

Alma Mater Studiorum – Università degli Studi di Bologna

Facoltà d'Ingegneria

DISTART

Dipartimento d'Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque,  
del Rilevamento, del Territorio

Tesi di laurea in Riabilitazione Strutturale LS

**SOLUZIONI INNOVATIVE PER LA  
RIPARAZIONE DI TRAVI  
IN LEGNO ANTICHE**

Tesi di laurea di:

IVAN BROSIO

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing.

ANDREA BENEDETTI



*Ai miei genitori...*



## *Un ringraziamento particolare a:*

- Innanzitutto i miei genitori che mi hanno permesso di affrontare e concludere gli studi.*
- Il prof. Benedetti per la disponibilità dimostratami in tutto questo periodo.*
- Roberto Bianchi del LaPS (Laboratorio Prove Strutture) per la pazienza che ha manifestato nei miei confronti.*
- I tecnici di laboratorio del LaRM (Laboratorio Resistenza Materiali) per avermi dedicato tempo e risorse.*
- La falegnameria Manzini per il grande contributo alla lavorazione delle travi.*
- La “Resintec Italia<sup>®</sup>” per gli interventi di rinforzo sulle travi.*
- Il prof. Mazzotti perché anche grazie a lui ho potuto effettuare le mie prove sperimentali.*
- Ennio Boldrini e il dott. Marco Errani per avermi fornito le barre in fibra di Carbonio e la fibra di Canapa.*
- Tutti coloro che hanno dato un apporto, anche piccolo, alla stesura di questa tesi.*



# Indice

<b>Introduzione.....</b>	<b>15</b>
--------------------------	-----------

## **Capitolo 1 - Il materiale legno: cenni storici...17**

1.1	Introduzione.....	17
1.2	La struttura del legno.....	19
1.2.1	Struttura del legno a livello del tronco..	21
1.2.2	La struttura del legno a livello microscopico.....	23
1.2.3	La struttura del legno a livello macroscopico.....	24
1.2.4	Cenni sulla struttura del legno a livello nanoscopico.....	26
1.2.5	Cenni sulla struttura del legno a livello molecolare.....	27
1.3	Caratteristiche fisiche del legno.....	29
1.4	Rapporti fra legno ed energia termica.....	30
1.5	Caratteristiche termiche del legno e risparmio energetico.....	34
1.6	Caratteristiche elettriche del legno.....	37
1.7	Difetti del legno e sue alterazioni degradative..	38

## **Capitolo 2 - Il legno come materiale da costruzione.....43**

2.1	Introduzione.....	43
2.2	Metodi di classificazione.....	50

2.2.1 Normativa per la classificazione.....	55
2.3 Misura del modulo E statico.....	56
2.4 Resistenza al fuoco.....	56
2.5 Corrispondenze fra il legno e l'acqua in esso contenuta.....	58

## **Capitolo 3 - Cenni sulla canapa.....67**

3.1 Introduzione e Caratteristiche della pianta.....	67
3.2 Esigenze pedo-climatiche.....	67
3.3 Biologia e tecnica colturale.....	67
3.4 Avversità.....	69
3.5 Miglioramento genetico.....	70
3.6 Varietà.....	70
3.7 La lavorazione tradizionale della canapa.....	72
3.8 Nuove possibilità ed utilizzazioni.....	74
3.9 I requisiti tecnologici per la produzione di nuovi filati derivati da fibre corte di canapa con l'aiuto della tecnologia del cotone.....	75
3.10 Valutazione della qualità e processo di ottimizzazione.....	77
3.11 La tecnica dell'esplosione a vapore.....	77
3.12 Aspetti economici ed ecologici.....	79
3.13 Primi risultati.....	80
3.14 Materie grezze e tecniche di lavorazione.....	81
3.15 Confronto tra cotone e canapa "cotonizzata" con l'esplosione a vapore.....	82
3.16 Ulteriori sviluppi e prospettive.....	83



## **Capitolo 4 - Comportamento meccanico degli elementi strutturali in legno.....85**

4.1 Legame costitutivo del legno e sue schematizzazioni.....	85
4.2 Comportamento statico di un elemento strutturale soggetto a sforzo di compressione nella direzione della fibratura.....	89
4.3 Comportamento statico di un elemento strutturale soggetto a sforzo di compressione nella direzione ortogonale alla fibratura.....	92
4.4 Comportamento di un elemento strutturale in legno sollecitato da sforzi di trazione nella direzione della fibratura.....	95
4.5 Comportamento di un elemento strutturale in legno sollecitato da sforzi di trazione trasversalmente alla fibratura.....	97
4.6 Resistenza di un elemento strutturale in legno sollecitato da uno sforzo tagliante.....	98
4.7 Comportamento di un elemento strutturale in legno soggetto a flessione.....	99
4.8 Comportamento delle strutture in legno nei confronti del sisma .....	103

**Capitolo 5 - Il rinforzo di elementi strutturali  
in legno soggetti a sforzi  
flessionali.....105**

5.1 Caso di rinforzo di travi facenti parte di un solaio.....	105
5.1.1 Elementi di connessione.....	109
5.2 Rinforzo di elementi strutturali tramite FRP: materiali, analisi sperimentali e valutazione dei risultati.....	114
5.2.1 Gli FRP (Fiber Reinforced Polymers).....	114
5.2.1.1 Definizione.....	114
5.2.1.2 Le Fibre.....	115
5.2.1.3 Le Matrici.....	117
5.2.2 Varie tecnologie di rinforzo e analisi sperimentali.....	120

**Capitolo 6 - Risultati delle prove effettuate  
sugli elementi soggetti a  
compressione e su quelli soggetti a  
sforzo tagliante.....131**

6.1 Risultati delle prove di compressione in termini di carico di collasso e modalità di rottura.....	131
6.2 Risultati delle prove di taglio in termini di carico di collasso e modalità di rottura.....	135

**Capitolo 7 - Prove Sperimentali sull'aderenza tra  
elementi in legno e rinforzi in fibra  
di Carbonio.....141**

7.1 Premessa.....	141
7.2 Confezionamento dei provini.....	142
7.3 Resinatura delle barre.....	144
7.4 Preparazione della macchina di prova.....	145
7.5 Acquisizione dei dati.....	147
7.6 Esecuzione delle prove.....	148
7.7 Risultati in termini di modalità di rottura.....	149

**Capitolo 8 - Prove sperimentali sulle travi in  
legno rinforzate con fibre di diverso  
materiale.....151**

8.1 Obiettivo della sperimentazione e preparazione delle travi rinforzate.....	151
8.2 Prova di flessione a quattro punti su trave rinforzata con barre in CFRP.....	158
8.2.1 Schema di carico e strumentazione.....	158
8.2.2. Esecuzione della prova ed analisi dei risultati.....	161
8.3 Prova di flessione a quattro punti su trave rinforzata con fibre sciolte di canapa.....	166
8.3.1 Schema di carico, strumentazione ed esecuzione della prova.....	166
8.4 Conclusioni e sviluppi futuri.....	172

8.5 Cenni sul funzionamento degli strumenti di misura di spostamenti e deformazioni.....	173
8.5.1 Premessa.....	173
8.5.2 Estensimetri.....	173
8.5.3 LVDT (Linear Voltage Differential Transformers).....	177

<b>Appendice A - Grafici carico-spostamento delle prove di delaminazione (capitolo 7).....</b>	<b>179</b>
--	------------

<b>Appendice B - Grafici carico-spostamento e carico-deformazione delle prove di flessione (capitolo 8).....</b>	<b>203</b>
--	------------

<b>Bibliografia.....</b>	<b>237</b>
--------------------------	------------

## *Introduzione*

*Nell'ambito delle strutture esistenti, il patrimonio delle costruzioni in legno è molto ampio, non solo in Italia ma anche in altri paesi europei e del mondo. Il legno, infatti, assieme ai materiali lapidei, è stato uno dei materiali maggiormente utilizzati dall'uomo, in quanto presenta alcuni vantaggi fondamentali e di grande interesse per la progettazione in ambito civile. Basti citare il peso molto ridotto rispetto ad esempio al calcestruzzo e le risorse resistenti invece paragonabili. E' un aspetto, questo, molto importante e da non sottovalutare anche e soprattutto alla luce dell'importanza che assumono le strutture leggere in relazione al rischio sismico. Si potrebbe citare, inoltre, la risposta del materiale legno al fuoco e il comportamento di questo a confronto con i materiali metallici.*

*Per questi e per altri motivi è opportuno che il legno venga rivalutato, sia per la costruzione di nuove strutture ma anche per la riparazione e il rinforzo delle strutture esistenti. E' necessario anche mettere in evidenza alcuni svantaggi del legno legati ad esempio alla sua forte ortotropia, che rende più complesso il lavoro di modellazione del materiale e al comportamento essenzialmente fragile se sollecitato da sforzi di trazione e taglio. Inoltre la presenza di difetti e alterazioni talvolta non visibili in maniera adeguata, porta alla difficoltà di individuare, in un elemento strutturale, un punto di debolezza o una sezione di minima resistenza in cui si prevede il collasso dell'elemento stesso.*

*In ambito universitario la ricerca assume un ruolo fondamentale, sia al fine di sperimentare nuove tecniche di rinforzo, sia per testare nuovi materiali. Oggi, inoltre, è sempre più sentito il tema del rispetto dell'ambiente. Pertanto l'impiego di materiali naturali, non solo per costruire ma anche per il rinforzo strutturale è sicuramente una questione che in futuro sarà sempre più trattata con maggiore forza.*



# 1. Il materiale legno: cenni storici

## 1.1 Introduzione

Il legno, insieme al fango, alla pietra e ai mattoni crudi è stato uno dei primi materiali utilizzati dall'uomo per la realizzazione di *architetture stabili* come ad esempio le palafitte. Esso, inoltre, ha costituito per molti secoli l'unico materiale adatto a realizzare strutture portanti orizzontali, a causa della sua leggerezza, resistenza a trazione e disponibilità. Fin dall'antichità, comunque, il legno è stato utilizzato sia per la realizzazione di elementi strutturali portanti sia per la costruzione di elementi portati. Aspetti fondamentali che hanno rappresentato vantaggi e costituito quindi alcune delle ragioni che hanno spinto a scegliere il legno come materiale da costruzione sono stati:

- una diffusa possibilità di approvvigionamento in natura;
- una spiccata duttilità applicativa;
- una leggerezza, la quale consente un agevole trasporto e messa in opera senza che risulti limitante per le caratteristiche di resistenza meccanica.

L'esperienza, inoltre, insegna che mentre gli elementi in legno esposti all'aria e all'umidità si degradano facilmente, in ambiente anaerobico e oscuro tendono a conservarsi per secoli. Un esempio eclatante è rappresentato dalle fondazioni a pali su cui poggia Venezia: il fango ha preservato i pali per millenni.

Naturalmente, connessi al legno come materiale edile, ci sono sia vantaggi (e ne sono stati citati alcuni), sia svantaggi.

Da sempre, una fondamentale limitazione dell'uso del legno come materiale strutturale è stata la sua elevata elasticità. Questo è sicuramente un aspetto positivo della risposta di un elemento strutturale soggetto a caricamento ciclico. Tuttavia esso potrebbe rappresentare un problema nel caso in cui sia richiesta alla struttura una certa rigidità, in maniera da non nuocere alla stabilità dei componenti edilizi quali per esempio quelli delle chiusure verticali e delle partizioni interne. Allo scopo, quindi, di irrigidire la struttura sono state impiegate, nel corso dei secoli, diverse soluzioni, tra le quali possiamo citare i controventi diagonali usati anche attualmente.

Da un punto di vista ambientale, l'ecologia del materiale e della tecnologia di produzione è garantita dalla naturalità della materia prima, dalla sua completa biodegradabilità e da una lavorazione che assicura emissioni inquinanti molto limitate rispetto agli altri materiali. Alcuni problemi, tuttavia, si possono riscontrare a partire dall'uso di colle, sostanze protettive e di miglioramento estetico. È fondamentale, a mio parere, sottolineare come il legno sia una risorsa completamente rinnovabile, a differenza di tutti gli altri materiali edili. Ancora più importante è osservare come il legno sia l'unica materia prima che è possibile creare.

Compatibilmente con la difesa dell'ambiente, poi, si può considerare che un utilizzo anche considerevole del legno in campo edilizio non necessariamente porta ad un indebolimento delle risorse boschive, a patto che, parallelamente, venga condotta un'opera di riforestazione programmata adeguata. L'esempio degli Stati Uniti d'America si dimostra, in questo senso, eclatante: conseguentemente, infatti, ad una eccezionale richiesta di legno nell'ambito delle costruzioni, il patrimonio boschivo è aumentato del 20% rispetto alla situazione di 40 anni fa.



## 1.2 La struttura del legno

Il legno rappresenta il tessuto del tronco, dei rami e delle radici di un albero e degli arbusti. Esso viene prodotto da uno strato di forma anulare detto *cambio*. Da esso, durante il periodo vegetativo, si differenziano, nella parte interna, le cellule del legno (xilema) e, nella parte esterna, le cellule del libro (floema), che forma la parte più interna della corteccia, la cui crescita è decisamente inferiore a quella del legno. Il legno del tronco assume le tre funzioni di sostegno, immagazzinamento

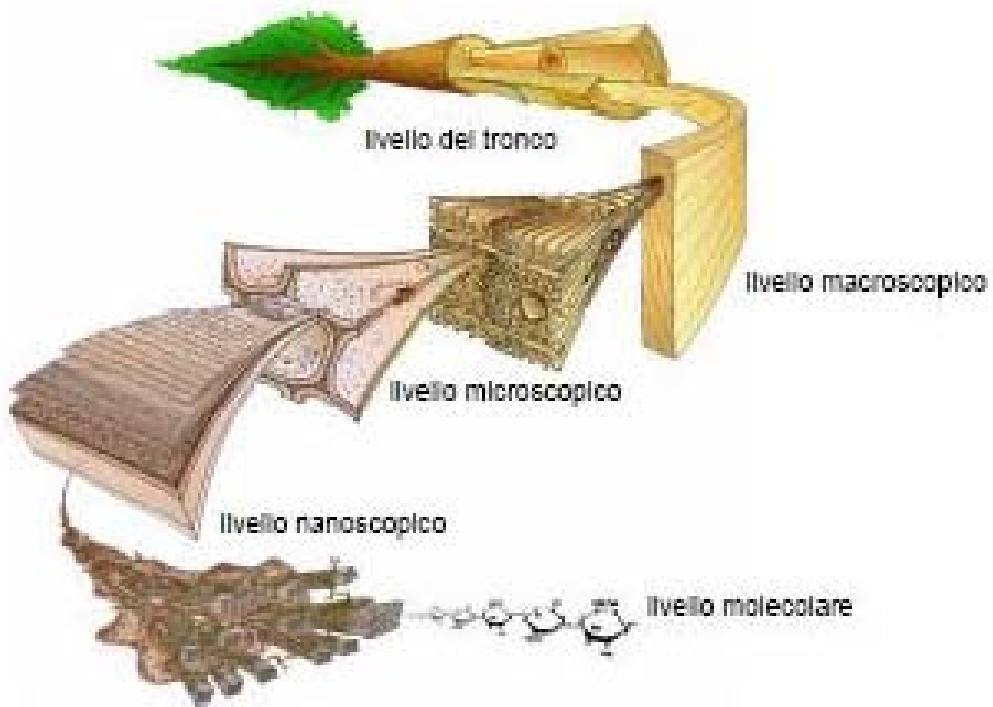


fig. 1.2.1 - i livelli del legno

e trasporto. L'albero può adattare molto bene le proprietà del legno alle esigenze legate a queste tre funzioni. La composizione chimica del legno rimane completamente invariata; le sue proprietà sono influenzate dal modo in cui le sostanze chimiche principali vengono assemblate a formare la struttura micro e macroscopica del legno stesso.

Fondamentalmente la struttura del legno può essere esaminata a cinque livelli (fig 1.2.1):

- a livello della struttura del tronco;
- a livello della struttura macroscopica;
- a livello della struttura microscopica;
- a livello della struttura nanoscopica;
- a livello della struttura molecolare;

Il legno può essere univocamente definito e caratterizzato soltanto considerando le tre direzioni anatomiche fondamentali, in quanto il tessuto e le cellule, che ne determinano l'aspetto, sono differenti a seconda della

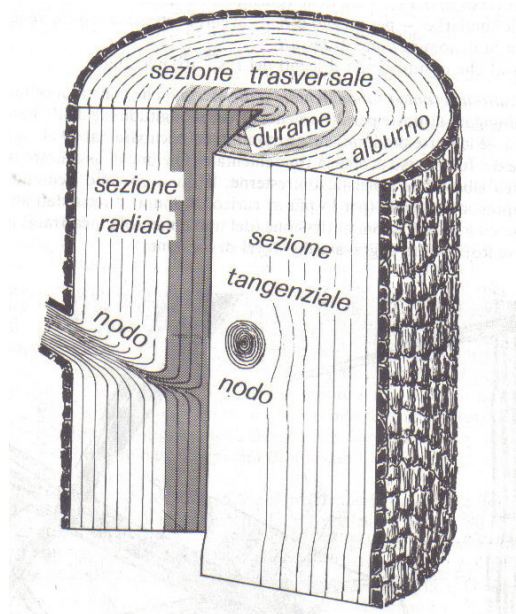


fig 1.2.2 - le direzioni principali

sezione considerata. Queste tre direzioni sono:

- direzione trasversale (perpendicolare all'asse del tronco);
- direzione radiale (piano della sezione parallelo all'asse del tronco e praticamente parallelo ai raggi midollari);

- direzione tangenziale (piano della sezione parallelo all'asse del tronco e perpendicolare ai raggi midollari).  
(fig. 1.2.2)

### 1.2.1 Struttura del legno a livello del tronco

Osservando la sezione di un tronco non scortecciato, si possono riconoscere ad occhio nudo, a seconda della specie legnosa, dall'esterno verso l'interno (vedi fig 1.2.1.1):

- la corteccia, divisibile in esterna ed interna (libro);
- il legno costituente la parte principale con l'alburno ed il durame più o meno distinguibili (legno differenziato o indifferenziato), con gli anelli di accrescimento, con i raggi midollari e gli altri tessuti;
- il midollo al centro.

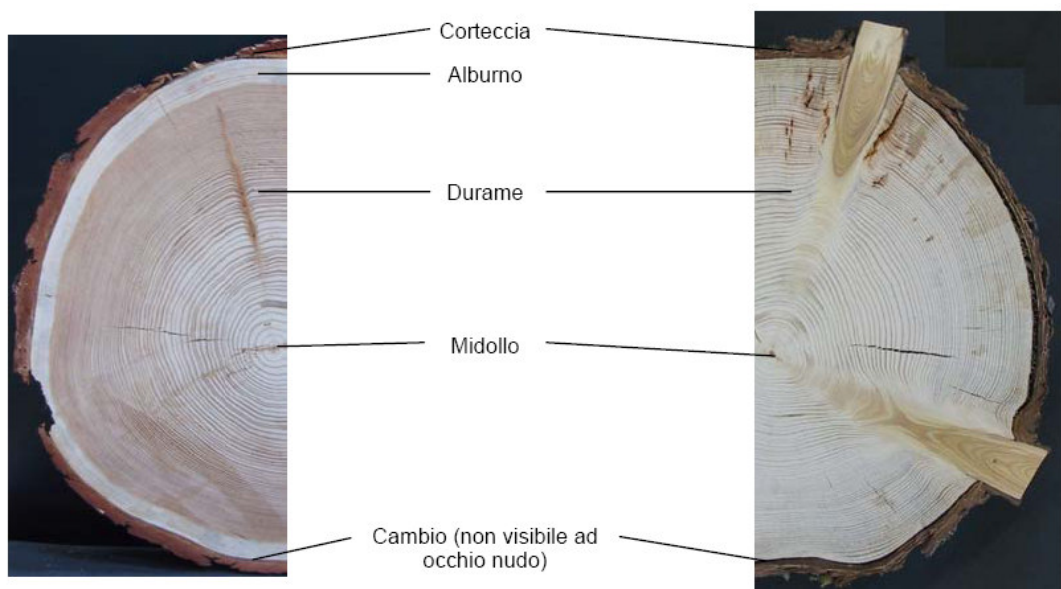


fig 1.2.1.1 - sezione di un tronco  
(a sinistra larice, a destra abete)

Il cambio, che si trova tra corteccia e legno, è riconoscibile solo a livello microscopico.

Nel suo primo anno di crescita, l'albero produce il cosiddetto "legno giovanile", che si trova nel centro del tronco immediatamente vicino al midollo. Nelle Conifere, il legno giovanile si contraddistingue da quello maturo per le seguenti caratteristiche:

- anelli di accrescimento più ampi;
- minore massa volumica;
- resistenza e rigidità da 50 a 70% inferiori.

Tra il quinto ed il ventesimo anno di crescita, le caratteristiche del legno migliorano gradualmente fino a raggiungere, all'incirca dal ventesimo anno di crescita, nel legno maturo, le "normali" proprietà del legno. Il legno nelle vicinanze del midollo presenta, pertanto, una resistenza nettamente inferiore di quello lontano da esso. Con l'invecchiamento dell'albero, il legno si divide in alburno e durame, mediante fenomeni di duramificazione. L'alburno circonda il durame ed è, in genere, più chiaro. L'alburno è costituito da cellule vive e fisiologicamente attive; esso ha funzione conduttrice dell'acqua e di immagazzinamento. L'ampiezza dell'alburno è molto variabile. Esso è generalmente poco durevole e quindi meno resistente del durame alle alterazioni biologiche indotte da funghi ed insetti. Il durame si forma in tutti gli alberi. La sua formazione comincia da una ben determinata ampiezza dell'alburno. Il durame comprende le zone interne del legno. Esso è costituito da cellule morte ma assolve ancora la funzione di sostegno ed è importante per la rigidità e la stabilità dell'albero. Fondamentalmente si distingue tra:

- durame differenziato obbligatoriamente;
- durame differenziato facoltativamente.

Oltre alla maggiore durabilità del durame differenziato obbligatoriamente, il durame colorato (differenziato) possiede altre proprietà fisico-meccaniche diverse da quelle dell'alburno: è di regola più scuro, più secco, più pesante, più duro e spesso più difficilmente impregnabile.

### 1.2.2 La struttura del legno a livello microscopico

Il legno è costituito da milioni di cellule di diverso tipo, grandezza, forma, numero e distribuzione.

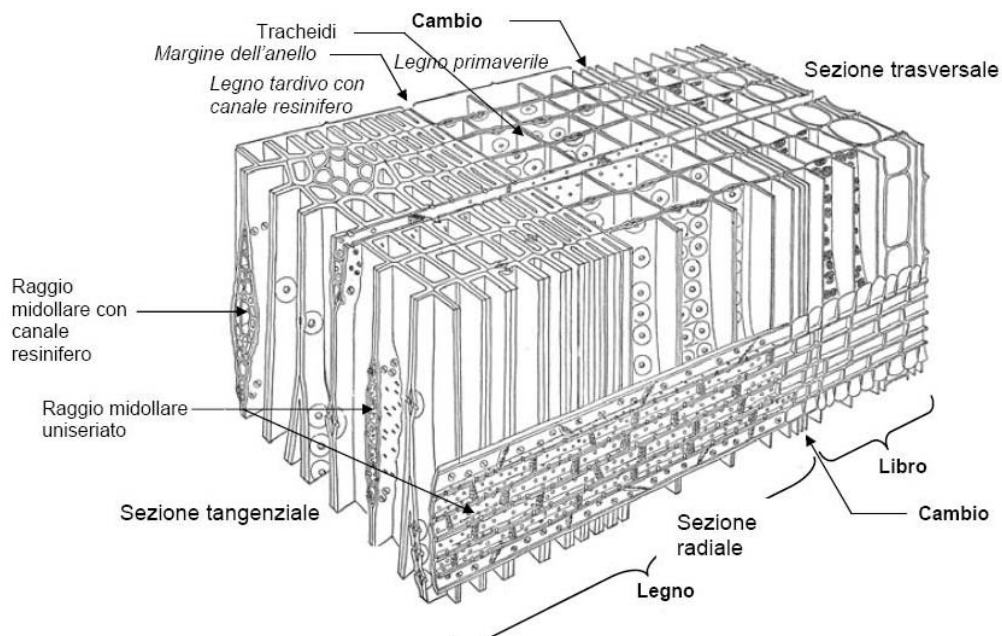


fig 1.2.2.1 - struttura microscopica del legno

Cellule dello stesso tipo si presentano raggruppate nei cosiddetti tessuti. In relazione alle tre funzioni principali del legno (sostegno, conduzione ed immagazzinamento), i tessuti si dividono in: tessuto meccanico fondamentale o di sostegno, tessuto conduttore e tessuto parenchimatico (o di riserva). Inoltre vi sono anche tessuti secondari: tessuto secretore (ad es. i canali resiniferi) e tessuti anomali. La maggior parte delle cellule del legno sono disposte parallelamente all'asse del

tronco o meglio "in direzione della fibratura". Perpendicolarmente ad essa, ovvero orizzontalmente per un albero in piedi, vi sono numerosi aggregati nastriformi di cellule indicati come "raggi del legno". Cellule contigue comunicano direttamente per mezzo di aperture (pori) nelle due pareti terminali (apicali) che hanno funzione conduttrice della linfa. Le Conifere si sono sviluppate prima delle Latifoglie; esse hanno una struttura relativamente semplice e regolare. Il tessuto del legno di Conifere è costituito da solo due tipi di cellule: le tracheidi e le cellule parenchimatiche. Le tracheidi longitudinali sono la forma originaria delle cellule del legno e formano il 90-95% del corpo legnoso delle Conifere. Esse sono orientate in direzione assiale, sono cellule morte e di forma a fuso. Viste in sezione trasversale, le tracheidi formano righe radiali regolari. Dalla zona primaverile a quella tardiva, il loro diametro in direzione radiale decresce mentre lo spessore delle pareti aumenta. Un particolare della costituzione microscopica del legno è mostrata in fig 1.2.2.1

### 1.2.3 La struttura del legno a livello macroscopico

Struttura, disposizione, forma e grandezza dei tessuti o degli insiemi risultanti da diversi tipi di cellule (da cui risulta l'aspetto di una specie legnosa) hanno carattere macroscopico, ovvero sono riconoscibili ad occhio nudo o per lo meno con una lente d'ingrandimento. Al contrario, la struttura delle singole cellule può essere osservata solo con un microscopio. Soltanto i vasi, che conducono la linfa greggia (acqua e ioni minerali) sono, per numerosi legni, tanto grandi da essere visibili a livello macroscopico come

pori, in sezione trasversale, o come canali porosi, in sezione longitudinale.

I cosiddetti *anelli d'accrescimento* si formano in seguito all'accrescimento del fusto interrotto da periodi di stasi. Nelle aree climatiche con pause invernali nell'attività vegetativa (regioni temperato-fredde), gli anelli di accrescimento corrispondono all'accrescimento arboreo annuale. L'età "approssimativa" di un albero può essere letta, pertanto, in una sezione trasversale posta in basso; gli anelli di accrescimento forniscono anche informazioni riguardo fattori che incentivano o rallentano l'accrescimento (p. es. il clima). Negli alberi caducifogli delle regioni tropicali e subtropicali, in dipendenza dall'alternarsi delle stagioni secche e di quelle delle piogge, si formano anelli che non corrispondono più all'accrescimento annuale. Nei sempreverdi delle foreste tropicali, caratterizzati da attività vegetativa ininterrotta, l'apparizione degli anelli è quasi o del tutto assente. Gli anelli di accrescimento diventano visibili perché si formano cellule di differente tipo e dimensione, in numero e distribuzione anch'essi differenti, all'inizio e verso la fine del periodo di attività vegetativa. Di conseguenza, si distingue all'interno di un anello tra legno primaverile (primaticcio) e legno tardivo. Mentre il legno primaverile assicura il rapido trasporto della linfa all'inizio della stagione vegetativa, al legno tardivo formatosi in estate spetta principalmente il compito del sostegno. In confronto al legno primaverile, il legno tardivo ha maggiore massa volumica e resistenza nonché maggiori valori dei parametri legati al ritiro ed al rigonfiamento. Le differenti funzioni del legno primaverile e del legno tardivo spiegano anche le evidenti differenze a livello anatomico tra zona primaverile e zona tardiva in

numerose specie legnose (in particolare Conifere e Latifoglie a legno poroso).

Nelle Conifere, il legno primaverile è costituito da cellule a lume ampio e parete sottile, quello tardivo invece da cellule a lume assai più esiguo e parete più spessa (per lume si intende l'interno di un organo cavo di forma tubolare). Questa differenza nello spessore della parete cellulare porta alla differenza di colore e di durezza all'interno dell'anello caratteristica nelle Conifere: il legno primaverile è più chiaro e tenero, il legno tardivo più scuro e compatto.

Nelle Latifoglie, in base alla disposizione ed alla grandezza dei vasi nell'anello annuale, si distinguono tre gruppi principali: specie a legno poroso-zonato, specie a legno semi poroso-zonato e specie a legno poroso-diffuso.

#### 1.2.4 Cenni sulla struttura del legno a livello nanoscopico

La parete cellulare è strutturata come un materiale fibroso composto. Nelle tracheidi delle Conifere e nelle fibre libriformi delle Latifoglie le pareti cellulari sono formate da tante lamelle di fibrille di cellulosa in una matrice di lignina che, mediante le emicellulose, costituiscono una rete a maglie e sono collegate tra loro. Due tracheidi di Conifere, o due fibre di Latifoglie, contigue vengono collegate mediante la lamella mediana (LM) (fig 1.2.4.1).



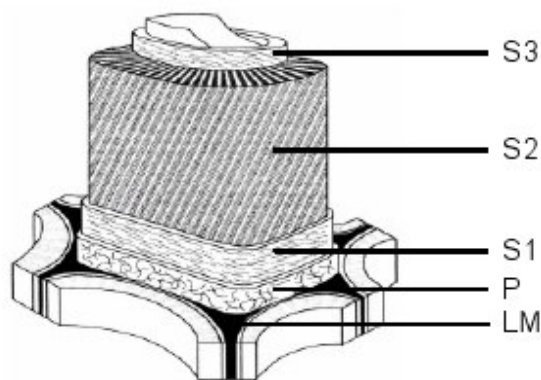


fig 1.2.4.1 - struttura microscopica del legno

Da entrambi i lati si deposita, per ogni cellula, una parete primaria (P) molto sottile. Su di essa segue la parete secondaria (S), che è costituita da tre strati (S1, S2 e S3) e rappresenta la parte più cospicua della parete cellulare. Quest'ultima, che collega due cellule, è quindi formata da un numero dispari di strati orientati. Perciò si parla di un laminato, le cui elevate potenzialità meccaniche derivano dal mutuo collaborare dei diversi strati.

### 1.2.5 Cenni sulla struttura del legno a livello molecolare

Il legno è costituito essenzialmente da circa 50% di carbonio (C), 44% di ossigeno (O) e 6% di idrogeno (H), da un contenuto medio di ceneri pari a 0,2-0,3% (→ sostanze minerali) e da un contenuto di azoto inferiore allo 0,1%. La composizione esatta dipende dal tipo di albero ed oscilla lievemente anche all'interno di uno stesso tronco. Le differenti proprietà del legno non sono determinate dal contenuto in percentuale degli elementi chimici ma dai differenti legami chimici e fisici degli stessi.

Il legno è un materiale composito costituito dalle sostanze a struttura macromolecolare formanti il complesso delle pareti cellulari, ovvero cellulosa, emicellulose e lignina, presenti in gran quantità, e da sostanze di natura diversa a struttura micromolecolare, presenti in ben più limitata quantità.

La cellulosa, polisaccaride composto da unità ripetute del monomero di glucosio, è il costituente caratteristico delle pareti cellulari delle piante e ne determina largamente la loro struttura. Essa forma nella parete cellulare una gerarchia di strutture fibrillari, parzialmente legate una all'altra per mezzo di una matrice omogenea costituita da pectina ed emicellulose. Si può quindi definire la cellulosa come l'ossatura della parete cellulare. Essa conferisce alle celle elevata stabilità della forma ed in particolare elevata resistenza a taglio ed a flessione.

Le emicellulose rappresentano, nel collegamento con la cellulosa, il "partner" facilmente deformabile, in modo che il materiale composito possa rimanere flessibile ed elastico.

Contrariamente alla cellulosa, con le sue lunghe molecole a catena, la lignina, amorfa e formante una rete tridimensionale, non è elastica. Non si presenta come costituente indipendente ma si deposita ("incrosta") durante la lignificazione (ultima fase della formazione della parete cellulare).

Con questo processo si riduce sensibilmente l'estensibilità delle pareti cellulari mentre rigidità e resistenza a compressione sono significativamente più elevate.

La parete cellulare è quindi un corpo misto di cellulosa resistente a trazione e lignina resistente a compressione, simile all'acciaio nel calcestruzzo di un elemento di

calcestruzzo armato o alle fibre nei materiali compositi sintetici.

Le sostanze contenute nel legno appartengono alle più differenti categorie chimiche e sono, per tipo e quantità, caratteristiche delle rispettive specie legnose. Sebbene

	<b>Costituenti Percentuale nel legno</b>	<b>Funzione principale</b>
<b>Costituenti principali</b>	<u>Cellulosa:</u> macromolecola non ramificata a catena lunga <b>41-51%</b>	Costituenti più importanti della parete cellulare Assorbimento delle forze meccaniche, soprattutto la <b>trazione</b>
	<u>Emicellulose:</u> macromolecola ramificata a catena corta <b>25-30% nelle Conifere</b> <b>27-40% nelle Latifoglie</b>	
	<u>Lignina:</u> macromolecola tridimensionale <b>28-41% nelle Conifere</b> <b>18-25% nelle Latifoglie</b>	Sostanza legante nella struttura primaria di cellulosa → lignificazione delle pareti cellulari, assorbimento delle <b>forze di compressione</b>
	<u>Pectine</u> (quasi esclusivamente nella lamella mediana): macromolecole tridimensionali <b>0,5% nelle Conifere</b> <b>1-2% nelle Latifoglie</b>	Sostanza legante, mantiene unite le cellule dei tessuti
<b>Sostanze di diversa natura</b>	A struttura micromolecolare, <b>1-10% nei legni delle zone temperate</b> <b>2-30% nei legni tropicali</b>	Influiscono sulle caratteristiche chimiche, biologiche e fisiche del legno, ad es. la resistenza all'esposizione solare, l'infiammabilità, la durabilità (p. es. mediante fenoli), l'odore (mediante oli eterici)

rappresentino solo una piccola percentuale della massa del legno, queste sostanze hanno una grande influenza sulle sue caratteristiche chimiche, biologiche e fisiche, ed un diretto effetto sulle sue caratteristiche meccaniche molto piccolo o nullo. A pagina precedente è stata riportata una tabella riassuntiva delle principali componenti presenti nel legno.

### 1.3 Caratteristiche fisiche del legno

Il legno è un materiale poroso-capillare. A seconda della massa volumica del legno, la percentuale dei pori è mediamente pari a 50-60%. Questo sistema costituito prevalentemente da cavità, come tutti i materiali porosi, assorbe vapore acqueo dall'aria circostante e può imbevversarsi, per capillarità, di acqua o di altri liquidi (ad

es. soluzioni di sostanze protettive del legno, adesivi). L'umidità del legno (detta anche tenore di umidità o contenuto di umidità) ne influenza praticamente tutte le caratteristiche fisiche, meccaniche e tecnologiche. La stabilità dimensionale assume un ruolo rilevante e può essere garantita se, in fase di lavorazione, il legno possiede un'umidità che manterrà anche nel successivo impiego. I parassitari del legno, animali e vegetali, necessitano, per la sopravvivenza, di un determinato contenuto minimo di umidità; è quindi possibile ottenere una buona protezione del legno semplicemente mantenendo sufficientemente bassa la sua umidità.

Per determinare l'umidità del legno, esistono, a seconda del tipo di applicazione, un gran numero di metodi diversi. Fondamentalmente si può distinguere tra:

- metodi diretti, secondo i quali il quantitativo di acqua contenuto nel campione di legno viene completamente evacuato e misurato;
- metodi indiretti, che sfruttano come grandezza misurabile una proprietà del legno dipendente dalla sua umidità.

Come esempio si cita il metodo dell'essiccamento.

Il metodo dell'essiccamento è un procedimento di misura che restituisce risultati in genere molto attendibili, impiegato soprattutto per analisi scientifiche ma anche come termine di paragone per la calibratura degli igrometri e dei procedimenti di misura dell'umidità del legno.

## 1.4 Rapporti fra legno ed energia termica

Esistono diversi aspetti che fanno parte dei rapporti fra legno ed energia termica. Essi riguardano la combustione, la trasmissione del calore, le variazioni dimensionali derivanti dai cambiamenti di temperatura, l'influenza sulle caratteristiche meccaniche.

Attualmente è di forte interesse una problematica fondamentale: quella del benessere termoigrometrico delle persone all'interno di una struttura. A questo proposito assume una rilevante importanza l'isolamento termico di un edificio e più in particolare la trasmissione del calore attraverso il legno massiccio ed i pannelli derivati.

La trasmissione dell'energia termica avviene secondo tre modalità: conduzione, convezione, irraggiamento.

Per quanto riguarda l'isolamento termico di un ambiente rispetto all'ambiente esterno è necessario considerare tutte e tre le forme di trasferimento di energia, sia per elementi in legno massiccio che per i prodotti derivati sotto forma di pannelli. Questi ultimi, in particolare, sono caratterizzati da modificazioni strutturali nella direzione delle fibre e nella discontinuità delle pareti, tra le quali si determinano microcavità che portano a variazioni nella massa e nel comportamento sia nei riguardi della trasmissione del calore che del suono. Sono queste caratteristiche favorevoli che possono essere incrementate

Coefficienti K di trasmissione termica per vari tipi di parete

- a) Parete di mattoni vuoti di 12 cm con intonaco esterno di 2 cm ed intonaco interno di 1,5 cm:  
 $K = 1,87$
- b) Parete di doppio strato di mattoni vuoti di 12 cm con intercapedine di 10 cm: intonaco esterno (strato di sinistra) di 2 cm ed intonaco interno (strato di destra) di 1,5 cm:  
 $K = 0,89$
- c) Parete di mattoni vuoti di 12 cm con intonaco esterno di 2 cm: verso l'interno sono accostati alla parete dei travetti sui quali è fissato un pannello di fibre del tipo duro e di spessore 3 mm:  
 $K = 1,25$
- d) Parete di doppio strato di mattoni vuoti di 12 cm con intercapedine di 10 cm: intonaco esterno (strato di sinistra) di 2 cm mentre allo strato di destra (interno) sono accostati dei travetti sui quali è fissato un pannello di fibre del tipo duro e di spessore 3 mm:  
 $K = 0,73$
- e) Parete in mattoni vuoti di 12 cm con intonaco esterno di 2 cm mentre sulla superficie interna è addossato un pannello di fibre del tipo poroso di spessore 2,5 cm:  
 $K = 0,88$
- f) Parete di doppio strato di mattoni vuoti di 12 cm con intercapedine di 10 cm: intonaco esterno (strato di sinistra) di 2 cm mentre sulla superficie interna dello strato di destra è addossato un pannello di fibre del tipo poroso di spessore 2,5 cm:  
 $K = 0,58$
- g) Parete di mattoni vuoti di 12 cm con intonaco esterno di 2 cm mentre verso l'interno sono accostati alla parete dei travetti sui quali è fissato un pannello di fibre del tipo poroso di spessore 2,5 cm:  
 $K = 0,74$
- h) Parete di doppio strato di mattoni vuoti di 12 cm con intercapedine di 10 cm: intonaco esterno (strato di sinistra) di 2 cm mentre verso l'interno sono accostati alla parete dei travetti sui quali è fissato un pannello di fibre del tipo poroso di spessore 2,5 cm:  
 $K = 0,53$
- i) Parete di mattoni vuoti di 12 cm con intonaco esterno di 2 cm seguita verso l'interno da intercapedine di 6 cm nella quale sono sistemati, ma non aderenti, dei piccoli travetti ai quali è fissato un pannello di lana di legno di 5 cm ricoperto verso l'interno da intonaco di 1,5 cm di spessore:  
 $K = 0,65$
- l) Parete di doppio strato di mattoni vuoti di 12 cm con intercapedine di 10 cm: intonaco esterno (strato di sinistra) di 2 cm mentre allo strato di destra segue verso l'interno una intercapedine di 6 cm nella quale sono sistemati, ma non aderenti, dei piccoli travetti ai quali è fissato un pannello di lana di legno di 5 cm ricoperto verso l'interno da intonaco di 1,5 cm di spessore:  
 $K = 0,47$
- m) Parete di mattoni vuoti di 12 cm con intonaco esterno di 2 cm seguita verso l'interno da intercapedine di 6 cm nella quale sono sistemati, ma non aderenti, dei piccoli travetti ai quali è fissato un pannello di particelle di spessore 2,5 cm con susseguente pannello di fibre del tipo duro di spessore 3 mm:  
 $K = 0,93$
- n) Parete di doppio strato di mattoni vuoti di 12 cm con intercapedine di 10 cm: intonaco esterno (strato di sinistra) di 2 cm mentre allo strato di destra segue verso l'interno una intercapedine di 6 cm nella quale sono sistemati, ma non aderenti, dei piccoli travetti ai quali è fissato un pannello di particelle di spessore 2,5 cm con susseguente pannello di fibre del tipo duro di spessore 3 mm:  
 $K = 0,60$
- o) Parete leggera in soli pannelli, costituita da due pannelli di lana di legno di 5 cm di spessore, appoggiati a travetti ma del tutto indipendenti in modo da creare una intercapedine: intonaco di 2 cm verso l'esterno (strato di sinistra) e di 1,5 cm verso l'interno (strato di destra):  
 $K = 0,51$
- p) Parete leggera in soli pannelli, costituita da un pannello di lana di legno di 5 cm di spessore ricoperto da intonaco di 2 cm di spessore verso l'esterno: verso l'interno si ha un secondo diaframma formato da un pannello di lana di legno più sottile (2,5 cm) del precedente e da un pannello di fibre del tipo duro di 3 mm di spessore. I due diaframmi sono del tutto indipendenti e nell'intercapedine tra di essi viene allogato uno strato di lana di vetro di 3 cm di spessore:  
 $K = 0,46$
- q) Parete leggera di soli pannelli, costituita da un diaframma esterno formato da un pannello di lana di legno di 5 cm di spessore ricoperto da intonaco di 2 cm di spessore; verso l'interno segue una intercapedine in cui sono sistemati dei piccoli travetti tra i quali è interposto un pannello di fibre del tipo poroso dello spessore di 1,25 cm: la delimitazione verso l'interno è ottenuta con un pannello di lana di legno di 2,5 cm ed un pannello di particelle di 2 cm:  
 $K = 0,52$

tab. 1.4.1

utilizzando dei particolari accorgimenti costruttivi e utilizzando il legno accoppiato con altri materiali. Si

riportano le tabelle 1.4.1 e 1.4.2 che danno un'idea delle caratteristiche di isolamento termico del legno, confrontate con quelle di altri materiali.

<i>Materiale</i>	<i>Coefficiente <math>\lambda</math> di conduttività termica</i>
Legno di abete o pino perpendicolarmen- te alla fibratura	0,12-0,16
Legno di quercia id. id.	0,14-0,20
Legno di pioppo id. id.	0,14-0,16
Legno di balsa id. id.	0,04
Sughero	0,06
Pannelli di compensato	0,10
Pannelli di fibre di tipo duro	0,09-0,14
Pannelli di fibre di tipo isolante	0,02-0,06
Pannelli di lana di legno e cemento	0,07
Pannelli di particelle	0,07-0,08
Riempimenti isolanti a base di:	
— segatura asciutta	0,05
— trucioli asciutti	0,08
— torba	0,05-0,10
— lana di vetro	0,04-0,05
— polistirolo espanso	0,03
— poliuretano espanso	0,02
— agglomerati di sughero	0,04
Muratura di mattoni vuoti	0,30-0,50
Muratura di calcestruzzo	0,70-1,70
Vetro	0,40-0,80
Acciaio	39
Alluminio	da 180 a 220

tab. 1.4.2: coefficienti di conduttività termica per diversi materiali da costruzione

Il confronto viene effettuato a partire dai coefficienti di conduttività termica  $K$  (espressa in  $kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ), dove per conduttività termica s'intende la quantità di calore che, in regime stazionario, attraversa l'unità di superficie ( $1 m^2$ ) di una parete, avente lo spessore di un metro, per  $1 ^\circ C$  di differenza di temperatura tra le due facce opposte.

Si riconosce sicuramente la validità del materiale legno dal punto di vista dell'isolamento termico. Bisogna, tuttavia, non trascurare il fatto che, in generale, nelle pareti dei locali e nei solai sottotetto compaiono sempre

aperture di diversa costituzione che inevitabilmente alterano, anche sensibilmente, le proprietà isolanti della parete.

## 1.5 Caratteristiche termiche del legno e risparmio energetico

Per valutare la capacità termica isolante di un elemento costruttivo, risulta di particolare importanza la conduttività termica  $\lambda$ . Con essa si intende la quantità di calore che in un'ora passa attraverso un cubo di 1 m di spigolo, quando tra due superfici laterali parallele esiste una differenza di temperatura, costante nel tempo, di 1°K. Si misura in W/(mK).

A causa della sua elevata percentuale di pori, il legno è un cattivo conduttore di calore. Il materiale legno è costituito da sostanza legnosa, acqua ed aria e quindi la sua conduttività termica è funzione di:  $\lambda_{\text{Legno}} = f(\text{massa volumica, umidità, temperatura})$ .

Per legno con un contenuto di umidità di circa il 20%, la conduttività termica perpendicolarmente alla fibratura assume valori pari a 0,10 ÷ 0,20 W/(mK). Essa è quindi circa 15 volte più piccola che nel calcestruzzo armato e circa 10 volte in quello non armato.

Per quello che riguarda la conduttività termica, la grandezza caratteristica è il coefficiente di dilatazione termica  $\alpha_T$ . Esso rappresenta la variazione di lunghezza di un'asta lunga 1 m dovuta ad una differenza di temperatura di 1°K:

$$\alpha_T = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T}; \left[ \frac{1}{K} \right] \quad 1.5.1$$

Con l'ausilio del coefficiente di dilatazione termica  $\alpha_T$ , la variazione di lunghezza  $\Delta l_T$  di un'asta di



lunghezza "l" per una variazione di temperatura  $\Delta T$  è data da:

$$\Delta l_T = l \cdot \Delta T \cdot \alpha_T; \quad 1.5.2$$

La dilatazione termica è poco rilevante in confronto ai fenomeni di ritiro e rigonfiamento del legno, tanto più che un aumento di temperatura (□ dilatazione termica) si oppone alla riduzione del contenuto di umidità (□ ritiro). Le variazioni di dimensioni dovute al ritiro o al rigonfiamento sono 10 volte maggiori di quello dovute alla dilatazione termica. Queste ultime, per tale motivo, hanno un'importanza trascurabile per gli elementi strutturali di legno.

Ai fini del risparmio energetico, è importante intervenire oltre, ovviamente, sulle nuove costruzioni, anche e forse soprattutto sulle strutture esistenti, vista la consistenza del parco edilizio esistente. Proprio ai fini del recupero energetico delle strutture, è fondamentale scegliere materiali in grado di consentire grandi vantaggi energetici, non solo in relazione al risparmio conseguibile attraverso il loro utilizzo ma anche valutando i consumi energetici di cui la loro produzione necessita. In un quadro più ampio di risparmio energetico, infatti, non avrebbe senso scegliere dei materiali per ottenere un certo risparmio energetico in un determinato lasso di tempo (che potrebbe essere la vita utile dell'elemento strutturale in questione) quando il consumo per la loro produzione risulta maggiore. Per ciò detto anche in precedenza, il risparmio energetico che si opera tramite l'utilizzo del legno è legato ai ridotti flussi termici conseguenti alle caratteristiche di questo materiale, in termini di conduttività termica. In ambito edilizio, gli interventi mirati al recupero energetico sono, inoltre, legati sia alle caratteristiche geometriche, termofisiche e di degrado

degli edifici stessi, sia alle caratteristiche peculiari dell'ambiente esterno, soprattutto dal punto di vista del clima. Inoltre, tali interventi riguardano soprattutto i componenti perimetrali trasparenti ed opachi. Da un punto di vista energetico e di comfort ambientale, a questi ultimi viene richiesto in modo particolare il controllo dei flussi termici entranti (per quanto riguarda il periodo estivo) e di quelli uscenti (nel periodo invernale). Per il secondo aspetto si può dire che la sua valutazione viene riferita a condizioni di temperatura stazionarie e ciò rende necessario adottare, appunto per poter realizzare un certo risparmio energetico, bassi valori del coefficiente di trasmissione termica. Questi possono essere ottenuti abbastanza agevolmente, per i componenti opachi, andando ad aggiungere materiali termicamente isolanti. La valutazione del primo aspetto, invece, viene effettuata considerando condizioni di temperatura variabili e dunque richiede caratteristiche di inerzia termica (definita come la capacità di smorzare e ritardare l'escursione della temperatura esterna), che a sua volta dipende dalla capacità termica dei componenti e più precisamente dalla loro massa per unità di superficie. Per cercare di migliorare le prestazioni nei confronti dei due aspetti, può essere utile andare a valutare l'influenza del posizionamento del materiale isolante in componenti opachi multistrato.

Per quanto riguarda il periodo invernale, è possibile operare un certo risparmio energetico andando ad inserire il materiale isolante verso l'esterno e cercare di sfruttare così, nei periodi di tempo in cui l'impianto di condizionamento viene tenuto spento, la massa del componente posto verso l'interno e la sua temperatura relativamente alta (inizialmente la sua temperatura sarà prossima a quella dell'ambiente interno).

Ai fini del posizionamento del materiale isolante, un altro aspetto da considerare è quello relativo ai possibili problemi di condensazione interna la quale dipende dalle condizioni termoigrometriche interne ed esterne. Il pericolo maggiore di condensazione interna si ha nel caso di materiale isolante posto in corrispondenza della parete interna. In questo caso sarebbe opportuno andare ad inserire, sempre nella parte rivolta verso l'interno, una barriera al vapore.

## 1.6 Caratteristiche elettriche del legno

Le grandezze caratteristiche sono:

- **resistenza elettrica R** = resistenza che il legno oppone al passaggio di corrente elettrica;
- **conducibilità elettrica G** = capacità di un materiale a lasciarsi attraversare da corrente elettrica. (È l'inverso della resistenza elettrica  $\square G=R^{-1}$ ).

La resistenza (quindi anche la conducibilità elettrica) del legno dipendono dai seguenti parametri:

### - **Umidità:**

Il legno allo stato anidro è un buon isolante. All'aumentare del contenuto di umidità, diminuisce la resistenza elettrica molto rapidamente tendendo, in condizioni di saturazione delle pareti cellulari, a raggiungere asintoticamente all'incirca il valore dell'acqua. Per umidità "u" compresa tra il 5% e il 22% il logaritmo della resistenza elettrica è pressoché funzione lineare dell'umidità del legno. Questa dipendenza viene sfruttata per la misurazione elettrica dell'umidità del legno con apparecchi che determinano la resistenza elettrica.

### - **Temperatura:**

All'aumentare della temperatura, la resistenza elettrica diminuisce notevolmente. Nei metodi di misurazione elettrica dell'umidità è necessario, quindi, un fattore correttivo dovuto alla temperatura.

- **Massa volumica, struttura del legno, specie legnosa:**

A causa delle differenti masse volumiche e delle diverse sostanze contenute nel legno, l'appartenenza ad una determinata specie legnosa influenza fortemente la resistenza e la conducibilità elettriche del legno.

- **Direzione della fibratura:**

La resistenza elettrica del legno perpendicolarmente alla fibratura è doppia di quella parallelamente ad essa.

## 1.7 Difetti del legno e sue alterazioni degradative

Si indicano con l'espressione: *difetti del legno* tutte quelle deviazioni rispetto alla normalità date da cause varie derivanti da come si è formato il fusto arboreo per effetto dell'ereditarietà o delle condizioni ambientali e per effetto anche di cause accidentali.

Le *alterazioni degradative del legno*, invece, riguardano mutazioni causate da agenti biologici come per esempio batteri, funghi ed insetti e che colpiscono le pareti cellulari modificandone la composizione chimica, o addirittura demolendole, comportando una interruzione rispetto alla continuità. Tra le alterazioni degradative vengono anche inclusi gli effetti del fuoco o anche soltanto gli effetti di una elevata temperatura. E' ovvio che difetti e alterazioni portano ad una riduzione delle caratteristiche, con conseguente perdita di valore. Per questo motivo è fondamentale ricercare possibili cause in maniera da poter porre rimedio.

Anche l'ambiente e le condizioni climatiche possono influenzare le caratteristiche del legno. Si pensi, infatti, ad un periodo di tempo caratterizzato da annate calde e molto piovose seguito da un certo numero di anni in cui il clima si è presentato freddo e asciutto. Nel primo periodo si avrà un legno che sarà contrassegnato da anelli più larghi; nel secondo periodo, invece, il legno sarà caratterizzato da anelli piuttosto sottili. Si susseguiranno, dunque, due zone distinte che presenteranno differenze per massa volumica, compattezza ed elasticità. Successivamente, a causa di sollecitazioni agenti sul fusto, come ad esempio il vento, si potrebbe verificare un distacco delle due zone in corrispondenza dell'anello d'accrescimento che indica il passaggio dall'una all'altra zona.

Molto frequentemente si riscontra, soprattutto nel caso di fusti provenienti da foreste d'alta quota o soggetti a forti venti, il fenomeno della *fibratura elicoidale* (chiamata anche *fibra spiralata* o *fibra torta*). Succede che le fibre, invece che seguire la direzione dell'asse midollare, procedono a spirale, con un passo che a volte può essere anche molto ridotto. Tale fenomeno si può rilevare agevolmente all'atto della formazione di fessure conseguenti al ritiro.

Per alcune specie tropicali la deviazione della fibratura assume una caratteristica peculiare chiamata: *fibratura incrociata*. Essa riguarda una variazione periodica della direzione della fibratura.

Sempre per quello che concerne i difetti del legno si introduce il concetto di *legno di reazione*. Un albero radicato su pendii ripidi e soggetto a carichi per una lunga durata (come può essere il carico da neve) potrebbe essere soggetto a mutazioni per quanto riguarda l'andamento del suo asse geometrico e la forma della sezione

trasversale. Oltre ai difetti di forma, inoltre, esistono difetti strutturali e relativi alla costituzione chimica delle pareti cellulari che nascono come reazione a stimoli meccanici di lunga durata. Il comportamento sotto tali stimoli è generalmente molto diverso se si prendono in considerazione Conifere e Latifoglie. Infatti, per quanto riguarda le Conifere, il legno di reazione è localizzato nella parte di legno che, sottoposto al carico esterno, è soggetto a sforzi di compressione. Per questo motivo, più che di legno di reazione, si parla di *legno di compressione* (o più volgarmente *canastro*). Avvengono, così, delle modificazioni a livello della forma della sezione cellulare che passa da sub-poligonale a tondeggiante, con parete a prevalenza di lignina. Ciò conferisce al legno anche un colore rossastro-bruno e una massa volumica maggiore rispetto al legno tradizionale. Per quanto riguarda le Latifoglie, le variazioni hanno luogo nella porzione di legno che, sotto l'effetto del carico esterno, sono soggette a sforzi di trazione. Analogamente alle Conifere, in questo caso si parla di *legno di tensione*. Si nota la presenza, all'interno della cavità cellulari, di una strato gelatinoso di colore bianco con prevalenza di cellulosa. Anche in questo caso la massa volumica è superiore a quella che si riscontra nel legno tradizionale.

Al legno di reazione (che sia legno di compressione o di tensione) si accompagna anche un elevato ritiro soprattutto nella direzione assiale, il quale favorisce il distacco della porzione di legno anomala rispetto a quella sana.

Altri difetti che molto spesso si riscontrano nel legno da costruzione sono sicuramente i nodi. Con tale termine si vuole fare riferimento alle inserzioni dei rami nei fusti arborei. I nodi sono fonte di difetti da tre punti di vista diversi. Innanzitutto da un punto di vista estetico, in quanto il nodo è caratterizzato da una colorazione

differente rispetto al legno circostante. Inoltre in prossimità di esso si possono osservare delle fessurazioni. Data, poi, la maggiore durezza del legno dei rami rispetto a quello del fusto, la porzione di legno nelle più strette vicinanze di un nodo è certamente meno agevole nelle lavorazioni. Il terzo svantaggio è rappresentato dal comportamento del legno in prossimità di un nodo nei confronti del trasferimento dei carichi.

Indubbiamente il legno è molto esposto agli attacchi di organismi viventi e tale peculiarità è stata di certo una ragione che ha portato negli anni ad una scarsa considerazione del legno nel campo dell'edilizia. Attualmente, tuttavia, esistono diverse tecniche per limitare "l'attaccabilità" del legno e limitarne il deterioramento. E' opportuno quindi conoscere le cause dell'alterazione del legno e le tecniche e i mezzi per la sua protezione.

Gli insetti che attaccano il legno sono comunemente chiamati *tarli*. Con questa generale denominazione si intende una vasta famiglia di insetti che fra loro differiscono per forma, dimensione, biologia, modalità di attacco e preferenze. La distinzione più grossolana che viene effettuata in ambito scientifico è tra *parassiti* che vivono e si sviluppano a spese del legno e *saprofiti* che invece vivono a spese dei resti dei precedenti ospiti. I parassiti degli alberi sono molteplici e ognuno di essi ha una porzione di albero "di competenza" (foglia, frutto, corteccia, fiore, legno). Quelli che attaccano il legno scavano delle gallerie visibili ad occhio nudo che contribuiscono ad un forte scadimento delle proprietà meccaniche. I saprofiti scavano anch'essi delle gallerie al fine di utilizzare il legno come nutrimento oppure come ambiente adatto alla sussistenza. E' infine sbagliato considerare che in ogni caso avvenga un attacco da parte di

tarli negli elementi in legno dopo la messa in opera. E' necessario, infatti, che ci sia la deposizione delle uova affinché il legno possa essere infestato da parassiti o saprofiti. Da ciò si capisce che è fondamentale che venga adottato ogni rimedio atto a negare l'accesso al legno da parte di ogni tipo di insetto adulto che sia in seguito messo nelle condizioni di deporre le uova.

Le cause principali di deterioramento del materiale legno sono sostanzialmente tre:

- fungo vegetale del decadimento
- insetti lignivori
- organismi marini perforatori

Tutte e tre queste tipologie d'attacco possono essere contrastate tramite l'uso di prodotti chimici di preservazione appropriati, che vengono applicati sotto vuoto e a pressione oppure ad immersione e a pressione ambiente. Nel primo caso si usano: creosoto, pentaclorofenolo, vari sali e altri preservanti. Nel secondo caso, invece, i prodotti impregnanti e vernicianti possono essere applicati sia artigianalmente che manualmente tramite un pennello. Ognuno di questi trattamenti fornisce risultati più performanti se ripetuto periodicamente.



## **2. Il legno come materiale da costruzione**

### 2.1 Introduzione

L'impiego di un materiale nel campo delle costruzioni è e deve essere sempre conseguente ad una indagine, condotta nella maniera più accurata possibile, mirata alla conoscenza delle caratteristiche meccaniche del materiale stesso e al suo comportamento statico sotto l'azione dei carichi. Se, però, l'indagine viene eseguita con l'unico scopo di determinare i valori di resistenza per le varie sollecitazioni, tale analisi sarebbe errata o per lo meno incompleta per ogni tipo di materiale e soprattutto per il materiale legno. Questo, infatti, a differenza degli altri materiali come il calcestruzzo e l'acciaio, non è né un materiale coerente né omogeneo e né tanto meno isotropo, in quanto proviene da organismi viventi, gli alberi. Esso, in parole povere, è caratterizzato da una struttura che presenta cellule cave al suo interno con forme e orientamenti differenti e organizzate in tessuti rispondenti a diverse esigenze. I tessuti stessi sono influenzati da diversi fattori come ad esempio il clima, la natura del suolo, la vegetazione circostante, l'azione della fauna e dell'uomo. Sono proprio tutti questi parametri che determinano la disomogeneità dei tessuti, ossia la presenza di proprietà intrinseche molto variabili. Si può asserire inoltre che la variabilità di tali proprietà dipende anche dal volume dell'elemento che si prende in esame. Si giunge, quindi, da un lato alla conclusione che l'analisi del comportamento meccanico dovrà necessariamente essere condotta andando a valutare le

influenze dell'*effetto di scala*. Inoltre, per assicurare una certa probabilità di sicurezza ad una costruzione, bisognerà stabilire i limiti di variabilità delle caratteristiche meccaniche, in funzione della forma e delle dimensioni degli elementi strutturali.

Altro inconveniente legato all'utilizzo del legno come materiale da costruzione è rappresentato dalla possibilità che vi sia, durante la vita utile della struttura, un degrado di tipo biologico nei confronti degli elementi lignei, legato alle condizioni ambientali di posa in opera. Esso costituisce sicuramente uno svantaggio rispetto non tanto all'acciaio quanto al calcestruzzo, materiali questi che dal canto loro, sono invece maggiormente soggetti a deterioramenti dovuti a forti differenze di temperatura o agli effetti di gas o prodotti chimici.

E' inoltre comprensibile come le condizioni igrometriche non abbiano pressoché alcuna influenza sul comportamento statico di strutture realizzate in acciaio o in materiali lapidei e come invece influenzino fortemente le risorse di resistenza di elementi in legno.

Nonostante il materiale legno si prestasse (e si presta) bene alla realizzazione di elementi che lavorassero a flessione (grazie alla resistenza a trazione lungo la direzione delle fibre che invece risulta molto più ridotta nel calcestruzzo), in passato i dubbi che nascevano nei progettisti riguardo all'utilizzo del legno nelle strutture erano conseguenti alle incertezze di comportamento dovute sia alle cause sopra descritte ma anche all'esposizione nei riguardi di possibili attacchi da funghi o insetti. Oggi, tuttavia, esistono tecniche di prevenzione con le quali si possono annullare, o per lo meno ridurre, i rischi connessi a queste cause.

E' possibile oggi, ancora, ovviare ad un problema molto serio che condizionava fortemente in passato l'utilizzo del

legno come materiale da costruzione, ossia la forma e la dimensione dei fusti arborei. Si ricorre, infatti, all'uso delle *strutture composte* e precisamente alle *composizioni lamellari*.

Bisogna infatti precisare che nell'ambito edilizio le opere in legno possono impiegare prodotti e componenti in legno massiccio (o massello), ossia come viene naturalmente prodotto nella sua massa dall'albero, oppure in "legno ricostruito" (detto anche legno ricomposto o migliorato). Il primo è caratterizzato da migliori qualità in termini di reperibilità, lavorabilità, leggerezza, resistenza meccanica. Il secondo invece, realizzato frammentando e ricomponendo il legno naturale con diverse tecniche in maniera da generare un elemento che conservi la maggior parte delle caratteristiche e delle prestazioni del legno naturale, supera alcuni limiti dati dal primo:

- "limitazioni dimensionali" degli elementi strutturali derivanti dalla relativamente modesta lunghezza dei tronchi;
- anisotropia e disomogeneità della materia (la struttura del tronco presenta infatti zone diverse fra loro e le fibre sono orientate in una direzione preferenziale pertanto il materiale reagisce in maniera diversa in funzione della direttrice della sollecitazione);
- presenza di difetti con un grado di variabilità molto elevato da specie a specie e da tronco a tronco all'interno della stessa specie. La presenza dei difetti induce a considerare il legno massiccio poco affidabile dal punto di vista delle risorse di resistenza e porta, in fase di dimensionamento degli elementi strutturali, ad adottare coefficienti di sicurezza piuttosto elevati;
- qualità non costante delle forniture;

- difficoltà a produrre elementi curvi resistenti (a meno che non si usano complicate e non sempre applicabili metodologie di curvatura a vapore);
- costi a volte elevati nel caso in cui si prevedano elementi strutturali con lunghezze elevate e chiamati a sviluppare resistenze notevoli.
- Modulo elastico limitato ed elevate deformazioni differite.

Il legno è un materiale da costruzione "naturale" dalle grandi potenzialità. Perciò occorre tener conto della differenza tra i vari livelli di "struttura" del materiale e della loro influenza sul comportamento meccanico. La resistenza a trazione per le singole fibre di cellulosa è pari a circa  $8000 \text{ N/mm}^2$ , per il legno "privo di difetti" (detto anche legno "netto") è di circa  $100 \text{ N/mm}^2$  mentre per il legno in dimensione strutturale è di un ordine di grandezza più piccolo. Pertanto, in riferimento alle caratteristiche meccaniche delle fibre di cellulosa, solo una parte del potenziale di questo materiale può essere sfruttata.

Le sezioni dei provini di legno di dimensione ridotte hanno dimensioni fino a  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ . Nelle norme per le prove su campioni in dimensione strutturale, non sono stabilite dimensioni fisse degli stessi; i valori caratteristici si riferiscono, tuttavia, a larghezze o altezze di riferimento.

Si riporta una tabella in cui vengono mostrati gli intervalli di variazione dei valori di resistenza a trazione e compressione parallelamente alla direzione della fibratura, distinguendo fra provini di legno netto e provini in dimensione strutturale. I dati si riferiscono all'abete rosso.

<b>Valori nominali</b>	<b>Provini di legno netto</b>	<b>Provini in dimensione strutturale</b>
Resistenza a flessione [N/mm <sup>2</sup> ]	49÷78÷136	37
Resistenza a trazione parallelamente alla fibratura [N/mm <sup>2</sup> ]	21÷90÷245	30
Resistenza a compressione parallelamente alla fibratura [N/mm <sup>2</sup> ]	35÷50÷79	32

Dalla tabella si può osservare chiaramente come i valori nominali del legno privo di difetti non possano rappresentare, con sicurezza ed affidabilità, il comportamento meccanico dei prodotti di legno per le costruzioni. Le cause delle differenze che si presentano nei provini in dimensione strutturale, caratterizzati da forte dispersione delle proprietà, risiedono nei cosiddetti difetti della costituzione anatomica dei tronchi (caratteristiche della crescita, per esempio i nodi) nonché nella lavorazione (per esempio la segazione del legno tondo).

E' fondamentale che l'ingegnere progetti e realizzi le sue opere nel rispetto della sicurezza e dell'affidabilità. Devono essere quindi determinati i valori dei parametri riferiti al materiale in grado di rispondere a queste esigenze e di restituire, inoltre, il più verosimilmente possibile l'effettivo comportamento del materiale impiegato nella costruzione. Le grandezze caratteristiche del legno come materiale da costruzione devono quindi essere determinate su provini in dimensione strutturale.

Per rappresentare le caratteristiche meccaniche di un materiale, si fa uso del diagramma costitutivo. In esso sono visibili tutte le informazioni più importanti, legate alla resistenza ed alla rigidezza.

Può essere utile valutare l'andamento della legge tensioni-deformazioni di un provino di legno netto (ossia privo di difetti). Nel campo delle sollecitazioni non elevate, esiste una dipendenza lineare tra tensioni e deformazioni sia a trazione che a compressione. Il legno si comporta in questo campo elasticamente, ciò significa che allo scarico del provino le deformazioni si annullano totalmente. Di seguito è rappresentata la legge di Hook con i relativi termini.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon;$$

dove:

$\sigma$ =tensione normale;

$E$ =modulo di elasticità longitudinale;

$\varepsilon$ =dilatazione lineare;

$$\tau = G \cdot \gamma;$$

dove:

$\tau$ =tensione tangenziale;

$G$ =modulo di elasticità tangenziale;

$\gamma$ =scorrimento mutuo;

Dopo aver superato il limite di proporzionalità, bisogna distinguere tra un comportamento a trazione spiccatamente fragile ed uno a compressione di tipo duttile.

Come già precisato precedentemente il legno non è un materiale isotropo. In virtù della sua struttura, infatti, esso possiede caratteristiche meccaniche che assumono ordini di grandezza differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali:

- Longitudinale (L);
- Radiale (R);

- Tangenziale (T);

Negli impieghi strutturali, le caratteristiche meccaniche sono definite, di regola:

- parallelamente alla fibratura: in questa direzione la resistenza e la rigidità raggiungono i valori massimi; per questo motivo rappresenta la direzione portante principale;
- perpendicolarmente alla fibratura: la distinzione tra direzione radiale e tangenziale è difficilmente realizzabile ai fini del dimensionamento e non porterebbe a significativi vantaggi sia tecnici che economici nell'utilizzo pratico del legno. Per questo motivo, le caratteristiche in direzione radiale e tangenziale vengono riassunte per semplicità in "perpendicolarmente alla fibratura" (piano trasversale all'asse del tronco). Esse sono inferiori di quelle nella direzione della fibratura;

Le proprietà elastiche (modulo E), a differenza della resistenza, possono essere determinate in maniera non distruttiva. La correlazione tra il modulo di elasticità e la resistenza meccanica offre quindi la possibilità di valutare la resistenza del legno senza prove distruttive e rappresenta quindi un parametro essenziale per la classificazione del legno strutturale secondo la resistenza.

Le caratteristiche meccaniche del legno sono influenzate da una serie di parametri, quali:

- presenza di difetti nella costituzione anatomica (nodi, deviazione della fibratura, ecc.);
- direzione (longitudinale (parallela), trasversale (perpendicolare), inclinata) e tipo di sollecitazione (trazione, compressione, flessione, taglio, torsione);
- angolo tra la retta d'azione dei carichi e la direzione della fibratura;

- specie legnosa;
- massa volumica;
- umidità del legno;
- dimensioni del campione;
- velocità di applicazione dei carichi;
- durata di azione dei carichi (resistenza a carichi di breve e lunga durata);
- configurazione di prova.

## 2.2 Metodi di classificazione

Nel legno strutturale, le verifiche si eseguono, di regola, secondo la teoria tecnica della trave. Con le "classiche" grandezze caratteristiche di resistenza, determinate in base a prove di carico normalizzate, e le tensioni calcolate secondo la teoria tecnica della trave esiste quindi una correlazione tra la determinazione degli sforzi e i valori delle resistenze.

Per permettere un dimensionamento sicuro ed affidabile degli elementi strutturali di legno, devono essere conosciute le caratteristiche del materiale con sufficiente attendibilità. Le caratteristiche meccaniche del legno presentano una dispersione dei valori molto grande (il rapporto fra il valore più piccolo e quello più grande della resistenza a rottura di un elemento di legno segato può raggiungere 1:10). Ciò impedirebbe, in mancanza di una classificazione efficace, di impiegare il legno quale elemento strutturale in modo adeguato.

La procedura di classificazione del materiale si prefigge di ottenere l'effetto seguente:

- formazione di classi di resistenza con proprietà differenziate e valori caratteristici affidabili;



- distribuzione dei valori delle proprietà meccaniche più ridotta all'interno delle singole classi di resistenza rispetto alla totalità del materiale (si definisce questo effetto come "omogeneizzazione" del materiale).

In dipendenza dall'utilizzazione prevista, il materiale può essere classificato prevalentemente secondo:

- la resistenza (resistenza e/o rigidità);
- l'apparenza estetica (criteri di classificazione specifici all'estetica o alla conformazione della superficie);
- esigenze in relazione all'utilizzazione prevista (fessurazione, stabilità dimensionale).

La classificazione secondo la resistenza avviene principalmente secondo due metodi:

- la classificazione visiva;
- la classificazione meccanica.

Per la classificazione visiva si applicano criteri visibili e riconoscibili senza l'uso di apparecchi particolari. Per il legno di Conifere si tratta principalmente di:

- nodi;
- inclinazione delle fibre;
- ampiezza degli anelli di accrescimento;
- eventualmente posizione nel tronco o nella sezione.

Il principio della classificazione visiva si basa sul fatto che esiste una correlazione, più o meno buona, tra i singoli criteri riconoscibili visivamente (per esempio la grandezza dei nodi) e le caratteristiche meccaniche del materiale. Mediante prove di carico a rottura di elementi strutturali di legno massiccio in dimensione reale, o sulla base della lunga esperienza della classificazione visiva, sono definiti i valori limite per ogni singolo criterio.

I vantaggi della classificazione visiva sono:

- le prescrizioni e le regole di classificazione sono semplici e facili da mettere in pratica;
- l'applicazione senza l'ausilio di apparecchiature specifiche è possibile;
- in caso di esecuzione precisa e coscienziosa, in relazione all'impiego delle risorse necessarie, si ottengono buoni risultati, cioè la classificazione offre sufficienti garanzie di affidabilità ed efficienza;
- una verifica ulteriore della classificazione di elementi già messi in opera è, in linea di principio, possibile.

Gli svantaggi della classificazione visiva sono:

- la classificazione è soltanto parzialmente riproducibile, in quanto spesso il giudizio soggettivo del personale preposto gioca un ruolo importante;
- il risultato finale dipende anche dalle condizioni di lavoro e dalla concentrazione del personale preposto alla classificazione;
- la classificazione visiva richiede un impiego notevole di personale;
- la classificazione in classi di resistenza "elevate" non è possibile tramite la classificazione visiva; il potenziale del materiale classificato non può quindi essere sfruttato completamente;
- le regole di classificazione piuttosto semplici non permettono di tener conto di tutti gli effetti e parametri di classificazione: il parametro di classificazione "peggiore" determina la classificazione.

Di seguito si riporta il procedimento di classificazione definito con il nome di "Metodo del carico effettivo (proof-loading)". Esso prevede che gli elementi di legno segato vengano sottoposti ad una sollecitazione definita

(carico effettivo). In caso di non rottura dell'elemento sotto l'azione di questo carico, esso viene assegnato ad una determinata classe di resistenza ed utilizzato come elemento strutturale. Il livello di carico usato per questa procedura è compreso tra il frattile al 2% e al 5% del valore caratteristico della resistenza della classe considerata.

La classificazione meccanica permette di considerare anche criteri non analizzabili in modo visivo, quali, ad esempio, la densità del materiale o il valore del modulo di elasticità. In questo caso, i criteri di classificazione vengono infatti riconosciuti e analizzati da un'apparecchiatura automatizzata, senza danneggiare in alcun modo il materiale.

Il criterio meccanico di classificazione più importante è il modulo di elasticità  $E$ , in quanto permette una correlazione con la resistenza più marcata rispetto agli altri criteri.

