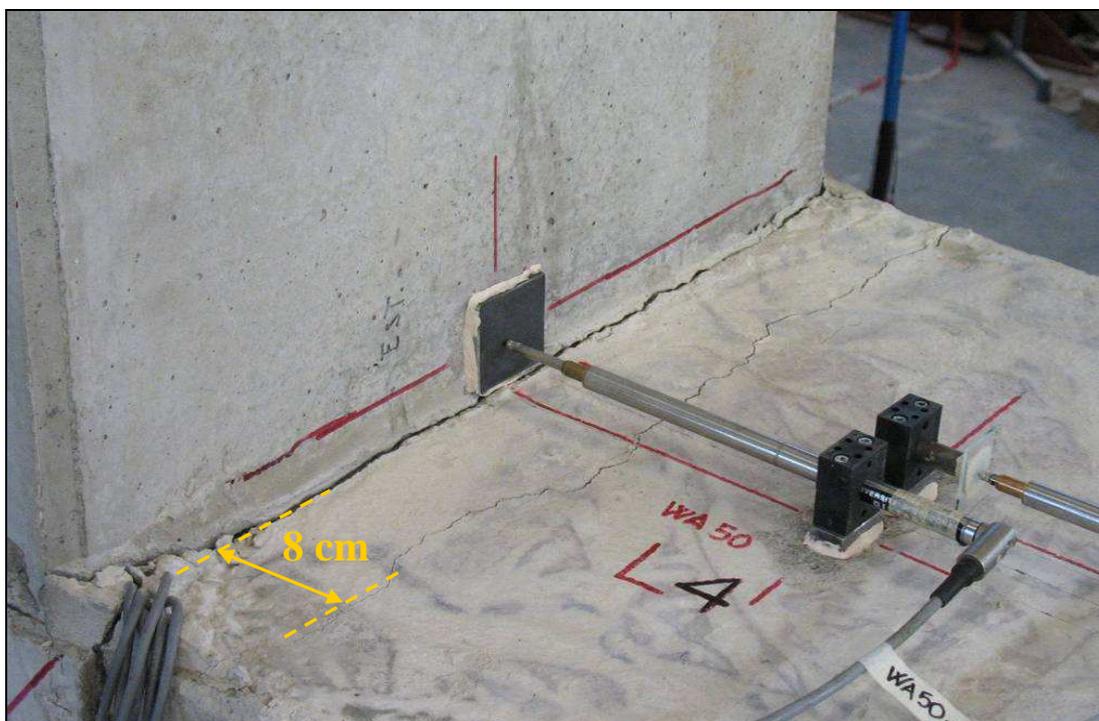
9.4.4 Interfaccia nodo-trave

Il tratto iniziale della trave, prossimo alla sezione di innesto nel nodo di collegamento, risulta essere la zona nevralgica della struttura di prova poiché progettualmente designata, nel rispetto del *criterio della gerarchia delle resistenze*, come sede preferenziale di plasticizzazioni, all'atto della formazione dei meccanismi dissipativi, e quindi come localizzazione dei meccanismi di rottura.

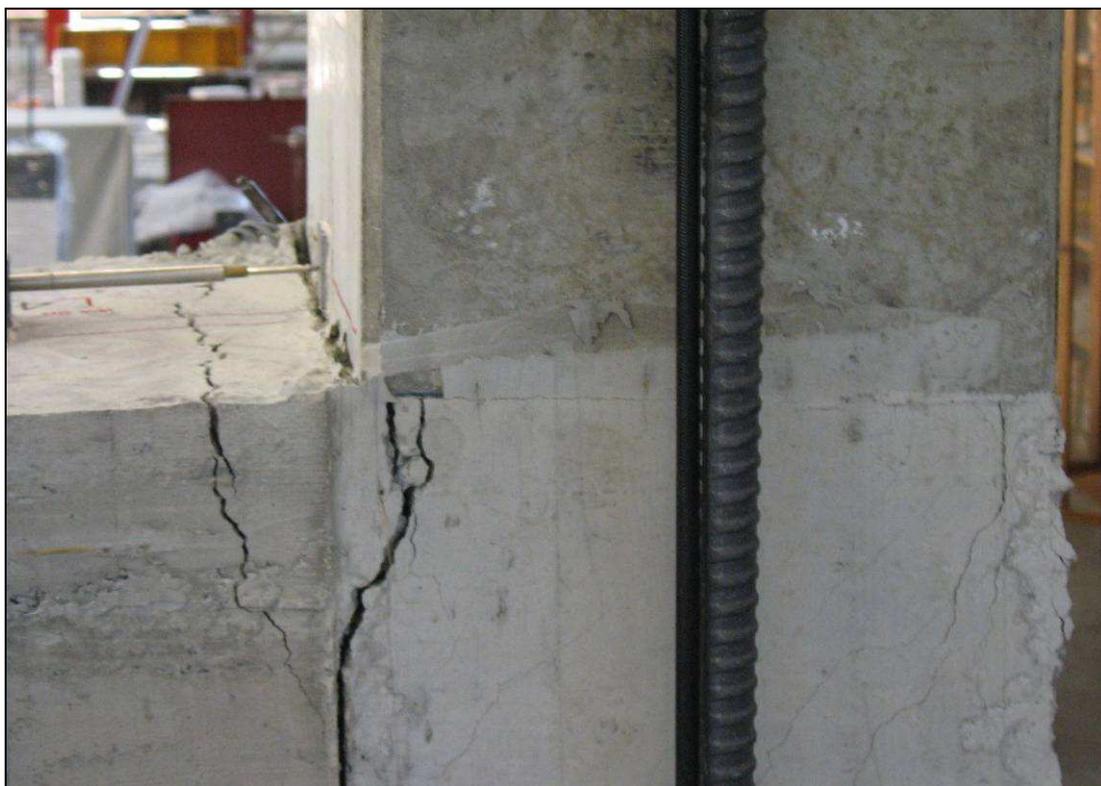
Si comprende dunque come l'aspetto più delicato in un collegamento d'estremità, quale quello in esame, riguardi l'efficacia degli ancoraggi delle barre integrative disposte nel getto di collegamento; occorre pertanto monitorare il complesso di deformazioni e spostamenti, che si attuano nell'arco della prova ciclica a rottura su barre d'armatura e calcestruzzo, per comprendere se tali ancoraggi hanno consentito o meno alle barre integrative di fornire l'escursione plastica utile al raggiungimento di una efficiente dissipazione energetica ed una resistenza ultima paragonabile ai valori sperimentali di calcolo. Per tali ragioni la maggior parte di induttivi ed estensimetri utilizzati nella prova in esame sono stati disposti proprio nei

primi 44 cm di trave (vedi schemi applicativi delle figg. 5.21 e 5.36, par. 5.2 e di fig. 6.1, par. 6.2).

Nel corso della prova ciclica in esame l'applicazione dei carichi positivi ha prodotto all'estradosso della trave due fessure trasversali che si sono propagate anche lungo le facce laterali, rappresentate con il numero **5** nello schema di fig. 9.11. La prima di tali fessure, formatasi a filo pilastro, è risultata visibile ad occhio nudo in prossimità del massimo valore di carico positivo applicato al *1° ciclo* della *serie EE*; la seconda fessura, formatasi a circa 8 cm dal filo pilastro, è risultata visibile immediatamente più tardi, in prossimità del massimo valore di carico positivo applicato al *3° ciclo* della *serie EE*. Dall'immagine di figura 9.14, scattata in corrispondenza del carico massimo positivo applicato al *3° ciclo* della *serie EE*, risultano visibili le propagazioni verticali delle fessure sul lato della trave; appare nettamente la prima fessura formatasi a filo pilastro, mentre risulta poco più che una cavillatura la seconda formatasi a 8 cm di distanza. L'evolversi della fessurazione all'estradosso della trave viene documentato dalla seguente sequenza d'immagini (figg. 9.30,31 e 32), raccolte in corrispondenza dei massimi carichi positivi applicati nel corso del *2° ciclo* delle serie *GG*, *HH* e *II*.

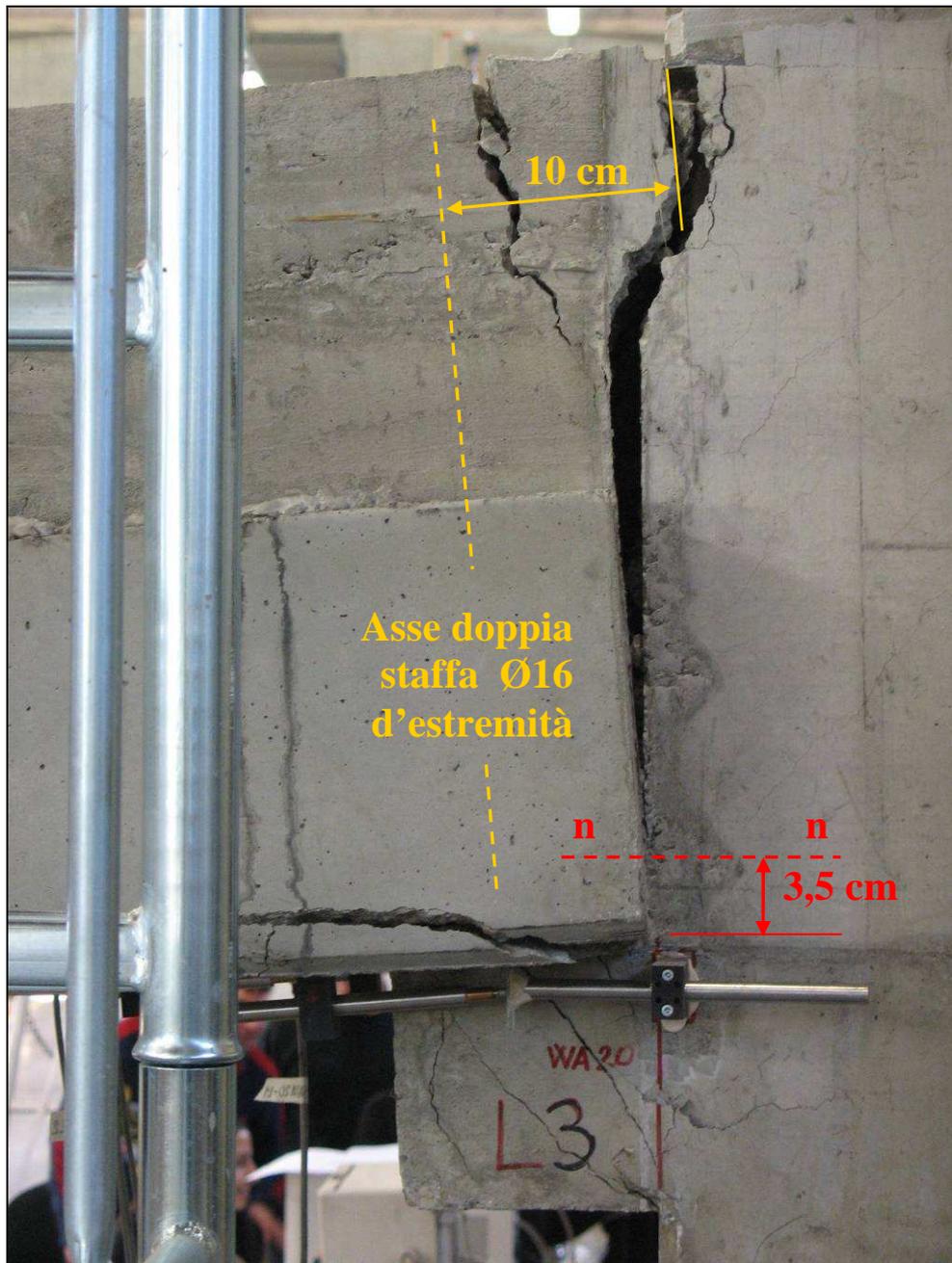


- **Figura 9.30** - Particolare della fessurazione dell'estradosso trave in prossimità del massimo carico positivo (*2° ciclo-serie GG*).



- **Figura 9.31** - Particolare della fessurazione dell'estradosso trave in corrispondenza del massimo carico positivo (2° ciclo-serie HH).

La disposizione della seconda fessura a 8 cm dal filo pilastro non è casuale ma avviene in prossimità della doppia staffa $\varnothing 16$ della trave il cui asse dista circa 10 cm dal filo esterno del pilastro, come evidenziato nelle figure 9.32 e 9.33.

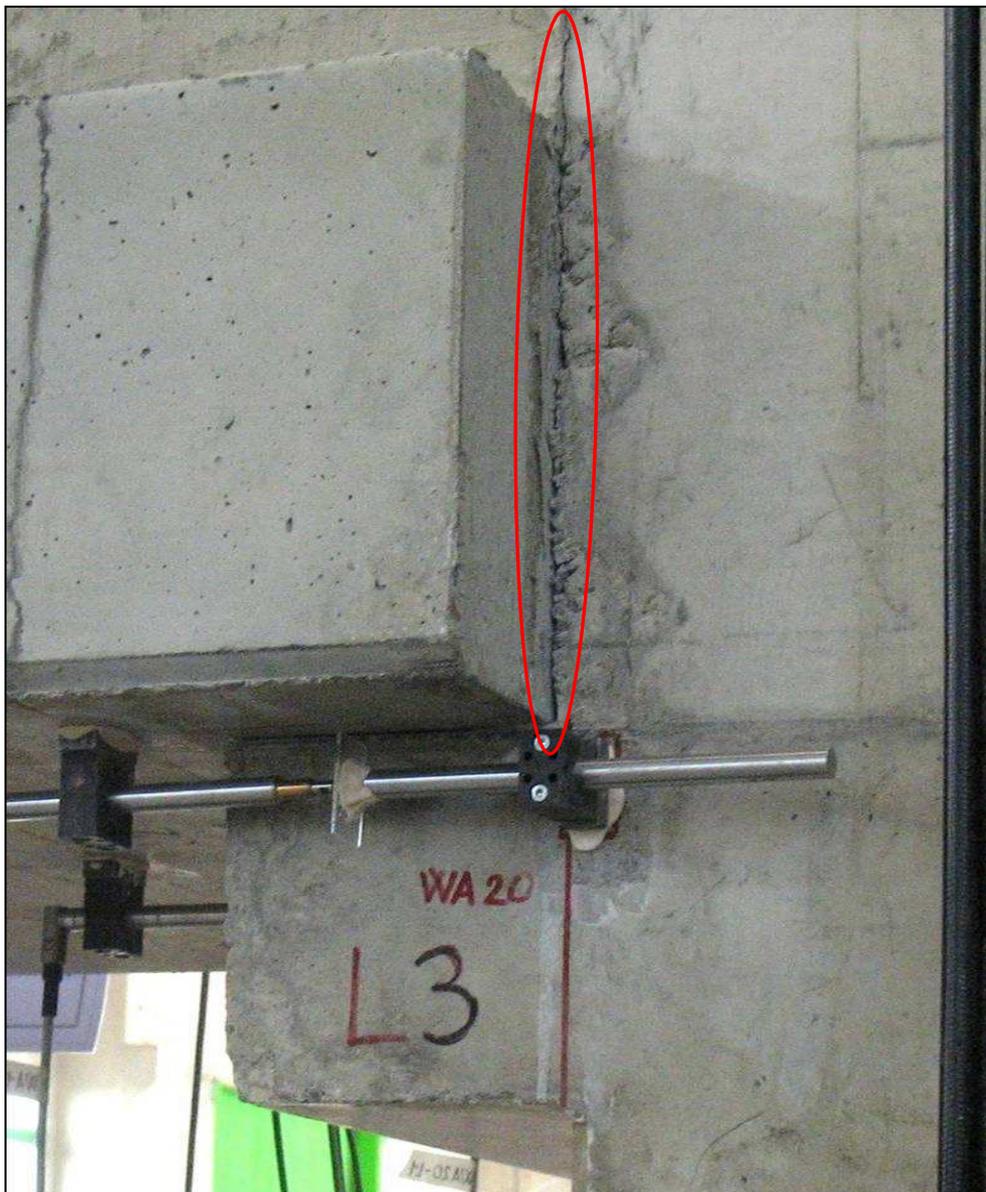


- **Figura 9.32** - Fessurazione dell'estradosso trave in prossimità del massimo carico positivo (1° ciclo-serie II): vista laterale.



- **Figura 9.33** - Particolare delle armature di nodo: disposizione del doppio staff aggio d'estremità trave.

L'applicazione dei carichi di prova negativi ha prodotto all'intradosso della trave lo scostamento della soletta prefabbricata dal pilastro; data la presenza della mensola d'appoggio inferiore, tale scostamento risulta visivamente rilevabile esclusivamente dalle fessure verticali presenti su entrambe le facce laterali della trave, rappresentate con il numero **7** nello schema di fig. 9.11, e dai segni che lo scorrimento sulla piastra inferiore di nodo, prolungata fino all'estremità della mensola, ha prodotto sull'intradosso della trave. Le fessure verticali sono risultate visibili ad occhio nudo già in prossimità del massimo valore negativo applicato al 1° ciclo della serie *GG*, ma l'ampliamento più significativo è stato osservato in corrispondenza del massimo valore negativo di carico applicato al 1° ciclo della serie *HH*; le immagini di figura 9.34 e 9.35 rappresentano l'evoluzione della fessura in corrispondenza dei massimi carichi negativi applicati nel corso del 2° ciclo delle serie *GG* ed *HH*.



- **Figura 9.34** - Fessurazione laterale dell'intradosso trave in prossimità del massimo carico negativo (2° ciclo-serie GG).



- **Figura 9.35** - Fessurazione laterale dell'intradosso trave in prossimità del massimo carico negativo (2° ciclo-serie HH).

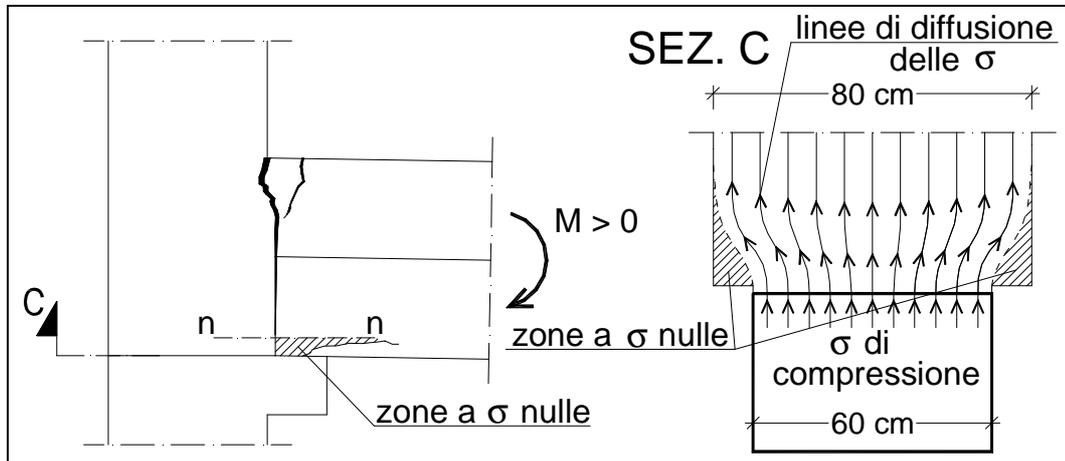
Al termine del *1° ciclo* della *serie HH* il deciso incremento d'ampiezza della fessura d'intradosso, unitamente all'avanzato quadro fessurativo presente all'estradosso della trave hanno in pratica determinato la formazione di una cerniera plastica in corrispondenza della sezione di collegamento della trave al pilastro, come evidenziato dalla completa fessurazione della sezione d'estremità della trave osservata durante il ramo di scarico successivo al raggiungimento del massimo carico negativo (fig. 9.36). Si intuisce come, per ampi intervalli di variazione del carico, intermedi tra il massimo valore positivo e quello negativo, il bilanciamento della sollecitazione flessionale sia totalmente affidato alle sole armature integrative, con conseguente incremento degli spostamenti registrati all'estremità della trave.



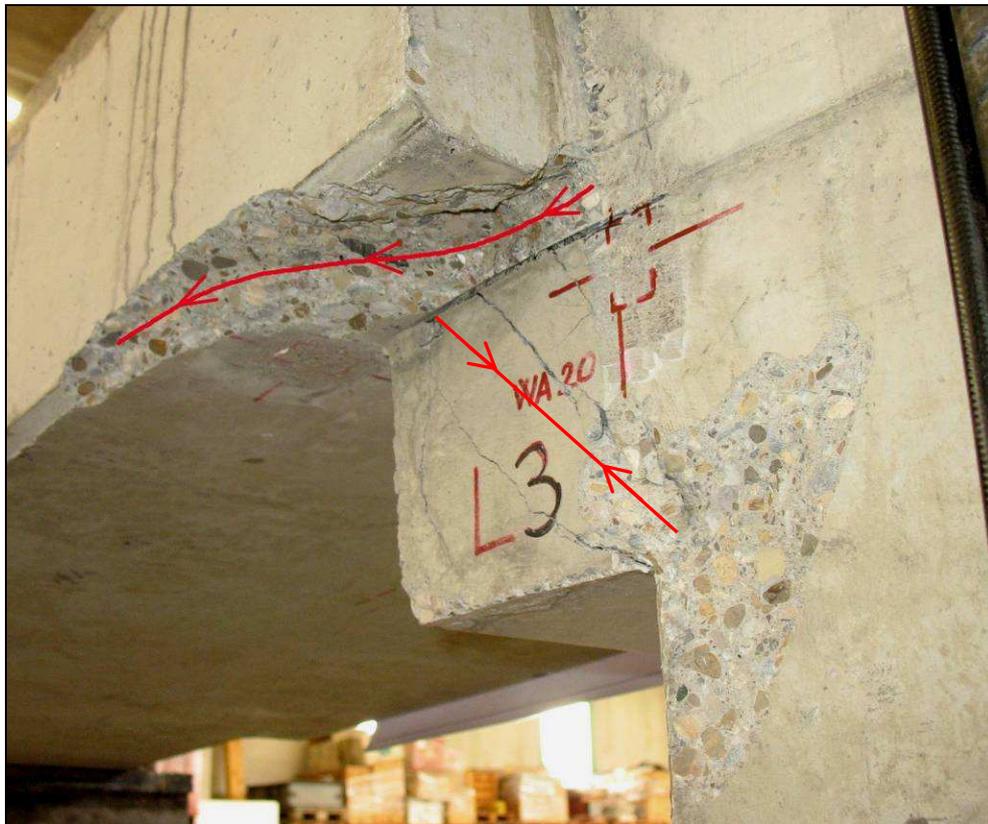
- **Figura 9.35** - Cerniera plastica all'estremità di collegamento della trave: situazione di carico intermedia tra max(-) 2° ciclo e max(+) 3° ciclo della serie HH.

L'incremento della fessurazione all'estradosso della trave, indotto dai successivi incrementi di carichi positivi, ha evidenziato, all'intradosso, la fessurazione delle ali laterali della trave, rappresentata con il numero **8** nello schema di fig. 9.11. Inizialmente, in corrispondenza del 3° ciclo della serie GG, si è osservata la fessurazione della parte inferiore dell'ala, quindi, in prossimità del massimo carico positivo applicato al 1° ciclo della serie HH, la fessurazione si è propagata anche alla faccia laterale dell'ala, determinando nei cicli successivi l'espulsione del copriferro inferiore su entrambe le ali (vedi fig. 9.32 e 9.37). Tali fessure consentono di visualizzare l'andamento delle linee di diffusione delle tensioni di compressione che, in corrispondenza dei carichi positivi, si propagano dalla battuta del pilastro alla soletta compressa, di 20 cm più larga. Lo schema di figura 9.36 aiuta a comprendere come il tratto estremo della parte inferiore dell'ala della soletta prefabbricata risulti scarico, poiché escluso dalla diffusione delle

tensioni di compressione; mentre l'immagine riportata in figura 9.37, scattata al termine della prova, previa rimozione del calcestruzzo espulso dalle compressioni superficiali, pone in evidenza gli effetti prodotti dal sistema di sollecitazioni di compressione presenti all'intradosso della trave, tenuto conto anche della leva fornita dalla mensola del pilastro.



- **Figura 9.36** - Schematizzazione della diffusione delle tensioni di compressione in corrispondenza della variazione inferiore di larghezza della trave.



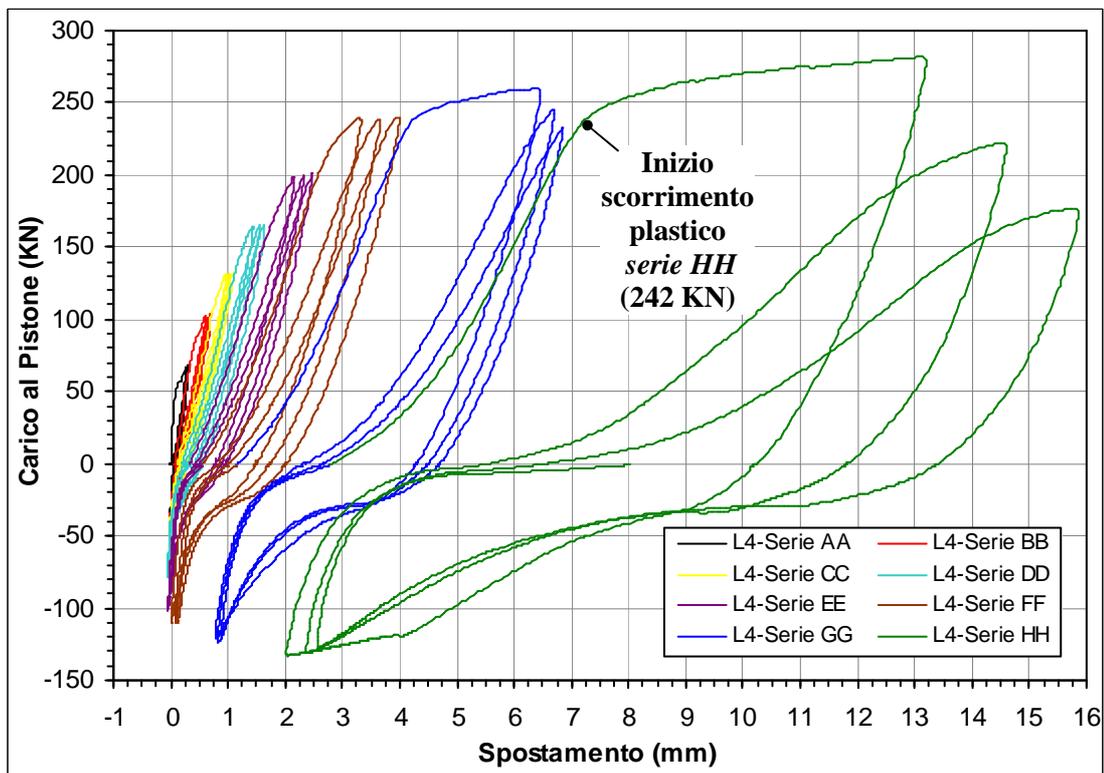
- **Figura 9.37** - Particolare dell'intradosso trave a fine prova: degrado a compressione dell'ala e della mensola d'appoggio..

Al fine di comprendere nel dettaglio quali siano stati i meccanismi responsabili degli eventi macroscopici osservati si procede all'analisi ed al confronto delle rilevazioni strumentali relative alla trave ed all'interfaccia col pilastro.

Si analizzano anzitutto gli scorrimenti relativi tra le sezioni estreme del primo concio di trave rilevati dall'induttivo L4, posto nella mezzeria dell'estradosso, e dalla coppia di induttivi, L1 ed L3, posti alle estremità della soletta d'intradosso, rappresentati rispettivamente nei grafici delle figure 9.38 e 9.39; in entrambi i grafici sono state trascurate le rilevazioni relative alla *serie di carico II*, al fine di consentirne una migliore rappresentazione.

Risulta immediato notare che lo spostamento della sommità della trave rispetto al pilastro risulta sempre positivo, escludendo piccoli accorciamenti dell'ordine del centesimo di millimetro in corrispondenza delle massime sollecitazioni negative delle prime serie di carico; osservando l'andamento delle singole curve cicliche si nota come in realtà vengano registrati, in corrispondenza dei valori negativi di carico, degli accorciamenti relativi, vanificati però in termini assoluti dai valori di scorrimento registrati in corrispondenza dei carichi nulli. Gli scorrimenti residui a carico nullo risultano essere sempre crescenti, con incrementi notevoli soprattutto in corrispondenza dei massimi livelli di carico positivo applicati nel corso del *1° ciclo* delle serie *GG* e *HH*; entrambi gli scorrimenti avvengono a carico pressoché costante e raggiungono valori pari a *2,2 mm* e *5,6 mm* rispettivamente. Il fatto che i due cicli di carico successivi ad entrambi gli scorrimenti si ripetano con cali di resistenza e rigidità, particolarmente evidenti nella *serie HH*, ma senza manifestare ulteriori spostamenti a carico positivo costante, sottolineano la natura degenerativa di tali fenomeni (vedi particolari in figg. 9.30 e 9.31). Occorre dunque analizzare anche il comportamento delle barre integrative superiori per verificare se gli scorrimenti plastici sono da imputare alla plasticizzazione dell'acciaio oppure ad uno scorrimento degli ancoraggi di nodo.

Resta infine da osservare come, in corrispondenza dei carichi di segno negativo, i primi tratti dei rami di carico e di scarico, pressoché orizzontali, evidenzino l'utilizzo di minime quantità del carico di prova per richiudere e riaprire, rispettivamente, le fessure all'estradosso.

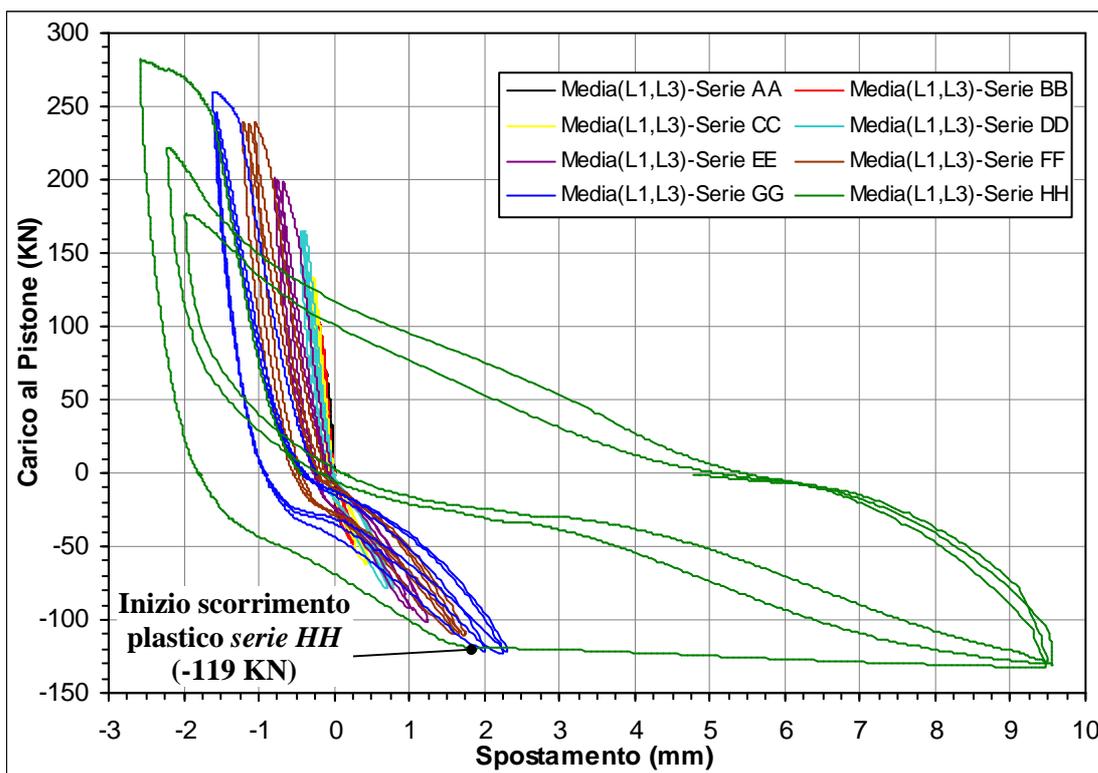


- **Figura 9.38** - Grafico degli spostamenti relativi della sommità del primo conio di trave rilevati dall'induttivo L4 in funzione del carico di prova.

Gli spostamenti relativi considerati all'intradosso vengono rappresentate nel grafico di figura 9.39 come media delle letture eseguite dai due induttivi L1 ed L3, posti sempre a battuta sul filo esterno del pilastro. Analizzandone l'andamento in funzione del carico di prova si nota un comportamento più omogeneo rispetto a quanto osservato all'estradosso, con escursioni negative e positive degli scorrimenti pressoché elastiche nell'arco di tutte delle prime sei serie di carico (*AA-FF*), e con rigidità, espresse sempre in funzione del carico di prova, più marcate nel caso delle rilevazioni in accorciamento (relative a carichi positivi), a causa del contributo resistivo fornito dal calcestruzzo compresso.

Nel corso della *serie GG* l'applicazione dei massimi carichi negativi ha indotto degli spostamenti relativi all'intradosso di circa $2,3\text{ mm}$, generando la prima fessurazione visibile ad occhio nudo, rappresentata in figura 9.34; l'applicazione dei massimi carichi positivi ha causato invece l'elevata fessurazione rilevata all'estradosso da L4, che ha prodotto un repentino abbassamento dell'asse neutro della sezione d'estremità della trave. Gli elevati livelli di compressione raggiunti nelle fibre inferiori del calcestruzzo di nodo hanno indotto uno schiacciamento tale da produrre una deformazione residua pari, in media, a circa 1 mm , rilevabile nel

grafico di figura 9.39 in corrispondenza di valori nulli del carico. Durante il 1° ciclo di carico della serie *HH* l'ulteriore aumento di carico ed il conseguente ampliamento della fessurazione d'estradosso hanno prodotto, in corrispondenza dei valori positivi di carico, l'ulteriore abbassamento dell'asse neutro d'intradosso; il nuovo incremento delle compressioni applicate a spessori sempre più ristretti di calcestruzzo ha fatto registrare, in corrispondenza di carichi nulli, un accorciamento residuo di circa 1,8 mm (vedi fig.9.39). L'applicazione dei carichi negativi, a completamento del ciclo di carico, ha indotto un improvviso scorrimento pari a 7,7 mm, avvenuto a carico praticamente costante ed interrotto solamente dal raggiungimento dello spostamento limite di controllo all'estremità della trave; gli ulteriori due cicli di applicazione dei valori minimi di spostamento assoluto all'estremità della trave hanno fatto registrare valori simili di allungamento all'intradosso, producendo la fessurazione rappresentata in figura 9.35.



- **Figura 9.39** - Grafico degli spostamenti relativi all'intradosso del primo concio di trave ottenuti dalla media delle rilevazioni effettuate dagli induttivi L1 ed L3 in funzione del carico di prova.

In analogia a quanto visto all'estradosso, anche gli induttivi applicati all'intradosso rilevano, in corrispondenza delle azioni di segno negativo, primi tratti dei rami di carico e di scarico pressoché orizzontali, a conferma delle minime

quantità di carico di prova utilizzate per richiudere e riaprire le ingenti fessurazioni formatesi nei primi 8 cm d'estradosso della trave.

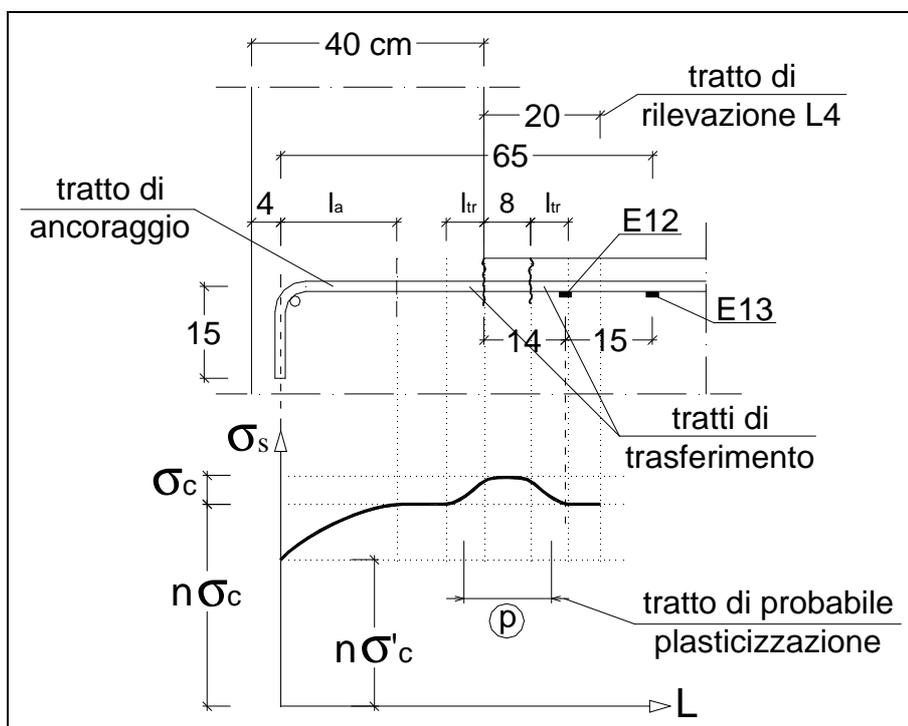
Allo scopo di approfondire lo studio dei fenomeni alla base degli scorrimenti osservati all'estradosso si vanno ad esaminare le deformazioni assiali rilevate sulla barra centrale di completamento dall'estensimetro E12, posto a 14 cm dal filo esterno del pilastro; nel grafico di figura 9.41 vengono rappresentate le letture relative alle prime sei serie di carico (AA-FF). Si nota anzitutto come, in corrispondenza dei primi cicli delle prime cinque serie, il crescente livello massimo positivo di carico induca delle diminuzioni di pendenza delle curve rilevate, effetto delle micro fessurazioni del calcestruzzo generatesi nell'interfaccia di aderenza con l'acciaio. L'ulteriore variazione di pendenza generatasi alla ripresa del carico positivo relativa al 1° ciclo della serie FF denota invece lo snervamento locale della barra, valicata la soglia delle $2.300 \mu\epsilon$ di deformazione, con conseguente deformazione plastica, e quindi leggera amplificazione delle deformazioni deducibili dall'allargamento isterico delle curve relative al singolo ciclo. Nei due cicli successivi della serie, condotta in controllo di forza, non ci sono più incrementi di carico e quindi non si inducono più escursioni plastiche, con un andamento delle curve lineare ed una riduzione della rigidità (ovvero della pendenza delle curve).

Le micro fessurazioni relative alle prime cinque serie di carico generano sull'interfaccia acciaio-clt delle deformazioni residue di trazione, rilevate a carico nullo, dell'ordine delle $250 \mu\epsilon$, mentre la successiva escursione plastica relativa alla serie FF raddoppia tale deformazione residua.

Ci si sofferma un istante sullo snervamento locale rilevato nella sezione in esame della barra integrativa d'estradosso per effettuare delle osservazioni relative alla deformazione dell'intera barra. Poiché il livello di carico di prova che ha indotto, nel corso della serie FF, lo snervamento rilevato in E12 risulta prossimo al massimo livello di carico applicato durante la serie EE, nel corso della quale si è riscontrata la fessurazione della trave, risulta lecito supporre che nel tratto di barra integrativa prossimo al pilastro fossero già presenti, nel corso della serie EE, plasticizzazioni diffuse dell'armatura.

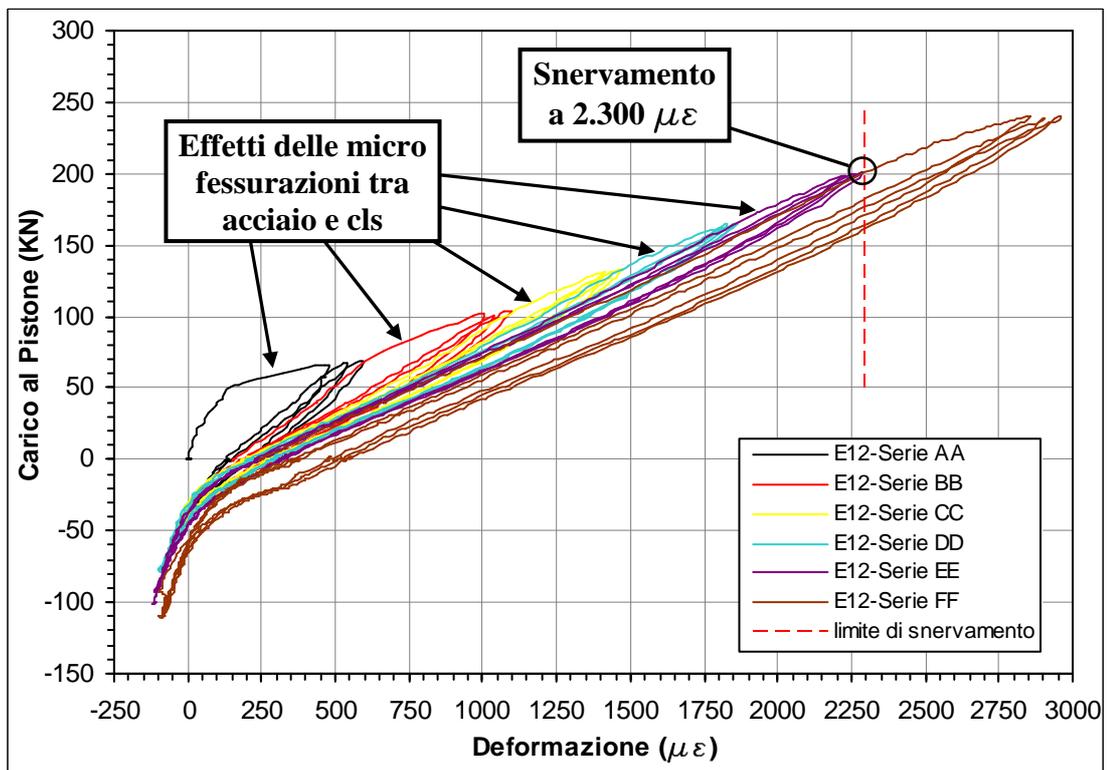
Tale riflessione, unitamente alle ulteriori osservazioni svolte in precedenza, consente di delineare l'andamento qualitativo delle trazioni relative alle barre integrative superiori rappresentato in figura 9.40. Si nota quindi che la sezione sede di rilevazione ricade ai bordi del tratto di trasferimento, consentendo di affermare

che, trascurando il contributo fornito dal concio di calcestruzzo compreso tra le due fessure, lo stato deformativo, e di conseguenza quello tensionale, atteso nei 20 cm di barra precedenti risulterà più elevato di quello rilevato in E12.



- **Figura 9.40** - Rappresentazione qualitativa dell'andamento delle tensioni nelle barre integrative d'estradosso all'atto della fessurazione.

In conclusione l'andamento delle tensioni di trazione ipotizzato per le barre integrative superiori suggerisce che il tratto di barra in cui, con maggiore probabilità, avvenga il primo superamento della deformazione di snervamento, ed in conseguenza la prima plasticizzazione della sezione, risulti compreso nell'intervallo p , rappresentato in figura 9.40 in corrispondenza delle fessure d'estradosso. Ne consegue che l'avvenuto snervamento della sezione monitorata dall'E12 implichi l'antecedente snervamento, per valori di carico inferiori, del tratto di barra prossimo alla sezione di collegamento della trave al nodo; stesso ragionamento varrà in seguito per la completa plasticizzazione della sezione.



- **Figura 9.41** - Grafico delle deformazioni assiali delle barre integrative superiori rilevate dall'estensimetro E12 applicato a 14 cm dal pilastro: prime sei serie di carico.

Le deformazioni rilevate durante l'applicazione delle successive tre serie di carico (*GG-II*) vengono analizzate con l'ausilio della rappresentazione grafica di figura 9.42. Si può notare come in corrispondenza del nuovo incremento del massimo carico **positivo**, relativo al *1° ciclo* della *serie GG*, lo snervamento riprenda esattamente dal livello deformativo a cui si era interrotto all'apice del *1° ciclo* della *serie FF* (rappresentata con tratteggio marrone), producendo, come evidenziato in precedenza, un'amplificazione isterica delle deformazioni. La conduzione in controllo di spostamento della serie di carico evidenzia, nei due cicli successivi, un andamento lineare delle curve con una sensibile riduzione delle resistenze (ovvero dei livelli di carico raggiunti a parità di deformazione) e della rigidità (ovvero della pendenza delle curve).

L'escursione in campo plastico relativa alle *serie FF* e *GG*, sommate agli effetti dell'ampliamento delle micro fessurazioni all'interfaccia di aderenza col calcestruzzo, producono delle deformazioni residue di trazione sulle barre che registrano, per valori nulli di carico, picchi superiori alle $900 \mu\epsilon$.

L'applicazione dei carichi di segno **negativo** mostra, al solito, un incremento di deformazione nelle barre superiori che si accollano, a seguito della parziale

richiusura delle fessure d'estradosso, una maggiore quota di compressioni; si evidenzia quindi, all'atto della ripresa di tensione da parte del conglomerato compresso, una riduzione di carico assorbito, testimoniata dall'incremento, in prossimità del massimo livello di carico negativo, della pendenza delle curve.