I vantaggi della classificazione meccanica sono:

- a causa delle suddivisione più efficiente del materiale nelle classi di resistenza, si ottiene un coefficiente di variazione più piccolo e quindi una migliore suddivisione del materiale (varianza più piccola). Ne risulta quindi una classificazione più efficace;
- la classificazione è documentata e ripetibile;
- il potenziale meccanico del materiale può essere sfruttato meglio, in quanto possono essere formate classi di resistenza con caratteristiche meccaniche migliori;
- la capacità di classificazione meccanica dei sistemi più moderni raggiunge i 300 metri lineari di materiale al minuto.

Gli svantaggi della classificazione meccanica sono:

- l'impegno finanziario per l'acquisto, la messa in esercizio e l'omologazione di un impianto di classificazione meccanica è molto importante. Gli impianti per la classificazione meccanica, e il risultato della classificazione da essi ottenuta, devono essere sottoposti regolarmente a controlli e verifiche sia interni allo stabilimento di produzione, sia esterni, cioè ad opera di istituti appositamente accreditati;

- il risultato della classificazione, e in particolar modo dopo che gli elementi in questione siano stati messi in opera, può essere ricostruito o controllato soltanto per mezzo di impegnativi sistemi di controllo della qualità e protocollo delle procedure;

- il personale addetto alla gestione e all'esercizio della classificazione meccanica deve essere istruito e qualificato secondo criteri ben definiti.

I sistemi di classificazione meccanica usati più frequentemente in Europa sono:

- la misura del modulo di elasticità (misura tramite flessione o modulo E "statico");

- la misura di parametri relativi alla propagazione di onde o vibrazioni (frequenze di risonanza, propagazione degli ultrasuoni, ecc.);

- i metodi basati sui raggi x (il principio delle radiografie);

## 2.2.1 Normativa per la classificazione

Di seguito sono indicate le norme che hanno rilevanza per la classificazione meccanica del legno strutturale:

### 1) Normativa europea

Le indicazioni per la classificazione secondo la resistenza si trovano nella EN 14081. Un sistema di classi di resistenza per il legno segato per uso strutturale si trova nella EN 338. Vi sono definite 12 classi di resistenza (C14 fino a C40) per il legno di Conifere e sei classi di resistenza per il legno di Latifoglie. Sono indicati i valori caratteristici della resistenza, della rigidezza e della massa volumica. La corrispondenza delle categorie di classificazione visiva attualmente in vigore a livello nazionale con le classi di resistenza europee, sulla base della norma EN 338, è regolamentata secondo la norma EN 1912.

### 2) Norme nazionali italiane

In Italia la classificazione visiva secondo la resistenza del legno strutturale avviene sulla base della UNI 11035:2003. La norma UNI 11035-1:2003 descrive la determinazione dei criteri di classificazione. La norma UNI 11035-2:2003 regola i criteri di classificazione per le diverse classi di resistenza in modo diverso per 3 gruppi di specie legnose:

- 1) "Conifere 1" (Abete rosso, Abete bianco, Larice e alcune altre specie di Conifere) nelle tre S1, S2 e S3;
- 2) "Conifere 2" (Douglasia) nelle due classi S1 e S2/S3;
- 3) "Latifoglie" (Castagno, Quercia, Pioppo, Faggio, Ontano, Robinia, Frassino e Olmo) in un'unica classe S.

Divisi secondo le diverse classi di resistenza e secondo le diverse specie legnose vengono indicati i valori caratteristici.

### 2.3 Misura del modulo E statico

Il materiale da classificare attraversa una serie di rulli che ne costringono la flessione; le forze e gli spostamenti in gioco vengono determinati a mezzo di sensori appositi. Tenendo conto delle dimensioni della sezione dell'elemento cui si riferiscono le misure e della geometria del sistema di rulli (di regola a distanza fra 600 e 1200 mm fra di loro), si può determinare in modo numerico il modulo di elasticità E.

La misura viene effettuata in continuità e l'assegnazione dell'elemento ad una classe di resistenza avviene sulla base del valore di E più piccolo misurato, oppure sulla base del valore più piccolo di un parametro di classificazione determinato sulla base anche di ulteriori valori misurati. Questo sistema è adatto per spessori del materiale da classificare fino a 80 mm ed è impiegato essenzialmente per la classificazione di tavole e di lamelle per la produzione di legno lamellare incollato.

### 2.4 Resistenza al fuoco

Un particolare (e sicuramente anche un po' paradossale) vantaggio dell'utilizzo del materiale legno nel campo delle costruzioni è legato al comportamento di tale materiale nei confronti del fuoco: infatti una struttura in acciaio, caratterizzata in generale per altro da un basso livello di iperstaticità, soggetta ad un evento eccezionale quale potrebbe essere un incendio, è caratterizzata da una crisi piuttosto improvvisa, in quanto è molto facile che,

collassando un elemento, venga a mancare la resistenza globale della struttura (bisogna comunque sottolineare che una struttura d'acciaio offre il vantaggio di preannunciare il suo indebolimento, causato da un incendio, con una progressiva forte deformazione, oltre che col cambiamento di colore). Una struttura realizzata in legno, invece, non collassa, anzi le fiamme e il calore creano sulla superficie una carbonizzazione, che limita il propagarsi della combustione all'interno. Esistono, inoltre, oggi, delle *vernici intumescenti* che aumentano quello strato protettivo creando, col calore, un rigonfiamento del film di vernice (anche di diversi centimetri) che fa da barriera al fuoco. E' possibile affermare, pertanto, che esistono materiali non combustibili la cui resistenza, in occasione di un incendio, può ridursi notevolmente e materiali, invece, che nonostante siano combustibili (ed è il caso del legno) in caso d'incendio, per lungo tempo, non mostrano sensibili riduzioni della capacità portante. Tali strutture, inoltre, durante un evento di questo tipo, sono in grado di assolvere ad altre funzioni come ad esempio quella d'isolamento termico o di barriera contro fumi o fiamme.

Per la valutazione della resistenza al fuoco è possibile ricorrere al metodo degli stati limite. Esso permette di stabilire con semplicità qual'è la resistenza di un elemento strutturale in seguito ad un evento eccezionale come un incendio, facendo riferimento ad una sezione di legno residua.

Prendendo in considerazione la velocità di avanzamento della carbonizzazione è possibile, da un lato, dimensionare ciascun elemento strutturale in maniera da assicurare una certa resistenza al fuoco e, dall'altro, verificare elementi già dimensionati, andando a rilevare la resistenza al fuoco. La velocità di carbonizzazione, nel caso in cui

non siano disponibili risultati di prove sperimentali, può essere assunta pari a:

- per legno di conifere europee:  
0,8 mm/min (per legno massiccio);  
0,7 mm/min (per legno lamellare);
  
- per legno di latifoglie dure:  
0,6 mm/min (per legno massiccio).

Si farà riferimento, inoltre, alle combinazioni di carico contemplate dal metodo degli stati limite, nel caso di eventi eccezionali:

$$F_d = G_k + Q_{dk} \quad 2.4.1$$

dove:

$F_d$  rappresenta il valore di calcolo delle azioni;

$G_k$  rappresenta il valore caratteristico delle azioni permanenti;

$Q_{dk}$  rappresenta il valore quasi permanente dei carichi variabili.

## 2.5 Corrispondenze fra il legno e l'acqua in esso contenuta

Nel legno, prima e dopo l'abbattimento, è presente acqua libera dentro le cavità cellulari, sotto forma liquida (linfa) o di vapore. E' presente anche dell'acqua collegata in modo complesso alle pareti cellulari. In tutte queste tre diverse forme, l'acqua contenuta rappresenta l'umidità, che viene espressa dal rapporto fra l'acqua contenuta e il peso del legno anidro espresso in percentuale. Per poter valutare il comportamento del legno è importante conoscere il contenuto d'umidità prima e dopo l'abbattimento, quando questo viene ridotto in assortimento (tavole, travi, ecc..). Quando il legno è ancora in piedi il contenuto di



umidità è molto alto ed è difficile stabilire un valore numerico preciso, in quanto si riscontrano notevoli differenze fra le diverse specie legnose, fra le diverse porzioni dell'albero e durante le diverse stagioni. Appena tagliato, un tronco non ha umidità inferiore al 50%. Addirittura un pioppo appena tagliato può avere una umidità che raggiunge il 300% (il peso dell'acqua è 3 volte quello secco). Dopo che l'albero è stato tagliato e ridotto in assortimenti la superficie esterna dei vari elementi viene a contatto con l'aria ambiente che contiene anch'essa un certo grado di umidità. Si stabilisce, pertanto, un equilibrio fra i due diversi contenuti di umidità, a partire da un'evaporazione dell'acqua superficiale, con conseguente migrazione di acqua dalle zone più profonde a quelle più superficiali. Il processo appena descritto porta al cosiddetto fenomeno dell'*essiccamento*. E' importante precisare, comunque, che all'essiccamento non è legato in generale all'evaporazione di tutta l'acqua. Esso, invece, sta ad indicare soltanto il raggiungimento di uno stato di equilibrio fra l'umidità del legno e quella dell'ambiente circostante. Inoltre il fenomeno del *desorbimento* è completamente reversibile: può, quindi, accadere che se in un primo tempo si verifica una migrazione di una parte dell'acqua dal legno all'ambiente, a causa di un cambiamento del contenuto di umidità dell'ambiente (o semplicemente spostando l'elemento di legno in un altro ambiente con un altro contenuto di umidità), il raggiungimento del nuovo stato d'equilibrio porta ad un nuovo contenuto di umidità all'interno del pezzo di legno. A proposito dell'essiccamento si può citare un esempio concreto: ad una temperatura attorno ai 20°C il legno fresco, che inizialmente ha un'umidità del 60%-65%, raggiunge, all'equilibrio, un contenuto di umidità del 12% del peso anidro. Convenzionalmente tale valore di umidità

viene chiamata *umidità normale*. Il legno esposto alle variazioni igrometriche dell'ambiente esterno contiene una umidità del 15 - 18%. Per locali chiusi e molto riscaldati, invece, l'umidità può scendere fino al 10 - 8%. Infine, il legno utilizzato nelle costruzioni stradali, idrauliche e navali, non ha bisogno dell'essiccamento prima della posa in opera.

L'umidità si stabilisce andando inizialmente a misurare il peso di un provino di legno al momento della consegna ( $P_u$ ). Successivamente si scalda il provino ad una temperatura di 102-104°C fino a che 2 pesate successive ad almeno 2 ore di distanza l'una dall'altra diano lo stesso valore ( $P_a$ ). A questo punto l'umidità percentuale sarà espressa come:

$$u = \frac{P_u - P_a}{P_a} \times 100; \quad 2.5.1$$

Attualmente per misurare l'umidità del legno si utilizzano solitamente degli igrometri, che sono di facile reperimento sul mercato. Essi si basano sulla variazione della resistenza e delle proprietà dielettriche al variare dell'umidità. Bisogna comunque tenere in considerazione due circostanze: la possibile presenza di un gradiente di umidità fra i punti dove si inseriscono gli elettrodi e il campo di variazione dell'umidità: l'esperienza mostra come risultati attendibili si possano ottenere soltanto in un campo di variazione dell'umidità da 5%-6% a 32%-35%.

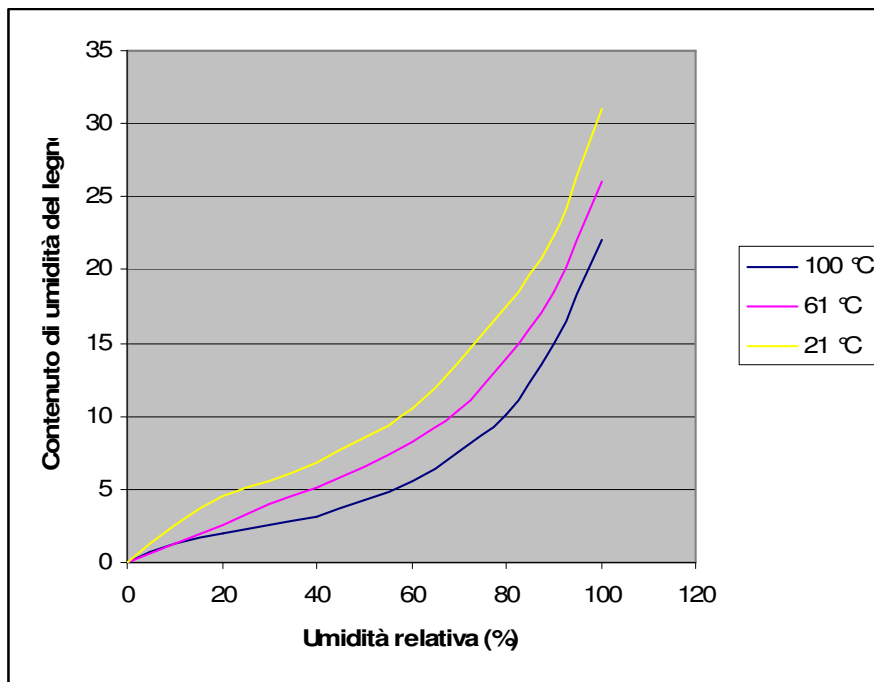
L'essiccamento naturale porta l'umidità del legno a valori che non sono mai minori di 11%-12%. Per tale motivo spesso si ricorre a metodologie di essiccamento artificiali, tramite diversi sistemi (ad aria calda, a condensazione, a depressione) che consentono di ottenere ottimi risultati in tempi brevi.

Le motivazioni che spingono ad effettuare l'essiccamento degli elementi in legno sono essenzialmente tre:

- scongiurare forti variazioni dimensionali conseguenti alla variazione dello stato igrometrico dell'aria;
- fare in modo che il legno sviluppi la più elevata resistenza ai carichi;
- aumentare la durabilità naturale del legno nei riguardi degli attacchi di funghi e insetti.

L'anisotropia del legno si manifesta in diversi modi: fra tutti spicca quello più appariscente e che è legato alla diversità dei movimenti nelle tre direzioni anatomiche.

Negli alberi non ancora abbattuti le cellule hanno la cavità interna più o meno riempita di linfa, sono turgide e non esistono discontinuità infracellulari. Le pareti poi sono sature d'acqua. Dopo l'abbattimento, l'acqua contenuta all'interno delle cavità cellulari cala progressivamente fino ad annullarsi; rimane invece l'acqua presente nelle pareti cellulari. Questo punto di passaggio è chiamato *punto di saturazione (totale) delle pareti cellulari* e corrisponde ad una umidità compresa tra il 30% e il 35% riferita al peso anidro del legno. Tale situazione è fondamentale in quanto fino a questo punto si riscontra che le dimensioni dell'elemento di legno rimangono costanti in tutte le direzioni. Nel momento in cui, invece, il contenuto d'acqua connesso alle pareti cellulari va via via riducendosi si possono notare variazioni (diminuzioni) delle dimensioni dell'elemento di legno che vengono indicate col termine *ritiro*. Il ritiro è strettamente connesso con l'assorbimento e il rilascio di acqua da parte del legno. Dal canto suo, il legno assorbe e cede umidità in funzione sia, come è già stato detto, dell'umidità dell'ambiente esterno ma anche in funzione delle condizioni di temperatura, come si può vedere dal grafico seguente.



Queste variazioni dimensionali sono diverse a seconda della direzione che si considera perché sono diverse, nelle diverse direzioni, le rigidità del materiale. Pertanto è normale accorgersi che nella direzione assiale, dove il legno è più rigido, l'entità del ritiro sarà più bassa. Si riportano i valori percentuali del ritiro nelle tre direzioni nel passaggio da stato fresco a stato anidro:

- direzione assiale (ossia lungo le fibre): < 1%;
- direzione radiale: fra il 3% e il 6%;
- direzione tangenziale: fra il 5% e il 12%;

E' bene precisare, comunque, che, come anche si è detto in precedenza, le condizioni di equilibrio del legno con l'aria non sono mai tali da comportare lo stato anidro del legno. Ciò, quindi, porta a considerare che i valori sopra riportati del ritiro nelle tre direzioni risultano maggiori dei rispettivi valori di ritiro che si riscontrano nella realtà. Si può asserire che per la direzione assiale si avrà un ritiro dell'ordine dello 0,25% mentre nelle due direzioni trasversali si avrà mediamente un campo di variazione del 3%-5%. Per ciò detto in precedenza e cioè

per il fatto che come il legno può essere soggetto a fenomeni di ritiro esso può rigonfiare, presa in considerazione una certa direzione, i movimenti del legno vanno intesi in un senso ma anche nell'altro e nonostante le variazioni dimensionali conseguenti a pari intervalli di desorbimento e assorbimento non siano proprio coincidenti a causa di una certa isteresi, essi si possono considerare comunque della stessa entità (l'errore che si commette si può considerare piccolo).

Per quanto riguarda le tavole, la diminuzione dell'umidità del legno fresco porta, oltre al ritiro, a delle deformazioni che variano di aspetto e di entità a seconda di come gli elementi sono orientati rispetto agli anelli di accrescimento. Mentre le tavole tagliate esattamente lungo una direzione radiale subiscono soltanto una riduzione dimensionale, rimanendo piane, le tavole tagliate tangenzialmente si curvano verso l'esterno dando luogo al fenomeno noto con il nome di *imbarcamento*. Tale fenomeno risulterà tanto più evidente, quanto più la tavola viene tagliata lontano dal midollo.

Per quello che concerne, invece, i tronchi, con il procedere della stagionatura la differenza fra il ritiro radiale e quello tangenziale provoca delle aperture a "V" che partono dal midollo con una direzione radiale. Essendo poi la circonferenza una funzione di primo grado del raggio, se la deformazione di quest'ultimo fosse uguale in percentuale alla deformazione della circonferenza periferica, non si avrebbero fessure. Invece la ineguaglianza dei ritiri nelle due direzioni porta ad avere delle fessure di ampiezza crescente dal midollo fino alla porzione periferica della sezione.

Il caso delle travi può presentare al fine della deformazione da ritiro, due comportamenti diversi a seconda che la sezione della trave contenga l'asse midollare del

fusto (ci si riferisce, in altre parole, al caso in cui la trave sia "centrata") o meno. La prima situazione è senz'altro la più frequente, almeno per sezioni con lati da 18-20 cm in su. In questo caso si ha sempre una corona circolare che circonda il midollo nella quale la differenza fra il ritiro tangenziale e quello radiale si manifesta con una fenditura, analogamente a quello che avviene nei tronchi. Tale fenomeno è del tutto naturale e intrinseco nella natura del legno, pertanto non imputabile ad errori di essiccazione o posa in opera. E' importante considerare che le fessure a V seguono la direzione longitudinale delle fibre. Pertanto esse sono un valido aiuto nella determinazione della direzione reciproca delle fibre rispetto all'asse della trave. Inoltre in tale modo si può capire se la direzione della fibratura è deviata dalla presenza di nodi, che potrebbero rappresentare un serio pericolo nei riguardi delle capacità di resistenza dell'elemento strutturale e pertanto bisognerà tenerne in considerazione al momento della scelta degli elementi da mettere in opera e del loro collaudo. Nel caso in cui si abbia un elemento sottoposto a flessione, è rilevante anche considerare la direzione reciproca fra la direzione delle fessure e quella del carico. Infatti, se la fessura è orientata nella direzione del carico, la presenza della fessura pregiudica in minore misura le risorse di rigidità flessionale dell'elemento. Nel caso in cui, invece, la fessura sia orientata ortogonalmente rispetto alla direzione del carico, si potrebbe avere una fessurazione così accentuata da provocare una mancanza di collaborazione fra la porzione sovrastante e quella sottostante rispetto alla fessura, con conseguente forte riduzione dell'inerzia della sezione e dunque della rigidità dell'elemento strutturale.

Prendendo in considerazione il caso di travi e travetti di dimensioni contenute, in genere manca la corona circolare che circonda il midollo e quindi non si verificheranno fenditure. Ci sarà, certamente, ritiro che comunque si manifesterà con delle riduzioni dimensionali che potranno determinare deformazioni più o meno importanti.





### **3. Cenni sulla canapa**

#### 3.1 Introduzione e Caratteristiche della pianta

La canapa è una pianta erbacea annua appartenente alla famiglia delle Cannabinacee. Presenta una radice fittonante che si approfondisce notevolmente nei terreni adatti. Il fusto è eretto, sottile, alto fino a 4 m, non ramificato se la semina è fitta. Le foglie sono palmato-lobate e formate da 7-10 foglioline molto allungate ed a margine seghettato. Il seme è un achenio (1000 semi pesano 15-20 grammi).

#### 3.2 Esigenze pedo-climatiche

La canapa è una coltura che predilige terreni mediamente fertili e profondi, può succedere a se stessa (2-3 anni) senza che il terreno accusi fenomeni di stanchezza. Si adatta ad un range climatico che va dal sub-tropicale al temperato ed essendo molto sensibile al freddo va seminata quando la temperatura del terreno ha ormai raggiunto i 10 gradi centigradi (dalla metà di marzo in avanti).

#### 3.3 Biologia e tecnica colturale

Il seme della canapa ha bisogno, viste le piccole dimensioni, di una accurata preparazione del letto di semina, per cui si deve operare con una aratura profonda circa 50 cm nel periodo di fine estate seguita da 1 o 2 erpicature durante le quali si provvede anche alla concimazione di fondo e se possibile a quella organica con 200 quintali ad ettaro di letame. La concimazione minerale si avvale di 2,5-3 q.li/Ha di concime minerale ternario (tipo 20-10-10) ed eventualmente 1 q.le/Ha di concime

minerale azotato in copertura. Da prove effettuate all'Istituto di Agronomia della Facoltà di Agraria di Bologna è emerso che somministrare dosi di azoto superiori ad 80 unità ad ettaro non porta ad ulteriori aumenti di prodotto sia in quantità che in qualità. Il periodo ottimale per effettuare la semina si colloca tra la metà di marzo ed i primi di maggio, a seconda delle zone e delle varietà impiegate, utilizzando 50-60 Kg di semente ad ettaro. La semina si esegue con una normale seminatrice universale ponendo gli organi distributori a 15-18 cm di distanza e con una profondità di semina di 2-3 cm in modo da ottenere una densità iniziale di popolamento di 150-200 piante a metro quadrato. Al momento della raccolta il popolamento si ridurrà a 120-150 piante a metro quadro o, nelle condizioni peggiori, a 80-100. Dopo la semina, tra maggio e giugno, si esegue la concimazione di copertura con il fertilizzante azotato. Altra operazione, non sempre necessaria durante la coltivazione, è una eventuale sarchiatura avente lo scopo di controllare le erbe infestanti, ridurre l'evaporazione, aerare lo strato superficiale del terreno e aumentare l'infiltrazione dell'acqua. Il massimo fabbisogno idrico della canapa si colloca durante il periodo di allungamento degli steli che dura dalle 5 alle 6 settimane nei mesi di giugno luglio; se l'acqua scarseggia in questa fase è consigliabile irrigare con circa 1500 metri cubi d'acqua. Se seminata a tempo la canapa non necessita dell'utilizzo di diserbanti chimici visto che il suo accrescimento è molto rapido ostacolando lo sviluppo alla maggior parte delle malerbe. La raccolta avviene normalmente nel periodo che va dai primi di agosto fino alla metà di settembre. Questa può essere eseguita con le normali macchine per la fienagione e preferibilmente con falcia - condizionatrici che riducono i tempi di essiccamento. L'altezza del taglio

può variare dai 3 ai 5 cm dal livello del terreno; il taglio più alto facilita l'aerazione dell'andana e quindi l'essiccamento. Il prodotto essiccato andrà poi rotoimballato facendo attenzione al peso delle rotoballe (da 100 a 400 Kg) e soprattutto all'umidità degli steli in modo da evitare nocivi fenomeni di fermentazione della massa imballata (UR ottimale 18%). La produzione di bacchette (fusto della pianta priva di foglie) si aggira dalle 10 alle 18 tonnellate per ettaro.

### 3.4 Avversità

Poche sono le avversità vegetali ed animali che colpiscono la canapa. Per le infestanti abbiamo detto precedentemente che se la canapa è seminata per tempo le malerbe non riescono a svilupparsi; i ritardi nella semina possono facilitare la crescita di erbe tipo *Abutilon* e/o *Amaranthus* e/o *Convolvulus* ecc., tipiche infestanti del mais. L'entomofauna presente sulla canapa, raramente a livelli epidemici riguarda Lygaeidi e Pentatomidi che danno il caratteristico "cimiciato", alcuni coleotteri del genere *Opatrum* e *Crepidodera* e diversi lepidotteri tra cui quello potenzialmente più pericoloso *Ostrinia nubilalis* (piralide); questi insetti, quando presenti, si stabiliscono nelle diverse parti della pianta, dalle radici al fusto, alle foglie fino alle infiorescenze (Entomologia Applicata).

### 3.5 Miglioramento genetico

Il lavoro di miglioramento genetico della canapa era intenso prima del declino di questa coltura già negli anni '50-'60 ed è stato ripreso recentemente anche in Italia; solo in Francia si può dire che tale lavoro non si è mai interrotto. I principali temi di ricerca del breeding della pianta sono stati:

- miglioramento della produzione di steli,
- miglioramento per il contenuto in fibra,
- abbassamento del contenuto di THC,
- resistenza alle malattie ecc.

Data la dioicità della canapa uno dei problemi maggiori è rappresentato dalla maturazione in periodi diversi delle piante maschili rispetto alle femminili; col miglioramento genetico si è riusciti ad ottenere varietà monoiche (la maggior parte francesi) che hanno risolto il problema anche se recenti studi hanno dimostrato la minore produttività sia quantitativa che qualitativa di queste rispetto alle varietà dioiche.

### 3.6 Varietà

Prendiamo in considerazione solo 3 varietà. Di queste, 2 sono varietà monoiche francesi (Fedrina 74 e Futura) e l'altra è una varietà dioica italiana (Fibranova).

**Fedrina 74 e Futura:** sono ibridi, derivanti dall'incrocio di varietà monoiche, con diverse varietà dioiche da fibra. Sono queste due varietà che presentano una diversa data di

fioritura (giugno - luglio) mentre la breve durata del ciclo è pressoché uguale (maturazione tra la fine luglio e la metà di agosto)

**Fibranova:** è una varietà selezionata a partire dalla Carmagnola (var. italiana più famosa). Rispetto alle varietà monoiche francesi che hanno un ciclo relativamente breve, la dioicità conferisce alla Fibranova una durata del ciclo vegetativo e quindi della maturazione molto più lunga (maturazione tra agosto e settembre).

Le fibre della corteccia ed in particolare quelle di canapa possiedono in natura un alto grado di variabilità e come prezioso materiale grezzo sono adatte alla più grande varietà di usi industriali. La tradizionale lavorazione della canapa è ad un livello tecnologico che risale a cinquant'anni fa, di conseguenza improduttivo. Al fine di realizzare prodotti competitivi e di usare le molteplici proprietà della fibra di canapa in senso economico ed ecologico, è indispensabile lo sviluppo o l'applicazione di metodi di lavorazione. A prescindere dal fatto che le fibre di canapa possano venire adottate per usi tessili o tecnici, si dovrebbe essere in grado di lavorarle su macchinari e nelle industrie già esistenti senza coinvolgere nuovi ed estesi sviluppi. La tecnologia dell'esplosione a vapore consente la realizzazione di fibre speciali che possono essere modificate in base ai prodotti oppure alle esigenze dei test. Attraverso l'adattamento del processo ingegneristico, si possono produrre manufatti di fibre "su misura", come, per esempio, nuovi tipi di filati di canapa creati nelle filature per il cotone; lo stesso criterio può essere applicato alla produzione di fibre speciali usate nell'industria della lana (pettinato di lana o filati di lana), o per specifici usi tecnici come tessuti

non filati, elementi filtranti, ecc.

Nelle spiegazioni seguenti verranno chiarite le problematiche della lavorazione della canapa e verrà stilata una lista delle necessità di nuovi metodi e possibilità. Saranno inoltre menzionate, con esempi tratti dai risultati di alcune ricerche, le numerose opportunità della tecnica dell'esplosione di vapore per la realizzazione di nuovi ed innovativi prodotti della canapa.

### 3.7 La lavorazione tradizionale della canapa

La lavorazione tradizionale della canapa può generalmente essere divisa in tre settori:

#### 1. Lavorazione della fibra lunga

La lavorazione della fibra lunga di canapa è principalmente usata nella produzione di filati di canapa a filatura bagnata. A causa delle dimensioni delle fibre, si possono impiegare solo macchine speciali con un basso grado di automazione, ma per gli alti costi di investimento non possiamo aspettarci, nel prossimo futuro, sviluppi nel campo della tecnologia della lavorazione a macchina. Dopo la raccolta e dopo aver completato il processo di macerazione (macerazione con rugiada, macerazione con acqua), i fusti di canapa "defogliati" vengono poi seccati, liberati dal nocciolo di legno in una sequenza di procedimenti quali: pigiatura, spezzatura e gramolatura. Con l'uso del cosiddetto ammorbidente o rullo, le fibre scorticate vengono rese più tenere e flessibili. L'accorciamento della lunghezza iniziale della fibra da 3m. a 650mm è effettuato da una speciale macchina da taglio. Le fibre corte ed intricate vengono pettinate, quelle lunghe invece, parallelizzate e lisciate con una macchina per la

scapecciatura. Dopo alcuni passaggi di tiratura e doppiatura, i frammenti manufatti sono prefilati in filati cardati e, a seconda della qualità della finezza desiderata, filati in filo di canapa attraverso processi di filatura a secco o con acqua.

## 2. La lavorazione della canapa

Il termine stoppa viene dato a quelle fibre derivate dai processi di gramolatura e scapecciatura. Esse sono separate dalle fibre lunghe, più corte ed ancora contenenti per gran parte legno, particelle di sporcizia o rifiuti. Nella lavorazione della stoppa, la stoppa della gramolatura e della scapecciatura viene filata a filo grezzo o cordame in un processo di filatura bagnata o a secco a seconda dei diversi livelli di purezza, inclusa la raffinatura e la pettinatura, con diverse macchine per la cardatura (cardatura di diverse intensità). Alcuni tipi di stoppa, assieme alle fibre non filabili, sono lavorati per realizzare prodotti tecnici come materiali per l'isolamento e modanature. Con queste fibre di "bassa qualità", esiste ancora un grande potenziale per migliorare il loro valore aggiunto. Attraverso nuovi metodi di lavorazione, le applicazioni per la stoppa, che racchiudono nel suo prodotto un valore aggiunto, possono essere incrementate.

## 3. Cotonizzazione

Nel secolo scorso erano già state effettuate delle ricerche concernenti la cotonizzazione della canapa. A causa di una più vasta produttività nell'industria cotoniera rispetto all'industria della fibra, le fibre venivano ordinate in base alla lunghezza ed alle caratteristiche tecniche di filatura in accordo con quelle del cotone (cotonizzazione), così che la loro lavorazione potesse essere realizzata con

le macchine per il cotone. Le sostanze appiccicose come la pectina o la lignina, responsabili della tenacia nei filati in acqua di canapa, devono essere rimosse per quanto possibile nel processo di cotonizzazione per ottenere un isolamento più o meno completo delle singole fibre. Tutto ciò può essere fatto sia attraverso l'utilizzo di vari metodi di elementarizzazione che con metodi di cotonazione puramente meccanica oppure meccanico-chimica. Non essendo più possibile la filatura di cellule di fibre completamente isolate, la fibra dovrebbe essere completamente elementarizzata nella produzione di fibre cotonizzate; con questo metodo non tutta la quantità di sostanze che l'accompagnano viene rimossa ottenendo così più cellule viste come un fascio di fibre. Un processo di cotonazione originale presenta sempre "un grado di fluttuazione" tra una totale elementarizzazione (perdita di filabilità), ed una insufficiente elementarizzazione delle fibre per la produzione di un buon filato di qualità, che finisce per essere un fascio di fibre troppo grezze.

### 3.8 Nuove possibilità ed utilizzazioni

Per garantire alle fibre di canapa una competitività a lungo termine ed una posizione nel mercato, le sue potenzialità devono essere incrementate attraverso nuovi prodotti e nuovi utilizzi. Una volta consolidato il più alto grado di efficacia, si possono realizzare prodotti impiegati nel campo tessile. Prendendo atto dei problemi nella lavorazione tradizionale della canapa, pare sia plausibile aumentare gli sforzi incentrati sugli sviluppi futuri e sulle innovazioni nel settore delle fibre corte e totali. Essere in grado, per esempio, di introdurre la canapa nel settore dell'abbigliamento di alta qualità, il quale al momento è governato da cotone o lana, le



caratteristiche di preparazione e di lavorazione devono essere largamente migliorate affinché le fibre di canapa possano eguagliare quelle di cotone o di lana. Questo significa che si devono modificare le fibre di canapa con un metodo speciale di elementarizzazione, così da poter essere lavorate su macchinari moderni e che producano tessili industrialmente, per ottenere filati di ottima qualità. Le fibre ed i filati di canapa tuttora sul mercato non soddisfano i requisiti dell'industria tessile. Riguardo alla finezza delle fibre, all'omogeneità, alla flessibilità ed in particolare alla distribuzione o alla lunghezza della fibra, l'industria tessile si trova ad affrontare enormi problemi di lavorazione. Affinchè l'applicazione industriale di fibre di canapa sia consentita, bisogna tenere in considerazione i requisiti dell'industria della lana e del cotone.

### 3.9 I requisiti tecnologici per la produzione di nuovi filati derivati da fibre corte di canapa con l'aiuto della tecnologia del cotone

In Europa, circa il 70% di tutti i filati lavorati rientra in un grado di finezza tra 20 Nm - 40 Nm. Attualmente per quanto riguarda i filati di canapa questo grado di finezza non è possibile. Esso dovrebbe diventare il target nella produzione dei filati della canapa.

Nella lavorazione della canapa come prodotto naturale, è necessario uno sviluppo della tecnologia che faciliti un progetto sulle fibre, il quale consideri le possibilità di lavorazione (filatura del cotone), ed il prodotto finale

desiderato. Il requisito primo è che il profilo delle fibre di canapa debba assomigliare fortemente a quello del cotone, per evitare qualsiasi modificazione estesa delle macchine del cotone. Le caratteristiche tecnologiche significative comprensive dei diversi livelli di importanza in base ai sistemi di filatura, sono elencati nella seguente.

<b>FILATURA AD ANELLO</b>	<b>FILATURA A ROTORE</b>
Lunghezza della fibra	Tenacia della fibra
Finezza della fibra	Allungamento
Tenacia della fibra	Finezza della fibra
Allungamento	Nitore
Rigidità	Rigidità
Nitore	Lunghezza della fibra
Superficie	Superficie

Mentre la lunghezza e la finezza della fibra sono i due fattori più importanti nella produzione di filati in macchine con filatura ad anello, in quelle con filatura a rotore sono principalmente importanti la tenacia e l'allungamento per una filatura riuscita; nel metodo di filatura a rotore la lunghezza gioca un ruolo secondario (Scheneck 1993).

Nella preparazione delle fibre si deve considerare il sistema di filatura del cotone designato. La materia grezza usata nella lavorazione della canapa copre un ruolo decisivo poiché la sua qualità è soggetta a deviazioni naturali. Per aver successo nell'ottenere un prodotto finale definito e di alta qualità, deve essere possibile poter indirizzare i parametri di lavorazione in accordo con la qualità del materiale grezzo e corrispondenti ai requisiti del prodotto finale. Tutto ciò necessita un

controllo oggettivo della qualità della materia iniziale (canapa grezza), del prodotto intermedio (fibre elementarizzate o "cotonizzate"), ed anche del prodotto finale (cardati, filato, articolo finito). Con l'aiuto della tecnica dell'esplosione a vapore di Reutlingen, inclusi i metodi di misurazione per un'oggettivo controllo della qualità delle fibre, anch'essi sviluppati alla IAF, è possibile soddisfare i requisiti tecnici essenziali per i nuovi tipi di prodotti della canapa.

### 3.10 Valutazione della qualità e processo di ottimizzazione

I criteri essenziali per stabilire la qualità della materia grezza sono la maturità e il grado di macerazione della canapa, che dipendono sia da proprietà chimiche e morfologiche, che da caratteristiche tecniche specifiche. La determinazione dei criteri di qualità si compie con test fisici, opto-elettronici e spettroscopici. La valutazione dei dati e l'ottimizzazione delle prove viene espletata usando metodi statistici moderni quali l'analisi multivariata.

La metodologia delle misurazioni oggettive di qualità ed i test statistici individuali saranno esposti dettagliatamente più avanti.

### 3.11 La tecnica dell'esplosione a vapore

Già negli anni trenta erano stati fatti dei riferimenti alla tecnica dell'esplosione a vapore per ottenere fibre dalla paglia delle piante fibrose, in alcuni documenti di

un brevetto.

Anche oggi il principio di questo metodo viene adottato in molti settori diversi, per esempio nella manifattura della carta e nella valutazione della sostanza organica della materia grezza contenente lignina (Marchessault 1988).

Nell'Institute for Applied Research di Reutlingen, questo principio di lavorazione è stato ulteriormente sviluppato ed ottimizzato per una produzione di fibra estremamente valevole. Attraverso il controllo di qualità oggettivo del materiale grezzo ed una direzionabilità del parametro corrispondente alla qualità d'entrata, si può realizzare un "progetto" delle fibre e delle caratteristiche specifiche, rispondenti alla tecnica della filatura ed al prodotto finale desiderato.

Le fibre, una volta decorticate e, quando possibile, ben pulite, sono utilizzate come materia grezza. Non ci sono conseguenze se si usano fibre gramolate, stoppa oppure fibre provenienti da altri stadi di lavorazione. Le caratteristiche di qualità oggettive delle fibre, (grado di maturità e macerazione, caratteristiche chimico/morfologiche e tecniche), nell'ambito di una direzionabilità ottimizzata dei parametri di lavorazione, vengono raggiunte adottando metodi moderni. Il materiale grezzo o d'entrata è pre-trattato con una soluzione impregnante e trattato in un reattore simile ad una camera pressurizzata, con vapore saturato. Sia la pressione (0-12 bar) ed il tempo (1-30 minuti), che la concentrazione alcalina variano in base alla qualità ed allo scopo designato delle fibre. Dopo il tempo di reazione necessario, il reattore si decompresa ad un livello di pressione normale per mezzo di una valvola (esplosione a vapore). Le fibre elementarizzate vengono mandate, con un

sistema di tubi, in recipienti di raccolta. Attraverso una repentina ebollizione ed accelerazione delle fibre che escono, si compie la raffinatura delle fibre. Quelle che sono state liberate dalle sostanze di accompagnamento nel processo di esplosione a vapore, vengono risciacquate nel trattamento seguente. Qui le fibre possono essere lavate, tinte oppure sottoposte ad una centrifuga finale, quando è richiesto. Dopo l'asciugatura, ed un primo processo di apertura, se necessario, le fibre possono essere consegnate per la filatura. In accordo con la materia grezza e l'applicazione delle fibre designata, i parametri di prova vengono aggiustati equivalendo alle caratteristiche così nominate "prodotto-proprietà-progetto".

Se, per esempio, le fibre di canapa dovessero venire lavorate secondo la filatura a pettinato, l'esplosione a vapore potrebbe essere omessa al fine di ottenere l'incremento di lunghezza necessario delle fibre. Per la filatura della lana la finezza della fibra deve essere di un grado inferiore alla filatura del cotone, così che la raffinatura per espulsione non è necessaria.

### 3.12 Aspetti economici ed ecologici

L'IAF di Reutlingen ha un laboratorio con a disposizione sia un impianto di elementarizzazione con un reattore 25 I, che un impianto adattabile alla ricerca tecnica nella industria della cellulosa, teoricamente capace di una annuale emissione, nella regione, di 1000 tonnellate di fibra. Tuttavia comunque la produzione è possibile solo a livello di ricerca, a causa della capacità e delle caratteristiche di prova dell'impianto. Attualmente non esiste un impianto industriale di esplosione a vapore specifico per la produzione di fibre. Le tecniche di lavorazione esistenti possono comunque essere adattate ai

sistemi correnti nell'industria della cellulosa, ed assieme ad una definizione di infrastrutture equivalenti, possono anche essere integrate alle già esistenti industrie tessili. In accordo sia con le possibilità di lavorazione e produzione, che con le caratteristiche della materia grezza e del prodotto, la mera elementarizzazione della fibra costa nella lavorazione tra 0.5 e 2 marchi tedeschi. Dando un'occhiata al prezzo attuale di mercato dei filati di alta qualità, 15-25 marchi per kg, al nuovo valore aggiunto tecnologicamente associato ed ai fattori potenziali del prodotto, queste influenze sui costi di produzione vengono rappresentate favorevolmente. Inoltre, il nuovo tipo di fibra può essere lavorato, in contrasto con le macchine per la tradizionale lavorazione della canapa, attraverso impianti altamente produttivi nell'industria tessile. L'aspetto ecologico appropriato è garantito poiché vengono utilizzati composti alcalini ed additivi in forma di vapore e altamente diluiti. In aggiunta agli agenti applicati, le sostanze degradate del vapore della canapa si accumulano in forma neutra e sono, come additivi singoli, biologicamente degradabili. Anche l'acqua di scarto standard ed un efficace sistema di riciclo presenti nelle industrie moderne contribuiscono ecologicamente all'intero processo. E' necessario fare ulteriori ricerche riguardanti l'uso agricolo ed industriale (pectina-lignina) dell'acqua di scarto del processo di esplosione a vapore.

Per l'alto grado di purità ottenuto dall'esplosione a vapore sulle fibre, la quantità necessaria di prodotti chimici o coloranti per ulteriori processi di raffinazione (sbiancatura o colorazione) è molto ridotta.

### 3.13 Primi risultati

Il processo d'esplosione a vapore per la produzione di fibre di lino sviluppato all'IAF per usarle nella pettinatura e nella filatura del cotone, può essere trasferito anche sulla lavorazione della canapa. Le prove attuate nell'istituto hanno dimostrato (in accordo con la canapa grezza scelta, al pre-trattamento del materiale grezzo ed all'adattamento della lavorazione) che le fibre ottenute possono essere compatibili con la lavorazione su macchine per la filatura del cotone. Nel frattempo, il fattore principale di sviluppo, sta nella produzione di fibre di canapa specifiche, le quali possono essere usate nella manifattura di filati particolari nella filatura ad anello o a rotore. I filati manufatti designati dovrebbero trovare una collocazione per tessuti di cotone ritorto (jeans), e in accordo con l'appropriata ottimizzazione, anche per articoli fatti a maglia.

### 3.14 Materie grezze e tecniche di lavorazione

Di fronte alla calante disponibilità di canapa grezza di alta qualità, che è un fattore decisivo per la futura qualità del prodotto, sono disponibili solo la stoppa e la canapa grezza gramolata di qualità basso/media, provenienti da diverse zone coltivate. Nelle prove che verranno illustrate nel prossimo capoverso, è stata usata come materia grezza una canapa gramolata e parzialmente macerata di origine rumena.

Le fibre grezze, fino a 3m. di lunghezza vengono accorciate con l'utilizzo di una macchina per tagliare la fibra (LaRoche) a 70mm. (micrometri) di lunghezza ed

elementarizzate nel reattore dell'IAF.

I parametri del processo d'esplosione a vapore ed il trattamento successivo sono adattati in base alla qualità della materia grezza<sup>2</sup>. Le fibre vengono imbevute in una soluzione acquosa, e successivamente sono sottoposte ad una pressione di vapore saturo di 8 bar, prodotta da un generatore. Dopo un tempo di reazione di 10 minuti, il vapore viene abbassato e le fibre condotte fuori attraverso un sistema esistente di contenitori di raccolta. Poi si compie il processo di lavatura e risciacquo per rimuovere le sostanze decomposte presenti. Dopo l'asciugatura delle fibre (con aria calda), esse vengono aperte, con un arnese seghettato, e liberate, con un pulitore multi-stage, dalla polvere, da frammenti di fibra e da rimanenti pezzetti di legno penzolanti. Un' ulteriore raffinatura e pettinatura viene compiuta usando una cardatrice standard per cotone modificata; in seguito a questo procedimento il materiale di fibra è pronto per la filatura.

### 3.15 Confronto tra cotone e canapa "cotonizzata" con l'esplosione a vapore

Il valore BF1 è stato misurato su uno strumento di analisi dell'immagine Kontron, la tenacia del fascio su uno Zellweger Stelometer. La rivelazione della distribuzione di lunghezza della fibra è stata compiuta su uno strumento AL Meter e Fibroliner (Peyer).

L'indice di finezza conseguente all'analisi dell'immagine, descrive l'area della sezione centrale dell'incrocio della fibra in micrometri. La canapa trattata col vapore mostra circa la metà della finezza della qualità del cotone usato, mentre la grossezza della canapa grezza è di circa nove volte più alta. Il valore di finezza della canapa



vaporizzata è sufficiente per la filatura di filo sottile. Naturalmente la tenacia della canapa, anche dopo la cotonizzazione, ha un valore che risulta essere molto più alto di quello del cotone.

Inoltre, per le proprietà naturali della fibra, la rottura dell'allungamento della canapa è molto bassa (3,5%) paragonata a quella del cotone (8,5%). Un aumento del valore di allungamento della canapa migliorerebbe decisamente il comportamento di lavorazione.

La distribuzione di lunghezza della fibra, nella canapa trattata col vapore, corrisponde alla maggiore estensione possibile del cotone. Il diagramma di qualità di queste fibre, previste per il processo di filatura ad anello, corrisponde al parametro di filatura richiesto. A causa delle dimensioni delle fibre di canapa grezza, la lunghezza oggettiva della fibra non può essere misurata.

### 3.16 Ulteriori sviluppi e prospettive

Entro le attuali attività di ricerca dell'IAF nell'area della canapa, viene data una particolare importanza alla classificazione della materia grezza ed alla valutazione di qualità della materia grezza e dei prodotti. I temi principali contenuti sono lo sviluppo e l'adattamento dei metodi di misurazione, e la loro standardizzazione. Lo scopo dello sviluppo nell'area del processo di ottimizzazione e del miglioramento del prodotto, è ottenere nuovi tipi di fibra, i quali possono essere applicati nella filatura pettinata e della lana ad uso industriale. Si può dire lo stesso per l'ottimizzazione delle tecniche di lavorazione nella produzione di filati del cotone, nella quale è necessario sia un miglioramento delle caratteristiche ottiche e tecniche, che un adattamento ai

parametri delle macchine per filare.

Le fibre di canapa possiedono inoltre uno sviluppo estensivo ed un potenziale di prodotto nell'area di applicazioni non tessili. La modificazione della superficie delle fibre ha reso possibile, attraverso l'esplosione a vapore, l'apertura a numerose aree di utilizzo nel settore dei compositi e non-tessili.

## 4. Comportamento meccanico degli elementi strutturali in legno

### 4.1 Legame costitutivo del legno e sue schematizzazioni

La flessione, nel legno come anche negli altri materiali, mette in gioco sia il comportamento a trazione che quello a compressione. E' di grande importanza, quindi, riportare il legame costitutivo per legno netto (fig 4.1.1) e alcune sue schematizzazioni che ne semplificano l'approccio, ma che inevitabilmente si discostano più o meno dalla situazione reale.

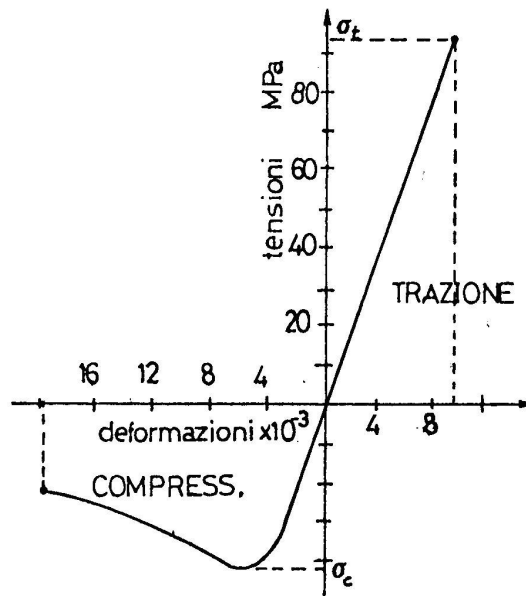


fig. 4.1.1 - legame costitutivo per legno netto  
(privo di difetti)

.....

La legge costitutiva più semplice ma che poco si adatta al vero comportamento del materiale è il cosiddetto legame elasto-plastico (fig. 4.1.2). Il modello è molto semplice, limitando la descrizione del diagramma a un triangolo-rettangolo. Tuttavia, nonostante l'eccessiva semplificazione, il modello viene adottato spesso.

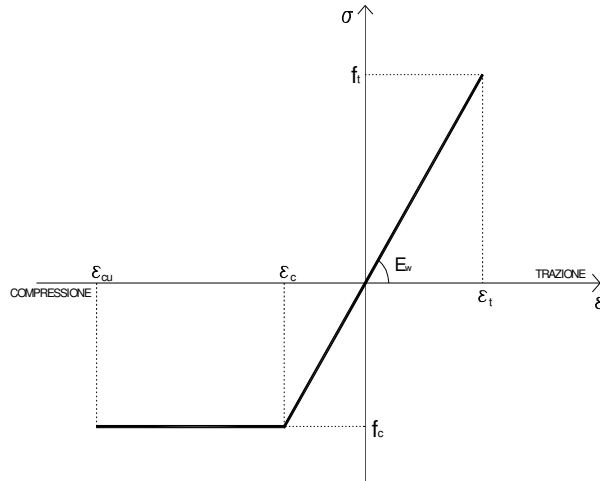


fig. 4.1.2 - modello di legame costitutivo elasto-plastico

Il passo successivo (in termini di complessità) è rappresentato da diagramma di Bazan (fig 4.1.3).

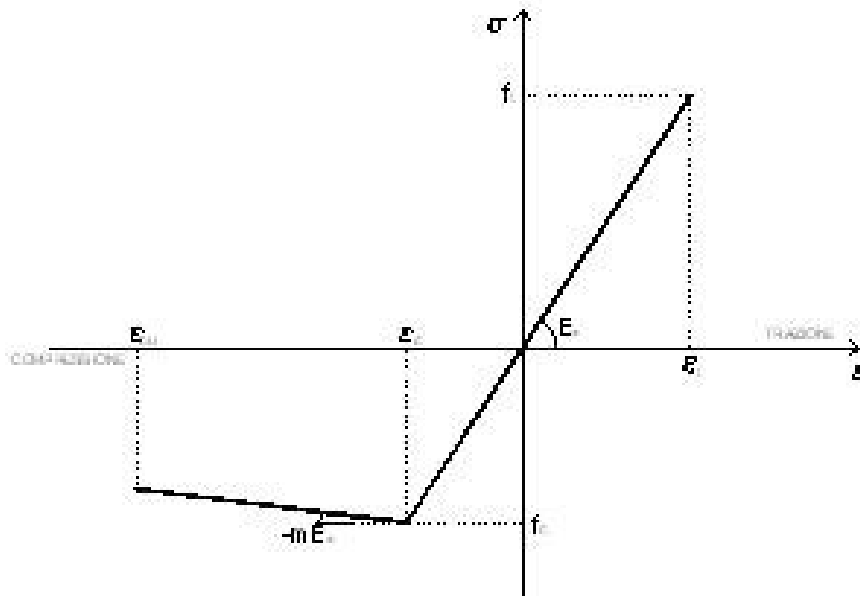


Fig. 4.1.3 - modello di legame costitutivo di Bazan

Il modello si presenta in forma più completa rispetto al precedente, senza tuttavia perdere i vantaggi della linearità. Si presenta la difficoltà della definizione del coefficiente  $m$  per la pendenza del tratto discendente.

Tradotto in relazioni matematiche tale legame costitutivo si può rappresentare come:

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon && \text{per } \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_t \\ \sigma &= f_c + mE_w(\varepsilon - \varepsilon_c) && \text{per } \varepsilon < \varepsilon_c \end{aligned} \quad 4.1.1$$

Ci si avvicina maggiormente al reale comportamento del materiale con il modello di O'Halloran (fig 4.1.4). Esso, tuttavia, introduce ulteriori complessità: da un lato la taratura richiede la definizione di due parametri aggiuntivi per la caratterizzazione della curva di

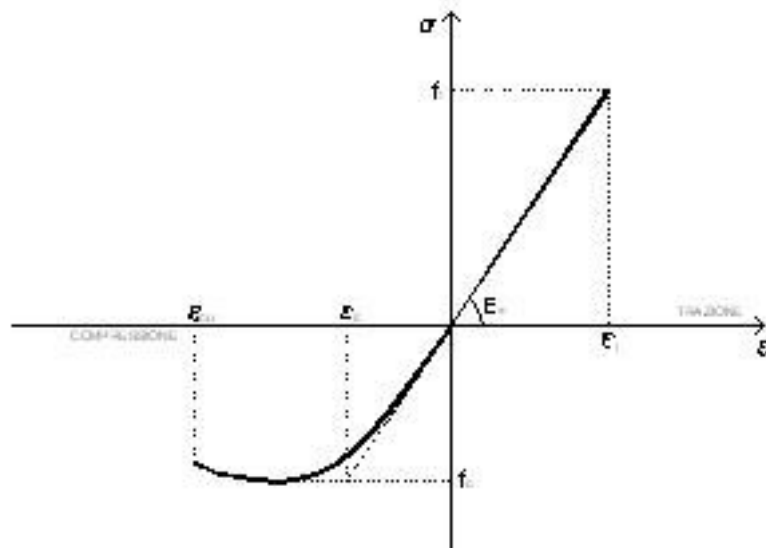


fig. 4.1.4 - modello di legame costitutivo di O'Halloran

compressione ( $A$  e  $n$ ) ed inoltre si perde il vantaggio della linearità in campo elastico, ovvero il tipico diagramma a farfalla che caratterizza il legame sforzo-deformazione negli Stati Limite di Esercizio. Anche in questo caso possiamo rappresentare la legge costitutiva tramite formule:

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon && \text{per } 0 < \varepsilon < \varepsilon_t \\ \sigma &= A \cdot \varepsilon^n + E \cdot \varepsilon && \text{per } \varepsilon_{cu} < \varepsilon < 0 \end{aligned} \quad 4.1.2$$

Risulta molto esplicativo un altro diagramma (fig. 4.1.5) in cui si vede chiaramente, nelle direzioni parallela e perpendicolare alla fibratura, sia il diverso comportamento in termini di andamento del grafico, sia le diversità in termini di resistenze e campo di deformazione che il legno può raggiungere.

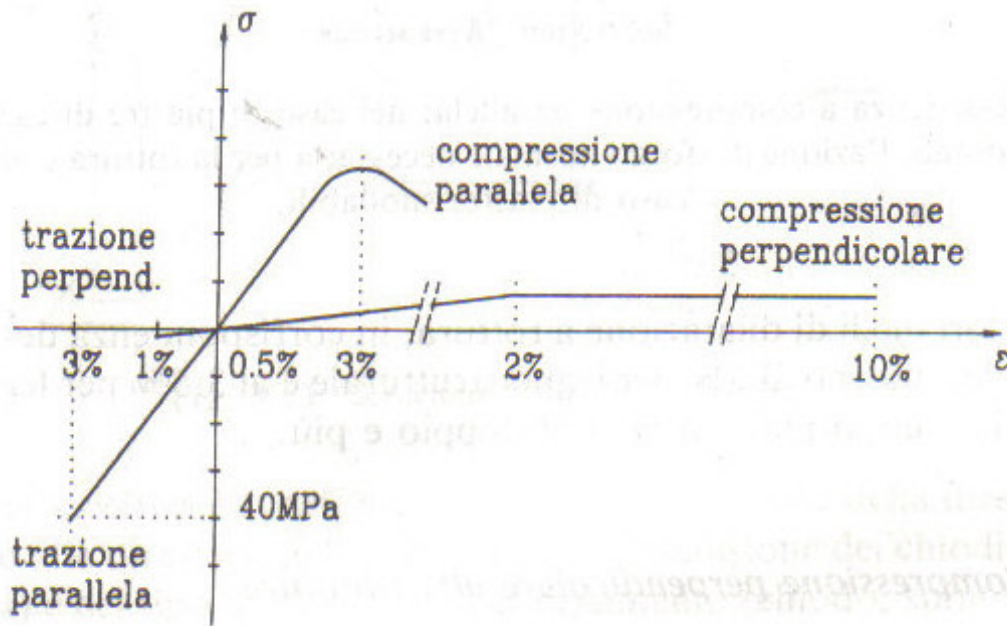


fig. 4.1.5 - legame costitutivo nella direzione perpendicolare e in quella assiale

## 4.2 Comportamento statico di un elemento strutturale soggetto a sforzo di compressione nella direzione della fibratura

Per poter rilevare il comportamento del legno sotto una sollecitazione di pura compressione è necessario prendere in considerazione provini che abbiano un valore di snellezza adeguatamente basso (e precisamente  $\lambda = \frac{l}{\rho} < 10$ ) in maniera da cautelarsi da eventuali modalità di crisi conseguenti a fenomeni di instabilità dell'equilibrio. Nel caso la prova di compressione venga condotta su un provino di legno netto caratterizzato da umidità normale del 12%, il grafico sforzi-deformazioni che se ne ricava sarà definito da 3 tratti (vedi fig. 4.2.1):

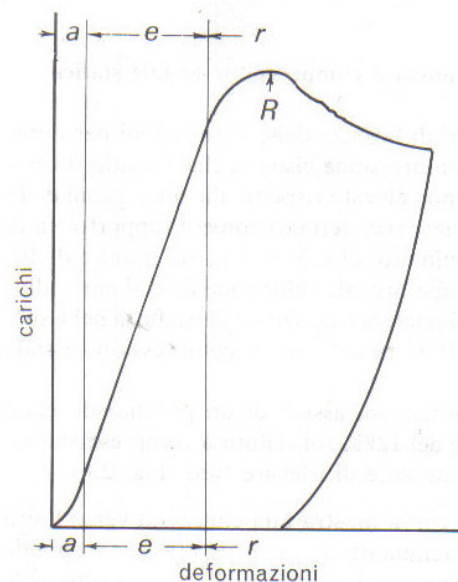


fig. 4.2.1 - legame costitutivo nella direzione assiale

Il primo tratto vede la concavità del grafico rivolta verso l'alto. In questa prima fase, infatti, si ha un adattamento

delle due sezioni estreme alle piastre che servono per l'applicazione del carico. Questa prima porzione di grafico non ha alcuna rilevanza per la caratterizzazione del materiale.

La seconda parte è definita da una relazione fra sforzi e deformazioni di tipo lineare, in cui pertanto è valida la legge di Hooke. Inoltre se si scarica il provino le deformazioni vengono restituite quasi completamente (comportamento elastico).

Al raggiungimento di un certo livello di carico, il grafico mostra un andamento con concavità rivolta verso il basso che indica come in questa fase vi sia una riduzione della rigidità dell'elemento e pertanto le deformazioni crescono in misura maggiore rispetto al carico. In questa fase inoltre si hanno anche fenomeni legati alla formazione di zone di deformazione a taglio (*kinking failure*). Questo tipo di percorso è lo stesso che viene seguito, sotto sforzi di compressione, anche da altri materiali caratterizzati da fibre, come ad esempio i compositi; la struttura del legno è, infatti, del tutto simile a quella di questi ultimi.

Studi recentemente eseguiti hanno messo in evidenza come il meccanismo del *kinking failure* sia caratterizzato da tre fasi. Vi è una prima fase incipiente (*incipient kinking*), che segue la fase elastica e caratterizza il provino fino al picco di resistenza: la curva  $\sigma - \varepsilon$  perde la sua linearità a causa di piccole instabilità delle fibre del legno, che si generano nei punti in cui sono presenti micro-deviazioni della fibratura, ovvero attorno ai canali resiniferi orizzontali. Come si è detto, questa prima fase termina con il picco di resistenza alla compressione. Successivamente inizia la fase transitoria (*transient kinking*), in cui le piccole zone di instabilità crescono e si uniscono a formare un'unica banda: analisi al



microscopio hanno messo in evidenza come la deformazione delle fibre coinvolga una compressione assiale ed una rotazione. La seconda fase è rappresentata da una perdita di carico e termina quando il comportamento del campione si stabilizza e diventa perfettamente plastico. Inizia così la fase finale stazionaria (*steady-state kinking*) in cui la banda di fibre instabilizzata si allarga al materiale circostante mantenendo le stesse tensioni. Se il livello tensionale viene ulteriormente incrementato si giunge ad un picco (che indica la rottura vera e propria dell'elemento) e conseguente tratto decrescente spesso anche con andamento irregolare. Dopo aver superato il picco, se il provino viene scaricato, la relativa porzione di grafico andrà ad intersecare l'asse delle ascisse in un valore che rappresenterà il valore della deformazione permanente.

E' importante anche valutare l'andamento del grafico carico-deformazione di un provino di legno con umidità di 32 - 35%. In questo caso il primo tratto è più prolungato, il secondo tratto è più breve, infine il terzo tratto si presenta più regolare e tendente all'orizzontalità. In questo caso il carico che si raggiunge senza lo sviluppo di deformazioni eccessive è minore.

### 4.3 Comportamento statico di un elemento strutturale soggetto a sforzo di compressione nella direzione ortogonale alla fibratura

Il comportamento di un provino di legno sottoposto ad uno sforzo di compressione trasversalmente alla direzione della fibratura è molto diverso da quello che si riscontra andando ad applicare la sollecitazione in direzione assiale: se come nel caso precedente, infatti, si va ad analizzare il grafico sforzi-deformazioni (fig. 4.3.1), la fase di assestamento è più lunga, mentre risulta meno esteso e meno pendente il tratto lineare (e dunque sarà minore la rigidità in direzione trasversale rispetto a quella assiale).

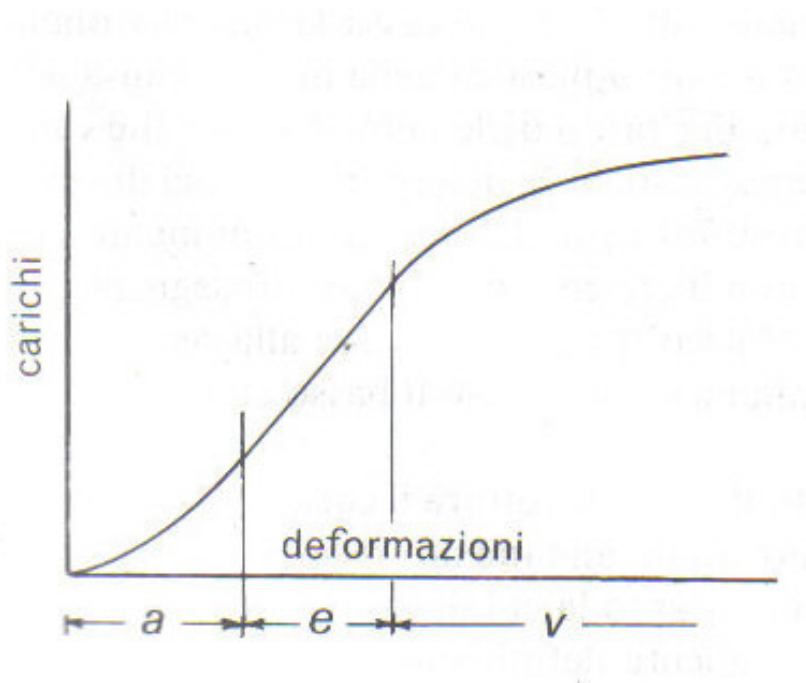


fig 4.3.1 - legame costitutivo nella direzione perpendicolare

La fase plastica, inoltre, non mostra un picco e

non si può riscontrare un punto di passaggio netto fra il precedente comportamento elastico. Questa fase risulta più estesa della corrispondente fase plastica del caso di caricamento assiale e può terminare con una fase di *hardening*. Un incremento del quantitativo di umidità, come già fatto notare nel caso del caricamento assiale, porta ad una fase di assestamento più lunga, un carico di transizione fra lo stato elastico e quello plastico più basso e ad un carico di rottura minore. La differenza di comportamento in termini di rapporto sforzi-deformazioni al variare dell'umidità è ancora più sensibile nel caso di caricamento trasversale rispetto alla precedente situazione di configurazione di carico assiale. Anche per quello che riguarda l'andamento delle deformazioni, all'aumentare dell'umidità, esse aumentano fino a diventare, in una situazione di completa imbibizione, anche 2-3 volte quelle relative ad uno stato di umidità normale.

Sono state eseguite delle sperimentazioni con lo scopo di valutare l'andamento del grafico carico-deformazione al variare dell'orientamento degli anelli di accrescimento rispetto alla direzione della forza applicata. I risultati, tuttavia, sono molto variabili, in quanto in ogni sperimentatore sono stati utilizzati provini di legno di specie diversa. E' comunque assodato che quando il carico è applicato in direzione radiale il comportamento del provino di legno in termini di deformazioni mostra una maggiore rigidità rispetto alla risposta che invece si può constatare nel caso in cui la forza è applicata in direzione tangenziale (ovviamente a parità di forza applicata). Ciò è dovuto all'azione irrigidente dei raggi midollari che peraltro sono impediti di instabilizzare trasversalmente e incurvarsi fuori dal proprio asse, per la presenza delle fibre circostanti. Trasversalmente, invece, i raggi tendono a venire schiacciati di fianco e non sono

soggetti a nessun contributo di rigidità da parte delle fibre. Sempre a partire da risultati sperimentali si è potuto constatare che il minimo carico che determina la rottura dell'elemento si verifica nel caso in cui la direzione relativa fra il carico e l'orientamento degli anelli risulta essere di  $45^\circ$ . In questo caso, infatti, la forza si scompone in una componente ortogonale rispetto agli anelli e una tangenziale. Quest'ultima sarebbe la causa di uno scorrimento che si verifica all'interfaccia fra la zona tardiva di un anello e la zona primaverile dell'anello successivo, zone queste caratterizzate da proprietà meccaniche differenti.

In generale, per quanto riguarda il comportamento del legno nei riguardi della compressione, è importante mettere in evidenza come la resistenza sia legata alla deformazione: infatti essa aumenta all'aumentare della deformazione e raggiunge un valore massimo quando il materiale legno è compresso completamente (approssimativamente ad un terzo del suo volume originario).

E' anche importante citare il caso in cui la forza di compressione sia inclinata di un angolo maggiore di  $0^\circ$  e minore di  $90^\circ$  rispetto alla direzione della fibratura. Questo è un caso tipico che si riscontra nelle capriate in corrispondenza del giunto fra il puntone inclinato e la catena. Il comportamento, in questo caso, sarà intermedio fra la situazione di compressione assiale e quella ortogonale alla fibratura, come intermedio sarà il valore della resistenza che offrirà il legno per questo tipo di sollecitazione.

#### 4.4 Comportamento di un elemento strutturale in legno sollecitato da sforzi di trazione nella direzione della fibratura

In generale, una valutazione accurata del comportamento del legno soggetto a sforzi di trazione non è semplice, in quanto la trasmissione dell'azione avviene in ogni caso tramite dispositivi vari come ad esempio incastri, bulloni, chiodature, connettori di diversa forma e incollaggi. Essi comportano uno stato di sollecitazione che in qualche caso può differire sensibilmente da quello della pura trazione e che può risultare più gravoso per l'elemento strutturale. Se si considera, ad esempio, lo schema statico della capriata in legno, e si pone l'attenzione sul trasferimento del carico dal puntone alla catena si può osservare che è sicuramente meno probabile che si verifichi una crisi per cedimento della catena dovuta al superamento della resistenza a trazione del legno, mentre è sicuramente prevedibile un cedimento in corrispondenza del nodo in cui avviene la trasmissione dello sforzo, per crisi a taglio del dente di estremità della catena. Altro esempio è quello dei nodi delle strutture reticolari: i gambi dei bulloni, in esercizio, pongono il legno a contatto con essi in condizioni in sopportare un livello tensionale molto elevato e che pertanto può, in alcuni casi, portare a crisi localizzate. La natura dei tessuti legnosi, caratterizzati da lunghe fibre strettamente connesse le une alle altre, implica una elevata capacità di resistenza a trazione, la quale dipende principalmente dalle caratteristiche di resistenza a trazione delle strutture della parete cellulare. Studi sperimentali hanno dimostrato come la resistenza a trazione nella direzione della fibratura del legno possa raggiungere anche i 350 MPa. Tra le specie di

legno di più frequente impiego nell'ambito edilizio, le resistenze a trazione variano da 60 MPa e 180 MPa con valori di massa volumica che assumono valori da 0,4 a 0,9 g/cm<sup>4</sup>. E' importante, inoltre, tenere in considerazione che mediamente la resistenza a trazione è da 2 a 3 volte quella a compressione.

Come succedeva per la resistenza a compressione, anche nel caso della resistenza a trazione, essa è direttamente proporzionale all'incremento di massa volumica, in certi casi secondo una legge lineare. Ancora maggiore è l'influenza della direzione fra la fibratura e il carico esterno rispetto al caso della resistenza a compressione. Pertanto, anche in questo caso, si avranno dei coefficienti riduttivi della resistenza in funzione della direzione della fibratura.

Un altro fattore che influenza in misura superiore il valore del carico ultimo a trazione è la presenza dei nodi. Nel caso della compressione, infatti, un nodo sano rappresenta una certa risorsa di resistenza, anche se la fibratura adiacente, appunto per la presenza del nodo, risultava fortemente deviata. Nel caso della resistenza a trazione il nodo non fa che ridurre la sezione resistente, pertanto si verrà ad incrementare inevitabilmente il livello tensionale.

## 4.5 Comportamento di un elemento strutturale in legno sollecitato da sforzi di trazione trasversalmente alla fibratura

La resistenza del materiale legno nei riguardi di sforzi nella direzione ortogonale alla fibratura è molto bassa: essa si aggira intorno a  $1/30 - 1/70$  della resistenza a trazione in direzione assiale. Per questo motivo è raro osservare elementi strutturali che vengono posti in opera in modo da essere sollecitati da trazione in direzione trasversale. Per quanto riguarda quelli che sono i parametri che influenzano il carico ultimo, c'è da dire che nel caso dei provini di piccole dimensioni che vengono utilizzati per effettuare le varie misurazioni assume un ruolo fondamentale la direzione secondo la quale decorrono gli anelli di accrescimento, mentre per i legni delle Conifere soprattutto è importante anche prendere in considerazione le variazioni della massa volumica in termini di compattezza tra la zona primaverile rispetto a quella tardiva degli anelli. Da ciò si capisce che è difficile estrapolare i risultati da elementi strutturali di medie e grandi dimensioni, in quanto sono caratterizzati da sezioni trasversali in cui gli anelli non hanno mai andamento costante rispetto ai lati perimetrali.

Altri fattori che influenzano negativamente la resistenza a trazione trasversale sono sicuramente temperatura e umidità. Ad un incremento di questi due parametri corrisponde una diminuzione del carico ultimo e il degrado delle proprietà meccaniche sarà tanto più accentuato quanto più il legno sarà esposto alle intemperie o più in generale all'ambiente esterno.

## 4.6 Resistenza di un elemento strutturale in legno sollecitato da uno sforzo tagliante

Per quanto riguarda la resistenza di un elemento strutturale di legno soggetto ad uno sforzo tagliante, è necessario mettere in evidenza la grande influenza dell'anisotropia del materiale. Infatti, come anche nel caso delle altre caratteristiche di sollecitazione, anche nel caso del taglio, la resistenza del legno è maggiore nel caso in cui lo sforzo di taglio agisca perpendicolarmente alle fibre (taglio verticale) rispetto al caso in cui invece la forza abbia la stessa direzione rispetto alla direzione delle fibre (taglio longitudinale). In sede di verifica è fondamentale prendere in considerazione il fatto che i fori, le fessure e le incisioni riducono la sezione resistente a taglio e pertanto contribuiscono ad un incremento del livello tensionale.

La rottura a taglio avviene principalmente per scorrimento dei piani di fibre gli uni sugli altri, quindi vi gioca un ruolo importante la lignina. In questo caso, inoltre, la presenza di nodi diventa un fattore di rinforzo, perché essi fungono da inserzioni dure che si oppongono agli scorrimenti degli strati. Valori orientativi di resistenza al taglio sono circa 2 - 4 Mpa.



## 4.7 Comportamento di un elemento strutturale in legno soggetto a flessione

La flessione degli elementi in legno è sicuramente il comportamento più frequente. È fondamentale dunque andare a valutare lo stato tensionale e deformativo di tali elementi sia in sede di verifica che in sede di dimensionamento. Se si esegue una prova a flessione di una trave si osserva un grafico carico-deformazione che presenta un primo tratto rettilineo (dunque lineare) che denota anche un comportamento di tipo elastico del materiale: se, infatti, dal campo elastico, si scarica la trave le deformazioni vengono "restituite" nella loro interezza. Incrementando ancora il carico il grafico mostrerà una pendenza via via minore, segno che la rigidità dell'elemento tende a calare (le deformazioni, pertanto, aumentano di un tasso maggiore del tasso di

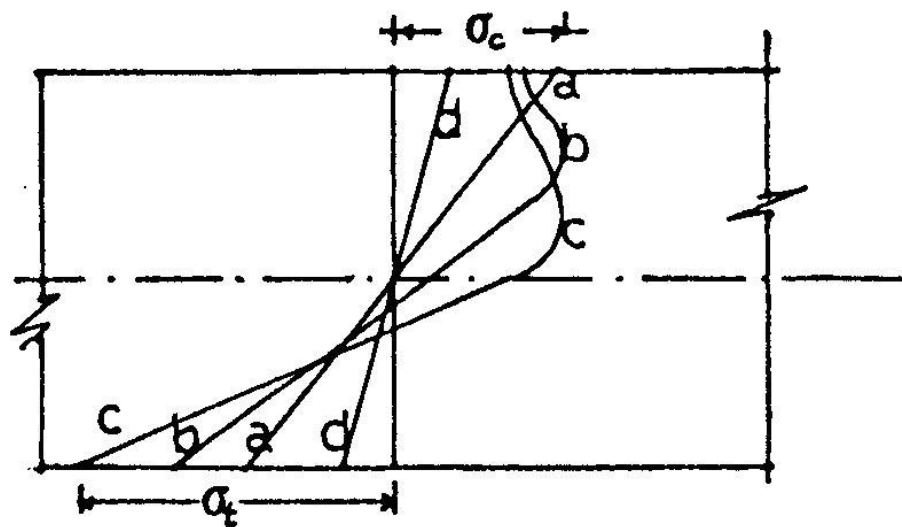


fig. 4 7 1 - andamento del grafico delle tensioni normali per sezione inflessa e per livelli tensionali crescenti

incremento del carico), fino ad arrivare a rottura. Risulta molto esplicativo un diagramma (fig. 4 7 1) in cui si riporta l'andamento delle tensioni di una sezione inflessa all'aumentare del livello tensionale. Si può vedere molto chiaramente come la posizione dell'asse neutro cambi al

variare dello stato tensionale. Infatti quando le tensioni di compressione superano il limite elastico, l'asse neutro si abbassa e pertanto l'area di legno soggetta a trazione diminuisce facendo sì che la tensione di trazione cresca.

Sempre per quanto riguarda la risposta del materiale ai carichi esterni, bisogna considerare che può che livelli di sollecitazione tali da far permanere l'elemento strutturale in campo elastico, se il carico esterno viene applicato in modo permanente o nel caso di caricamento ciclico, possono indurre uno stato deformativo permanente o addirittura, in un caso estremo, possono portare alla crisi dell'elemento stesso. Sperimentazioni condotte su provini di legno netto hanno mostrato che la transizione fra il comportamento elastico e quello plastico è più netta rispetto alla situazione che si verifica nel caso di prove su elementi in legno con difetti e nodi. In quest'ultimo caso, infatti, non è possibile definire un punto di transizione ma il cambiamento di stato avviene con un ampio raccordo. Come per ogni elemento strutturale, conseguentemente all'applicazione del carico esterno, si avrà una deformazione di segno opposto ai due lembi maggiormente sollecitati. Esisterà, naturalmente, un asse neutro in cui saranno nulle sia le deformazioni che le tensioni. Per elementi strutturali in materiale isotropo il diagramma delle tensioni sarà simmetrico e l'asse neutro coinciderà con l'asse baricentrico della sezione. Il materiale legno, tuttavia, è fortemente anisotropo, pertanto a rottura si avrà l'asse neutro spostato verso l'intradosso (pertanto l'area soggetta a sforzi di trazione sarà più ampia dell'area soggetta a compressione).

Al momento dell'applicazione del carico esterno e fino ad una certa intensità del livello tensionale, l'elemento strutturale rimarrà in campo elastico. Andando ad incrementare il carico, essendo la resistenza a

compressione maggiore della resistenza a trazione, ci si troverà in una situazione in cui in una certa sezione (in generale quella di massimo momento) le fibre all'estradosso (caratterizzate dalla deformazione a compressione più elevata) inizieranno ad instabilizzarsi e via via, aumentando le deformazioni, l'instabilizzazione si propagherà verso le fibre più interne della sezione. Pertanto si può affermare che la crisi di un elemento strutturale in legno soggetto a flessione ha inizio l'instabilizzazione della fibre di parte della zona compressa. Andando ad incrementare ancora il carico, siccome l'asse neutro, immediatamente dopo l'instabilizzazione delle prime fibre compresse, inizierà a spostarsi verso il basso (con conseguente riduzione dell'area di materiale soggetta a trazione), si giungerà ad un certo valore di deformazione a cui corrisponde un valore di tensione a cui le fibre al lembo teso andranno in crisi. Da qui la rottura definitiva dell'elemento. Il comportamento degli elementi strutturali soggetti a flessione varia in funzione di diversi fattori: massa volumica, umidità, temperatura, direzione della fibratura rispetto alla direzione dell'asse geometrico, presenza di nodi o altri difetti, velocità, durata e ripetizione del carico.

In generale, se si mantiene fissato il contenuto di umidità, si può affermare che all'aumentare della massa volumica sia la resistenza che la rigidità del legno aumentano. Un discorso a parte è da fare, tuttavia, per quanto riguarda le Conifere d'alta quota. Infatti il loro legno contiene resina in grandi quantità che fa incrementare altrettanto la massa volumica ma fa leggermente diminuire la resistenza e la rigidità.

Per quanto riguarda la temperatura e l'umidità, esiste una proporzionalità inversa fra questi due fattori e la resistenza del legno.

Particolare attenzione va rivolta agli effetti provocati dalla deviazione della fibratura, in quanto essa influisce fortemente sulle caratteristiche di resistenza e sul comportamento a flessione. Sarebbe opportuno, pertanto, applicare dei coefficienti riduttivi al valore del carico di rottura in maniera da tenere in considerazione questo aspetto.

La presenza dei nodi è sicuramente indice di peggioramento delle proprietà meccaniche del legno non solo nei confronti della flessione ma in generale sotto ogni configurazione di carico. Per tenere conto della più o meno grande quantità di nodi presenti, che ovviamente, influenza in misura variabile il comportamento del legno sotto carico, si è introdotto il KAR che sta per *Knots Area Ratio*. Esso è il rapporto fra la proiezione dei nodi sulla sezione trasversale e la superficie totale. A proposito di nodi, dal punto di vista operativo, è consigliabile cercare di fare in modo che le zone ad elevata percentuale di nodi si trovino in corrispondenza delle porzioni di legno che in esercizio risultano sollecitate da sforzi di compressione.

## 4.8 Comportamento delle strutture in legno nei confronti del sisma

Da esperienze pregresse si può asserire che le strutture portanti realizzate in legno hanno una buona resa nei riguardi del sisma. Esistono, infatti, esempi di edifici domestici ad intelaiatura in legno con un elevato grado di iperstaticità e con numerose partizioni non portanti. Quando ci sono stati dei collassi, questi sono avvenuti per i seguenti motivi:

- fondazioni inadeguate: non sufficientemente irrigidite e mal connesse;
- cedimento della sottostruttura;
- forma strutturale fortemente asimmetrica caratterizzate da grandi aperture in prossimità degli spigoli della struttura;
- connessioni inadeguate (soprattutto fra elementi di differente rigidezza);

motivazioni, queste, indipendenti dalle qualità intrinseche del legno.

E' ancora da chiarire se il buon funzionamento di quelle strutture che sono state osservate storicamente dipenda dalla particolare tipologia strutturale o invece dalle prestazioni del materiale legno con cui sono state realizzate. Possiamo asserire con certezza, comunque, che essendo le strutture in legno più leggere rispetto per lo meno alle strutture in calcestruzzo (la resistenza del legno è dello stesso ordine di grandezza di quella del calcestruzzo mentre il peso del calcestruzzo è circa 5 volte quello del legno), durante un evento sismico entra in gioco una minore massa inerziale.

Rimane assodato, inoltre, il fatto che il legno è un materiale maggiormente deformabile. Ciò comporta una più

elevata elasticità, che si può tradurre in un più alto periodo proprio di oscillazione, e dunque in una minore suscettibilità nei confronti dell'azione sismica.

Il comportamento a rottura del legno in dimensioni strutturali, a causa della presenza inevitabile di difetti e proporzionalmente rispetto alla massa e alle dimensioni dell'elemento, è sostanzialmente, parallelamente alla fibratura, di natura fragile.

E' vero anche che talora si verificano rotture di tipo duttile: si pensi al comportamento di un elemento monodimensionale inflesso: all'atto della crisi si hanno le fibre d'estradosso plasticizzate, l'asse neutro si sposta verso il basso e la rottura si avrà al lembo teso, ossia all'intradosso.

In ogni caso, anche prevedendo un comportamento di tipo duttile di un certo elemento strutturale, non si può sperare di superare un valore pari a 2 di duttilità per le sezioni infesse, decisamente lontano dai corrispondenti valori relativi al calcestruzzo e all'acciaio. C'è poi da considerare che prima della frattura, rimanendo il materiale in campo elastico, i cicli di isteresi sono molto schiacciati con conseguente bassa dissipazione di energia. Infine è fondamentale osservare che il comportamento ortogonalmente alla fibratura è molto diverso. In questo caso, infatti, la duttilità può raggiungere quella relativa al legno netto, fino a valori di 5-10.

## **5. Il rinforzo di elementi strutturali in legno soggetti a sforzi flessionali**

### 5.1 Caso di rinforzo di travi facenti parte di un solaio

Quando nasce l'esigenza di rinforzare membrature in legno sollecitate a flessione, in molti casi si cerca di agire aumentando le risorse di resistenza della sola sezione di legno tramite elementi che possono essere ad esempio in calcestruzzo armato o acciaio.

Come per tutte le tipologie strutturali, inoltre, per trasferire le sollecitazioni da un elemento ad un altro e rendere efficiente, dal punto di vista della resistenza, l'incremento della geometria della sezione trasversale, vengono adottati dei connettori di materiale metallico.

Nell'ambito del ripristino di strutture esistenti, si può citare, come esempio, il rinforzo di solai originariamente realizzati con delle travi principali in legno. Un altro caso potrebbe essere quello relativo alle strutture da ponte che sono sicuramente esposte alle intemperie, maggiormente rispetto ad altre tipologie strutturali, e che pertanto possono avere bisogno nel tempo di interventi di ripristino delle caratteristiche di resistenza originarie. Se si prende in esame, ad esempio, il primo caso, per incrementare le prestazioni in termini di rigidità flessionale delle travi, è possibile eseguire, al disopra della trave, un getto di calcestruzzo di peso normale (o di calcestruzzo alleggerito, in modo da limitare l'aggravio di peso). E' fondamentale, comunque, rendere solidali la trave in legno con la soletta in calcestruzzo, per fare in modo che ci sia un trasferimento di sollecitazioni taglianti dalla trave alla soletta ed evitare, invece, un

comportamento "in parallelo" delle due porzioni di struttura. In altre parole è necessario minimizzare gli scorrimenti fra i due elementi, attraverso l'uso di connettori che saranno pertanto in generale sollecitati da sforzi di taglio.

Operativamente è consigliabile puntellare le travi in legno prima del getto della soletta in c.a.; così facendo si ottiene anche l'effetto benefico di assorbire il momento dato dal peso proprio della struttura composta legno-clc. Bisogna considerare, tuttavia, che non è possibile, nella pratica, annullare totalmente gli scorrimenti relativi fra trave e soletta collaborante, in quanto l'elemento di connessione avrà una certa deformabilità e pertanto anche la deformabilità dell'elemento strutturale composito sarà maggiore. Ammettendo, quindi, una certa quotaparte di scorrimento rispetto al caso di completa sconnessione fra le due porzioni di struttura, se si considera una determinata sezione soggetta a flessione, questa sarà sollecitata da un momento applicato al legno, un momento applicato alla porzione di calcestruzzo e un momento che sarà agente invece in corrispondenza dell'intera sezione composita. Esisteranno, inoltre, altre problematiche che dovranno essere affrontate al momento del dimensionamento. In particolare è necessario prendere in esame la possibilità che, a seguito di un carico tagliante particolarmente elevato in corrispondenza di un singolo connettore, si abbia un eccessivo livello tensionale per quanto riguarda le tensioni di contatto connettore-legno e quindi si verifichi una crisi localizzata per plasticizzazione del legno. In questo caso il fatto di avere piccoli scorrimenti fra legno e soletta in calcestruzzo si ripercuote in una riduzione del livello tensionale in riferimento alle tensioni di contatto connettore-legno e connettore-calcestruzzo, rispetto ai



valori che si riscontrerebbero se, in un caso ideale, non si verificassero scorrimenti. E' importante anche mettere in evidenza il fatto che, andando a realizzare una struttura composta legno-calcestruzzo, fatta da una trave in legno con al di sopra una soletta in calcestruzzo resa solidale alla trave, si mette in atto anche una razionalizzazione dei materiali, in quanto si evita che nella porzione tesa della sezione resistente sia presente il calcestruzzo che, come è noto, presenta una bassissima resistenza a trazione.

Come accennato precedentemente, soprattutto quando il rinforzo di un solaio in legno sia necessario a fronte di un incremento dei carichi variabili, può essere importante cercare di limitare il peso della soletta, utilizzando un calcestruzzo alleggerito, ottenendo una riduzione di peso dell'ordine del 15%-20%. Tuttavia, bisogna rilevare che, rispetto ad un calcestruzzo di peso normale, risulta minore sia il carico ultimo trasmissibile fra i due materiali che il modulo di elasticità di tale calcestruzzo.

Sono state effettuate indagini sperimentali in cui sono state condotte delle prove di taglio in provini realizzati gettando un prisma di calcestruzzo alleggerito (LC) fra uno strato di legno e due travi in posizione orizzontale. La collaborazione fra i due materiali è stata realizzata tramite connettori di diversa geometria (vedi fig. 5.1.1).

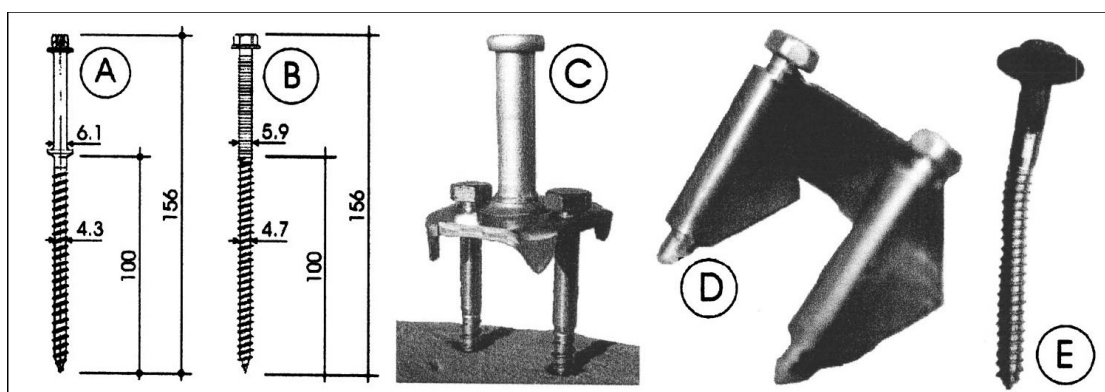


fig. 5.1.1 - tipologie di connettori utilizzati nella sperimentazione

I risultati ottenuti sono stati evidentemente diversi in termini di carico ultimo trasmesso, rigidità della connessione e decadenza di questa all'aumentare dello sforzo, entità dello scorrimento relativo e capacità della connessione di mantenere una certa forza trasmessa fra i due materiali anche dopo grandi scorrimenti (che può risultare vantaggioso in caso di condizione di carico ciclico).

A riprova delle grandi doti di duttilità di alcuni dei connettori in questione si riportano alcuni grafici carico-spostamento (fig. 5.1.2):

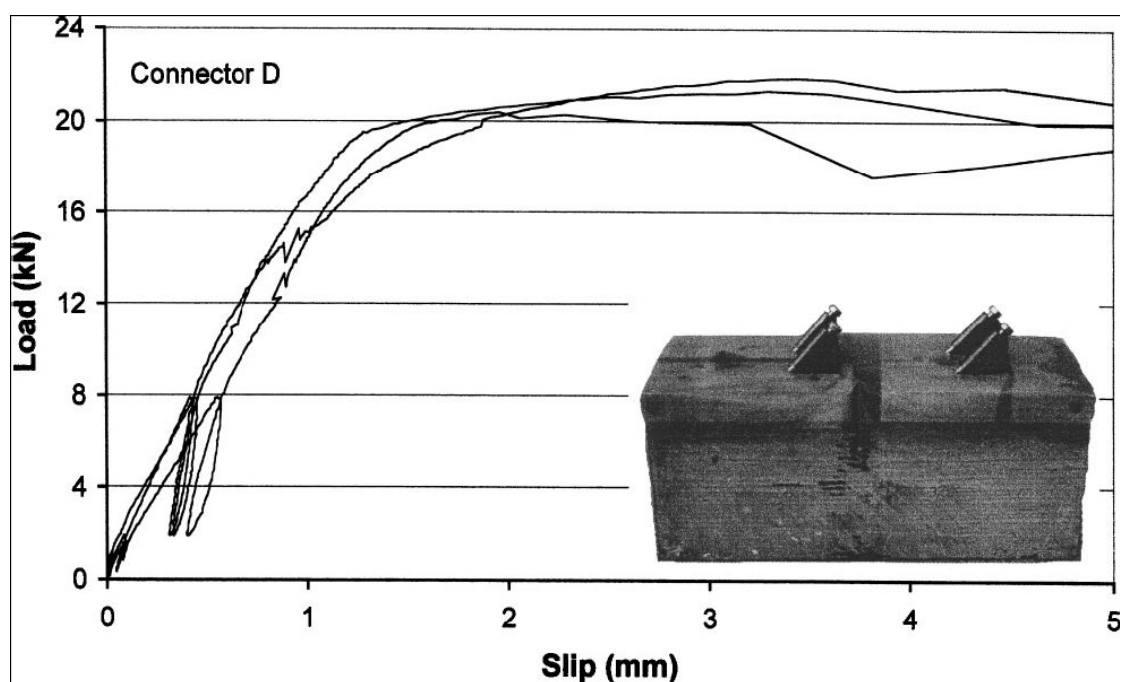


fig 5.1.2 - grafico carico spostamento relativo al connettore D

Nel caso del connettore D la risposta del provino al di là del limite elastico, è stata la migliore.

Per il rinforzo degli elementi strutturali in legno sollecitati da sforzi flessionali si può ricorrere anche a travi in acciaio, poste al di sopra o al di sotto della

struttura principale e ancorate a questa, anche in questo caso, tramite connettori metallici di diversa natura e geometria. Le possibilità d'intervento sono molteplici: si potrà avere, ad esempio, un rinforzo dell'intradosso tramite una piastra d'acciaio ancorata al legno tramite bulloni all'estradosso, oppure il rinforzo sarà legato all'inserimento di una trave metallica tipo IPE o HE al di sotto della trave principale in legno, oppure, ancora, da travi di diversa forma poste lateralmente rispetto alla trave da rinforzare. Le ultime due tipologie sono molto criticabili da un punto di vista puramente estetico. Bisogna sempre, invece, prestare molta attenzione alla connessione fra la struttura da rinforzare e l'elemento di rinforzo, in quanto l'efficienza e la rigidità della connessione è fondamentale per la buona riuscita della connessione stessa. Sempre dal punto di vista dell'estetica è molto vantaggioso un tipo di rinforzo che prevede una trave tipo HE inserita al di sopra della trave in legno e nel pacchetto del solaio in modo da non risultare visibile né dal basso (per la presenza della trave in legno) e né dall'alto, in quanto nascosta dalla soletta in c.a. Questo tipo di rinforzo è vantaggioso anche perché in generale la trave in legno risulta in zona tesa e si riduce fortemente il problema della viscosità, essendo, questa, minore per gli elementi in legno sollecitati a trazione.

### 5.1.1 Elementi di connessione

Come si vede dalla figura 5.1.1 gli elementi di connessione sono molteplici.

Per quanto riguarda i giunti di connessione fra elementi in legno, è possibile sottolineare la possibilità di adottare tipologie di connettori a tubo che uniscono grandi risorse di resistenza a buone capacità dissipative. Esse sono

sicuramente da prendere in esame, soprattutto alla luce della necessità di realizzare strutture in grado di dissipare energia sotto un'azione sismica. Tali connessioni, inoltre, sempre grazie alle capacità dissipative, permettono al legno di potersi deformare elasticamente, come peraltro è nella sua natura (se si tiene conto del comportamento a trazione). Le tecnologie di realizzazione di tali connessioni sono molteplici. Alcune prevedono inizialmente l'incollaggio di elementi di rinforzo in legno ad elevata resistenza in corrispondenza dell'interfaccia fra due elementi di legno che andranno ad essere connessi. Poi si procede con la realizzazione di un foro passante negli elementi in legno (foro che verrà realizzato di diametro maggiore rispetto al diametro del connettore), successivamente viene inserito nel foro il connettore a tubo e tramite un dispositivo a martinetto idraulico viene fatto espandere in direzione radiale e fatto aderire alle pareti del foro in modo da evitare scorrimenti relativi fra i due elementi di legno (fig. 5.1.1.1).

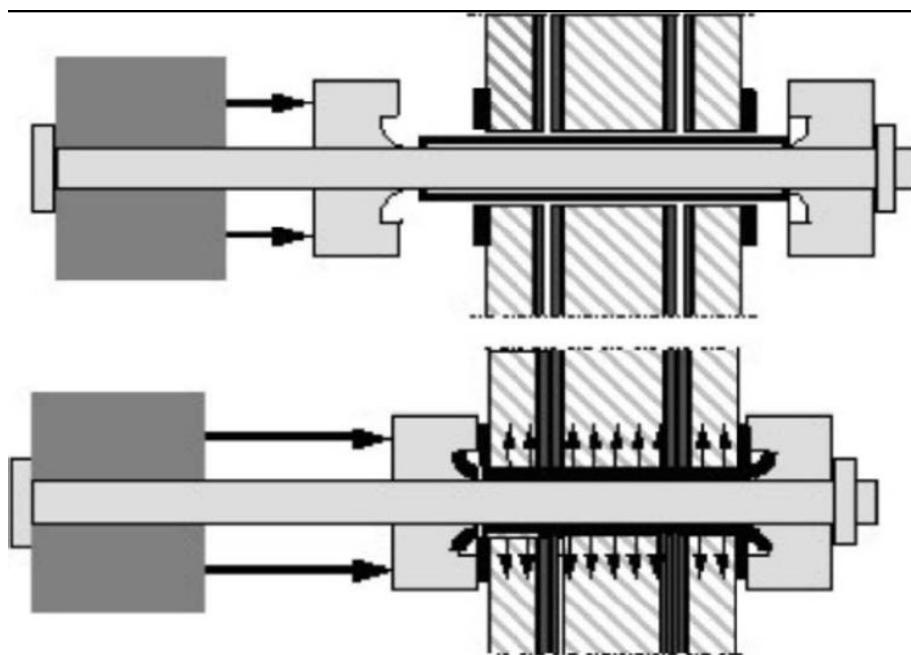


fig. 5.1.1.1 - tecnica di inserimento del connettore a tubo

E' bene prestare particolare attenzione alla fase dell'allargamento del connettore verso le pareti del foro, in quanto una scarsa espansione potrebbe ripercuotersi in maniera negativa anche sulla rigidità della connessione. Prove di carico monotone su 16 provini, in cui sono state montate delle connessioni a tubo di 35 mm di diametro e precedentemente lo strato di rinforzo di DVW, hanno rivelato che un'adeguata espansione porta ad un trasferimento di carico immediato, una elevata resistenza e altrettanto buone doti di duttilità della connessione. In fig. 5.1.1.2 sono riportati i grafici carico-scorrimento dei 16 provini, in cui si può notare, inoltre, come sia bassa la discrepanza fra i grafici relativi a ciascuna prova (segno di un comportamento omogeneo).

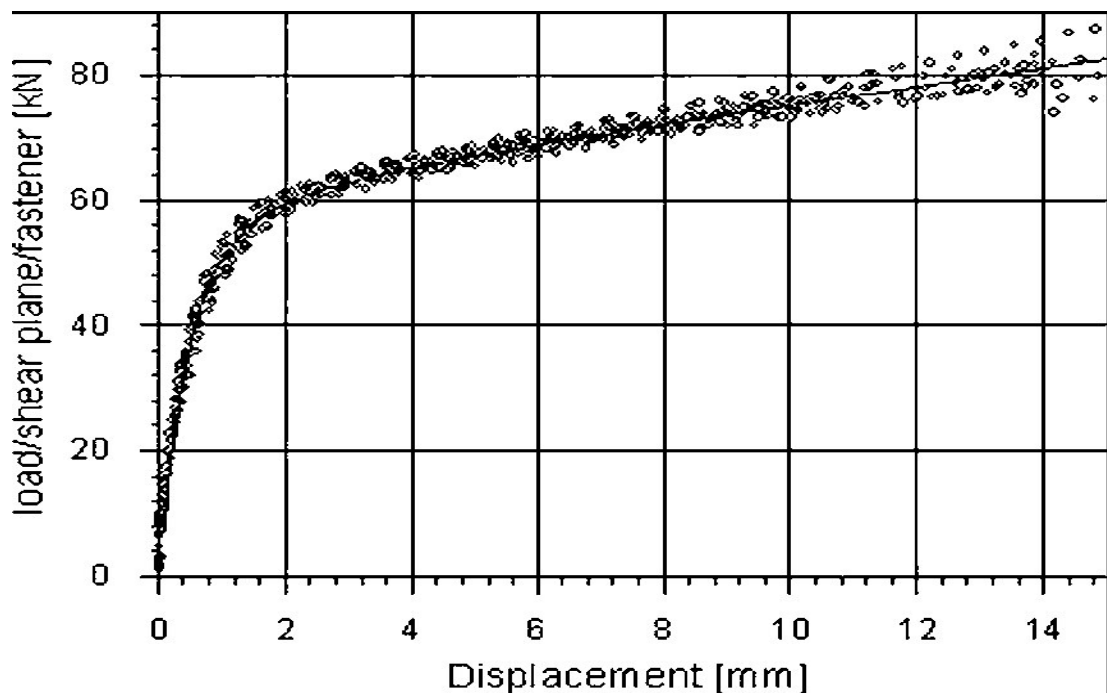


fig 5.1.1.2 - diagrammi carico spostamento per prova monotona e per 16 provini

Diversamente dalla tecnica sopra esposta, è possibile utilizzare l'accorgimento di riempire i vuoti fra il connettore e il foro precedentemente realizzato, tramite l'uso di iniezioni di resina.

Come accennato precedentemente, nelle varie sperimentazioni condotte, per rinforzare localmente il legno in corrispondenza della zona di connessione, è stato usato un tipo di legno simile al compensato (Densified Veneer Wood (DVW)) che fornisce un incremento di resistenza nei confronti di eventuali crisi localizzate. La ragione principale che porta a rinforzare localmente il legno è per evitare che esso possa spezzarsi o danneggiarlo in corrispondenza della zona di connessione. Più precisamente, lo strato di DVW viene incollato in ogni singolo elemento di legno, in corrispondenza della porzione che sarà a contatto con ciascun altro elemento.

Nell'ultimo decennio sono stati condotti degli studi per valutare il comportamento di tale tipologia di connettore nei riguardi di condizioni di carico ciclico. Da questo tipo di prova si è visto che le crisi che si sono verificate non sono mai state crisi di tipo fragile. Inoltre, in nessun caso gli elementi in legno hanno riscontrato alcun danneggiamento. La crisi si è avuta per snervamento del tubo che costituiva la connessione. In fig. 5.1.1.3 è riportato lo spaccato del tubo dopo diversi cicli di carico che hanno portato allo sviluppo di grandi deformazioni.

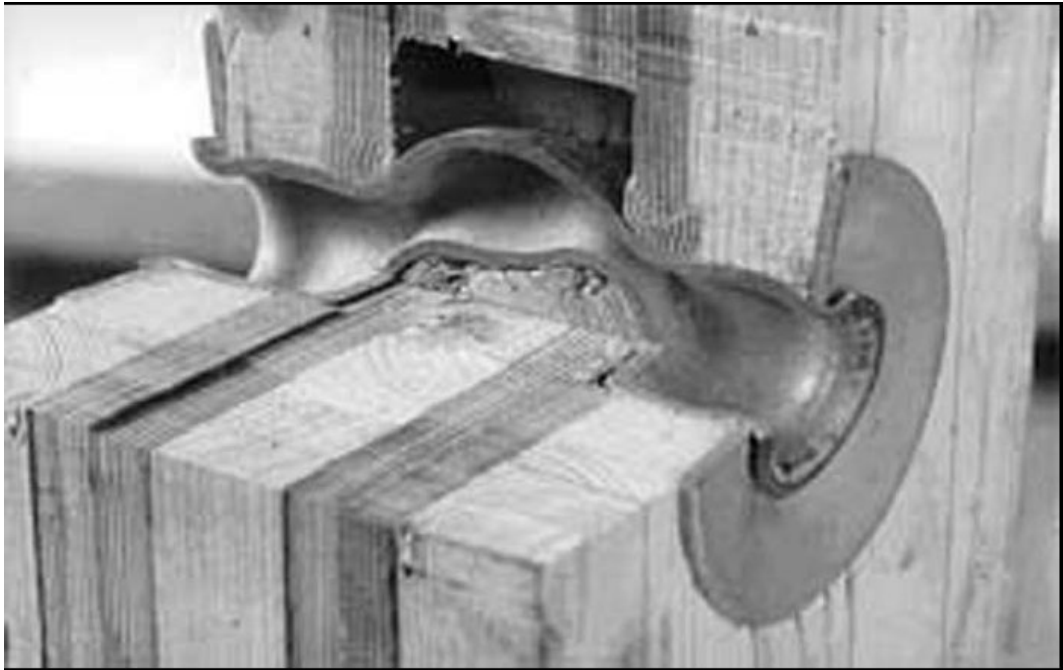


fig 5.1.1.3 - deformazione del tubo dopo diversi cicli di carico

Nello studio in questione è stato ricavato anche il grafico momento flettente massimo (al centro del connettore)-rotazione media per ogni ciclo di carico e relativo a connettori di diametro 28mm, in cui si vede molto bene come la rigidità della connessione, dopo i primi cicli, cala notevolmente (vedi fig. 5.1.1.4).

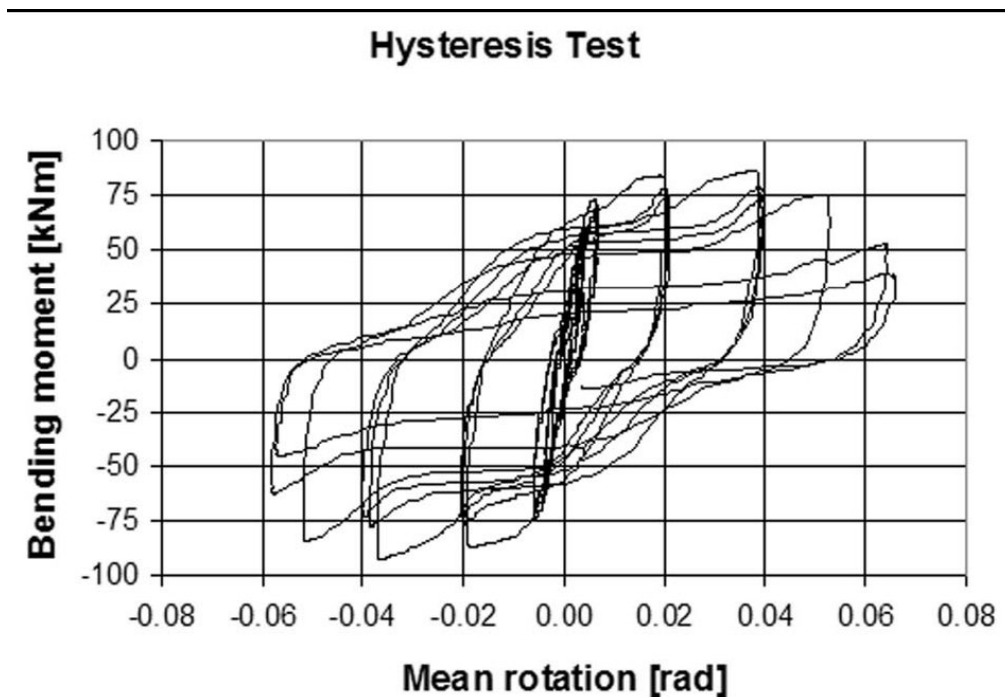


fig 5.1.1.4 - diagrammi momento flettente-rotazione per diversi cicli di carico

5.2 Rinforzo di elementi strutturali tramite FRP: materiali, analisi sperimentali e valutazione dei risultati

5.2.1 Gli FRP (Fiber Reinforced Polymers)

5.2.1.1 Definizione

Un materiale composito, in generale, è costituito da due o più materiali distinti, con caratteristiche fisiche più o meno diverse tra loro, e con proprietà meccaniche complessive significativamente superiori ai componenti presi singolarmente.

In particolare, il FRP è ottenuto combinando fibre ad alta resistenza (rinforzo) con una matrice polimerica (matrice).



### 5.2.1.2 Le Fibre

Le fibre costituiscono l'elemento di rinforzo vero e proprio in un composito. Esse sono inserite in una matrice per conferirle proprietà meccaniche superiori e sono costituite da fibre elementari, dette *monofilamenti*, con diametro compreso tra 8 e 20  $\mu$ . Un insieme di monofilamenti è detto *filo* (*Yarn*) ed è alla base dei materiali polimerici fibrorinforzati. Le fibre più comunemente usate sono il vetro e il carbonio.

Le *fibre di vetro* sono caratterizzate da un basso costo, elevata tenacità e resistenza a trazione, buona resistenza a compressione; tuttavia presentano un modulo elastico relativamente basso, una bassa adesione alla matrice e un'alta sensibilità all'umidità.

Esse sono ottenute tramite un processo di filatura di un fuso vetroso attraverso una filiera di platino. Il processo è integrato a quello di produzione del vetro.

I due più comuni tipi di vetro utilizzati per la fabbricazione di fibre per utilizzi strutturali sono il vetro "E" e il vetro "S". Si riportano di seguito alcune caratteristiche delle fibre che si ottengono.

proprietà	Vetro E	Vetro S
Densità [ $\text{g/cm}^3$ ]	2,54	2,49
Resistenza a trazione [MPa]	3448	4585
Modulo elastico [GPa]	72,4	85,5
Diametro [ $\mu\text{m}$ ]	3-20	8-13
Coeff. dilatazione termica [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$

Le *fibre di carbonio* sono quelle più utilizzate nei compositi avanzati perché conferiscono altissime proprietà

meccaniche in termini di modulo di elasticità normale, resistenza a compressione e trazione; inoltre risultano essere scarsamente sensibili ai fenomeni di *creep*, di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione di resistenza a lungo termine.

Le proprietà di queste fibre sono dovute alla struttura grafitica del carbonio, che in tale forma ha ibridizzazione  $sp^2$  e struttura planare. I legami molto forti tra gli atomi di carbonio in uno di questi piani rende elevato il modulo di elasticità del materiale in questa direzione, mentre i deboli legami tipo *Van der Waals* tra piani vicini rendono molto inferiore il modulo in direzione ortogonale ai piani. La struttura delle fibre di carbonio non è mai perfettamente cristallina come quella della grafite. Nel linguaggio comune, il termine grafite indica una fibra il cui contenuto in carbonio è superiore al 99%, mentre il termine carbonio indica un materiale in cui la percentuale di carbonio è variabile tra l'80 e il 95%.

Le elevate caratteristiche ottenibili con una struttura avente proprietà pari alla grafite non vengono mai raggiunte durante la produzione, a causa di inevitabili difetti che si interpongono tra gli strati. La tecnologia di produzione prevede la pirolisi, cioè la decomposizione termica in assenza di ossigeno di sostanze organiche, dette precursori. I precursori impiegati sono tre:

- PAN (*Poliacrilonitrile*)
- Rayon (poco usato)
- Peci

Le fibre da peci possono essere considerate fibre di grafite, le altre sono fibre di carbonio.

### 5.2.1.3 Le Matrici

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti. Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente. Per miscelazione con un opportuno reagente esse polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido vetroso. Poiché la reazione può essere accelerata agendo sulla temperatura, le suddette resine sono anche dette termoindurenti.

Tra i vantaggi delle matrici polimeriche troviamo l'alta capacità di impregnare le fibre, dovuta alla bassa viscosità allo stato fluido, ottime proprietà adesive, la possibilità di avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente, una buona resistenza agli agenti chimici e l'assenza di una temperatura di fusione.

I principali svantaggi sono invece rappresentati dall'ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa, dalla modesta tenacità a frattura (comportamento "fragile") e dalla sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più utilizzate nei compositi fibrorinforzati per il settore civile sono quelle epossidiche. In alcuni casi è possibile impiegare resine poliestere o vinilestere.

Sono ancora in corso di studio i materiali compositi fibrorinforzati che utilizzano matrici polimeriche termoplastiche, che possono richiedere tecniche di applicazione diverse dalle precedenti e che permettono la modellazione della resina in qualsiasi momento con opportuni trattamenti termici.

Le resine epossidiche presentano una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed inoltre esibiscono ottime proprietà adesive. Sono perciò particolarmente indicate per la realizzazione di compositi da impiegare nel settore civile.

Appartengono alla classe delle resine termoindurenti, preparate a partire da reagenti a basso peso molecolare e a bassa viscosità, in modo che possano facilmente impregnare le fibre. Il reagente precursore (principale), costituito di solito da liquidi organici a basso peso molecolare, contiene un certo numero di gruppi funzionali ad anello formati da due atomi di carbonio legati ad un atomo di ossigeno (gruppo epossidico). Tali sostanze possono, ad esempio, essere prodotte per reazione di epicloridrina con composti amminici o acidi del bisfenolo A. La viscosità del prepolimero epossidico dipende dal grado di polimerizzazione.

La suddetta miscela, che in termini di composizione costituisce il reagente principale, viene fatta reagire (curing) con un agente reticolante (di solito un'ammina alifatica). La reazione, di tipo radicalico, è esotermica e ha luogo senza la formazione di prodotti secondari. Può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura, a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate. Inoltre consiste in due tipi di reazione

- poliaddizione tra gruppo epossidico ed agente di cura (indurente)
- reazione di omopolimerizzazione epossidi - epossidi.

La scelta dell'agente di reticolazione è molto importante per le proprietà termiche, di resistenza chimica e di lavorabilità; le proprietà meccaniche ne sono poco influenzate.

La resina epossidica più comunemente utilizzata per materiali compositi è il diglicidil etero del bisfenolo A (DGEBA).

Gli adesivi rivestono un ruolo fondamentale nel trasferire le sollecitazioni tra due materiali con comportamento visco-elastico diverso (come ad esempio il legno e le fibre di carbonio) e hanno quindi il ruolo di rendere i materiali "meccanicamente compatibili" (congruenza degli spostamenti). Pertanto, è fondamentale che gli adesivi destinati all'impiego strutturale siano specificamente formulati e testati con idonee metodologie, che ne evidenzino l'adesione (resistenza a taglio), la compatibilità col supporto e la durabilità nei confronti dell'esposizione a cicli termoigrometrici. Nel caso in cui il supporto sia materiale ligneo le considerazioni appena viste devono essere prese con maggiore attenzione in quanto:

- La differenza tra le caratteristiche meccaniche del legno e delle resine è rilevante.
- Le specie legnose utilizzate in ambito strutturale sono diverse e aventi ognuna differenti proprietà meccaniche e fisiche, quindi diverso è su ognuna di esse il legame di aderenza resina-legno.
- La resina deve necessariamente resistere a cicli termoigrometrici compatibili con la classe di servizio a cui appartiene il materiale ligneo di supporto (EN 1995).

Le matrici si possono considerare a tutti gli effetti come materiali meccanicamente isotropi, sono termoindurenti a comportamento visco-elastico il cui andamento della curva carico-spostamento (fig. 2.10) dipende dalla composizione chimica.

In tali polimeri, per i quali la reazione di reticolazione procede a temperatura ambiente, la temperatura di

transizione vetrosa ( $T_g$ ), al di sopra della quale diminuiscono sensibilmente gran parte delle caratteristiche meccaniche.

## 5.2.2 Varie tecnologie di rinforzo e analisi sperimentali

Attualmente per il rinforzo di elementi in legno ma anche in c.a., soggetti a sforzi flessionali, i prodotti maggiormente utilizzati sono tessuti, lamine o barre realizzate in materiali compositi. In campo strutturale, le fibre maggiormente utilizzate sono quelle di Carbonio e Vetro che offrono caratteristiche meccaniche in termini di rigidità e tensione di rottura molto elevate. Tra le varie possibilità esiste quella di annegare delle barre in fibra di carbonio in della resina epossidica, il tutto all'interno di un certo numero di scanalature realizzate all'intradosso della trave. A questo proposito presso il LaPS (Laboratorio Prove Strutture) sono state svolte delle prove di delaminazione su travetti di legno antico (abete bianco la cui età si può stimare attorno ai 200 anni), in cui precedentemente sono state inserite delle barre in fibra di carbonio di diametro 10mm all'interno di scanalature ricavate nei travetti stessi. La resina epossidica, inoltre, aveva il compito di effettuare il trasferimento del carico assiale di trazione dalla barra al travetto. I provini erano stati realizzati con lunghezze d'ancoraggio barra-legno variabili fra 140mm, 240mm e 440mm. Durante ciascuna prova è stato misurato il carico applicato alla barra tramite una cella di carico e gli spostamenti della barra, del legno e della resina tramite dei trasduttori di spostamento (LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*)) in modo da poter ricavare, in fase

di elaborazione dei dati, la differenza di spostamento relativamente a questi tre punti.

Per quasi tutte le prove effettuate il tipo di rottura che si è avuto è stato secondo la modalità "frattura coesiva nel legno (A)". Più precisamente, poi, in alcune prove la crisi è stata caratterizzata da una modalità A1 (con formazione di un leggero film di legno sul tassello che si ottiene all'atto della crisi) (vedi fig. 5.2.2.1)

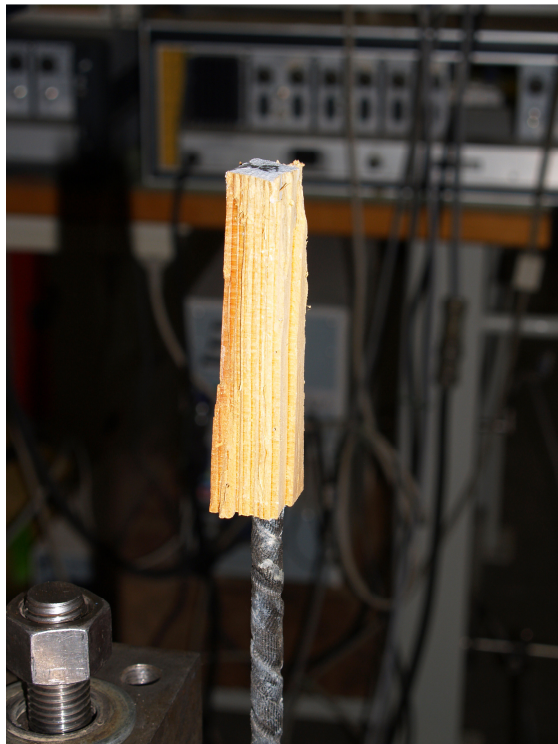


fig.5.2.2.1 - Modalità di rottura A1

mentre in altre, in cui la superficie di rottura descriveva un cuneo, la modalità è stata quella denominata A2 (vedi fig. 5.2.2.2).



fig. 5.2.2.2 - .Modalità di rottura A2

Come si auspicava, non si sono verificate crisi all'interfaccia fra l'adesivo e il rinforzo (indice sicuramente di una non corretta applicazione dell'adesivo), né tipologie di crisi alternativamente sia adesive che coesive (frattura mista).

E' da sottolineare che per quanto riguarda due provini, si è avuta una rottura per compressione della porzione di legno di contrasto (vedi fig. 5.2.2.3) (necessario per poter vincolare il provino nei riguardi della componente orizzontale di spostamento). In particolare, in un caso la crisi per compressione è sopraggiunta in quanto il carico assiale elevato (circa 4000kg) unito ad un legno degradato e dunque con caratteristiche meccaniche peggiori, hanno portato all'instabilizzazione delle fibre compresse e dunque all'impossibilità del provino di assorbire un carico più alto. Il valore di tensione in corrispondenza della superficie di legno soggetta allo sforzo di compressione,



all'atto della crisi per instabilità delle fibre è stata quantificata col valore di  $240 \text{ kg/cm}^2$  circa. Nel secondo caso, invece, la qualità del legno era migliore e pertanto anche le caratteristiche meccaniche. La superficie in cui si scaricava lo sforzo di compressione era, tuttavia, inferiore rispetto alle prove fatte in precedenza. Inoltre, sempre in corrispondenza della superficie compressa, il legno presentava un nodo di grandi dimensioni che, con buona probabilità, può essere stato concausa della elevata concentrazione di tensioni rilevata. Anche per questo caso la tensione è stata calcolata ed ha assunto un valore di circa  $250 \text{ kg/cm}^2$  circa.



fig. 5.2.2.3 - Modalità di crisi per compressione

A parte questi due casi, che non si possono evidentemente considerare significativi del comportamento a delaminazione dei provini, tutte altre prove hanno evidenziato una

modalità di crisi di tipo fragile. Gli unici sentori della crisi imminente erano vari scricchiolii, accompagnati da un leggero e temporaneo scarico del provino, sintomo del fatto che alcune fibre avevano raggiunto il loro carico ultimo. (Altre informazioni su questo tipo di prove sono riportate nel capitolo 6).

Precedentemente a questo tipo di sperimentazioni, sono state condotte altre prove, sempre su travetti dello stesso tipo, sempre di abete bianco. Questa volta, però, sono state incollate su una faccia di ogni travetto non barre ma su alcuni provini lamine e su altri tessuti entrambi in CFRP e entrambi di larghezza pari a 50mm. Inoltre per questo tipo di prova, le lunghezze d'ancoraggio con cui si è deciso di realizzare i provini sono state di 100mm, 200mm e 300mm.

Tutte e due queste prove sono fondamentali perché permettono di stabilire se sia fattibile o meno realizzare un rinforzo di un elemento in legno soggetto ad una condizione di carico che genera flessione e quanto sia elevato l'incremento di momento ultimo che è possibile ottenere su tale elemento rispetto allo stesso non rinforzato, prima che si verifichi la delaminazione essendo proprio la tensione di delaminazione il vero limite del rinforzo, piuttosto che la tensione di rottura del materiale di cui è costituito il rinforzo. E' bene precisare che per quanto riguarda le prove sui travetti in legno con ancorate le barre in carbonio, si può parlare di crisi per delaminazione solo in quei casi in cui la rottura è avvenuta accompagnata dalla formazione di un tassello lungo la superficie di ancoraggio della resina rispetto al legno (vedi foto...). Nei casi in cui la rottura avviene con formazione di un cuneo di legno (vedi foto...) allora si parla più propriamente di crisi per raggiungimento della

tensione massima di trazione nel legno nella direzione della fibratura.

Esistono, inoltre, pubblicazioni riguardanti sperimentazioni in cui si valuta il comportamento di elementi lignei (legno massiccio o lamellare) rinforzati con barre in fibra di vetro o carbonio, poste in corrispondenza dell'intradosso, caricati da forze che producono sollecitazioni flessionali. Ciò è importante in quanto non è detto che il comportamento del rinforzo in una prova di trazione sia coincidente con il comportamento di un elemento rinforzato secondo, ad esempio, uno schema a 4 punti. Nelle prove di trazione descritte in precedenza, infatti, non si riesce a cogliere il fatto che le tensioni tangenziali che si trasferiscono dal rinforzo al supporto possono essere inferiori nel caso in cui, come succede in una prova di flessione, oltre che uno stato tangenziale puro, supporto e rinforzo vengono a scambiarsi anche delle tensioni normali di trazione, generate dalla rigidità a flessione del rinforzo e dal fatto che, sotto carico, anche il rinforzo sarà caratterizzato da una curvatura non nulla. E' intuitivo, infatti, accorgersi del fatto che, se in corrispondenza del punto d'estremità di un rinforzo (sia esso una lamina o un tessuto) si applica una forza che sia in grado di incrementare l'adesione fra rinforzo e supporto (e ci si può riferire, ad esempio, alla fasciatura che si realizza come rinforzo nei confronti delle sollecitazioni taglienti), si potrà sperare in uno sforzo di delaminazione più elevato (anche se in sede progettuale non si terrà conto di tale incremento).

Come esempio possiamo citare una campagna di sperimentazione condotta dall'università di Manitova (Canada) in collaborazione con la "North Carolina State University" che aveva come scopo quello di andare a valutare la tipologia di crisi e il carico ultimo di alcune

travi di un ponte rimasto in servizio per oltre 30 anni rinforzate con delle barre in GFRP sottoposte ad una prova di flessione a 4 punti. Più precisamente alcune prove sono state condotte su delle travi in scala reale mentre altre sono state eseguite su travi in scala 1:2. Per ogni trave, si è trattato di andare ad eseguire due scanalature e inserire dentro un certo numero di barre con diametro che variava da provino a provino (pertanto anche le dimensioni delle scanalature erano variabili). Inoltre, avendo a disposizione un certo numero di provini e di travi in scala reale, è stato deciso di rendere variabile da prova a prova la percentuale geometrica d'armatura. Successivamente il rinforzo è stato reso aderente al supporto tramite resina epossidica. Alcune prove sono state eseguite andando a realizzare una scanalatura in corrispondenza dell'intradosso mentre per altri provini la scanalatura è stata effettuata sul fianco della trave, (comunque in modo da avere le barre posizionate in corrispondenza del lembo teso della trave). Per andare a valutare la rigidezza e resistenza iniziali, alcune prove sono state condotte su elementi privi di rinforzo. Conseguentemente si è visto che il rinforzo produce negli elementi strutturali presi in considerazione un incremento di rigidezza flessionale fra il 18% e il 46%.

La fibra di vetro utilizzata era caratterizzata da un modulo elastico pari a 56 GPa e una resistenza a trazione di 1800 MPa, mentre la resistenza a compressione della resina ad una temperatura di 20°C è stata valutata attorno a 55 MPa. Infine si è registrata una resistenza a trazione delle barre di circa 700 MPa e un modulo elastico di 42 GPa (ciascuna barra era caratterizzata da una percentuale in peso di fibra del 70% e di resina del 30%). Per valutare lo sforzo sul rinforzo è stato applicato un estensimetro mentre per misurare le inflessioni di ciascuna trave sono

stati inseriti LVDT collocati in 5 diverse posizioni. Per i provini in scala 1:2 il carico è stato applicato con velocità di 3 mm/min mentre per quanto riguarda le travi in scala reale la velocità di applicazione del carico è stata di 1 mm/min.

Per prevenire la possibilità che si verifichi instabilità laterale durante il caricamento, ad un quarto della luce ed in maniera simmetrica è stato applicato un rinforzo.

Dalla valutazione dei diagrammi carico-spostamento (inflexione nella sezione di mezzeria) per i provini in scala 1:2 risulta che le modalità di resistenza di ciascun elemento rinforzato sono divenute più duttili in quanto,

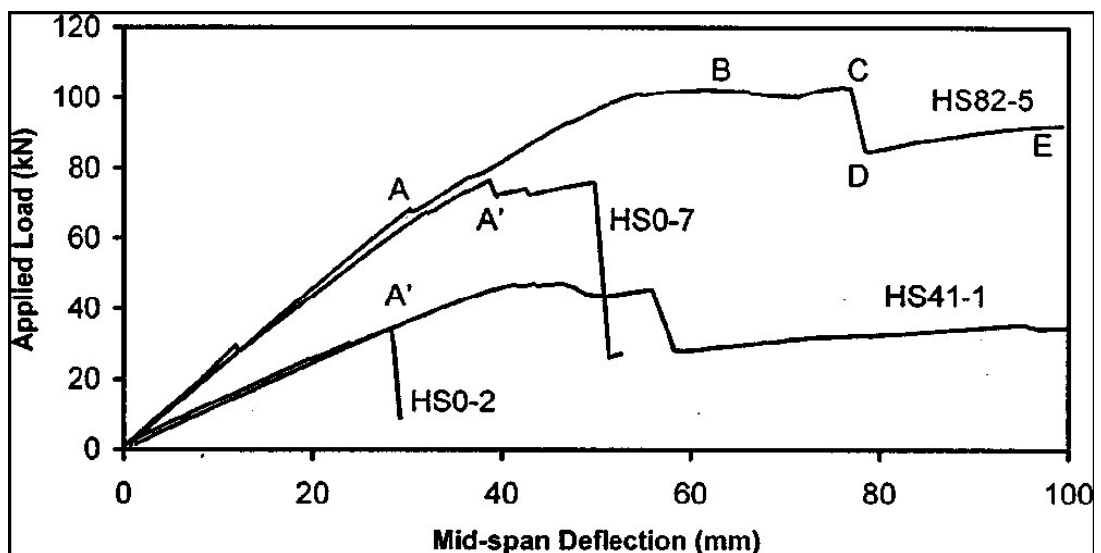


fig. 5.2.2.4 - Grafico carico-freccia in mezzeria per la trave in scala 1/2

grazie all'apporto di resistenza delle barre, ha acquisito maggiore peso la modalità di rottura per schiacciamento delle fibre compresse all'estradosso. Il grafico di fig. 5.2.2.4 mostra un primo tratto lineare fino al punto A coincidente con la formazione di una fessura in corrispondenza della zona di trazione. Successivamente la rigidezza tende a calare gradualmente fino al

raggiungimento del carico massimo sopportato dalla trave. A questo punto ha avuto inizio lo schiacciamento delle fibre compresse. Altro punto significativo del grafico è il punto C in cui si è formata una fessura di grosse dimensioni che ha determinato un momentaneo scarico della trave e successivo ricarico (ramo CD e DE). La registrazione dei dati, da questo punto, si è interrotta a causa delle limitazioni nel campo di utilizzo degli strumenti del sistema di acquisizione.

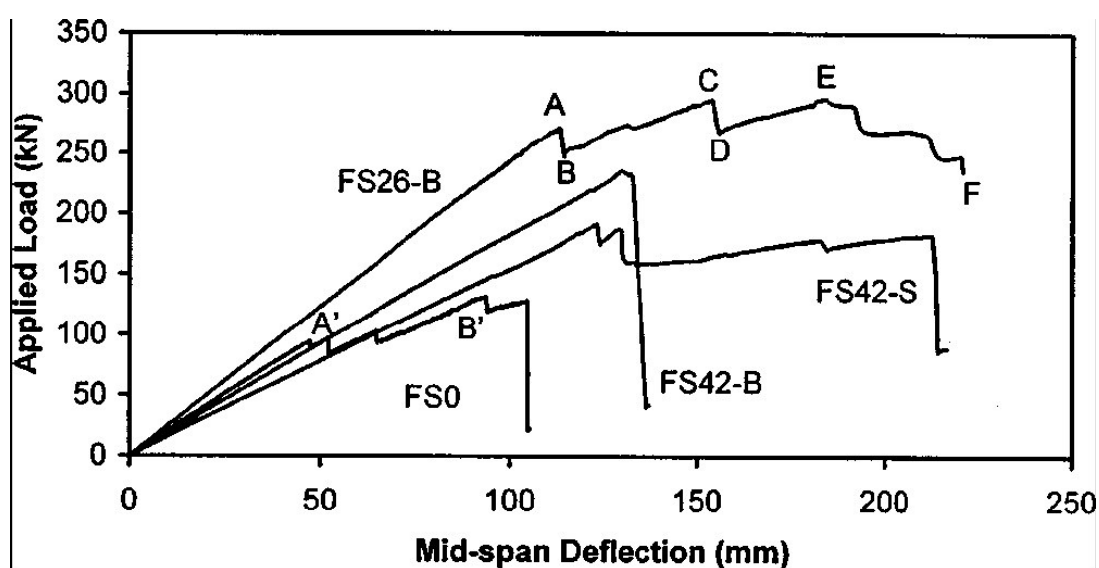


fig. 5.2.2.5 - Grafico carico-freccia in mezzeria per la trave in scala reale

Per quello che concerne le travi in scala reale, dalla misurazione della rigidità sugli elementi non rinforzati si è ottenuto un incremento di rigidità del 5% - 7%. Il comportamento di ciascun elemento è stato elastico-lineare fino al 95% del carico ultimo. Relativamente ad una sola prova, addirittura, il comportamento elastico-lineare si è avuto fino alla crisi dell'elemento stesso, crisi che è avvenuta dovuta alla propagazione di una fessura generatasi nella zona di trazione e propagatisi lungo un difetto presente nel legno. Successivamente si è avuta rottura

nella porzione compressa della trave. Si può notare dal grafico di fig. 5.2.2.5 che il tratto non lineare del diagramma è del tutto simile al grafico relativo ai provini in scala 1:2. Inoltre, ciò che si nota in maniera evidente dai grafici è che i rinforzi hanno conferito ad ognuno degli elementi sia maggiori risorse di resistenza che, soprattutto, migliori risorse di duttilità, in quanto hanno spostato, seppure leggermente, la modalità di rottura e hanno permesso di evidenziare le caratteristiche duttili del materiale legno.





## 6. Risultati delle prove effettuate sugli elementi soggetti a compressione e su quelli soggetti a sforzo tagliante

### 6.1 Risultati delle prove di compressione in termini di carico di collasso e modalità di rottura

Per poter valutare la resistenza a compressione del legno, sono state condotte prove su elementi di altezza  $10\text{cm}$  e sezione  $5\times 5\text{cm}^2$ .

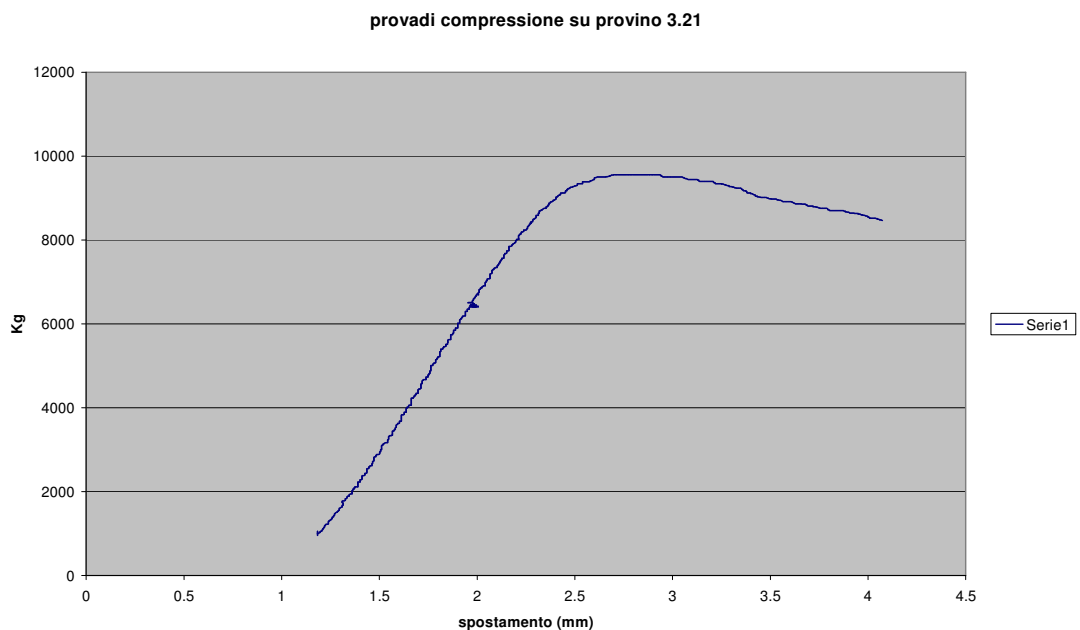


fig. 6.1.1 – grafico carico spostamento provino 3.21

Le prove sono state effettuate in controllo di carico. Per quanto riguarda la tensione di rottura del materiale si ipotizzava un valore di  $200\div 250\text{Kg}/\text{cm}^2$ . Tuttavia, anche per questo caso, i livelli di tensione registrati sono ben oltre quelli attesi. Dalle prove, infatti, si sono ottenuti valori di resistenza che in qualche caso hanno sfiorato i

$400\text{Kg}/\text{cm}^2$ . Mediamente il carico di rottura è stato di 8 tonnellate circa per la trave 3 e 6,5 tonnellate per la trave 7. Inoltre per il provino 3.21 (fig. 6.1.1) si è registrato un valore di carico a rottura di 9,5 circa e un valore di tensione di  $380\text{Kg}/\text{cm}^2$ .

In termini di risposta del materiale, come per altro ci si aspettava, è stato riscontrato il comportamento tipico del materiale legno sottoposto a sforzo normale di compressione nella direzione della fibratura. Infatti dai grafici carico-spostamento che sono stati ricavati per ciascuna prova, si può osservare un tratto iniziale che indica l'assestamento e la presa di carico del provino (pertanto, come anche nel caso delle prove di taglio, questo tratto è ininfluenza); successivamente si osserva un tratto lineare fino al raggiungimento del carico per il quale le fibre iniziano ad instabilizzarsi e quindi un tratto non lineare in cui il provino perde rigidità e pertanto ad un certo incremento di spostamento assiale segue un incremento di carico basso, se non in qualche caso nullo o addirittura una perdita di carico del provino stesso. La differenza di comportamento più evidente (fra la risposta a carico assiale di compressione parallelamente alle fibre e tagliante) è senza dubbio quella che si rileva una volta superato il limite elastico del materiale. Nel caso dei provini sollecitati da uno sforzo tagliante vi è un accenno di comportamento duttile ma in diversi casi, il ramo non-elastico è molto breve e pertanto sopraggiunge immediatamente la rottura, non essendo più il provino in grado di sostenere un certo carico (anche parziale rispetto al carico ultimo) a fessurazione avvenuta. Nel caso dei provini sottoposti a caricamento assiale di compressione, invece, esiste sì un ramo elastico del grafico carico spostamento, ma, oltrepassato il carico per il quale la risposta del materiale è elastica, si ha tutto un

intervallo di spostamenti in cui si vede che il provino (o meglio il materiale di cui è composto) è in grado di portare una certa quotaparte del carico di collasso. Per rendersi conto di ciò, può essere utile valutare l'andamento del grafico relativamente al provino 3.18, (fig. 6.1.2)

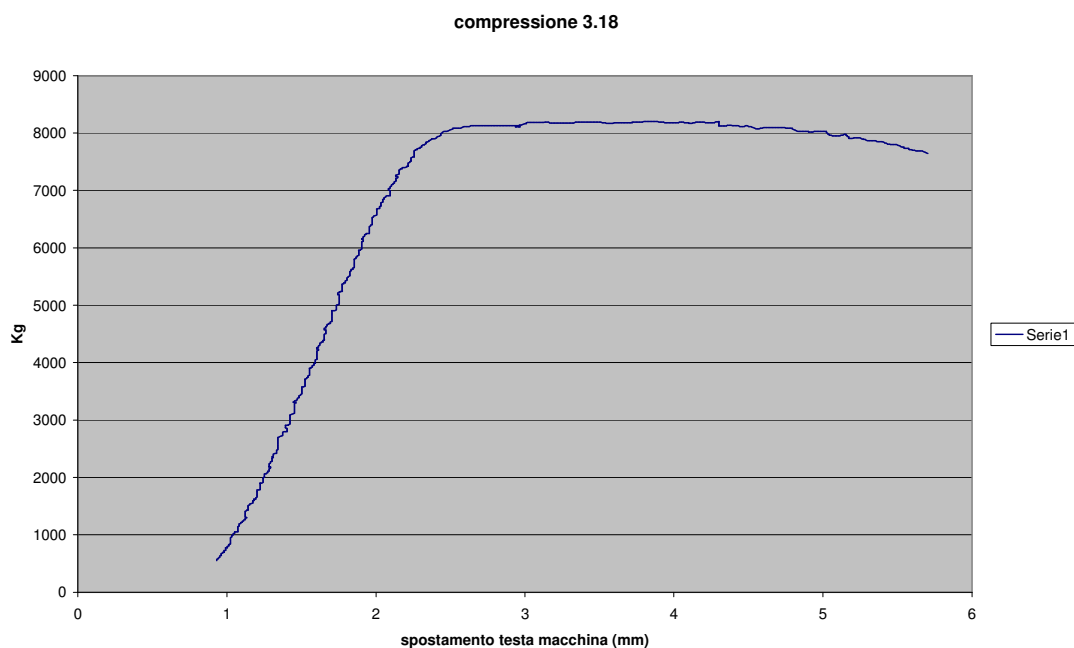


fig. 6.1.2 – grafico carico spostamento provino 3.18

in cui si vede che, superato il ramo elastico, il provino riesce a portare ancora l'intero carico ultimo del materiale (8000Kg circa). Tale differenza di comportamento era prevedibile in quanto la resistenza a taglio del materiale legno, sviluppatasi fra fibre adiacenti, è strettamente correlata alla resistenza a trazione ortogonalmente allo sviluppo delle fibre e si sa che il comportamento a trazione del legno non è affatto duttile. Dai vari grafici carico-spostamento che sono stati ricavati a partire dalle prove, si rileva che alcuni provini, dopo il superamento del limite elastico, sono caratterizzati da un andamento molto duttile, in cui il ramo plastico è più

esteso e dunque si ha un campo di spostamento relativamente grande in cui il provino è in grado di portare un carico rilevante anche a plasticizzazione avvenuta. E' importante valutare ciò in quanto, il comportamento duttile, come specificato anche precedentemente, è un requisito fondamentale per le strutture soggette a sollecitazioni sismiche, per le quali sono necessarie buone doti dal punto di vista della dissipazione d'energia.

Si riporta una figura (fig.6.1.3) in cui si può osservare in maniera evidente la modalità di rottura dei provini sottoposti ad una forza di compressione, per instabilità delle fibre del legno costituente i provini stessi.



fig. 6.1.3 – crisi per compressione provino 3.18

## 6.2 Risultati delle prove di taglio in termini di carico di collasso e modalità di rottura

Anche le prove a taglio sugli elementi a "s" sono state condotte in controllo di carico, con una velocità di carico di circa  $15\text{Kg/sec}$ . I provini sono stati prelevati da 2 diverse travi, individuate per semplicità con il numero 3 e 7. Per la trave 3 sono state effettuate prove su 7 provini, mentre dalla trave 7 si sono ottenuti 8 provini.

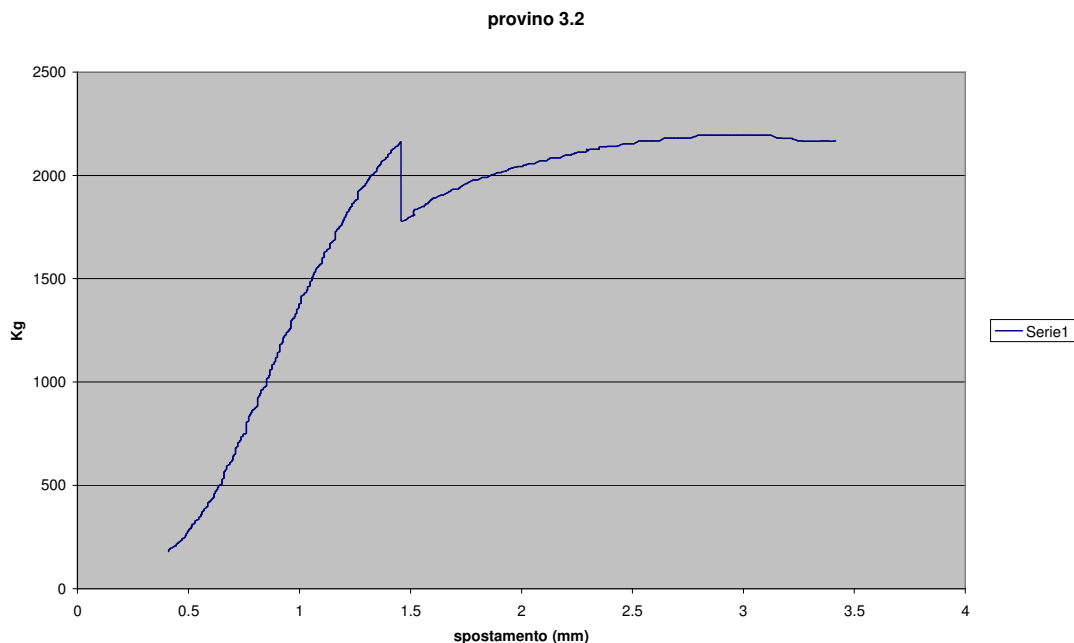


fig. – 6.2.1 – grafico carico spostamento provino 3.2

Per questo tipo di prove si aveva supposto un carico di collasso di circa  $1000\text{Kg}$ , in quanto si era ipotizzata una resistenza di circa  $30\text{Kg}/\text{cm}^2$ .

Le prove sperimentali, invece, hanno evidenziato una resistenza nettamente maggiore. Dalla trave 3 infatti sono stati ottenuti carichi ultimi dell'ordine di  $1850\text{Kg}$  (valore medio su tutti i provini). Per il provino 3.2, (fig. 6.2.1) addirittura, è stato ottenuto un valore di carico ultimo di  $2220\text{Kg}$ . In termini di resistenza, la media dei valori registrati per ogni prova è di  $64\text{Kg}/\text{cm}^2$  (più del doppio della resistenza ipotizzata). E' stato, inoltre, raggiunto un picco di tensione ultima (sempre relativamente al provino 3.2) di circa  $76\text{Kg}/\text{cm}^2$ .

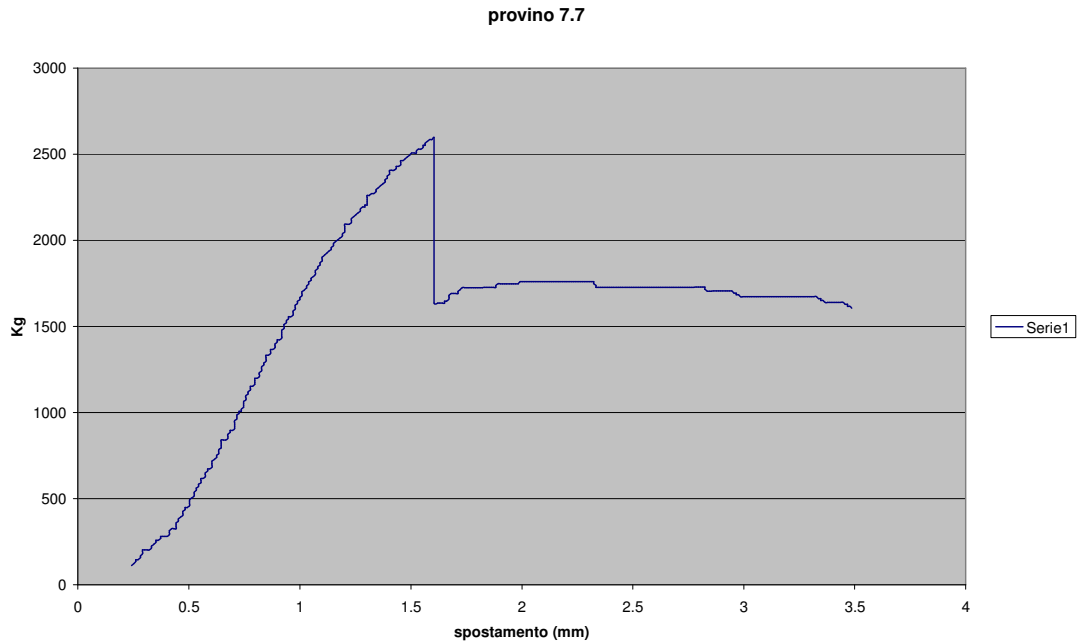


fig. 6.2.2 – grafico carico spostamento provino 7.7

Circa la trave 7 la resistenza media in termini di carico ultimo è stata di quasi  $2082Kg$ , a cui corrisponde una tensione di rottura del materiale di quasi  $73Kg/cm^2$ . I valori massimi di carico di collasso e di tensione ultima sono stati raggiunti dal provino 7.7 (fig. 6.2.2) e sono rispettivamente  $2595Kg$  e  $86,5Kg/cm^2$ . E' fondamentale tenere in considerazione che il provino 7.7 è caratterizzato da un forte ammaloramento nella zona trasversale. Tuttavia la regolarità della fibratura e la mancanza di nodi nella zona critica di trasferimento del carico, ha fatto sì che tale provino sviluppasse una resistenza maggiore.

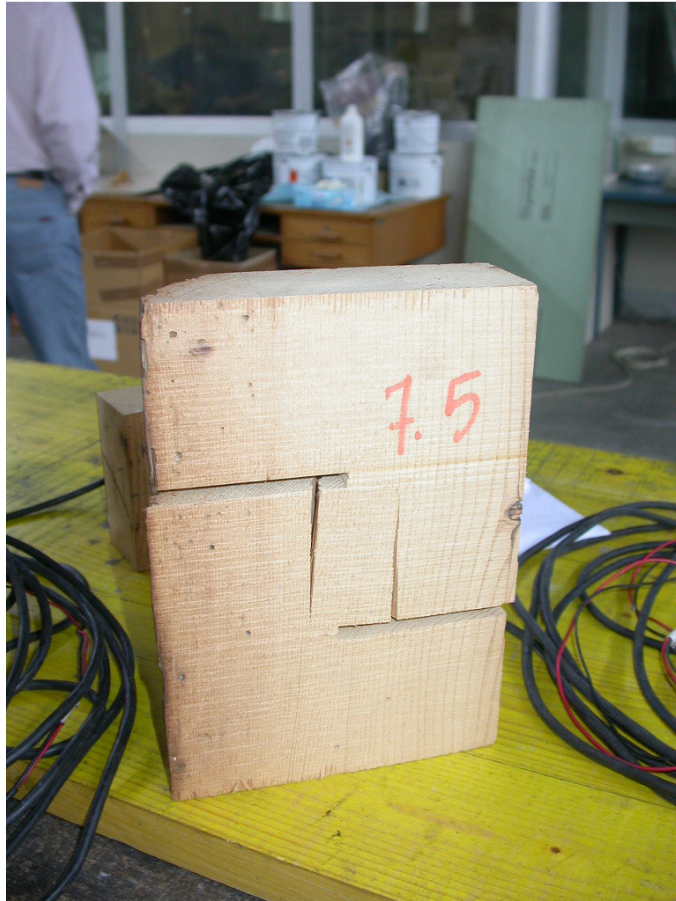


fig. 6.2.3 – crisi per taglio provino 7.5

Dai diagrammi carico-spostamento di ciascuna prova si possono individuare diversi tratti: inizialmente vi è un primo tratto di assestamento che, ovviamente, non ha alcun interesse nei confronti del comportamento del provino sotto carico. Successivamente vi è un tratto lineare e un breve tratto in cui gli spostamenti crescono maggiormente rispetto al carico. Dopo questo breve tratto non lineare si giunge al carico di rottura dell'elemento (fino al raggiungimento del carico di rottura, quasi tutti grafici mostrano un andamento del tutto simile). Nella stragrande maggioranza dei casi, la rottura si è avuta con la formazione di due fessure verticali (fig. 6.2.3). Dopo la formazione delle fessure segue una parziale ripresa del carico da parte dell'elemento fino all'ulteriore



danneggiamento del materiale costituente il provino. Come elemento di diversità si registra il comportamento più duttile che ha caratterizzato gli elementi 3.2 e 7.7. Infatti in questi casi il tratto non lineare, successivo al tratto verticale discendente, è stato più prolungato rispetto al relativo tratto degli altri provini.



## **7. Prove Sperimentali sull'aderenza tra elementi in legno e rinforzi in fibra di Carbonio.**

### 7.1 Premessa

Le prove sperimentali eseguite si prefiggono di investigare il problema dell'aderenza che coinvolge legno e fibre di carbonio solidarizzati mediante resine epossidiche. Sono state svolte prove di strappo mediante una macchina di prova messa a punto presso il LaPS.