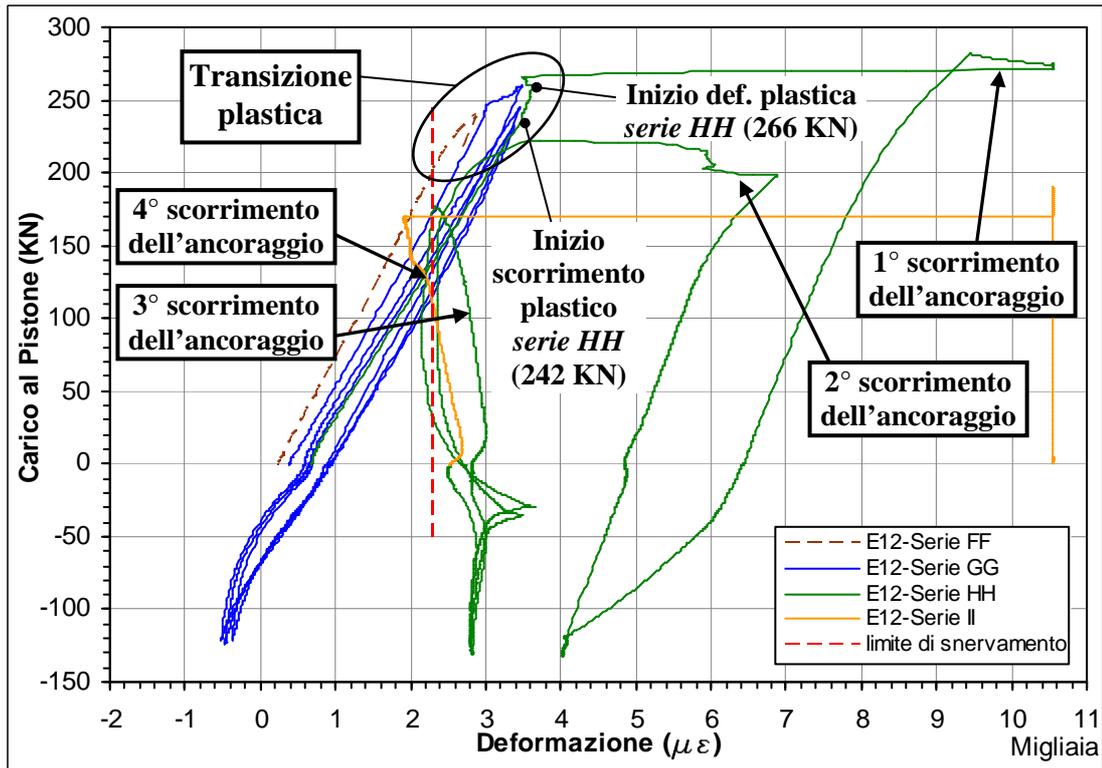
L'ulteriore incremento di carico massimo positivo applicato al *1° ciclo* della *serie HH* induce una nuova ripresa dello snervamento, in corrispondenza del livello deformativo a cui si era interrotto all'apice del *1° ciclo* della *serie GG*; la lieve riduzione della deformazione, prima, ed il brevissimo tratto di ripresa successivo che sfocia nel plateau orizzontale, denotano la completa plasticizzazione della sezione della barra posta a 14 cm dal filo esterno del pilastro, con un'escursione plastica di circa $7.000 \mu\epsilon$ (da $3.600 \mu\epsilon$ a $10.550 \mu\epsilon$).

Confrontando i dati rilevati dall'induttivo L4 con le letture effettuate dall'estensimetro E12 risulta possibile ottenere un riscontro pratico su quanto ipotizzato in precedenza a riguardo della probabile localizzazione del tratto di prima plasticizzazione. A tale scopo si è evidenziato nel grafico rappresentativo le letture effettuate in L4 (fig. 9.38) il punto di inizio dello scorrimento plastico avvenuto durante il *1° ciclo* della *serie HH* ed il relativo valore di carico, si è quindi evidenziato il corrispondente punto anche sul grafico rappresentativo le letture effettuate in E12 (fig. 9.42); si può notare come, in corrispondenza dell'inizio dello scorrimento plastico rilevato all'estradosso (per un carico di prova di 242 KN), l'incremento delle deformazioni rilevate in E12 subisca un rallentamento, con conseguente breve tendenza ad andamento verticale della curva, fino all'inizio del tratto plastico, corrispondente ad un livello di carico pari a 266 KN .

Tale andamento evidenzia come la totale plasticizzazione trasversale sia originariamente avvenuta in un tratto di barra più vicino al nodo rispetto alla sezione in esame, per un carico di 242 KN , e si sia quindi propagata fino alla sezione monitorata da E12 (posta a 14 cm dal filo esterno del pilastro) a seguito di un incremento di carico di 24 KN . Risulta quindi confermato in pratica quanto ipotizzato in riferimento allo schema di figura 9.40.

Proseguendo quindi nell'analisi del diagramma di figura 9.42, si osserva che raggiunta la deformazione plastica di $10.550 \mu\epsilon$ a 275 KN di carico l'azione continua a crescere mentre la deformazione diminuisce, raggiungendo le $9.400 \mu\epsilon$ a 282 KN di carico, valore massimo in corrispondenza del quale viene raggiunto lo spostamento limite di controllo all'estremità della trave (pari ad 80 mm). Nonostante

il raggiungimento, a $10.550 \mu\epsilon$, del limite massimo di deformazione registrabile dall'estensimetro in uso (come testimoniano il breve tratto verticale rilevato in corrispondenza della deformazione massima del 1° ciclo della serie *HH* ed il ben più esteso tratto verticale rilevato al termine della *serie II*), la successione di deformazioni rilevate in prossimità del massimo valore positivo di carico relativo al 1° ciclo della serie *HH* consente di individuare, in maniera inequivocabile, l'avvenuto scorrimento dell'ancoraggio d'estremità delle barre integrative.



- **Figura 9.42** - Grafico delle deformazioni assiali delle barre integrative superiori rilevate dall'estensimetro E12 applicato a 14 cm dal pilastro: ultime tre serie di carico.

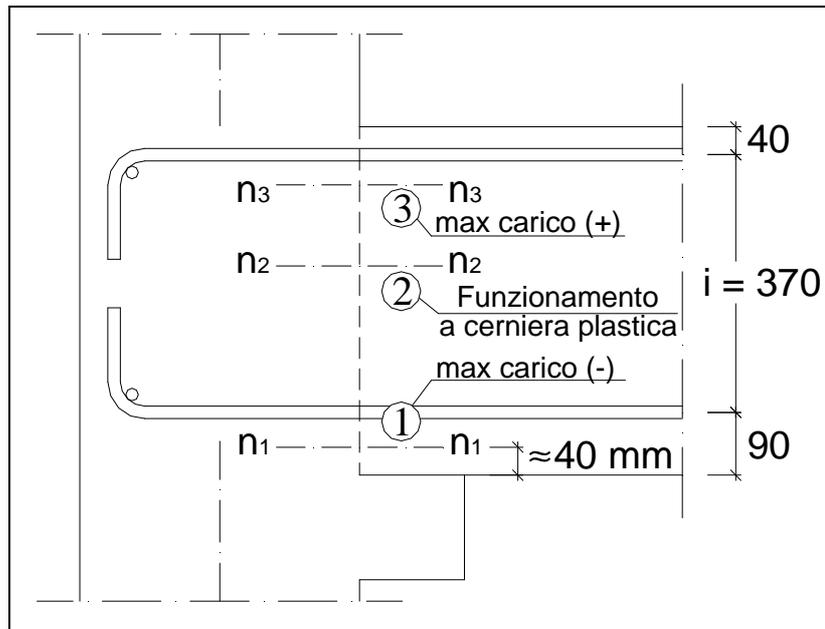
Sempre dall'analisi del grafico di figura 9.42 si può osservare come il ramo di scarico, relativo all'azione positiva applicata al 1° ciclo della *serie HH*, risulti parallelo al ramo di carico del 1° ciclo della *serie FF*, durante il quale si è registrato l'inizio della plasticizzazione della sezione della barra in esame. L'allungamento plastico subito dalla barra d'estradosso sotto l'azione del carico massimo positivo fa sì che, invertendo il segno del carico di prova, le deformazioni della barra registrino una repentina riduzione, pur conservando notevoli valori assoluti di dilatazione, con una pendenza della curva molto più elevata rispetto ai cicli negativi di carico relativi alla *serie GG*. Tale comportamento, noto come “*effetto Bauschinger*”, risulta

caratteristico negli acciai duttili sottoposti a carico ciclico in cui al raggiungimento dello snervamento segue l'inversione del segno di sollecitazione applicata; si evidenzia solitamente un limite elastico sensibilmente inferiore a quello del provino caricato per la prima volta, ed inoltre non risulta più definibile in modo evidente il valore della tensione di snervamento [15].

All'aumentare del carico negativo non si osserva inoltre nemmeno il consueto incremento di pendenza prodotto dal contributo del conglomerato compresso, poiché l'accorciamento di oltre 11 mm rilevato all'estradosso della trave da L4 (fig. 9.38), non risulta comunque sufficiente al completo recupero dei $13,2\text{ mm}$ di spostamento massimo rilevati in corrispondenza del massimo carico positivo.

I 2 mm di fessurazione residui presenti all'estradosso della trave, all'atto dello spostamento di $7,7\text{ mm}$ registrato all'intradosso (vedi figg. 9.38 e 9.39), prefigurano la formazione della cerniera plastica in corrispondenza della sezione estrema della trave. L'osservazione, in fig. 9.42, dell'andamento lineare del ramo di scarico, di completamento del 1° ciclo, e del primo tratto iniziale del ramo di carico, relativo al 2° ciclo della serie *HH*, dimostra come l'equilibrio flessionale sia totalmente a carico delle sole armature integrative superiori ed inferiori; il contributo dei primi 14 cm di conglomerato d'estradosso, interessati da ampie fessure e da micro fessurazioni all'interfaccia d'aderenza, risulta infatti nullo, con conseguente disposizione dell'asse neutro della sezione ad una quota prossima al punto medio dell'interasse verticale tra le armature, come schematizzato in figura 9.43 dalla posizione indicata con il numero **2**.

Per valori di carico prossimi a 120 KN la chiusura della fessura d'intradosso (vedi grafico di fig. 9.39) ripristina il contributo a compressione del conglomerato d'intradosso, provocando l'abbassamento dell'asse neutro, (che si dispone secondo la posizione **1** di fig. 9.43, visivamente quantificabile dal propagarsi della fessura fino a circa 40 mm dall'intradosso) ed il conseguente incremento delle trazioni nelle barre d'estradosso, come testimonia l'incremento di pendenza rilevato, nel grafico di figura 9.42, dalla curva di carico positivo relativa al 2° ciclo della serie *HH*.



- **Figura 9.43** - Disposizione qualitativa dell'asse neutro in corrispondenza della sezione d'estremità trave in relazione alle varie fasi di carico consecutive alla formazione della cerniera plastica.

L'incremento di trazione, unitamente all'ulteriore degrado subito dall'ancoraggio d'estremità della barra a seguito delle notevoli escursioni deformative, produce, in corrispondenza di un carico di 198 KN ed una deformazione di $6.900\ \mu\epsilon$, un secondo scorrimento della barra; infatti, come già osservato in occasione del primo scorrimento, nonostante il carico di prova cresca fino a 222 KN le deformazioni assiali della barra subiscono una repentina diminuzione, fino a valori di $3.700\ \mu\epsilon$, riprendendo quindi a decrescere, durante il ramo di scarico, in maniera simile ai cicli precedenti fino ad un carico di 160 KN (vedi grafico di fig. 9.42).

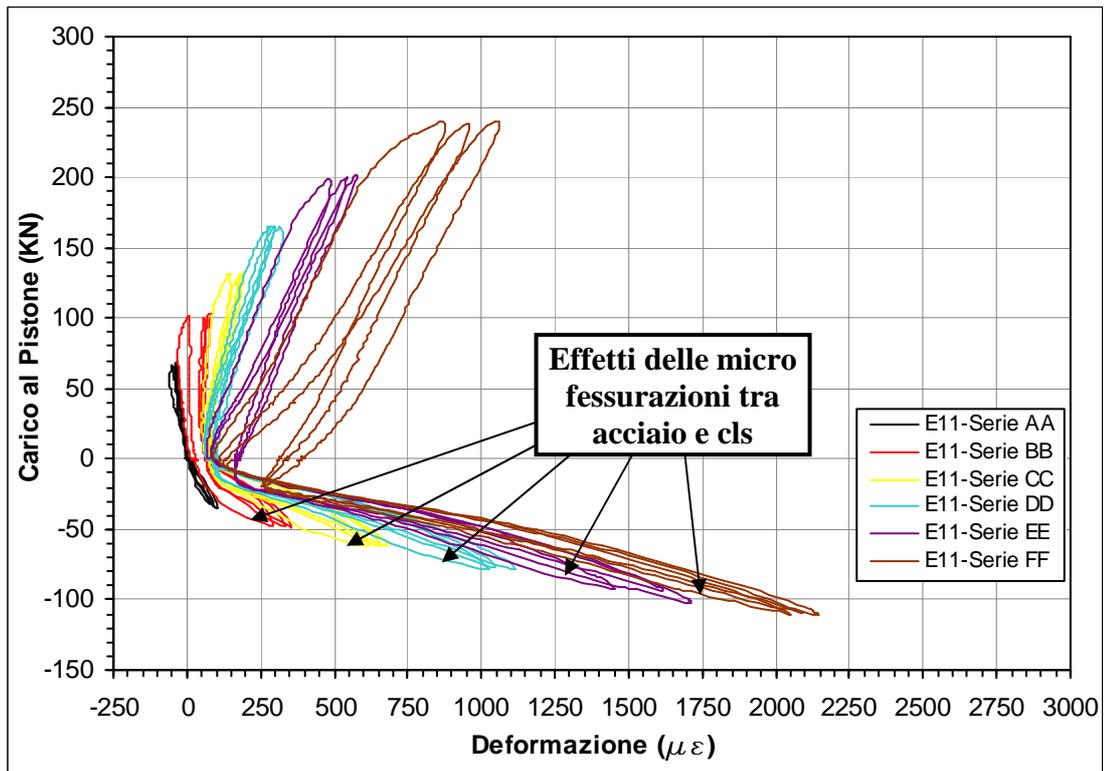
I restanti cicli di carico vedranno impegnate le barre superiori ed inferiori nel bilanciamento, per ampi intervalli di carico, dell'intera sollecitazione flessionale applicata alla sezione di collegamento della trave a seguito della formazione della cerniera plastica. L'applicazione dei carichi positivi relativi all'ultimo ciclo della *serie HH* ed all'unico ciclo della *serie II* genera, dato il degrado ormai evidente dell'ancoraggio delle barre integrative superiori, due ulteriori scorrimenti; come si può notare dal grafico di figura 9.42 si ha infatti un decremento delle deformazioni al crescere del livello di carico, probabilmente accompagnato, nel corso della *serie II*, anche da un'ulteriore escursione plastica delle deformazioni delle barre superiori. L'azione di carico viene spinta fino al raggiungimento, nella sezione estrema di

controllo, dello svolgimento limite del filo estensibile, raggiungendo di fatto il collasso del collegamento strutturale, e provocando anche l'interruzione del funzionamento dell'estensimetro E12.

Si passa ora ad analizzare le deformazioni relative alle barre inferiori, rilevate dall'estensimetro E11, posto sempre a 14 cm dal filo esterno del pilastro, e rappresentate nei grafici di figura 9.44 e 9.45. L'applicazione delle prime sei serie di carico evidenzia, in corrispondenza dei primi cicli di carico negativo di ogni serie, il consueto effetto delle micro fessurazioni del calcestruzzo all'interfaccia di aderenza con l'acciaio; si nota inoltre il leggero incremento di pendenza che le varie curve subiscono in prossimità del massimo carico negativo, frutto del contributo fornito dal calcestruzzo compresso d'estradosso a seguito della parziale richiusura delle fessure.

In corrispondenza dei carichi di segno positivo si nota invece la transizione, nel passaggio dalla seconda alla terza serie di carico, da deformazioni di contrazione ad allungamenti, conseguenza delle elevate deformazioni presenti all'estradosso; tali deformazioni inducono infatti, nel corso dei cicli di carico, l'abbassamento dell'asse neutro, che si assesta, in corrispondenza degli ultimi cicli di carico, a circa 3,5 cm dall'intradosso della trave (posizione **1** nello schema di fig. 9.43). La posizione dell'asse neutro può essere individuata anche dall'analisi dell'immagine di figura 9.32, scattata in corrispondenza dell'ultimo ciclo di carico, mediante la tracciatura in rosso passante per il punto d'apertura della fessura che si propaga fino all'estradosso, e che delimita quindi la sottostante porzione compressa di sezione.

L'elevata quota di posizionamento delle barre integrative inferiori, disposte direttamente sulla soletta prefabbricata della trave a 9 cm dall'intradosso, fa sì che le sollecitazioni siano sempre di trazione anche in corrispondenza di carichi di prova di segno positivo. Nel corso delle serie *CC*, *DD* ed *EE* l'andamento delle deformazioni delle barre inferiori sotto l'azione dei carichi positivi risulta pertanto proporzionale a quello delle barre superiori. L'incremento di deformazione relativo al *1° ciclo* della serie *EE* denota l'ulteriore abbassamento dell'asse neutro conseguente alla fessurazione dell'estradosso, mentre l'ancora più evidente incremento relativo al *1° ciclo* della serie *FF* corrisponde all'avvenuta plasticizzazione del tratto, di circa 20 cm di lunghezza, di barra superiore coinvolto nella doppia fessura di estradosso (tratto p dello schema di fig. 9.41).



- **Figura 9.44** - Grafico delle deformazioni assiali delle barre integrative inferiori rilevate dall'estensimetro E11 in funzione del carico di prova: prime sei serie di carico.

Le deformazioni assiali indotte nelle barre integrative d'intradosso dall'applicazione delle ultime tre serie di carico sono rappresentate nel grafico di figura 9.45. L'applicazione dei carichi di prova aventi segno **negativo** induce al *1° ciclo* della *serie GG* il superamento della deformazione limite di snervamento, con conseguente variazione di pendenza della curva di carico. L'incremento di carico negativo applicato al *1° ciclo* della *serie HH* genera un andamento delle deformazioni rilevate che ripercorre fedelmente quello delle curve di carico dei cicli precedenti, quindi, eguagliati i livelli di carico limite raggiunti dalla precedente *serie GG*, le deformazioni subiscono un momentaneo incremento a cui segue un intervallo di carico a deformazione nulla; tale sequenza di avvenimenti testimonia, come già osservato per le armature superiori, la ripresa dello snervamento dal medesimo livello deformativo a cui si era interrotto all'apice del *1° ciclo* della *serie GG*, e la successiva completa plasticizzazione della sezione.

L'ulteriore incremento del valore negativo del carico induce una repentina deformazione plastica di $2.230 \mu\epsilon$ (da $3.000 \mu\epsilon$ a $5.230 \mu\epsilon$) a 132 KN di carico, che induce l'immediato raggiungimento dello spostamento di controllo all'estremità della trave e la conseguente riduzione del carico di prova.

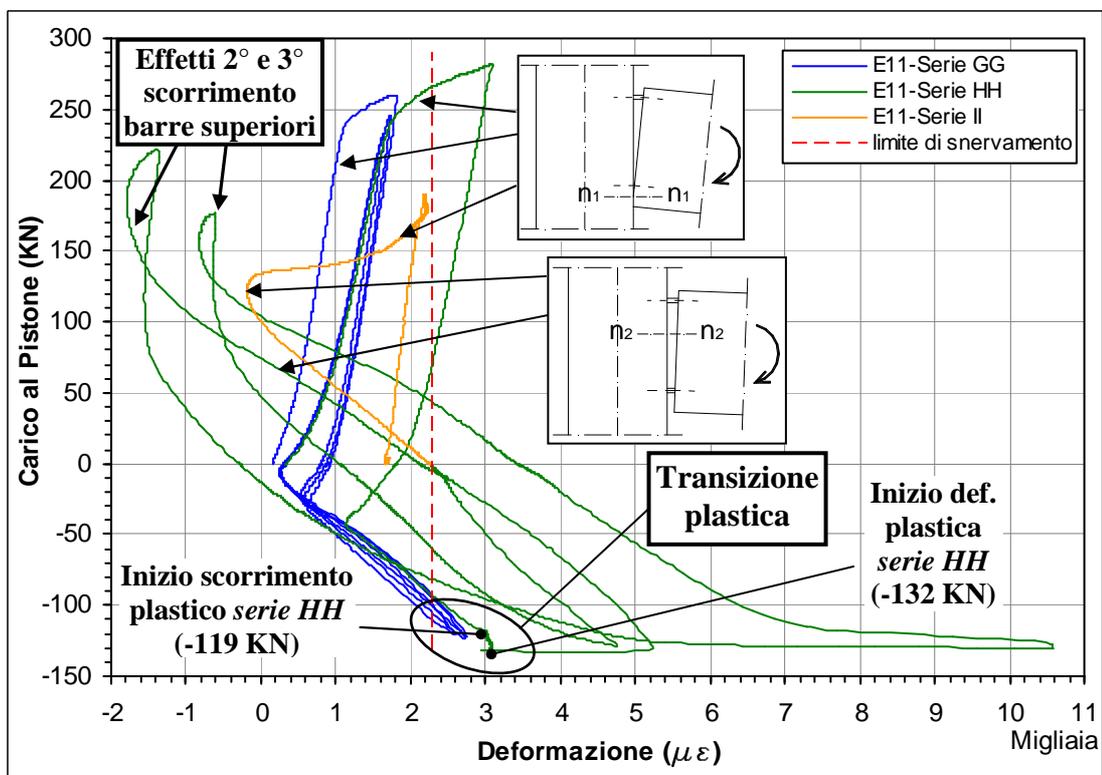
Confrontando la media delle rilevazioni eseguite dagli induttivi L1 ed L3 con le letture effettuate dall'estensimetro E11 risulta possibile, in analogia a quanto fatto per le barre superiori, individuare indicativamente il tratto in cui è avvenuta la prima plasticizzazione delle barre d'intradosso. A tale scopo si è evidenziato, nel grafico rappresentativo i valori medi delle letture effettuate in L1 ed L3 (fig. 9.39), il punto di inizio dello scorrimento plastico relativo al 1° ciclo della serie *HH*, indicandone il corrispettivo valore di carico, e si è quindi evidenziato il corrispondente punto anche sul grafico rappresentativo le letture effettuate in E11 (fig. 9.42); si può notare come, in corrispondenza dell'inizio dello scorrimento plastico rilevato all'intradosso (per un carico di prova di -119 KN), le deformazioni rilevate in E11 subiscono un rallentamento, con conseguente andamento verticale di un breve tratto della curva, fino all'inizio del tratto plastico, corrispondente ad un livello di carico pari a -132 KN . Tale andamento evidenzia come la totale plasticizzazione trasversale sia originariamente avvenuta in un tratto di barra più vicino al nodo rispetto alla sezione in esame, per un carico di -119 KN , e si sia quindi propagata fino alla sezione monitorata da E11 (posta a 14 cm dal filo esterno del pilastro) a seguito di un incremento di carico di 13 KN .

L'incremento di carico necessario alla propagazione della plasticizzazione fino alla sezione in esame (monitorata da E11) risulta circa la metà di quanto ricavato per le barre d'estradosso, a fronte tuttavia di un numero di barre pari a circa la metà e di un braccio della coppia interna più ridotto; fattori quest'ultimi che amplificano notevolmente l'effetto dell'incremento del carico sulla tensione nelle barre. Poiché sia E12 che E11 sono applicati alla stessa distanza dal filo esterno del pilastro, risulta possibile affermare che la sezione di prima plasticizzazione delle barre d'intradosso risulti indicativamente localizzabile nel medesimo tratto evidenziato per le barre d'estradosso, confermando anche per le barre inferiori la validità delle ipotesi effettuate in riferimento allo schema di figura 9.40.

Proseguendo quindi nell'analisi del diagramma di figura 9.45 si nota come le rilevanti deformazioni registrate all'estradosso in corrispondenza dei carichi di segno positivo inducono, nell'arco della serie di carico *GG* e del 1° ciclo della serie *HH*, un ulteriore abbassamento dell'asse neutro ed un conseguente incremento degli allungamenti registrati sulle barre d'intradosso. L'elevato scorrimento plastico subito dalle barre integrative d'estradosso nel corso del 1° ciclo delle serie *HH*

produce, nelle barre integrative d'intradosso, dilatazioni massime pari a circa $3.100 \mu\epsilon$, tali da indurre lo snervamento dell'acciaio.