Tra i vari tipi di fibre disponibili in commercio si è scelto di sottoporre a prova quelle a base di carbonio (CFRP), essendo, a livello applicativo, le più indicate a svolgere la funzione di rinforzo strutturale.

Le tipologie di compositi presi in esame sono:

Barre (Sika<sup>®</sup> CarboDur<sup>®</sup> BC10) ad aderenza migliorata di diametro  $\Phi_f=10$  mm fornite dalla Sika<sup>®</sup> Italia S.p.A. così come le resine per gli incollaggi.

Al fine di poter determinare la lunghezza efficace  $l_e$ , sono state prese in esame tre differenti lunghezze di ancoraggio *BL* (*Bonding Length*):

- $BL_1=100$  mm
- $BL_2=200$  mm
- $BL_3=400$  mm

Le esperienze sono state condotte su provini di legno strutturale appartenente alle due differenti classi di qualità: C1 e C2. Inoltre per ogni campione si sono potute effettuare due prove: una nel lato destro e una su quello sinistro.

La campagna di sperimentazione si è articolata in 12 prove di aderenza.

## 7.2 Confezionamento dei provini

Il legno presenta forti alterazioni di tipo biotico: sono evidenti ad occhio nudo numerose gallerie prodotte da insetti parassiti su tutto il lotto; ai fini del presente lavoro, le alterazioni avanzate del legno non sono da considerarsi un limite, bensì una condizione tale per cui i risultati che si otterranno corrisponderanno a situazioni più realistiche: infatti la presenza di stati di degrado sulle nervature lignee rappresenta una condizione ragionevolmente vicina a quella effettiva che si ritrova nella realtà.

Anche se non è possibile una classificazione unificata, per i motivi sopraccitati, si è comunque proceduto ad una suddivisione del lotto in due classi di qualità: provini in "buone condizioni" (C1) e provini in "cattive condizioni" (C2). La suddivisione, eseguita esclusivamente attraverso un'indagine "a vista", ha preso in considerazione la quantità di "gallerie di insetti", la presenza di nodi, di smussi d'angolo e di fessure da ritiro.

Altro aspetto da tenere presente è la regolarità geometrica dei travetti in quanto le dimensioni delle facce laterali presentano su ogni pezzo una notevole variabilità con la lunghezza.

Si riscontrano, inoltre, in alcuni travicelli, modeste irregolarità quali arcuature, falcature e svergolamenti, che tuttavia possono ritenersi trascurabili.

Al fine di ottenere un congruo numero di provini simili, aventi medesime proprietà geometriche, per entrambe le classi di qualità, in precedenza erano state eseguite delle lavorazioni meccaniche.

Avvalendosi di una piallatrice a rullo, le facce dei travetti sono state rese piane e parallele fra di loro e

poi ancor più regolari e pulite con una piallatrice orbitale.

Infine da ogni travicello, a seconda della lunghezza, si è ottenuto uno o due provini. L'impiego di una tranciatrice per la segatura ha permesso anche di mantenere le testate dei provini perpendicolari allo sviluppo longitudinale del provino stesso.

Dovendo rinforzare i provini con barre è stata eseguita una particolare lavorazione. Si è realizzata una scanalatura di lunghezza leggermente superiore alla lunghezza di ancoraggio  $BL$  (4 cm in più) e di sezione 15 mm × 15 mm, per permettere l'inserimento delle barre di diametro  $\Phi_f=10$  mm.

In tab. 1 si riportano le lunghezze dei provini, la classe di qualità e il tipo di prova ad essi associato.

PROVINO	$L$ (mm)	TIPO PROVA		
		Tipo FRP	$BL$ (mm)	CL. QUAL.
1	597	barra	100	C1
2	598	barra	100	C2
3	849	barra	200	C2
4	937	barra	200	C1
5	954	barra	400	C2
6	918	barra	400	C1

### 7.3 Resinatura delle barre

Si è proceduto quindi alla resinatura delle barre sui provini di legno.

Si è preparata la resina epossidica miscelando nel giusto rapporto in peso (1/4) i due componenti A (reagente) e B (induritore o coreagente) la cui mistura dà luogo alla reazione di presa della resina. Si sono prodotte piccole quantità di resina per volta in quanto messi in contatto i due componenti si ha a disposizione un tempo di lavorabilità di circa 30 minuti.

La resina consigliata per le barre in CFRP secondo le schede tecniche fornite dal produttore è la SikaDur<sup>®</sup>-30. Si è preferito però optare per il prodotto Sikadur<sup>®</sup>-330, quest'ultima è sicuramente più adatta per incollaggi su supporti lignei: essendo più fluida assicura una migliore penetrazione nelle imperfezioni della superficie del legno.

La resina è stata inserita nelle scanalature precedentemente ricavate sui provini, fino a colmarle completamente. Le barre quindi sono state inserite nell'incavo per una lunghezza pari alla lunghezza di ancoraggio. L'inserimento delle barre ha provocato la fuoriuscita laterale di resina che è quindi stata reintegrata con una seconda applicazione. Per mantenere l'asse geometrico delle barre parallelo a quello del provino durante la presa della resina si sono utilizzati opportuni spessori e una livella.

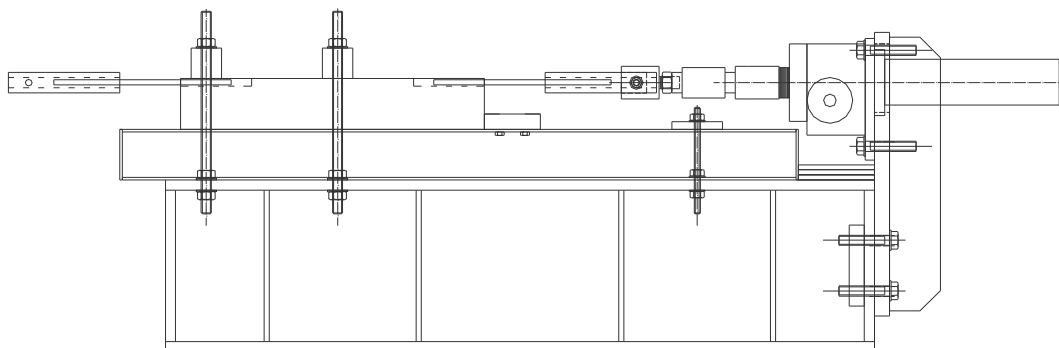
La procedura si è conclusa con alcuni giorni necessari per l'indurimento della resina.

Per facilitare e rendere ottimale la prova, cercando di ottenere uno sforzo assiale privo di eccentricità, è stato creato un particolare sistema di afferraggio della barra. All'estremità di questa è infatti stato solidarizzato,

sempre facendo uso di resina Sikadur<sup>®</sup>-330, un cilindro di alluminio dotato di un foro al quale si congiunge, mediante un bullone, un elemento di ancoraggio collegato alla cella di carico.

## 7.4 Preparazione della macchina di prova

Il macchinario di prova impiegato è stato messo a punto per uno studio analogo, ma riguardante il c.c.a. anziché il legno. Il dispositivo permette di esercitare sul rinforzo una forza di trazione complanare al rinforzo stesso. Tale condizione è essenziale per lo studio della crisi per delaminazione che altrimenti rischierebbe di avvenire a causa di altri fenomeni, primo tra tutti il *peeling* dovuto, alla presenza di fenomeni flessionali sul placcaggio.



Il banco di prova è costituito essenzialmente da una trave IPE 340 che funge da basamento, una trave HE 100 utilizzata come spessore, un martinetto meccanico e vari dispositivi di bloccaggio-

Al basamento sono vincolati rigidamente il martinetto, il profilato HE 100 e i tirafondi per il bloccaggio del provino.

Il martinetto consente di esercitare una forza di trazione sul rinforzo attraverso l'azionamento manuale, inoltre dispone di due diverse manovelle, una per grandi e una per piccoli spostamenti. Il braccio del martinetto è fissato al rinforzo FRP attraverso l'unione in serie di una cella di carico per la misurazione della forza trasmessa e un cilindro di ancoraggio in acciaio.

Il cilindro di alluminio, rigidamente connesso all'estremità della barra di FRP viene inserito all'interno del cilindro di ancoraggio e serrato per mezzo di un bullone passante,

Lo sforzo di trazione sulla barra di FRP si traduce in una distribuzione di tensioni tangenziali sull'interfaccia resina-legno, essendo, il provino, impedito in ogni suo possibile spostamento. In particolare esso non può traslare in avanti per la presenza di un rilievo in acciaio fissato alla HE 100 e non può ruotare rispetto all'elemento di contrasto grazie al vincolo costituito da due parallelepipedi di acciaio ancorati al basamento mediante i tirafondi che costringono il provino a rimanere abbassato.



## 7.5 Acquisizione dei dati

Per sistema di acquisizione si intende tutto l'apparato necessario per misurare e registrare le grandezze che si è deciso di monitorare nel corso delle prove. La scelta del tipo di strumentazione necessaria è pertanto vincolata al tipo e al numero di parametri da monitorare, nonché dal grado di precisione voluto per le misurazioni.

Le grandezze misurate nelle prove sono:

- Lo spostamento  $u_1$  della testata del legno, misurato a 65 mm dalla base del provino e sull'asse di simmetria verticale della faccia.
- Lo spostamento  $u_2$  della resina, misurato in corrispondenza della sezione terminale della barra.
- Lo spostamento  $u_3$  della barra misurato a distanza pari a 1 cm dalla testa del travetto.
- La forza  $F$ , esercitata dal martinetto sulla barra.

Per la misura degli spostamenti si è fatto uso di trasduttori differenziali LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) le cui caratteristiche sono riportate nella tabella seguente:

Spostamento	$u_1$	$u_2$	$u_3$
Modello	Wa1	Wa2	Wa9
Marca	HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik)	HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik)	HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik)
Numerazione	LaPS WA1	LaPS WA2	LaPS WA20-9
Corsa (mm)	50	50	20
Costante di taratura (mm/Volt)	4,9968942	5,0194583	1,9825285

La forza è stata rilevata mediante la cella di carico il cui intervallo di misura è  $-50000 \text{ N} \div +50000 \text{ N}$ .

Trasduttori e cella di carico sono stati amplificati e condizionati dalla centralina di amplificazione (MGC) a 16 canali. L'acquisizione è avvenuta tramite scheda di acquisizione dati DAQCard-6036E, marca: National Instruments. Il controllo e la memorizzazione dei dati sono stati fatti con un programma LabView operante in ambiente Windows.

I dati sono stati acquisiti ad una frequenza di 10 Hertz e memorizzati in files di testo contenenti i dati registrati durante la prova.

## 7.6 Esecuzione delle prove

Completate le operazioni preliminari ad ogni prova: sistemazione del provino sulla macchina di prova, collocazione degli strumenti di misura e collegamento degli apparati per l'acquisizione come è stato descritto nei paragrafi precedenti, ha avuto inizio la prova. Agendo manualmente sulla manovella dei piccoli spostamenti, il rinforzo è stato sottoposto a sforzi di trazione via via crescenti, fino alla crisi del collegamento tra CFRP e legno. Il valore del carico applicato è stato osservato durante gli esperimenti grazie al display di cui è dotato l'amplificatore MGC; questo ha permesso di dare "collocazione" ai fenomeni che eventualmente si sono riscontrati visivamente.

Ogni test è stato nominato con la lettera "P" seguita da un numero a tre cifre che rappresenta l'ordine progressivo di esecuzione degli esperimenti (esempi: P001, P002, ecc.). Ad ogni prova corrisponde un provino ben preciso, contraddistinto da un numero e il relativo lato (destra o sinistra).

Nel corso dell'esecuzione di tutti i test si sono osservati alcuni fatti che meritano di essere menzionati:

Al raggiungimento di circa 10000 N fino a delaminazione si registrano scricchiolii e crepitii tipici del legno, dovuti sicuramente alla rottura progressiva delle fibre. Tale aspetto è da considerarsi positivo in quanto ogni segnale, visivo o acustico, che si manifesti prima di una crisi strutturale risulta utile come "campanello di allarme".

La rottura del collegamento, cioè la delaminazione, è sempre avvenuta con comportamento di tipo fragile. Il distacco del rinforzo dal supporto si verifica senza nessun preavviso evidente con liberazione di energia sotto forma di un rumore secco e vibrazione della lamina di rinforzo che provoca il distacco e la proiezione dei cunei utilizzati per la misurazione degli spostamenti della (per tale motivo è opportuno indossare guanti e occhiali di protezione). E' la natura fragile della rottura per delaminazione (*debonding*) il motivo per cui tale meccanismo di crisi va considerato con particolare attenzione.

## 7.7 Risultati in termini di modalità di rottura

I risultati in termini di tipologia di rottura sono indicati nella seguente tabella.

Per maggiore chiarezza sarà indicata con:

A: Frattura coesiva nel legno.

Tale meccanismo si presenta a sua volta in due modalità:

1. Sulla superficie del rinforzo è presente solo un film di materiale ligneo
2. Sul rinforzo rimane un consistente strato di legno dello spessore nell'ordine del centimetro a forma di cuneo.

B: Frattura adesiva.

M: Frattura mista.

C: Rottura per compressione.

<b>prova</b>	<b>Provino</b>	<b>Lato</b>	<b>Rottura</b>	<b>Note</b>
P001	1	DX	A2	Classe 1
P002	1	SN	A2	Classe 1
P003	2	DX	A1	Classe 2 ; Rinforzato con tessuto
P004	2	SN	A1	Classe 2 ; Rinforzato con tessuto
P005	3	DX	A2	Classe 2 > cuneo di grandi dimensioni
P006	3	SN	A2	Classe 2 > cuneo di grandi dimensioni
P007	4	DX	A2	Classe 1 ; cuneo di piccole dimensioni
P008	4	SN	A2	Classe 1 ; cuneo di piccole dimensioni
P009	5	DX	C	Classe 2 ; Rottura per compressione
P010	5	SN	A1	Classe 2
P011	6	DX	C	Classe 1 ; Rottura per compressione
P012	6	SN	A1	Classe 1

I dati acquisiti nelle prove sono stati raccolti in appendice A I grafici riportano l'andamento degli spostamenti  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$  registrati dai trasduttori induttivi in funzione delle forza e gli scorrimenti relativi barra-legno, barra-resina e resina-legno.

## **8. Prove sperimentali sulle travi in legno rinforzate con fibre di diverso materiale**

### 8.1 Obbiettivo della sperimentazione e preparazione delle travi rinforzate

Nell'ambito di questa tesi, lo scopo che si vuole perseguire è quello di andare a valutare le risorse di resistenza nei confronti di sollecitazioni esterne che inducono sforzi flessionali, su travi in legno antico preventivamente giuntate a parti in legno nuovo tramite connettori in acciaio e rinforzate tramite fibre di canapa. Lo schema di carico utilizzato è stato uno schema a 4 e a 3 punti. Ci si prefigge di conoscere il comportamento della canapa rispetto alla fibra di carbonio, in termini di modalità di collasso dell'elemento rinforzato e livello tensionale raggiunto dal rinforzo in condizioni di rottura incipiente. L'innovazione sta nell'utilizzare, come rinforzo, delle fibre naturali (le fibre di canapa appunto), che da una parte risultano essere completamente biodegradabili e dall'altra si adattano decisamente meglio al legno, rispetto alle più consuete fibre di carbonio, essendo, il legno, come è stato, peraltro, messo in evidenza più volte precedentemente, un materiale naturale. Non bisogna neanche dimenticare il processo di produzione delle fibre naturali, che risulta di gran lunga meno "invasivo" da un punto di vista del rispetto dell'ambiente, a confronto con il relativo processo produttivo che interessa le fibre di carbonio.

Si è deciso di applicare il rinforzo alle travi facendo uso di fibre non in forma di lamine o tessuti ma andandole ad

inserire, sciolte, all'interno di scanalature precedentemente realizzate e rendendole solidali alla trave (condizione necessaria affinché si possa effettivamente ed efficacemente concretizzare un certo incremento di resistenza) tramite resina. Si è deciso inoltre di realizzare la giunzione fra trave di legno vecchio e spezzone di legno nuovo tramite dei connettori a tubo. Questi hanno la funzione non di trasmettere momento ma esclusivamente di trasferire la sollecitazione tagliante. Infatti si è deciso di studiare lo schema di carico in maniera da fare in modo che il connettore fosse posizionato fra uno dei due carichi esterni e la reazione vincolare all'estremità della trave. I connettori, inoltre, sono stati posti in asse alla trave e si è limitata la lunghezza per evitare sforzi flessionali elevati. D'altro canto una lunghezza troppo limitata avrebbe significato un'intensificazione delle tensioni di contatto fra il connettore e il legno e quindi avrebbe potuto far insorgere problemi di rifollamento. Inizialmente da due travi lunghe 583 cm e 617 cm sono state ricavate 6 travi di lunghezza minore: 1 da 190 cm, 2 da 180 cm, 2 da 170 cm e 1 da 117 cm. Prima di eseguire tutte le operazioni di rinforzo sono state realizzate le scanalature



fig. 8.1.1 - realizzazione delle scanalature lungo l'asse della trave

(vedi fig. 8.1.1) (2 cm x 2 cm) e i fori in asse alla trave (diametro 5 cm e profondità 12 cm) sia sulle travi di legno vecchio che sui pezzi nuovi (ognuno di lunghezza 60 cm). Per poter valutare le caratteristiche di resistenza del legno antico, sono stati ricavati dei provini a forma di parallelepipedo di sezione 5 cm x 5 cm e altezza 10 cm destinati alle prove di compressione. Per poter valutare, invece, la resistenza a taglio sono stati estratti dalle travi degli elementi di sezione 5 cm x 15 cm e di altezza 21 cm. Lungo l'altezza e ad interasse di 7 cm sono stati eseguiti dei tagli di 7,5 cm (dunque a metà della larghezza del provino),



fig. 8.1.2 - realizzazione dei provini a taglio

(vedi fig. 8.1.2). in maniera da realizzare un provino a "s" Caricando questi provini con una forza di compressione con buona probabilità si potrà assistere ad una crisi per scorrimento lungo la sezione verticale esistente fra i due tagli e in corrispondenza della mezzeria della sezione.

Sulle travi da rinforzare, successivamente alla realizzazione dei fori e delle scanalature, si è proceduto sia con la giunzione degli elementi di legno antico con gli spezzoni di legno nuovo che con il rinforzo all'intradosso delle travi stesse. Per prima cosa sono stati inseriti i connettori metallici a tubo: i tubi sono stati preventivamente riempiti di polistirolo, per evitare che la resina andasse a finire all'interno. La resina, infatti, è stata prevista per assolvere alla sola funzione di aderenza fra la parete esterna di ciascun connettore e la parete del foro. Per assicurare una adeguata impregnazione dei connettori con la resina, la resina stessa è stata inserita



all'interno dei fori (vedi fig. 8.1.3) e successivamente sono



fig. 8.1.3 - preparazione dei fori per l'inserimento dei connettori a tubo

stati inseriti i connettori (vedi fig. 8.1.4). Con l'inserimento dei tubi la resina in eccesso è refluita all'esterno ed è stata quindi rimossa.

Una delle 6 travi è stata rinforzata con due barre in fibra di carbonio di diametro 12 mm. A tal fine è stata preparata la resina ed è stata colata all'interno delle scanalature.



fig. 8.1.4 - inserimento dei connettori a tubo

Successivamente sono state inserite le due barre e quindi di nuovo una certa quantità di resina in modo da ottenere la migliore aderenza fra resina e barre. Per le altre travi, è stato deciso di utilizzare una resina meno densa di quella utilizzata per la trave rinforzata con le barre in fibra di carbonio. Siccome, infatti, si era deciso di inserire all'interno delle scanalature una quantità di fibre di canapa piuttosto elevata, si aveva bisogno di una resina che fosse in grado di impregnare completamente le fibre e consentire pertanto una aderenza ottimale tra la fibra stessa e il legno. Innanzitutto è stata posizionata la canapa all'interno delle scanalature, stesa in maniera che le fibre seguissero la direzione dell'asse della trave (vedi fig. 8.1.5).



fig. 8.1.5 - predisposizione della fibra di canapa all'interno delle scanalature

Successivamente, in corrispondenza della scanalatura è stato disposto del nastro adesivo, in maniera da fare in modo che la fibra rimanesse confinata all'interno della scanalatura. E' stata colata, quindi, la resina attraverso dei fori precedentemente realizzati sul nastro (vedi fig. 8.1.6). Infine sono stati predisposti dei pesi in corrispondenza di ogni scanalatura in maniera da confinare la fibra di canapa all'interno delle scanalature.



fig. 8.1.6 - inserimento della resina all'interno delle scanalature

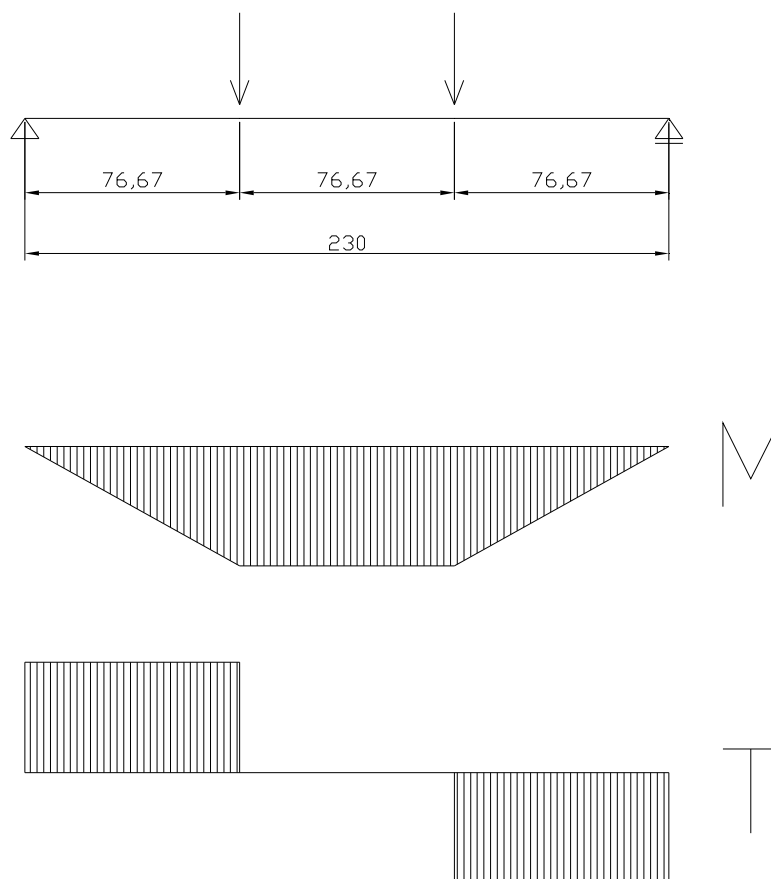
## 8.2 Prova di flessione a quattro punti su trave rinforzata con barre in CFRP

### 8.2.1 Schema di carico e strumentazione.

E' stata effettuata una prova di flessione a quattro punti su una trave di 250 cm di lunghezza, di luce pari a 230 cm di sezione pressoché rettangolare, con base di 23 cm e altezza 16 cm, rinforzata con 2 barre in fibra di carbonio da 12 cm di diametro poste in due scanalature in corrispondenza dell'intradosso. Come ribadito anche precedentemente, la trave è costituita da un elemento in legno antico di lunghezza pari a 190 cm connesso ad un elemento di legno nuovo lungo 60 cm. la trasmissione delle sollecitazioni fra i due elementi avviene sia tramite le

barre in CFRP (sollecitazioni flessionali) sia tramite un connettore a tubo (sollecitazioni taglianti).

Si riporta di seguito lo schema statico e lo schema di carico dell'elemento strutturale oggetto della prova.



Per poter valutare l'entità di spostamenti e deformazioni, sono stati inseriti preventivamente dei trasduttori di spostamento (LVDT) e degli estensimetri. Più precisamente 2 LVDT sono stati disposti in corrispondenza dei due appoggi, 1 LVDT in corrispondenza della mezzeria per poter misurare la freccia e altri 2 LVDT a cavallo fra l'elemento di legno nuovo e quello vecchio, in maniera da andare a misurare di quanto si allontaneranno i due pezzi. Sono stati incollati, inoltre, degli estensimetri, uno in corrispondenza della

mezzeria all'intradosso e un altro sempre sulla mezzeria ma sull'estradosso. Altri due estensimetri sono stati incollati nella zona di unione dei due diversi elementi: essi sono stati disposti non sul legno ma sulle scanalature e dunque per poter misurare la deformazione della resina. Per permettere una migliore diffusione della sollecitazione e per regolarizzare la zona di carico, in corrispondenza delle superfici di applicazione delle forze sono stati realizzati degli spessori di malta cementizia (Emaco). Si riporta in fig. 8.2.1.1 il setup di prova in cui è possibile vedere il posizionamento dei trasduttori di spostamento.



fig.8.2.1.1 – setup di prova

Per avere una visione più chiara della disposizione degli strumenti si rende necessario mettere meglio in evidenza il

posizionamento degli LVDT disposti sulla fessura in corrispondenza della giunzione (fig. 8.2.1.2).

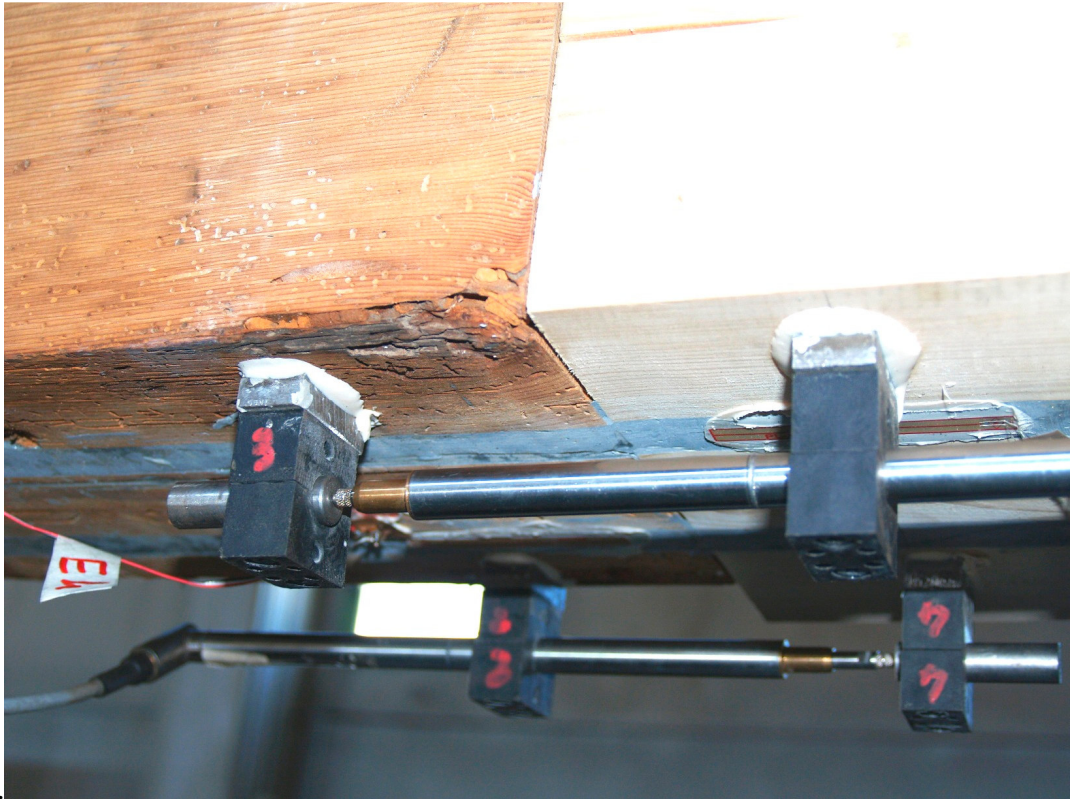


fig. 8.2.1.2– disposizione degli LVDT nella zona di giunzione

## 8.2.2 Esecuzione della prova ed analisi dei risultati.

La prova di carico è stata condotta andando ad effettuare tre cicli di carico. Con il primo ciclo ci si è fermati a 500 Kg circa. E' opportuno riportare un grafico carico-spostamento (fig. 8.2.2.1) che aiuta a capire come fino a 500 Kg il comportamento dell'elemento fosse sostanzialmente elastico lineare. E' da rilevare, tuttavia, che allo scarico l'andamento del diagramma non segue il tratto di carico.

### LVDT 3

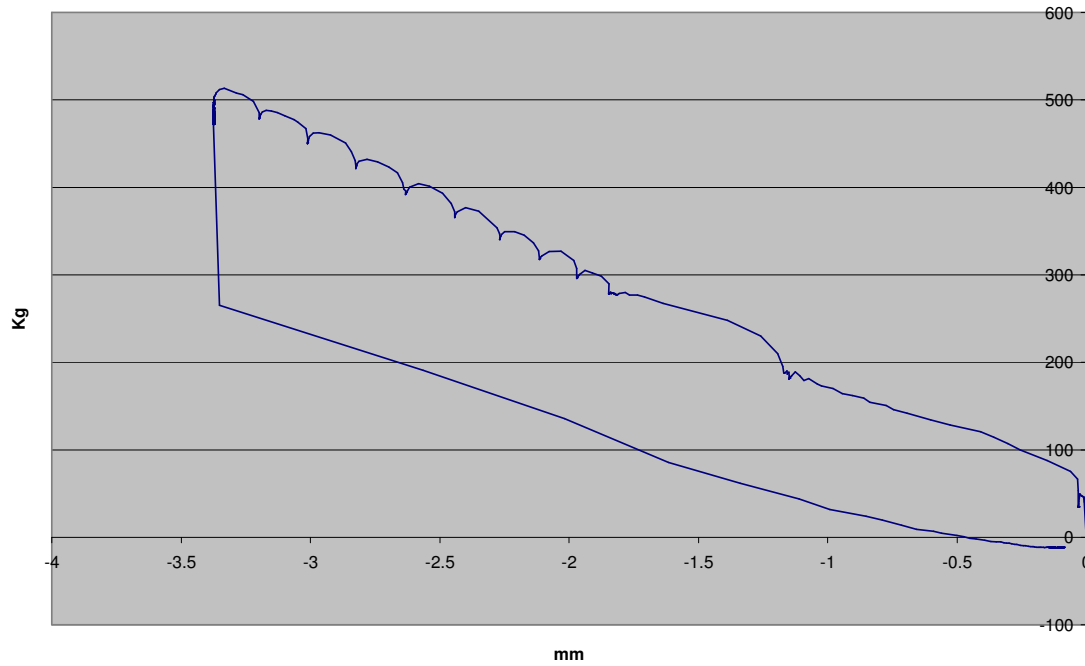


fig.8.2.2.1 – primo ciclo: grafico carico-spostamento in mezzeria

Con il secondo ciclo di carico è stato raggiunto un livello di carico di circa 1000 Kg per pistone. Il comportamento dell'elemento si è dimostrato ancora lineare (fig. 8.2.2.2).



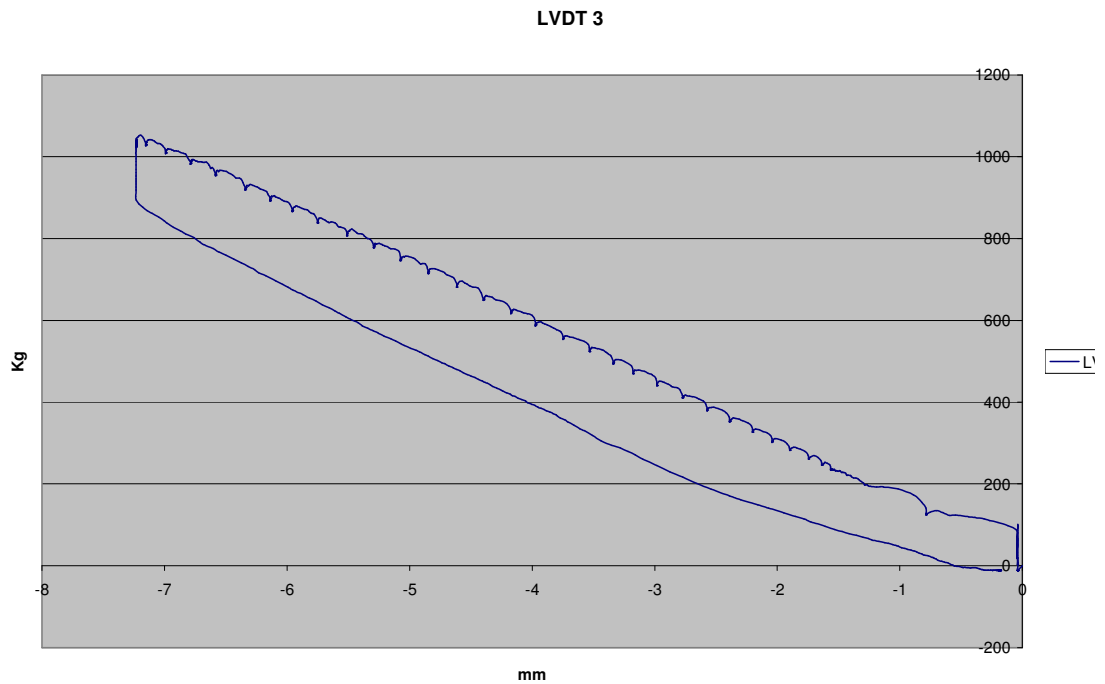


fig. 8.2.2.2 – secondo ciclo: grafico carico-spostamento in mezzeria

Ancora una volta, inoltre, allo scarico si è riscontrata una porzione di diagramma in cui si vede chiaramente come fino ad un certo valore della sollecitazione esterna, ad una diminuzione di carico non abbia fatto seguito una diminuzione di spostamento. Infine dal confronto del primo ciclo con il secondo si può dire che il materiale dopo il primo ciclo non ha subito danneggiamenti tali da ridurre la rigidezza, in quanto il ramo di ricarico (corrispondente dunque al secondo ciclo di carico) è sovrapponibile perfettamente al ramo di carico del primo ciclo.

Il terzo ciclo termina con la rottura dell'elemento strutturale per delaminazione del rinforzo ad un valore di carico di 3300 Kg circa. Anche in questo caso si riporta il grafico carico-freccia (fig. 8.2.2.3).

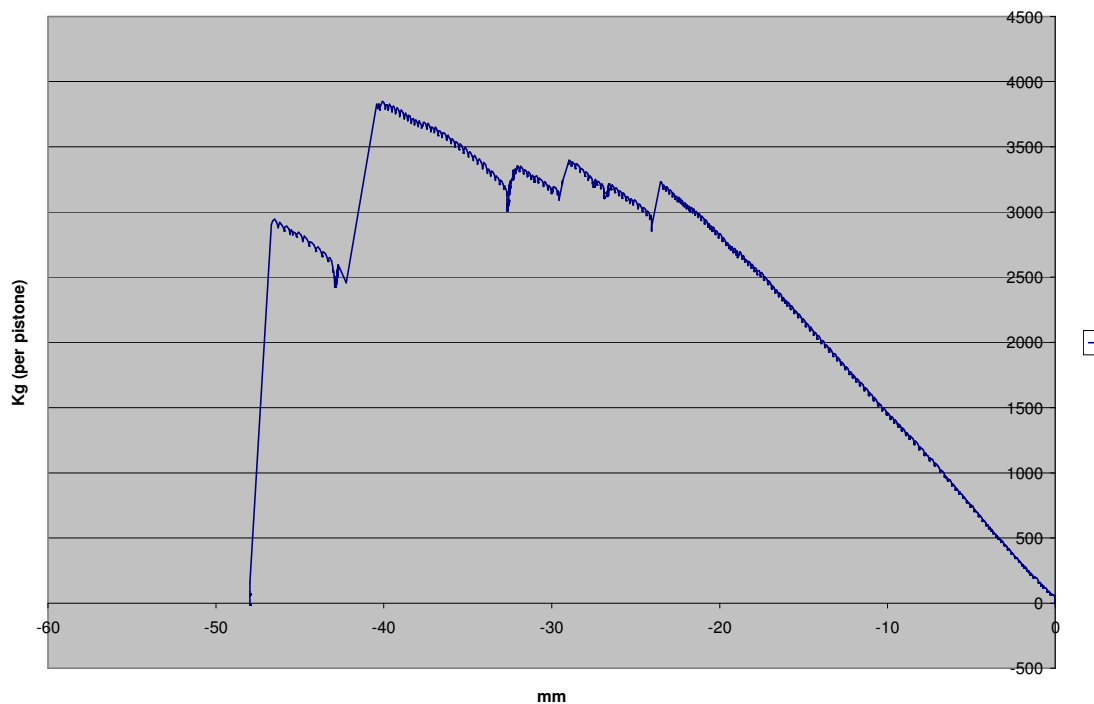


fig. 8.2.2.3 – terzo ciclo: grafico carico-spostamento in mezzeria

Vista la tipologia di crisi che si è riscontrata, c'era sicuramente da aspettarsi un grafico di questo tipo. Quello che si nota infatti è che, nonostante dei tratti discendenti (dovuti con buona probabilità a perdite di carico legate a loro volta a cedimenti dell'ancoraggio delle barre sul legno), la ripresa di carico avviene sempre con un tratto sostanzialmente caratterizzato dalla medesima pendenza. Ciò è dovuto, probabilmente, proprio alla modalità di crisi: al fatto, cioè, che la rottura non è sopraggiunta per compressione delle fibre all'estradosso, come succede in generale per le travi in legno, ma per delaminazione del rinforzo rispetto al supporto ligneo. In fig. 8.2.2.4 si può vedere molto chiaramente come la rottura sia molto simile alla crisi riscontrata nelle prove di delaminazione dei travetti in legno con ancorate barre in fibra di carbonio. Anche in questo caso, infatti, il collasso dell'elemento è avvenuto con formazione, in

corrispondenza della superficie bagnata del rinforzo, di una pellicola di fibre superficiali di legno.



fig. 8.2.2.4 – terzo ciclo: grafico carico-spostamento in mezzeria

## 8.3 Prova di flessione a quattro punti su trave rinforzata con fibre sciolte di canapa

### 8.3.1 Schema di carico, strumentazione ed esecuzione della prova.

Le dimensioni di questa trave sono leggermente diverse rispetto alla trave trattata nel paragrafo precedente. Infatti la lunghezza dell'elemento è di 240 cm con luce di 220 cm. Pertanto varierà anche la distanza tra i punti di caricamento che in questo caso è 73 cm circa.

Sia lo schema di carico che la disposizione della strumentazione è identica al caso della prova di flessione della trave rinforzata con la fibra di carbonio. Si riassume brevemente, comunque, quella che è stata la sistemazione dei vari strumenti. I trasduttori di spostamento utilizzati sono stati 5, di cui 2 collocati in corrispondenza degli appoggi e 1 nella mezzeria. Altri 2 sono stati disposti nella zona di giunzione dei due elementi per valutare l'apertura della fessura all'aumentare del carico. Oltre agli LVDT sono stati incollati 4 estensimetri: 2 per misurare la deformazione di compressione e di trazione nella mezzeria della trave e altri 2 sulla zona di connessione.

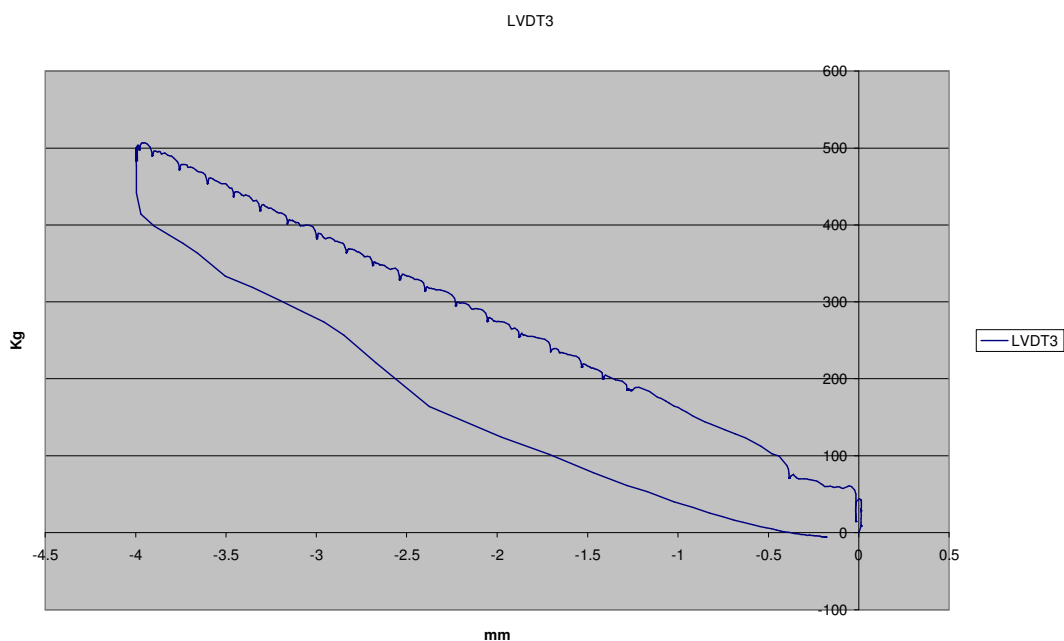


fig. 8.3.1.1 – primo ciclo: grafico carico-spostamento in mezzeria

La prova è stata condotta andando ad effettuare 4 cicli di carico. Con il primo ciclo ci si è fermati a 500 Kg. La trave non ha mostrato segni di cedimenti; si sono, uditi tuttavia, alcuni scricchiolii a quota 330 Kg circa dovuti probabilmente alla crisi delle fibre di legno in porzioni di struttura dove il legno stesso era maggiormente ammalorato.

Anche dai grafici carico-spostamento e carico-deformazione si può notare come l'andamento sia lineare e la pendenza non mostri segni di variazione all'aumentare del carico. Anche in questo caso per avere un ordine di grandezza della freccia dell'elemento relativo al primo ciclo di carico si riporta la fig. 8.3.1.1. Come anche nel caso della trave rinforzata con il carbonio, anche in questo caso dal diagramma si nota che nel ramo di scarico vi è una porzione di grafico in cui ad un decremento di carico non corrisponde una proporzionale riduzione del valore della freccia.

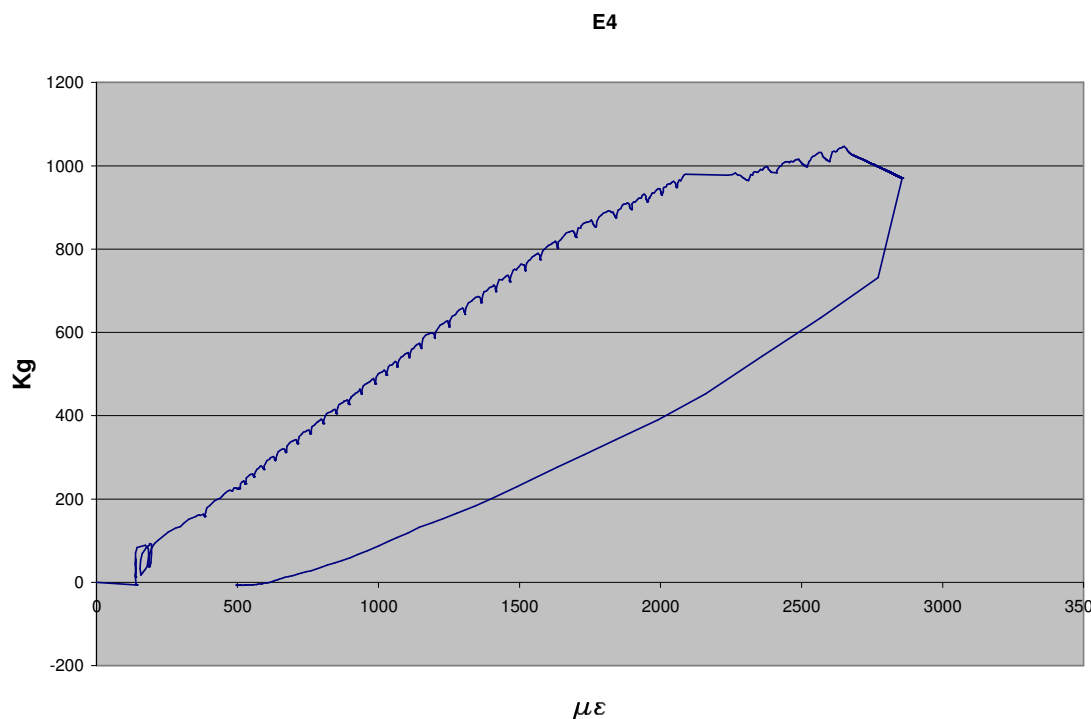


fig. 8.3.1.2 – secondo ciclo: grafico carico-deformazione  
(estensimetro posto sulla resina in corrispondenza della zona di giunzione  
nell'elemento di legno nuovo)

Con il secondo ciclo si è deciso di incrementare il carico fino a 1000 Kg. I grafici carico-spostamento mostrano tutti un andamento lineare. C'è da dire, tuttavia che dal diagramma carico-deformazione (deformazione riferita all'estensimetro posizionato in corrispondenza della resina dalla parte dell'elemento di legno nuovo) (fig. 8.3.1.2) si può riscontrare, per un valore di carico poco inferiore a 1000 Kg, un leggero cambio di pendenza che simboleggia con buona probabilità una riduzione della rigidità dell'elemento strutturale e quindi, in maniera del tutto equivalente, un incremento di deformazione maggiore esibito dalla trave a parità di incremento di carico.

Può essere significativo mettere in evidenza che, nonostante siamo vicini al carico di rottura dell'elemento,

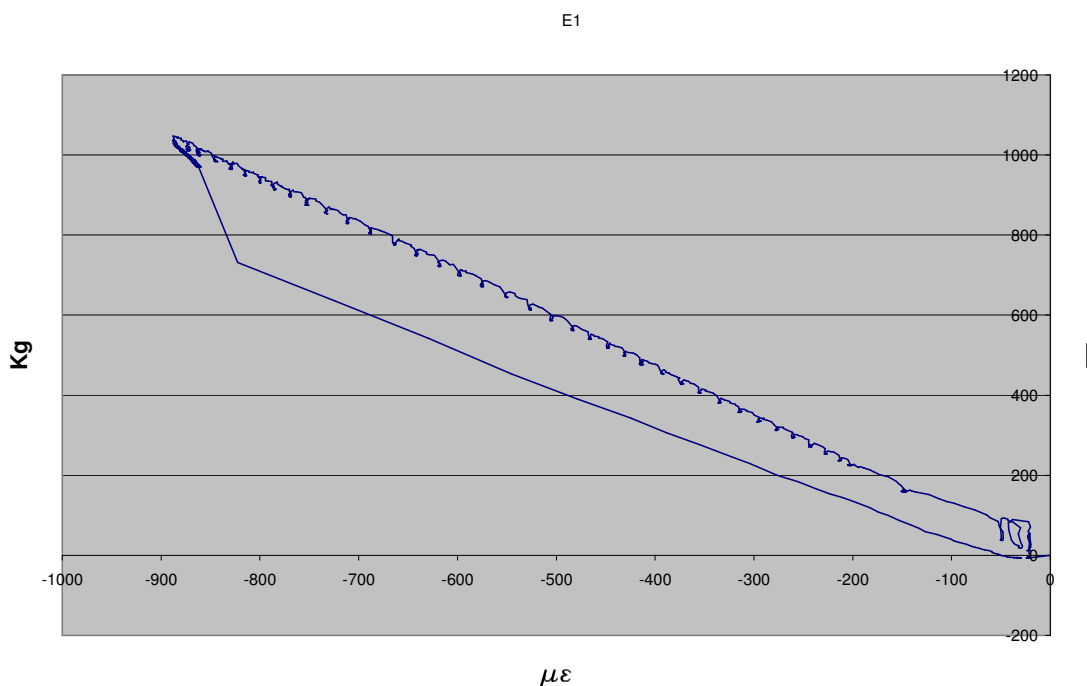


fig. 8.3.1.3 – secondo ciclo: grafico carico-deformazione  
(estensimetro posto in mezzeria nella zona d'estradosso)

le fibre di legno soggette alla massima compressione (ossia quelle dell'estradosso della trave a metà della luce) si comportano ancora linearmente e dunque il livello tensionale è ancora inferiore alla tensione di rottura per compressione del materiale. Ciò si può notare molto chiaramente anche dalla fig. 8.3.1.3.

Il terzo ciclo di carico è stato quello che ha portato a rottura la trave (rottura avvenuta a 1200 Kg circa). Arrivati a quota 1200 Kg, infatti, è andata in crisi la resina all'interno delle scanalature (quasi in contemporanea), per superamento della tensione limite di trazione. Più precisamente, con una buona probabilità, ha raggiunto la crisi prima la resina di una delle due scanalature. Successivamente l'altro rinforzo ha dovuto assorbire l'intero "carico flessionale" nella sezione di

giunzione. Tuttavia questo era troppo alto per essere sopportato da un singolo rinforzo e quindi si è avuto il collasso anche della resina della seconda scanalatura. Ciò si può vedere abbastanza chiaramente dalla fig. 8.3.1.4. Si nota inoltre, scaricando la trave, che essa è ancora in grado di resistere ad un carico esterno, comunque molto basso (240 Kg circa).

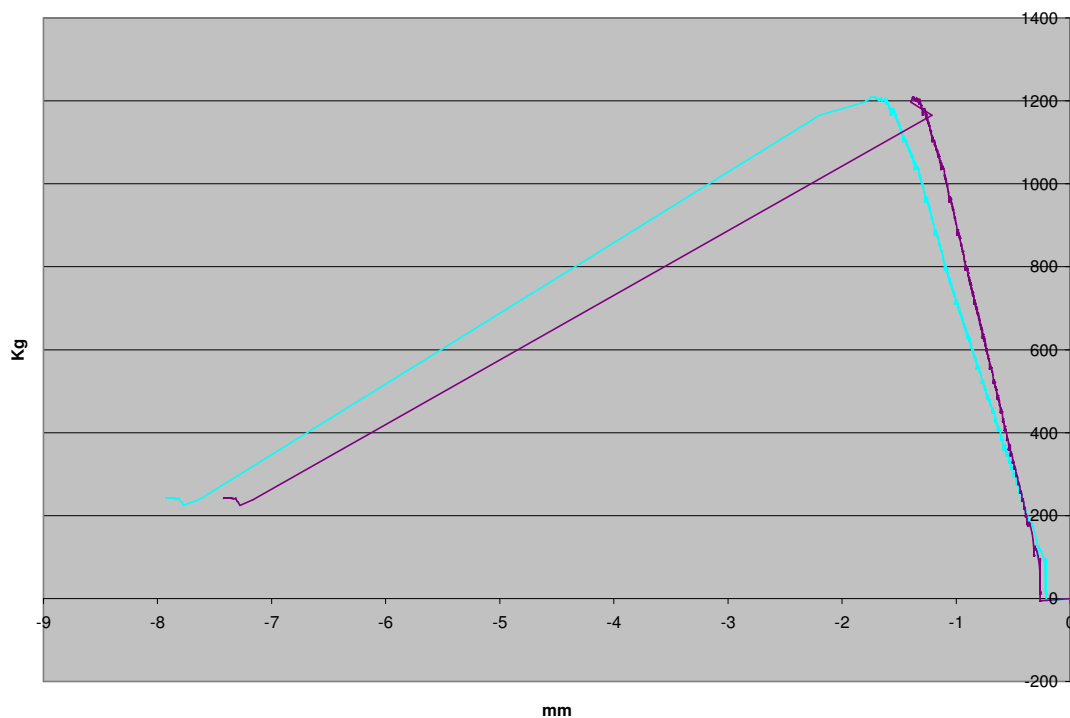


fig. 8.3.1.4 – terzo ciclo: grafici carico-spostamento in corrispondenza della connessione fra i due elementi lignei

Siccome alla fine del terzo ciclo, visivamente era possibile osservare che la resina era andata in crisi ma vi era ancora continuità per quello che riguarda le fibre, si è deciso di effettuare un ultimo ciclo per valutare l'eventuale carico residuo che l'elemento strutturale riusciva a portare. Si è potuto riscontrare durante il ciclo che progressivamente le fibre arrivavano alla rottura e anche quando tutte le fibre avevano raggiunto il collasso la trave era in grado di trasmettere momento da un elemento all'altro. Ciò potrebbe risultare molto strano, ma si



spiega considerando che per una deformazione molto grande il connettore metallico riusciva oltre che a portare il taglio, anche a trasmettere una certa quota di momento flettente.

Si riporta in fig. 8.3.1.5 il raffronto di due grafici carico-spostamento relativi l'uno al ciclo che ha portato alla rottura e l'altro al ciclo in cui si è voluto valutare il carico residuo.

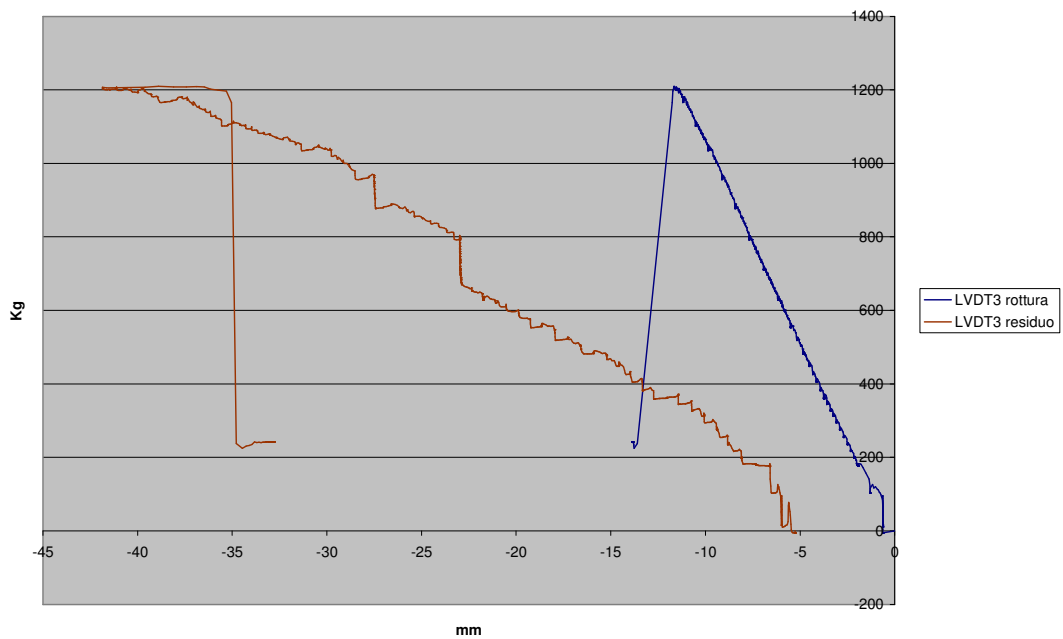


fig. 8.3.1.5 – grafici carico-spostamento in mezzeria relativi al terzo e al quarto ciclo

Da questo grafico si riesce a cogliere chiaramente, tra e altre cose, la molto forte diversità, in termini di rigidità, fra l'andamento dei due grafici.

## 8.4 Conclusioni e sviluppi futuri

Alla luce delle due prove effettuate si può dire, per quello che riguarda il tipo di rinforzo, che siamo certamente di fronte a comportamenti totalmente diversi. Da un lato, infatti, la fibra di Carbonio, certamente più prestazionale rispetto alla fibra di Canapa, offre un meccanismo di rottura estremamente fragile, quale è la delaminazione e dunque siamo di fronte effettivamente ad una situazione in cui la resina viene ad essere rinforzata dal carbonio in modo da modificare la gerarchia delle resistenze e fare in modo che non si abbia crisi lato resina (come sarebbe, probabilmente, se come rinforzo si prevedesse di utilizzare solo la resina). Da parte sua, invece, la prova della trave preparata con fibra di Canapa, ha mostrato una modalità di crisi molto diversa. In questo caso, infatti, fra legno, Canapa e resina il primo materiale ad andare in crisi è stata la resina (per superamento della sua resistenza a trazione; pertanto non c'è stata delaminazione). Inoltre, volendo valutare le risorse di resistenza della trave in cui la resina aveva raggiunto il collasso e a resistere erano chiamate unicamente le fibre, possiamo dire che il carico che la trave riusciva a portare era nettamente minore (ed era minore anche alla luce del fatto che nel momento in cui erano vicine alla crisi anche le fibre, vi era una quota parte di momento che veniva assorbito dal connettore a taglio).

Indubbiamente per trarre conclusioni di validità più generale occorrerebbe effettuare altre prove, ma sembrerebbe che nel caso del rinforzo con la fibra di Canapa non è la fibra che rinforza la resina ma è piuttosto forse la resina che tende a fare da rinforzo alla fibra.

In futuro si prevede di realizzare delle altre prove di carico sempre su travi rinforzate con la Canapa andando a realizzare rinforzi con diverse quantità di fibra con lo scopo di desumere una relazione fra i livelli prestazionali del rinforzo stesso e le stesse quantità di Canapa.

Inoltre un altro obiettivo futuro è quello di realizzare prove di trazione sia sulle singole fibre di Canapa sia su lamine di prefissata lunghezza e larghezza costituite da fibre impregnate nella resina.

(Tutti i grafici carico-spostamento e carico-deformazione delle due prove sono riportati in Appendice B).

## 8.5 Cenni sul funzionamento degli strumenti di misura di spostamenti e deformazioni

### 8.5.1 Premessa

Durante la maggior parte delle prove sperimentali eseguite sono stati utilizzati particolari strumenti come estensimetri, LVDT, celle di carico, oltre a resine epossidiche ed adesivi bicomponenti e specifiche attrezzature di acquisizione dati, oltre al sistema di acquisizione di grandezze quali spostamenti, deformazioni e forze.

### 8.5.2 Estensimetri

I più usati estensimetri elettrici sono quelli a resistenza nei quali la misura della deformazione è ricondotta alla misura di una variazione di resistenza. Sono costituiti da una griglia di materiale resistivo, generalmente una lega di nichel, che costituisce la parte sensibile dello strumento, fissata ad una base di materiale plastico che

funge da isolante elettrico nei confronti del materiale su cui effettuare la misura, a sua volta incollata al pezzo con resina epossidica (resina X60) o cianoacrilato. In fig. 8.5.2.1 vengono mostrate le componenti tipiche di un estensimetro a resistenza.

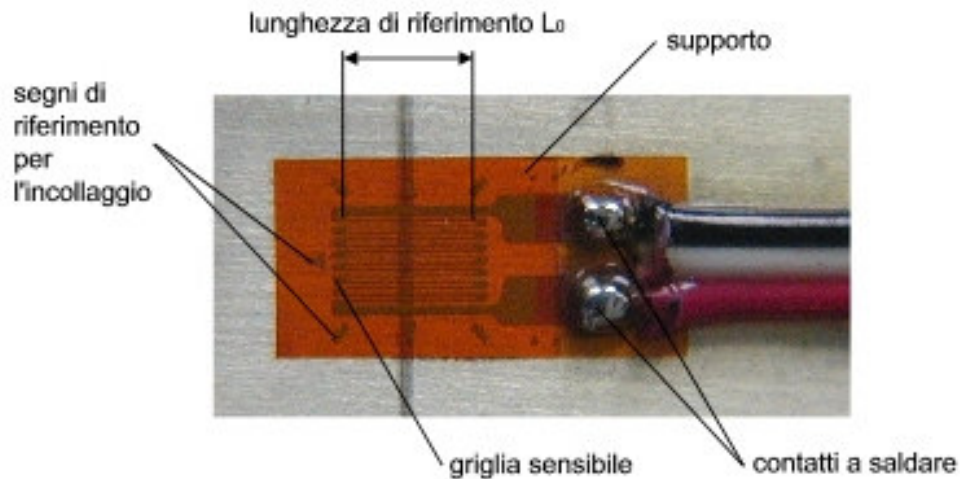


fig. 8.5.2.1 - estensimetro a resistenza

Lo spessore complessivo di griglia, base e collante non supera i 50  $\mu\text{m}$ . La deformazione del pezzo induce una deformazione della griglia, che a sua volta fa variare la resistenza elettrica letta tra i due terminali. La variazione di resistenza è dovuta in parte alla variazione di sezione e di lunghezza dei tratti della griglia in parte alla variazione di resistività del materiale di cui essa è fatta.

Infatti la resistenza di un conduttore di sezione  $A$  e lunghezza  $l$  è:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad 8.5.2.1$$

in cui  $\rho$  è la resistività del materiale. La derivata logaritmica di questa espressione dà:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}. \quad 8.5.2.2$$

Dalla teoria dell'elasticità

$$\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon \quad \frac{\Delta A}{A} = 2\nu. \quad 8.5.2.3$$

Il fenomeno della piezoresistività è la dipendenza della  $\Delta\rho/\rho$  dalla deformazione; questa per piccoli valori di  $\varepsilon$  si assume lineare

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = k' \varepsilon \quad 8.5.2.4$$

Con  $k' \approx 0.5$  per molti materiali. Quindi  $\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon(k'+1+2\nu) \approx 2.1\varepsilon$  e,

in generale,  $\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$  dove la deformazione  $\varepsilon$  è misurata parallelamente ai tratti della griglia. Il valore di  $k$  è di circa 2-2.1 per i tipi più diffusi di estensimetri. Il valore nominale di  $R$  è di 120  $\Omega$  e l'isolamento rispetto al substrato deve superare i 1000 M  $\Omega$ .

La deformazione del materiale sul quale è applicato un estensimetro (ER) produce una deformazione della griglia che, essendo un conduttore elettrico, cambia di resistenza: la variazione di tale caratteristica costituisce il segnale di misura.

La massima sensibilità dello strumento è nella direzione del proprio asse principale (longitudinale) ed il segnale elettrico ricavato è proporzionale alla deformazione secondo il coefficiente  $k$  (detto fattore di taratura - Gauge Factor) di progetto, verificato in sede di produzione.

Poiché la variazione di resistenza è estremamente ridotta, per la sua misura si ricorre all'inserimento dell'estensimetro in un circuito elettrico noto come "ponte di Wheatstone", in grado di amplificare fisicamente questa variazione. Di questa struttura elettrica si utilizzano tre configurazioni diverse, ovvero la configurazione a ponte intero, con quattro estensimetri a bordo dell'elemento da sottoporre a misura ("attivi"), la configurazione a mezzo ponte, con due estensimetri "attivi" e due "passivi" o di riscontro, e di quella a quarto di ponte con un solo estensimetro "attivo" e tre "passivi".

L'applicazione (incollaggio) degli estensimetri è preceduta da una accuratissima pulizia della superficie; inoltre l'estensimetro non può essere riutilizzato perchè non è possibile staccarlo senza rovinarlo. La precisione ottenibile è dell'ordine di poche unità per milione (*pochi microepsilon* ( $\mu\epsilon$ )).

Per le varie prove effettuate sono stati utilizzati diversi tipi di estensimetri. Innanzitutto occorre distinguere tra:

- Estensimetri per calcestruzzo
- Estensimetri per Acciaio e FRP

All'interno di ciascuna classe poi, gli estensimetri si differenziano per le diverse lunghezze di misura, avendo così a disposizione una vasta gamma di prodotti tra cui scegliere quello più opportuno all'utilizzo.

### 8.5.3 LVDT (Linear Voltage Differential Transformers)

Durante le attività di prova sono stati spesso utilizzati trasduttori di spostamento lineare LVDT (Trasformatori lineari Differenziali di Tensione) (vedi fig. 8.5.3.1).

Si tratta di un trasformatore con un avvolgimento primario e due secondari che sono in opposizione di fase. Questi avvolgimenti sono coassiali e sbobinati all'interno del corpo principale del trasduttore che presenta un foro passante lungo il suo asse neutro. Un nucleo, da collegarsi all'elemento mobile esterno da misurare viene fatto muovere all'interno del foro ed accoppia il campo magnetico dal primario ai due secondari (con un rapporto di trasformazione espresso in mV/V/mm).

Il nucleo mobile di misura, che si sposta guidato all'interno del foro guida, si deve fissare all'oggetto mobile da misurare tramite un'asticina in materiale magnetico (acciaio inox, alluminio, plastica, etc.) in modo che non interferisca con il funzionamento magnetico del trasduttore. I trasduttori vengono fissati tramite una morsa e inseriti e tenuti in posizione su un apposito sostegno.