Il completamento del 1° ciclo di carico della serie HH produce, come detto, l'ulteriore escursione plastica delle deformazioni delle armature inferiori e la conseguente ingente fessurazione dell'intradosso (vedi fig. 9.39), completando di fatto la formazione della cerniera plastica in corrispondenza della sezione di collegamento della trave, con conseguente innalzamento dell'asse neutro alla quota relativa alla posizione **2** dello schema di figura 9.43. Ne consegue che le deformazioni rilevate, in corrispondenza delle barre inferiori, durante l'applicazione dei carichi positivi, relativi agli ultimi tre cicli di prova, tornino ad essere negative.



- **Figura 9.45** - Grafico delle deformazioni assiali delle barre integrative inferiori rilevate dall'estensimetro E11 in funzione del carico di prova: ultime tre serie di carico.

Risulta quindi possibile analizzare in parallelo le deformazioni rilevate sulle barre integrative superiori ed inferiori durante l'applicazione degli ultimi due cicli di carico della *serie HH*, poiché costituiscono, per ampi intervalli di carico, gli unici elementi resistenti alle ulteriori sollecitazioni flessionali di prova. Risulta anzitutto evidente come le deformazioni delle barre superiori (fig. 9.42) risultino, dal ramo positivo di scarico relativo al 2° ciclo della *serie HH* in poi, estremamente

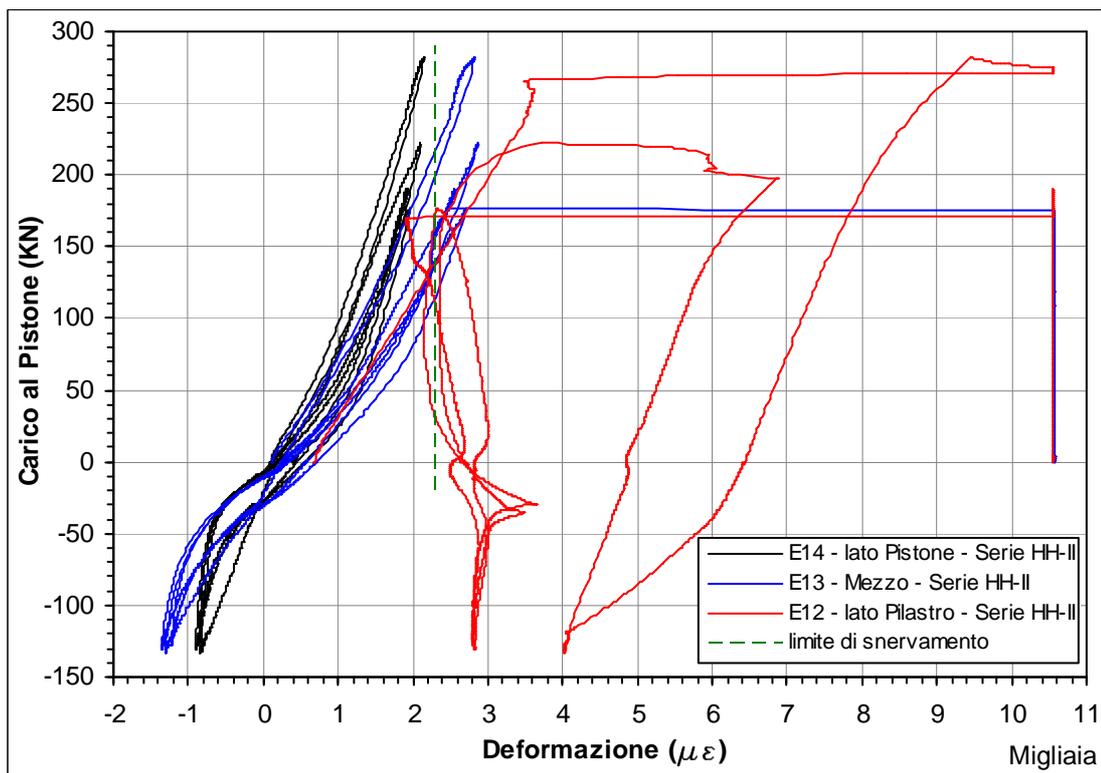
contenute, con variazioni comprese tra le $2.000 \mu\epsilon$ e le $3.500 \mu\epsilon$, mentre le barre inferiori subiscono ampie escursioni deformative che inducono, in corrispondenza del massimo carico negativo applicato al 2° ciclo della serie *HH*, ad una ulteriore e più ampia escursione plastica (da $5.000 \mu\epsilon$ a $10.500 \mu\epsilon$).

Tale comportamento deriva da molteplici fattori: anzitutto la ridotta percentuale d'armatura inferiore fa sì che l'asse neutro venga a disporsi in prossimità delle preponderanti armature superiori, generando maggiori sollecitazioni sulle barre d'intradosso; inoltre la crisi venutasi a creare all'ancoraggio delle barre superiori genera sia gli scorrimenti a trazione evidenziati in precedenza, sia conseguenti scorrimenti relativi in compressione, alleviando notevolmente l'escursione deformativa rilevata nelle barre superiori. Il comportamento deformativo rilevato nelle barre inferiori, in prossimità dei massimi carichi positivi applicati durante il 2° e 3° ciclo della serie *HH*, evidenzia infatti una notevole riduzione nonostante il carico continui a crescere, a conferma del verificarsi del 2° e 3° scorrimento rilevato all'ancoraggio delle barre superiori.

L'applicazione della serie *II*, spinta fino al collasso strutturale, imprime degli scorrimenti all'estradosso talmente elevati da provocare l'abbassamento dell'asse neutro della sezione di applicazione di E11 al di sotto dell'asse delle barre integrative inferiori; per tale ragione le ultime rilevazioni effettuate in E11 tornano ad evidenziare degli allungamenti in corrispondenza di carichi positivi (fig. 9.45), mentre gli accorciamento, rilevati all'intradosso dagli induttivi L1 ed L3, raggiungono i $5,5 \text{ mm}$, valore massimo raggiunto nell'intera prova, producendo evidenti fenomeni di schiacciamento quali ad esempio quelli rappresentati in figura 9.37.

Il sistema di estensimetri disposti per il monitoraggio dello stato deformativo delle barre integrative prevede ulteriori 4 estensimetri applicati a coppie sulle barre centrali, superiore ed inferiore già strumentate rispettivamente da E12 ed E11, applicati alle medesime distanze, pari a 29 cm ed a 44 cm, dal filo esterno del pilastro (vedi fig. 5.36, par. 5.3). I grafici rappresentati nelle figure 9.46 e 9.47 mettono a confronto le rilevazioni effettuate, dai 3 estensimetri applicati su ciascuna barra, durante l'esecuzione delle ultime due serie di carico (*HH-II*), in corrispondenza delle quali avvengono i fenomeni deformativi più rilevanti per il tratto di trave iniziale.

Dal grafico di figura 9.46 si nota come già a 29 cm dalla sezione di collegamento della trave, in corrispondenza della quale al termine del 1° ciclo della serie di carico *HH* viene a crearsi la cerniera plastica, l'effetto delle plasticizzazioni della barra e degli scorrimenti dell'ancoraggio di nodo risulti appena rilevabile; solo in E13, posto a 29 cm dal filo esterno del pilastro, si ha il superamento del limite di snervamento, con un picco deformativo pari a circa $2.900 \mu\epsilon$, mentre l'ultimo scorrimento provoca, in analogia con quanto avvenuto in E11, l'immediato raggiungimento del fondo scala in E13.

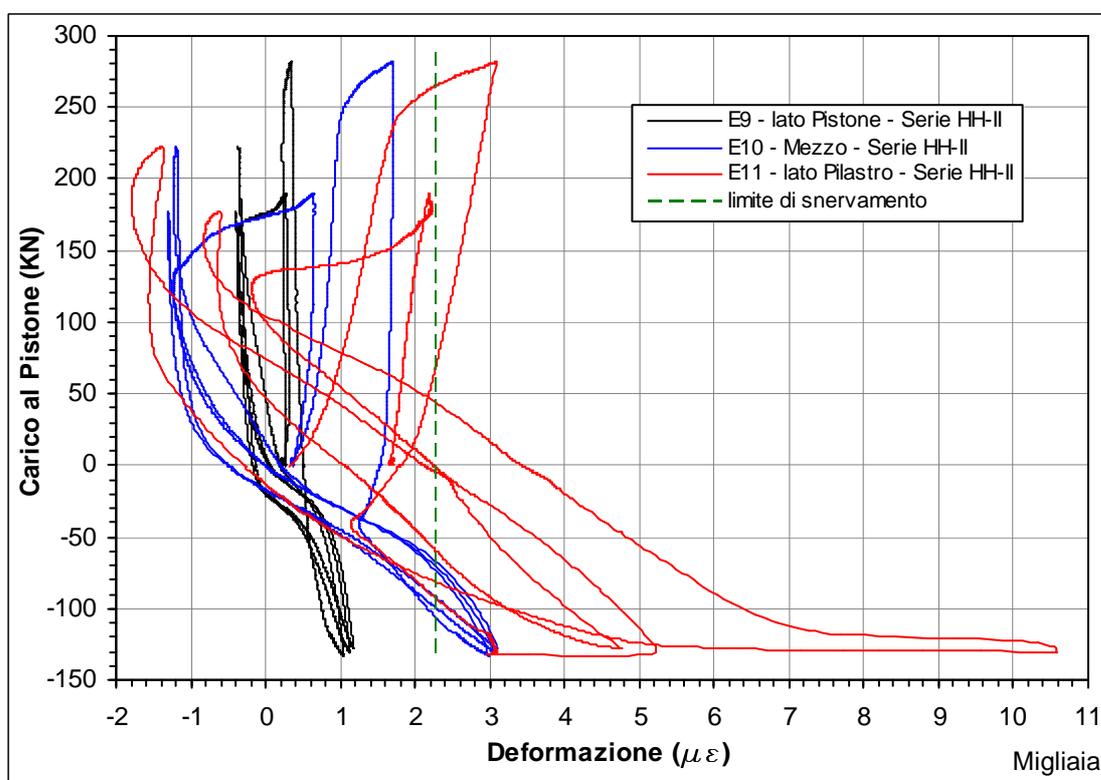


- **Figura 9.46** - Confronto tra le rilevazioni effettuate dagli estensimetri E14, E15 ed E16 applicati alla barra integrativa centrale superiore in funzione del carico di prova: ultime due serie di carico.

In generale E13 ed E14 mostrano un'amplificazione dei valori deformativi massimi in corrispondenza delle serie *GG* ed *HH*, delineando un incremento di rigidità (espresso sempre in funzione del carico di prova), per bassi valori di carico, ed un consecutivo decremento in prossimità dei valori limite, sia positivi che negativi. Tale comportamento è diretta conseguenza dell'ampliarsi delle fessure d'estradosso ed intradosso, con il conseguente maggiore trasferimento di carico alle barre in corrispondenza delle inversioni di segno dell'azione di prova, e quindi del loro richiudersi in prossimità dei massimi livelli, con conseguente incremento del

contributo fornito dal conglomerato compresso che va ad alleviare la deformazione nelle barre.

Per quanto riguarda le rilevazioni effettuate dagli estensimetri posti sulla barra inferiore, rappresentate nel grafico di figura 9.47, si nota invece come l'estensimetro E10, posto a 29 cm dal filo esterno del pilastro, risenta, nell'arco delle serie di carico *FF* e *GG* e del 1° ciclo della *serie HH*, dell'elevata fessurazione presente all'estradosso della trave; ne consegue che, per carichi di segno positivo, l'asse neutro scende al di sotto della barra generando deformazioni positive. Tale effetto risulta molto meno rilevante per l'E9, posto a 44 cm dal filo esterno del pilastro, con l'asse neutro che non scende mai al disotto della barra.



- **Figura 9.47** - Confronto tra le rilevazioni effettuate dagli estensimetri E9, E10 ed E11 applicati alla barra integrativa centrale inferiore in funzione del carico di prova: ultime due serie di carico.

Al termine del 1° ciclo di carico della *serie HH*, l'integrale fessurazione della sezione di collegamento della trave genera l'innalzamento dell'asse neutro ed il conseguente caricamento diretto delle sole armature integrative. Le deformazioni corrispondenti ai carichi positivi tornano, pertanto, ad essere negative, mentre le deformazioni limite, sia positive che negative, subiscono un notevole ampliamento; come già affermato in precedenza, la preponderanza delle armature superiori genera,

in tale fase, forti escursioni deformative nelle barre inferiori con il conseguente superamento del limite di snervamento nella sezione posta a 29 cm dal pilastro. L'ampliamento delle fessure ed il consecutivo richiudersi, in corrispondenza dei valori limite di carico, genera anche in E10 ed E9 la tipica variazione di rigidità già osservata in precedenza per E13 ed E14.

Dall'analisi dei risultati fin qui svolta appare abbastanza delineato il quadro descrittivo del comportamento delle barre integrative, con estese escursioni plastiche, sia delle barre superiori che di quelle inferiori, e con molteplici scorrimenti degl'ancoraggi delle barre superiori. Un ulteriore chiarimento sul comportamento delle armature integrative può essere ricavato dal confronto diretto tra ciò che accade sulla superficie della trave, all'estradosso ed all'intradosso del 1° concio di controllo, ed il comportamento delle barre integrative immediatamente sottostanti, il tutto rappresentato in funzione del tempo trascorso dall'inizio della prova.

Si tratta quindi di confrontare gli spostamenti relativi rilevati dagli induttivi posti all'estradosso (L4) ed all'intradosso (L1 ed L3) del primo concio di trave con le deformazioni registrate, rispettivamente in E12 ed E11, dagli estensimetri posti sulle barre integrative; occorre quindi convertire anzitutto le letture effettuate dagli induttivi in deformazioni. Da quanto evidenziato nei grafici delle figure 9.46 e 9.47 la deformazione plastica delle barre integrative si è propagata, nel corso delle ultime tre serie di carico, fino alle sezioni poste a 29 cm dal pilastro, sede di applicazione degli estensimetri E11 ed E10; si ritiene pertanto opportuno considerare gli spostamenti relativi, rilevati tra le sezioni estreme del primo concio di trave, dipendenti principalmente dalle deformazioni presenti nei tratti di barre integrative compresi tra gli spezzoni d'ancoraggio e le sezioni d'applicazione degli estensimetri E11 ed E10, ottenendo pertanto un *tratto di riferimento di 65 cm di lunghezza* (vedi schema di fig. 9.40).

Il grafico di figura 9.48 mette a confronto le deformazioni medie dell'estradosso della trave, ricavate dal rapporto tra le letture effettuate in L4 ed il tratto di 650 mm considerato, con le deformazioni assiali della barra integrativa superiore, rilevate da E12, entrambe rappresentate in funzione del tempo. Occorre anzitutto osservare che il diagramma così ottenuto non annovera il carico di prova tra le grandezze rappresentative, non consentendo quindi di evidenziare in maniera

esplicita il legame che sussiste tra il valore delle deformazioni rilevate ed il segno dell'azione di prova che le ha provocate.

Per ovviare a tale lacuna interpretativa si è deciso di suddividere, mediante differenti colorazioni, la rappresentazione grafica dell'andamento delle deformazioni dedotte dalle rilevazioni dell'induttivo L4, posto all'estradosso del primo concio di trave, in base alle serie di carico applicate. Poiché la suddivisione eseguita ed i colori utilizzati in figura 9.48 (rappresentazione grafica del legame 'deformazione-tempo di prova') risultano essere i medesimi adottati in tutte le rappresentazioni grafiche dei legami 'carico al pistone-deformazioni' raffigurate nelle pagine precedenti, il raffronto grafico tra le due tipologie rappresentative risulta immediato, consentendo quindi di risalire con facilità al segno delle azioni di prova applicate istante per istante. Considerando inoltre che il primo ramo di carico del ciclo iniziale di ogni serie (e quindi il primo tratto di curva contraddistinto da una differente colorazione) viene realizzato per mezzo di un'azione di prova di segno positivo (spinta verso l'alto del pistone), risulta ancora più immediato correlare, istante per istante, ogni successiva deformazione rappresentata nel grafico di fig. 9.48 al segno dell'azione di prova che l'ha generata (vedi didascalie incorniciate in nero all'interno del grafico); sarà infatti sufficiente tener conto della variazioni di segno subite dalle pendenze delle 6 spezzate che costituiscono ogni singola serie di carico, avvalendosi inoltre, come esplicitato in seguito, dell'andamento delle linee congiungenti i valori delle deformazioni relative a valori nulli del carico di prova. Naturalmente una volta individuato il segno dell'azione di prova che ha indotto, al generico istante considerato, la deformazione relativa ad L4, risulta immediato ricavare, sulla medesima verticale, la deformazione corrispondente rilevata in E12, e viceversa.

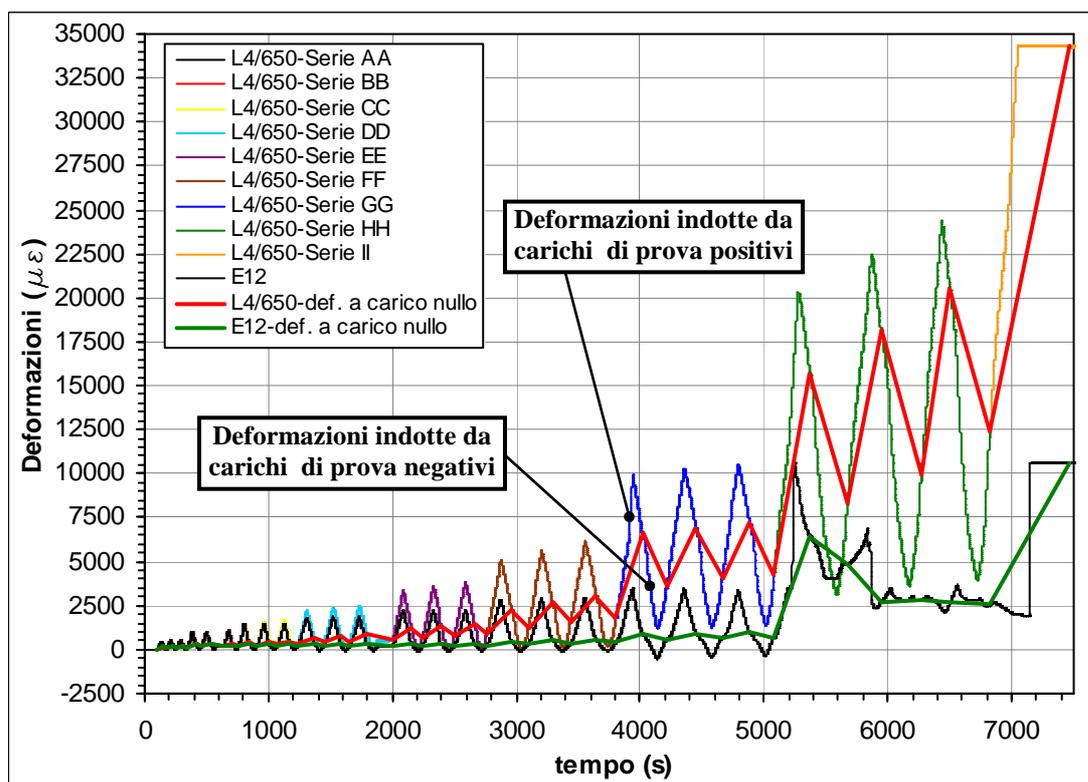
Analizzando quindi il grafico di fig. 9.48 si può notare come le due deformazioni abbiano un andamento proporzionale fino al termine della serie di carico *EE* (il leggero scostamento è principalmente dovuto al progressivo abbassamento dell'asse neutro ed alle micro fessurazioni del calcestruzzo), quindi nel corso della *serie FF* lo snervamento rilevato in E12, ed esteso probabilmente al tratto di barra interessato dalle fessure d'estradosso (vedi schema di fig. 9.40), produce un incremento più che proporzionale delle deformazioni medie d'estradosso.

Tale tendenza prosegue anche nel corso della *serie GG* giungendo a deformazioni medie superficiali dell'ordine delle $10.000 \mu\epsilon$, che risultano compatibili con una diffusa plasticizzazione delle armature superiori (E12, posto come detto ai margini del tratto più sollecitato della barra, si assesta infatti su deformazioni dell'ordine delle $3.200 \mu\epsilon$) e permettono quindi di confermare l'assenza di scorrimenti in corrispondenza degli ancoraggi di nodo.

L'incremento di spostamento prodotto dalla *serie HH* induce delle deformazioni medie superficiali all'estradosso della trave che superano le $20.000 \mu\epsilon$, fino a sfiorare quota $24.500 \mu\epsilon$, a fronte di un picco di deformazione assiale della barra superiore, rilevato in E12, pari a $10.500 \mu\epsilon$; si confermano pertanto gli scorrimenti all'ancoraggio delle barre evidenziati in precedenza, poiché l'eventuale assenza di tali scorrimenti avrebbe dovuto provocare la rottura della barra in prossimità della sezione di collegamento della trave.

L'incremento di spostamento relativo alla *serie II*, spinto fino al collasso della struttura, genera una deformazione media superficiale che supera abbondantemente il 3,5 % ($35.000 \mu\epsilon$), non rilevata dall'induttivo L4 giunto a fine corsa, mentre anche in E12 il repentino incremento di deformazione manda fuori scala l'estensimetro; le immagini raccolte in tale fase, mostrate al punto 9.4.5, evidenziano in maniera inequivocabile la crisi provocata all'ancoraggi delle barre superiori di nodo.

Altro aspetto interessante è il confronto tra le spezzate (rappresentate in fig. 9.48) che congiungono i valori di deformazione rilevati in corrispondenza dell'annullamento ciclico del carico di prova (linea rossa ispessita per le deformazioni medie superficiali d'estradosso e linea verde ispessita per le deformazioni in E12). Si nota come le deformazioni impresse della barra subiscono un picco in corrispondenza del 1° ciclo della *serie HH*, assestandosi quindi su valori di poco superiori alle $2.500 \mu\epsilon$, mentre le deformazioni impresse superficiali subiscono un primo incremento, prodotto dalle diffuse plasticizzazioni delle barre superiori, durante la *serie GG* e quindi un costante e deciso incremento nel corso della *serie HH*, a seguito dell'ampliarsi degli scorrimenti.



- **Figura 9.48** - Confronto tra le deformazioni medie d'estradosso, ricavate dalle rilevazioni effettuate dall'induttivo L4, e le deformazioni assiali delle barre superiori, rilevate dall'estensimetro E12, in funzione del tempo.

Anche per l'intradosso della trave si procede, in maniera del tutto analoga a quanto visto per l'estradosso, al confronto fra le deformazioni medie superficiali del conglomerato e le deformazioni puntuali assiali delle barre integrative inferiori, sempre riferite alla sezione posta a 14 cm dal pilastro (rilevate dall'estensimetro E11), in relazione al tempo di prova. Lo spostamento relativo considerato è costituito dalla media delle letture effettuate dagli induttivi L1 ed L3, mentre il tratto di riferimento per il calcolo delle relative deformazioni medie viene sempre considerato pari a 650 mm di lunghezza (computato dallo spezzone trasversale d'ancoraggio delle barre fino alla sezione di applicazione di E10); il grafico così ottenuto è rappresentato in figura 9.49.