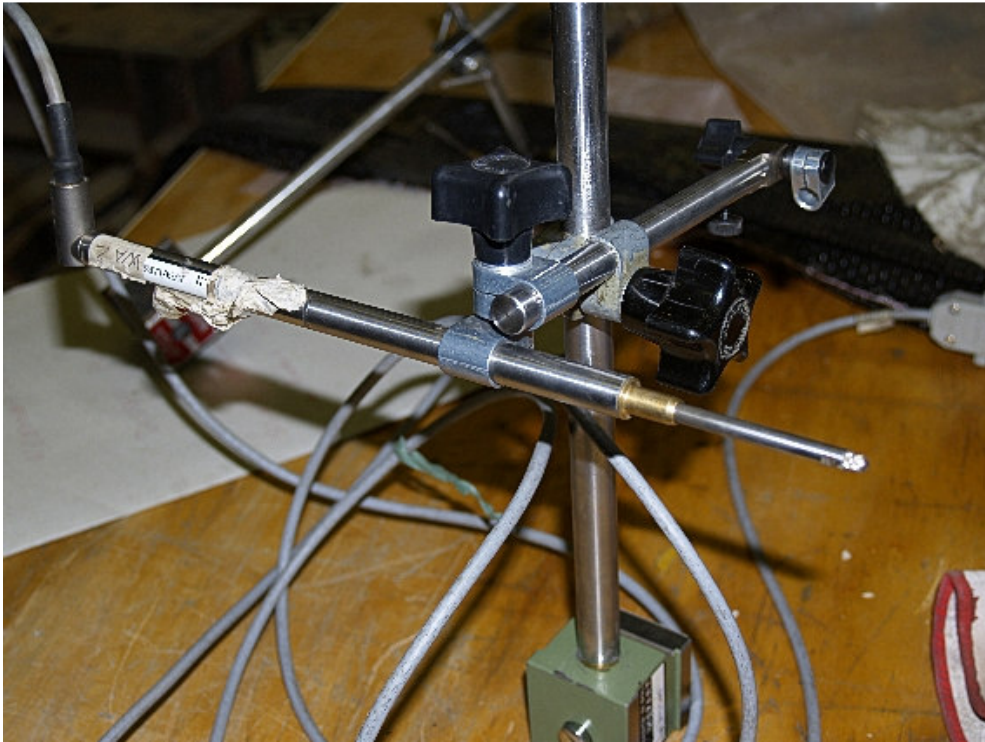
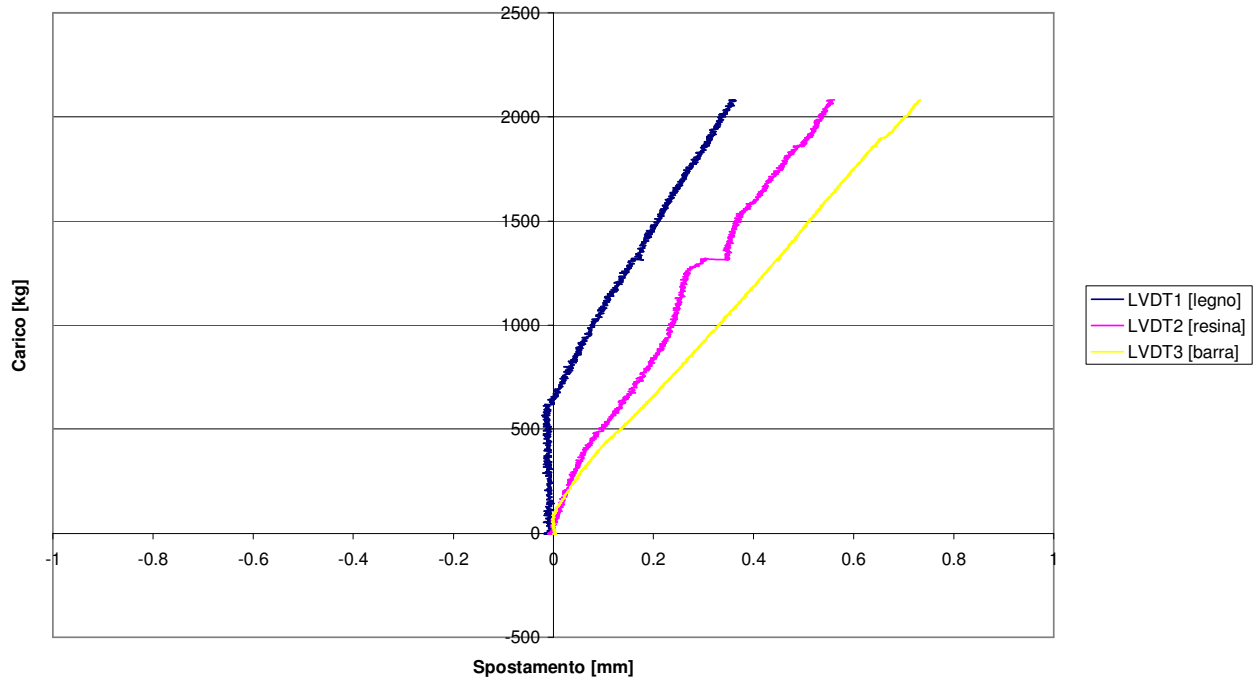


fig. 8.5.3.1 - trasduttore di spostamento (LVDT)

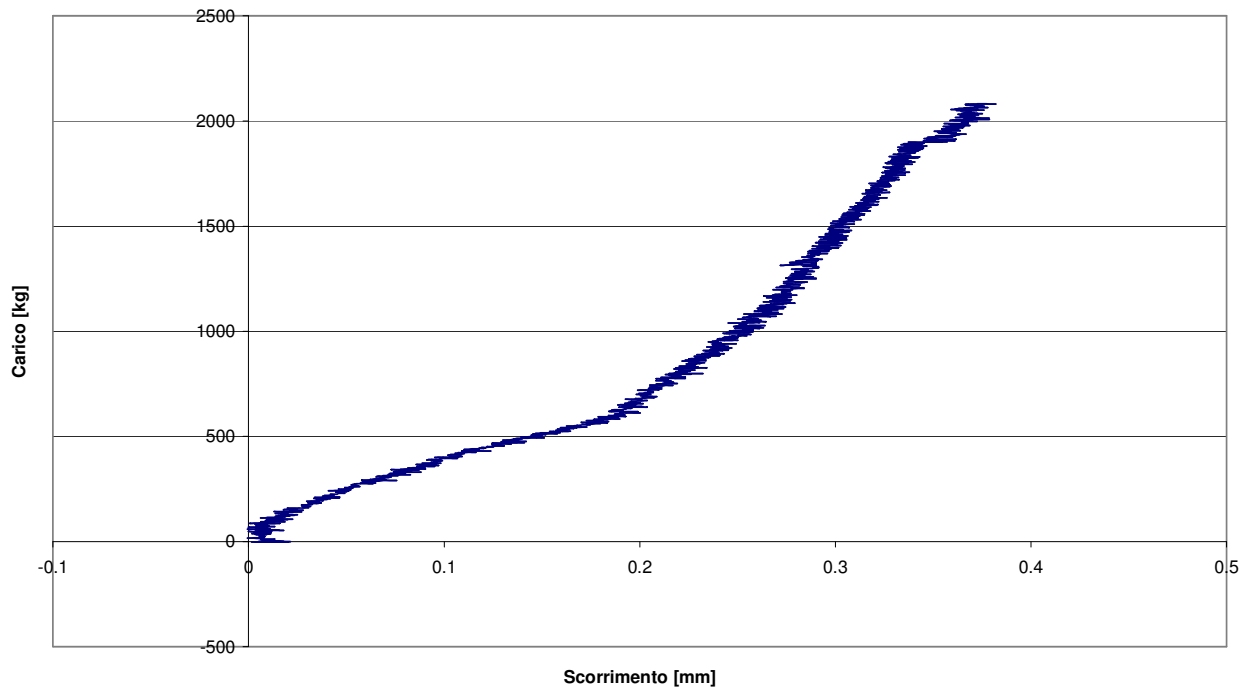


Appendice A: Grafici carico-spostamento prove di delaminazione (capitolo 7)  
Provino 1 (parte destra)

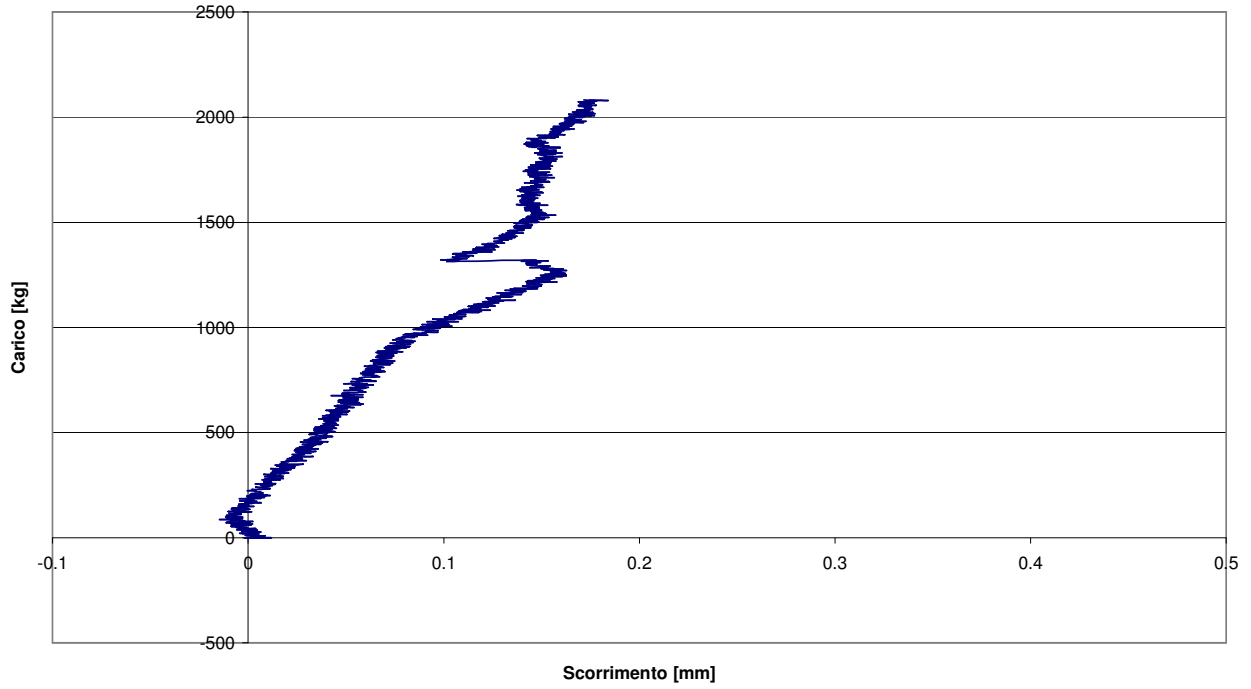
**Grafico Carico - Spostamento**



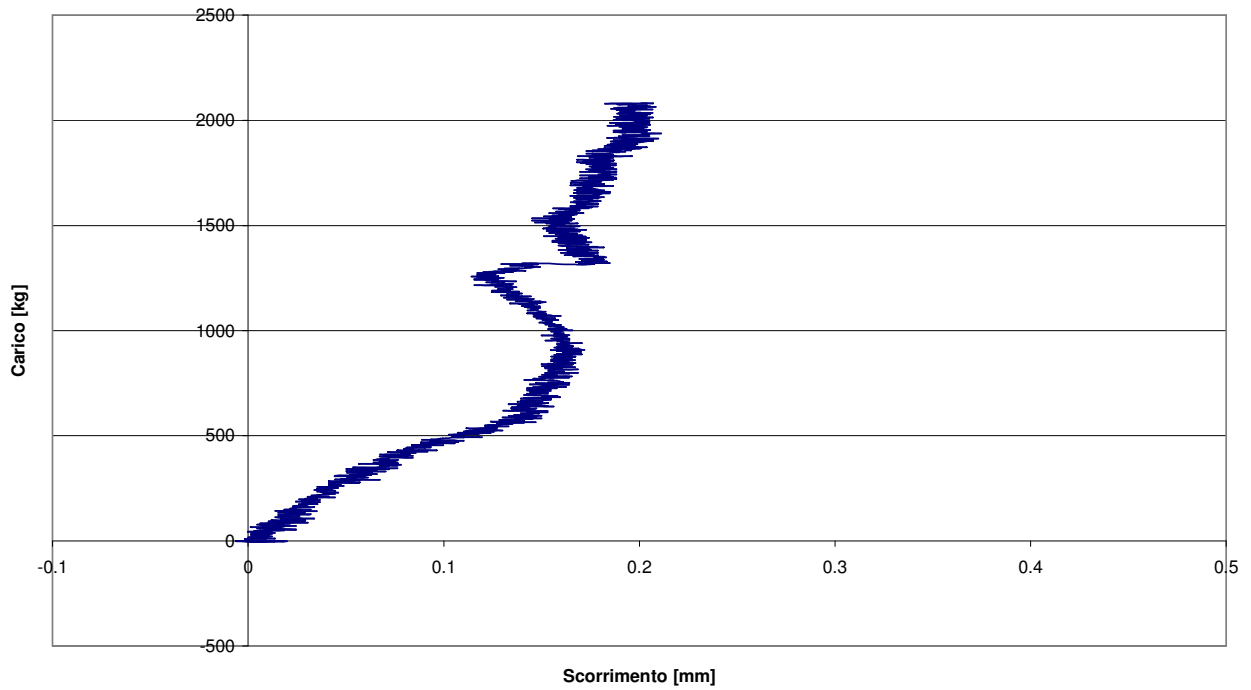
**Scorrimento barra - legno**



**Scorrimento Barra - Resina**

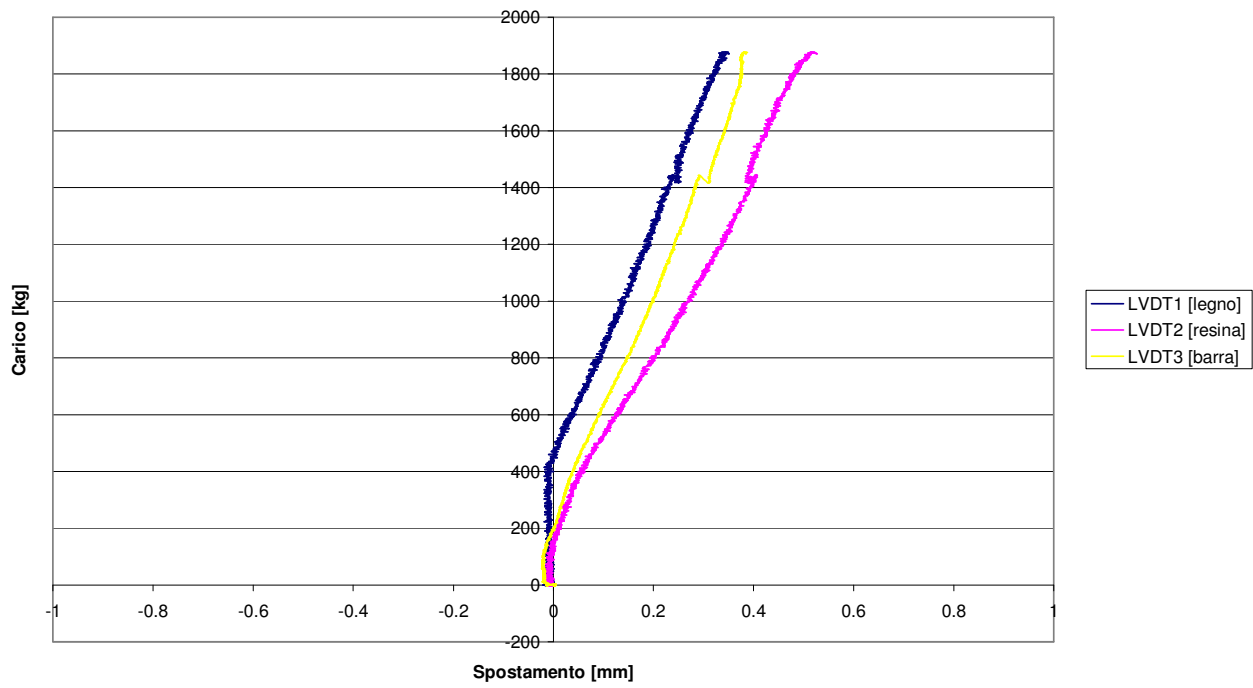


**Scorrimento resina - legno**

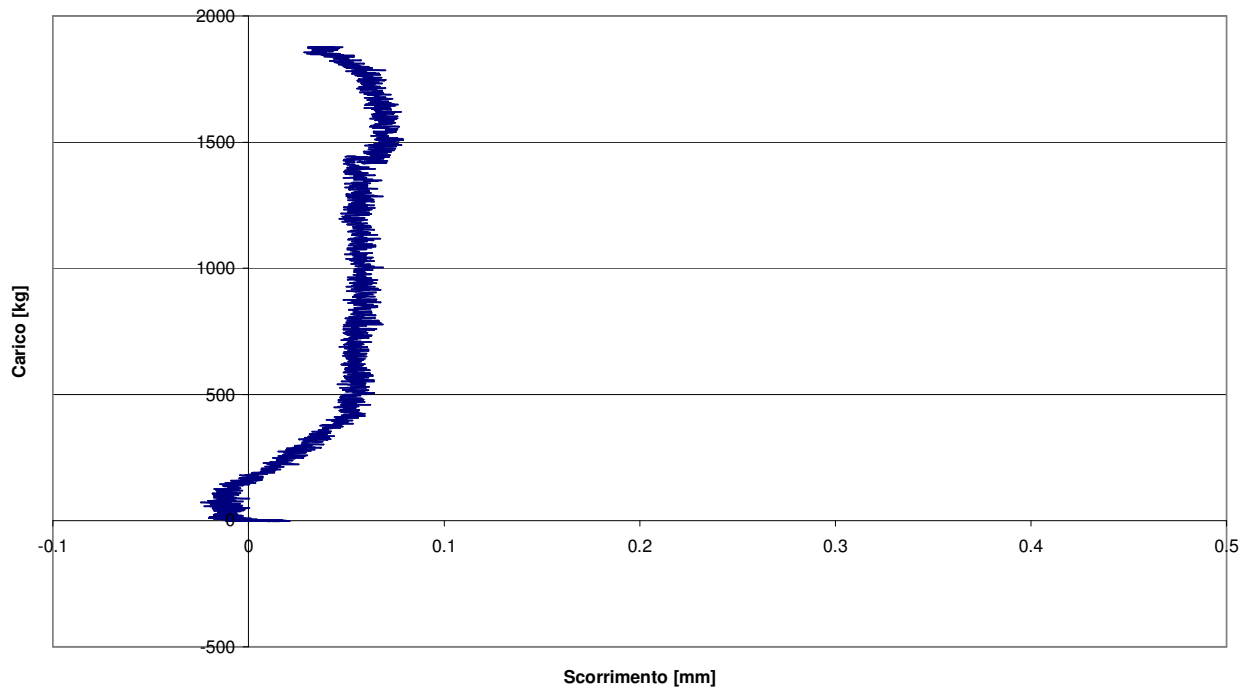


Provino 1 (parte sinistra)

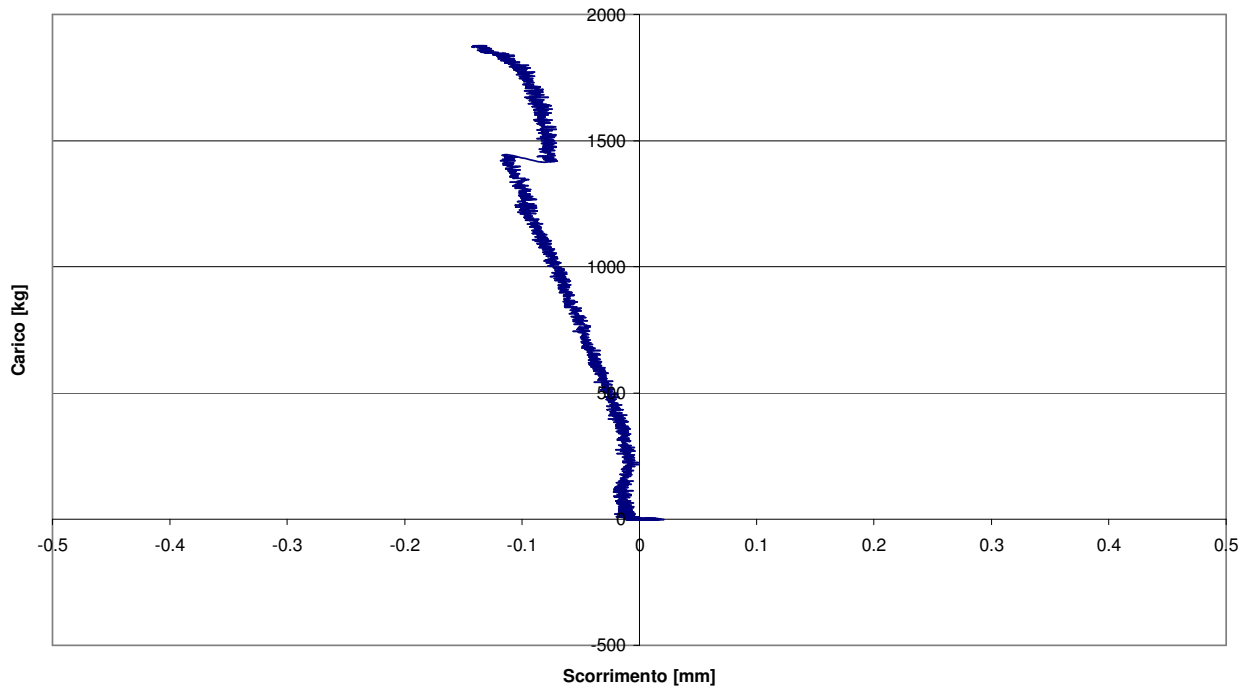
Grafico Carico - Spostamento



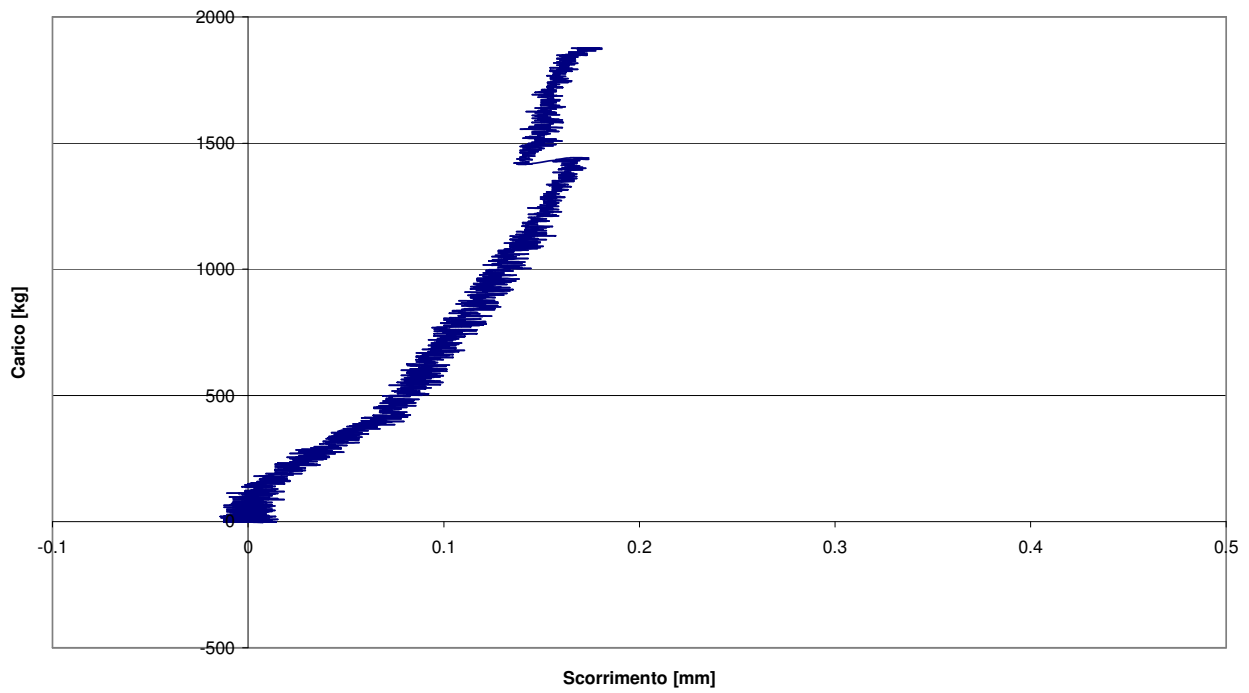
Scorrimento Barra - Legno



Scorrimento Barra - Resina

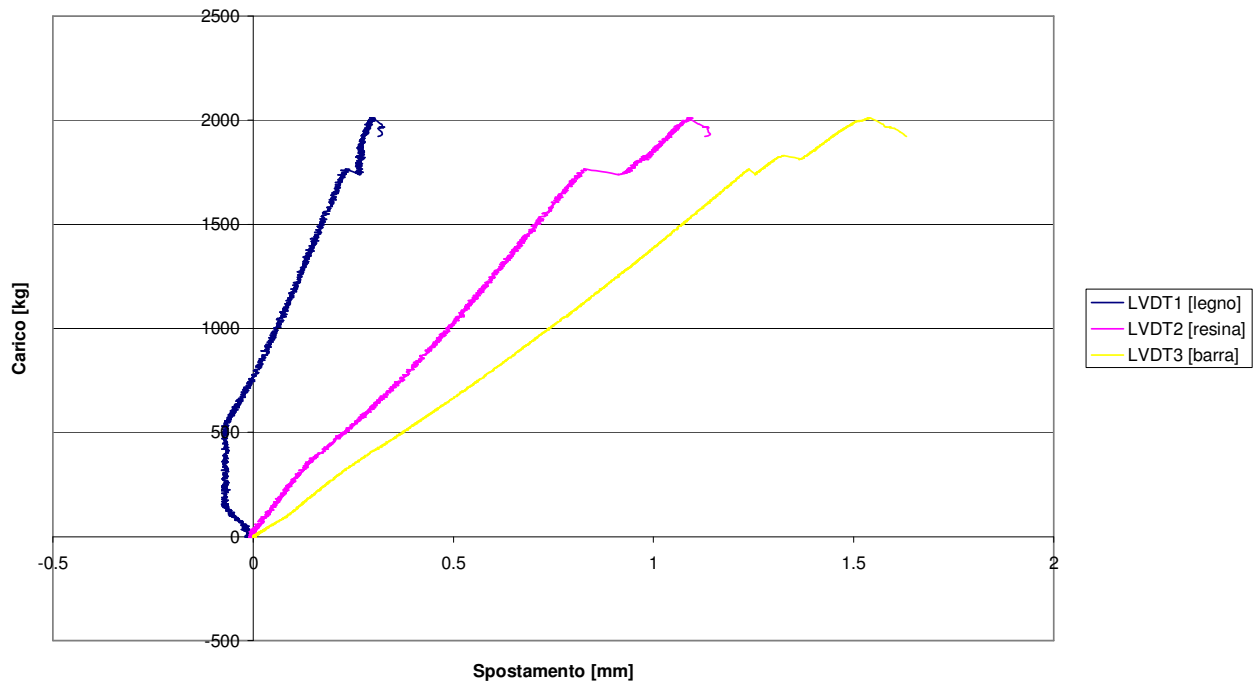


Scorrimento Resina - Legno

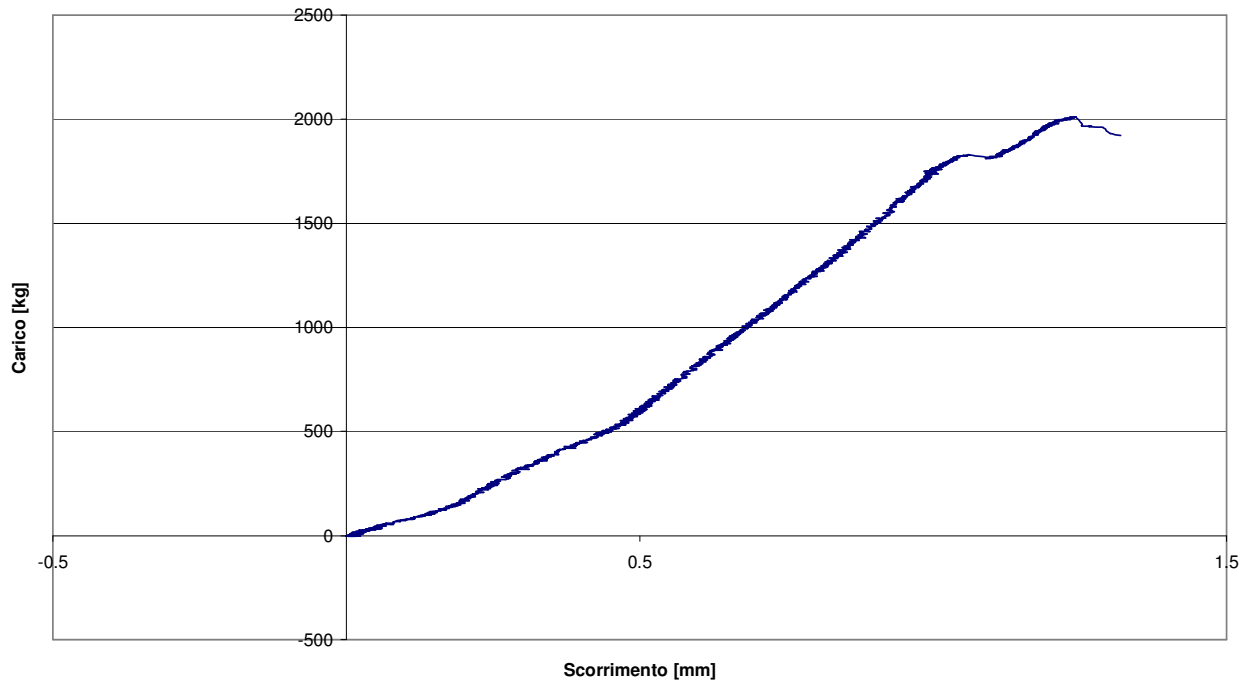


Provino 2 (parte destra)

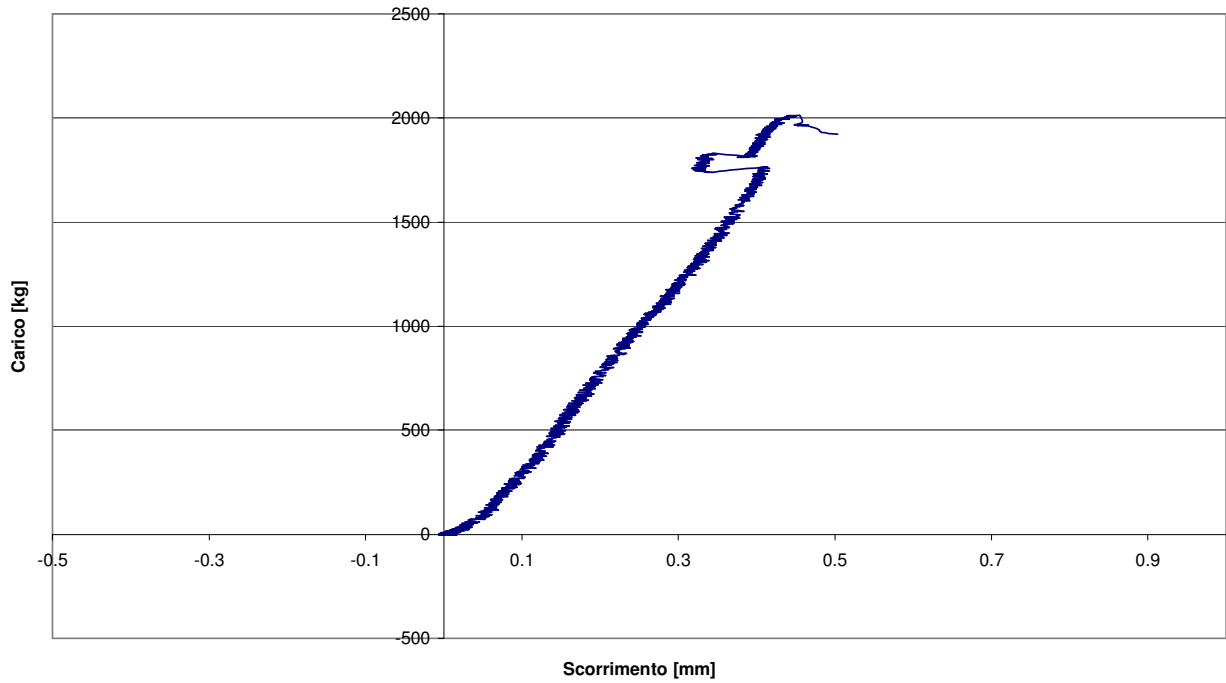
Grafico Carico - Spostamento



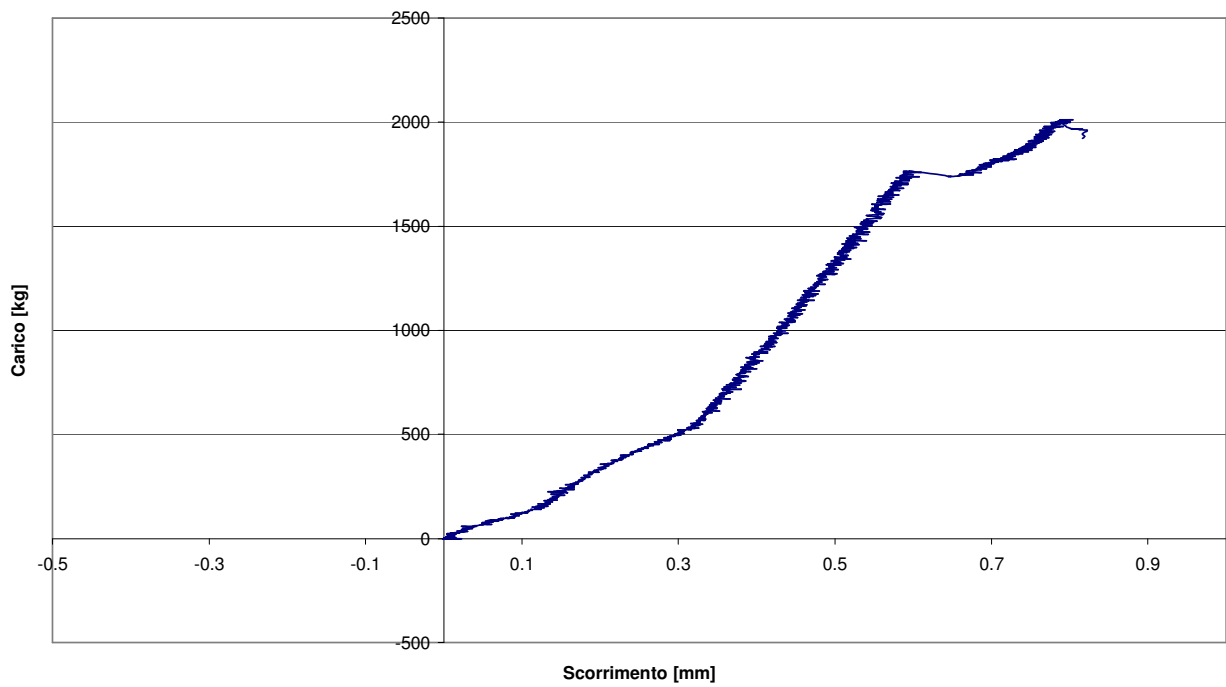
Scorrimento barra - legno



**Scorrimento barra - resina**

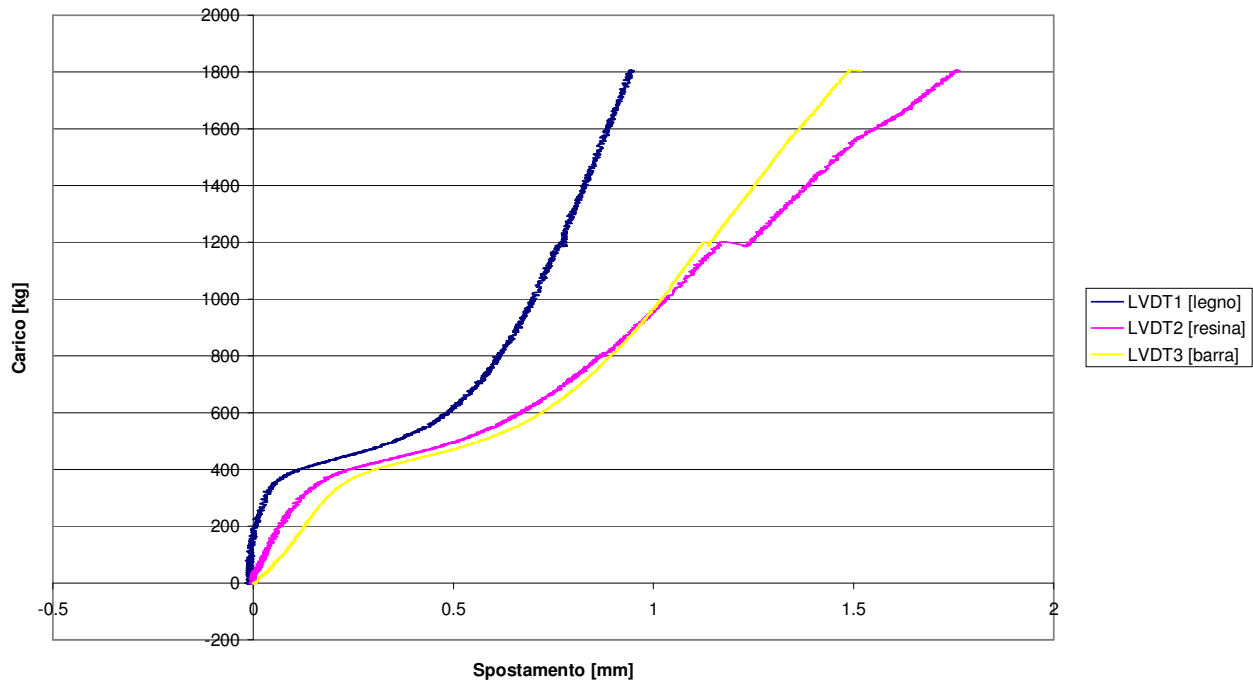


**Scorrimento resina - legno**

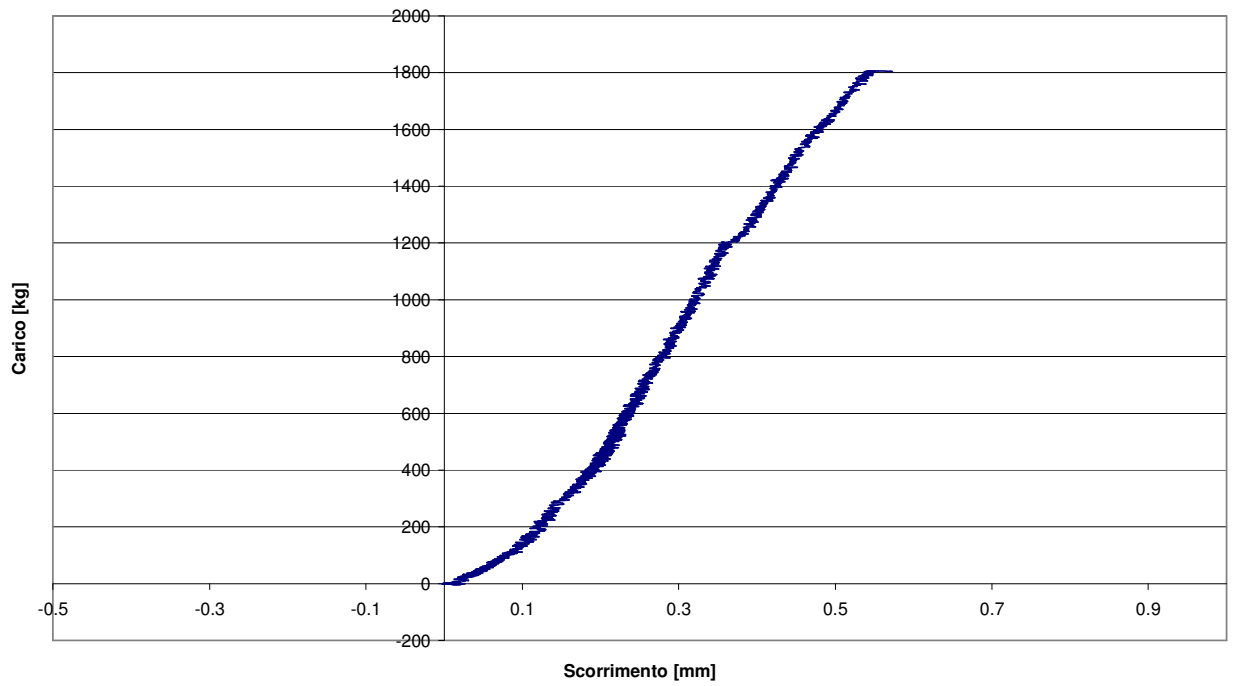


Provino 2 (parte sinistra)

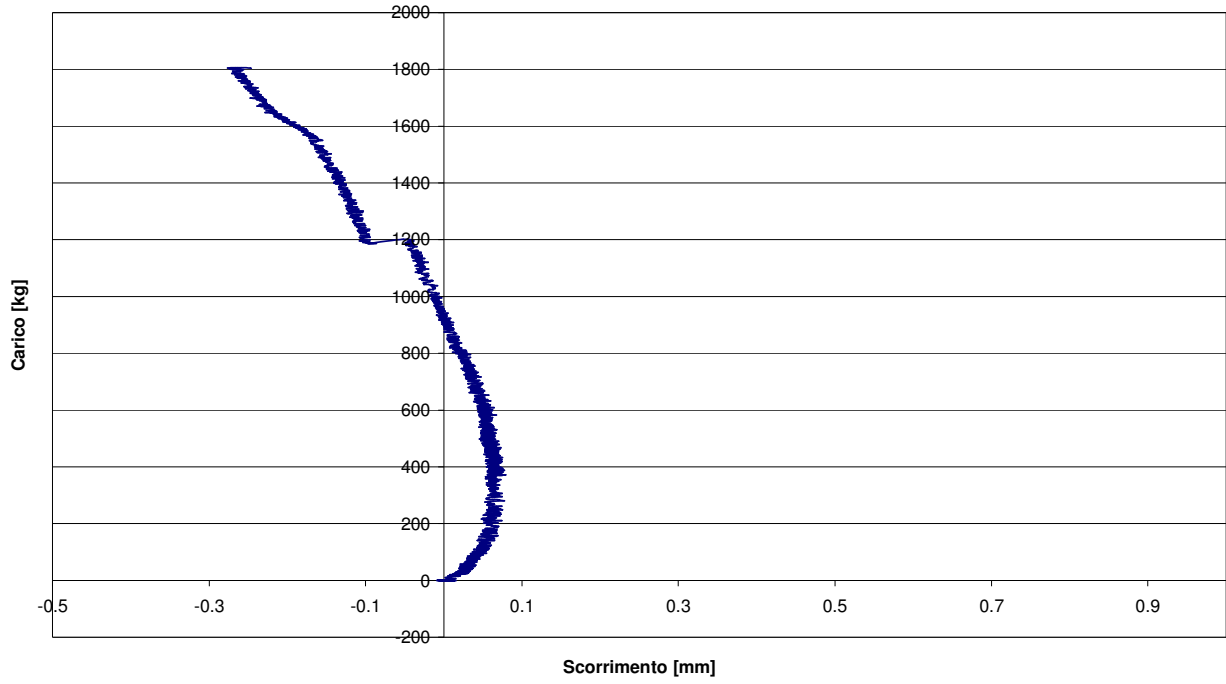
Grafico Carico - Spostamento



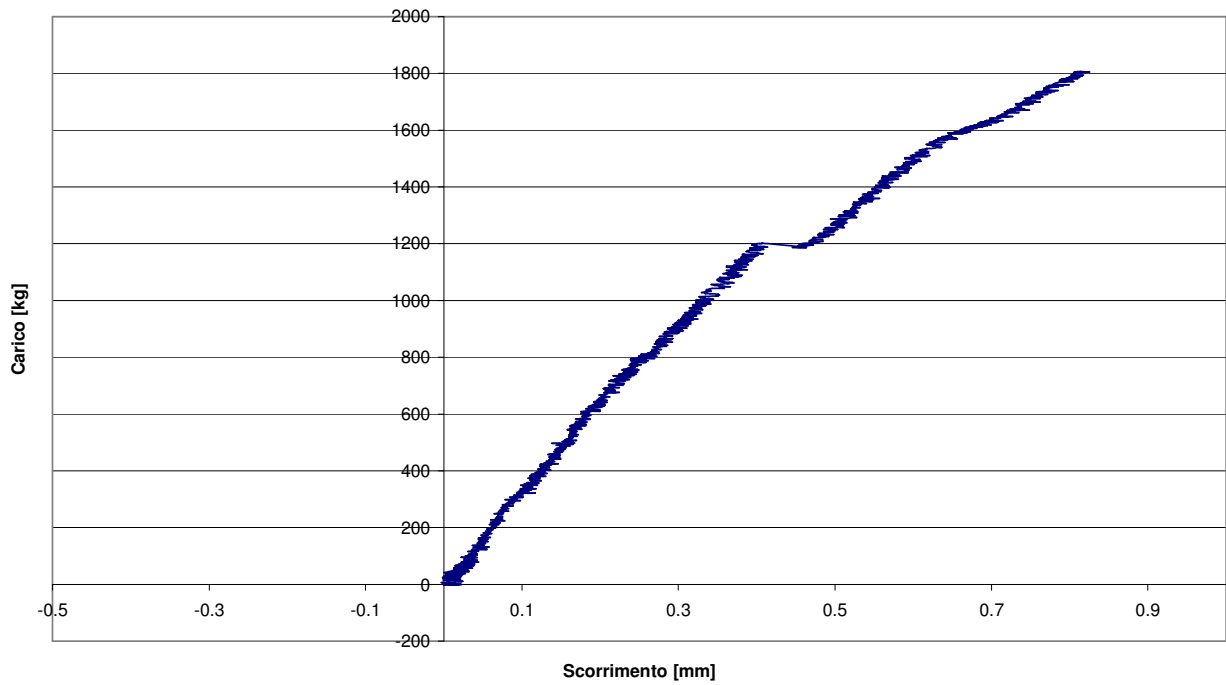
Scorrimento barra - legno



**Scorrimento barra - resina**



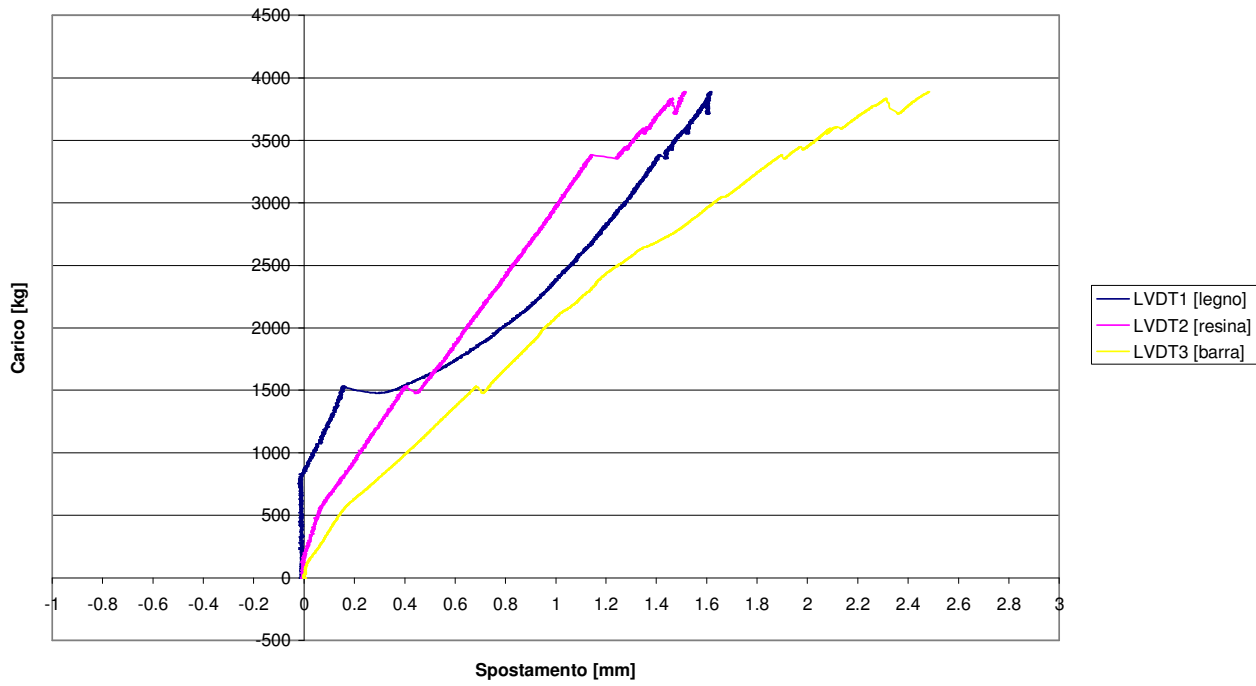
**Scorrimento resina - legno**



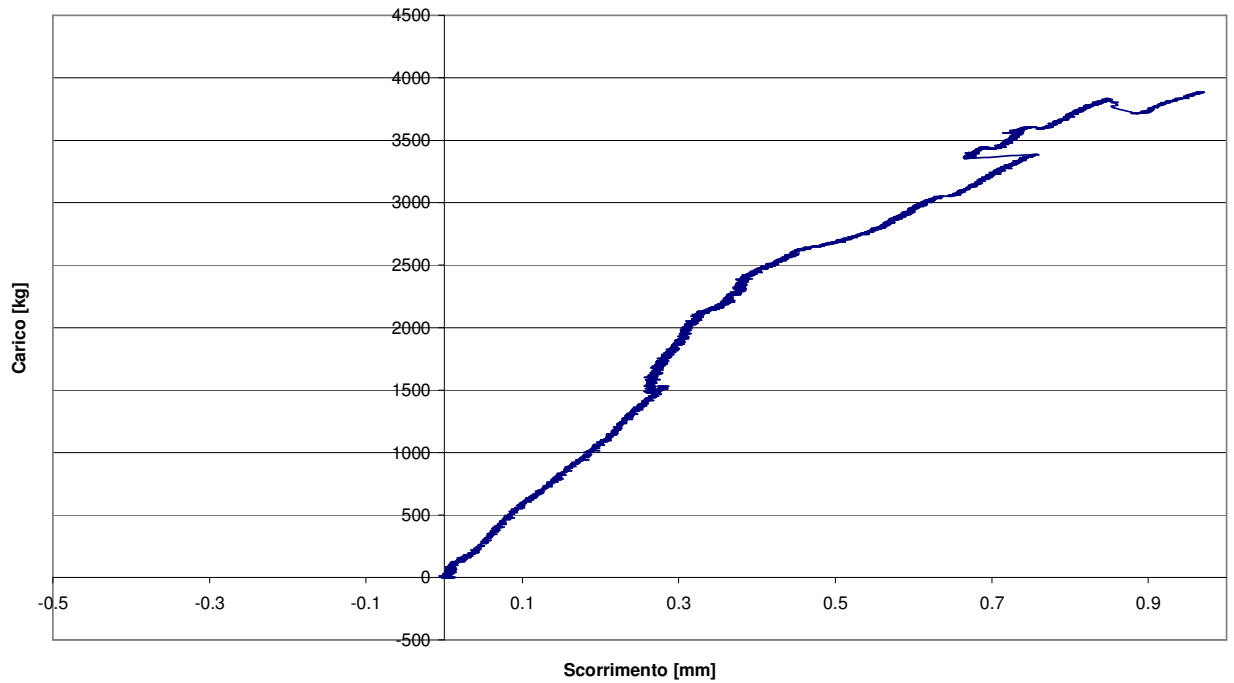


Provino 3 (parte destra)

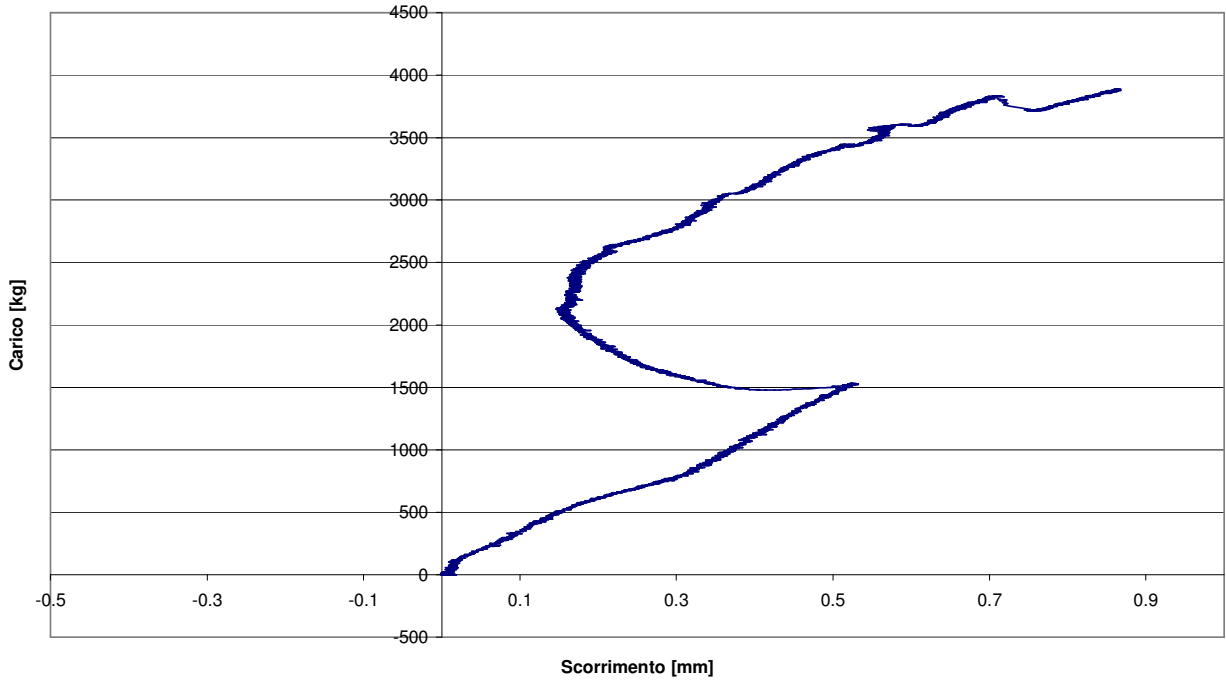
Grafico Carico - Spostamento



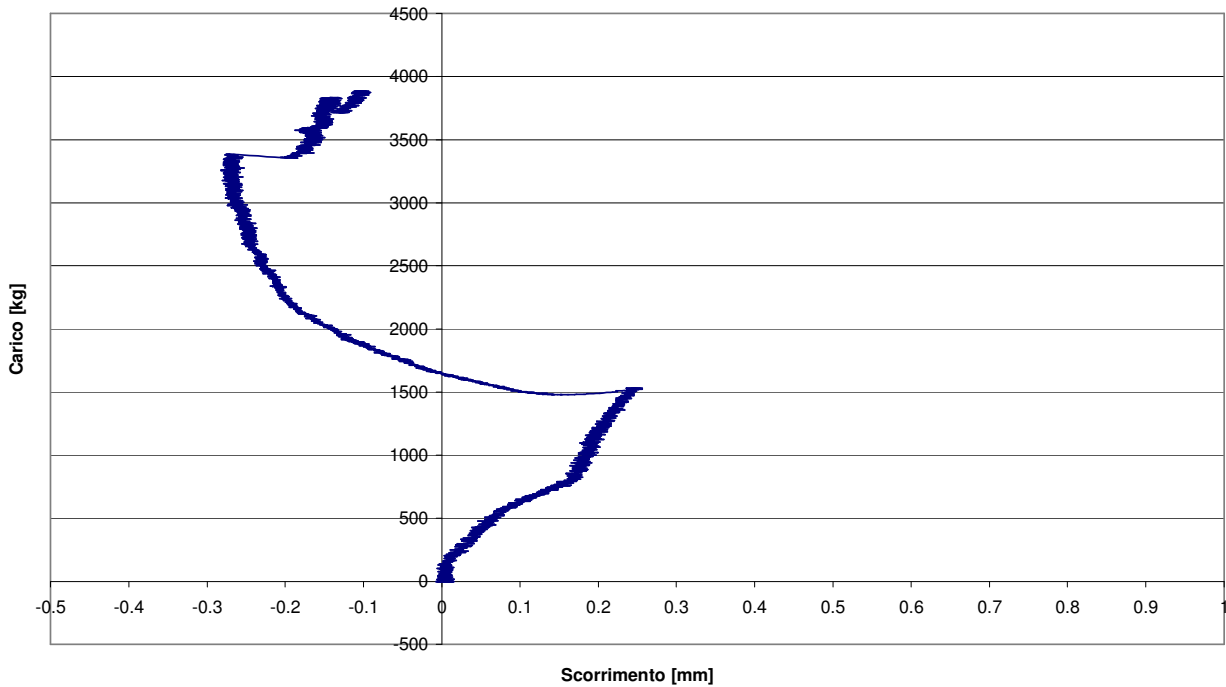
scorrimento barra - legno



**Scorrimento barra - resina**

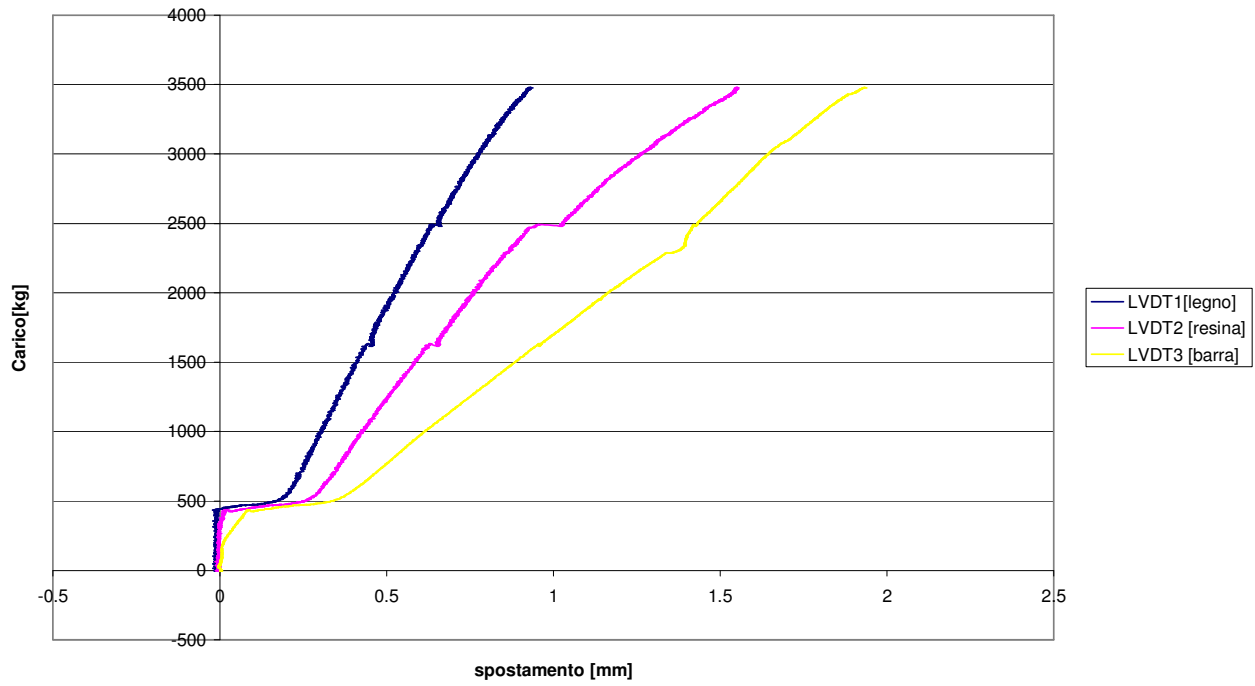


**Scorrimento resina - legno**

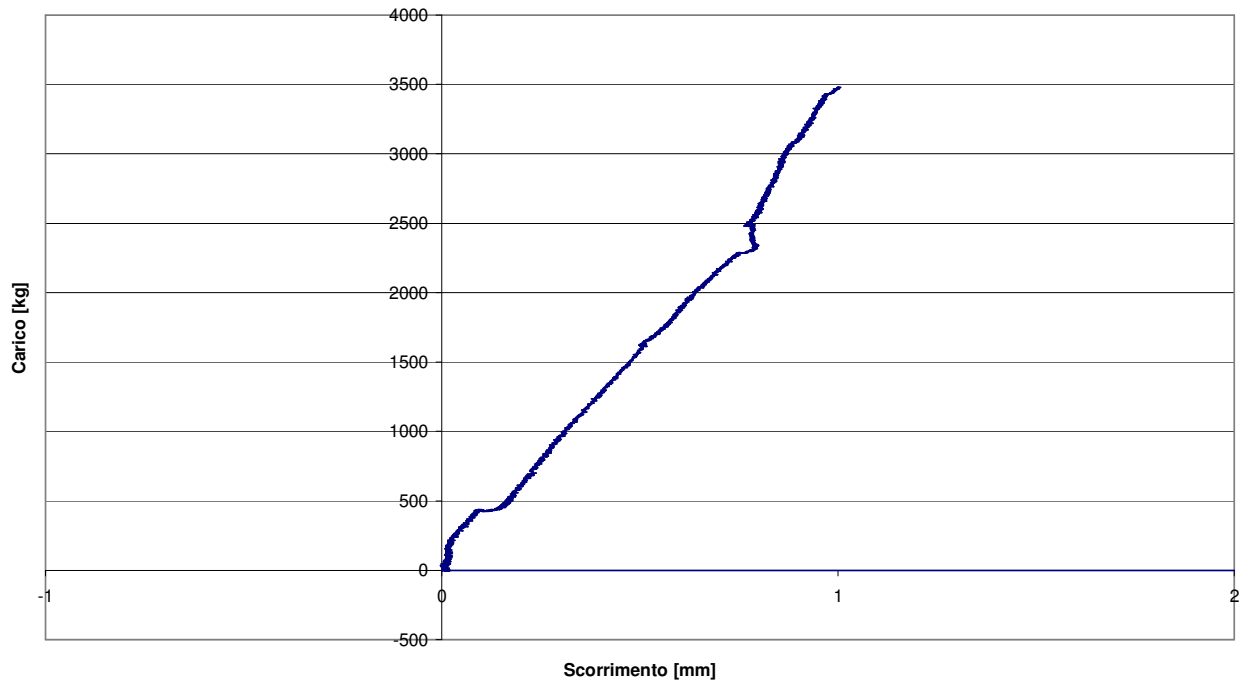


Provino 3 (parte sinistra)

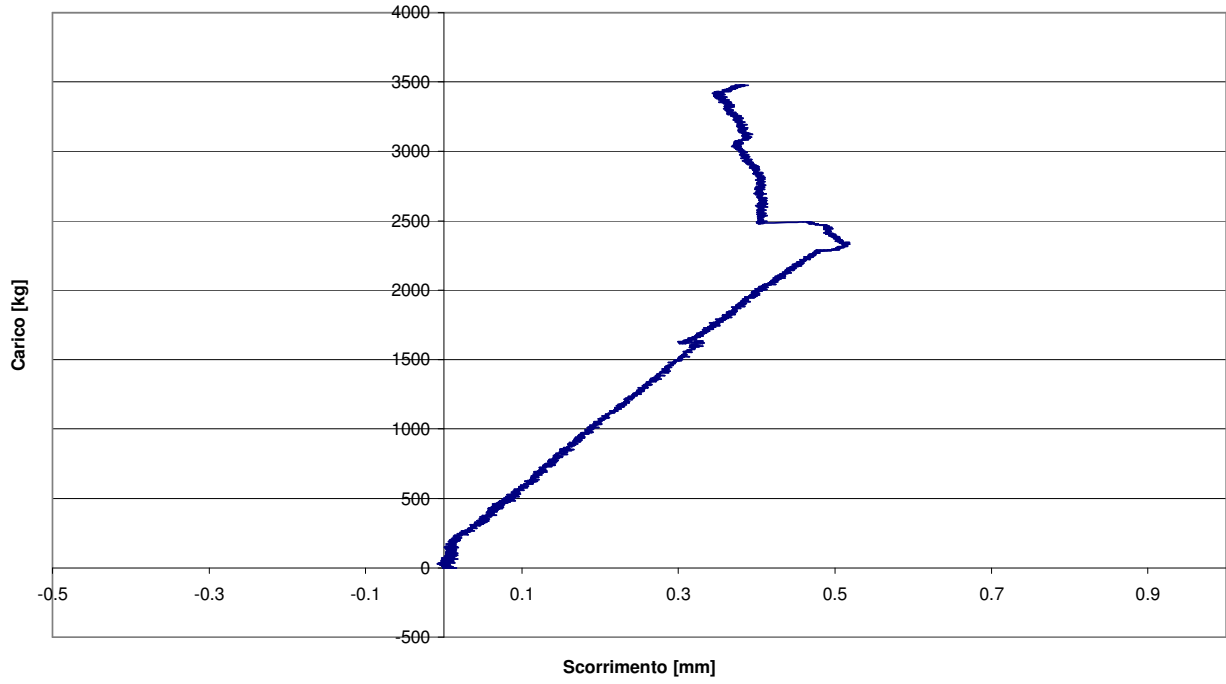
Grafico Carico- Spostamento



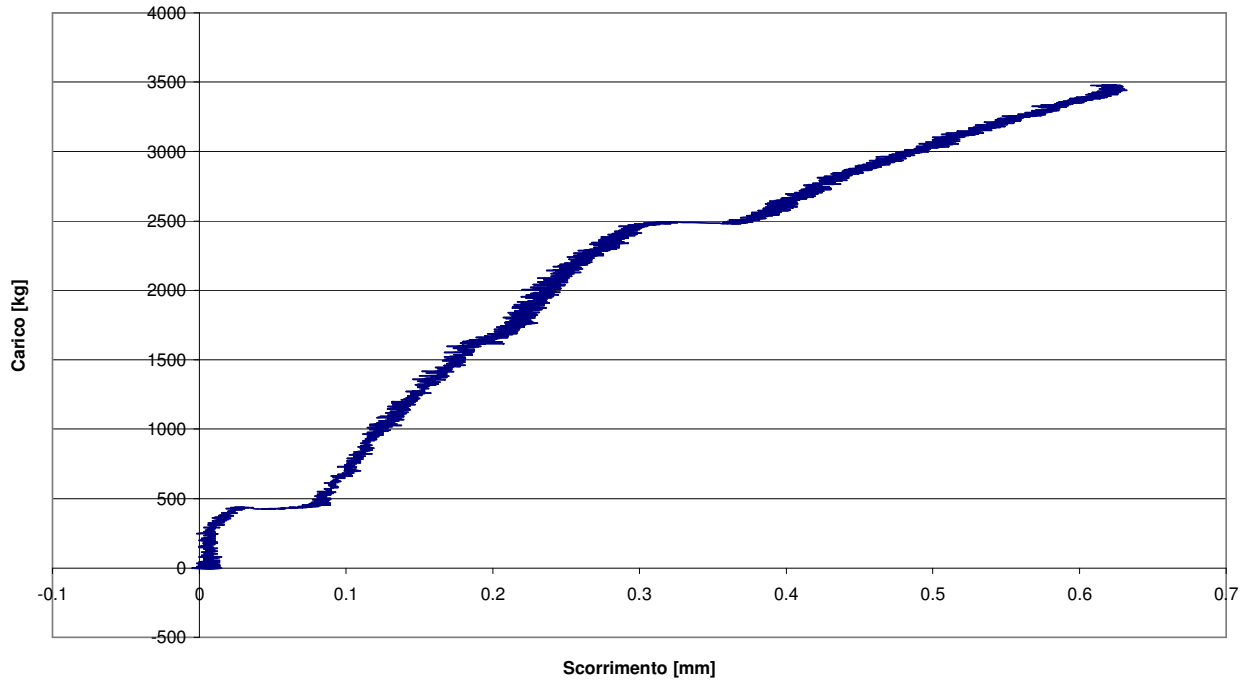
Scorrimento barra - legno



**Scorrimento barra - resina**

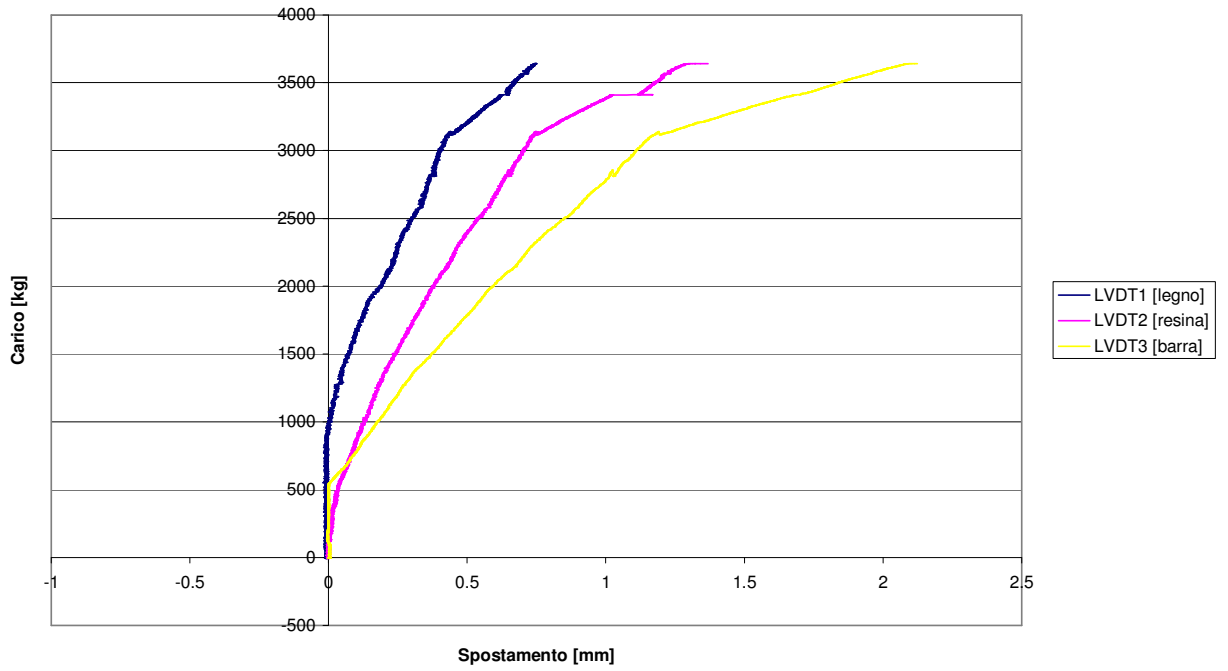


**Scorrimento resina - legno**

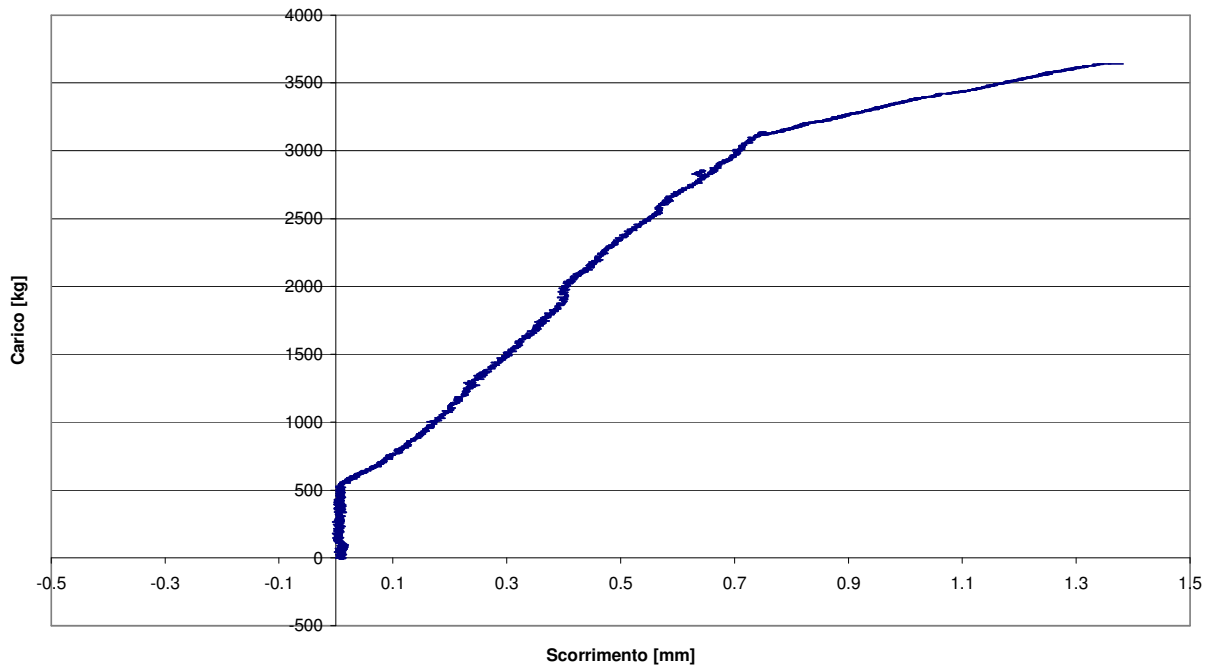


Provino 4 (parte destra)

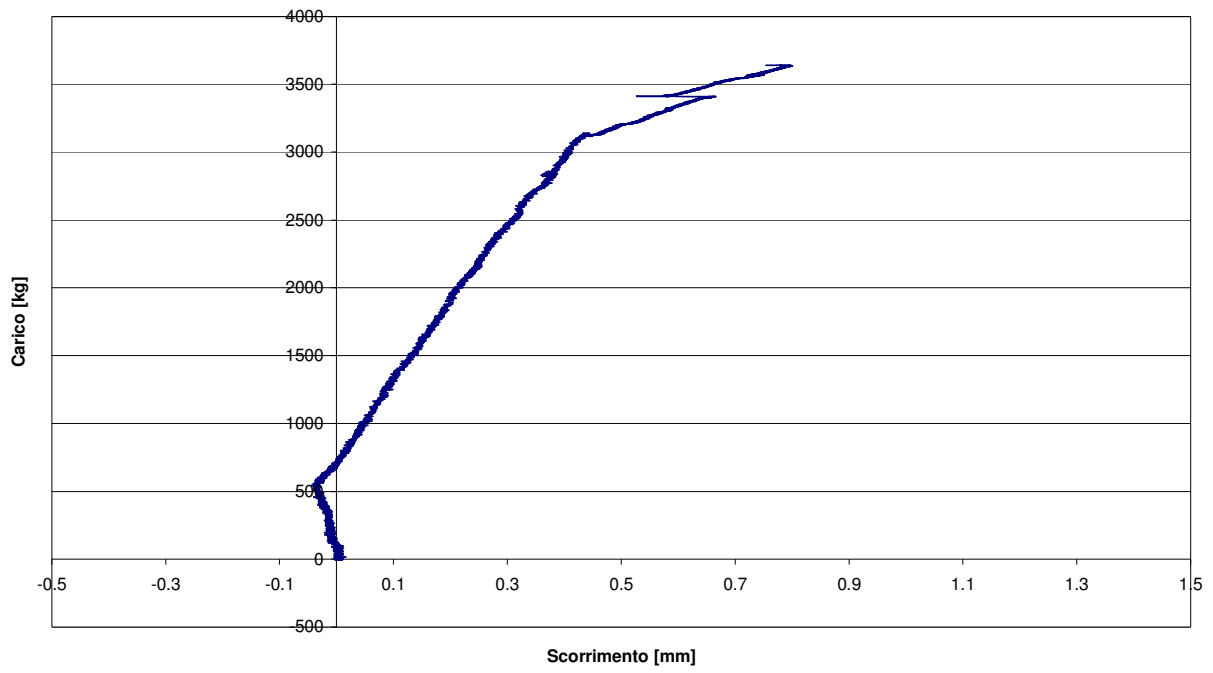
Grafico Carico - Spostamento



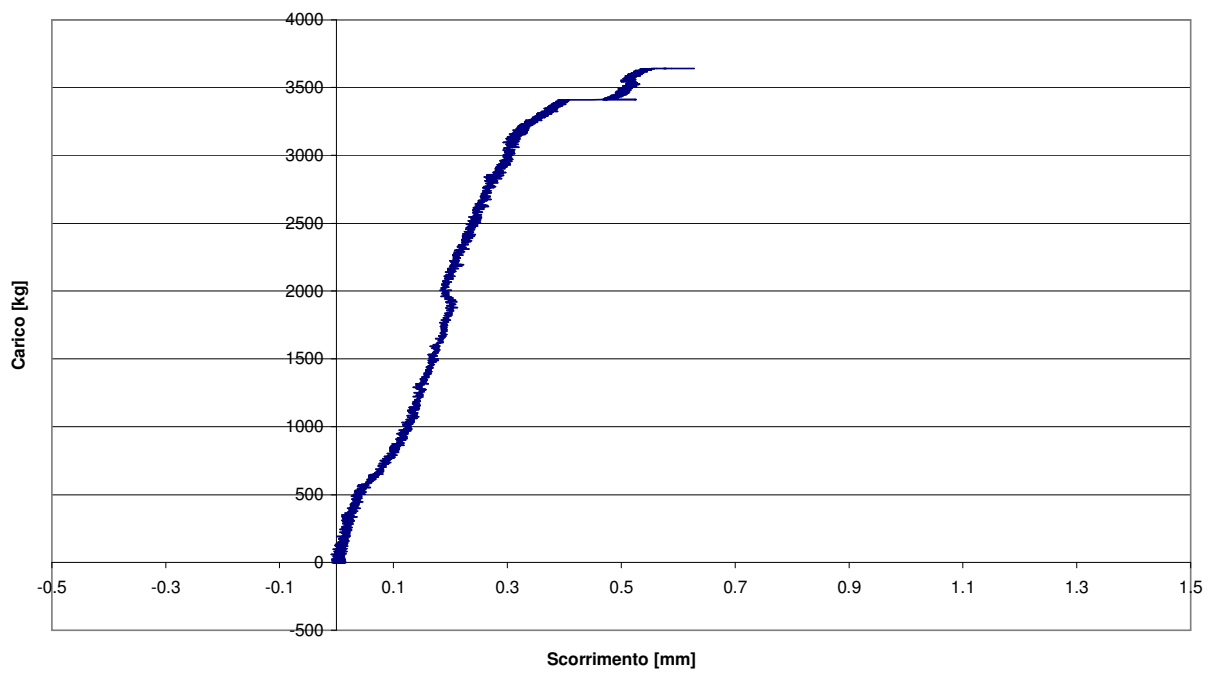
Scorrimento barra - legno



Scorrimento barra - resina

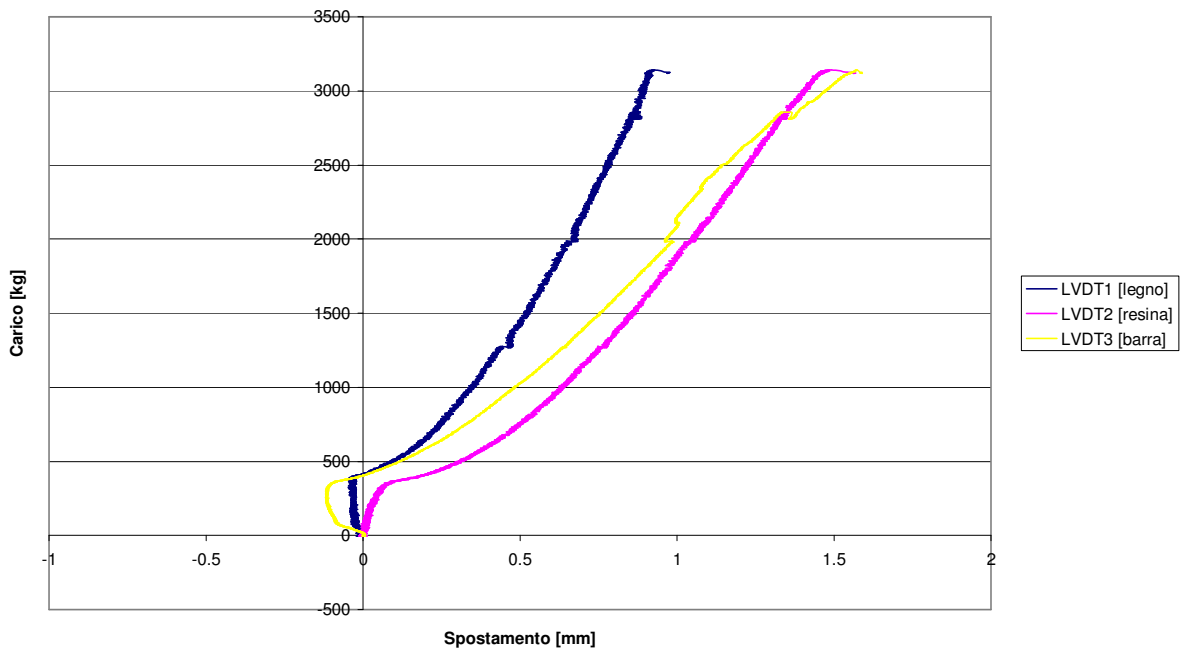


Scorrimento resina - legno

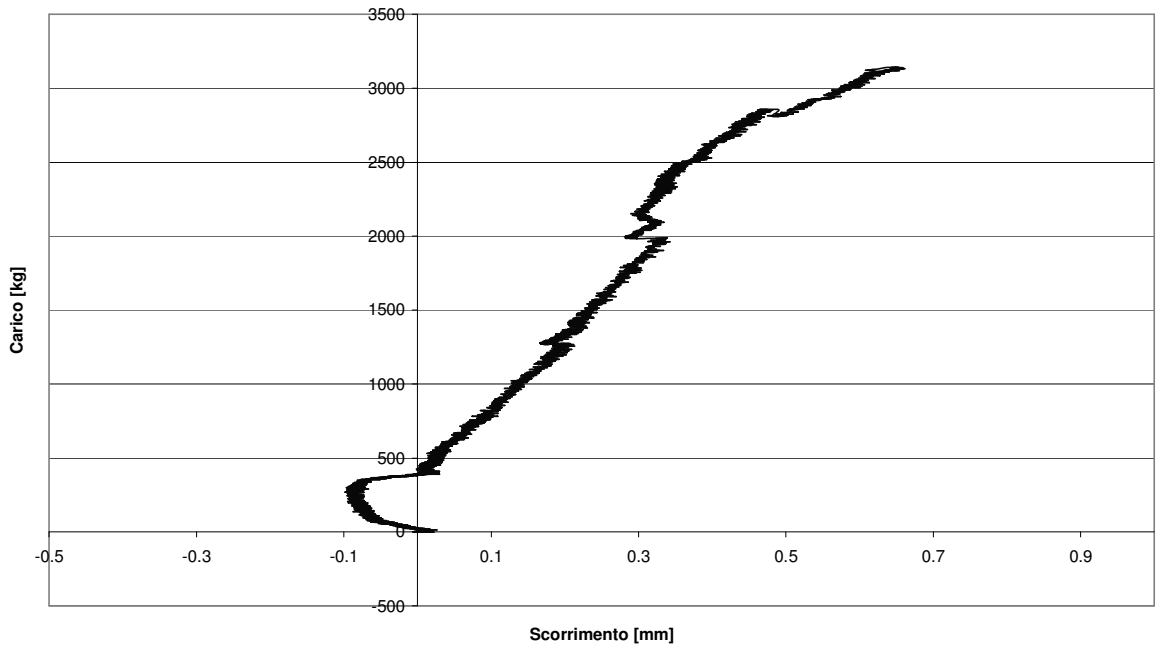


Provino 4 (parte sinistra)

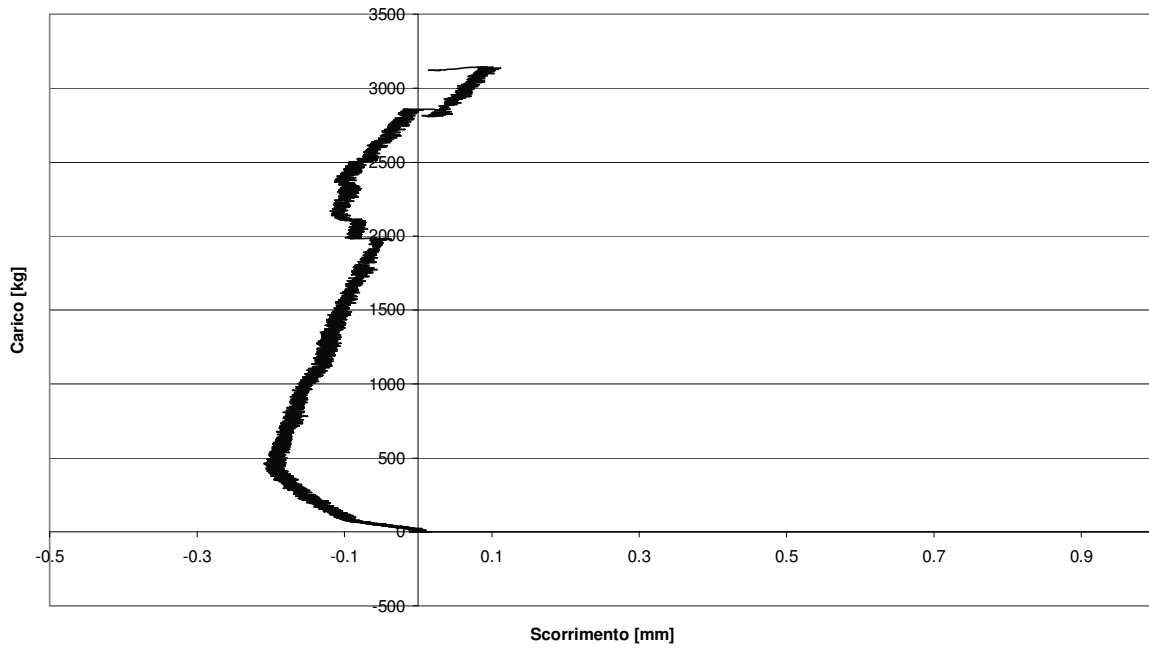
**Grafico Carico - Spostamento**



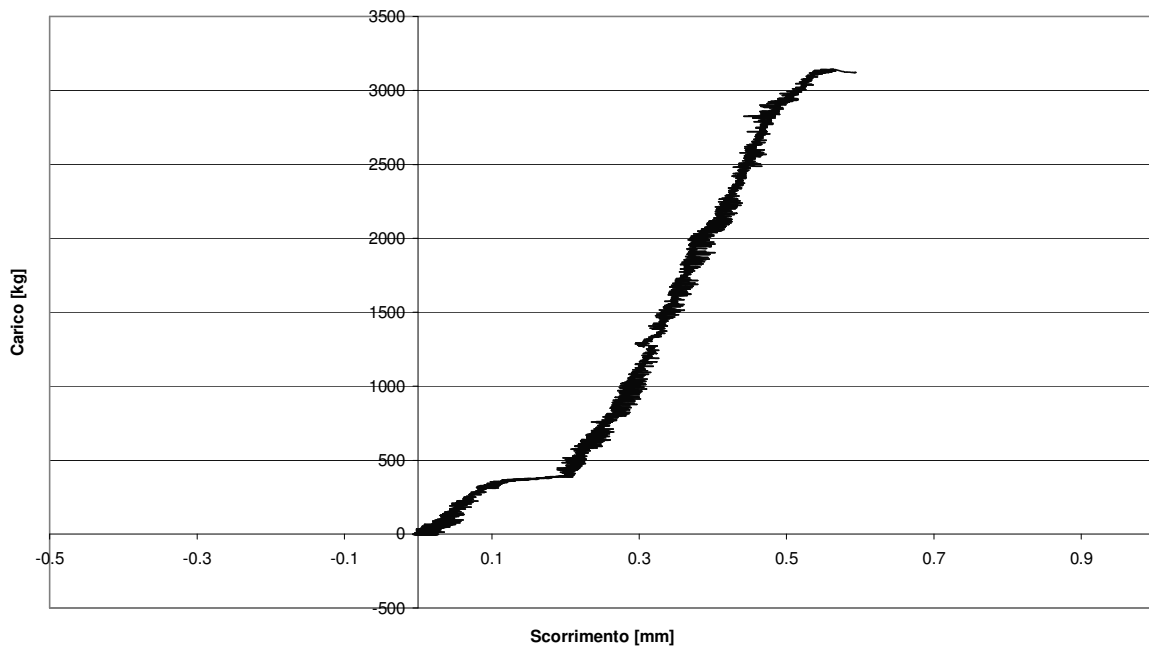
**Scorrimento barra - legno**



**Scorrimento barra - resina**



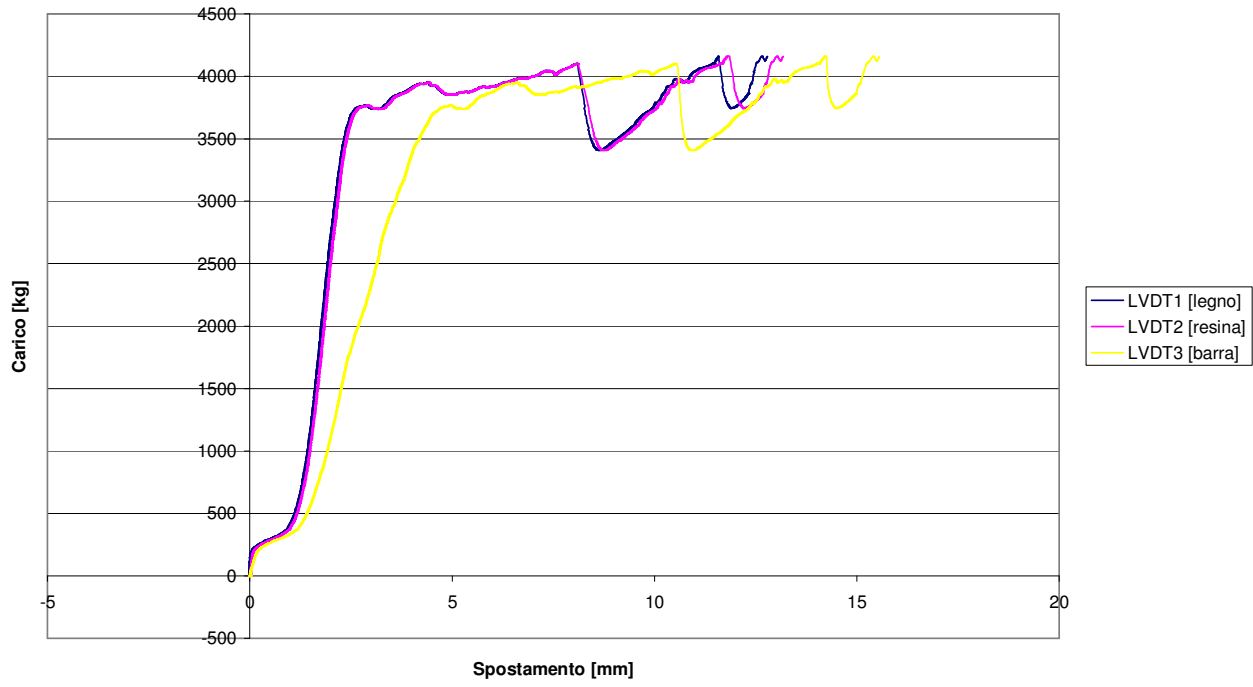
**Scorrimento resina - legno**



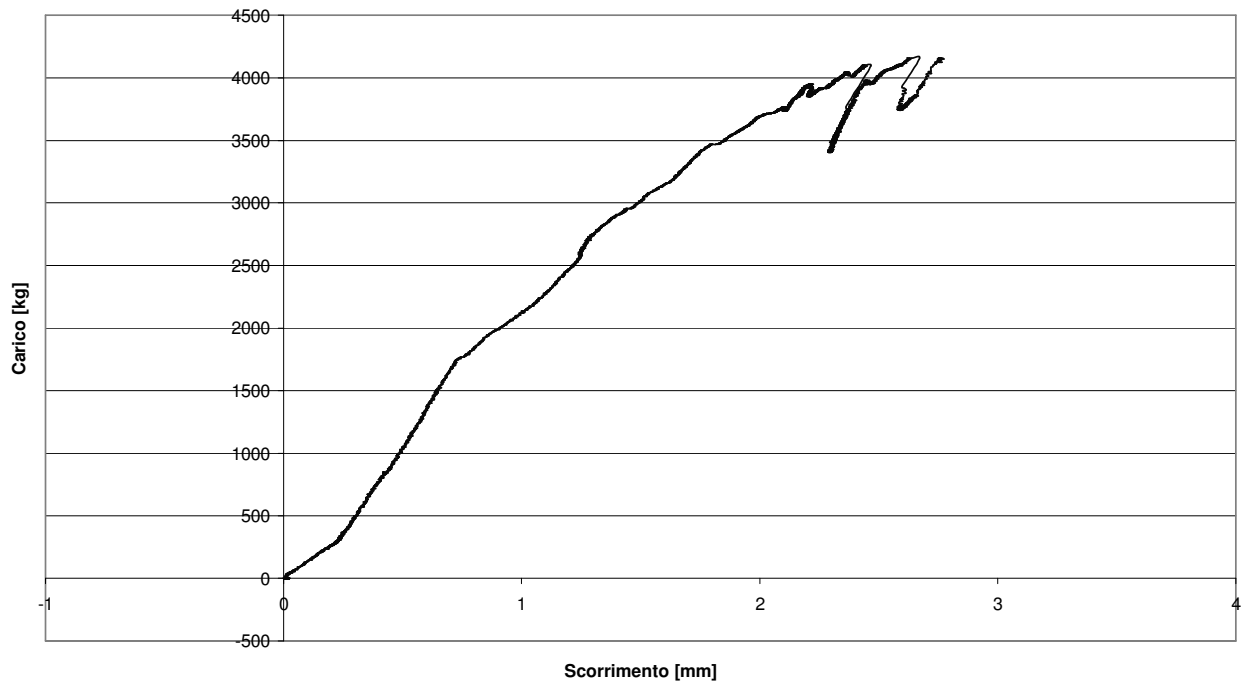


Provino 5 (parte destra)

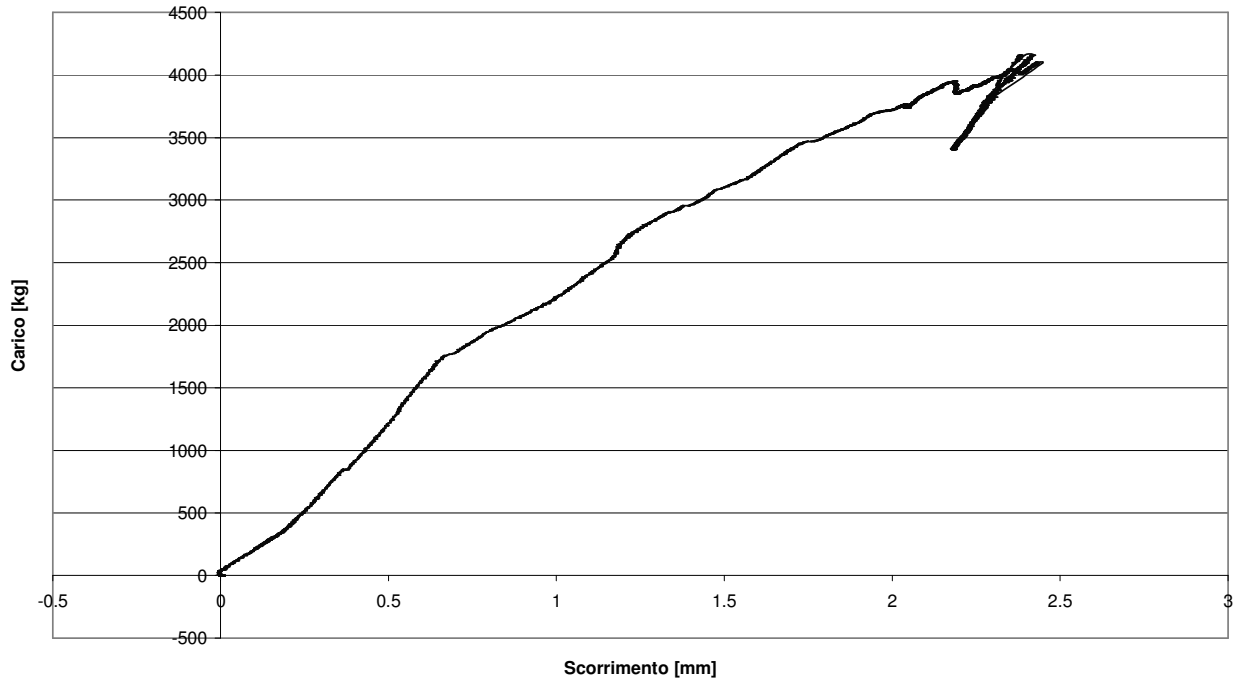
Grafico Carico - Spostamento



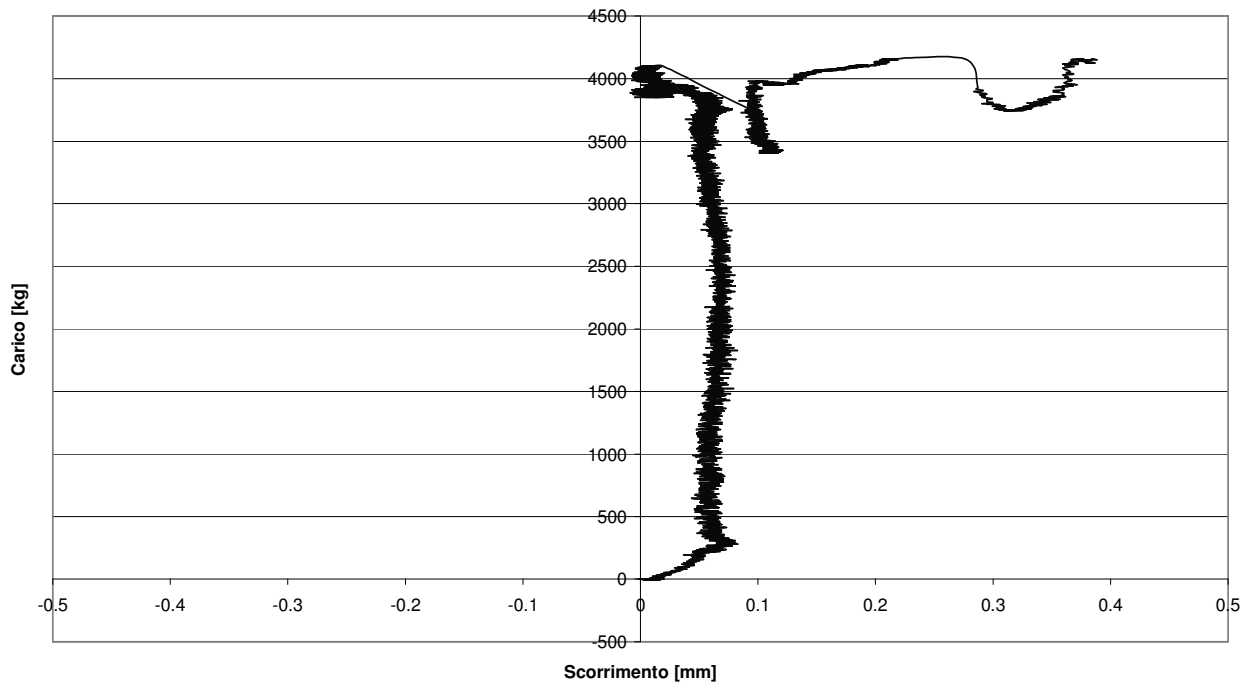
Scorrimento barra - legno



**scorrimento barra resina**

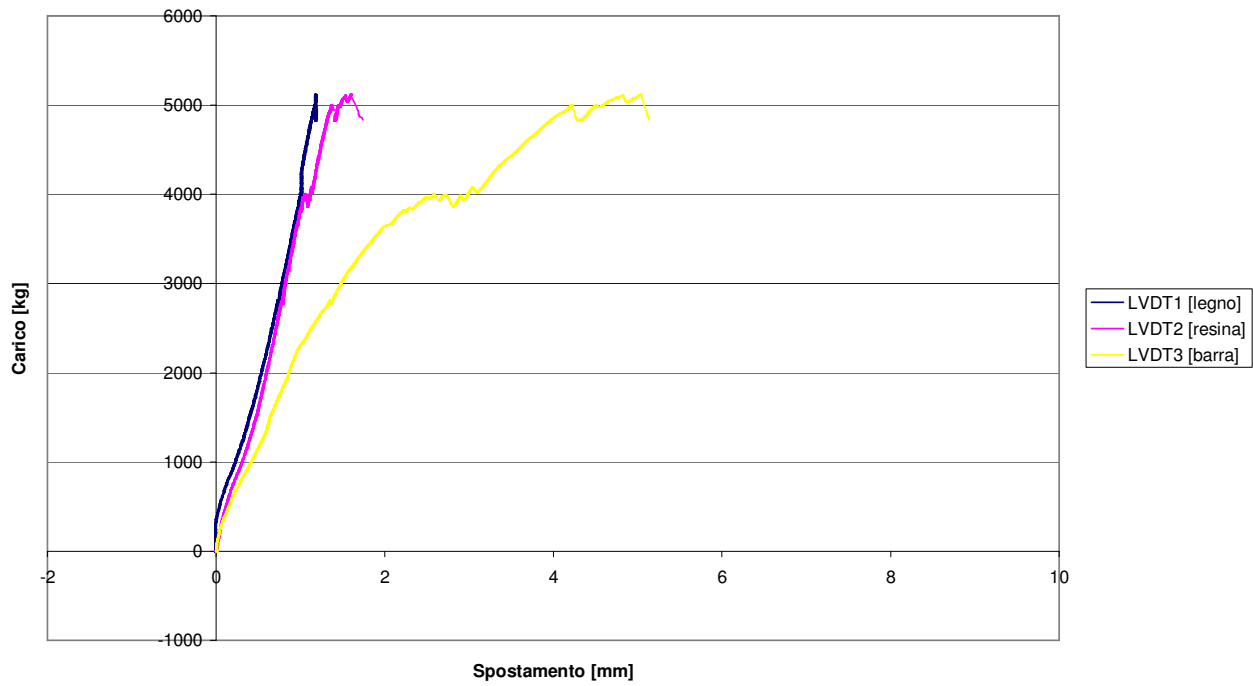


**scorrimento resina - legno**

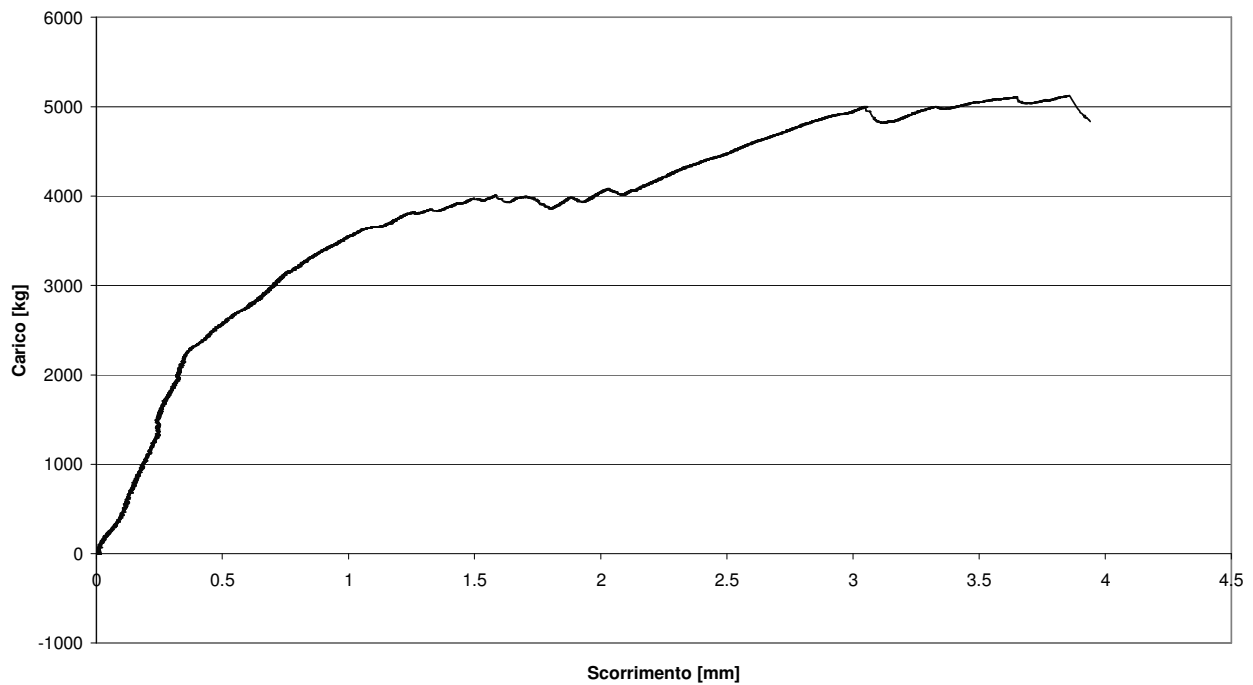


Provino 5 (parte sinistra)

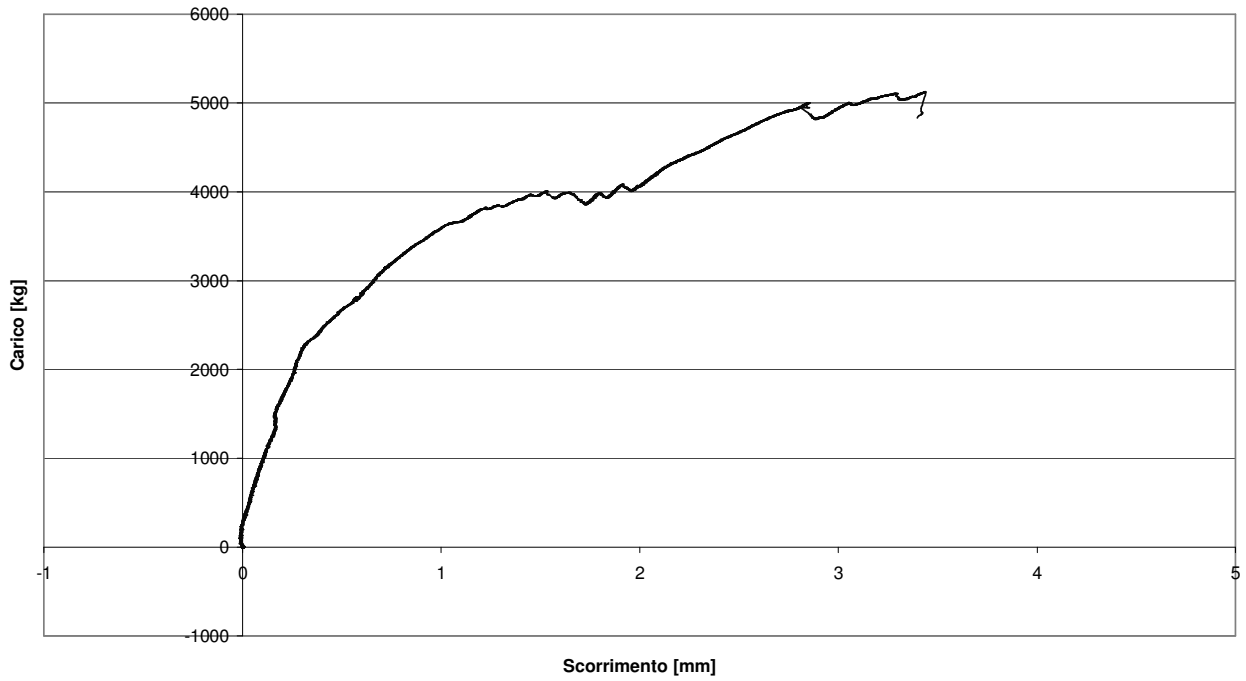
**Grafico Carico - Spostamento**



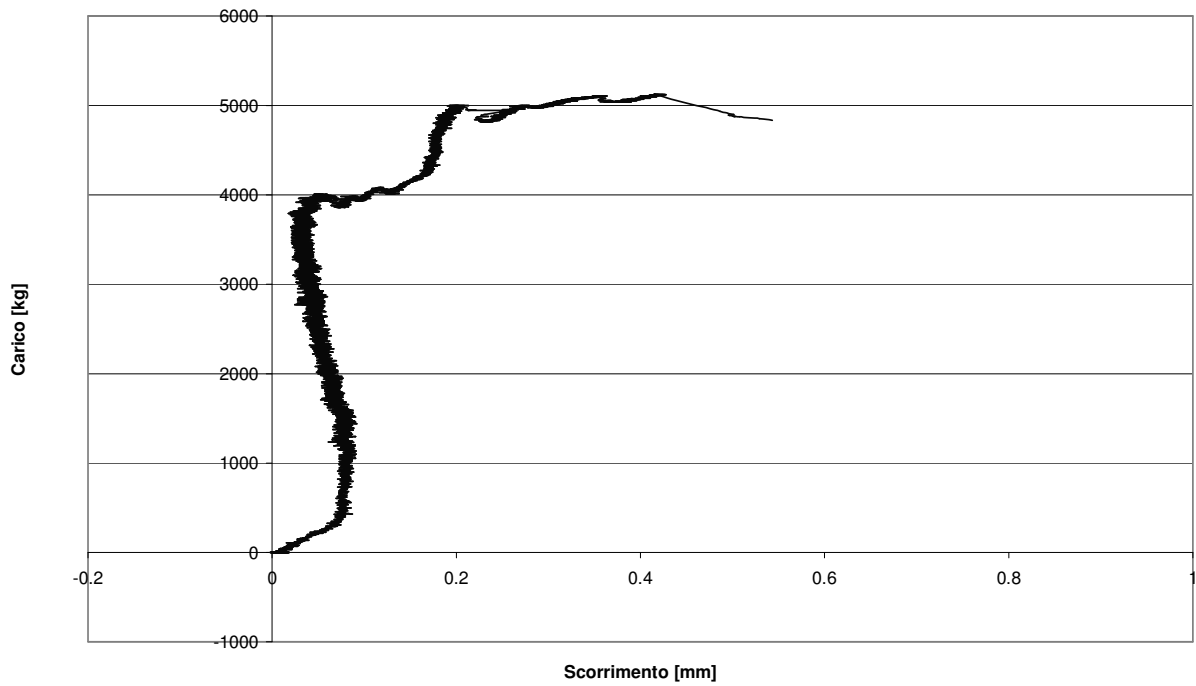
**Scorrimento barra - legno**



**Scorrimento barra - resina**

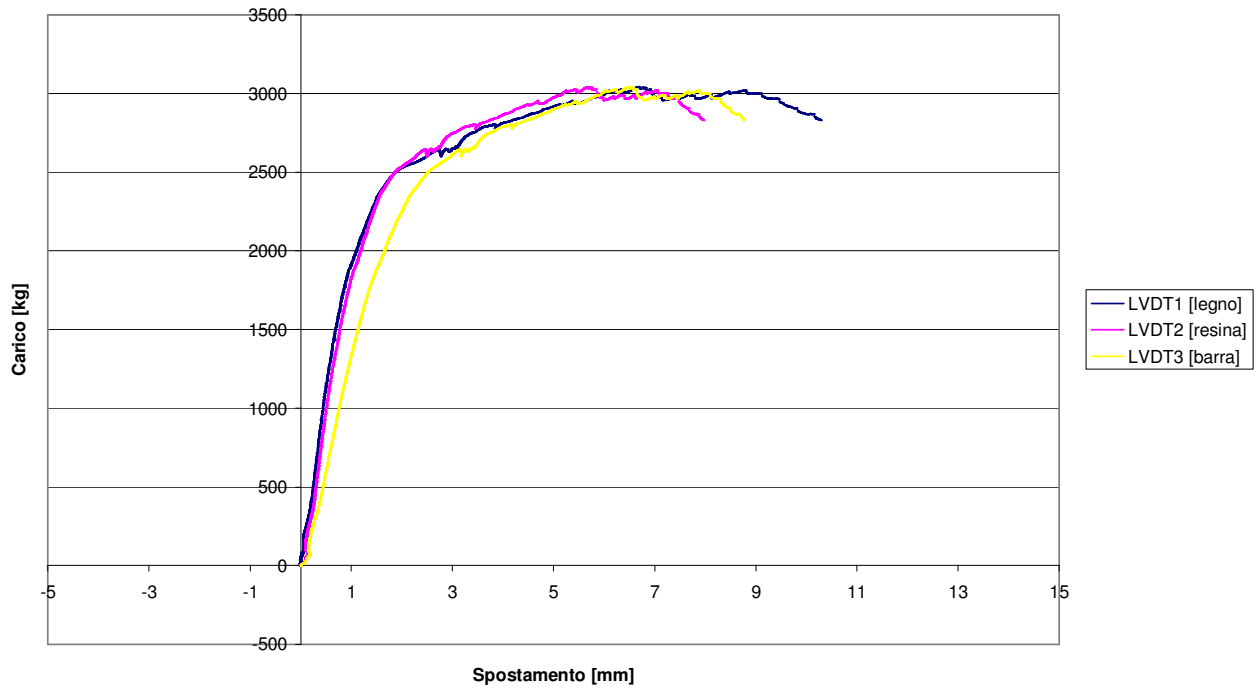


**Scorrimento resina - legno**

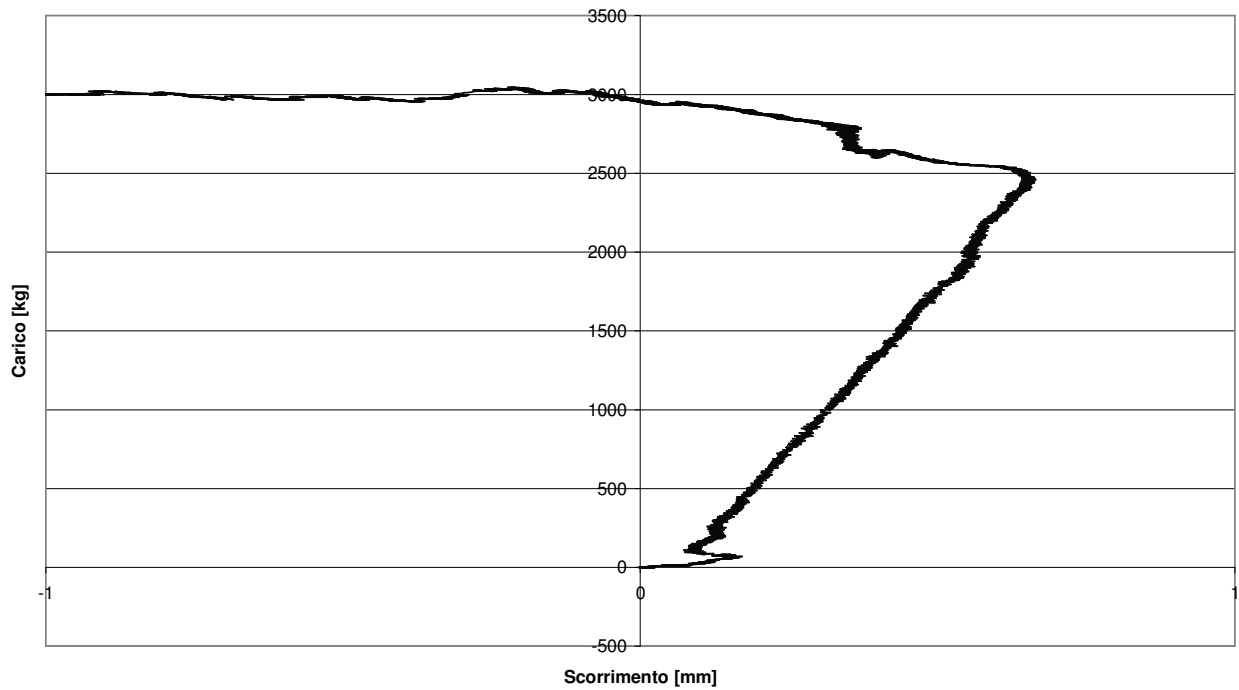


Provino 6 (parte destra)

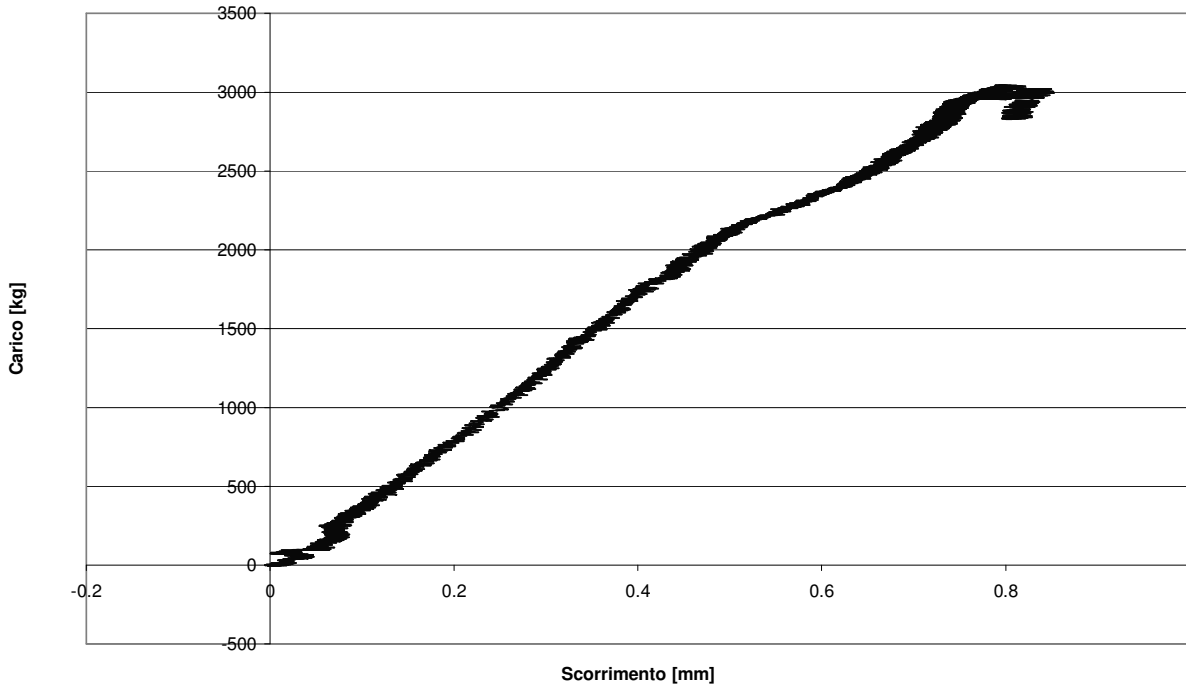
**Grafico Carico - Spostamento**



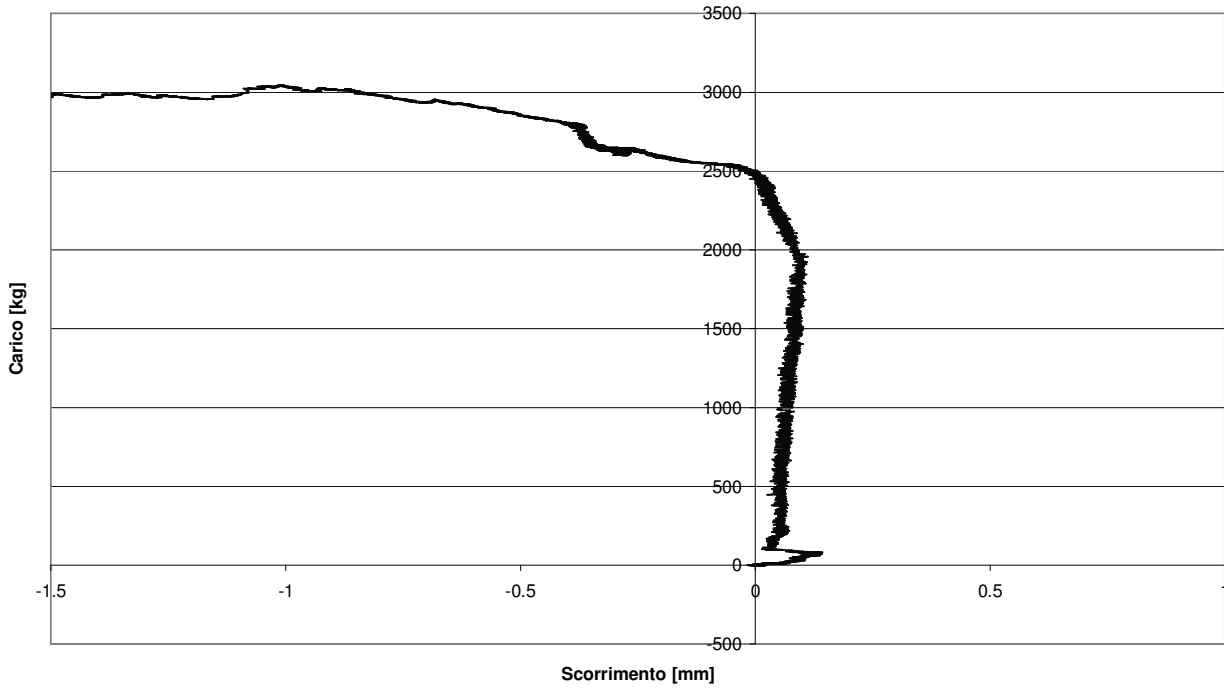
**Scorrimento barra - legno**



**Scorrimento barra - resina**

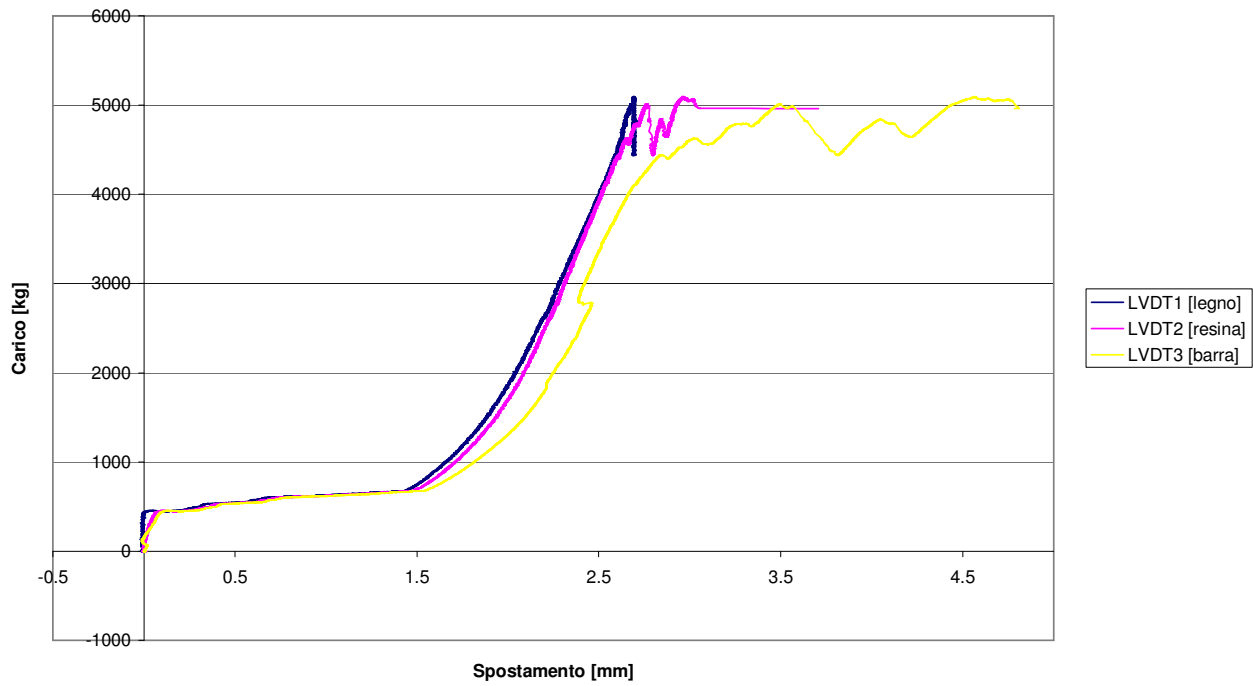


**Scorrimento resina - legno**

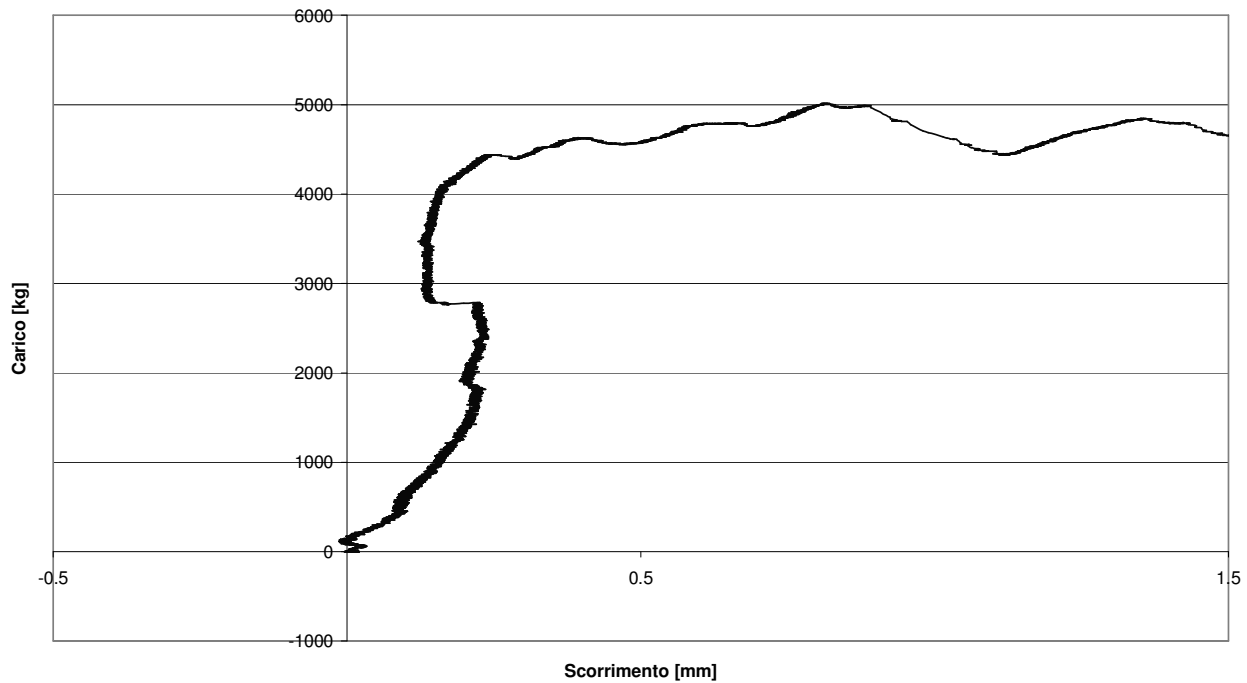


Provino 6 (parte sinistra)

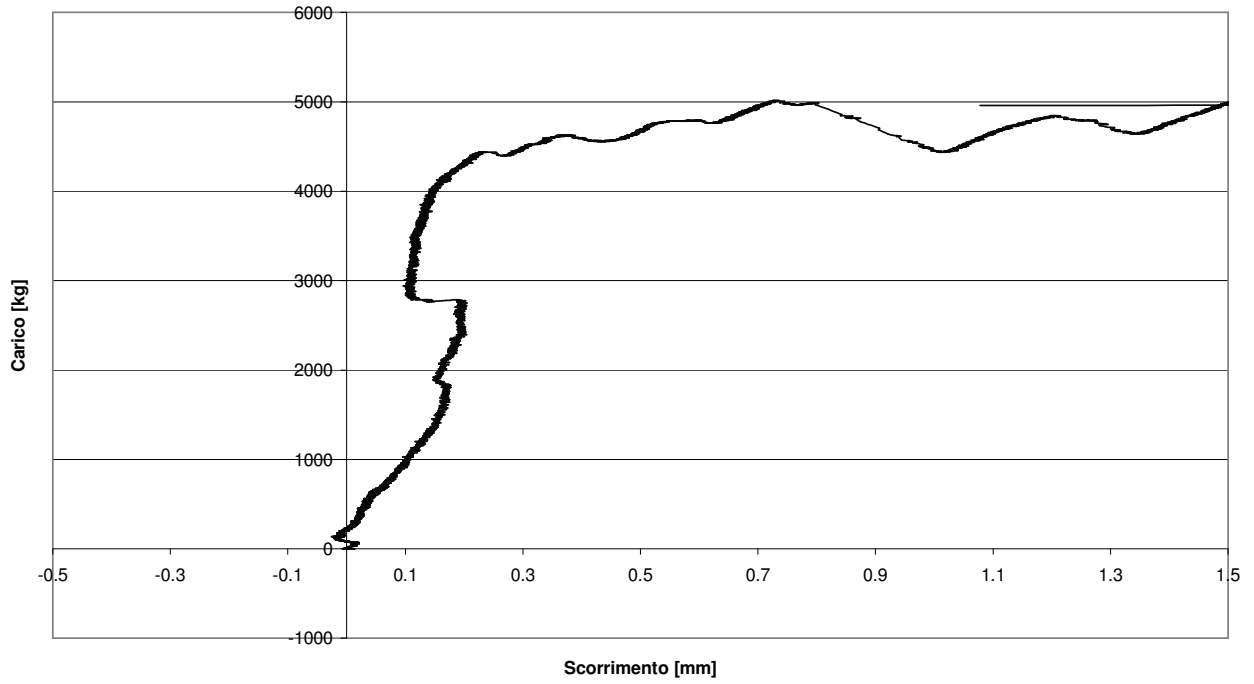
Grafico Carico - Spostamento



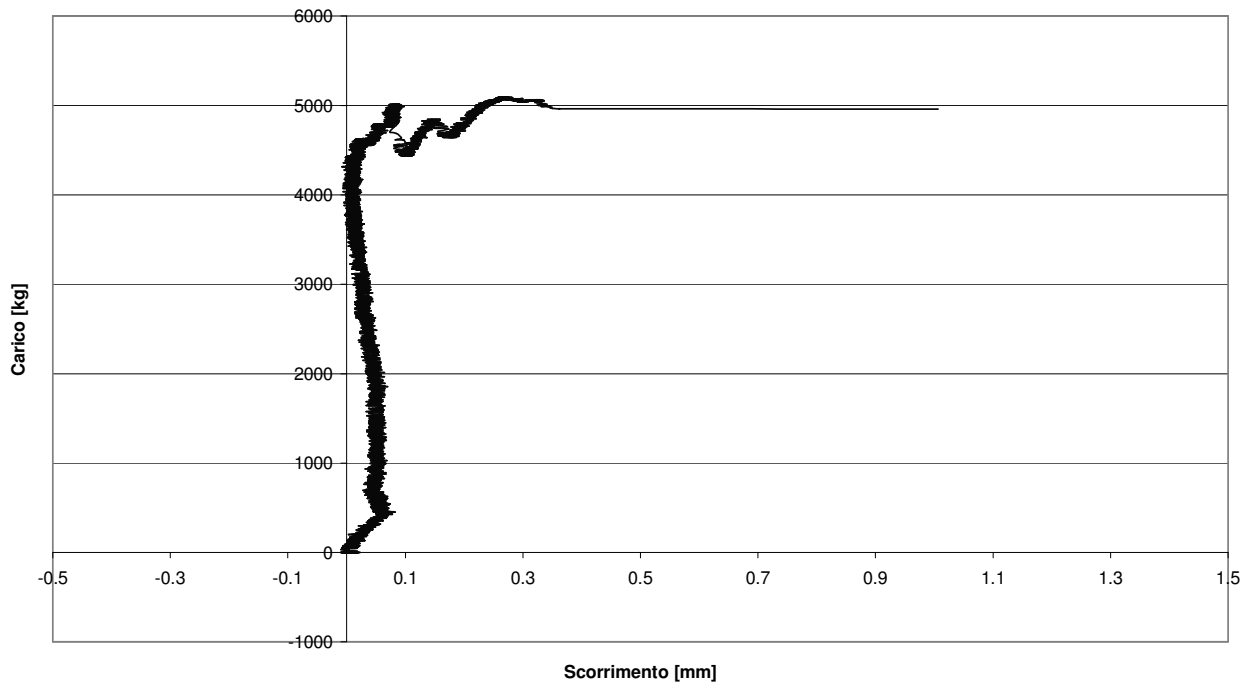
Scorrimento barra - legno



**Scorrimento barra - resina**



**Scorrimento resina - legno**

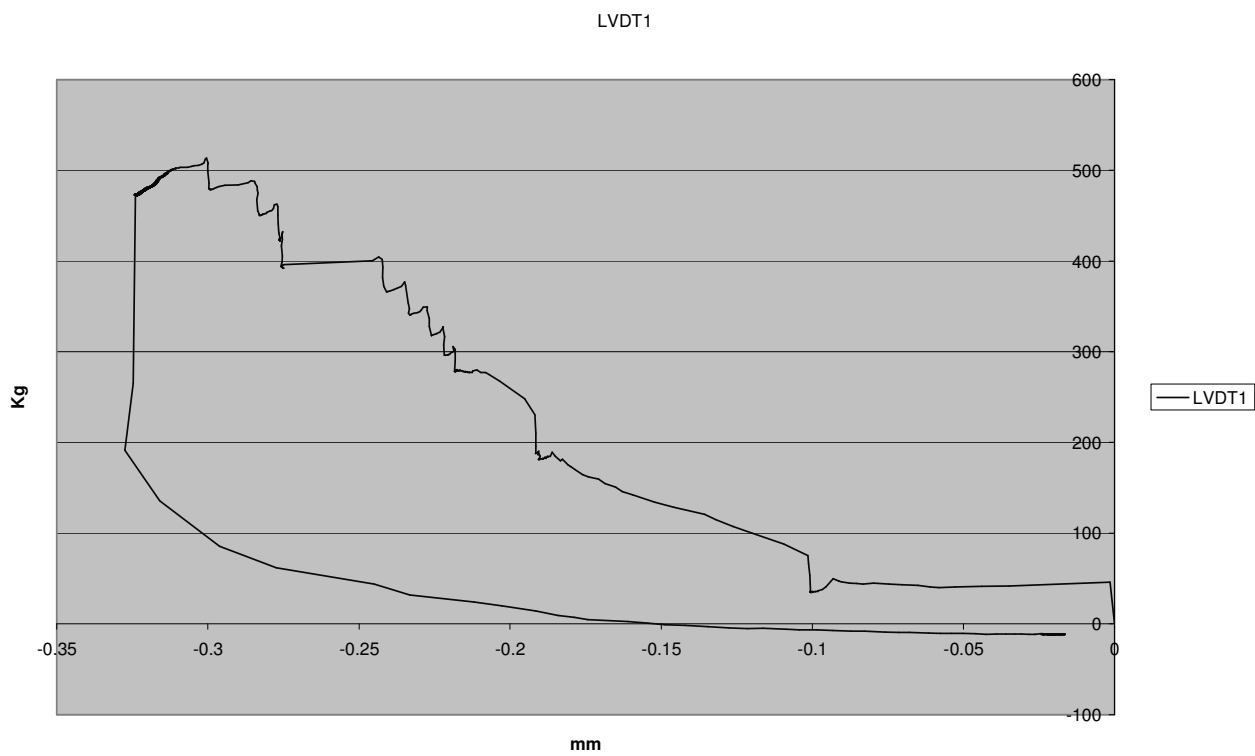




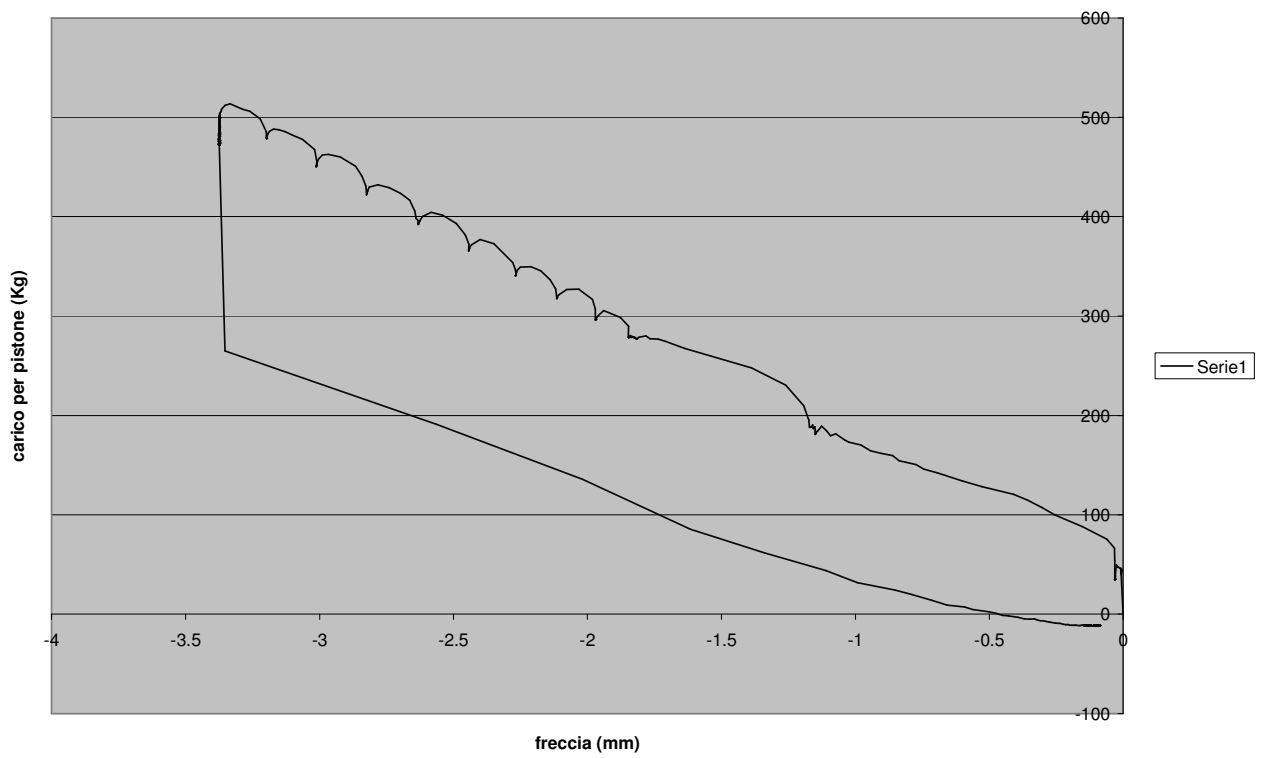
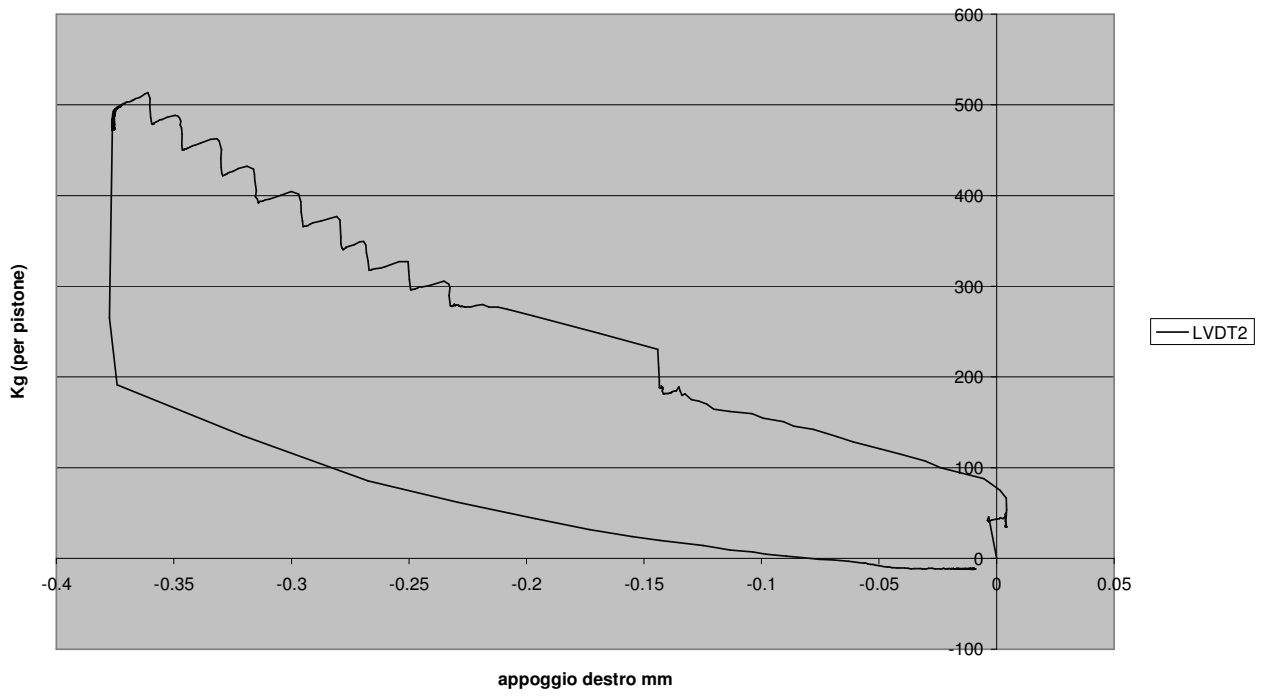
Appendice B - Grafici carico-spostamento e carico-deformazione riguardo alle prove di flessione sulle travi rinforzate

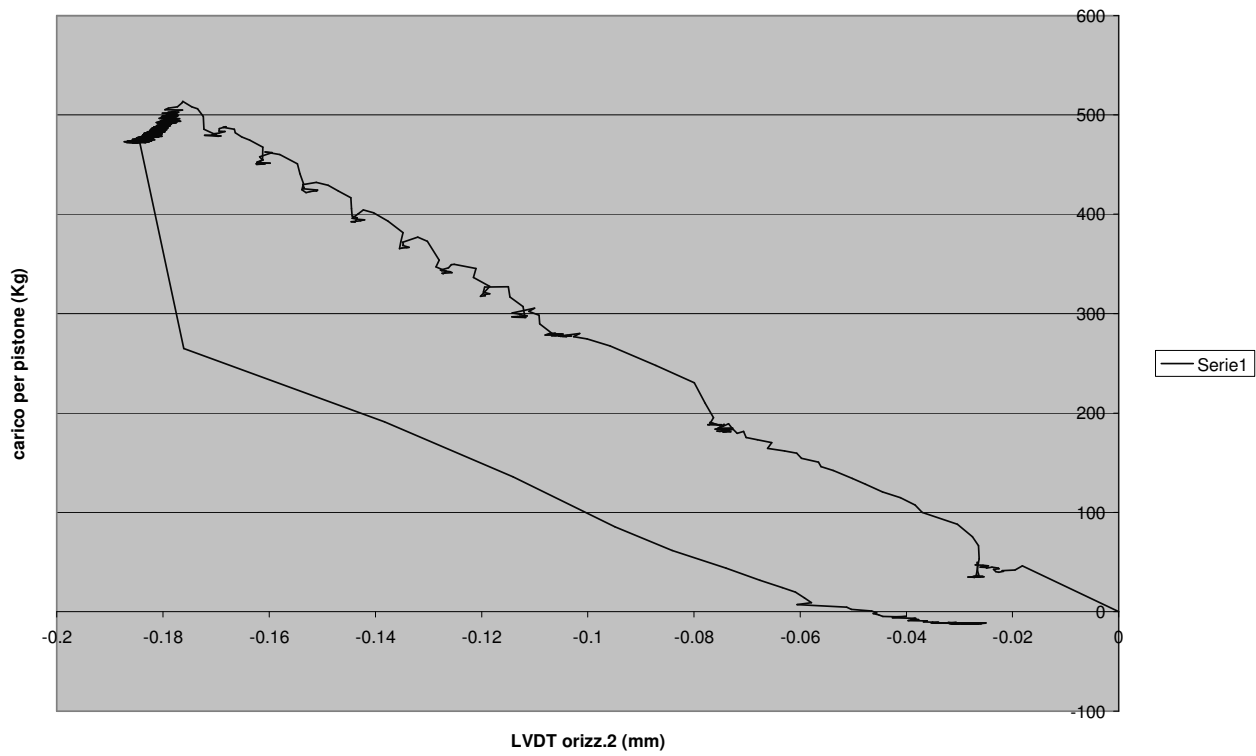
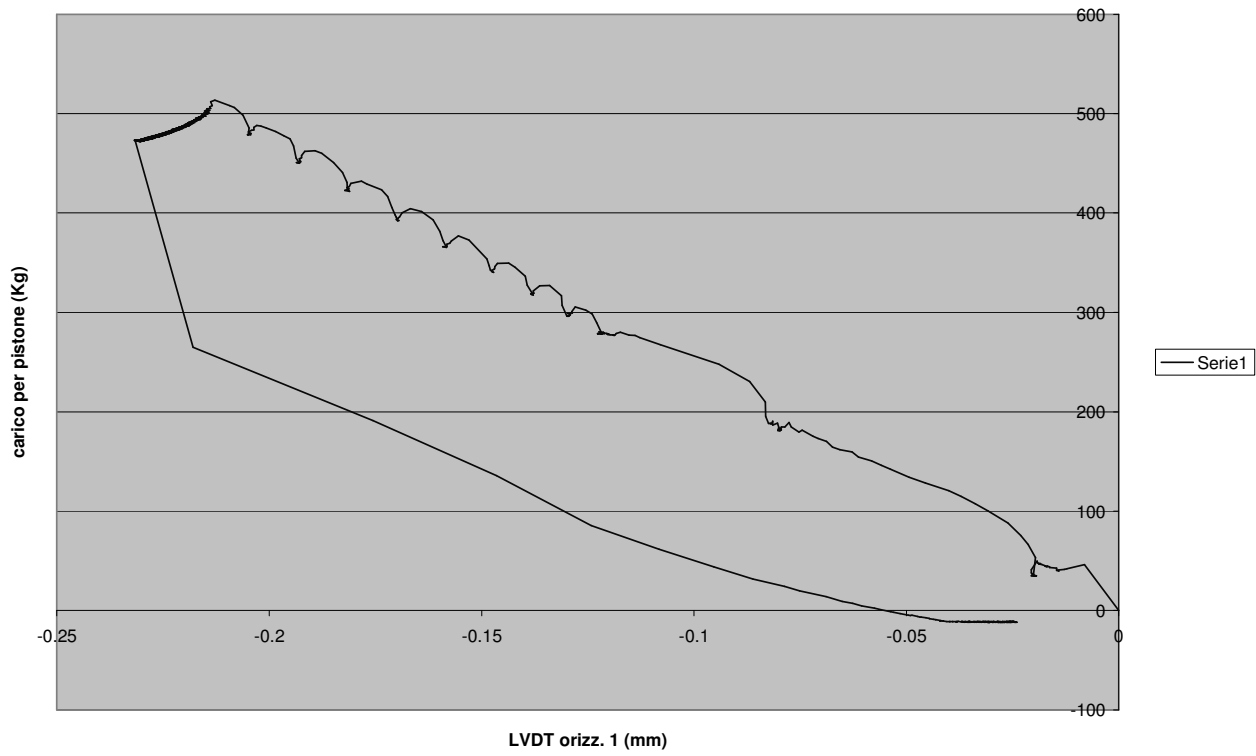
Prova di flessione a quattro punti su una trave rinforzata con barre in fibra di carbonio.

Primo ciclo (0 - 500 Kg).

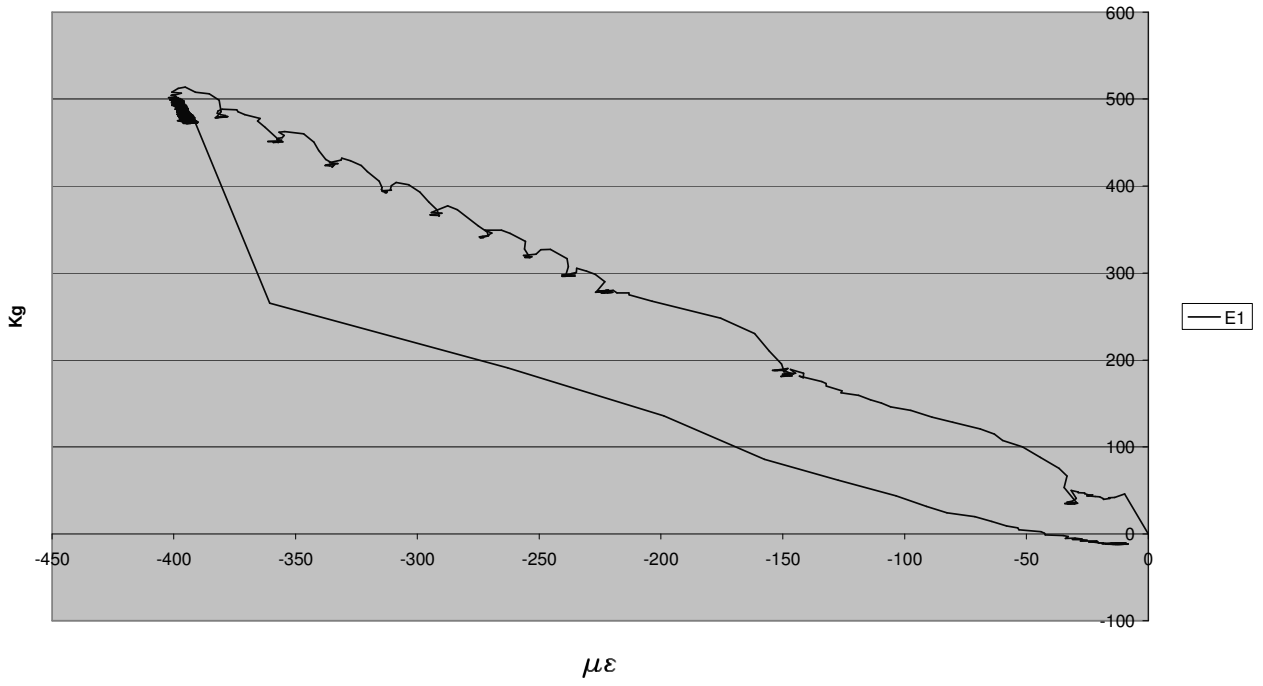


LVDT2

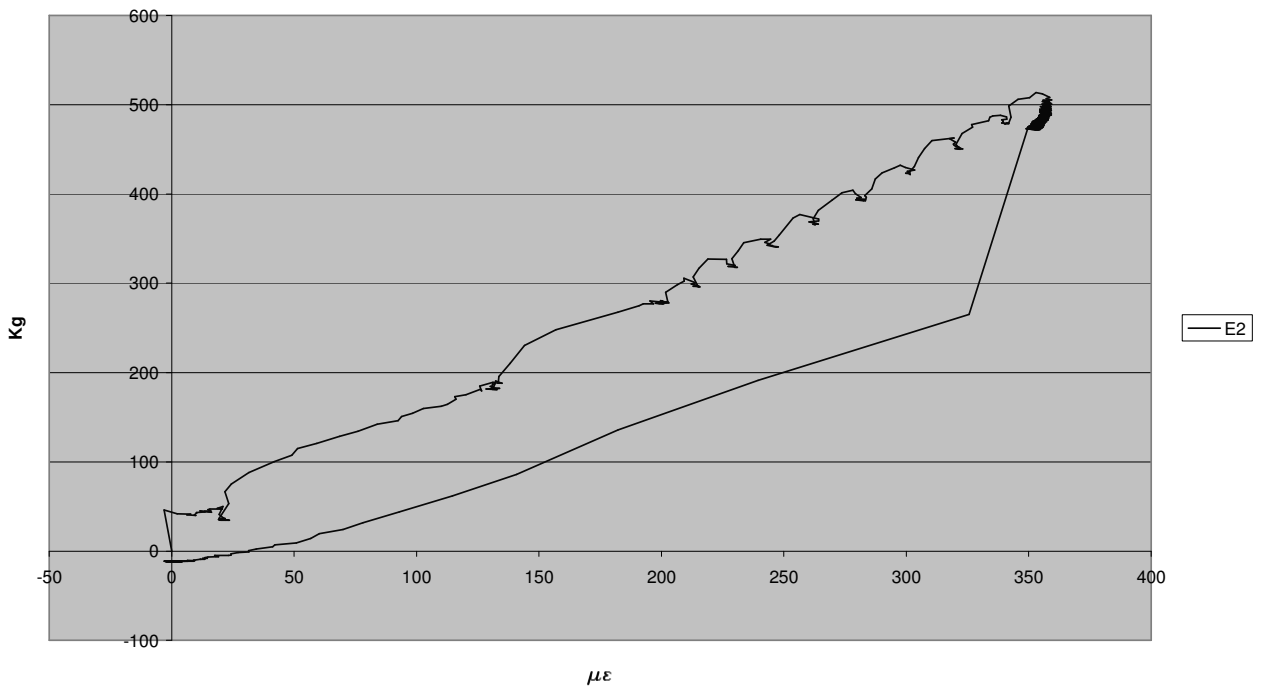




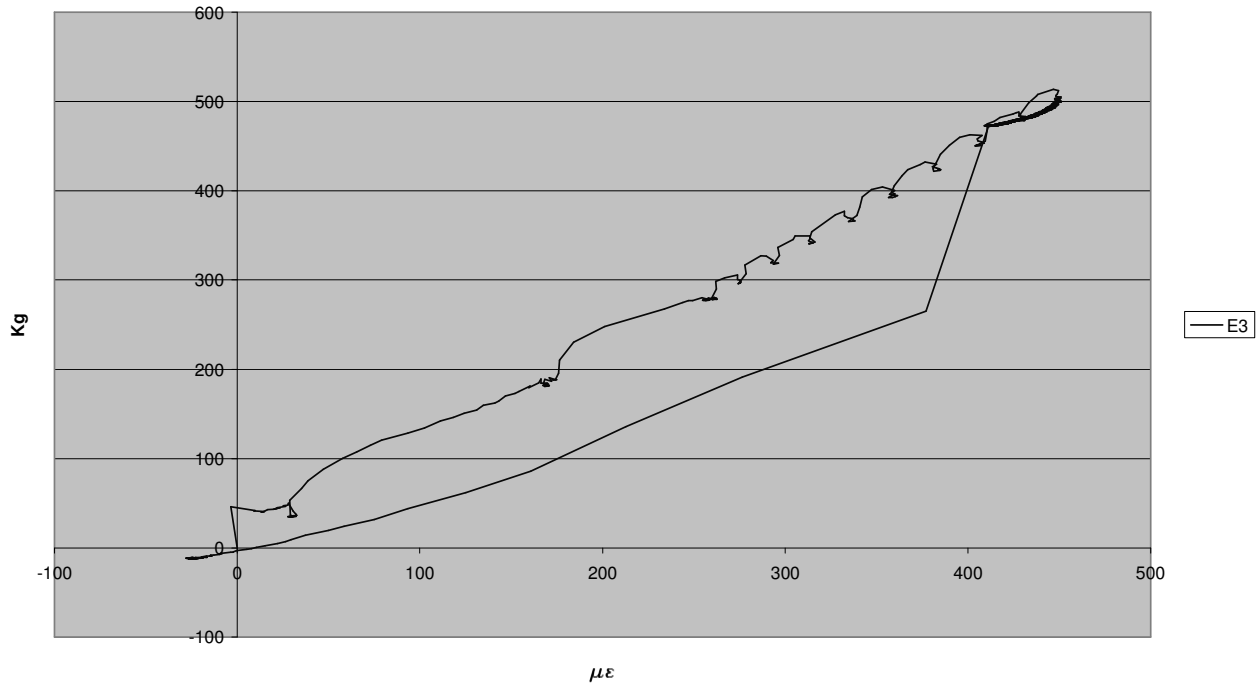
E1



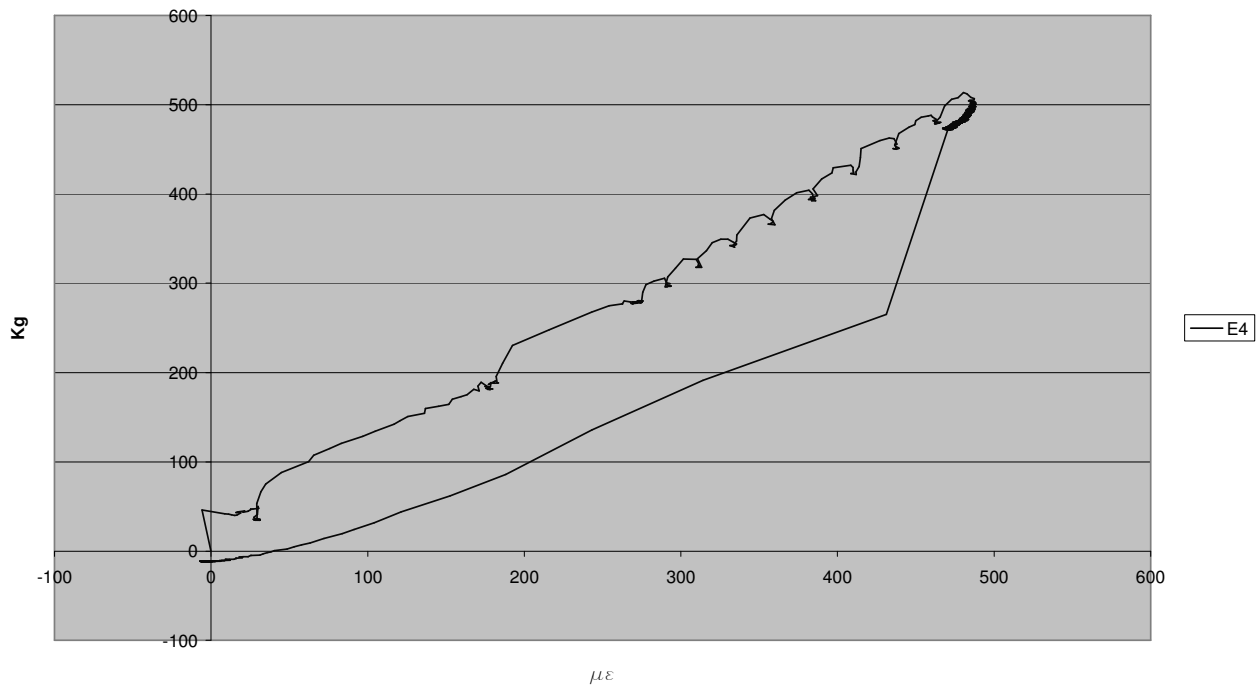
E2



E3

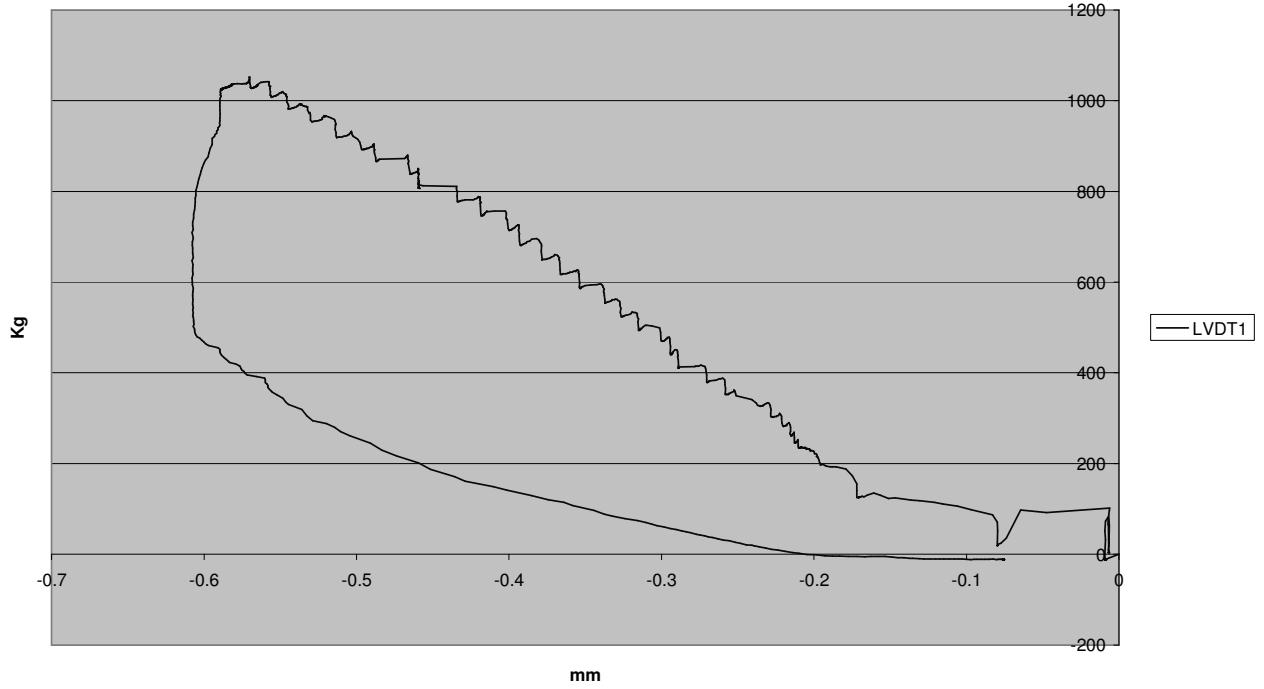


E4

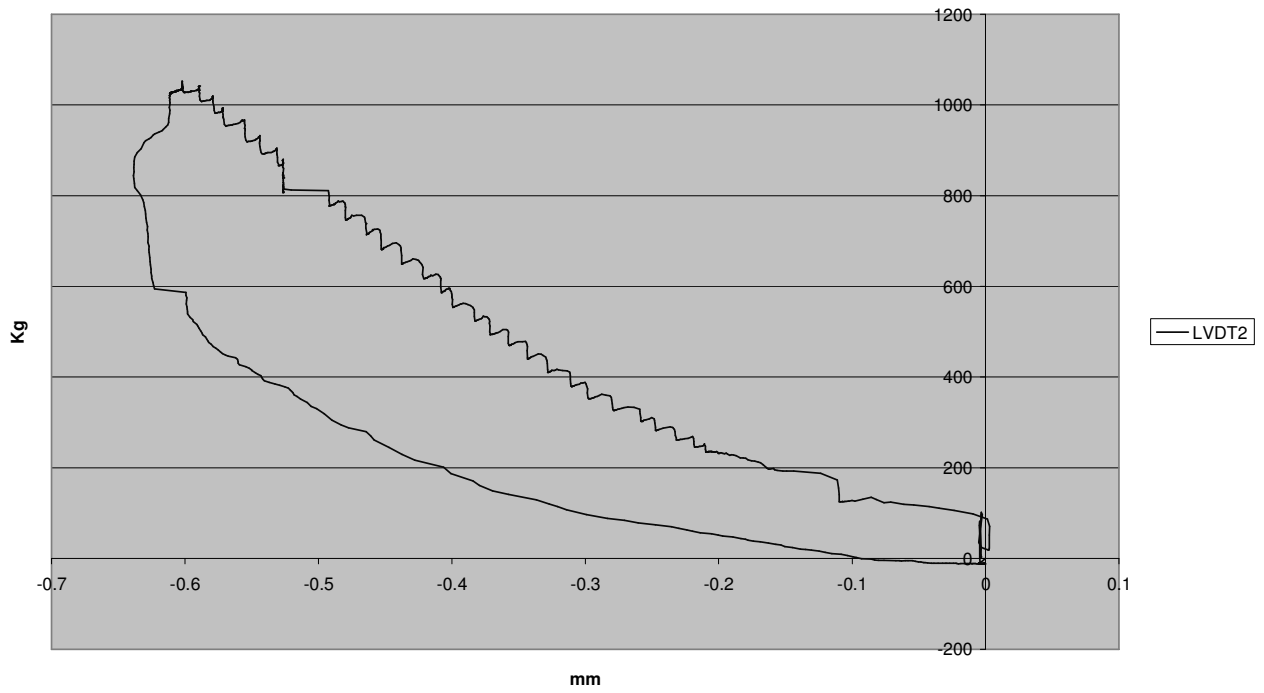


Secondo ciclo (0 - 1000 Kg).