Come si può notare le colorazioni utilizzate per la suddivisione grafica delle serie di carico risulta la medesima adottata per il grafico 9.48, valgono pertanto tutte le considerazioni svolte in precedenza sulla determinazione del segno del carico di prova applicato ad ogni istante considerato (vedi didascalie incorniciate in nero all'interno del grafico).

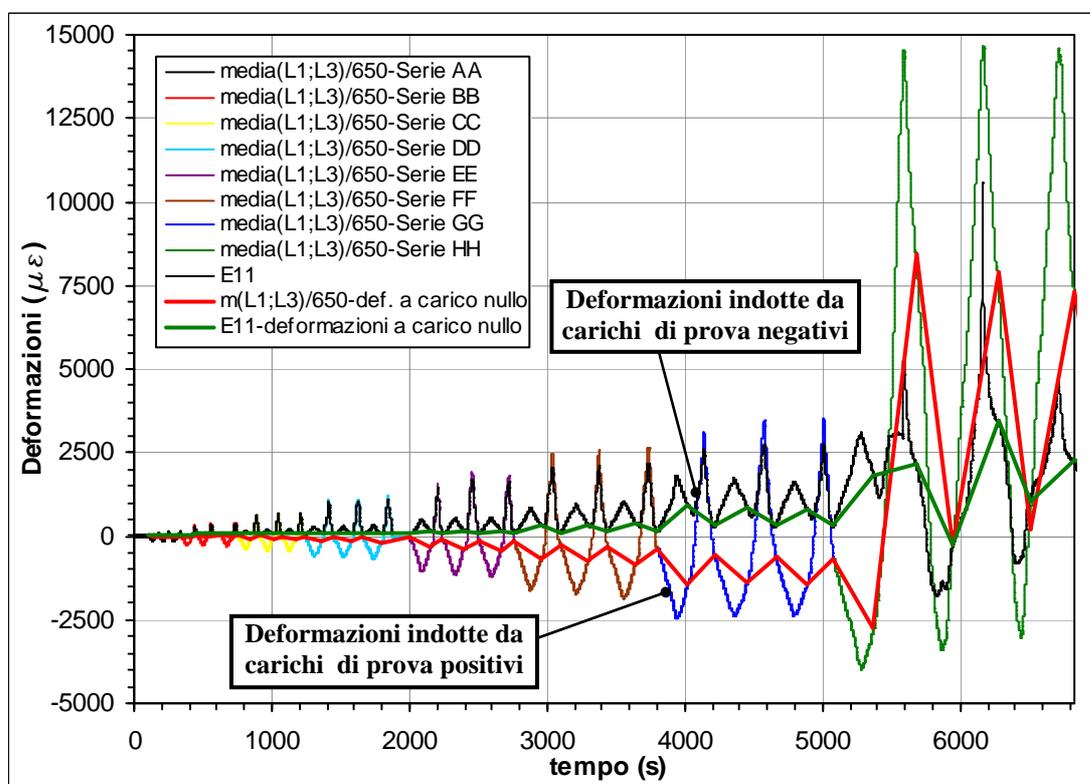
Si osserva immediatamente come, nel corso delle prime sette serie di carico (AA-GG), vi sia assoluta proporzionalità tra la deformazione medie rilevate in superficie e quelle puntuali relative alle barre inferiori, confermando l'inequivocabile assenza di scorrimenti degli ancoraggi di nodo; si nota inoltre la costante presenza di sollecitazioni di trazione nelle barre integrative inferiori, per quanto riguarda almeno i primi 15-20 cm di trave, causate, come già osservato in precedenza, dal repentino abbassamento dell'asse neutro della sezione.

Al termine del 1° ciclo di carico della serie HH il notevole ampliamento della fessura d'intradosso (vedi anche grafico di fig. 9.39) induce una deformazione media superficiale prossima alle 15.000 $\mu\epsilon$, che si ripete anche all'applicazione dei massimi carichi negativi relativi ai due successivi cicli; la corrispondente deformazione assiale della barra inferiore raggiunge dapprima un valore di circa 5.300 $\mu\epsilon$, al termine di un breve allungamento plastico, quindi, in corrispondenza del 2° ciclo, un picco di quasi 10.600 $\mu\epsilon$, al termine di una ben più estesa deformazione plastica, per riassetarsi infine sulle 5.000 $\mu\epsilon$ di deformazione. Questa dinamica dello stato deformativo sottolinea il propagarsi, sia all'interno del nodo che all'esterno, della deformazione plastica della barra integrativa inferiore, iniziata probabilmente in prossimità della sezione di collegamento della trave e giunta rapidamente fino a circa 30 cm di distanza (vedi curve relative ad E10 in fig. 9.47), consentendo dunque di stimare una deformazione media delle barre inferiori compatibile a quella ricavata per la superficie dell'intradosso; tali osservazioni inducono a confermare quindi la già ipotizzata assenza di scorrimenti per quanto riguarda gli ancoraggi di nodo delle barre integrative inferiori.

Ulteriore conferma dell'assenza di scorrimenti all'ancoraggio delle barre inferiori deriva inoltre dall'osservazione della media delle rilevazioni cicliche compiute dagli induttivi L1 ed L3 in corrispondenza dei cicli di carico relativi alla serie HH (vedi grafico di fig. 9.39); si può notare come al ripetersi dei cicli di carico, applicati in controllo di spostamento, la resistenza e la rigidità della sezione siano praticamente invariate (il massimo valore negativo di carico raggiunto è lo stesso), mentre la capacità dissipativa del primo concio di trave viene notevolmente ridotta in conseguenza della prima estesa plasticizzazione (la superficie racchiusa entro le curve del grafico si riduce nel corso dei cicli). Tali osservazioni evidenziano come l'amplificazione delle deformazioni derivi esclusivamente dalla propagazione

della plasticizzazione delle barre inferiori, senza cedimenti conseguenti a scorrimenti delle barre nel nodo.

La rappresentazione (in fig. 9.48) delle spezzate che congiungono i valori di deformazione rilevati in corrispondenza dell'annullamento ciclico del carico di prova (linea rossa ispessita per le deformazioni medie superficiali d'intradosso e linea verde ispessita per le deformazioni in E11), evidenzia come, nel corso delle prime sette serie di carico, le deformazioni impresse di conglomerato e barre risultino, rispettivamente, di accorciamento e di allungamento; entrambi causa diretta della preponderanza delle azioni positive che determina un notevole abbassamento dell'asse neutro nei primi tratti della trave.



- **Figura 9.49** - Confronto tra le deformazioni medie d'intradosso, ricavate dalle rilevazioni effettuate dagli induttivi L1 ed L3, e le deformazioni assiali delle barre inferiori, rilevate dall'estensimetro E11, in funzione del tempo.

L'intera fessurazione della sezione di collegamento della trave al nodo fa sì che, al termine durante il 1° ciclo della serie HH, le deformazioni medie impresse della superficie d'intradosso subiscano un brusco incremento, oscillando, nel corso della serie HH, tra le 7.500 $\mu\epsilon$ e valori pressoché nulli, mentre le deformazioni

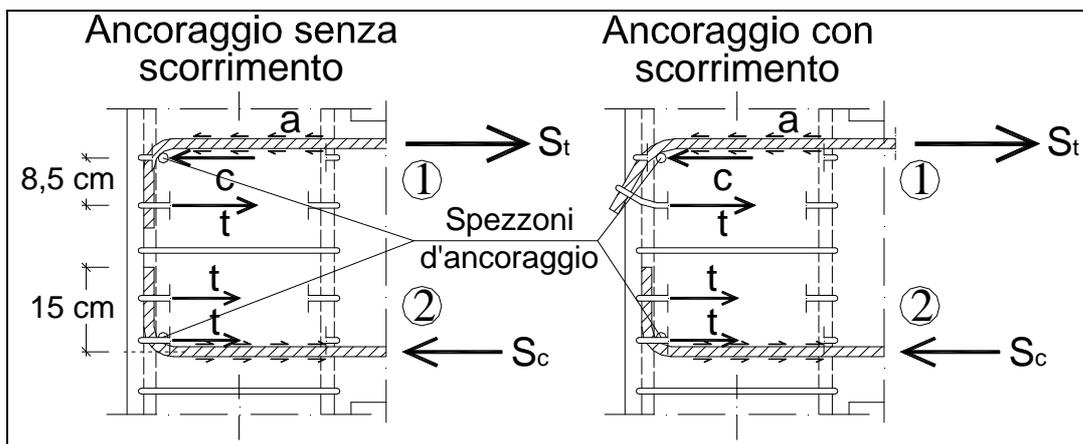
imprese della barra inferiore oscillano tra valori massimi di $3.500 \mu\epsilon$ e minimi prossimi a zero.

Si nota anche graficamente come, nel corso della *serie HH*, l'intrecciarsi delle spezzate relative alle deformazioni impresse di conglomerato ed armature d'intradosso denoti l'assenza di scorrimenti relativi; basta infatti far riferimento ai corrispondenti tratti definiti all'estradosso della trave (fig. 9.48), dove gli scorrimenti dell'ancoraggio delle barre sono un fatto appurato, per notare il progressivo allontanamento delle due spezzate, con dilatazioni superficiali impresse in netto aumento e deformazioni delle armature persino uniformi a tratti.

9.4.5 Interazione ancoraggi barre integrative-nodo

Gli ancoraggi delle barre integrative di collegamento della trave al nodo vengono realizzati piegando a 90° il tratto finale, di 15 cm di lunghezza, di ogni barra; l'estremità della barra viene quindi inserita nel nodo di collegamento accostando il tratto piegato, disposto verticalmente, alla superficie interna delle staffe (si veda il particolare di fig. 9.27). Un ulteriore elemento di ancoraggio è fornito disponendo uno spezzone trasversale $\varnothing 16$ all'interno delle piegature delle barre, al fine di esercitare un'azione di contrasto e di diffusione delle compressioni sul conglomerato di nodo.

L'ancoraggio così realizzato opera mediante il meccanismo resistente schematizzato in figura 9.50; si può notare come, in caso di sollecitazione a trazione della barra (schema 1), l'azione resistente sia fornita dall'aderenza al calcestruzzo, esercitata sul tratto orizzontale di barra che attraversa il nodo (l'aderenza sul tratto verticale di 15 cm risulta ridotta per l'inaffidabilità del copriferro esterno), e dalla leva fornita dalla staffa di nodo che funge da contenimento per il tratto verticale di barra. La staffa, posta a circa 8,5 cm dallo spezzone trasversale che funge da fulcro, esercita una coppia equilibrante che impedisce lo scorrimento longitudinale della barra.



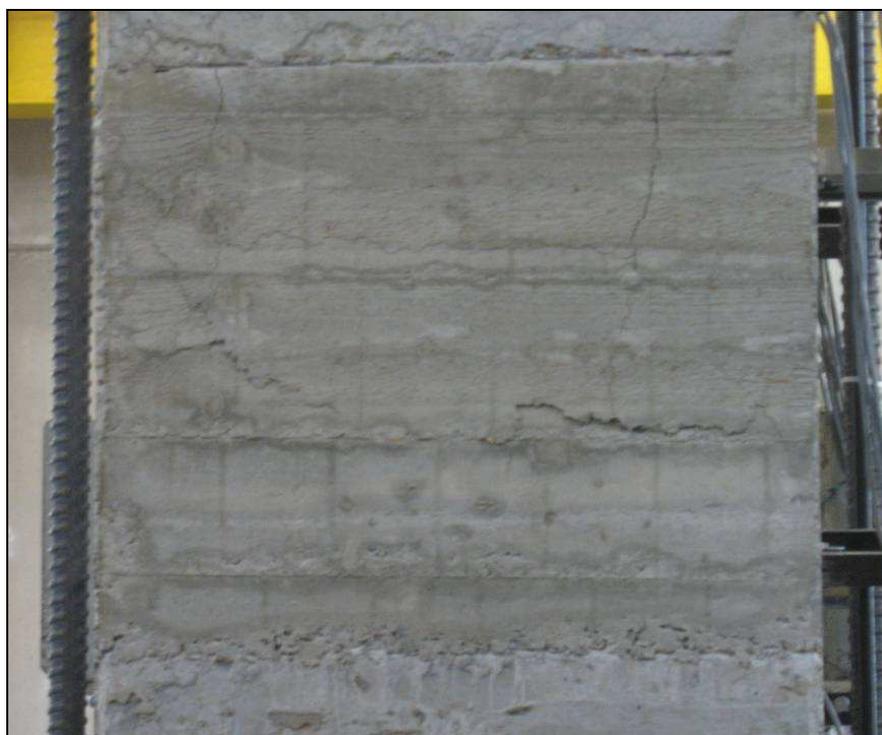
- **Figura 9.50** - Schematizzazione delle azioni attivate dal meccanismo di ancoraggio delle barre integrative all'interno del nodo.

L'analisi delle rilevazioni effettuate dagli strumenti applicati alle barre integrative ed ai conci estremi della trave hanno evidenziato in maniera inequivocabile i molteplici scorrimenti relativi all'ancoraggio delle barre superiori. L'ulteriore conferma proviene dalle fessurazioni osservate ad occhio nudo sul pannello posteriore del nodo, rappresentate con il numero **10** nello schema di fig. 9.11.

Dapprima sono comparse, al termine del *1° ciclo* di carico della *serie HH*, due fessure verticali estreme generatesi a partite dalla piastra superiore di nodo e propagatesi verso il basso per circa 20 cm di lunghezza, collegate da un'ulteriore fessura orizzontale; quindi, nel corso dei restanti cicli della *serie HH*, si è assistito all'ulteriore propagarsi delle fessure verticali con conseguente sollevamento della porzione di copriferro circoscritta da tali fessure. Le immagini riportate nelle figure 9.51 e 9.52 rappresentano lo stato fessurativo del pannello posteriore di nodo in corrispondenza dell'applicazione, rispettivamente, del carico massimo e minimo relativi al *3° ciclo* della *serie HH*. Risulta interessante notare come, in corrispondenza del carico positivo, lo scorrimento verso la trave delle barre superiori tese provochi la deformazione del tratto verticale piegato, il quale a sua volta induce un leggero sollevamento del copriferro (fig. 9.51); la successiva applicazione del picco negativo del carico provoca invece una compressione sulle barre che produce nel tratto di nodo, a causa dell'ormai degradato legame di aderenza all'interfaccia col conglomerato, uno scorrimento opposto al precedente, determinando un incremento nella fessurazione che evidenzia la tendenza ad espellere il copriferro posteriore (fig. 9.52).



- **Figura 9.51** - Particolare della fessurazione nel pannello posteriore di nodo relativo all'applicazione del massimo carico positivo, 3° ciclo - serie HH.



- **Figura 9.52** - Particolare della fessurazione nel pannello posteriore di nodo relativo all'applicazione del massimo carico negativo, 3° ciclo - serie HH.

Risulta quindi già possibile intuire che il meccanismo deformativo alla base dello scorrimento riguarda, come schematizzato in figura 9.50, il raddrizzamento del tratto piegato della barra, provocato dallo sfilamento a battuta sullo spezzone trasversale di contrasto ed assecondato dalla deformazione locale, sia assiale che trasversale, della staffa di nodo. Il raddrizzamento del tratto verticale dell'ancoraggio determina, all'atto dello scorrimento opposto indotto dall'inversione del carico, un'azione sul copriferro posteriore esterno del nodo che va ad incrementare la fessurazione osservata al termine di ogni ciclo.



- **Figura 9.53** - Espulsione del copriferro posteriore di nodo durante l'incremento di carico relativo all'esecuzione della serie II: immagine scattata in corrispondenza di un carico di 100 KN.

L'ulteriore incremento di carico relativo alla *serie II*, condotta in controllo di spostamento fino ad un abbassamento di 178 mm dell'estremità libera della trave, induce un degrado notevole dell'ancoraggio delle barre superiori, evidenziato anche dal netto ampliamento delle fessure d'estradosso. Il meccanismo che si osserva è lo

stesso evidenziato dai cicli della *serie HH*, con lo scorrimento dell'ancoraggio della barra, sottoposta alla trazione indotta dall'incremento positivo di carico, che provoca un ulteriore raddrizzamento del tratto piegato d'estremità (fig. 9.53); il raggiungimento dello spostamento limite d'estremità trave comporta delle deformazioni plastiche tali che la successiva riduzione del livello di carico equivale ad un'azione di sollevamento della trave, con conseguenti scorrimenti opposti degli ancoraggi delle barre superiori che generano la completa espulsione del copriferro (fig. 9.54).



- **Figura 9.54** - Espulsione del copriferro posteriore di nodo durante l'annullamento di carico relativo all'esecuzione della serie II: immagine scattata in corrispondenza di un carico di 10.

Annulato il carico al pistone l'entità delle deformazioni plastiche è tale da decretare il collasso della struttura e quindi il termine della prova. La rimozione delle porzioni di copriferro, parzialmente staccatesi dal pannello posteriore di nodo, consente di osservare le deformazioni finali subite dalle barre d'ancoraggio e dalle staffe di nodo mediante le immagini riportate nelle figure 9.55 e 9.56.



- **Figura 9.55** - Deformazione a fine prova degli ancoraggi di nodo delle barre integrative: vista frontale.

L'azione ciclica dei carichi ed il loro incremento seriale d'intensità, unitamente all'estesa plasticizzazione delle barre integrative, induce un'elevata micro fessurazione del calcestruzzo all'interfaccia di aderenza con le barre d'acciaio; il conseguente degrado dell'aderenza longitudinale alle estremità delle barre integrative superiori, che si registra al termine delle prime sette serie di carico (AA-GG), fa sì che l'intero ancoraggio venga affidato ai tratti piegati d'estremità.



- Figura 9.56 - Deformazione a fine prova degli ancoraggi di nodo delle barre integrative: vista laterale.

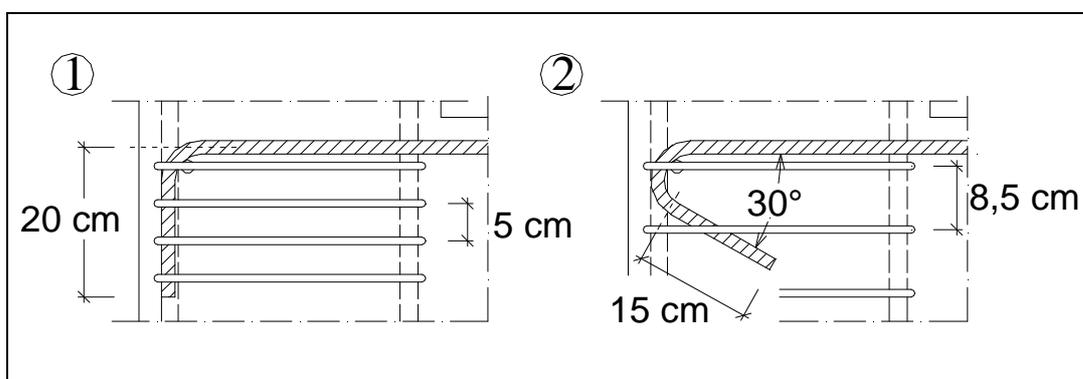
Giunti a tale condizione estrema di degrado, la schematizzazione della deformazione a scorrimento riportata in figura 9.50 ed i particolari evidenziati dalle figure 9.55 e 9.56 fanno comprendere come le staffe di nodo coinvolte nel contenimento dei tratti di barra piegati ed i relativi bracci d'azione risultino insufficienti a contrastare lo sfilamento delle barre.

Per ovviare a tale carenza strutturale occorrerebbe modificare l'ancoraggio in modo tale da impedire il raddrizzamento del tratto piegato di barra, evitandone quindi lo sfilamento. In figura 9.57 sono schematizzate due possibili soluzioni alternative:

- lo *schema 1* prevede un allungamento del tratto piegato ed il raffittimento delle staffe di nodo, andando quindi ad incrementare il

numero di staffe di contenimento ed aumentandone al tempo stesso il braccio di leva;

- lo *schema 2* prevede l'incremento sia della lunghezza che dell'angolo di piegatura del tratto estremo della barra, andando quindi a realizzare l'ancoraggio all'interno del conglomerato di nodo, sottoposto all'efficace confinamento fornito dalle staffe. In tal caso la sollecitazione degli'ancoraggi non viene più trasmessa direttamente alle staffe, ma risulta diffusa sull'intero traliccio resistente di nodo, senza quindi richiedere il raffittimento locale delle staffe di nodo.



- - Figura 9.57 - Schemi alternativi di ancoraggio delle barre integrative.

Entrambe le alternative proposte richiedono semplici modifiche, ma complicano ulteriormente le operazioni di assemblaggio del nodo in opera; occorre infatti ricordare che le dimensioni e la forma delle cavità ricavate nel getto di prefabbricazione del pilastro e della trave limitano notevolmente le operazioni di posa e di fissaggio delle barre e delle staffe di completamento.

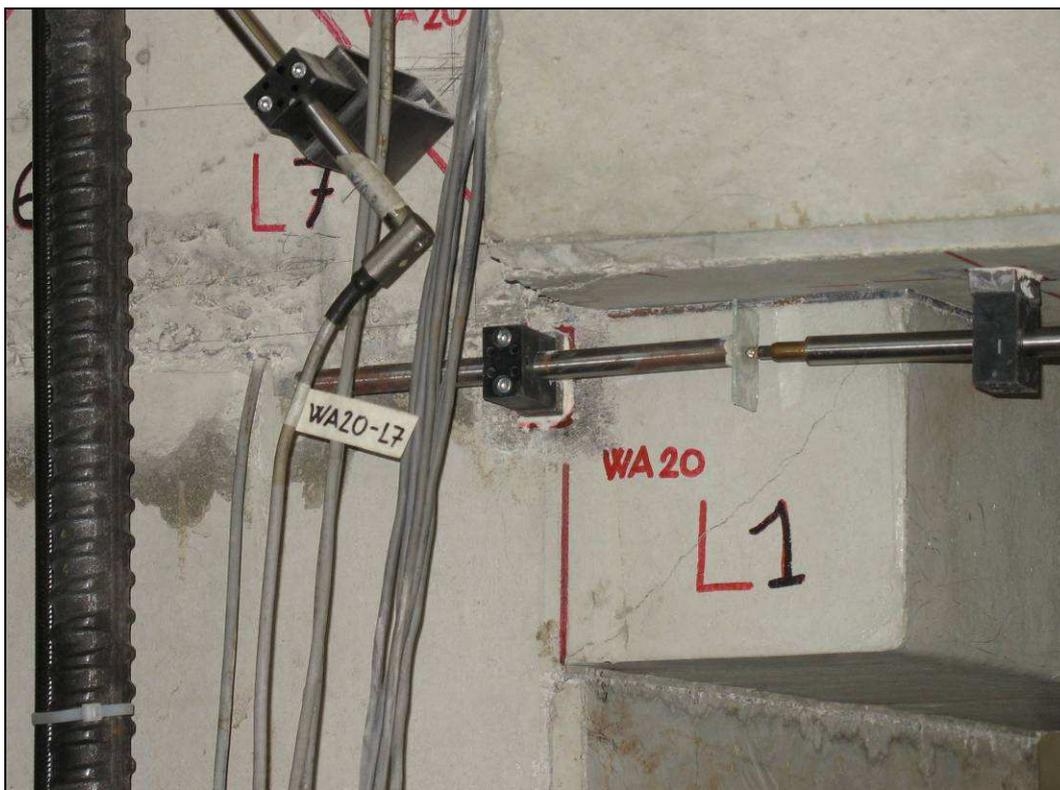
Occorre infine sottolineare che le osservazioni macroscopiche effettuate e le immagini raccolte non evidenziano alcun meccanismo di scorrimento degli ancoraggi delle barre inferiori, confermando le considerazioni svolte al paragrafo precedente in fase di analisi delle rilevazioni strumentali a disposizione.

9.4.6 Interazione trave-mensola

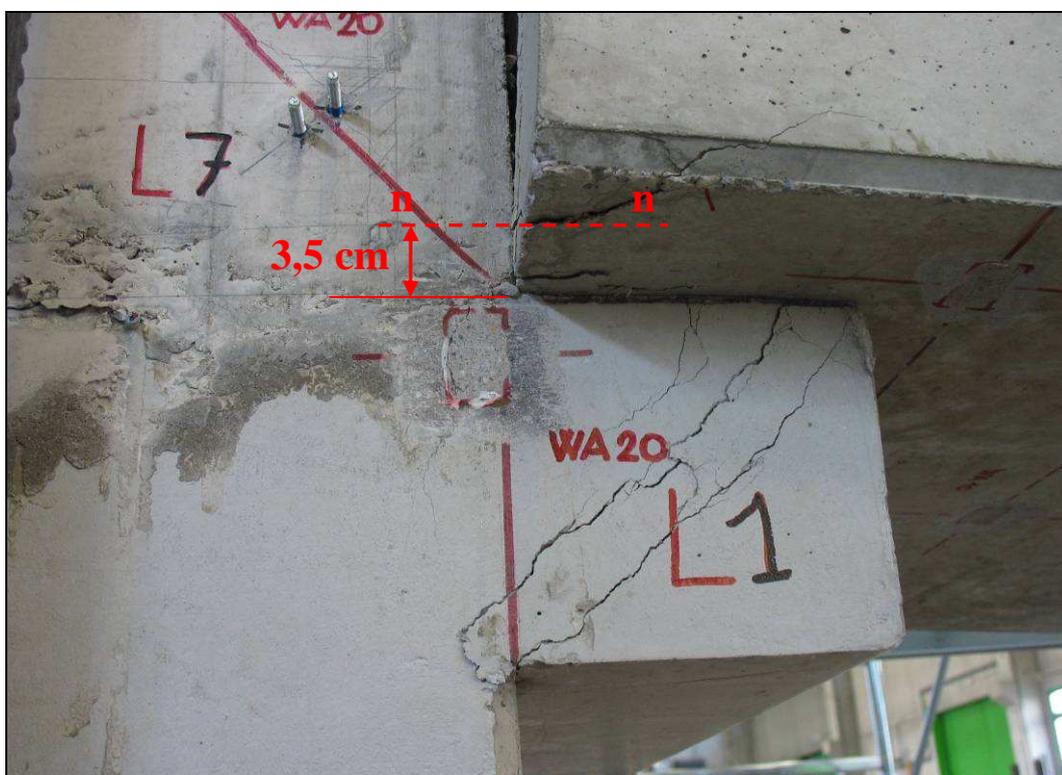
La mensola ricavata nel getto prefabbricato del pilastro, alla base dell'interruzione di getto destinata ad ospitare il collegamento di nodo, risulta necessaria in fase di assemblaggio in opera della struttura fungendo da appoggio per la trave prefabbricata. I carichi considerati nel suo dimensionamento risultano essere pertanto i pesi propri degli orizzontamenti che poggiano sulle ali laterali della trave prefabbricata, il peso della trave prefabbricata stessa ed il peso delle armature e del getto di completamento. Avvenuta la maturazione del getto integrativo il nodo di collegamento è in grado di garantire la continuità strutturale necessaria a supportare le azioni di progetto; tuttavia in presenza di sollecitazioni orizzontali di natura sismica l'applicazione di momenti flettenti che tendono le fibre d'estradosso della trave e di azioni taglianti dirette verso il basso vanno comunque a sollecitare, in prossimità del pilastro, la mensola. Per tale motivo la prova ciclica in esame si ripropone di valutare anche l'influenza della mensola nel meccanismo resistente del collegamento d'estremità.

La mensola, avente sezione trasversale quadrata di lato pari a 15 cm, risulta essere un elemento tozzo e come tale deformabile soprattutto a taglio; le armature trasversali in grado di svolgere la funzione di tiranti, nel meccanismo resistente a traliccio, sono costituite da 8 *staffe* verticali Ø10 a doppio braccio (vedi dettagli costruttivi di fig. 2.8, par. 2.2). Il comportamento a traliccio è stato evidenziato dalle osservazioni macroscopiche effettuate nel corso della prova, rilevando, in prossimità del massimo carico positivo applicato al 1° ciclo della serie *HH*, la comparsa della prima fessura diagonale sulla faccia laterale della mensola, parallela alla direzione di massima compressione (biella compressa del traliccio resistente), indicata con il numero 9 nello schema di fig. 9.11 e rappresentata in figura 9.58.

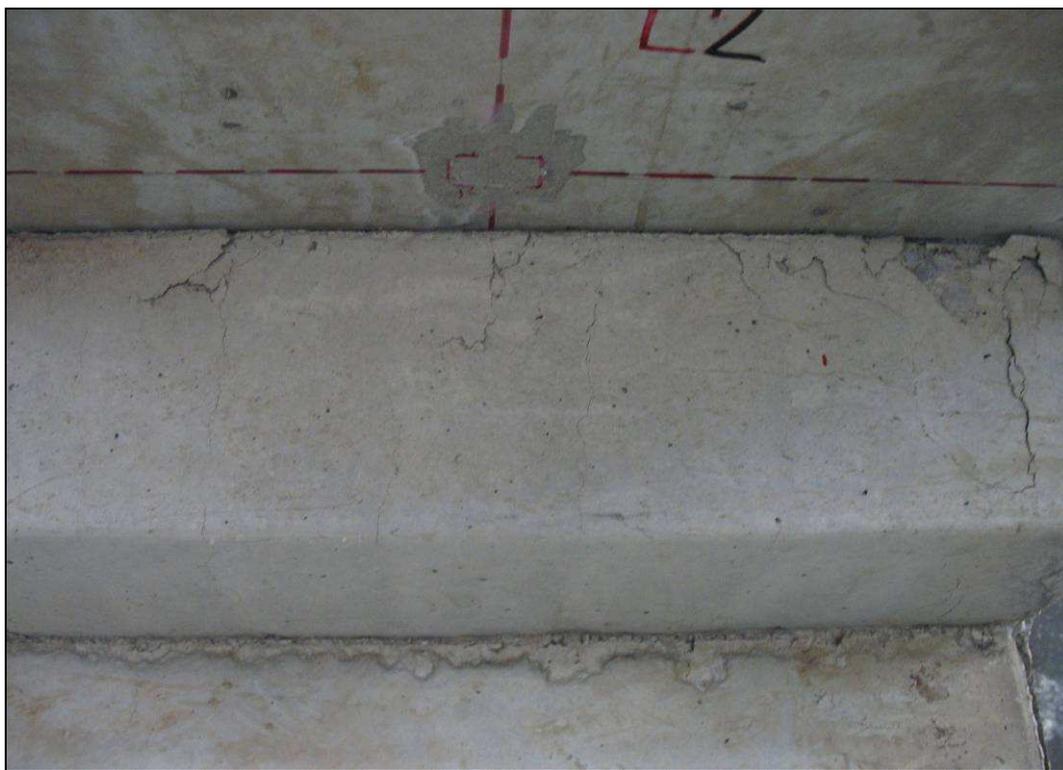
L'applicazione dei carichi positivi, nel corso della serie di carico *HH*, produce, come già affermato in precedenza, diffuse plasticizzazioni e molteplici scorrimenti delle armature integrative superiori, provocando quindi un notevole incremento della rotazione della trave, denotato in maniera evidente dal grafico rappresentativo del legame momento-curvatura relativo al primo concio di trave (rappresentato in figura 9.7).



- **Figura 9.58** - Particolare della prima fessurazione della mensola indotta dall'applicazione del massimo carico positivo relativo al 1° ciclo della serie HH.



- **Figura 9.59** - Quadro fessurativo finale della mensola al termine della prova: vista laterale.



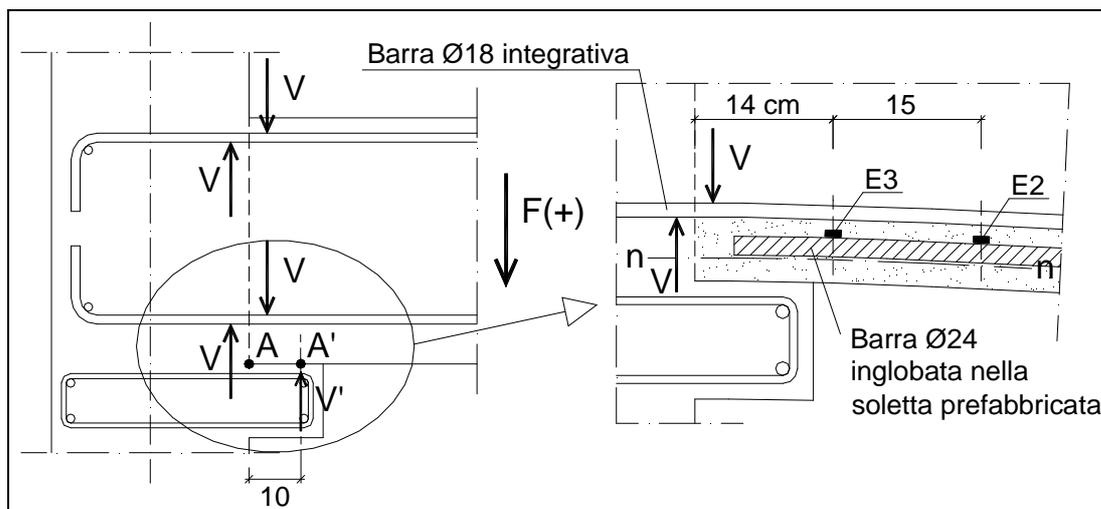
- Figura 9.60 - Quadro fessurativo finale della mensola al termine della prova: vista frontale.

Le deformazioni in gioco inducono sollecitazioni sempre maggiori nella mensola prefabbricata, determinando un evidente incremento delle fessurazioni nel corso dell'azione ciclica del carico; nelle figure 9.32, 9.59 e 9.60 è possibile notare l'elevata fessurazione presente durante le ultime fasi di carico ed al termine della prova, sia sulla faccia laterale che sullo spessore frontale della mensola, a testimonianza delle elevate tensioni raggiunte nei piani verticali, rispettivamente, paralleli e trasversali all'asse della trave.

Al fine di analizzare in maniera approfondita l'andamento delle sollecitazioni all'interno della mensola si è applicato un estensimetro sul braccio superiore della staffa centrale, denominato con la sigla E4 (vedi schema applicativo di fig. 5.21, par. 5.2); tuttavia, a causa del mal funzionamento del canale della morsettiera a cui lo strumento è stato collegato, le relative letture registrate nel corso della prova si sono rilevate inaffidabili.

Resta comunque la possibilità di indagare sull'influenza esercitata dalla reazione della mensola nel meccanismo resistente analizzando le letture degli strumenti posti sulla trave, in prossimità dell'appoggio alla mensola; si farà riferimento in particolar modo all'estensimetro E3 applicato alla barra centrale

longitudinale inclusa nella soletta prefabbricata della trave, ad una distanza di 14 cm dal filo esterno del pilastro (vedi schema applicativa di fig. 5.21, par 5.2).



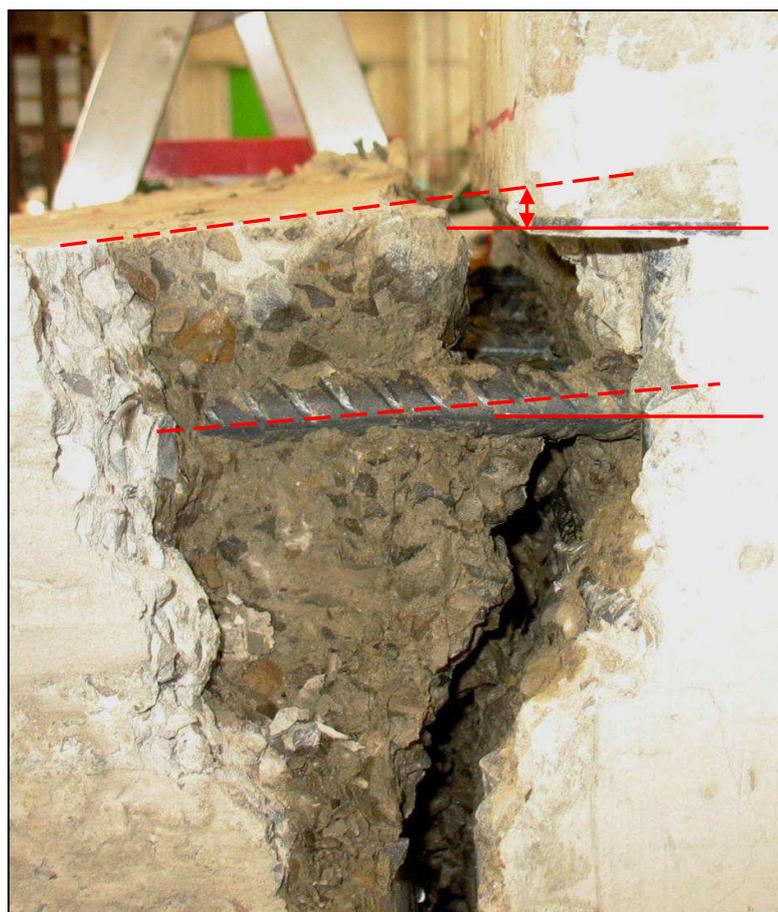
- **Figura 9.61** - Schematizzazione del contributo fornito dalla mensola all'atto della totale fessurazione della sezione di collegamento della trave.

La totale fessurazione verticale che si verifica nella sezione di collegamento della trave al pilastro, al termine del 1° ciclo della serie *HH*, affida di fatto la resistenza a flessione alle sole armature integrative, mentre la resistenza a taglio, oltre che dalle armature, è in parte fornita anche dall'ingranamento del calcestruzzo; la successiva distribuzione delle azioni verticali che si viene a creare, applicando carichi di segno positivo, è quella schematizzata in figura 9.61.

L'apertura delle fessure presenti all'estradosso genera un incremento di rotazione rigida della trave rispetto al pilastro, con fulcro nel punto *A*, mentre la deformazione delle barre a taglio genera una traslazione della trave verso il basso. La successiva ripetizione ciclica dei carichi genera un ampliamento di tali componenti di spostamento, inducendo quindi una sollecitazione verticale crescente nella mensola. La risultante che ne deriva viene applicata alla trave con un braccio esiguo, generando quindi delle sollecitazioni flessionali nel complesso trascurabili; tuttavia l'appoggio fornito in *A'* tende a ridurre la componente di abbassamento della trave e produce di fatto la traslazione del centro di rotazione della trave da *A* verso *A'*. Il primo tratto di soletta prefabbricata risulta pertanto indotto a sollevarsi rispetto al punto *A*, ma la presenza dell'effetto "bietta", fornito dalle armature integrative inferiori innestate nel nodo di collegamento, e dell'effetto "ingranamento", fornito soprattutto in corrispondenza di bassi valori di carico (e

quindi di ridotta ampiezza della fessurazione) dalle superfici scabre di calcestruzzo della fessura, contrasta tale rotazione; viene quindi impressa un'accentuazione della curvatura locale della soletta che ne incrementa la trazione nelle fibre d'intradosso, poste al di sopra dell'asse neutro.

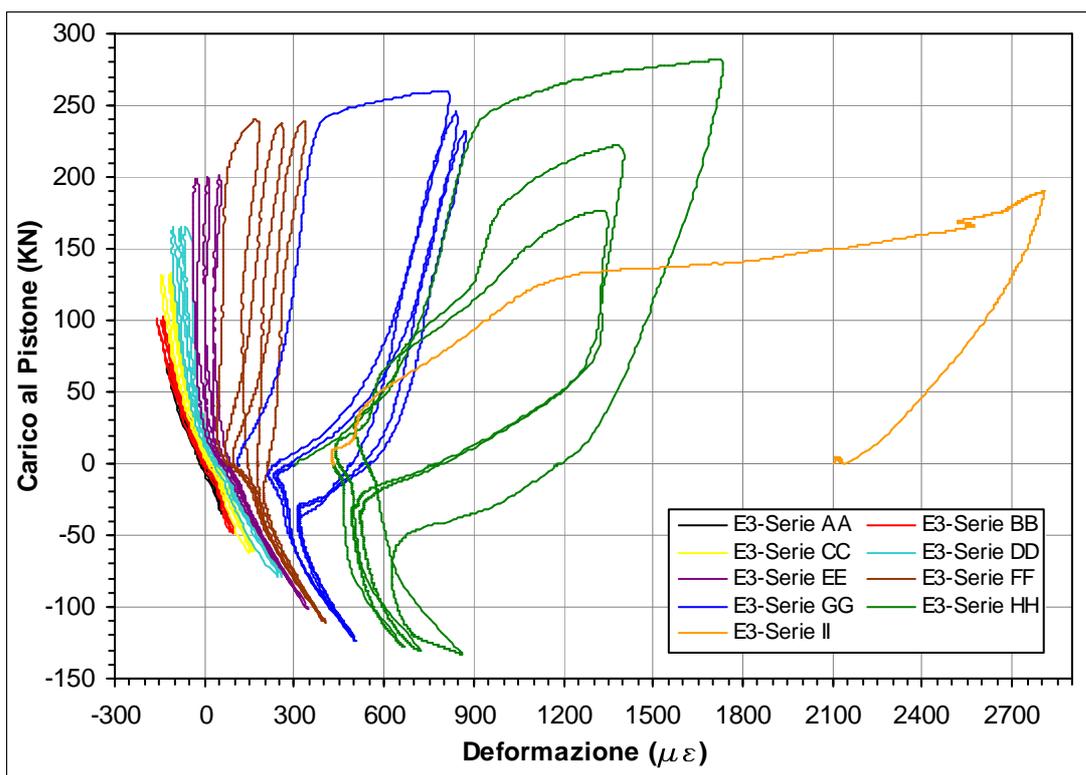
Il particolare della fessurazione d'estradosso rappresentato in figura 9.62, fotografato al termine della prova, previa rimozione del calcestruzzo sgretolato, evidenzia come il bordo della fessura della trave sia leggermente rialzato rispetto al bordo di distacco dal pilastro, a testimonianza del lieve sollevamento imposto dalla presenza della mensola all'estremità della trave; si osserva inoltre la repentina deformazione subita dalla barra integrativa superiore a causa della concentrazione di sollecitazioni flessionali e taglianti. In assenza della mensola la mancanza di un contrasto verticale all'azione di taglio avrebbe probabilmente prodotto, una volta avvenuta la plasticizzazione della sezione di collegamento della trave, uno scorrimento verso il basso della trave stessa.



- **Figura 9.62** - Particolare della fessurazione d'estradosso relativo al termine della prova in cui si è posto in evidenza il sollevamento del bordo della trave e la deformazione delle barre integrative.

I meccanismi deformativi descritti potrebbero quindi essere alla base del notevole abbassamento subito dell'asse neutro in corrispondenza delle sezioni trasversali dei primi tratti di trave; come si può notare in figura 9.59 l'asse neutro, giungendo a circa 3,5 dall'intradosso della trave, passa addirittura al di sotto delle barre longitudinali di prefabbricazione, aventi asse posto a circa 4,5 cm dall'estradosso della soletta, generando deformazioni di trazione anche in corrispondenza di azioni positive di carico. Il primo tratto delle barre longitudinali di prefabbricazione risulta inoltre costretto a seguire la deformazione locale impressa alla soletta, con conseguenti aumenti di curvatura che, dato l'elevato diametro pari a 24 mm, generano ulteriori incrementi di deformazione superficiale della barra estesi anche al punto di applicazione di E3 (vedi schema di fig. 9.61).

La legittimità dei meccanismi deformativi fin qui ipotizzati risulta convalidata dall'analisi delle rilevazioni effettuate dall'estensimetro E3, rappresentate nel grafico di figura 9.63.

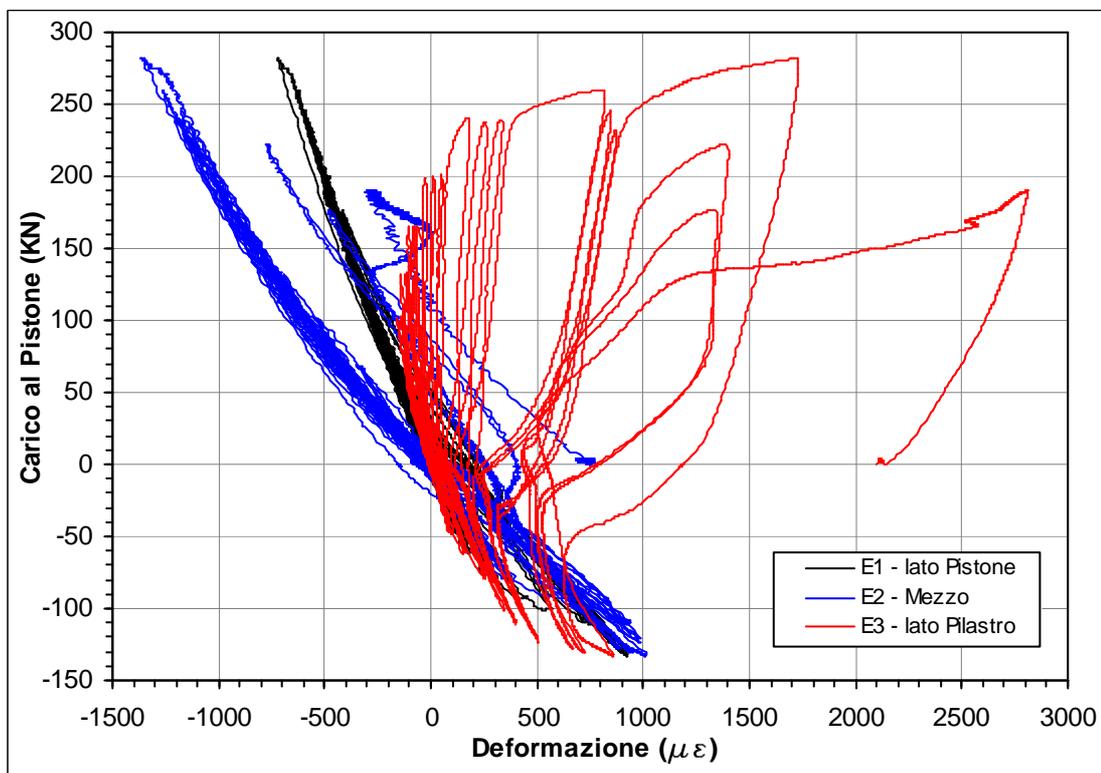


- **Figura 9.63** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale, inclusa nella soletta prefabbricata della trave, rilevate dall'estensimetro E3 in funzione del carico di prova.