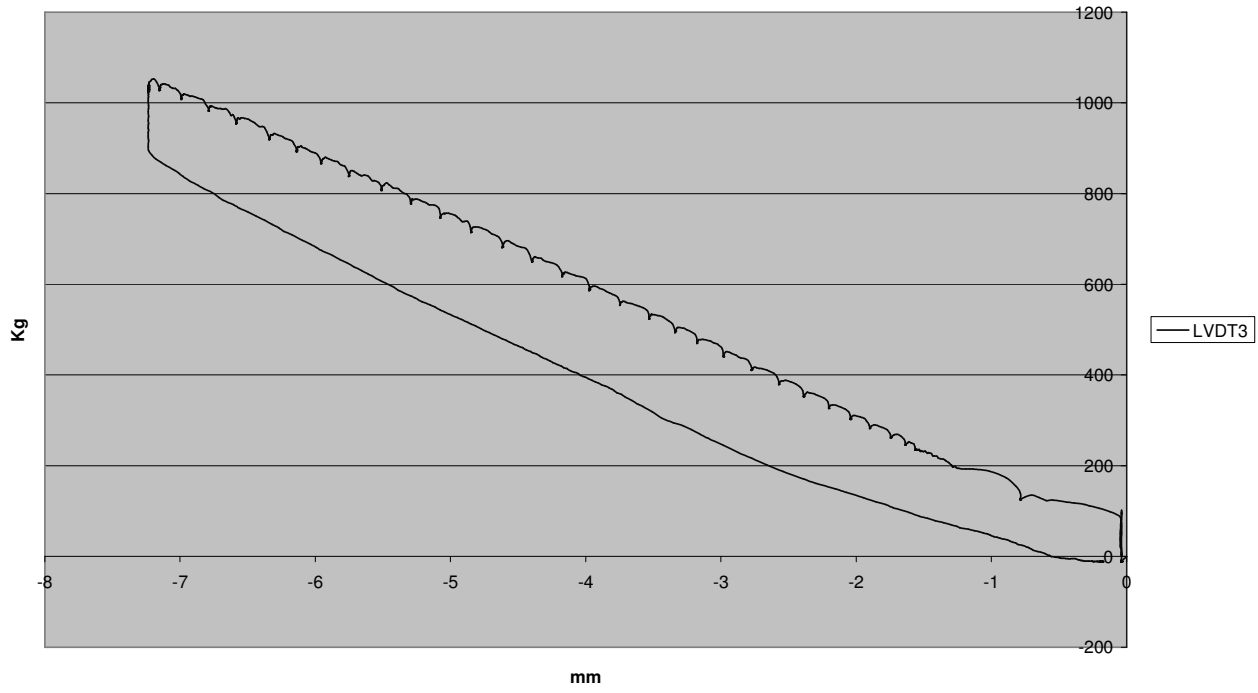
LVDT1



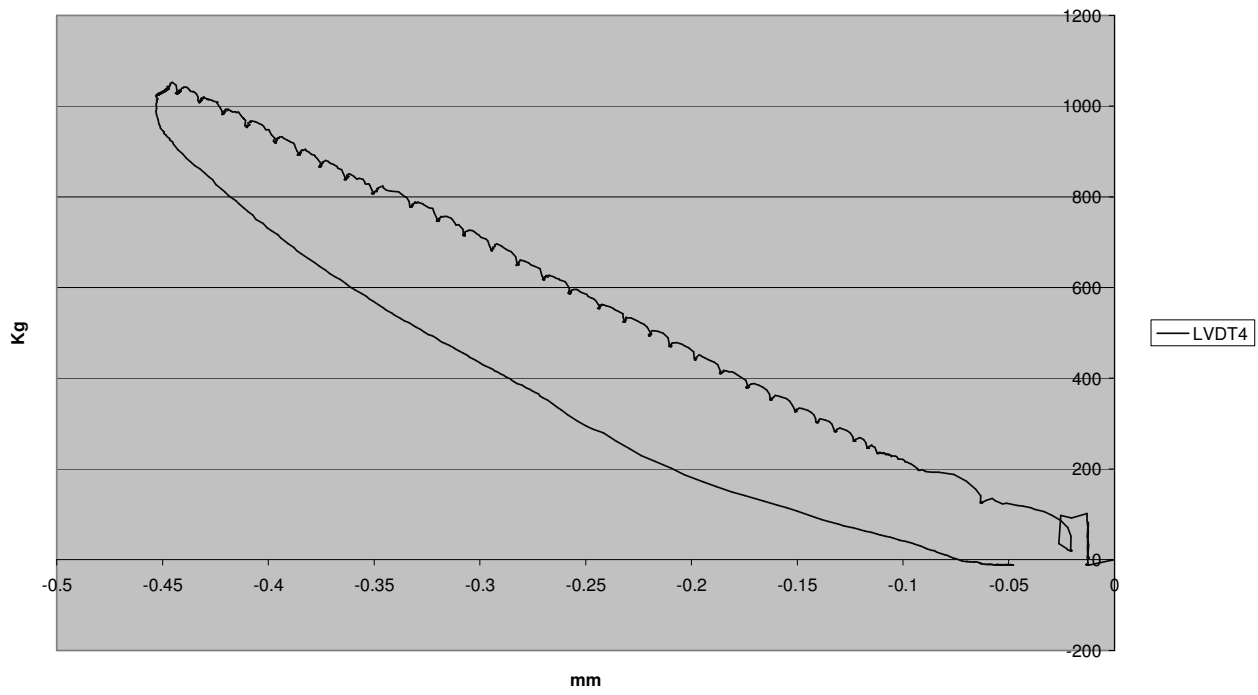
LVDT2



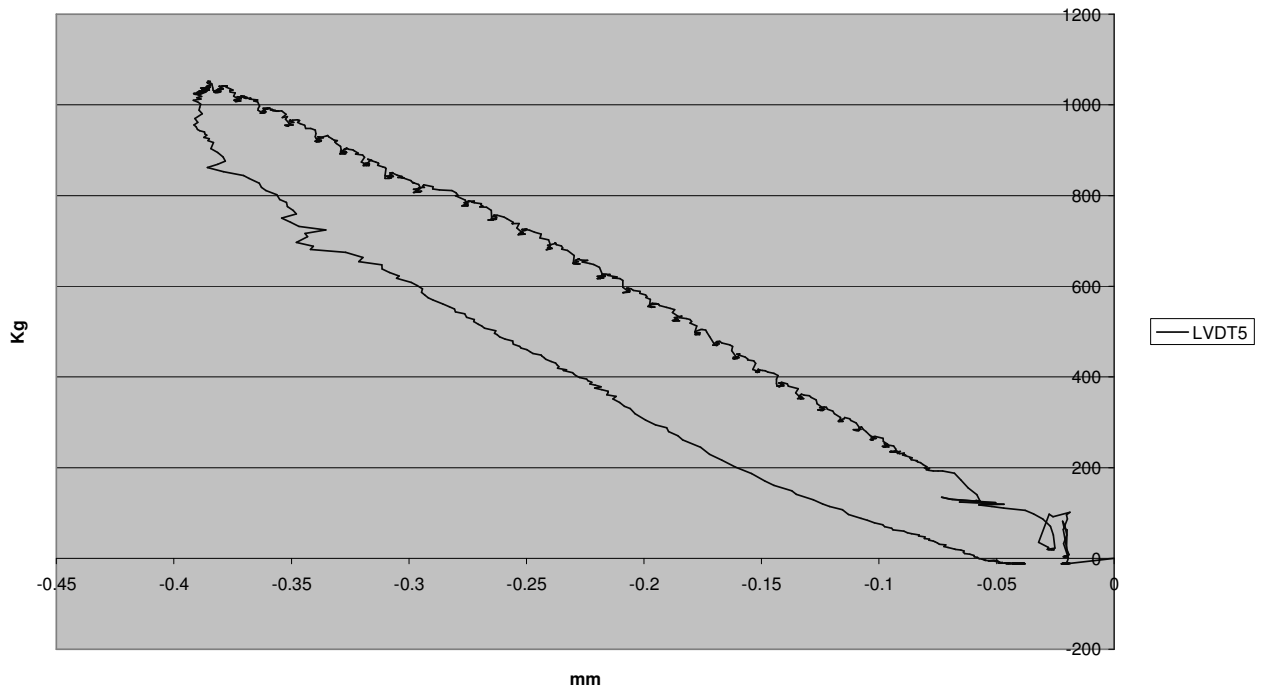
LVDT3



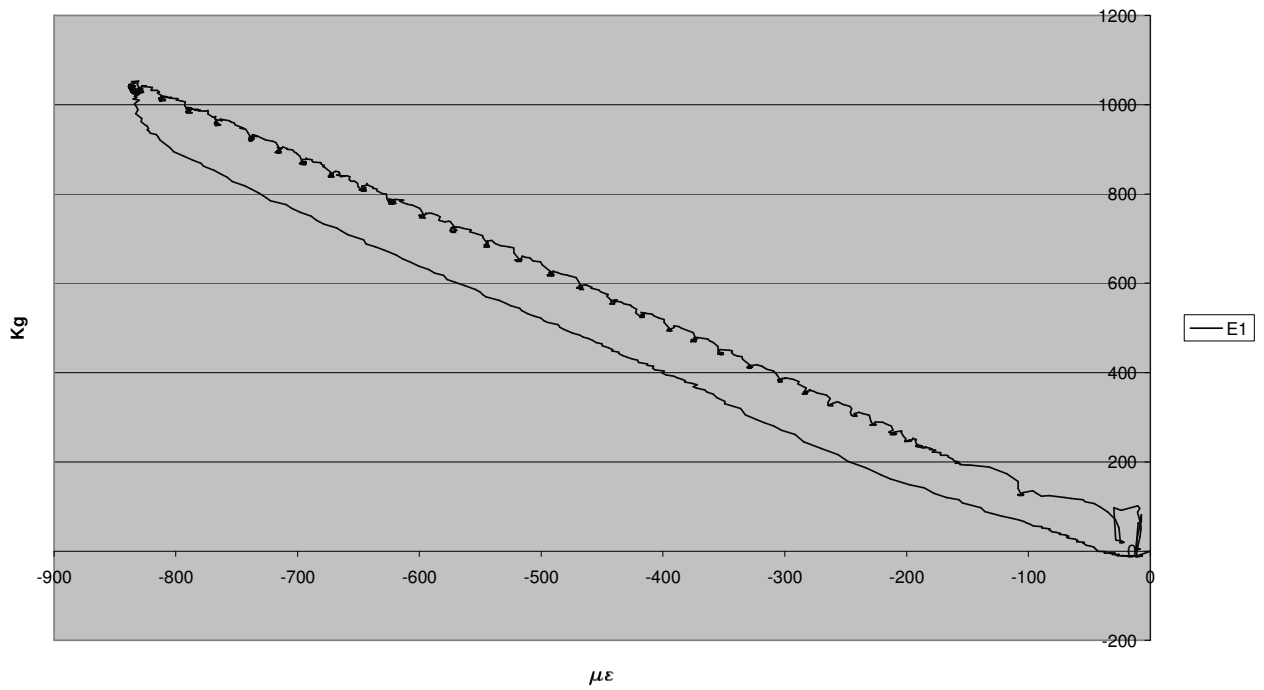
LVDT4



LVDT5

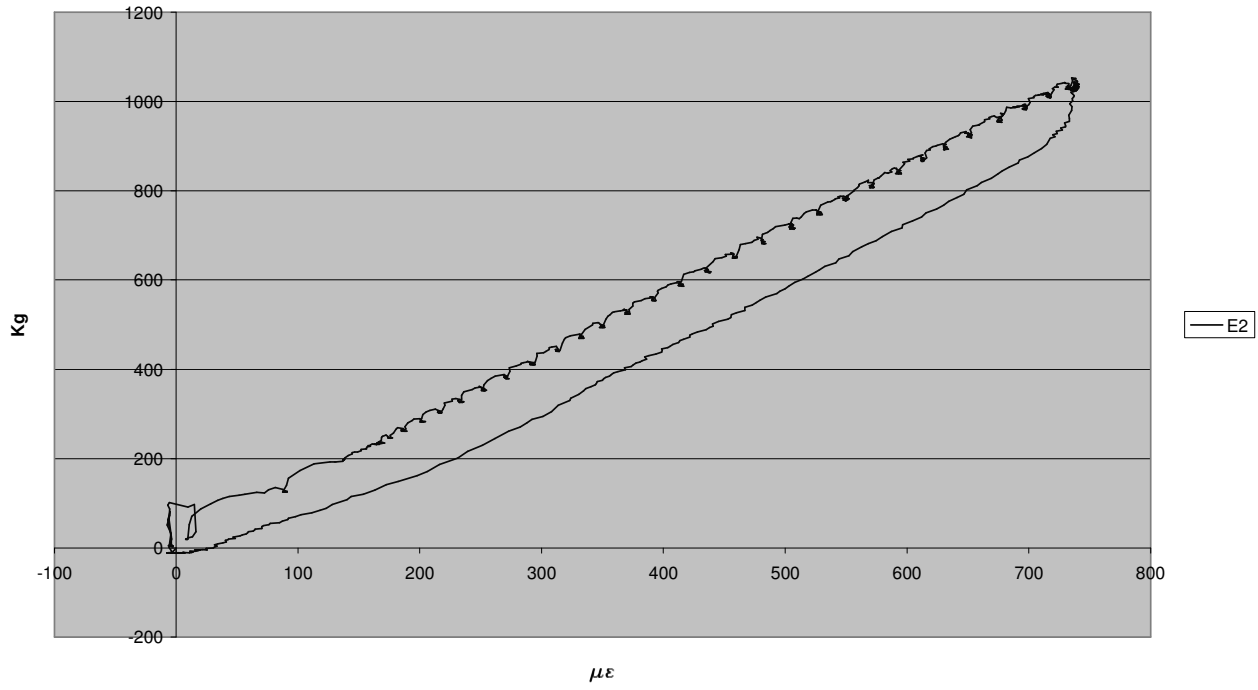


E1

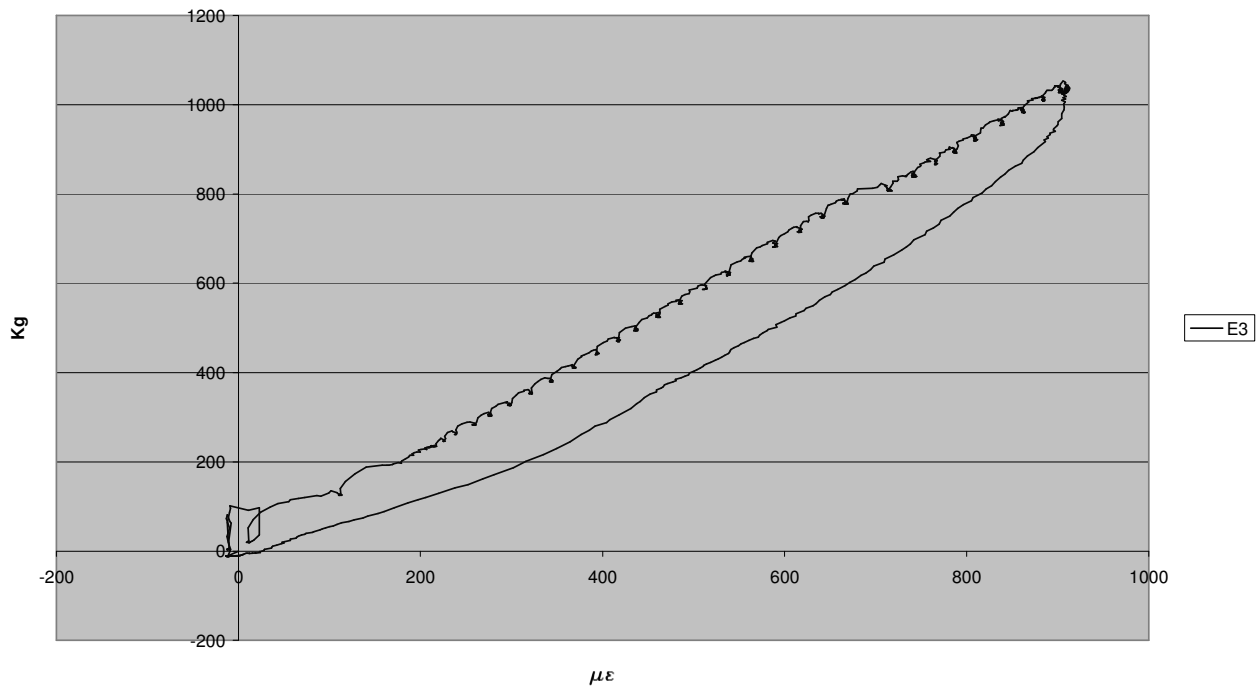




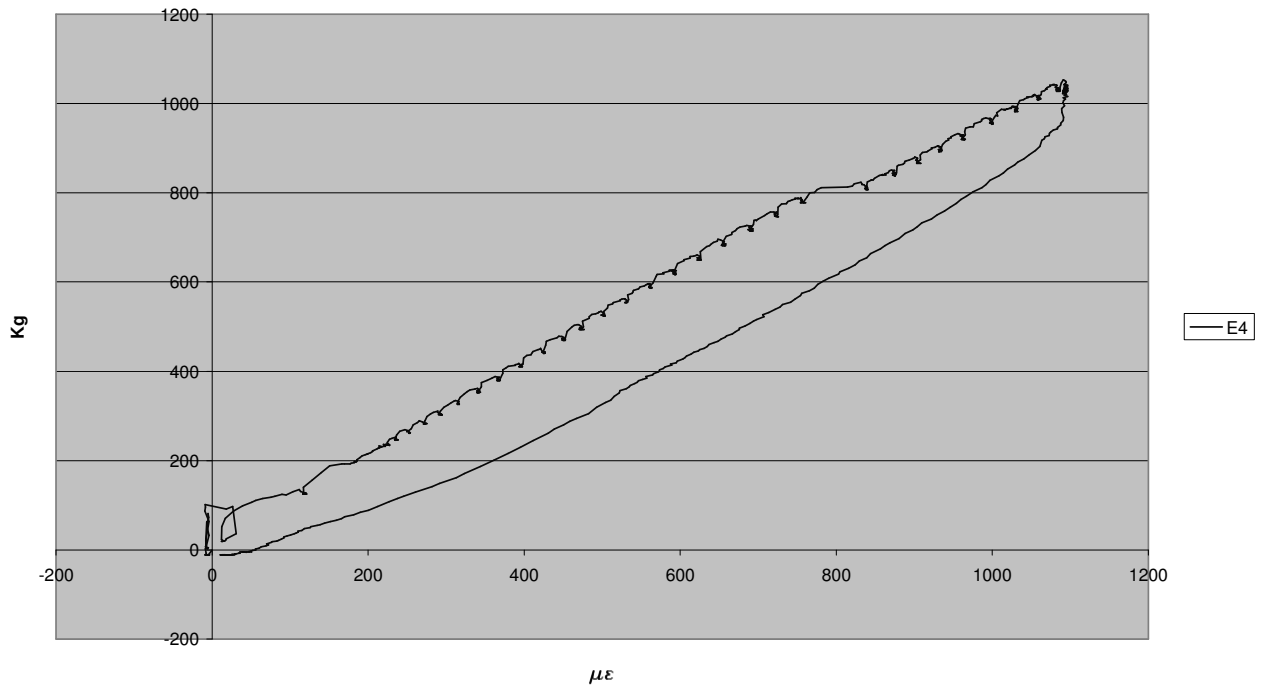
E2



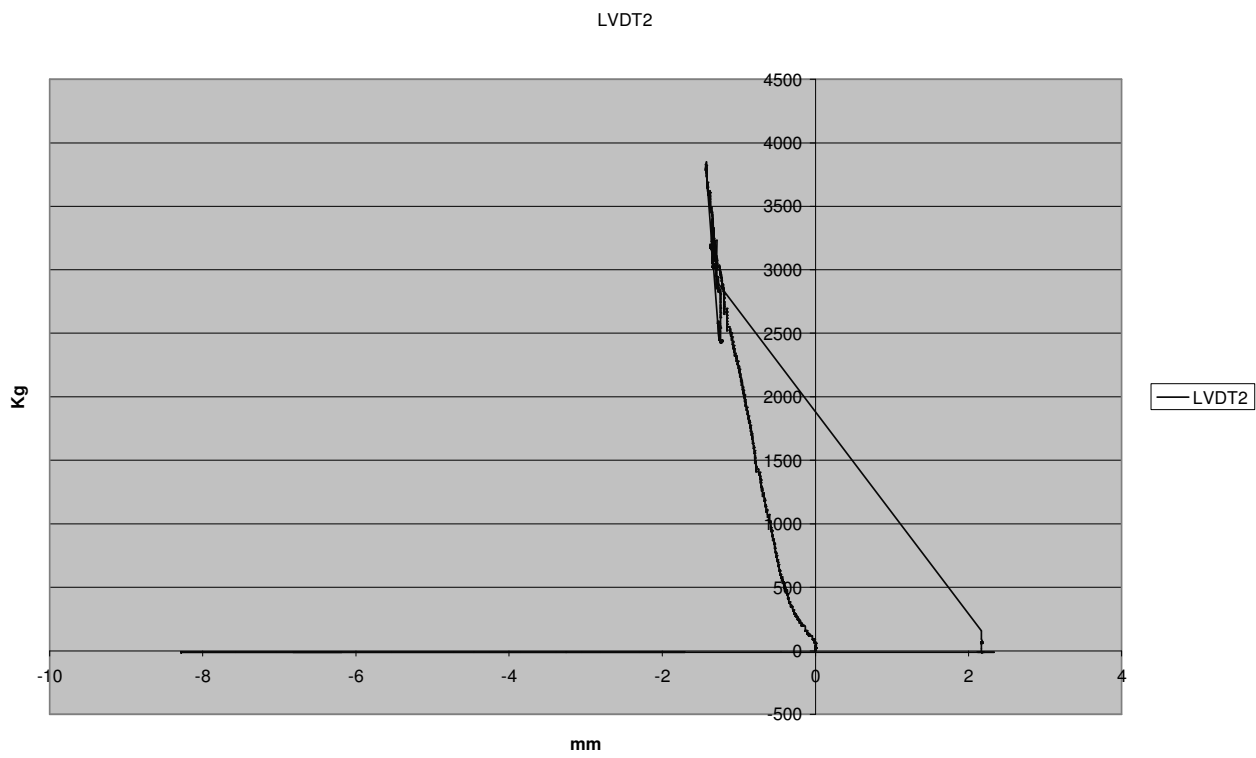
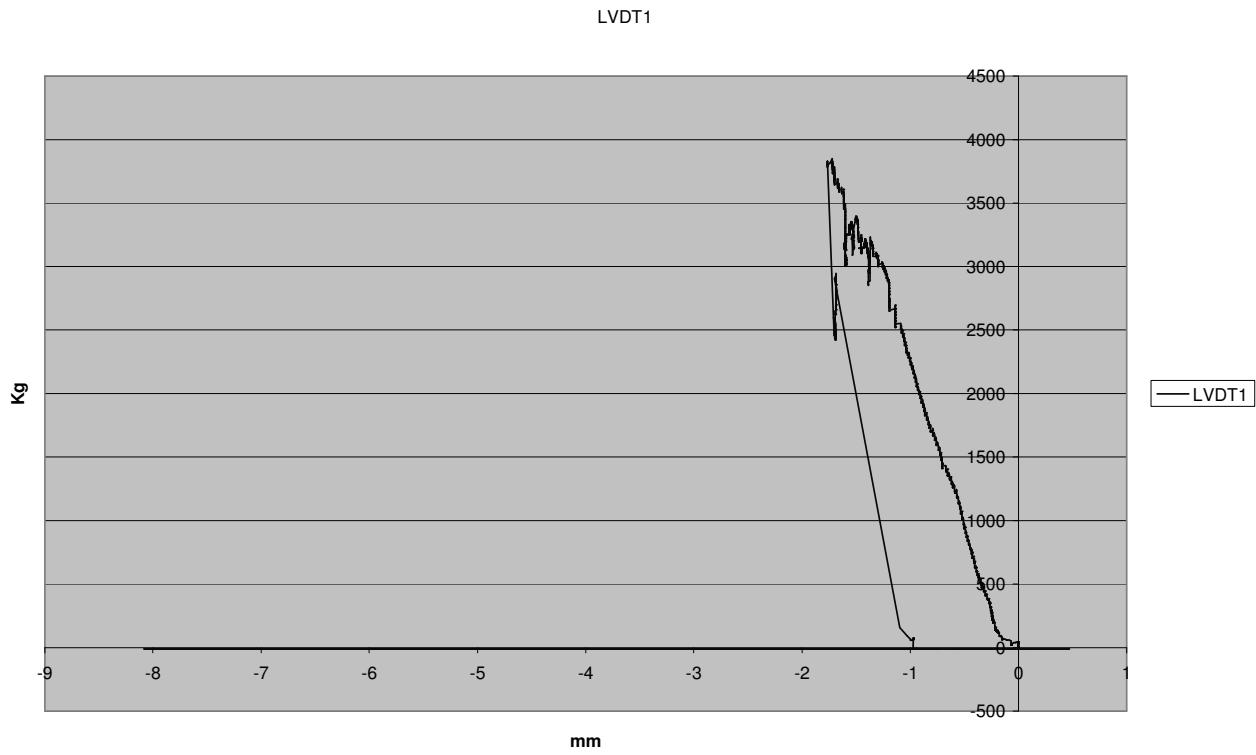
E3



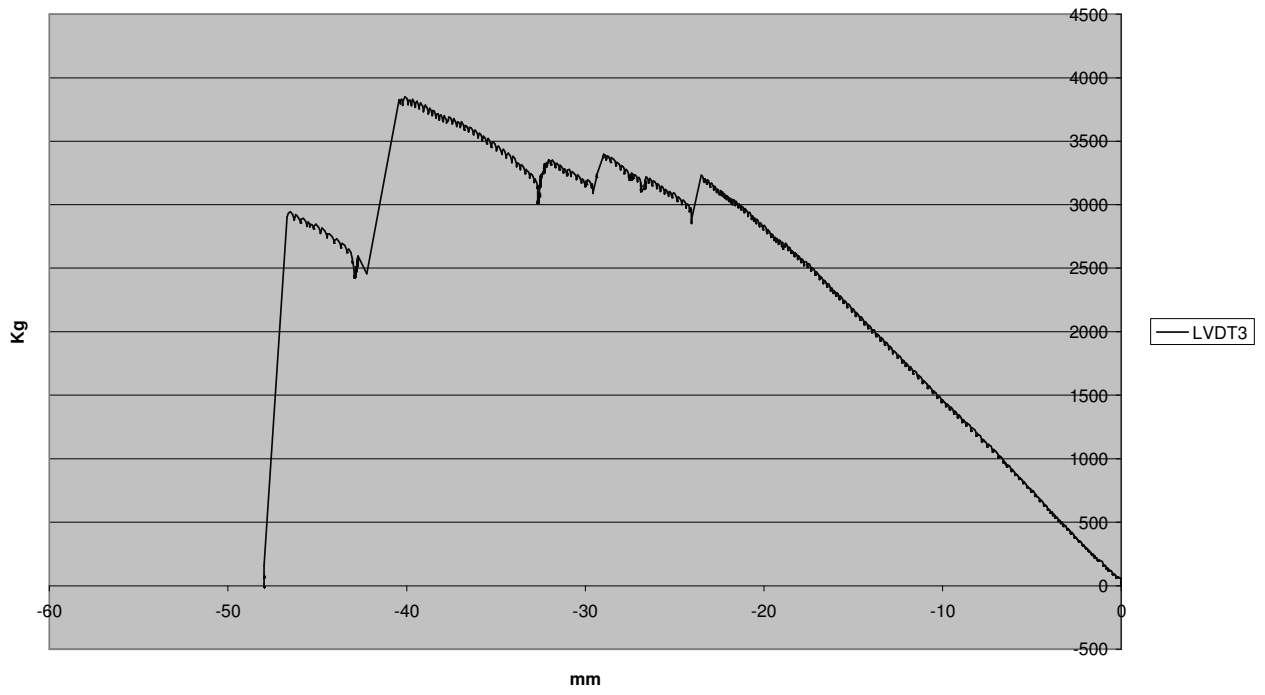
E4



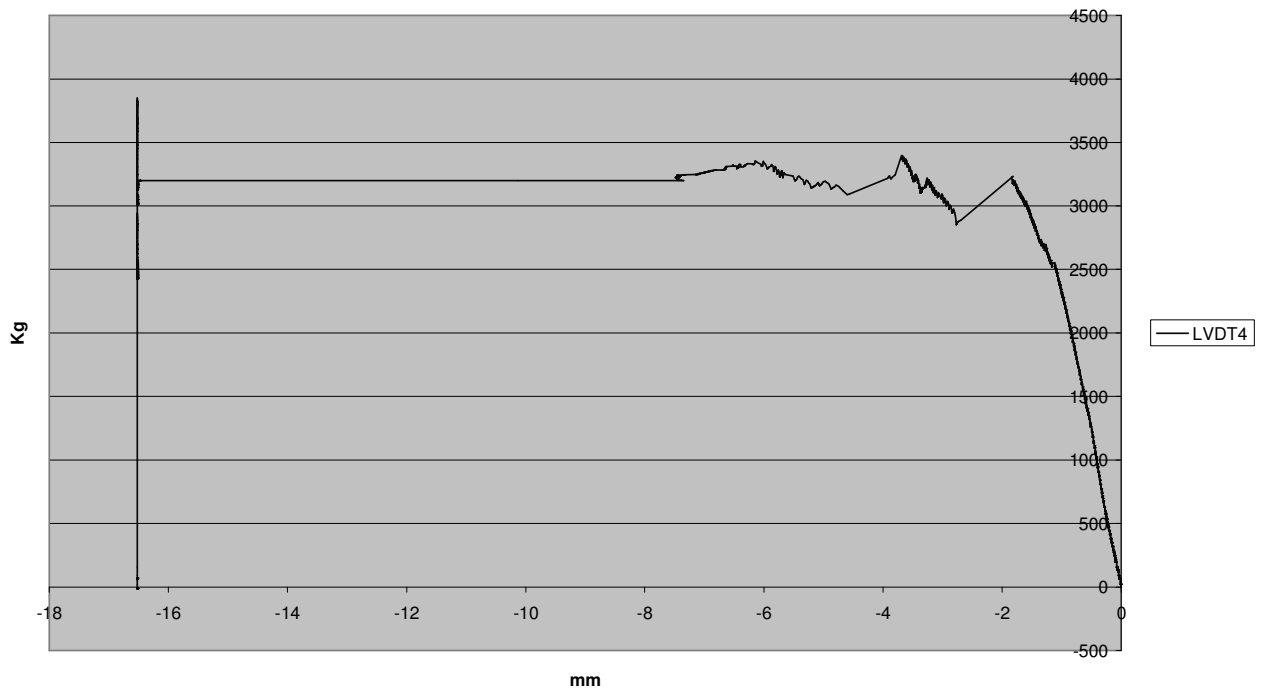
Terzo ciclo (0 - 3800 Kg).

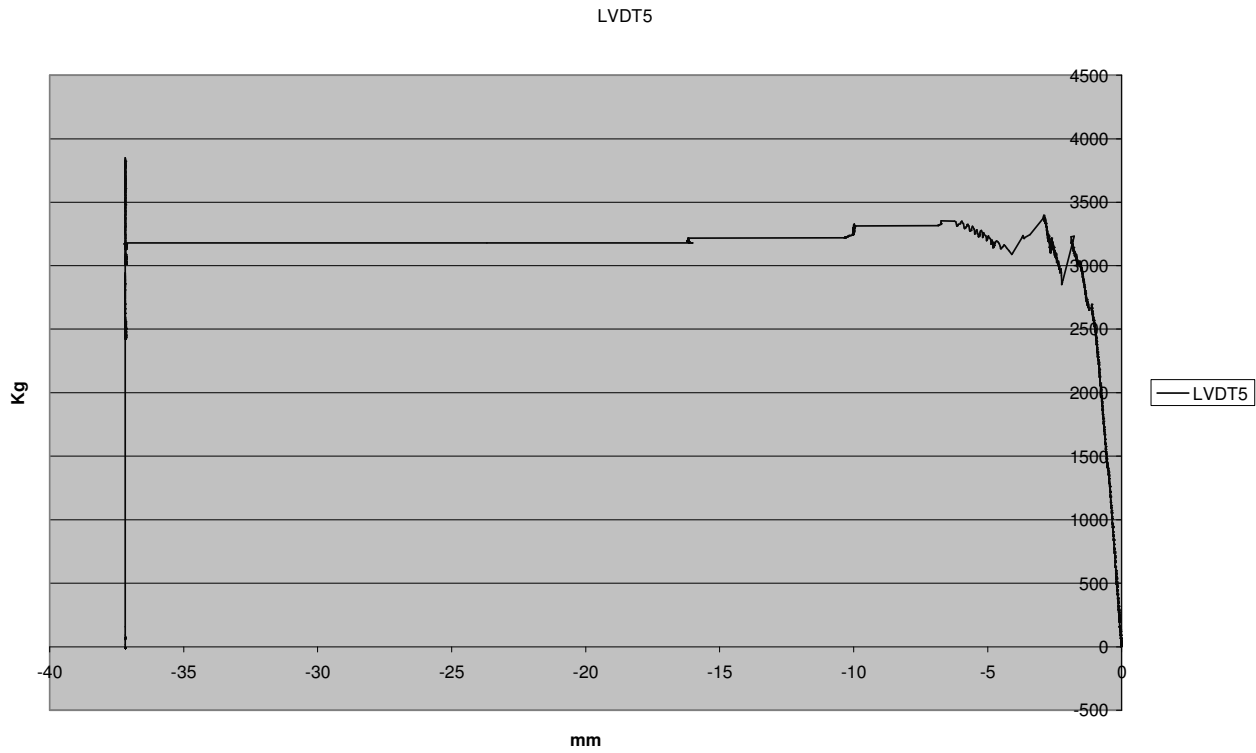


LVDT3

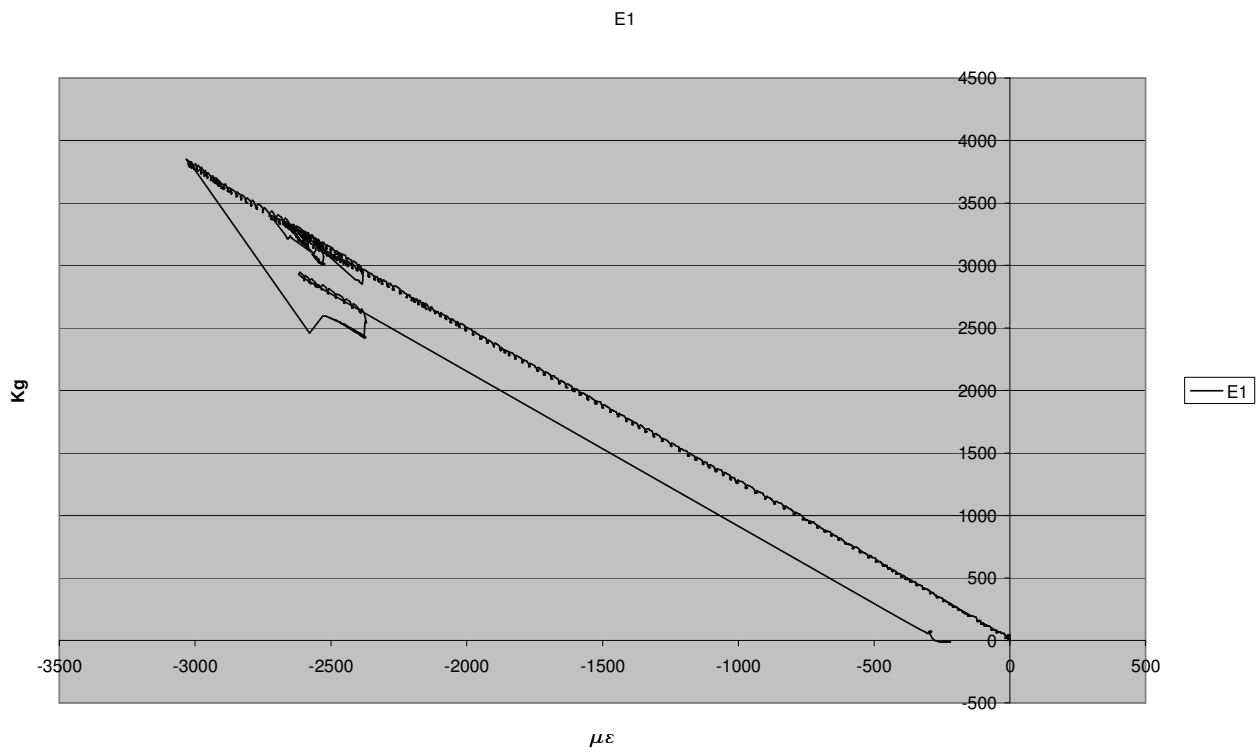


LVDT4

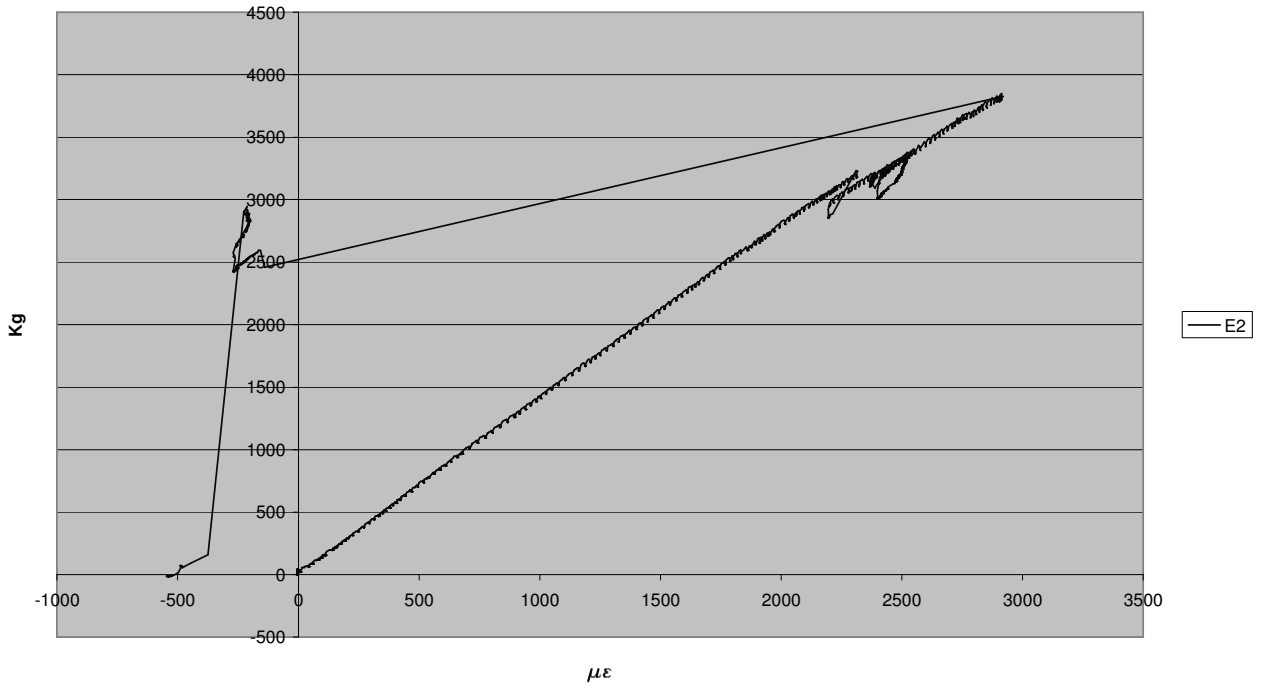




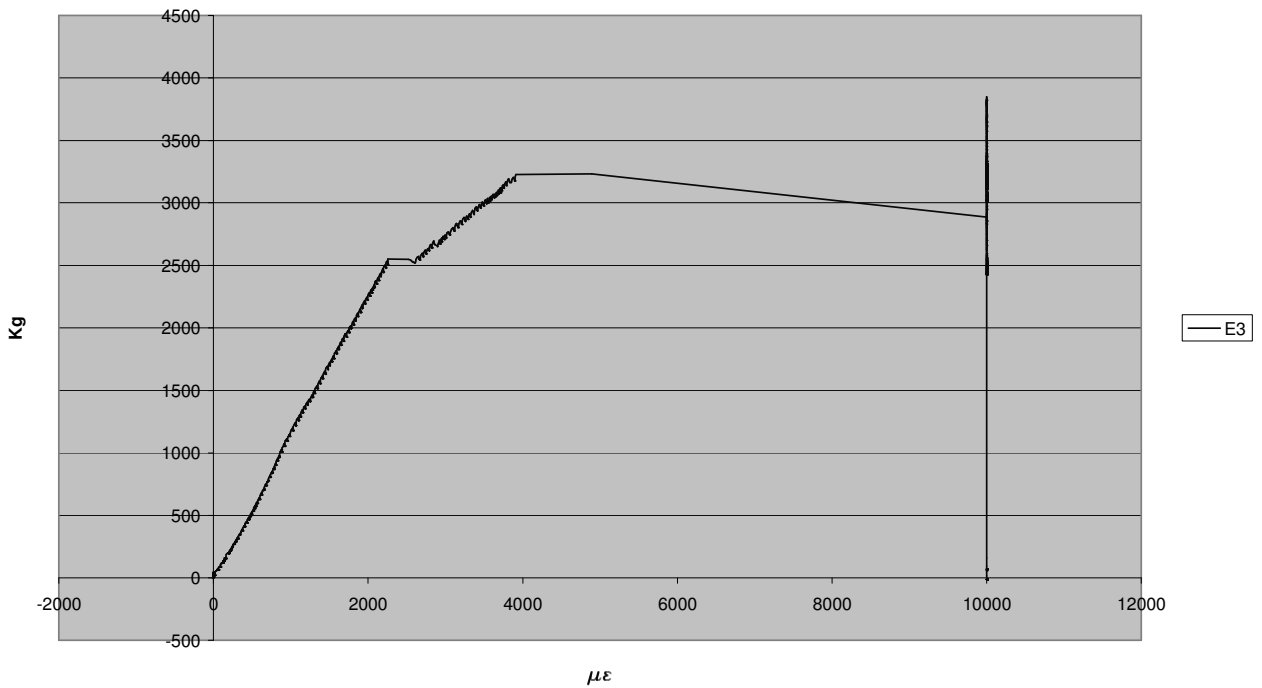
N.B.: Per evitare danni agli LVDT4 e LVDT5 questi sono stati rimossi dalla struttura poco prima del carico di collasso.



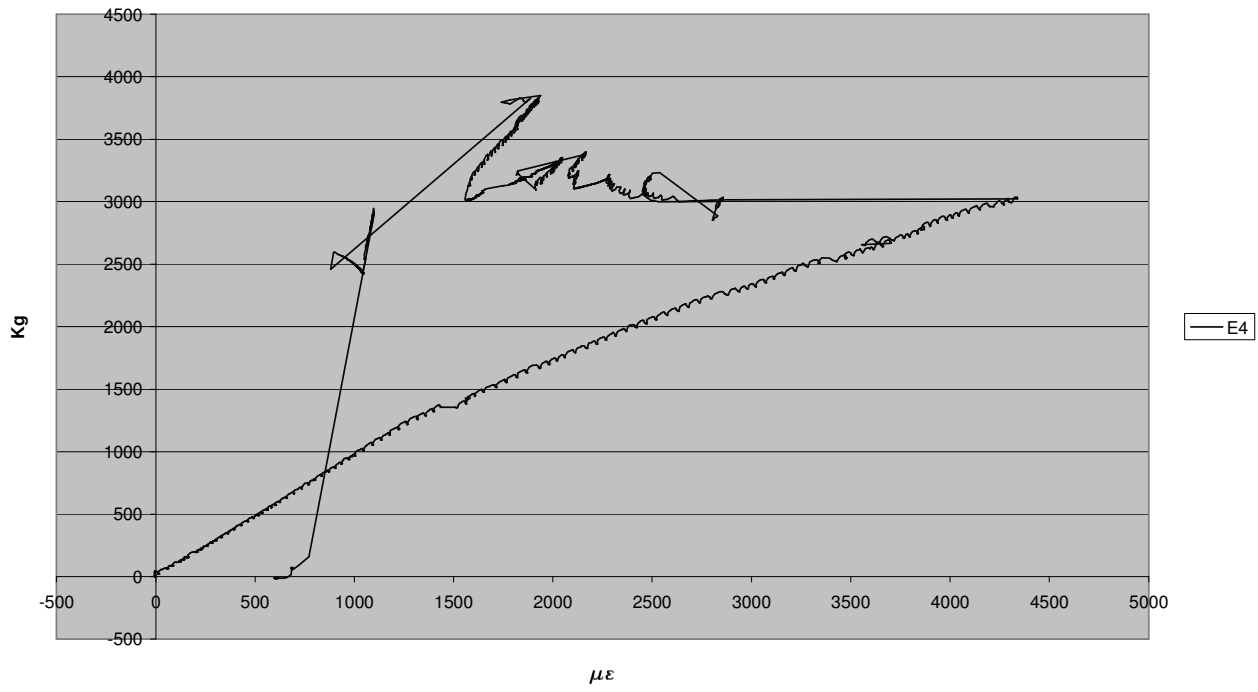
E2



E3

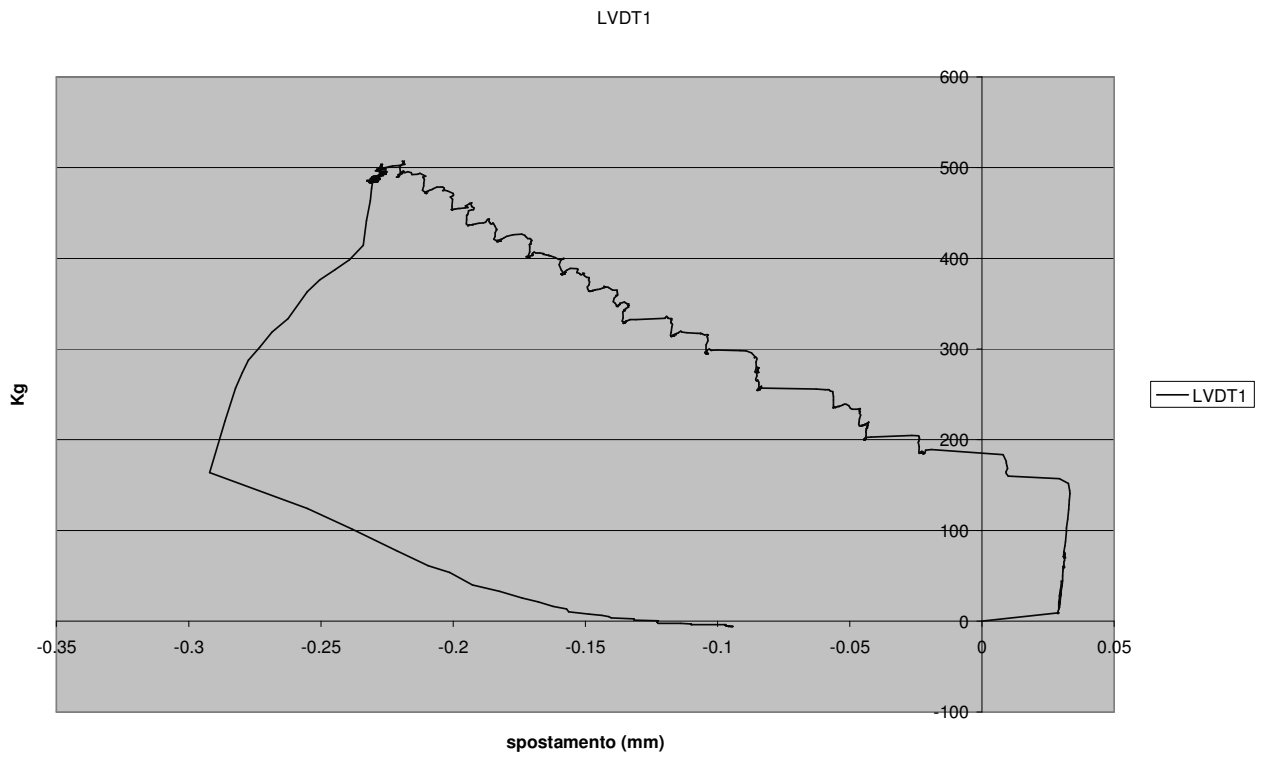


E4



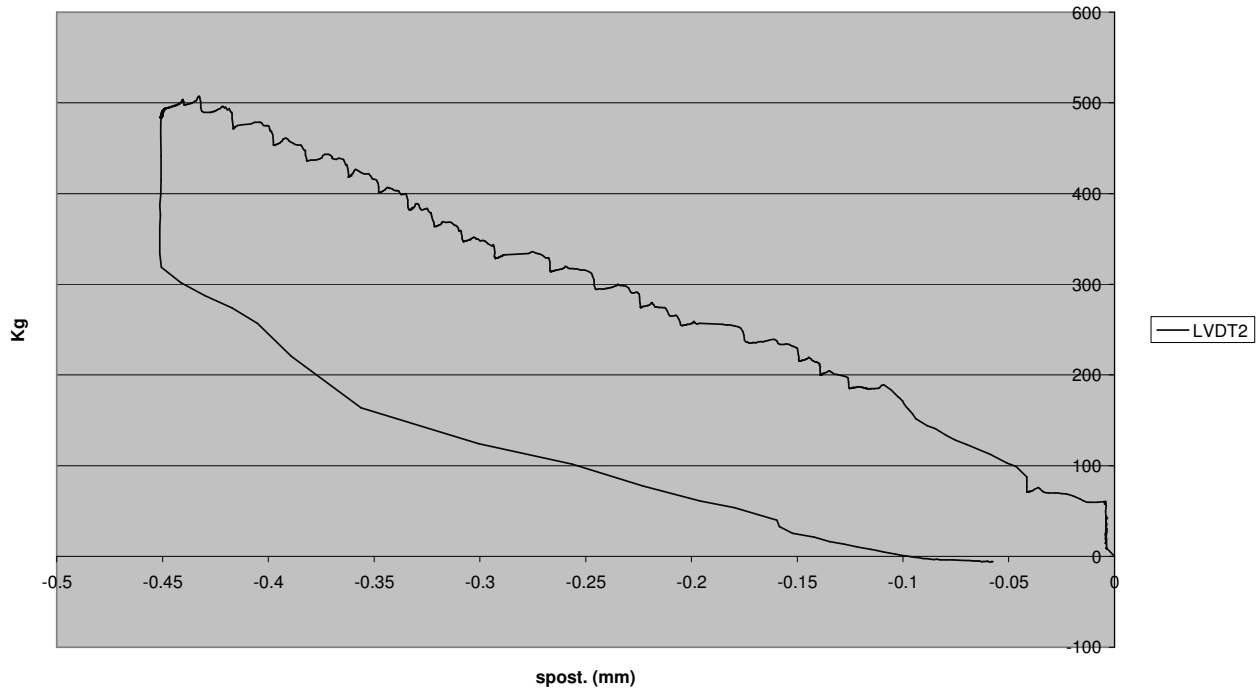
Prova di flessione a quattro punti su una trave rinforzata con barre in fibra sciolta di canapa.

Primo ciclo (0 - 500 Kg).

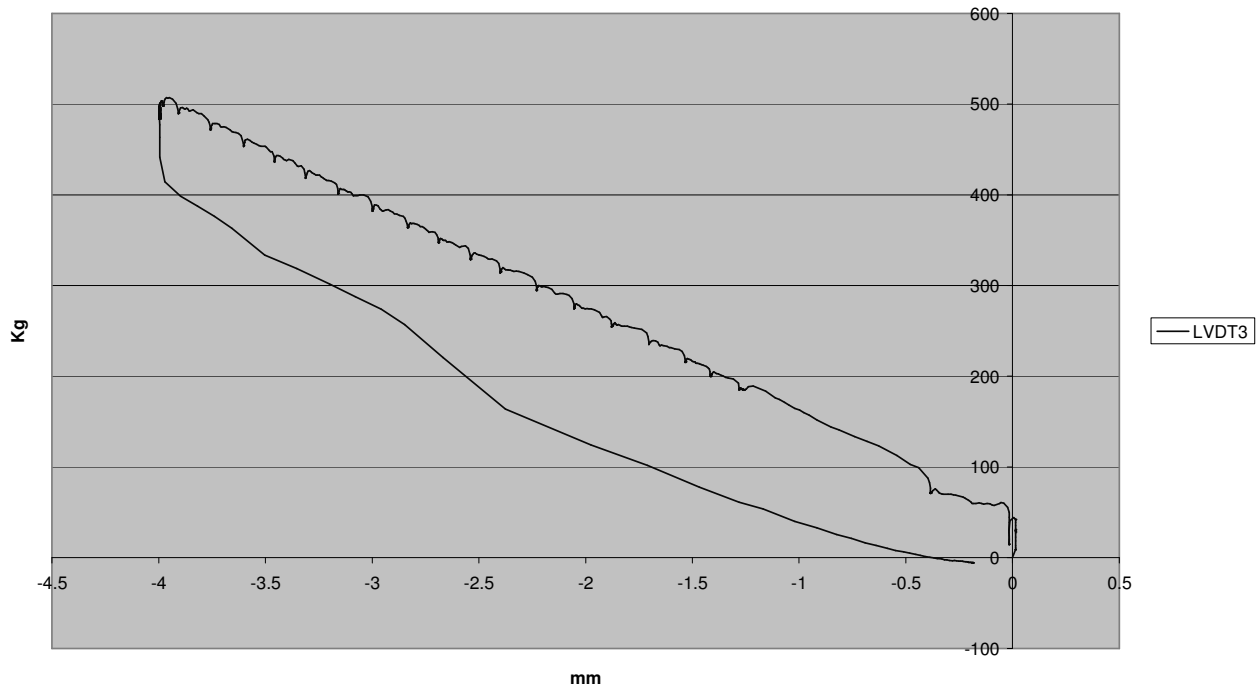




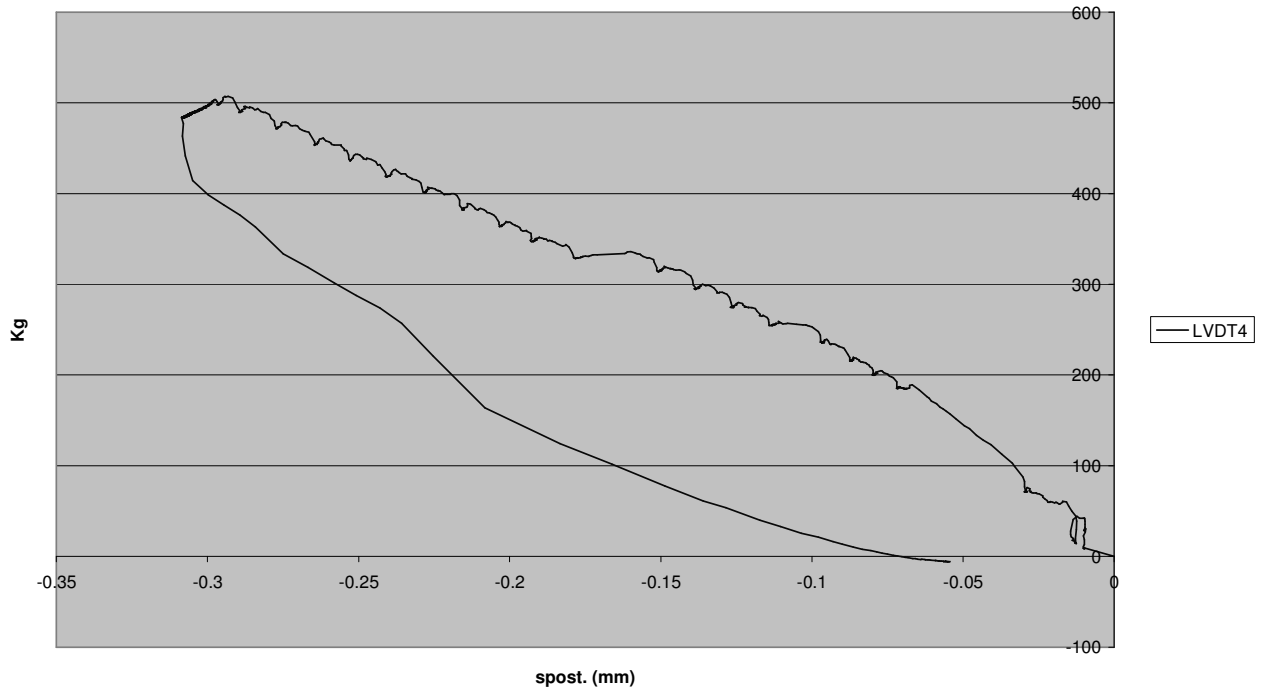
LVDT2



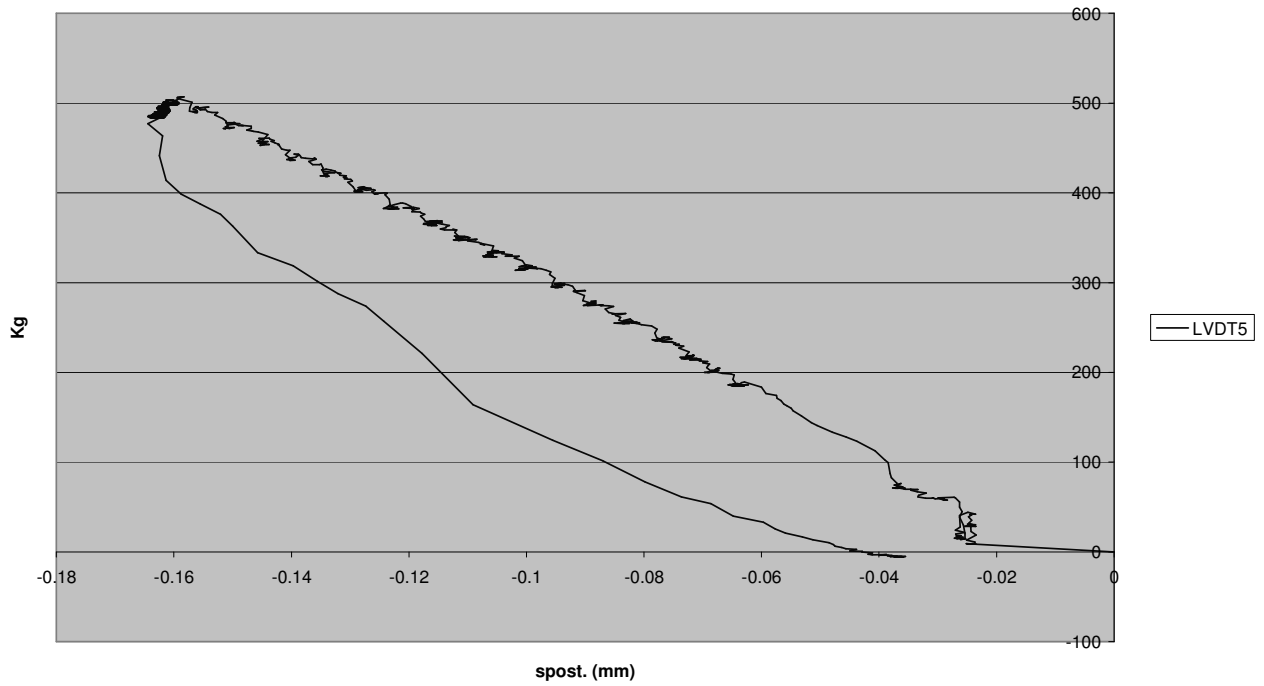
LVDT3



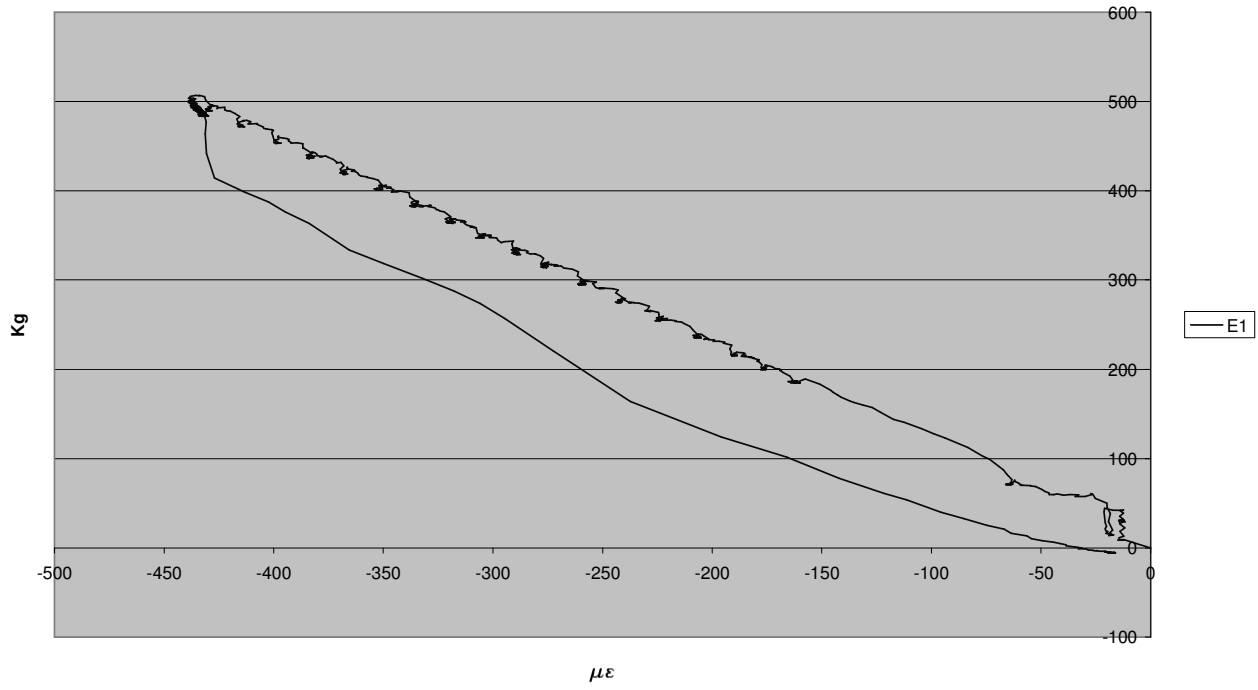
LVDT4



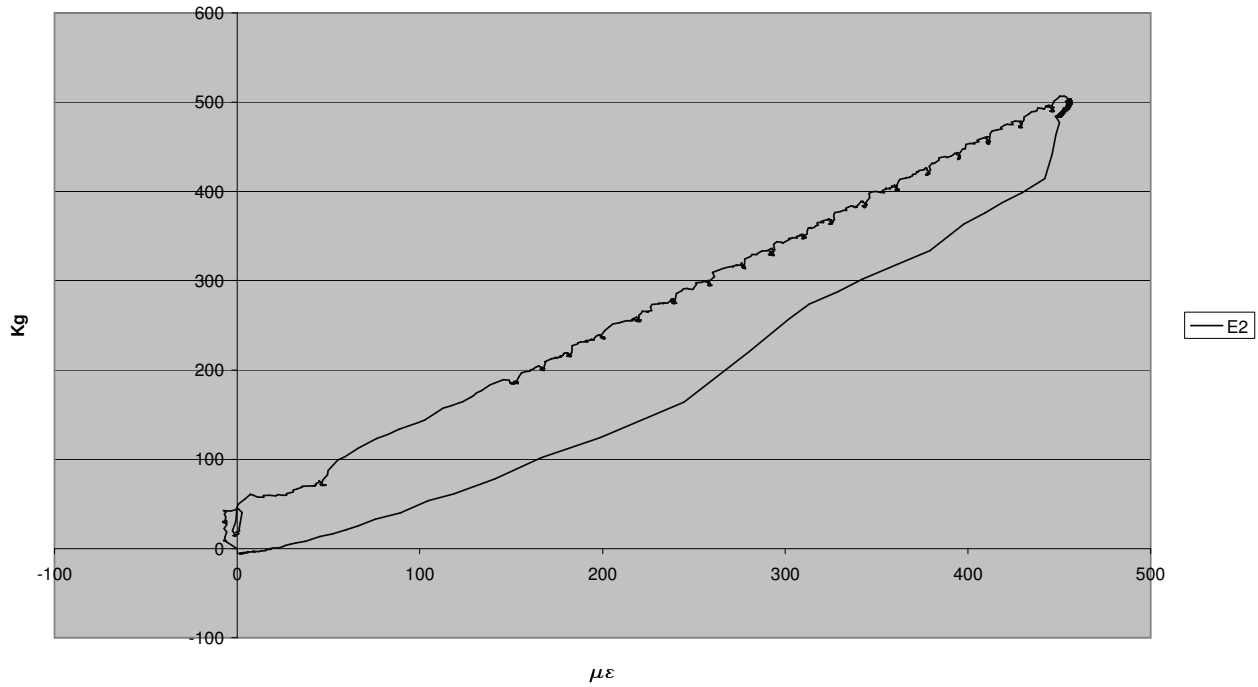
LVDT5



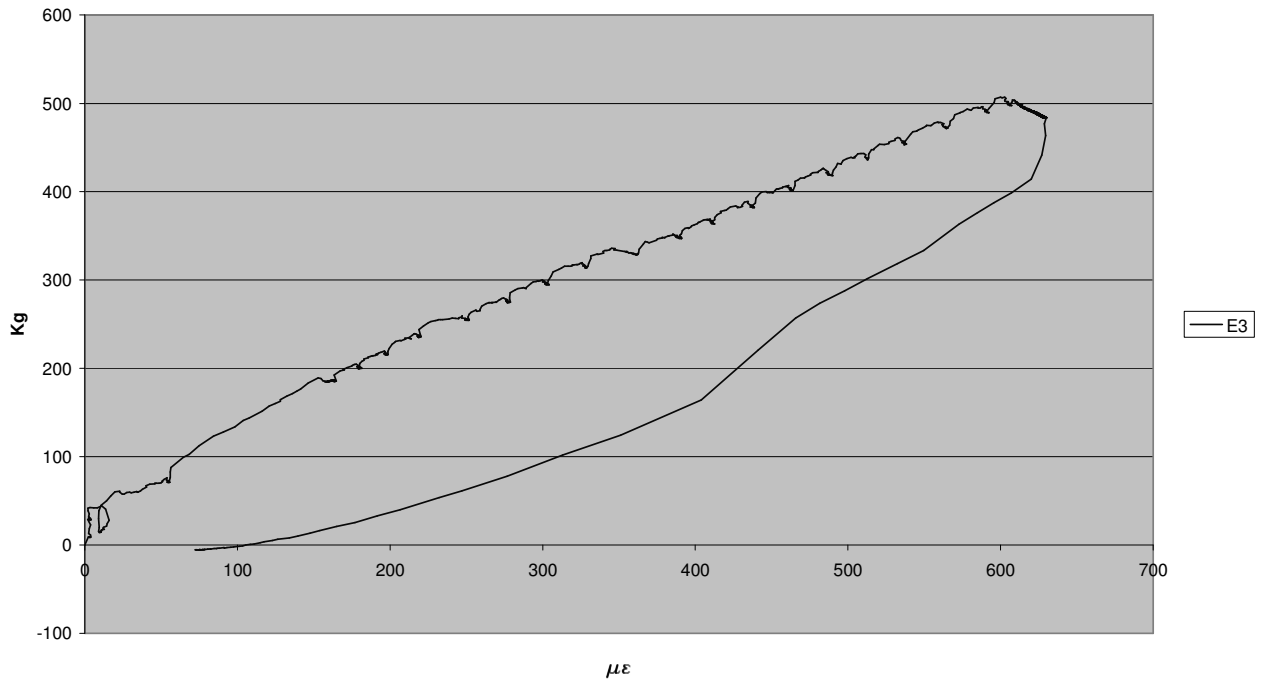
E1



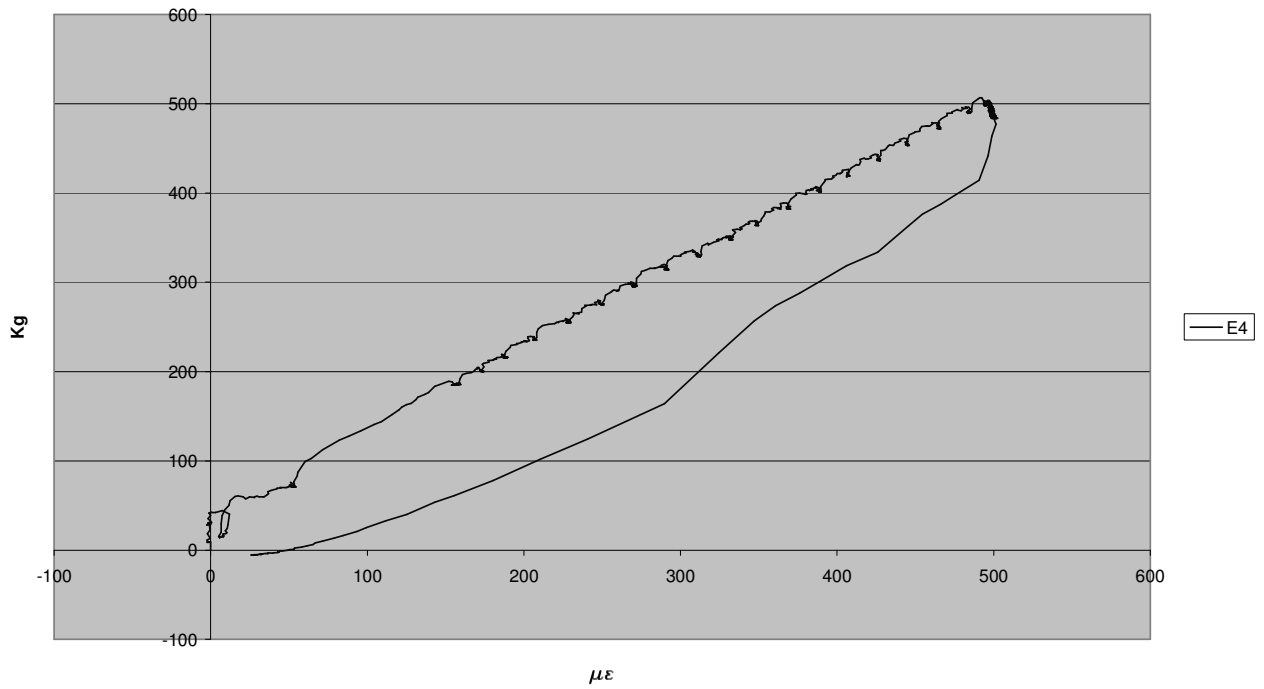
E2



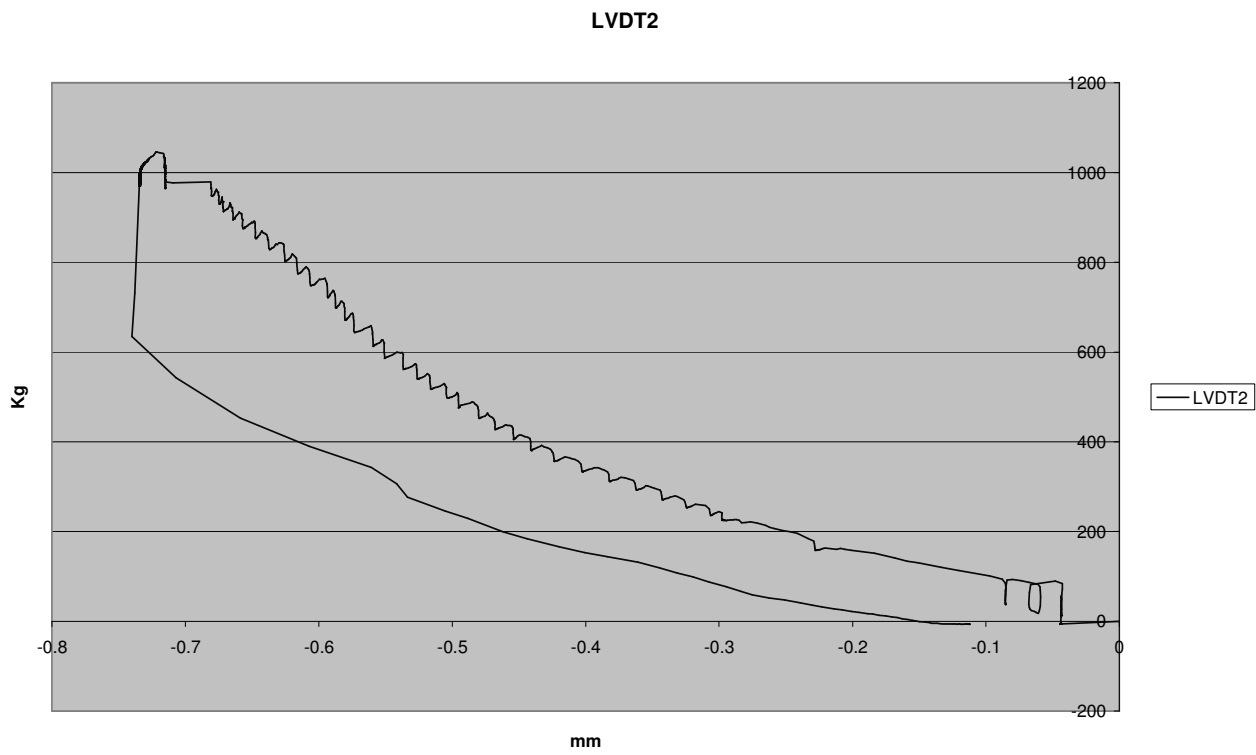
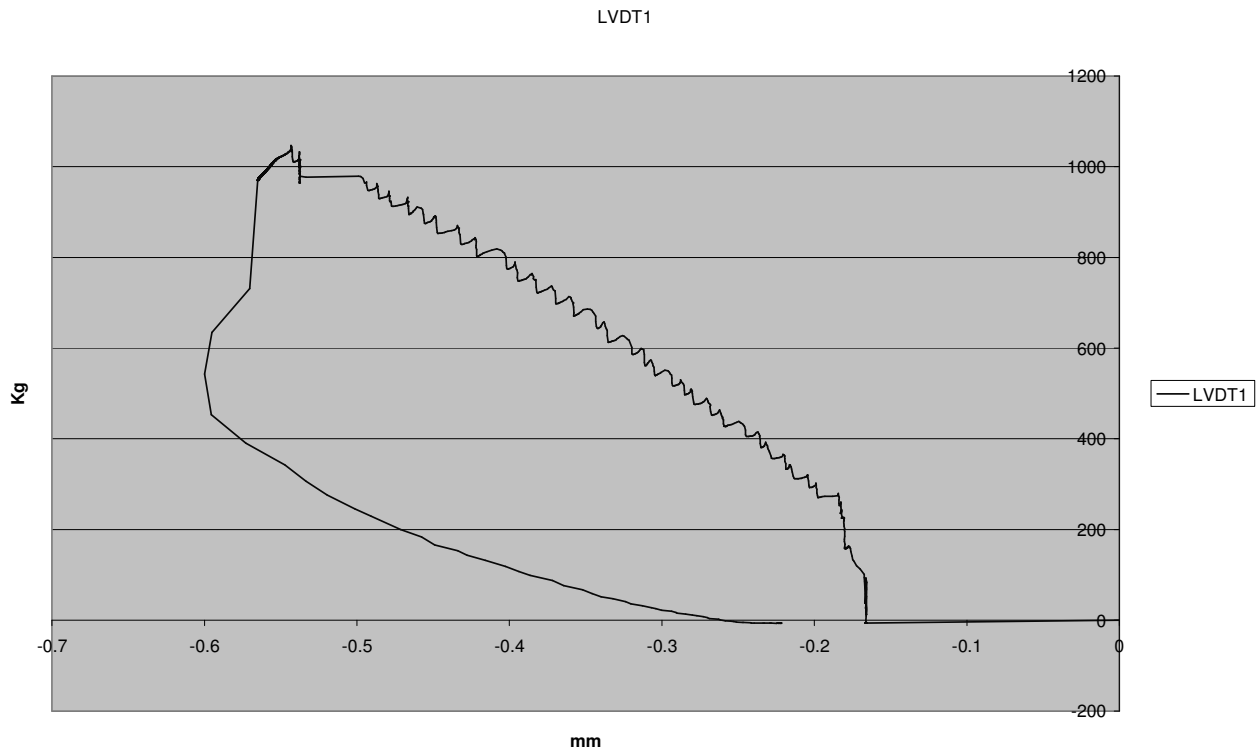
E3