Si osserva anzitutto la presenza di dilatazioni anche per carichi applicati di segno positivo, in analogia con quanto rilevato in corrispondenza della stessa

sezione trasversale per le barre integrative inferiori (vedi grafico relativo ad E11 di fig. 9.44). Tuttavia, tenuto conto della vicinanza dell'asse della barra all'asse neutro della sezione (vedi schema di fig. 9.61), la preponderanza delle dilatazioni rilevate in corrispondenza dei carichi positivi rispetto a quelle prodotte dai carichi negativi non può essere giustificata soltanto dall'abbassamento dell'asse neutro; appare quindi sensato imputare l'ulteriore amplificazione delle dilatazioni all'influenza della curvatura impressa alle barre descritte in precedenza.

Ulteriore conferma della localizzazione degli effetti indotti dalla fessurazione della sezione di collegamento della trave e dell'influenza della mensola può essere dedotta dall'analisi del grafico di figura 9.64, nel quale si confrontano le rilevazioni effettuate in E3, posto a 14 cm di distanza dal pilastro, con quelle effettuate in E2 ed E1, posti rispettivamente a 29 cm e 44 cm dal pilastro.



. - **Figura 9.64** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale, inclusa nella soletta prefabbricata della trave, rilevate dagli estensimetri E1, E2 ed E3 in funzione del carico di prova.

Si nota infatti come, già a distanza di poche decine di centimetri dal pilastro, la variazione delle deformazioni torni ad assumere un andamento abbastanza lineare, evidenziando alternanza di dilatazioni e contrazioni in corrispondenza di carichi di segno opposto; solo in corrispondenza della sezione di applicazione

dell'estensimetro E2, posto a 29 cm dal pilastro, si osserva la tendenza ad avere dilatazioni superficiali della barra anche per carichi di segno positivo all'atto dell'applicazione degli ultimi due cicli della *serie HH* e del ciclo della *serie II*.

9.5 Analisi globale del comportamento strutturale

Sulla base delle dettagliate analisi svolte al paragrafo precedente, in relazione ai meccanismi resistenti sviluppati delle varie componenti strutturali, risulta ora possibile analizzare il comportamento strutturale globale del sistema di collegamento d'estremità. Occorre anzitutto constatare che l'elevata qualità del calcestruzzo di prefabbricazione, unitamente alle notevoli quantità di armature disposte nel pilastro e nella porzione prefabbricata di trave, hanno fatto sì che le lesioni evidenziate fossero localizzate, sin dai primi livelli di carico, in una porzione ristretta di struttura. In pratica la plasticizzazione delle barre d'armatura, longitudinali e trasversali, ha riguardato il pannello di nodo, i primi 30 - 40 cm di trave ed i primissimi tratti delle armature longitudinali, della porzione superiore del pilastro, prospicienti la trave; la fessurazione a trazione del calcestruzzo ha invece riguardato esclusivamente il getto integrativo, con lesioni diagonali del pannello di nodo, fessurazioni trasversali localizzate nei primi 8 cm di trave ed espulsione del copriferro dalla faccia posteriore del nodo.

L'entità e la posizione delle lesioni all'interno di questo ristretto ambito strutturale ha inoltre evidenziato l'influenza della netta preponderanza delle armature integrative superiori rispetto a quelle inferiori, aspetto questo che ha condizionato del resto anche la distribuzione dei livelli di carico positivi e negativi di prova. La preponderanza delle trazioni applicate alle barre integrative superiori ha evidenziato, all'atto dell'applicazione dei valori di carico corrispondenti ai momenti resistenti ultimi di progetto della sezione di collegamento della trave (*serie di carico DD*), la comparsa, a livello macroscopico, delle prime fessurazioni diagonali del pannello di nodo; durante i successivi cicli di carico tali fessure si sono moltiplicate ed ampliate, riguardando l'intero spessore del nodo di collegamento, ed intaccando di conseguenza anche l'aderenza longitudinale delle barre integrative.

Queste lesioni a taglio del pannello di nodo, unitamente al superamento del limite deformativo di snervamento in ampi tratti delle barre integrative superiori, verificatosi sempre in prossimità dei valori ultimi di progetto del carico, hanno

avviato un progressivo degrado dell'ancoraggio d'estremità degli spezzoni integrativi; la successiva applicazione delle serie di carico condotte in controllo di spostamento ha visto dapprima il completo degrado dell'ancoraggio d'estremità, realizzato per aderenza all'interno del nodo di collegamento dalle barre integrative superiori, e quindi anche il raddrizzamento del tratto piegato, complice l'inefficace contenimento realizzato dalle staffe di nodo.

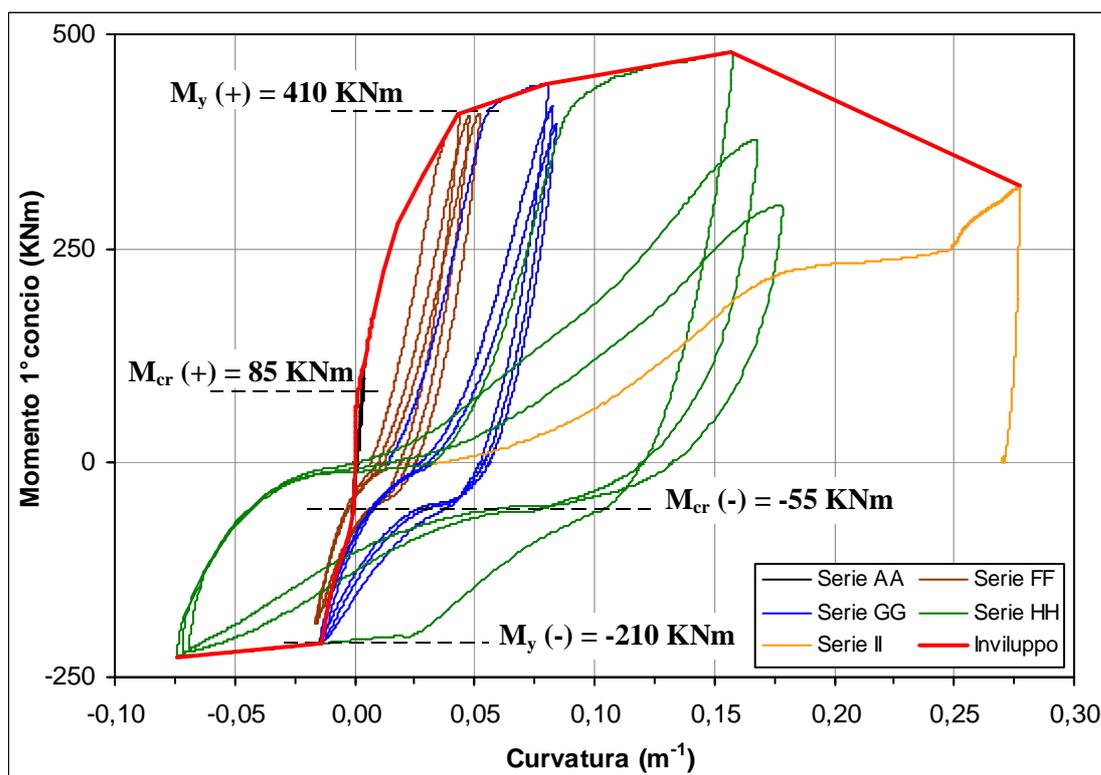
Gli scorrimenti degli ancoraggi che si sono susseguiti nel corso dei successivi cicli di carico (relativi alla *serie HH*) hanno di fatto fortemente limitato il propagarsi della plasticizzazione nelle barre integrative superiore, consentendo l'ampliamento della deformazione plastica della sezione di collegamento della trave, ma limitando notevolmente la dissipazione energetica ciclica della struttura (vedi punto 9.5.3).

Le barre integrative inferiori, meno interessate dalla fessurazione del pannello di nodo, hanno conservato un efficace ancoraggio d'estremità che ne ha consentito una repentina e diffusa escursione plastica, fondamentale ai fini della totale fessurazione trasversale della trave. Tuttavia l'elevata fessurazione verificatasi all'estradosso della trave e lo scorrimento delle barre integrative superiori (relativi agli ultimi quattro cicli di carico), manifestatosi anche in corrispondenza di azioni di compressione, hanno di fatto limitato il propagarsi della plasticizzazione anche nelle barre inferiori, impedendone probabilmente anche il degrado dell'ancoraggio e quindi lo scorrimento.

Ne consegue che la formazione della cerniera plastica, in corrispondenza della sezione di collegamento della trave al pilastro, non è risultata sufficiente ad indirizzare il comportamento strutturale verso un'auspicabile crisi duttile, eventualmente causata da un incremento della plasticizzazione delle armature e culminata nella rottura delle barre integrative. Il sopraggiungere della crisi per scorrimento degli ancoraggi delle barre integrative superiori ha di fatto condotto la struttura a collasso per il raggiungimento di spostamenti limite, convertendo la natura delle ultime escursioni deformative da duttile a fragile.

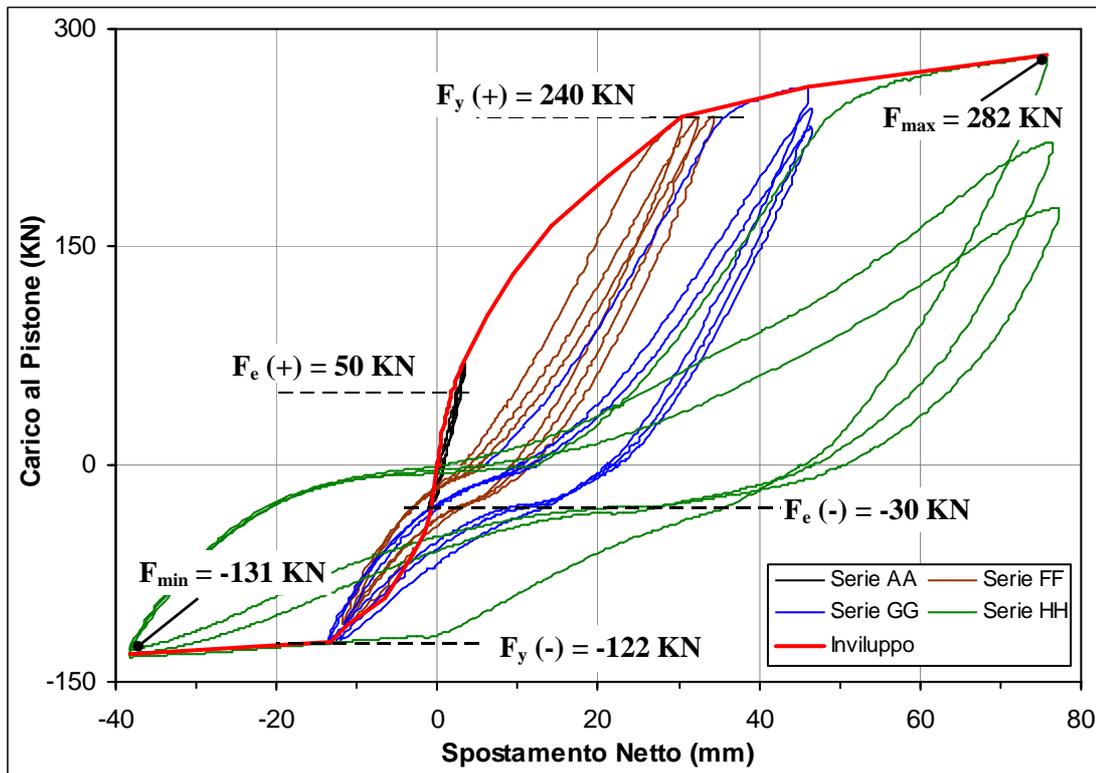
Nei successivi punti di questo paragrafo si fornirà un riscontro quantitativo delle affermazioni appena svolte in riferimento al comportamento globale della struttura sottoposta a prova ciclica, in termini di *resistenza, rigidità e dissipazione energetica*. Poiché, come si vedrà in seguito, le fasi che fungono da discriminante nel comportamento della struttura sono principalmente la formazione delle prime fessure ed il loro successivo ampliamento, e considerato che gran parte delle

fessurazioni ha luogo in corrispondenza del primo concio della trave, risulta utile riproporre, come ulteriore strumento d'analisi, l'involuppo del legame momento-curvatura relativo al 1° concio di trave (ottenuto come descritto al punto 9.2.3). La rappresentazione fornita in figura 9.65 viene inoltre corredata dall'indicazione dei momenti di fessurazione ($M_{cracking}$) e di snervamento ($M_{yielding}$), direttamente connessi rispettivamente alle fasi di formazione delle fessure e del loro successivo ampliamento, riportando inoltre la rappresentazione delle serie cicliche nel corso delle quali tali fenomeni avvengono e si estendono.



- **Figura 9.65** - Involuppo delle curvature medie del 1° concio di trave e relativa indicazione dei momenti di fessurazione e di snervamento.

Quale ulteriore strumento d'analisi, si ripropone anche l'involuppo degli spostamenti dell'estremità libera della trave, computati al netto delle componenti di spostamento rigido (ottenuto come descritto al punto 9.2.2); la rappresentazione fornita in figura 9.66 viene corredata, in analogia con quanto fatto per il legame $M-\chi$, dall'indicazione delle azioni corrispondenti al limite elastico del comportamento strutturale (F_c) ed al limite di snervamento (F_y), riportando inoltre la rappresentazione delle serie cicliche nel corso delle quali tali valori si evidenziano e si propagano.



- **Figura 9.66** - Involuppo degli spostamenti estremi della trave e relativa indicazione dei azioni al limite elastico e di snervamento.

Da un primo confronto tra il diagramma rappresentativo del legame momento-curvatura relativo al primo concio di trave (fig. 9.65) ed il diagramma rappresentativo del legame forza-spostamento relativo all'estremità della trave (fig. 9.66) risulta possibile rimarcare lo stretto rapporto che intercorre tra la deformazione locale del primo concio di trave e la deformazione globale della struttura di nodo. Considerando infatti le coppie flettenti che le azioni di prova (sia di segno negativo che positivo), responsabili dello snervamento strutturale (evidenziate con F_y in fig. 9.66), generano in corrispondenza della sezione media del 1° concio di trave, si possono ritrovare proprio le coppie flettenti responsabili dello snervamento delle barre d'acciaio (evidenziate con M_y in fig. 9.65). Ricordando infatti che l'asse del pistone ha un braccio d'azione pari a $b_{1^\circ} = 1,7$ m rispetto alla sezione media del 1° concio di trave, si ha:

$$F_y(+)\cdot b_{1^\circ} = 240\cdot 1,7 = 408 \text{ KN}\cdot\text{m} \approx M_y(+);$$

$$F_y(-)\cdot b_{1^\circ} = 122\cdot 1,7 = 207 \text{ KN}\cdot\text{m} \approx M_y(-).$$

Ragionamento del tutto analogo vale anche per le coppie flettenti generate, in corrispondenza della sezione media del primo concio di trave, dalle azioni di prova che inducono il superamento del limite elastico strutturale (indicate con F_e); dalle

relazioni seguenti si può notare come si ottengano valori prossimi a quelli delle coppie flettenti localmente responsabili della fessurazione del primo concio di trave (evidenziati in fig. 9.65):

$$F_e(+)\cdot b_{1^o} = 50\cdot 1,7 = 85 \text{ KN}\cdot\text{m} = M_{cr}(+);$$

$$F_e(-)\cdot b_{1^o} = -30\cdot 1,7 = -51 \text{ KN}\cdot\text{m} \approx M_{cr}(-).$$

9.5.1 Variazione delle resistenze

L'analisi del comportamento globale della struttura in termini di resistenza massima sviluppata fa riferimento anzitutto alla curva di involucro dello spostamento netto subito dall'estremità della trave in funzione del carico di prova, rappresentata nella figura 9.66. Si nota come già per valori di carico positivi pari a circa 50 KN e negativi pari a circa 30 KN si abbandona l'andamento lineare, osservando invece un incremento più che proporzionale degli spostamenti d'estremità; giunti quindi ad un carico pari a 240 KN , per quanto riguarda i carichi di segno positivo, e pari a -122 KN , per quanto riguarda i carichi di segno negativo, si ha il netto snervamento strutturale.

Il successivo aumento delle deformazioni vede comunque un incremento, seppur ridotto, dei carichi, raggiungendo il massimo valore positivo di 282 KN , e negativo di -129 KN ; si denota pertanto un comportamento strutturale globale, in fase di deformazione plastica, di tipo duttile.

L'analisi dell'involucro dei valori massimi di carico supportati dalla struttura di nodo nel corso della prova ciclica fornisce un'indicazione delle *azioni massime supportabili in caso di sollecitazione simica della struttura*. Ricordando i valori teorici dei *massimi momenti ultimi sperimentali* relativi alla sezione di collegamento della trave, calcolati a scopo puramente indicativo e riportati al paragrafo 8.2 del capitolo 8, si possono ricavare, tenuto conto del valore del braccio d'azione del pistone pari a $1,8 \text{ m}$, le corrispondenti azioni ultime teoriche:

$$F_{\max,\text{teorico}} = M_{r,\text{estr.}(ult.)}/b_p = (\text{eq. (2), par. 8.2}) = 433\cdot 1,8 = 241 \text{ KN};$$

$$F_{\min,\text{teorico}} = M_{r,\text{intr.}(ult.)}/b_p = (\text{eq. (3), par. 8.2}) = -195\cdot 1,8 = -108 \text{ KN}.$$

Confrontando tali valori con quelli sperimentali, pari a $F_{\max} = 282 \text{ KN}$ e $F_{\min} = -108 \text{ KN}$ (evidenziati in figura 9.66), si nota che i risultati attesi sono comunque stati ampiamente soddisfatti.

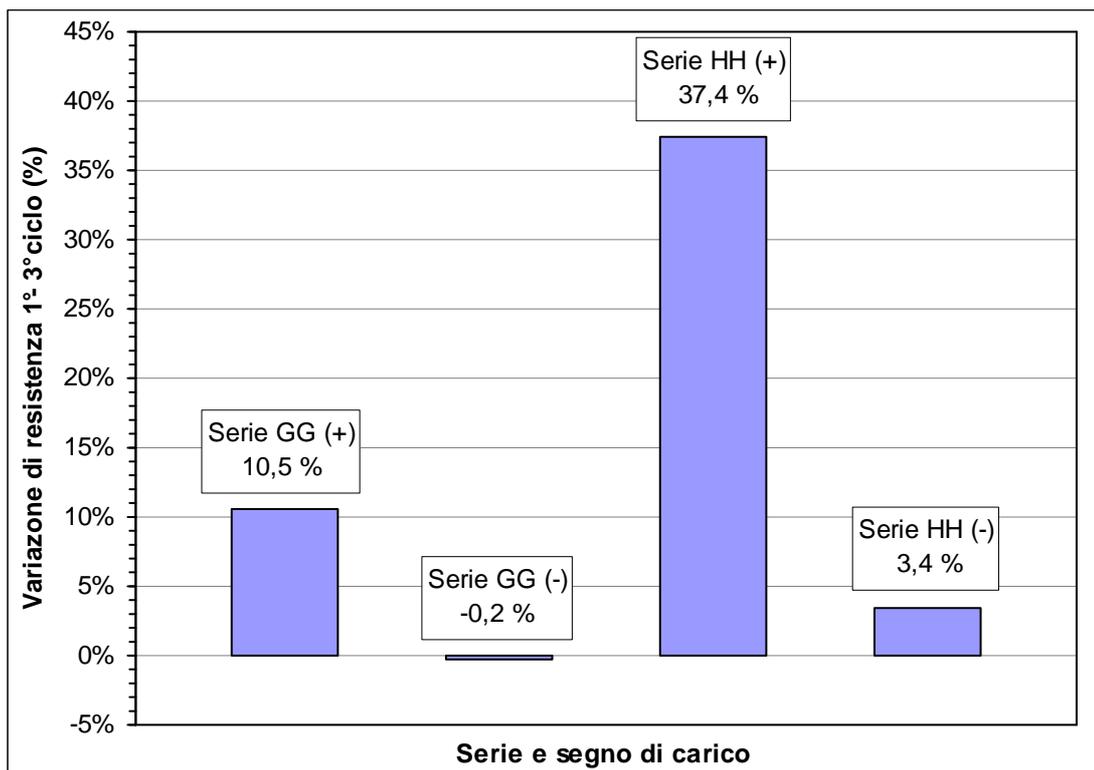
Una più dettagliata analisi delle resistenze, limitata ai soli cicli della medesima serie di carico, consente inoltre di quantificare il degrado delle resistenze

in funzione dell'azione ciclica del carico, fornendo quindi informazioni relative anche alla *resistenza della struttura in funzione della durata dell'azione sismica*.

L'analisi del degrado delle resistenze, relativo all'applicazione ciclica del carico, viene svolta con riferimento alle sole serie di carico condotte in controllo di spostamento (*serie GG ed HH*), poiché sono le uniche che consentono di registrare differenti valori di carico necessari a raggiungere una prefissata deformazione. Si procede determinando la variazione percentuale delle resistenze massime raggiunte in corrispondenza del 1° e del 3° ciclo della serie in esame, secondo la seguente relazione:

$$\Delta_{\text{Res. 1°-3°ciclo}} = \frac{F_{\text{max,1°ciclo}} - F_{\text{max,3°ciclo}}}{F_{\text{max,1°ciclo}}} \cdot 100.$$

Procedendo in tal modo sia per i carichi di segno positivo che per quelli di segno negativo, relativi alle *serie GG ed HH*, si ottengono i valori riportati nell'istogramma di figura 9.67.



- **Figura 9.67** - Variazioni percentuali di resistenza massima verificatesi tra il 1° ed il 3° ciclo di carico relativi alle serie condotte in controllo di spostamento.

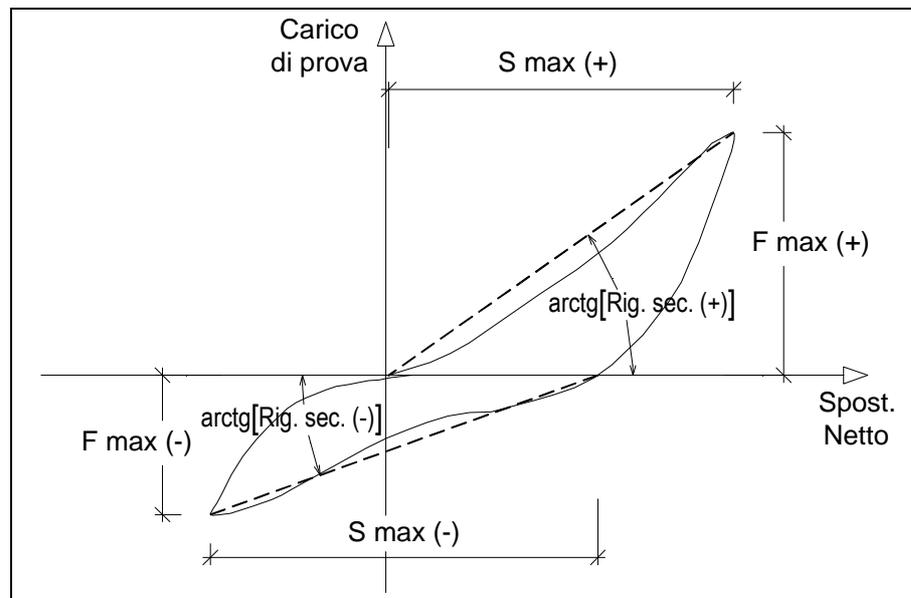
Si nota anzitutto come la preponderanza dei carichi di segno positivo generi delle variazioni molto più accentuate rispetto a quelle evidenziate dai carichi

negativi; si osserva quindi come nel corso della *serie GG* le diffuse plasticizzazioni delle armature integrative inducano una perdita ciclica di resistenza del 10,5 %, mentre l'intervento degli scorrimenti delle barre integrative superiori, nel corso della *serie HH*, risulti ancora più degradante, incrementando quasi di quattro volte la riduzione ciclica delle resistenze (si è rilevata una riduzione del 37,4 %).

9.5.2 Variazione delle rigidzze secanti

L'analisi delle rigidzze secanti relative alle varie serie di carico ed ai relativi cicli di ripetizione consente un'indagine ancora più approfondita degli effetti che i meccanismi resistenti locali inducono sul comportamento globale della struttura, consentendo di analizzare il degrado delle rigidzze relativo alle ripetizioni cicliche dei carichi delle serie condotte sia in controllo di forza che in controllo di spostamento.

In relazione al generico ciclo di applicazione dell'azione di prova vengono definite due rigidzze secanti, una relativa all'azione di segno positivo e l'altra relativa all'azione di segno negativo; entrambe fanno riferimento ai soli rami di carico e vengono definite dal rapporto tra la forza applicata ed il correlativo spostamento massimo indotto. Lo schema di figura 9.68 fornisce una rappresentazione di quanto detto: si può notare come il computo degli spostamenti trascuri le componenti impresse residue relative ai precedenti cicli di carico, ed inoltre come la duplice definizione, sia per carichi di segno positivo che negativo, consenta di cogliere il differente comportamento strutturale derivante dalle dissimmetrie d'armatura.



- **Figura 9.68** - Schema esemplificativo: rappresentazione grafica delle rigidezze secanti relative al 2° ciclo di carico della serie HH.

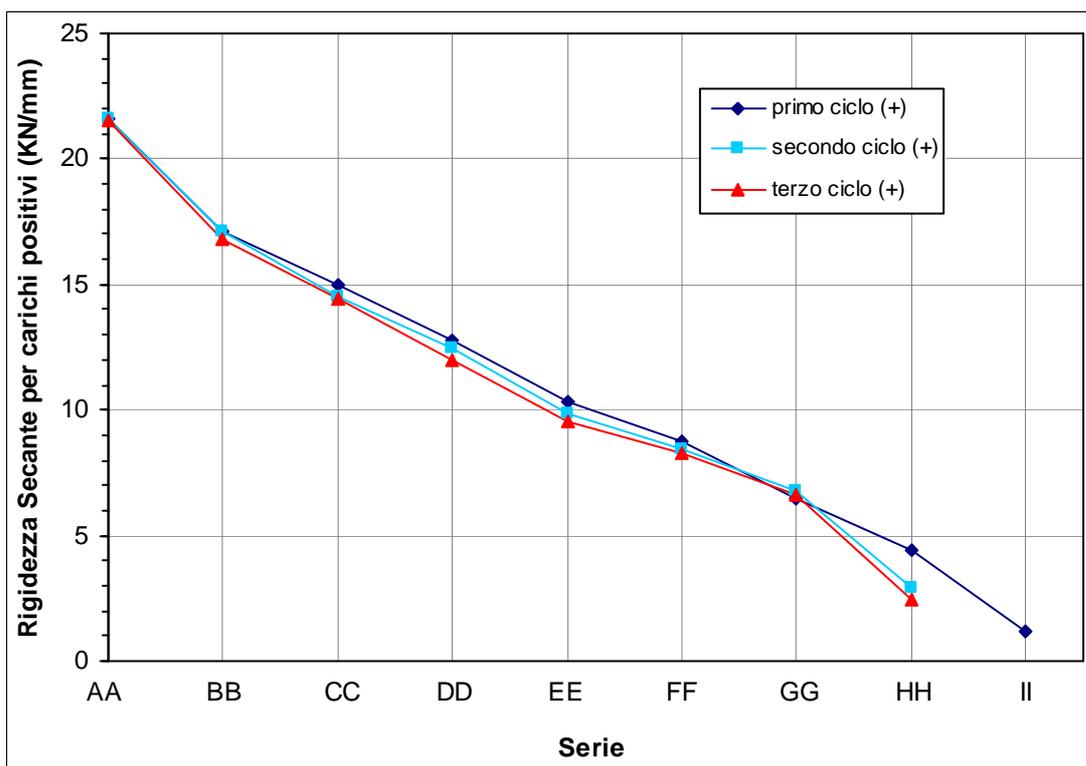
Il grafico di figura 9.69 rappresenta l'andamento delle rigidezze secanti in funzione delle varie serie di carico e dei cicli di ripetizione, con riferimento ai solli carichi di segno positivo. Analizzando anzitutto la variazione seriale delle rigidezze, si può notare come la riduzione sia più marcata nel corso delle prime serie di carico (AA-EE), durante le quali, sia in corrispondenza del pannello di nodo che del primo tratto di trave, si ha la formazione delle fessure (vedi grafici di fig. 9.65 e 9.66). Nel corso delle serie successive (FF-GG) il calo delle rigidezze subisce un assestamento, poiché il propagarsi della fessurazione si arresta, mentre si assiste all'ampliamento delle fessure già presenti (in parte osservabili anche ad occhio nudo sulla superficie del getto). Si osserva inoltre che l'ampia deformazione osservata nel corso delle ultime quattro serie di carico (FF-II) viene compensata, in termini di rigidezza, dal ridotto incremento di carico corrispondente, sottolineando nuovamente come la struttura giunga al collasso con un comportamento tutto sommato duttile.

Analizzando quindi il degrado ciclico delle rigidezze, si nota come in corrispondenza delle prime due serie (AA e BB) la struttura denoti in pratica un comportamento elastico, mentre nel corso delle tre serie successive (CC-EE) il degrado ciclico della rigidezze tenda costantemente a crescere, sempre a causa dell'incremento del numero di fessure, effetto macroscopico della rottura a trazione del calcestruzzo e delle micro fessurazioni del calcestruzzo all'interfaccia di aderenza con le barre d'armatura; al termine della serie EE la rigidezza della

struttura, relativa all'applicazione dei carichi positivi, ha subito una riduzione superiore, in media, al 50 % del valore iniziale.

Nel corso delle serie *FF* e *GG* il degrado ciclico delle rigidzze viene velocemente annullato poiché le estese plasticizzazioni delle barre integrative superiori (vedi grafici in figg. 9.41 e 9.42), causa primaria dell'ampliamento delle fessure d'estradosso, avvengono principalmente all'atto dell'applicazione del primo ciclo di carico di ogni serie.

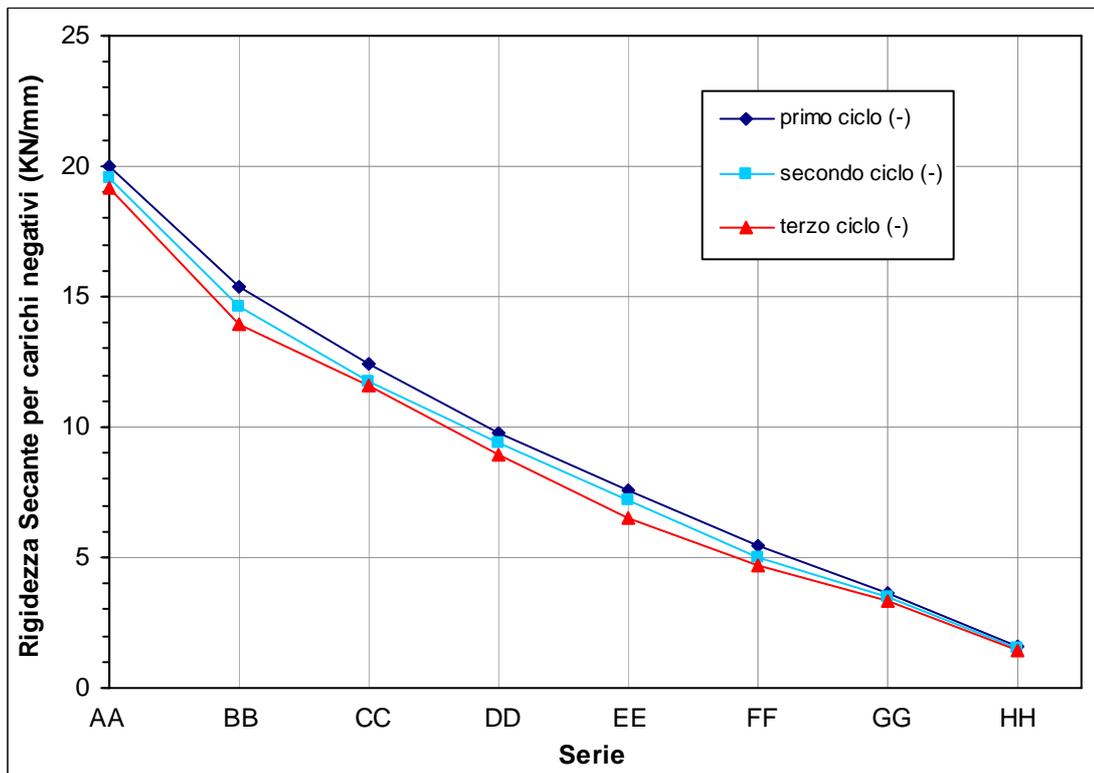
Successivamente la crisi degli ancoraggi delle barre integrative superiori genera degli scorrimenti in corrispondenza di ogni ciclo della *serie HH* (vedi grafico di fig. 9.42), provocando un evidente degrado ciclico delle rigidzze; in particolar modo il 2° e 3° ciclo, che fanno riferimento alla formazione della cerniera plastica in corrispondenza della sezione di collegamento della trave, evidenziano una riduzione di circa il 90 % del valore iniziale della rigidzza, passando dai 21,5 *KN/mm* della *serie AA* ai circa 2,7 *KN/mm* degli'ultimi due cicli della *serie HH*.



- **Figura 9.69** - Andamento delle rigidzze secanti in funzione della serie di carico e del ciclo di ripetizione: carichi di segno positivo.

Il grafico di figura 9.70 rappresenta l'andamento delle rigidzze secanti in funzione delle varie serie di carico e dei cicli di ripetizione, con riferimento ai sol

carichi di segno negativo. Il valore medio iniziale di rigidezza, pari a circa 19,5 KN/mm , risulta paragonabile ai 21,5 KN/mm relativi al caricamento in trazione verso il basso della trave, tuttavia l'applicazione delle azioni negative alla struttura denota una riduzione seriale delle rigidezze più rapida rispetto al caricamento di segno positivo; già in corrispondenza del livello di carico ultimo di progetto, applicato nel corso della *serie DD*, si evidenzia una riduzione del 50 % della rigidezza iniziale.



- **Figura 9.70** - Andamento delle rigidezze secanti in funzione della serie di carico e del ciclo di ripetizione: carichi di segno negativo.

Data la trascurabile fessurazione generatasi, nel corso delle prime serie di carico, all'intradosso della trave, tale riduzione di rigidezza risulta dovuta principalmente al ridotto contributo fornito dal conglomerato compresso d'estradosso; l'ampia fessurazione generata all'estradosso dai preponderanti carichi positivi ha infatti reso tardiva, ed in parte incompleta, la conseguente richiusura delle fessure durante la successiva inversione del carico, il tutto a scapito di notevoli deformazioni.

Il degrado ciclico delle rigidezze risulta notevole sin dalle prime serie, assumendo massima rilevanza in corrispondenza della *serie BB*, quindi nel corso delle serie successive si assiste alla consueta attenuazione del fenomeno, attribuibile

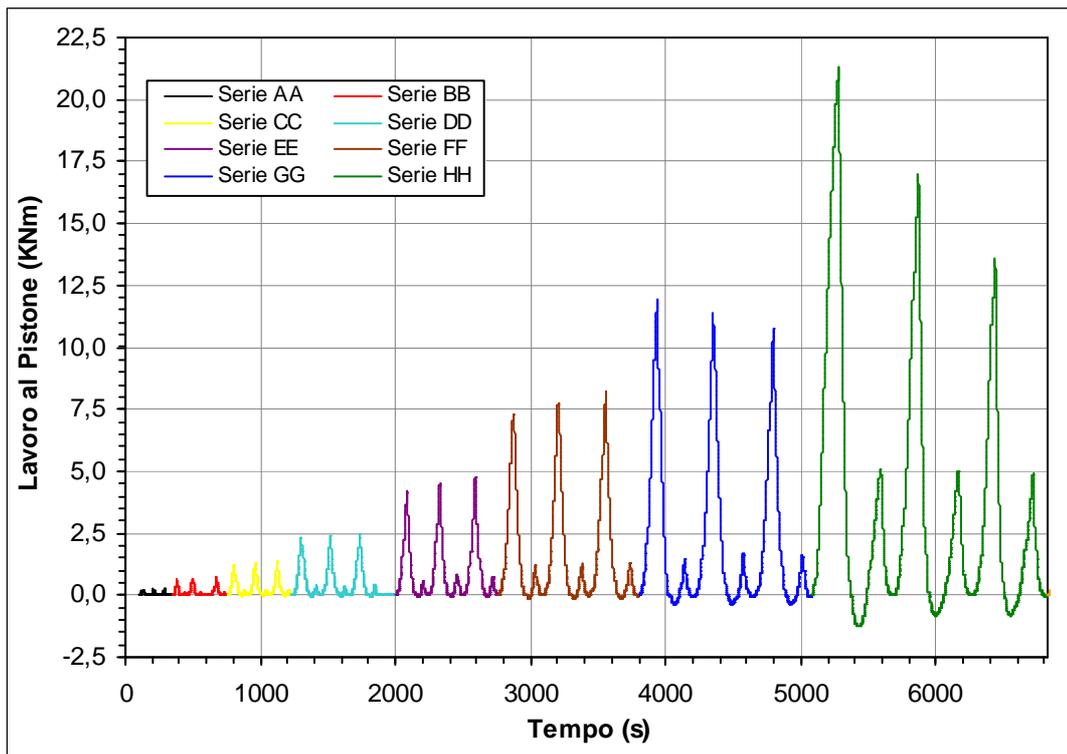
sempre alla transizione tra la formazione di nuove fessure e l'ampliamento di quelle già presenti. Le deformazioni plastiche corrispondenti alle serie di carico *GG* ed *HH*, alla base dell'ampia fessurazione generatasi all'estradosso della trave, si sono verificate principalmente all'applicazione del 1° ciclo di carico, annullando di fatto il degrado ciclico delle rigidezze.

L'influenza sempre maggiore delle rotazioni rigide compiute dalla trave per recuperare, sotto l'azione negativa del pistone, le ampie deformazioni dell'estradosso ha prodotto, al termine della prova, una riduzione superiore al 90 % del valore iniziale della rigidezza, passando dai $19,5 \text{ KN/mm}$ della serie *AA* ai circa $1,4 \text{ KN/mm}$ della serie *HH*.

9.5.3 Variazione delle dissipazioni energetiche

La valutazione delle dissipazioni energetiche della struttura di collegamento nel corso del caricamento ciclico di prova è un importante parametro di valutazione di quella che sarà poi la *capacità dissipativa della struttura reale sottoposta all'azione ciclica di un sisma*. Come già osservato in occasione dell'analisi del degrado delle resistenze, le serie di carico condotte in controllo di spostamento (*serie GG* ed *HH*) risultano essere le più idonee ad una valutazione delle dissipazioni cicliche.

Il grafico di figura 9.71 riporta l'andamento del lavoro svolto dal pistone, computato ad ogni istante di prova come prodotto dell'azione rilevata alla cella di carico per lo spostamento correlativo indotto all'estremità della trave (le convenzioni sui segni rispettano le convenzioni di fig. 9.1); i valori relativi alle *serie GG* ed *HH* sono un riferimento utile per valutare l'incidenza dell'entità delle dissipazioni osservate sul valore massimo di energia introdotta nel sistema.



- **Figura 9.71** - Andamento dell'energia introdotta dal pistone nel sistema sottoforma di lavoro, espressa in funzione del tempo di prova.

L'istogrammi rappresentato in figura 9.72 riporta i valori delle dissipazioni energetiche prodotte per isteresi ciclica dalla struttura di nodo; la loro valutazione è stata effettuata con l'ausilio del diagramma rappresentativo il legame tra carico applicato al pistone e spostamenti netti rilevati all'estremità trave (riportato al punto 9.2.2, fig. 9.5), calcolando l'area racchiusa all'interno di ogni curva relativa ad un ciclo completo di carico.

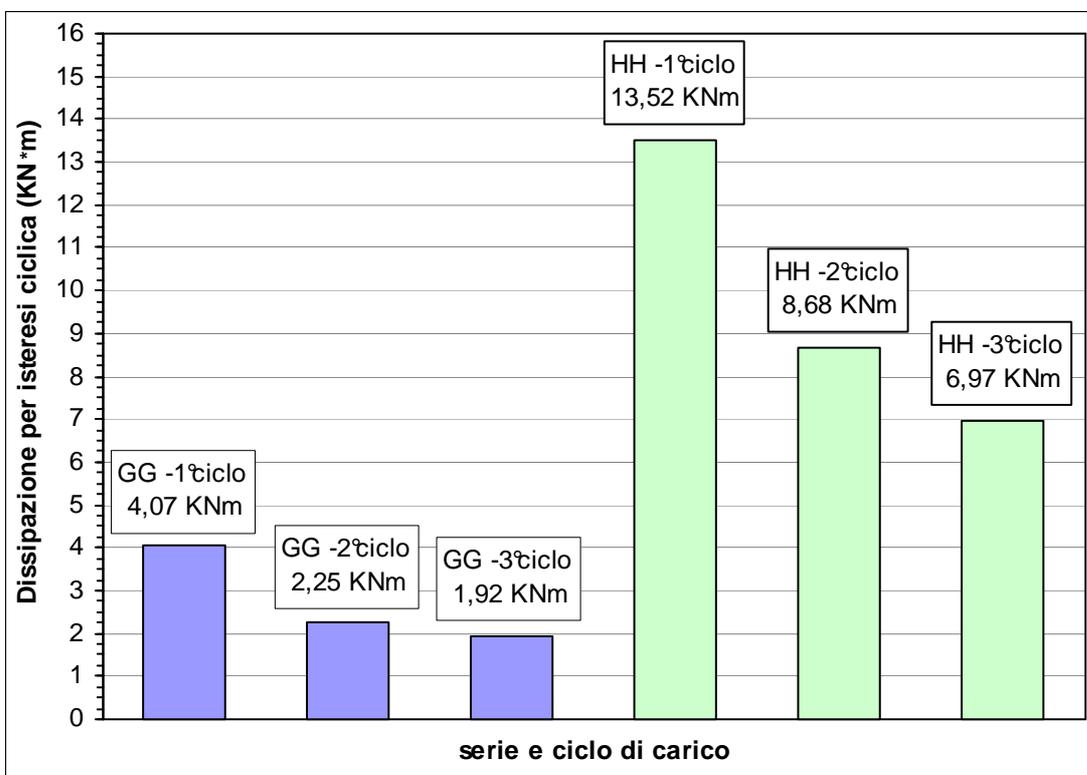
Analizzando in parallelo le singole serie di carico si nota come l'immissione, da parte del pistone di carico, di un lavoro massimo pari a $11,9 \text{ KNm}$, nel corso del 1° ciclo della *serie GG*, e pari a $21,2 \text{ KNm}$, nel corso del 1° ciclo della *serie HH*, induca una dissipazione energetica strutturale pari rispettivamente a $4,07 \text{ KNm}$ e $13,52 \text{ KNm}$. Si evidenzia quindi come il deciso ampliamento deformativo verificatosi nel corso della *serie HH* tenda quasi a raddoppiare il rapporto tra l'energia immessa nel sistema e quella dissipata.

Risulta immediato notare inoltre la preponderanza, in termini assoluti, della dissipazioni relative alla *serie HH*, con un picco di oltre 3 volte superiore a quanto rilevato per la *serie GG*; aspetto riconducibile all'ampia plasticizzazione

manifestata, nel corso del 1° ciclo della serie HH, dalle armature integrative e culminata all'estradosso nello scorrimento degli ancoraggi di nodo.

Si può osservare infine come nel corso di entrambe le serie sia preponderante la dissipazione relativa al 1° ciclo di carico: nel corso della serie GG la capacità dissipativa subisce una riduzione del 45 % passando dal 1° al 2° ciclo di carico, mentre nel corso della serie HH tale riduzione è meno marcata, raggiungendo il 36 %. Nel corso del 1° ciclo della serie GG la plasticizzazione delle armature integrative, più estesa in corrispondenza delle barre superiori, subisce un'apprezzabile diffusione, rimarcata solo in parte dai due successivi cicli di carico; tale fatto rappresenta, probabilmente, una conseguenza diretta del cinematismo acquisito dalla trave a causa dell'ampliamento della circoscritta fessurazione d'estradosso.

Nel corso della serie HH il deciso ampliamento delle plasticizzazioni nelle armature integrative consente la formazione della cerniera plastica all'estremità della trave; le barre integrative si sobbarcano quindi la maggior parte del carico, evidenziando forti dissipazioni plastiche, ma il cedimento degli ancoraggi superiori d'estremità limita fortemente le potenzialità dissipative del cinematismo strutturale.



- Figura 9.72 - Energia dissipata per isteresi nel corso dei cicli di carico relativi alle serie GG ed HH, condotte in controllo di spostamento.

Bibliografia

Bibliografia

- [1] Sito internet:
www.ape.it, sito ufficiale della ditta APE s.p.a..
- [2] Sito internet:
www.dsiamerica.com/products/post-tensioning/bar-post-tensioning-system.
- [3] BISIO G.M. (2002), “*Appunti alle lezioni*”;
Università degli studi di Genova, *Ingegneria Biofisica ed Elettronica, Corso di Misure Elettroniche, Sensori e Trasduttori 1*.
- [4] Sito internet:
www.setec-group.it/products/downloads/documentation5-2.html.
- [5] Sito internet:
[www.setec-group.it/products/downloads/ServoAct\(I-GB\).pdf](http://www.setec-group.it/products/downloads/ServoAct(I-GB).pdf).
- [6] Sito internet:
www.cours.polymtl.ca/mec6405/Instruments%20Spec/Vishay_P3500.pdf.
- [7] Bollettino tecnico Cod. B-129-IT
“*Preparazione della superficie per l’incollaggio degli estensimetri*”
Rev. 2 del 07/05/99.
- [8] Bollettino tecnico Cod. B-127-IT
“*Incollaggio degli estensimetri*”
Rev. 2 del 18/11/99.
- [9] Sito internet:
www.intertechnology.com/Vishay/Vishay_Model_2100_Signal_Conditioner_Amplifier.html.
- [10] Sito internet:
www.hbm.com/it/menu/prodotti/eltronica-e-software-di-misura/sistemi-universali-di-acquisizione-dati.
- [11] Sito internet:
sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/1177.
- [12] Sito internet:
www.apc.com/resource/include/techspec_index.cfm?base_sku=BR800I.
- [13] Ministero delle Infrastrutture;
D.M. 14 gennaio 2008, “*Norme tecniche per le costruzioni*”.

- [14] Eurocodice 8
UNI EN 1998-1, "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica"
Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici

- [15] POZZATI P.- CECCOLI C., "Teoria e tecnica delle strutture", UTET; Volume II, Parte II, p. 1.3.3.