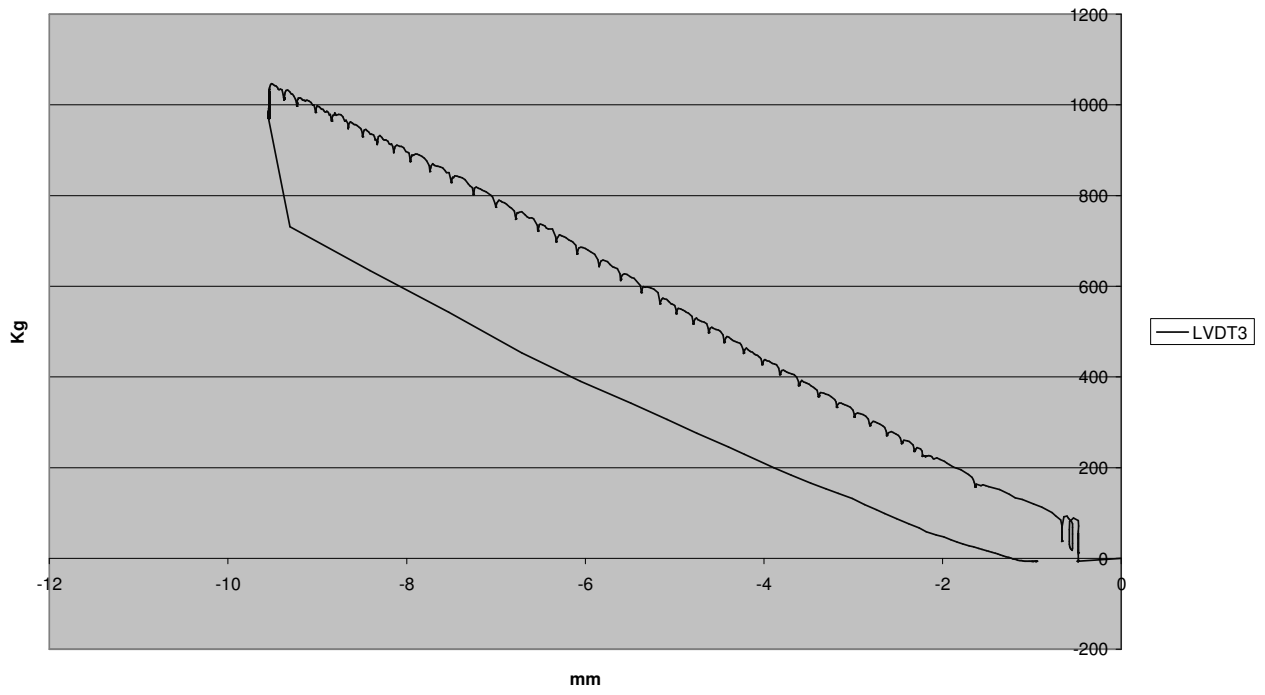
E4



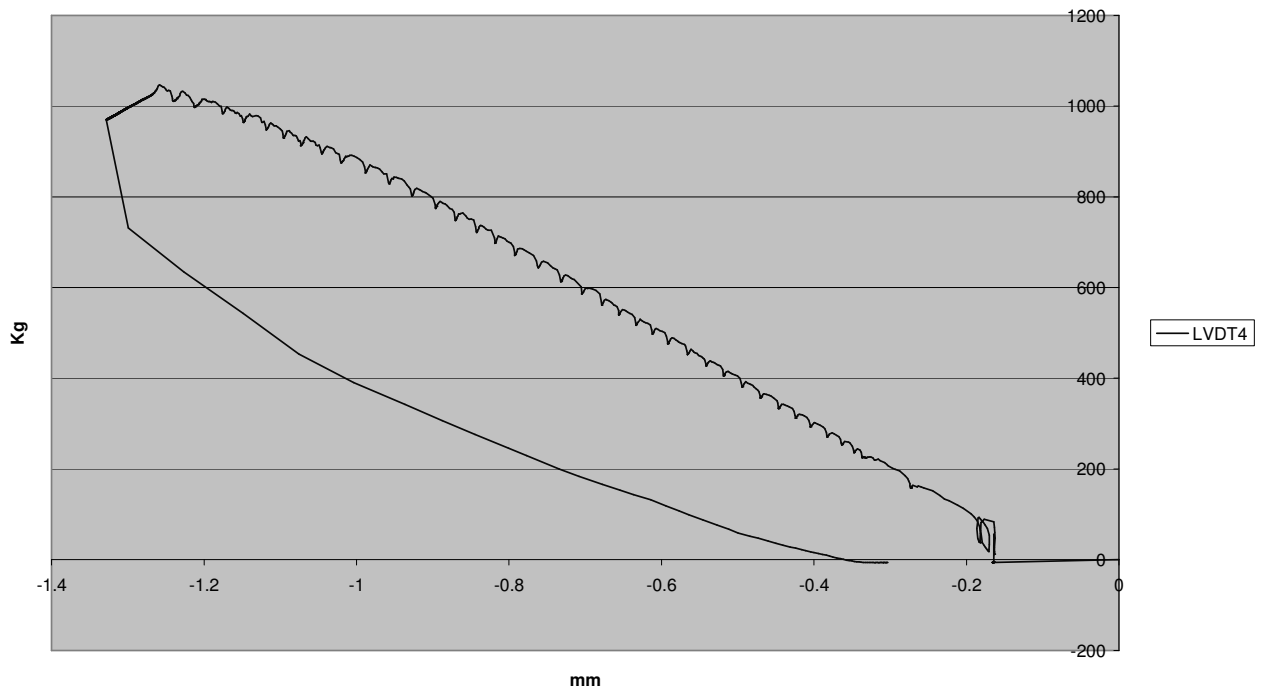
Secondo ciclo (0 - 1000 Kg).



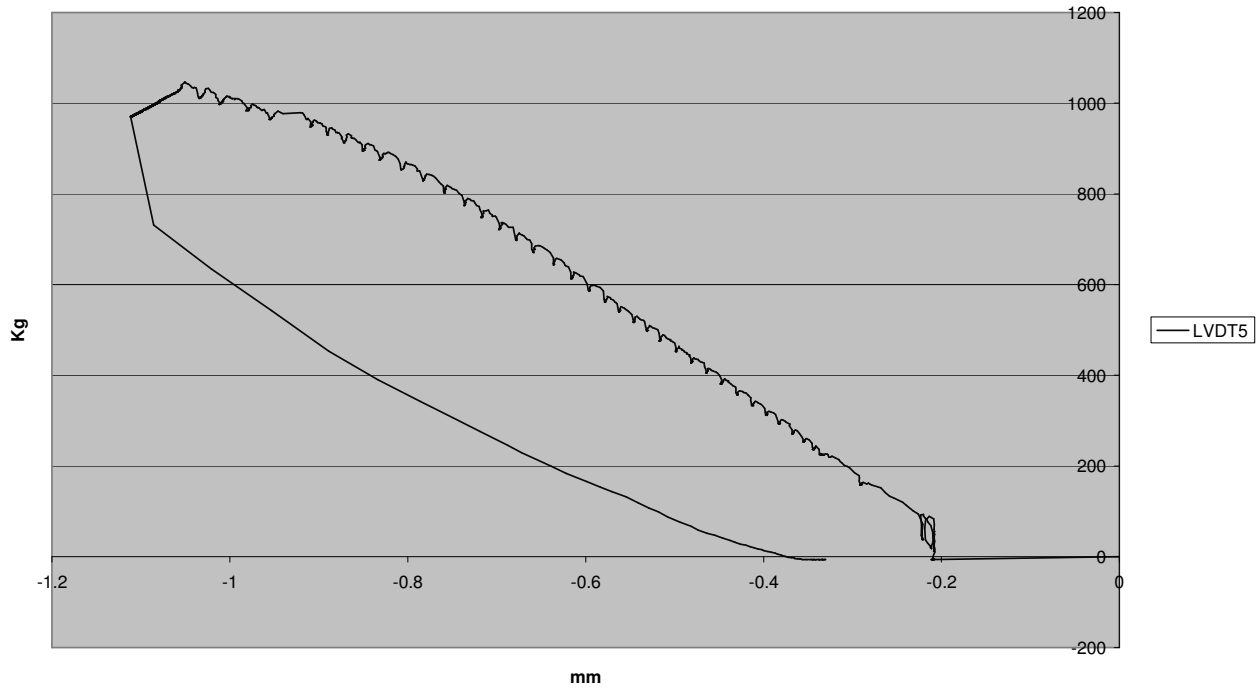
LVDT3



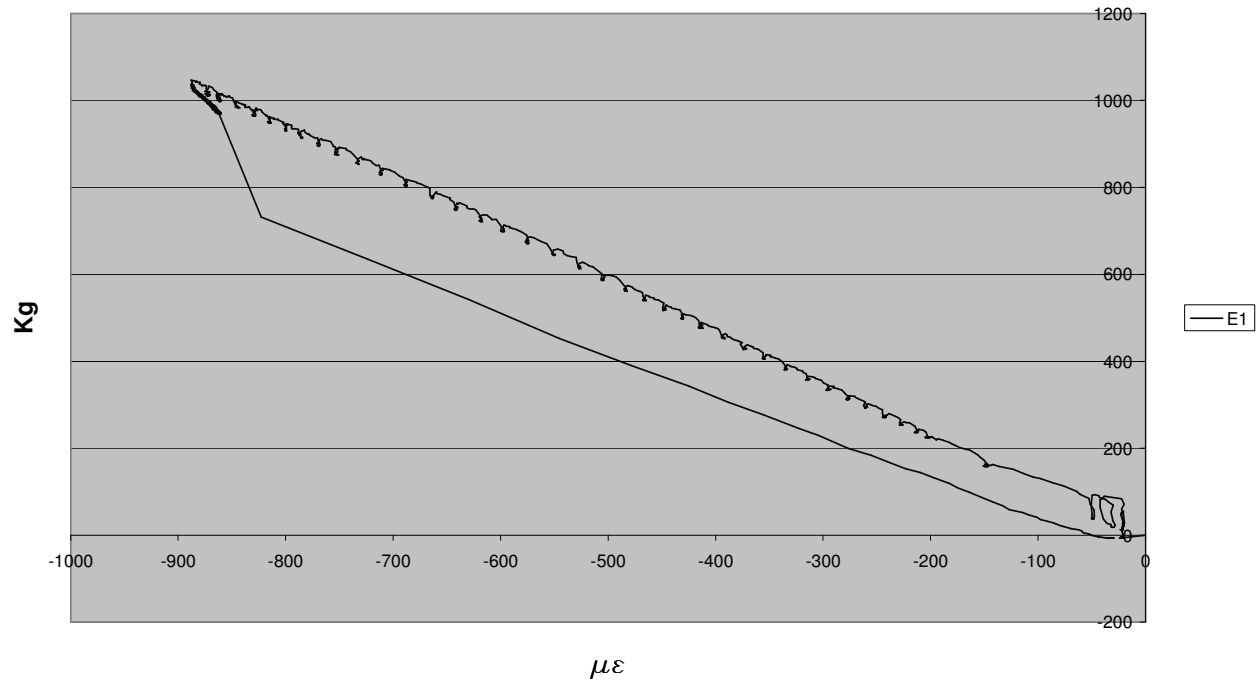
LVDT4



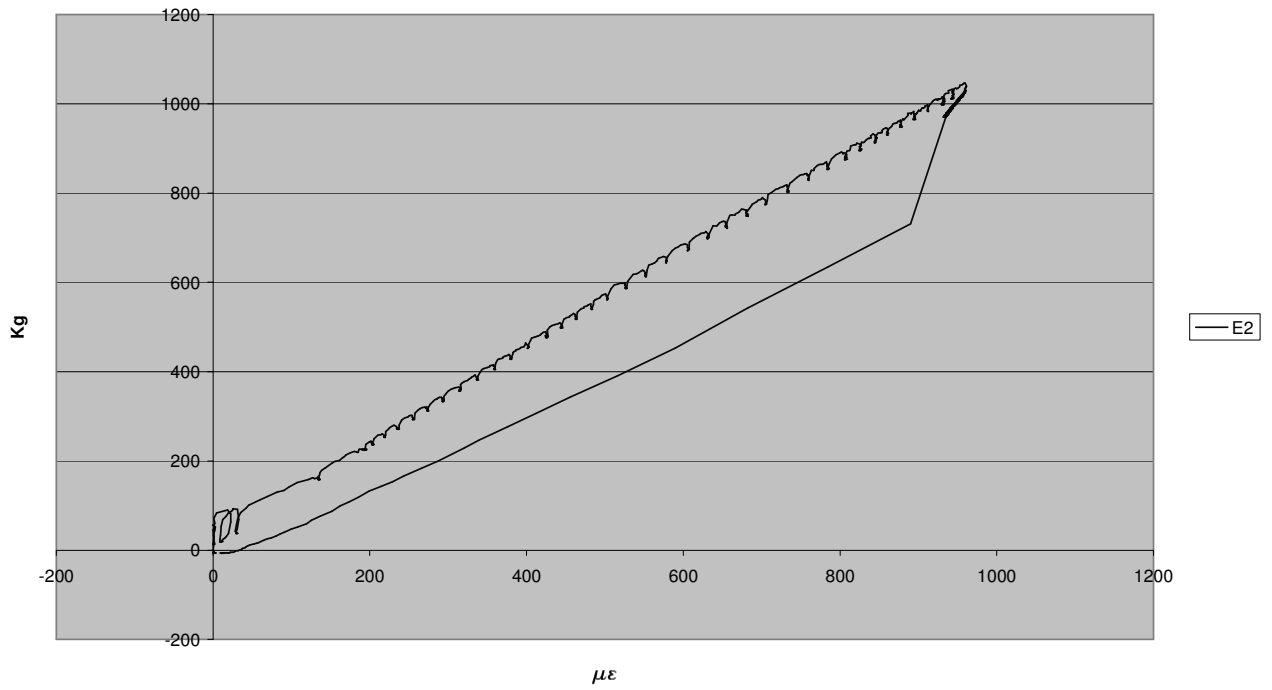
LVDT5



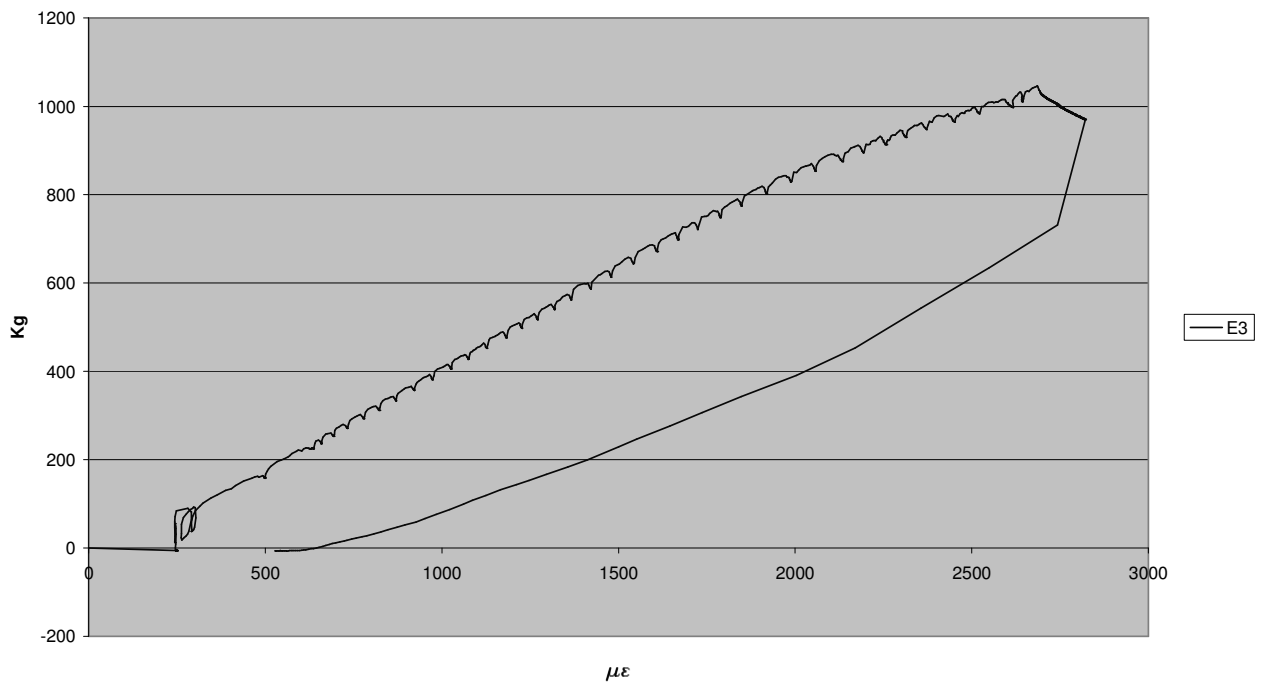
E1



E2

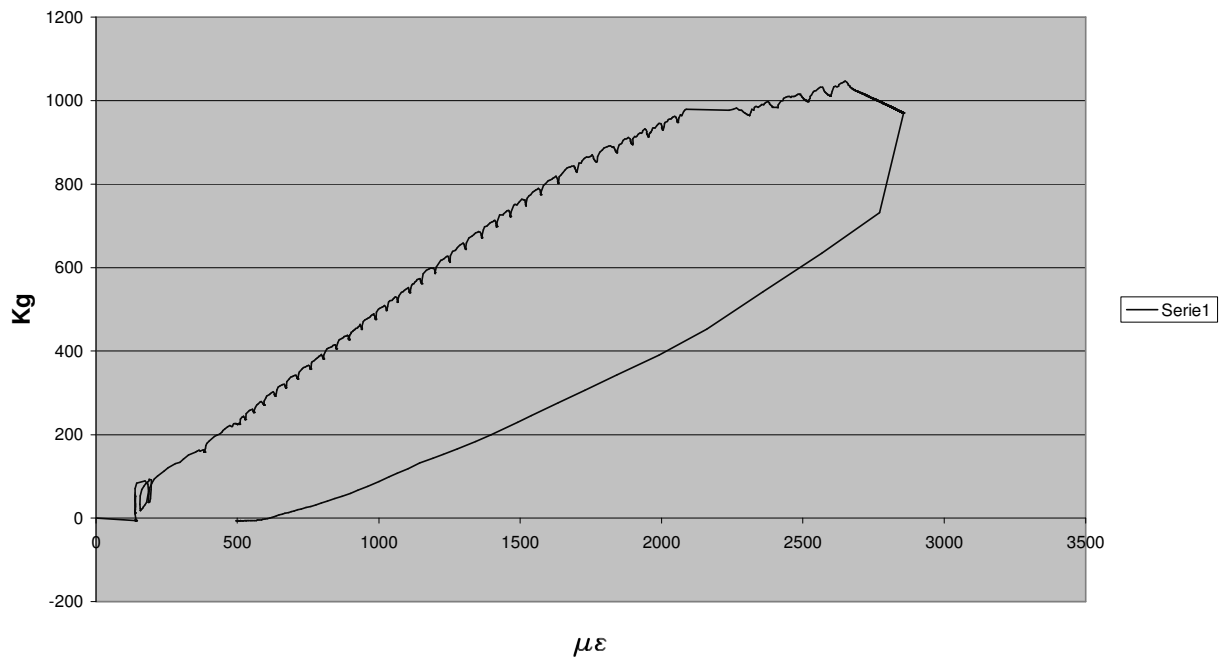


E3

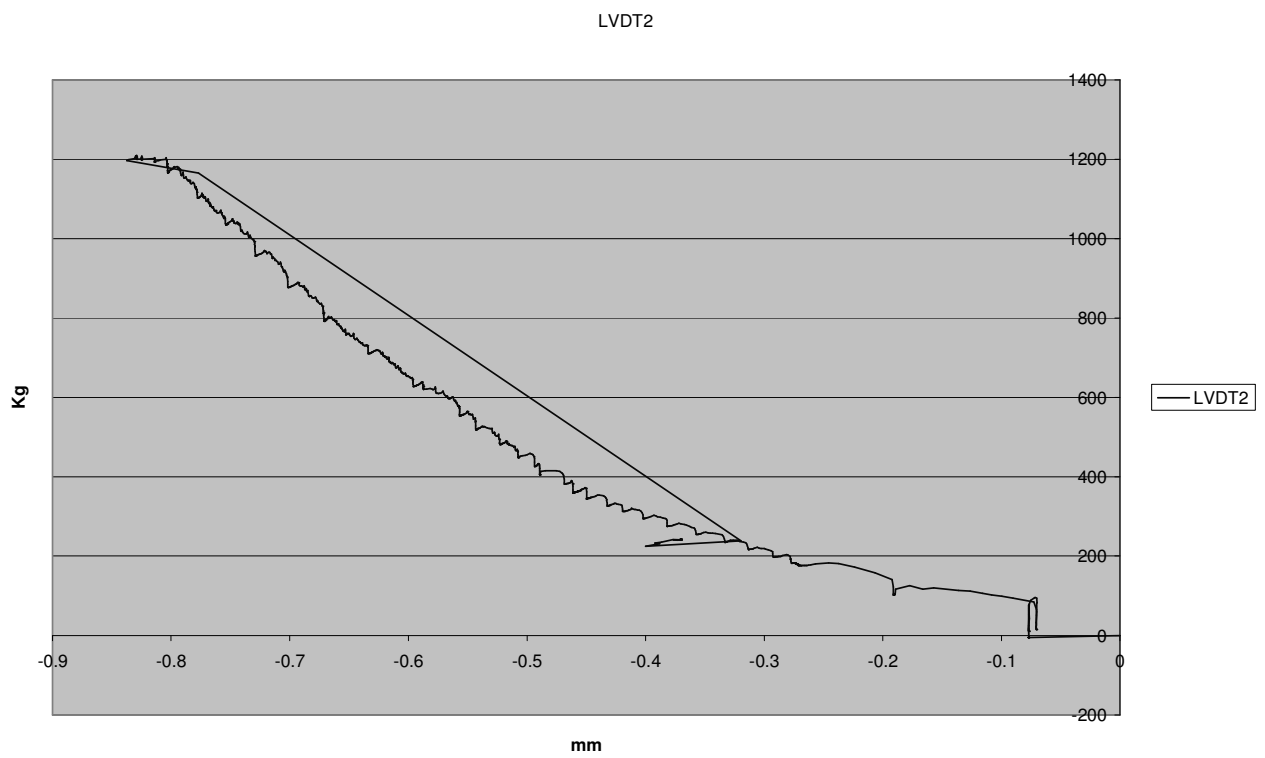
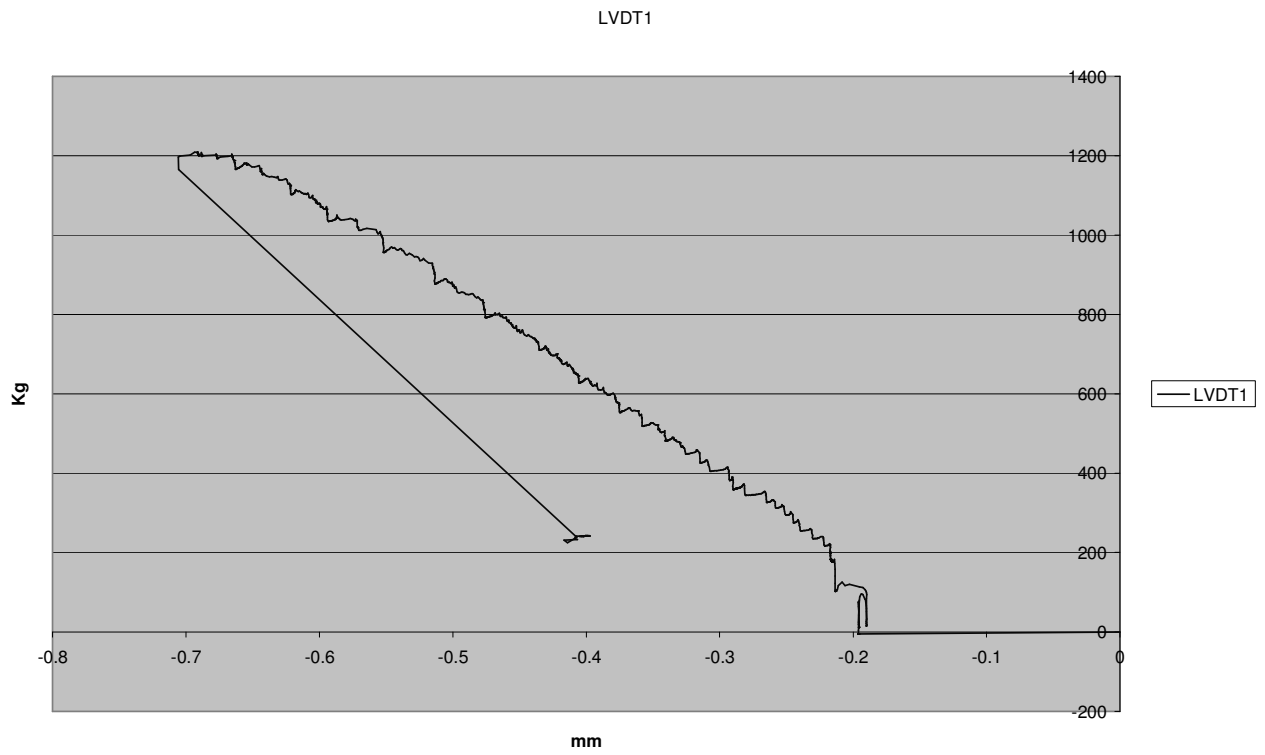




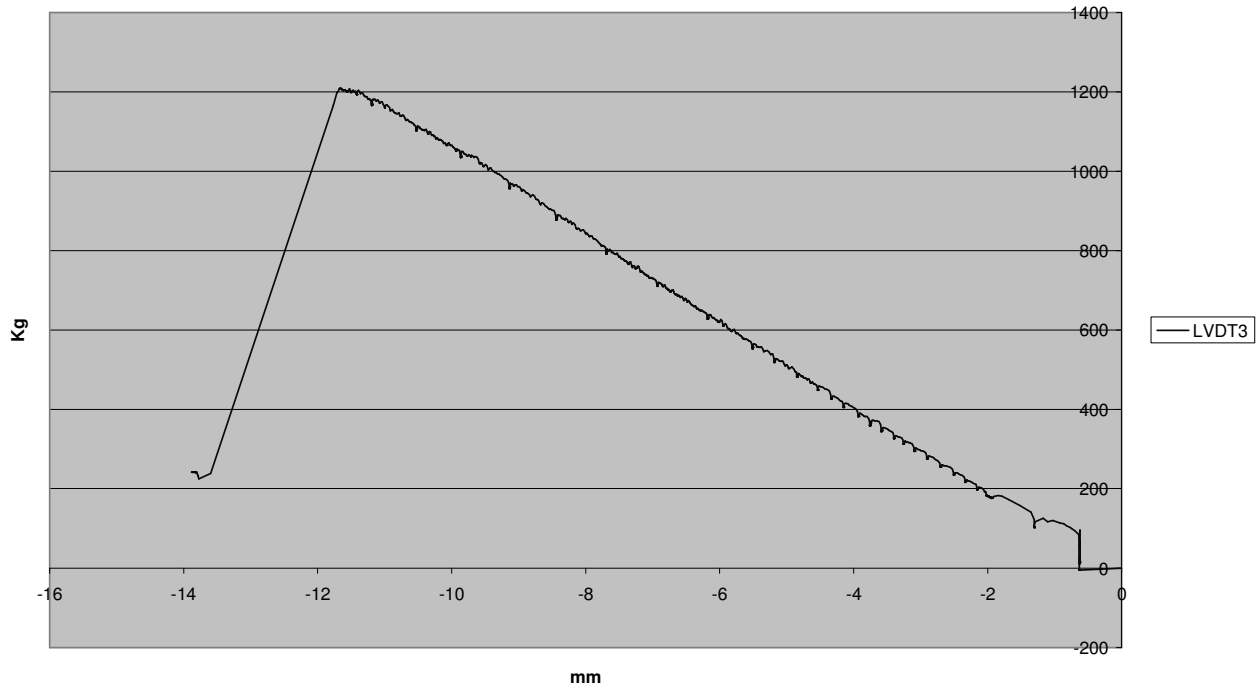
E4



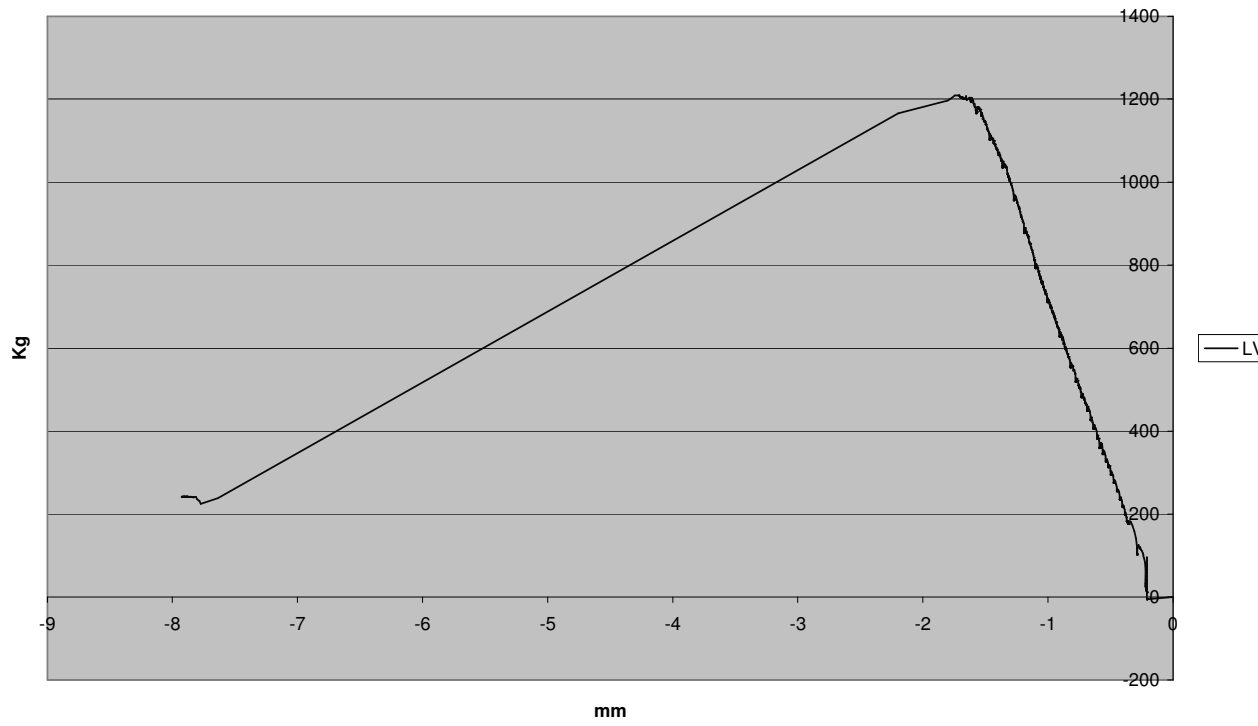
Terzo ciclo (0 - 1200 Kg).



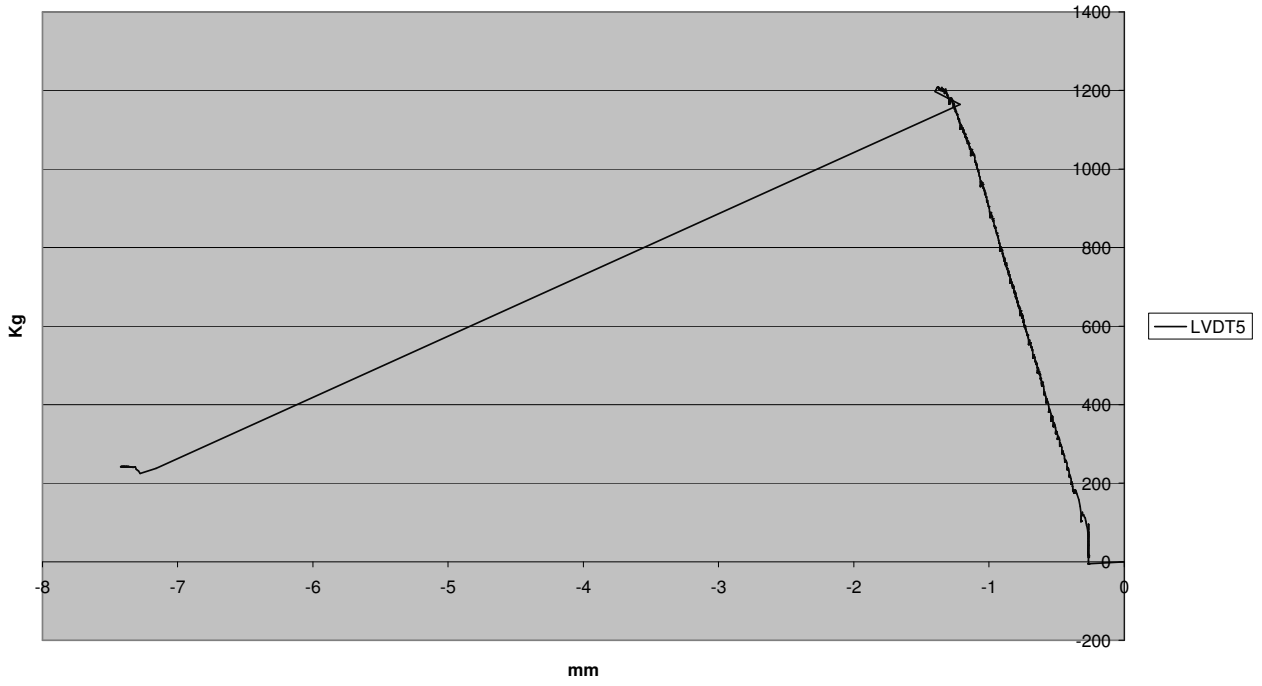
LVDT3



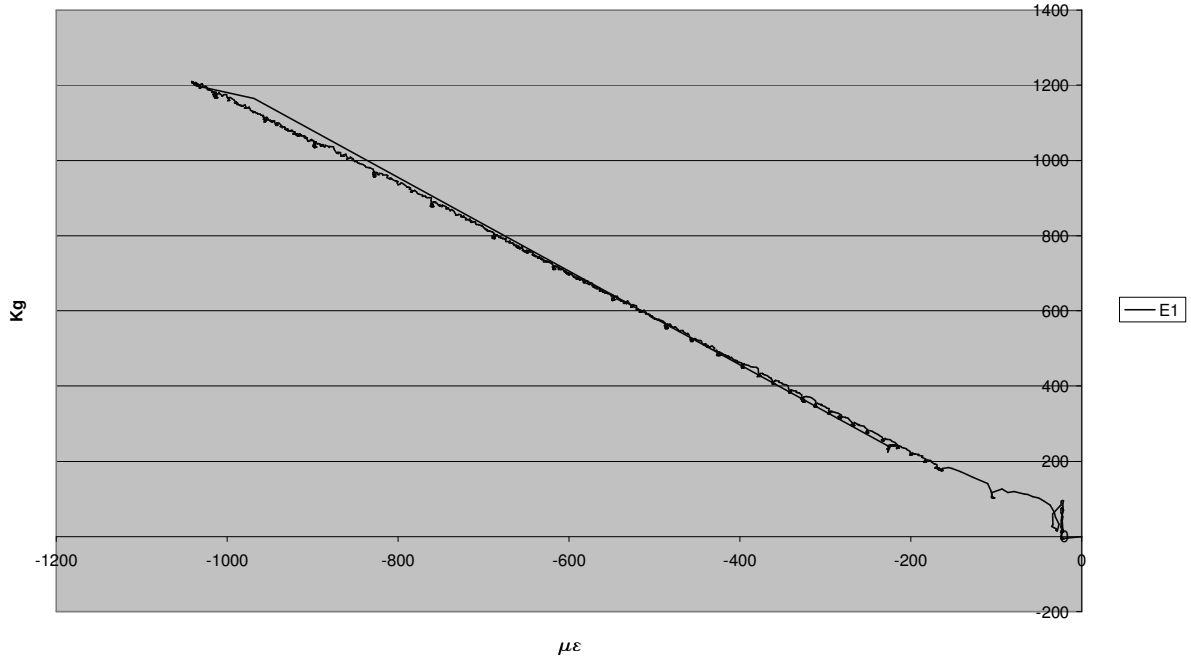
LVDT4



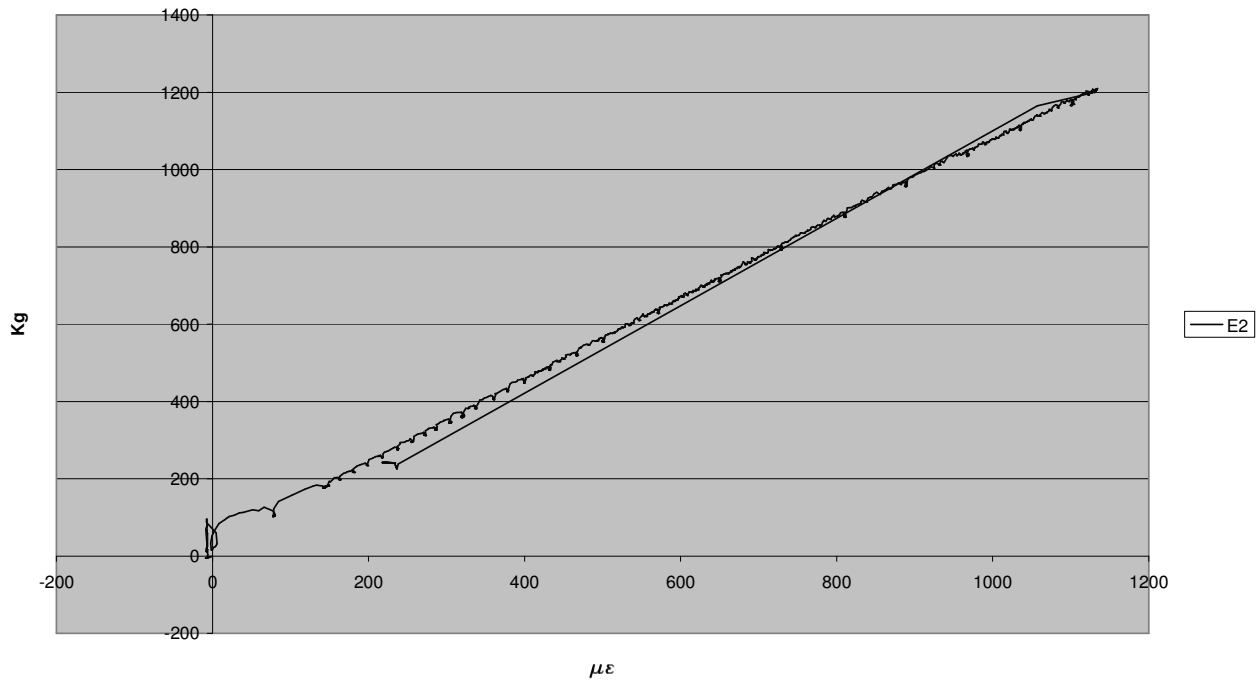
LVDT5



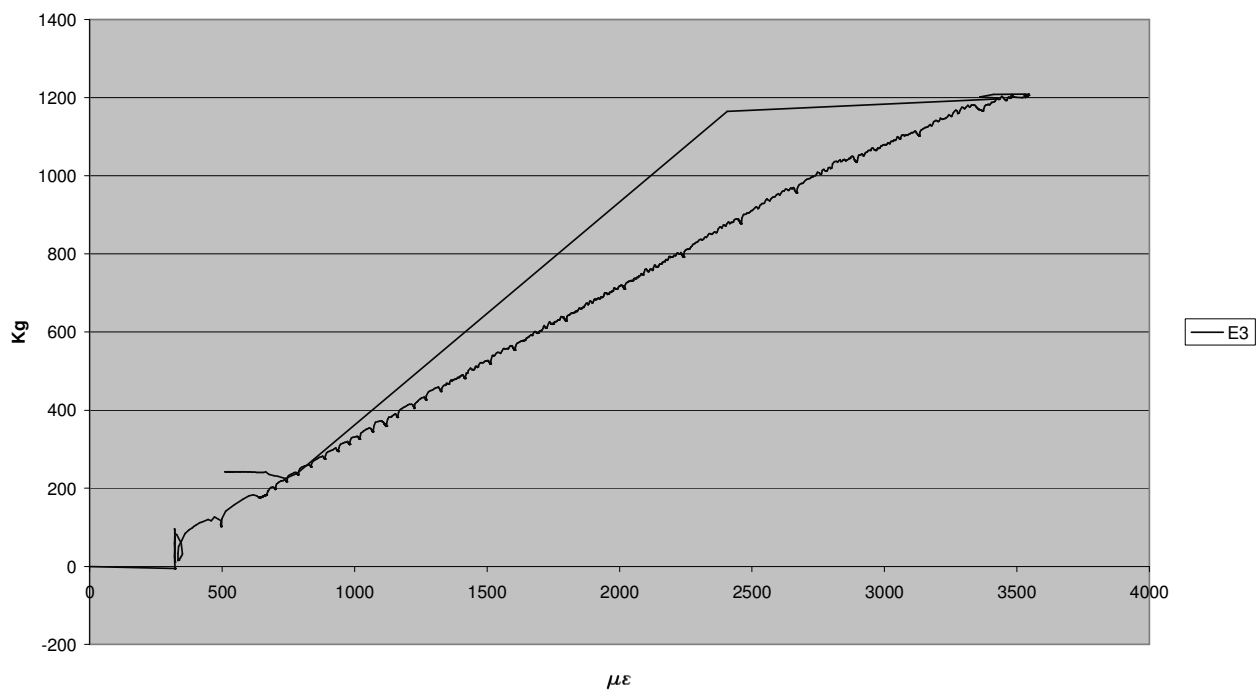
E1



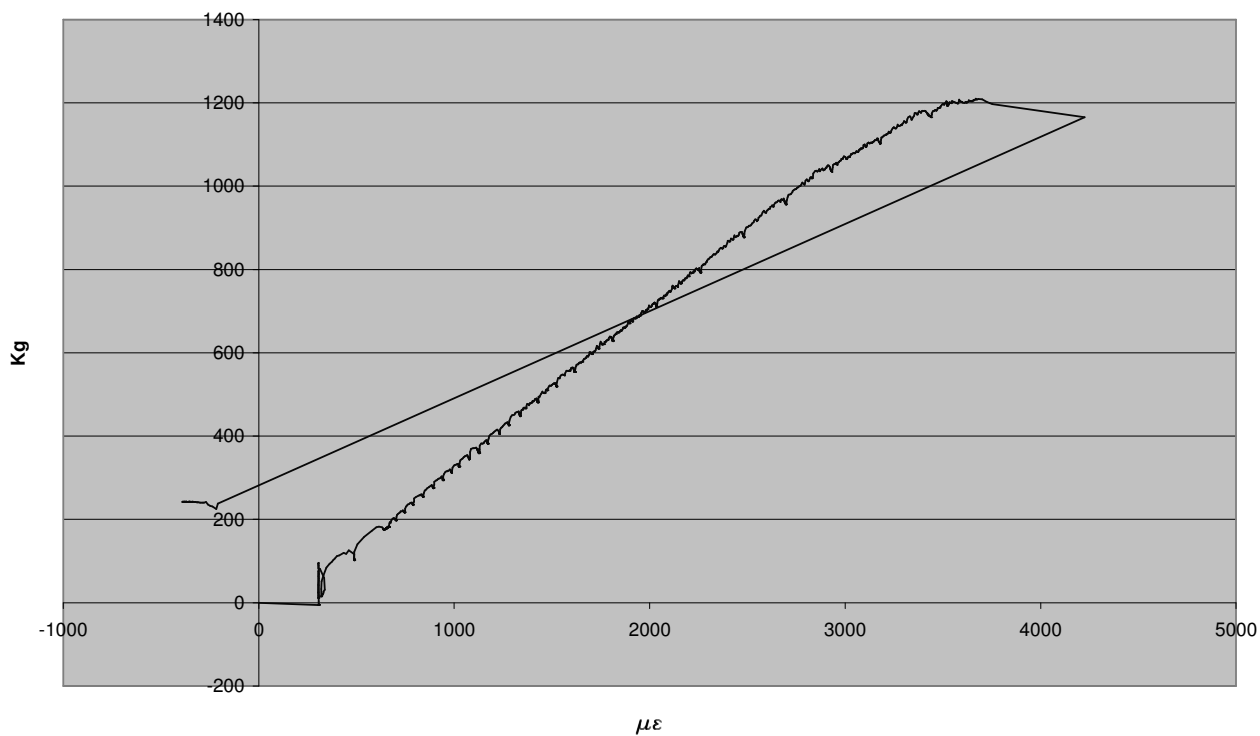
E2



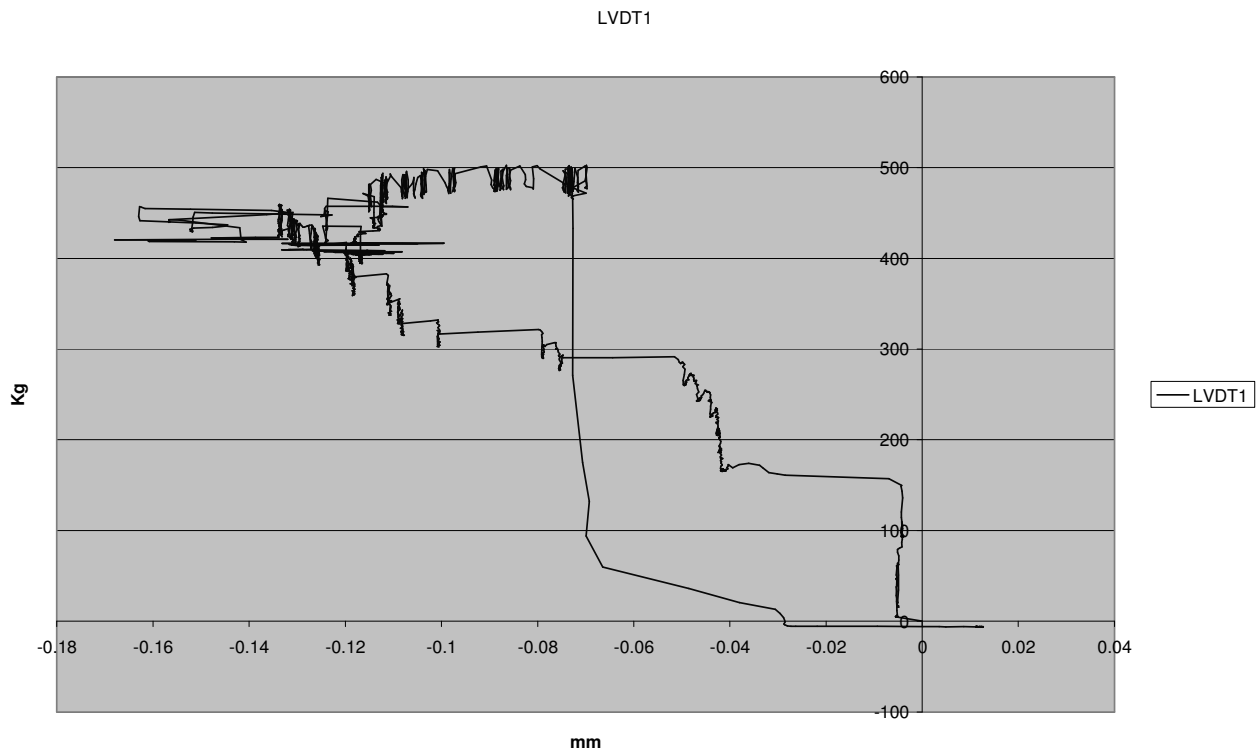
E3



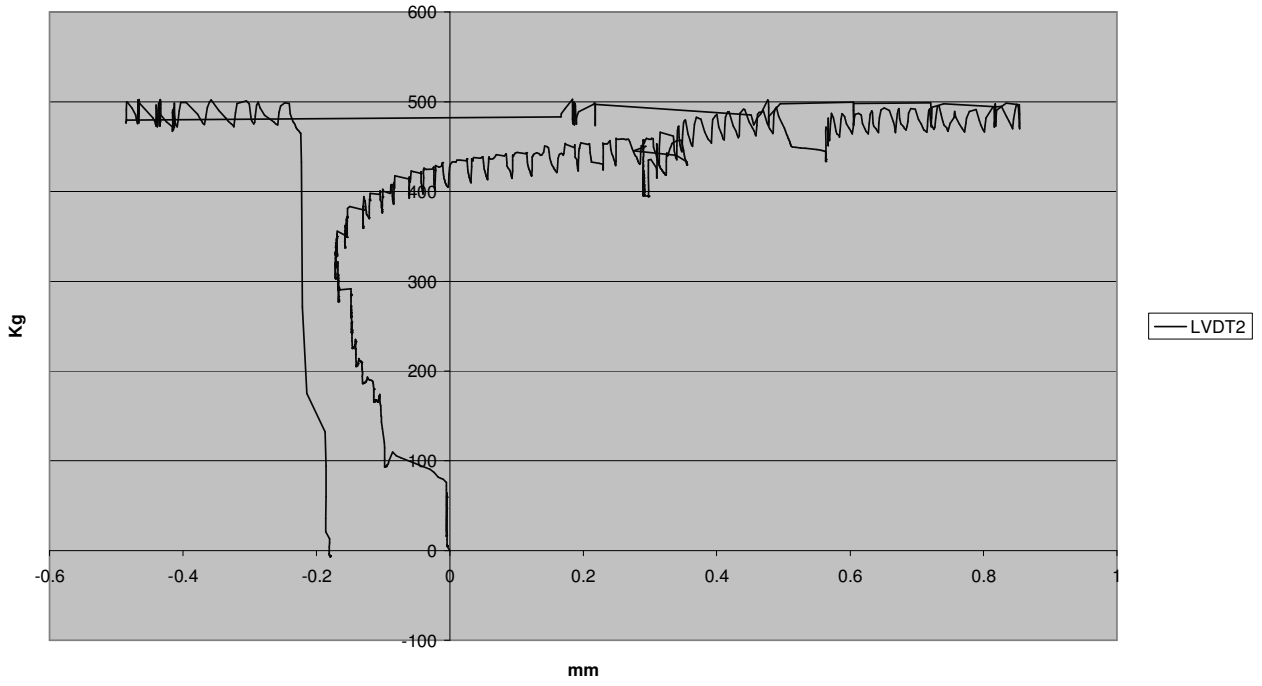
E4



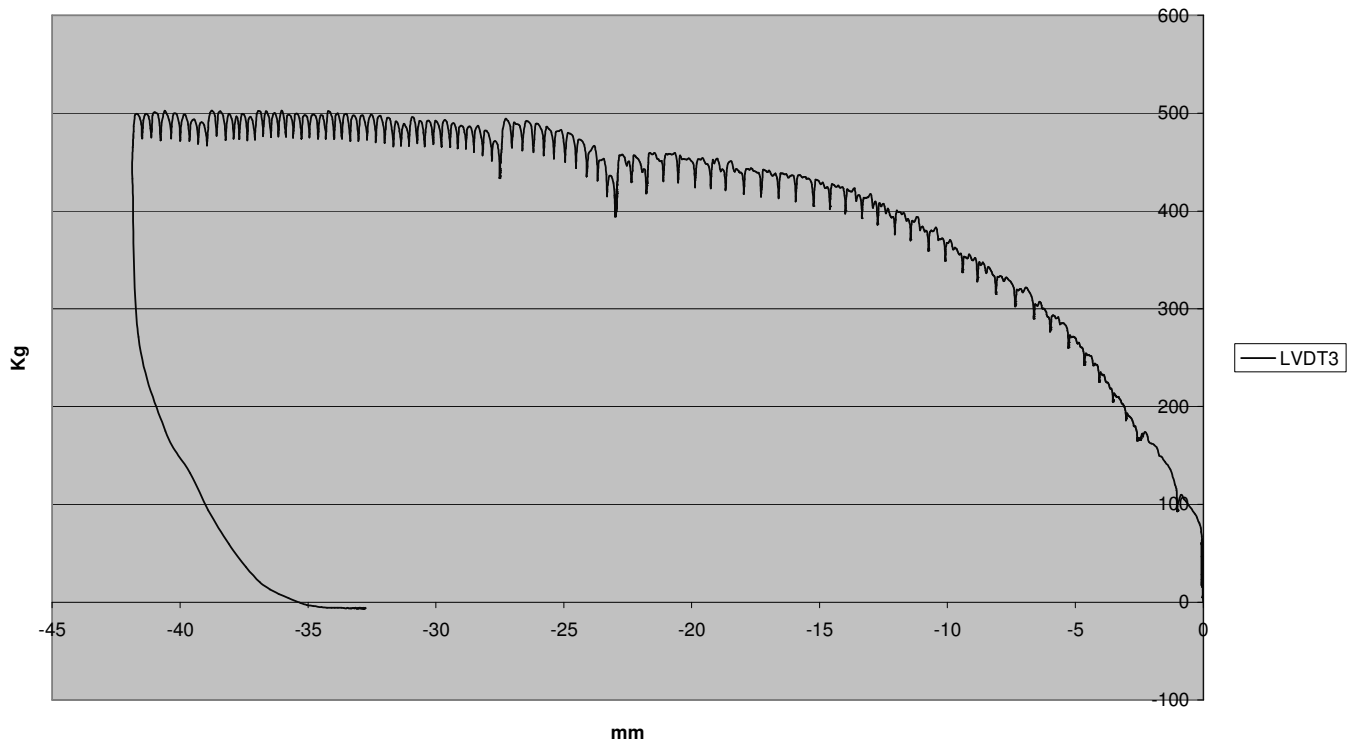
Quarto ciclo (0 - 500 Kg).



LVDT2

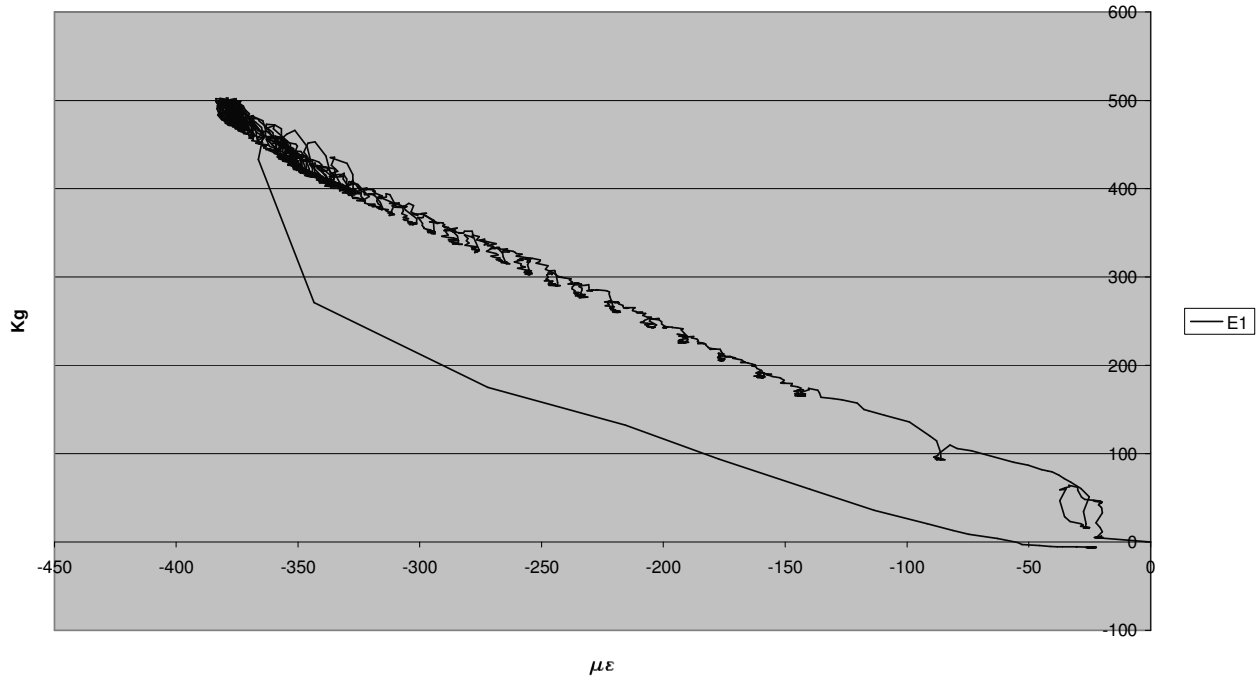


LVDT3

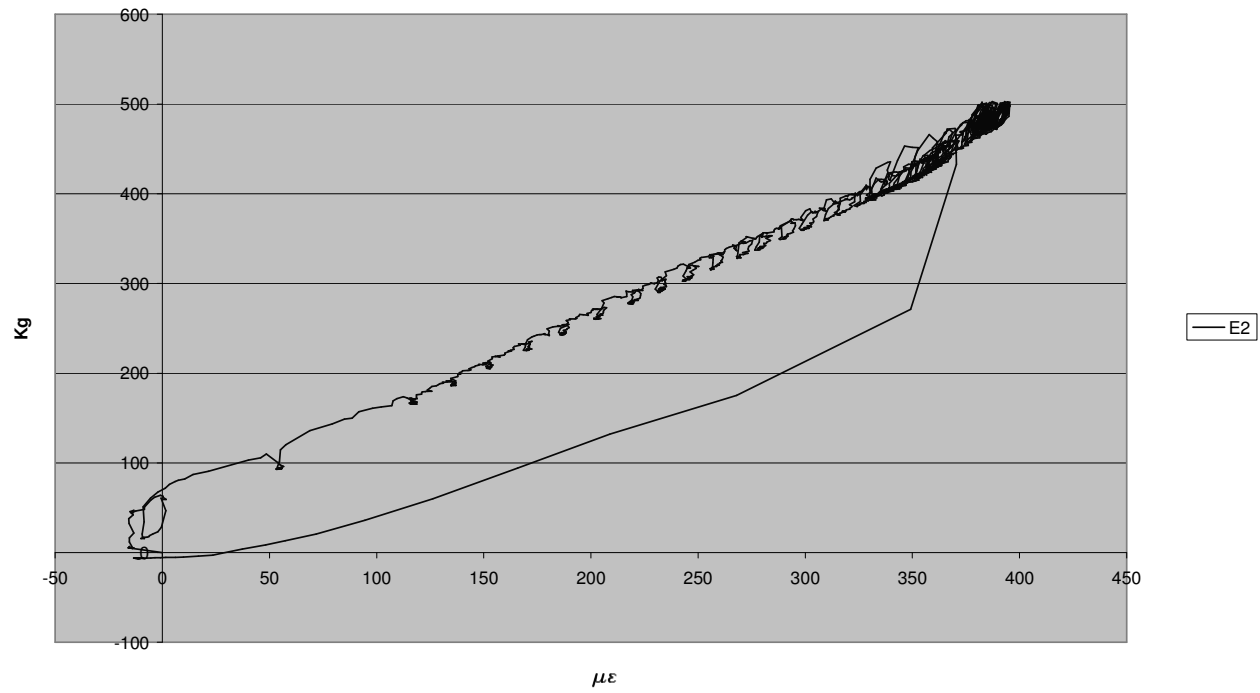


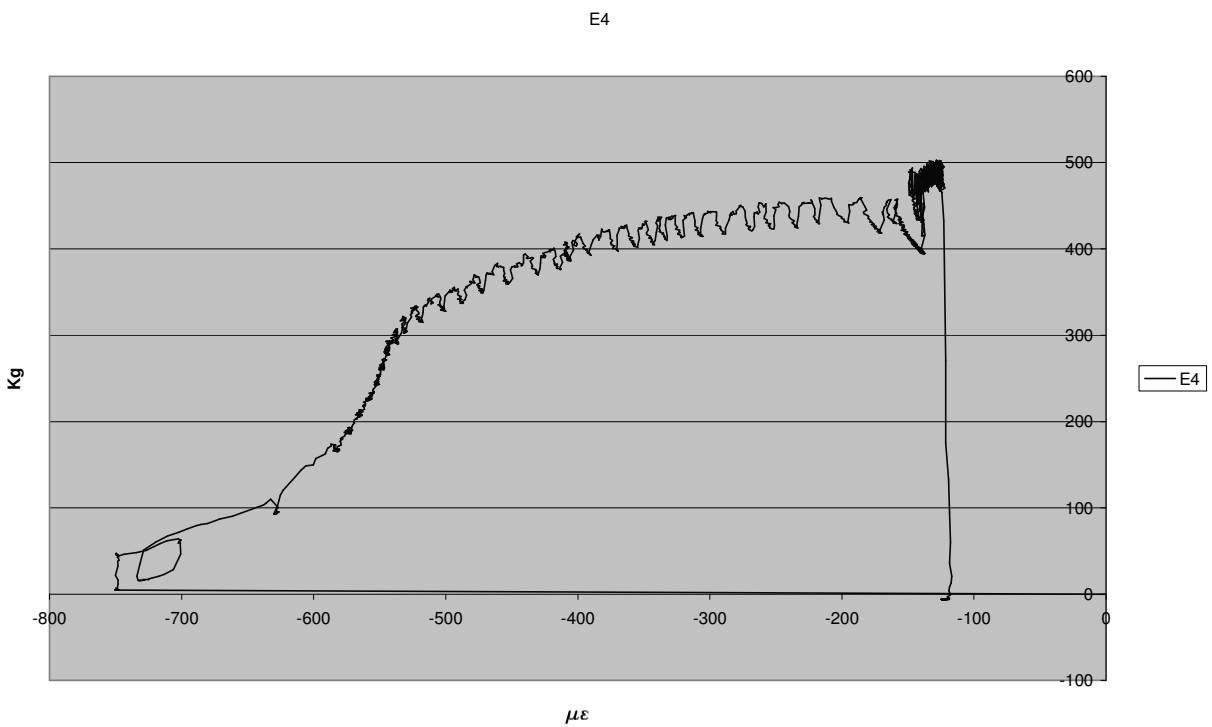
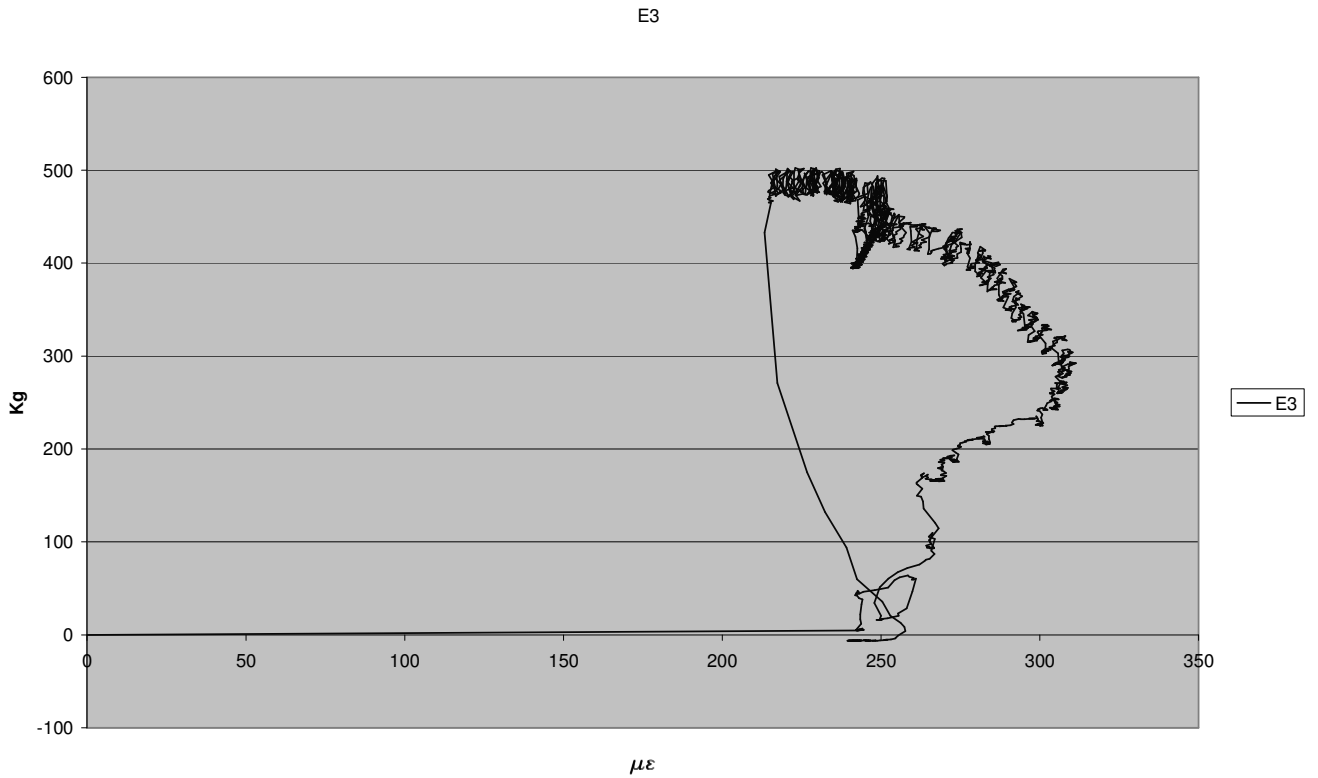


E1



E2





N.B.: Per evitare danni agli strumenti, prima dell'inizio di questo ciclo gli LVDT4 e LVDT5 sono stati rimossi dalla struttura.

## *Bibliografia*

*Autori: Guglielmo Giordano, Ario Ceccotti, Luca Uzielli - **Tecnica delle costruzioni in legno : caratteristiche, qualificazione e normazione dei legnami da costruzione; progettazione e controllo delle strutture lignee tradizionali; applicazione dei moderni metodi di calcolo alle nuove tipologie costruttive; classi di resistenza dei legnami strutturali, secondo la normativa europea, quinta edizione** – Editore: Hoepli Milano.*

*Autore: Guglielmo Giordano - **Tecnologia del legno** – Editore: Unione tipografico-  
editrice torinese Torino.*

*Autori: Julius Natterer, Thomas Herzog, Michael Volz - **Atlante del legno** – Editore:  
U.T.E.T. Torino.*

*Autore: Attilio Arcangeli - **Le costruzioni in legno** – Editore: Hoepli Milano.*

*Autori: Eric Steinberg, Ricky Selle, Thorsten Faust - **Connectors for Timber-  
Lightweight Concrete Composite Structures** - Ed.: JOURNAL OF  
STRUCTURAL ENGINEERING © ASCE*

*Autori: A. J. M. Leijten<sup>1</sup> S. Ruxton<sup>2</sup> H. Prion<sup>3</sup> F. Lam - **Reversed-Cyclic Behavior  
of a Novel Heavy Timber Tube Connection** - Ed.: JOURNAL OF  
STRUCTURAL ENGINEERING © ASCE*

*Autori: Chris Gentile, Dagmar Svecova, Sami H. Rizkalla, F.ASCE - **Timber Beams  
Strengthened with GFRP Bars: Development and Applications** – Ed.:  
JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION*