



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLA MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN
INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

**“Analisi di Archi in Muratura
Danneggiati e Rinforzati con Compositi”**

**“Analysis of Damaged Masonry Arches
and Reinforced with Composites “**

RELATORE:

PROF. ING. ROBERTO CAPOZUCCA

TESI DI LAUREA DI:

DE MARTINO NICOLA

CORRELATORE:

DOTT. ING. MAGAGNINI ERICA

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

INDICE

INTRODUZIONE

Capitolo 1 STATICA DELL'ARCO IN MURATURA

1.1 Premessa

1.2 Statica dell'arco

1.2.1 Curva della Pressioni

1.2.2 Stabilità dell'Arco-Heyman

1.2.3 Teoremi dell'Analisi Limite di un Arco Rinforzato

Capitolo 2 UTILIZZO DEI MATERIALI COMPOSITI PER ELEMENTI IN MURATURA (ARCHI)

2.1 Premessa

2.2 Materiali Compositi di Rinforzo

2.2.1 Classificazione FRP

2.2.2 Caratteristiche Meccaniche delle Fibre

2.2.3 Matrici

2.3 Istruzioni e Normativa

2.3.1 Requisiti di Progetto

2.3.2 Progetto di Rinforzo

2.3.3 Delaminazione

2.4 Rinforzo di Strutture Murarie

2.4.1 Strutture a Semplice Curvatura

2.5 Casi Studio di Rinforzi con Materiali Compositi

2.5.1 Chiesa di San Matteo in Nicciano (LU)

2.5.2 Cattedrale Santa Maria Annunziata (MC)

2.5.3 Ponticello in Pietra in Sud Sardegna

2.5.4 Santuario della Madonna dell'Ambro (FM)

Capitolo 3 SPERIMENTAZIONE RINFORZO DI UN ARCO IN MURATURA CON BFRP

3.1 Premessa

3.2 Carico sull'Arco

3.2.1 Prove di Carico sull'arco Integro

3.2.2 Condizione di Carico Sfavorevole

3.2.3 Analisi Fessurativa

3.3 Sperimentazione con BFRP

3.3.1 Rinforzo in Fibra di Basalto

3.3.2 Applicazione del Rinforzo

3.3.3 Prove di Carico a Rottura

3.3.4 Risultati Sperimentali

3.3.5 Schemi Deformativi

Capitolo 4 CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

RINGRAZIAMENTI

INTRODUZIONE

Il seguente lavoro di tesi si collega ad una sperimentazione su un arco in muratura, in particolare una riproduzione della volta in muratura nella ex caserma Villarey, sede dell'attuale Facoltà di Economia e Commercio della città di Ancona.

La tesi si compone di una prima trattazione della statica di un arco in muratura, in particolare la funzione del rinforzo con materiali compositi e lo stato tensionale per il quale il rinforzo evita il collasso dell'opera. Si analizzano le caratteristiche dei materiali compositi rinforzati a matrice polimerica, i metodi di applicazione ed i criteri progettuali di un rinforzo di un arco in muratura.

Infine, si tratterà la sperimentazione di laboratorio sul modello di arco in muratura in scala 1:4, analizzando i dati ottenuti dal danneggiamento dell'opera e il successivo rinforzo con materiali compositi FRP, in particolare con fibre di basalto BFRP.

1. STATICA DELL'ARCO IN MURATURA

1.1 Premessa

L'arco è un elemento costruttivo a profilo curvilineo, in grado di sostenere i carichi della struttura sovrastante con sole sollecitazioni di compressione. Occorre specificare che un arco murario è composto da conci disposti con giunti pressoché radiali, in modo da garantire l'impossibilità di slittamenti a taglio.

Nell'arco si possono distinguere le seguenti parti:

- L'intradosso e l'estradosso, rispettivamente le superfici inferiore e superiore dell'arco;
- Gli archivolti, le superfici frontali dell'arco;
- La chiave, il punto più alto della curva di intradosso;
- Le imposte, le giaciture di appoggio dell'arco sui piedritti;
- La corda o luce, la distanza tra i due piedritti di sostegno dell'arco;
- La freccia o monta, distanza tra il punto in chiave e la corda;
- Le reni, la porzione dell'arco dell'apertura di circa 30° dalle imposte.

1.2 Statica dell'Arco

Lo studio delle volte, delle cupole e degli archi ha coinvolto molti ricercatori, per studiare tecniche numeriche di calcolo e definire il comportamento strutturale attraverso indagini sperimentali. Heyman ha fornito un contributo molto importante all'analisi degli archi e delle volte in muratura, secondo Heyman, il collasso è visto come un problema essenzialmente geometrico, non tensionale o deformativo, legato allo spessore, in relazione alla posizione della curva delle pressioni.

1.2.1 Curva delle Pressioni

Uno strumento ben noto per l'analisi degli archi è la funicolare dei carichi, la cui costruzione può essere chiarita con un semplice esempio. La figura 1.1 mostra un sistema di 3 forze parallele w_1 , w_2 , w_3 , che rappresentano un semplice sistema di carico su un arco, e 2 forze di reazione parallele ai carichi R_1 e R_2 agenti rispettivamente nei punti A e B. Il sistema è supposto in equilibrio, da cui si ottiene:

$$w_1 + w_2 + w_3 = R_1 + R_2 \quad (1.1)$$

ed anche una seconda equazione di equilibrio al momento, che non è interessante per l'argomento.

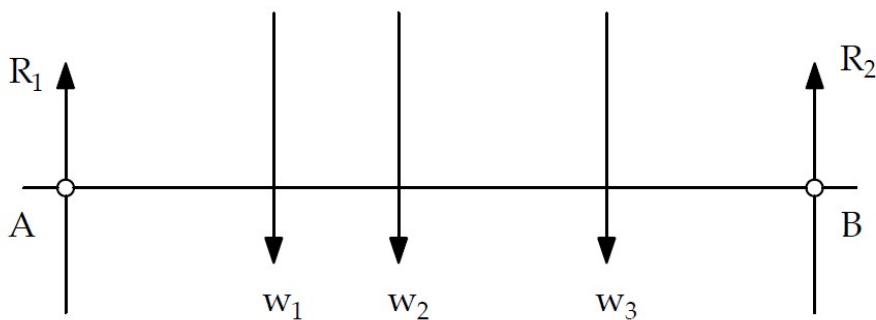


Figura 1.1 Sistema di forze agenti su corda

Se supponiamo tale sistema di forze agenti su corda senza peso proprio allora la forma della corda può essere trovata graficamente. Assumendo nota la componente orizzontale H di tensione nella corda, allora il triangolo delle forze fornisce l'inclinazione delle porzioni di corda (figura 1.2). Considerando la porzione AP della corda, l'inclinazione sarà data dalla forza T_1 con componenti R_1 e H , mentre per la porzione PQ di corda sarà data dalla forza T_2 con componente verticale $(R_1 - w_1)$ e componente orizzontale sempre H (figura 1.2).



Figura 1.2 Costruzione forze T_1 e T_2

Determinando le inclinazioni di tutte le porzioni della corda, si costruisce la funicolare dei carichi corrispondenti alle forze w_1, w_2, w_3 e alle reazioni R_1 e R_2 .

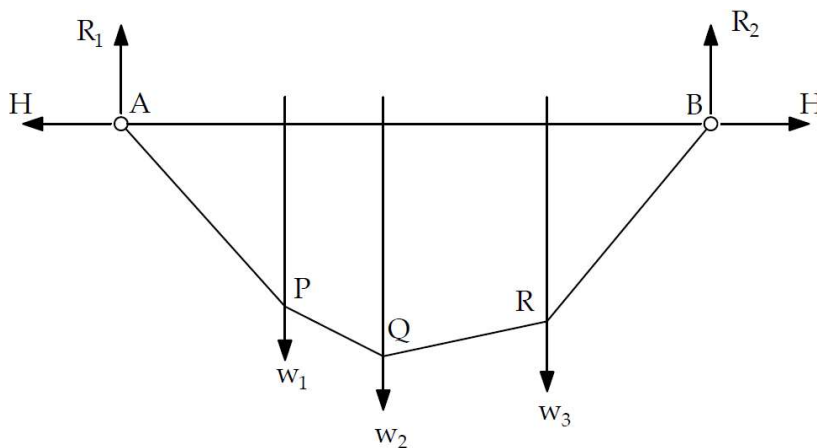


Figura 1.3 Funicolare dei carichi

Il problema della corda appesa e dell'arco dal punto di vista statico è lo stesso, ruotando la funicolare dei carichi di 180° otteniamo delle aste in compressione e non più in trazione, come nel caso della corda appesa, Teorema

di Hooke. La funicolare APQRB è la linea delle spinte in un arco caricato da w_1 , w_2 , w_3 , ovvero la curva delle pressioni. Se la curva delle pressioni è all'interno dello spessore dell'arco, la struttura reale è stabile poiché tutte le porzioni di arco lavorano a compressione e non a trazione, per cui la muratura si è assunta avere resistenza nulla.

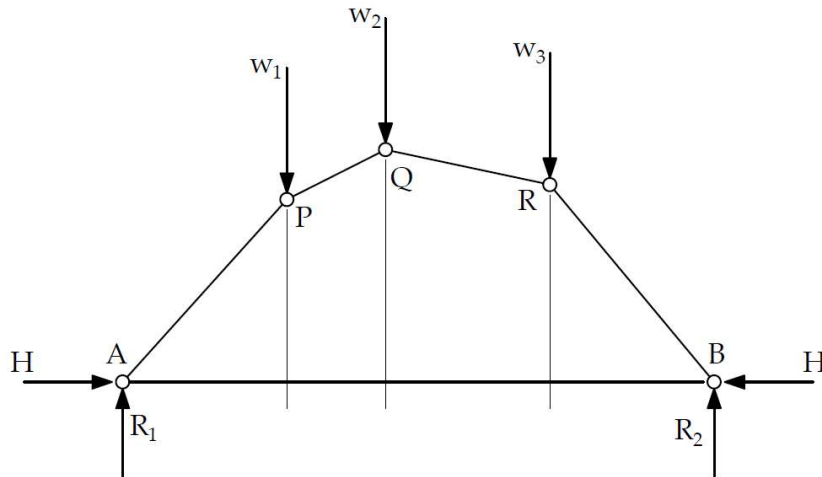


Figura 1.4 Curva delle pressioni di un arco

La curva delle pressioni è stata costruita supponendo noto il valore della reazione orizzontale H , di trazione per la corda e compressione per l'arco. Considerando un valore $H' < H$ per un arco si ottiene una funicolare AP'Q'R'B (figura 1.5) stirata verso l'alto; infatti, le ordinate di ogni sezione seguono il rapporto:

$$\frac{P'p}{Pp} = \frac{Q'q}{Qq} = \dots = \frac{H'}{H} \quad (1.2)$$

Quindi, un arco più basso spingerà le imposte con forze orizzontali maggiori rispetto ad un arco più alto, a parità di carichi e di luce.

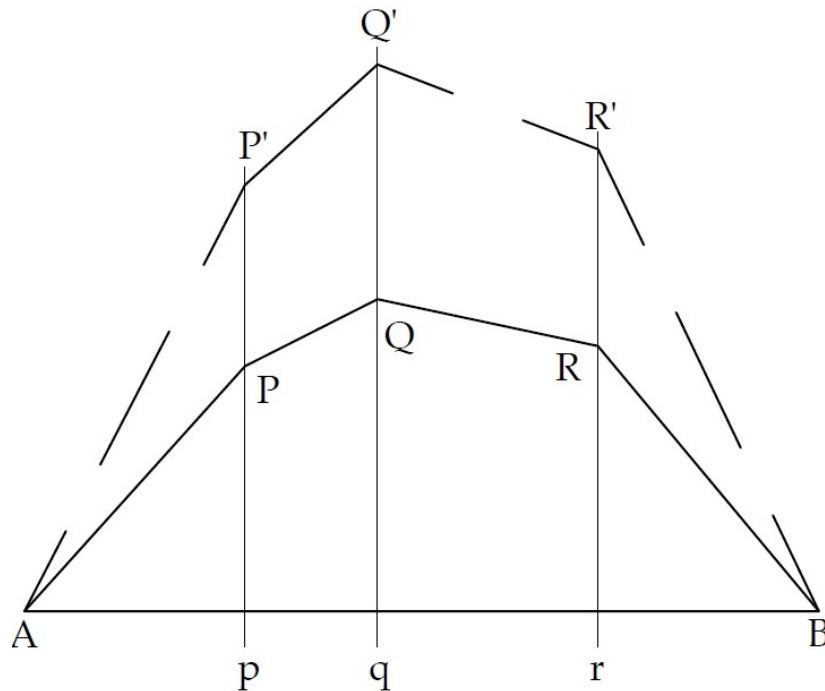


Figura 1.5 Curva delle pressioni in un arco

La funicolare è una catenaria, ovvero, in matematica, una curva piana iperbolica con due estremi vincolati, con un andamento caratteristico di una fune omogenea, flessibile, non estensibile, soggetta soltanto al proprio peso. Tale concetto è stato introdotto da Hooke, mettendo in relazione una fune in equilibrio e una medesima curva invertita all'interno di un arco rigido, quindi definendo l'inversa della catenaria, detta appunto funicolare dei carichi o curva delle pressioni, come curva ideale che deve essere contenuta nella geometria dell'arco affinché risulti stabile sotto relative condizioni di carico.

Il metodo grafico per la costruzione della curva delle pressioni, sopra descritto è stato proposto da Méry, da cui prende il nome, ed è basato sulla modellazione di un poligono di equilibrio vincolato a due punti: il terzo medio

inferiore nella sezione di imposta ed il terzo medio superiore nella sezione in chiave.

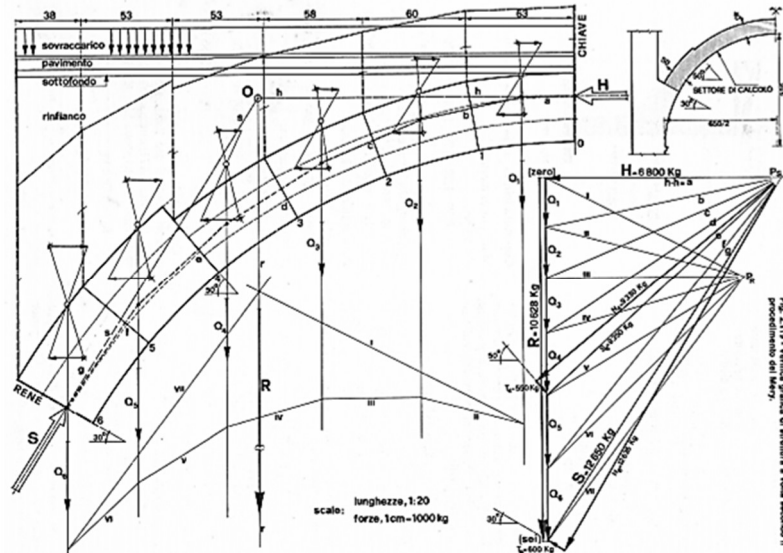


Figura 1.6 Metodo grafico di Méry

1.2.2 Stabilità dell'Arco-Heyman

Lo studio della stabilità degli archi murari fu introdotto da Jacques Heyman, riprende il metodo grafico per il tracciamento della curva delle pressioni, e determina il meccanismo di rottura ed il carico ultimo per il quale si raggiunge il collasso di un arco. Heyman ha semplificato l'analisi sull'arco, sulla base delle ipotesi fondamentali della teoria di Coulomb:

- Infinita resistenza a compressione della muratura;
- Resistenza a trazione nulla;
- Impossibilità di scorrimento tra conci.

Heyman descrive il collasso come un problema geometrico legato allo spessore dell'arco, afferma: "La struttura è stabile sotto un certo carico se e solo se è possibile trovare una funicolare dei carichi interamente contenuta nella geometria della struttura".

Quindi, se la risultante delle pressioni, per una generica sezione radiale, è posta sul bordo della sezione, si raggiunge la condizione di crisi locale con formazione di cerniera plastica. L'arco a tre cerniere è staticamente determinato, e la funicolare per carichi dati è unica. La formazione di una quarta cerniera fa sì che si raggiunga il meccanismo di collasso.

Sia dato un arco in muratura, di spessore $t = 2h$, con R risultante delle forze trasmesse da una generica sezione $S-S$, per l'ipotesi per cui i conci non possono scorrere tra loro, la componente tagliante T di R non influisce sul meccanismo di collasso. Quindi, lo stato di sollecitazione della struttura può essere descritto da soli due parametri, sforzo normale N e Momento $M = Ne$.

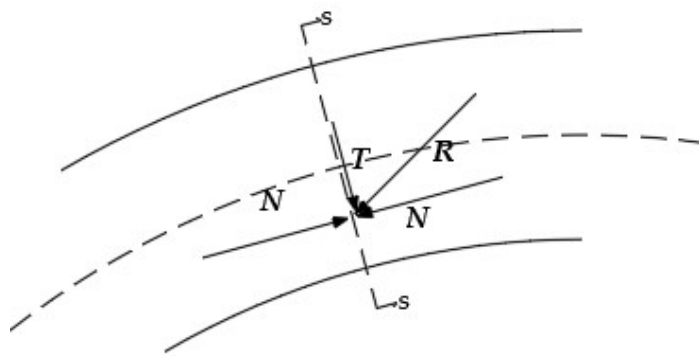


Figura 1.7 Concio di arco soggetto ad una forza R

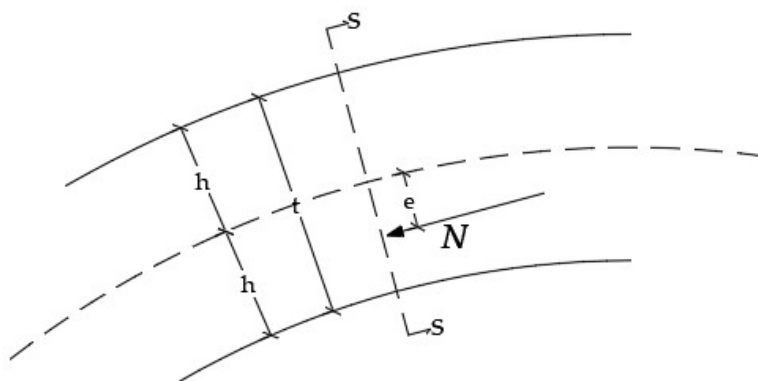


Figura 1.8 Momento sul concio di arco

Per $e = h$ tra i due conci contigui si forma una cerniera, allora la condizione per la formazione di una cerniera su un arco è: $M = \pm Nh$.

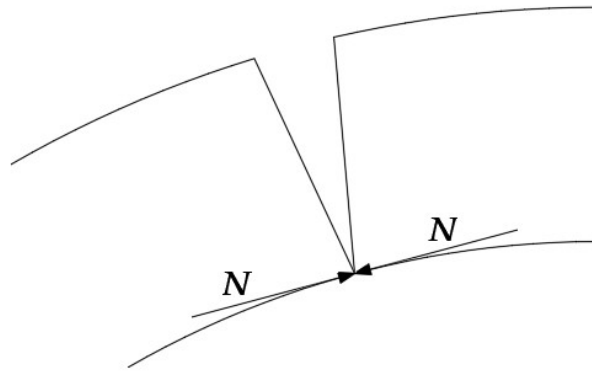


Figura 1.9 Formazione di una cerniera tra due conci contigui

Si costruisce la curva limite nel sistema coordinate M, N , che è rappresentata dalle rette di equazione $M = \pm Nh$ uscenti dall'origine O , essendo il materiale per ipotesi non reagente a trazione.

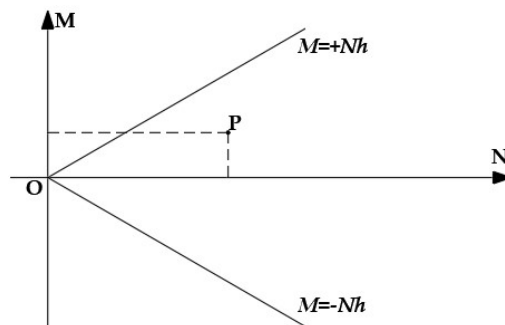


Figura 1.10 Dominio delle sollecitazioni ammissibili

Tutti i punti P all'interno dell'angolo formato dalle due semirette sono rappresentativi di uno stato di sollecitazione accettabile, in quanto i due conci sono ancora in contatto. I punti al di fuori del dominio rappresentano uno stato di sollecitazioni non ammissibili, ovvero la risultante delle forze interne R cadrebbe al di fuori della sezione e ciò non è accettabile per l'ipotesi di non resistenza a trazione del materiale.

Rimuovendo l'ipotesi di resistenza infinita alla compressione, ovvero assegnando un materiale con resistenza finita, la curva limite è rappresentata non da due semirette, ma da due archi di parabola. Heyman, esaminando diversi manufatti, ha constatato che gli sforzi interni e le dimensioni delle sezioni sono tali da rendere il rapporto tra sforzo normale e sforzo massimo molto piccolo: $\xi = \frac{N}{N_0} \ll 1$.

In particolare, lo sforzo normale N è compreso entro $1/30$ dello sforzo massimo N_0 , ciò consente di assimilare la curva limite alla bilatera.

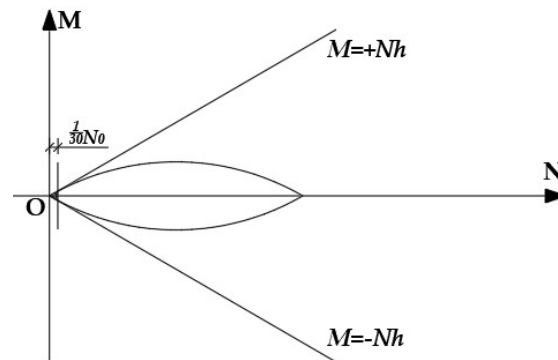


Figura 1.11 Curva limite di un arco di materiale con resistenza a compressione finita

1.2.3 Teoremi dell'Analisi Limite per un Arco Rinforzato

Per una struttura non rinforzata, ciò che è stato descritto precedentemente può essere riassunto nei teoremi dell'analisi limite:

- Teorema statico: la struttura è stabile se è possibile trovare un qualsiasi sistema di sollecitazioni interne in equilibrio con il carico esterno, ovvero la funicolare, per bilanciare i carichi, deve adagiarsi all'interno della sagoma dell'arco.
- Teorema cinematico: due generiche sezioni contigue possono ruotare relativamente attorno ad uno dei due bordi, sede di

cerniera, ma solo allontanandosi, mai comprimendosi. La rotazione produce allontanamento quindi distacco, non ammette la compenetrazione di materia.

Per archi rinforzati con FRP i teoremi dell'analisi limite sono validi con alcune modifiche:

- Teorema statico: la curva delle pressioni può cadere al di fuori dello spessore dell'arco in quelle porzioni di contorno che al contorno opposto sono rinforzate, mentre nelle rimanenti porzioni deve rimanere all'interno o sul bordo.
- Teorema cinematico: le cerniere, attorno cui ruotano le sezioni, si formano solo in punti del contorno i cui contorni opposti non sono rinforzati.

2. UTILIZZO DEI MATERIALI COMPOSITI PER ELEMENTI IN MURATURA (ARCHI)

2.1 Premessa

Dall'inizio degli anni Novanta l'utilizzo di rinforzo di strutture con materiali compositi è cresciuto significativamente, ciò grazie ai vantaggi offerti da questi tipi di materiali, come efficacia degli interventi, tempi brevi di esecuzione, peso e ingombro ridotti, e all'aumento del numero di prodotti sul mercato e conseguente deflazione dei prezzi.

In generale, il rinforzo di una struttura è necessario in occasione di diverse condizioni, tra cui le più frequenti:

- danneggiamento dovuto ad un carico eccezionale (sisma, incendio, impatto, ecc.);
- necessità di aumento dei carichi permanenti o accidentali, per adeguamento normativo o cambio d'uso della struttura;
- adeguamento o miglioramento sismico;
- errori di progettazione o di esecuzione (distribuzione delle armature errata o scarsa qualità del conglomerato in strutture in calcestruzzo armato);
- degrado dei materiali (corrosione delle armature metalliche per strutture in calcestruzzo armato)

In Italia l'applicazione di interventi di rinforzo di strutture di muratura con materiali compositi è notevolmente aumentata successivamente al sisma che ha colpito Umbria e Marche nel settembre del 1997, e nello stesso periodo si osserva una crescita degli studi di carattere teorico e sperimentale.

Con specifico riferimento alle strutture di muratura, gli interventi tipici di rinforzo con materiali compositi sono descritti da:

- rinforzo di archi e volte, in presenza di azioni sismiche, carichi verticali concentrati o disposti in modo non simmetrico;
- rinforzo di pannelli murari per le sollecitazioni derivanti da azioni sismiche;
- rinforzo a compressione per confinamento di colonne murarie;
- realizzazione di cinturazioni di piano;
- realizzazione di collegamento tra i paramenti di muri a sacco;
- realizzazione o miglioramento del collegamento tra pannelli di muratura ortogonali.

2.2 Materiali Compositi di Rinforzo

I prodotti di materiale composito comunemente utilizzati per il rinforzo delle strutture sono costituiti da fibre lunghe immerse in una fase continua, detta matrice. Le fibre sono l'effettivo rinforzo degli elementi strutturali, sono dotate di elevata resistenza a trazione e rigidezza assiale; la matrice invece garantisce una uniforme distribuzione degli stati tensionali tra le singole fibre e spesso funge da legante tra il supporto, elemento strutturale da rinforzare, e le fibre, garantendo la trasmissione degli stati tensionali tra supporto e fibre, ovvero l'aderenza.

2.2.1 Classificazione FRP

Le fibre più utilizzate sono di carbonio, di vetro o aramidiche, inoltre esistono prodotti realizzati con altri tipi di fibre come PVA o PBO. La matrice è costituita da un materiale polimerico, spesso resina epossidica perché ha un'elevata aderenza, e tali prodotti composti appunto da fibre lunghe e matrici polimeriche sono identificati con l'acronimo FRP (Fiber Reinforced Polymer).

I prodotti fibrosi utilizzati per il rinforzo delle strutture sono classificati in base alla morfologia come segue:

- Nastri o fogli, costituiti da sole fibre parallele, di spessore inferiore a 1 mm, con piccolissima rigidità flessionale. I nastri si applicano impregnandoli con la matrice all'atto dell'incollaggio sulla struttura da rinforzare.
- Tessuti, costituiti da fibre disposte in diverse direzioni, almeno due ortogonali (trama e ordito), con spessore inferiore a 1 mm, con piccolissima rigidità flessionale. Anche i tessuti sono applicati impregnandoli con la matrice all'atto dell'incollaggio sulla struttura da rinforzare.
- Reti di fibre, costituite da fibre raccolte in piccoli mazzi disposti a formare una rete a maglia quadrata o rettangolare con dimensioni poco superiori al centimetro. Hanno uno spessore inferiore a 1 mm, piccolissima rigidità flessionale e anche le reti sono impregnate con la matrice all'atto dell'incollaggio sulla struttura da rinforzare, può essere resina epossidica o anche malta a base cementizia.
- Lamine o lamelle, costituite da fibre parallele immerse nella matrice, di spessore superiore a 1 mm, dotate di una certa rigidità flessionale. Sono incollate alla struttura da rinforzare mediante resina epossidica.

Sono ottenute per pultrusione, un processo continuo in cui le fibre di rinforzo vengono formate, immerse nella matrice, e fatte consolidare.

I nastri, i tessuti e le reti grazie alla modestissima rigidità flessionale si adattano ben su superfici con piccoli raggi di curvatura, mentre le lamelle sono più adatte per superfici regolari. I tessuti, avendo fibre disposte in diverse direzioni, sono in grado di sopportare trazioni in diverse direzioni, mentre nastri e lamelle sopportano solo le trazioni nell'unica direzione delle fibre.

2.2.2 Caratteristiche Meccaniche delle Fibre

Il materiale composito è un materiale eterogeneo ed anisotropo; infatti, i rinforzi hanno elevata resistenza e rigidità esclusivamente a trazione nella direzione delle fibre, mentre sono molto modeste la resistenza a compressione, a trazione in direzione ortogonale alle fibre e a taglio. Quindi, è di interesse tecnico il legame costitutivo a trazione in direzione delle fibre, che è di tipo elastico lineare fino a rottura.

I parametri meccanici sono riferiti a una sezione nominale A_f o, adottando una larghezza unitaria, ad uno spessore nominale t_f , denominato anche spessore di calcolo. Nel caso dei prodotti impregnati in situ (nastri, tessuti, reti) lo spessore nominale è riferito alle fibre in una certa direzione ed è determinato con la relazione:

$$t_f = \frac{p_f}{\gamma_{fibre}} \quad (2.1)$$

In cui è p_f il peso delle fibre in una certa direzione per unità di superficie di rinforzo e γ_{fibre} è il peso specifico delle fibre.

Ad esempio, considerando un nastro con peso delle fibre di carbonio $p_f = 300 \text{ g/m}^2$ ed un peso specifico delle fibre $\gamma_{fibre} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$, si ottiene:

$$t_f = \frac{300}{1,8 \cdot 10^6} = 0,167 \text{ mm}$$

Analogamente, un tessuto con fibre di carbonio disposte lungo due direzioni ortogonali x e y, con peso totale di fibre $p_f = 400 \text{ g/m}^2$ e quantità di fibre doppie in direzione y rispetto x, avrà spessori nominali lungo x e y:

$$t_{fx} = \frac{1}{3} \frac{400}{1,8 \cdot 10^6} = 0,074 \text{ mm} \quad t_{fy} = \frac{2}{3} \frac{400}{1,8 \cdot 10^6} = 0,148 \text{ mm}$$

Nel caso di composti preformati, come le lamelle, lo spessore nominale è lo spessore del prodotto comprendente fibre e matrice e deve essere fornito dal produttore.

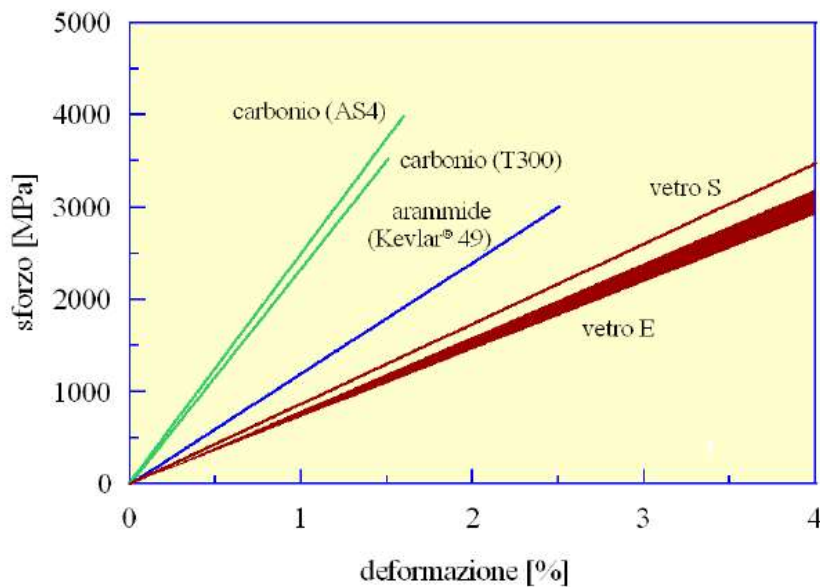


Figura 2.1 Legame costitutivo a trazione dei più comuni FRP

Le proprietà meccaniche del composito impregnato sono valutate tramite le seguenti relazioni:

$$f_f = \frac{F_{fu}}{A_{fib}} \quad (2.2)$$

$$E_f = \frac{F_{fu}}{A_{fib} \cdot \varepsilon_{fu}} \quad (2.3)$$

in cui sono indicati:

f_{fu} resistenza a trazione

F_{fu} massima forza di trazione in un rinforzo

E_f modulo elastico a trazione in direzione delle fibre

ε_{fu} deformazione di rottura

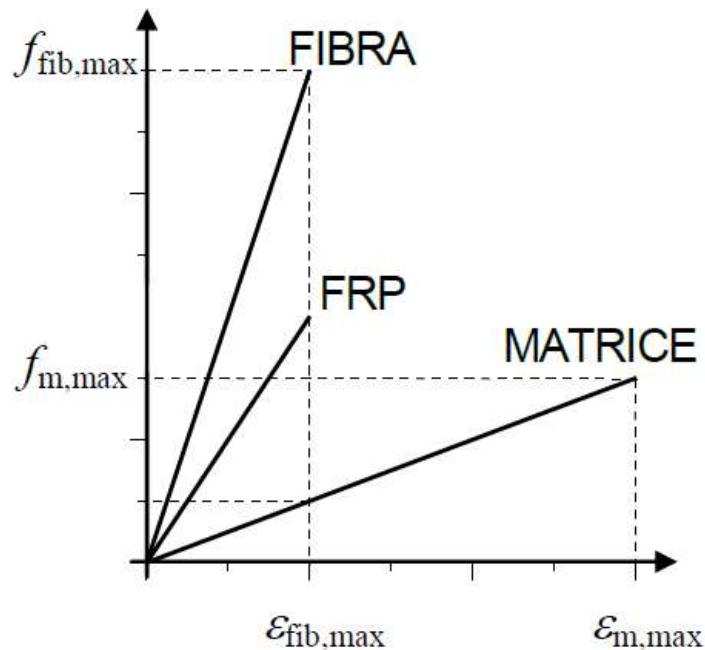


Figura 2.2 Legge costitutivo di fibre, matrice e relativo FRP

Analizzando i legami costitutivi di fibre, matrice e corrispondente materiale composito (Figura 2.2), si nota come il materiale composito ha una rigidità inferiore a quella della fibra, mentre giunge a rottura in corrispondenza di una deformazione $\varepsilon_{fib,max}$ coincidente con la deformazione di rottura delle fibre, poiché non è possibile un trasferimento degli sforzi dalle fibre alla matrice.

2.2.3 Matrice

Le matrici più utilizzate per i composti fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti. Le resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente. Per miscelazione con un opportuno reagente esse polimerizzano,

reazione di reticolazione, ovvero si formano macromolecole lunghe reticolate da cui si ottiene un solido vetroso. Sono caratterizzate da una bassa viscosità allo stato fluido e quindi da una relativa facilità di impregnazione delle fibre, da ottime proprietà adesive, da una buona resistenza agli agenti chimici, dall'assenza di una temperatura di fusione. I punti negativi sono rappresentati dalla bassa temperatura di transizione vetrosa, in cui il polimero passa dallo stato vetroso allo stato gommoso, che ne limita il campo di esercizio, dalla modesta tenacità a frattura con comportamento fragile e dalla sensibilità all'umidità durante l'applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più diffuse nel settore civile sono le epossidiche, altre impiegate sono le resine poliestere o vinilestere.

Le resine epossidiche sono caratterizzate da una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed inoltre presentano ottime proprietà adesive. Il reagente principale è costituito da liquidi organici a basso peso molecolare che contengono un certo numero di gruppi epossidici, anelli composti da un atomo di ossigeno e due atomi di carbonio.

Le resine poliestere sono caratterizzate da una viscosità inferiore rispetto a quella delle epossidiche e sono notevolmente versatili con elevata reattività. La resistenza meccanica e le proprietà adesive sono solitamente inferiori rispetto alle epossidiche, sono polimeri lineari ad alto peso molecolare, che contengono doppi legami C=C in grado di reagire chimicamente.

2.3 Istruzioni e Normativa

In Italia, le prime istruzioni emanate dal CNR sono datate 1998 (DT 109/98) e riguardano barre di armatura per il calcestruzzo e rinforzi esterni sempre limitatamente al calcestruzzo.

Nonostante l'utilizzo di materiali compositi di rinforzo si stesse diffondendo rapidamente, sia per il calcestruzzo sia per la muratura, la prima normativa italiana in cui questa tipologia di materiali è presente è l'Ordinanza P.C.M. 3274 del 2003. L'utilizzo di FRP viene citato come rinforzo al taglio di travi e pilastri in calcestruzzo armato e per il confinamento di strutture in c.a. In generale si evidenziava come la duttilità e la resistenza di tali strutture migliorasse.

Le istruzioni DT 200/2004 emanate dal CNR considerano i materiali compositi per il rinforzo di strutture in calcestruzzo armato e per il rinforzo di strutture in muratura; sono di riferimento per le normative nazionali. Scopo delle Istruzioni DT 200/2004 è quello di fornire nell'ambito delle attuali norme vigenti, un documento orientativo per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento strutturale mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.

2.3.1 Requisiti di Progetto

Il progetto del sistema di rinforzo deve soddisfare requisiti di resistenza, di esercizio e di durabilità. Inoltre, il sistema di rinforzo deve essere posizionato in modo da resistere a tensioni di trazione, non deve essere soggetto a tensioni di compressione.

Il rinforzo deve essere progettato facendo sì che il degrado atteso nel corso della vita utile della struttura rinforzata non ne riduca le prestazioni al di sotto del livello previsto.

Per assicurare durabilità all'intervento si tiene in considerazione:

- condizioni ambientali,
- destinazione d'uso della struttura,

- caratteristiche dei materiali preesistenti (composizione e proprietà) e di quelli utilizzati per la messa in opera del materiale composito,
- sito,
- particolari costruttivi,
- emisure protettive per incendi,
- manutenzione durante la vita utile.

2.3.2 Progetto di Rinforzo

Con riferimento al documento tecnico DT 200/2004, i valori di calcolo delle caratteristiche meccaniche dei rinforzi di materiale composito si determinano con il metodo dei coefficienti parziali, per cui deve essere verificato, per gli stati limite di esercizio SLE e per gli stati limite ultimi SLU:

$$E_d \leq R_d \quad (2.4)$$

con E_d ed R_d valori di progetto della generica sollecitazione presa in considerazione e della corrispondente capacità per lo stato limite indagato.

I valori di calcolo si ricavano dai valori caratteristici attraverso opportuni coefficienti parziali indicati in normativa in funzione dello stato limite considerato. Per la generica proprietà di resistenza o di deformazione di un materiale/prodotto il valore di calcolo è espresso come:

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_r}{\gamma_m} \quad (2.5)$$

dove η è un fattore di conversione per particolari problemi, X_r è il valore caratteristico della generica proprietà, e γ_m è il coefficiente parziale del materiale/prodotto che tiene conto del tipo di applicazione.

Modalità di collasso	Coefficiente parziale	Applicazione tipo A ⁽¹⁾	Applicazione tipo B ⁽²⁾
Rottura	γ_f	1.10	1.25
Delaminazione	$\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

Figura 2.3 Coefficienti parziali γ_m per materiali e prodotti

La resistenza di progetto è espressa come:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{rd}} \cdot R\{X_{d,i}; a_{d,i}\} \quad (2.6)$$

in cui $R\{.\}$ è una funzione riconducibile allo specifico modello meccanico (flessione, taglio, ...) e γ_{rd} coefficiente parziale che tiene conto delle incertezze del modello. Argomenti della funzione $R\{.\}$ sono $X_{d,i}$ valore di calcolo del materiale/prodotto utilizzato nel rinforzo o preesistente, ed $a_{d,i}$ valore nominale

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

dei parametri geometrici.

Figura 2.4 Coefficienti parziali γ_{rd}

In generale, per l'elemento rinforzato non può essere considerato un incremento della resistenza di progetto, dovuto al solo FRP, superiore al 60% rispetto all'elemento non rinforzato. In particolare, la resistenza a trazione di calcolo di un rinforzo si determina:

$$f_{fRd} = \eta_a \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \quad (2.7)$$

essendo

f_{fk} = resistenza a trazione caratteristica

γ_f = coefficiente parziale di sicurezza del materiale

η_a = fattore di conversione ambientale

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Figura 2.5 Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e vari sistemi di FRP.

In condizione di elasticità lineare dei rinforzi, alla resistenza di calcolo f_{fRd} corrisponde la deformazione di rottura di calcolo:

$$\varepsilon_{fRd} = \frac{f_{fRd}}{E_f} = \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (2.8)$$

in cui E_f e ε_{fk} sono rispettivamente il valore medio del modulo elastico e la deformazione di rottura caratteristica.

2.3.3 Delaminazione

Per un elemento strutturale rinforzato, le suddette relazioni indicano il raggiungimento dello stato limite ultimo per rottura del materiale di rinforzo. In realtà il collasso degli elementi strutturali rinforzati con materiali compositi avviene nella grande maggioranza dei casi per delaminazione, ossia distacco del materiale di rinforzo dal supporto (calcestruzzo o muratura). Ciò avviene per stati tensionali e deformativi molto inferiori a quelli di stato limite ultimo a rottura del materiale di rinforzo, quindi, le sollecitazioni resistenti degli elementi strutturali devono essere determinate con riferimento alle (2.7) e (2.8), o se inferiori, ai limiti dipendenti al fenomeno della delaminazione.

La deformazione ultima di calcolo è:

$$\varepsilon_{fd} = \min\{\varepsilon_{fRd}, \varepsilon_{d,db}\} \quad (2.9)$$

in cui $\varepsilon_{d,ab}$ è la deformazione del rinforzo alla quale corrisponde la sua delaminazione dal supporto, detta dilatazione di delaminazione.

Stabilite le relazioni di calcolo e note le caratteristiche meccaniche dei materiali dell'elemento strutturale da rinforzare, le sollecitazioni resistenti di calcolo dell'elemento rinforzato sono determinate utilizzando l'opportuno modello di calcolo meccanico. Infine, le sollecitazioni resistenti sono divise per un altro coefficiente parziale γ_{Rd} , coefficiente parziale di modello, che tiene conto di incertezze del modello meccanico, e sono confrontate con le sollecitazioni di calcolo a soddisfare la (2.4).

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Figura 2.6 Coefficiente parziale di modello γ_{Rd}

2.4 Rinforzo di Strutture Murarie

L'intervento di rinforzo si inserisce nell'ambito di un progetto complessivo di consolidamento strutturale. Il consolidamento, sia adeguamento o miglioramento, può essere realizzato:

- incrementando la resistenza di pannelli, archi o volte;
- cerchiando colonne allo scopo di incrementarne la resistenza a compressione e la duttilità;
- riducendo la spinta di strutture spingenti;
- trasformando elementi non strutturali in elementi strutturali, mediante conferimento di rigidità e capacità resistente;
- rafforzando e irrigidendo strutture orizzontali non spingenti;
- incatenando o fasciando lateralmente l'edificio all'altezza degli impalcati o della copertura.

La progettazione degli interventi di rinforzo deve garantire uno stato di trazione nei rinforzi di FRP. Infatti, i rinforzi di FRP soggetti a compressione non sono in grado di incrementare le prestazioni delle murature, in quanto, a parità di contrazione, la risultante degli sforzi di compressione a carico della muratura prevale su quella a carico del composito fibrorinforzato, a causa della notevole differenza di area tra la muratura compressa ed il rinforzo. Inoltre, i rinforzi compressi sono soggetti a possibile delaminazione per instabilità locale.

L'applicazione di rinforzi di FRP deve essere effettuata su elementi strutturali di adeguate proprietà meccaniche. Qualora la muratura sia danneggiata tale che si precluda la corretta trasmissione degli sforzi con il rinforzo, si deve procedere al suo preconsolidamento con tecniche tradizionali. Inoltre, visto le diverse tipologie di rinforzo disponibili sul mercato (fibre di vetro, di carbonio, aramidiche), la scelta del sistema a base di FRP deve tener conto delle proprietà fisiche e chimiche della muratura allo scopo di scegliere la soluzione più idonea.

Quando si applicano tessuti o lamine di FRP su superfici murarie, si deve tener presente la completa assenza di traspirabilità dei materiali compositi. Per tale motivo gli interventi di rinforzo strutturale eseguiti con tali materiali non devono, di norma, interessare estese superfici della muratura al fine di preservare un'adeguata traspirabilità del sistema.

2.4.1 Rinforzo di Elementi Strutturali a Semplice Curvatura

Il rinforzo con materiali compositi incrementa notevolmente i carichi di collasso delle strutture in muratura; perciò, le analisi sono effettuate relativamente alla condizione di collasso. Per semplicità si considerano sistemi piani, come per volte con sezione costante, archi.

Gli elementi strutturali a singola o a doppia curvatura perdono generalmente la funzionalità per formazione di cerniere che attivano meccanismi di collasso. Le cerniere si formano nelle strutture murarie a semplice e doppia curvatura a causa della limitata resistenza a trazione della muratura. Generalmente un arco o un portale collassa per formazione di almeno 4 cerniere. La scelta di disporre il rinforzo in intradosso o in estradosso deriva, più che da considerazioni di carattere strutturale, da questioni legate alle condizioni di esecuzione, come accessibilità in estradosso o presenza di decorazioni di pregio in intradosso.

Sia in intradosso che in estradosso, la trazione del rinforzo impedisce il formarsi di cerniere sul bordo opposto a quello rinforzato, grazie all'aderenza con il supporto, ovvero la muratura. Data la curvatura, per avere l'equilibrio nella muratura, si hanno tensioni normali alla superficie di interfaccia muratura-FRP teso. Per rinforzi intradossali sono tensioni normali di trazione, mentre per rinforzi estradossali sono tensioni normali di compressione (Figura 2.7).

La forza di distacco normale al piano di adesione è di difficile quantificazione, se non attraverso prove sperimentali condotte sul paramento in corrispondenza degli interventi di rinforzo previsti.

Le istruzioni tecniche del CNR suggeriscono:

$$\sigma_b = \frac{F_f}{b_f \cdot R} \quad (2.10)$$

essendo

F_f = forza di trazione nel rinforzo

R = raggio di curvatura della superficie di interfaccia

b_f = larghezza del rinforzo

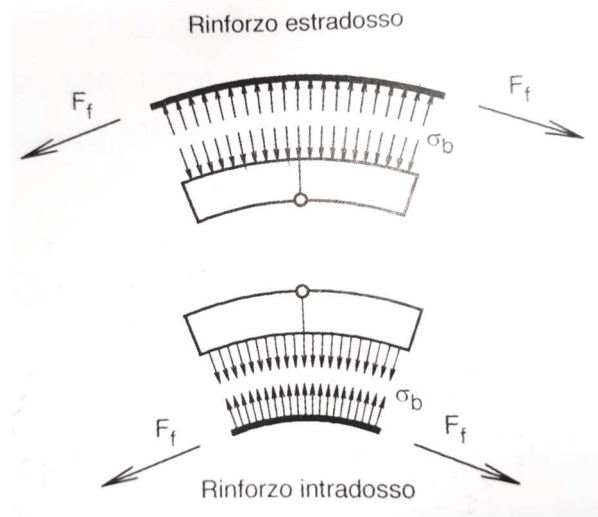


Figura 2.8 Tensioni normali alla superficie di aderenza all'intradosso e all'estradosso

Prevedono, inoltre, per casi di tensioni normali di trazione (rinforzi intradosso) e di modesta curvatura, un coefficiente riduttivo α_c .

Un'altra caratteristica strutturale importante per la scelta del rinforzo intradosso o estradosso è la spinta delle imposte. Per archi caricati verticalmente verso il basso, il rinforzo estradosso non verifica l'equilibrio della struttura se alle imposte non è presente una spinta orizzontale non nulla. Quindi l'equilibrio di un arco caricato verticalmente e rinforzato solo in estradosso non è verificato. Invece, un rinforzo intradosso, verifica e soprattutto permette la verifica dell'equilibrio con spinta orizzontale alle imposte nulla (Figura 2.8). Si

può affermare che nel caso di archi appoggiati su elementi con capacità di fornire una forza orizzontale scarsa, risulta conveniente il rinforzo all'intradosso.

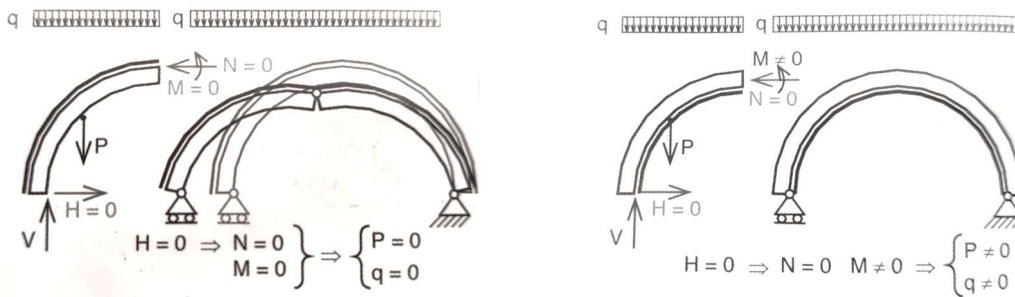


Figura 2.8 Schema arco con rinforzo estradosale e intradosale

Le istruzioni DT 200/2004 del CNR considerano la resistenza della muratura a tensioni di trazione nulla, indicando le verifiche da eseguire per l'arco rinforzato:

- verifica di meccanismo;
- verifica a pressoflessione, considerando la possibilità di rottura per schiacciamento della muratura e di rottura a trazione del composito fibrorinforzato;
- verifica a taglio;
- verifica di delaminazione.

2.5 Casi Studio di Rinforzi con Materiali Compositi

2.5.1 Chiesa di San Matteo Apostolo in Nicciano (LU)

La Chiesa di San Matteo Apostolo di Nicciano (LU) è una costruzione in pietra di origine medievale. L'edificio è costituito da muri portanti che sorreggono delle volte protette da una copertura in legno immediatamente soprastante le volte stesse. La struttura ha subito alcuni interventi a seguito di

eventi sismici, come la ricostruzione della copertura e la realizzazione di un sistema di incatenamento per eliminare la spinta di archi e volte alle imposte.

A seguito dell'attività sismica del 2013 si sono evidenziate problematiche in 2 volte della navata principale e nell'arco che le separa. Attraverso il rilievo con georadar è stato possibile tracciare l'andamento delle fessurazioni e la profondità, oltre allo spessore della volta stessa, ciò operando dall'intradosso, senza smantellare la copertura in legno all'estradosso.

Le volte sono state rinforzate all'estradosso con tessuti unidirezionali in fibra di carbonio e resina epossidica, si è reso necessario lo smontaggio della copertura per non intaccare le decorazioni all'intradosso. Le fasce sono state distribuite in modo da seguire l'andamento delle tensioni principali di trazione, e ancorate alle imposte mediante barre pultruse in fibra di carbonio, trasferendo le tensioni dall'arco alla fibra di rinforzo e all'imposta, in zona compressa.



Figura 2.9 Applicazione tessuti di fibra di carbonio con resina epossidica

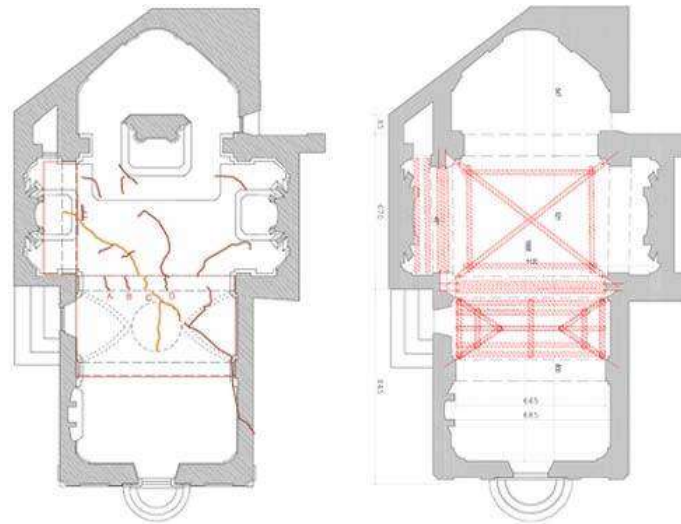


Figura 2.10 Quadro fessurativo e disposizione FRP

2.5.2 Cattedrale Santa Maria Annunziata (MC)

Le scosse sismiche, che nel 2016 hanno colpito le Marche, hanno lesionato l'abside della Cattedrale di Camerino. La Soprintendenza delle Marche ha optato per una cerchiatura con fasce in FRP, in modo da non avere ingombri sulle vie di accesso al centro storico.

Dapprima si è provveduto alla cucitura delle lesioni con l'inserimento di barre elicoidali a secco, dopodiché è stato applicato un sottofondo, a base di calce idraulica naturale ed eco-pozzolana, un primer epossidico, e quindi la resina epossidica ed il tessuto unidirezionale in fibra di carbonio.



Figura 2.11 Cattedrale Santa Maria Annunziata



Figura 2.12 Cerchiatura con FRP dell'abside lesionata

2.5.3 Ponticello in Pietra in Sud Sardegna

L'intervento di manutenzione straordinaria che ha interessato la struttura voltata del ponticello in pietra è stato necessario per l'evidenza di ampie fessurazioni longitudinali, ovvero parallele al senso di marcia, tale che si stava scomponendo la volta in archi elementari.

Il rinforzo strutturale è stato realizzato con fasce in fibra unidirezionale di fibra di carbonio, applicando, in ordine, il primer, la resina epossidica e la fibra poi impregnata.



Figura 2.13 Ponticello in pietra

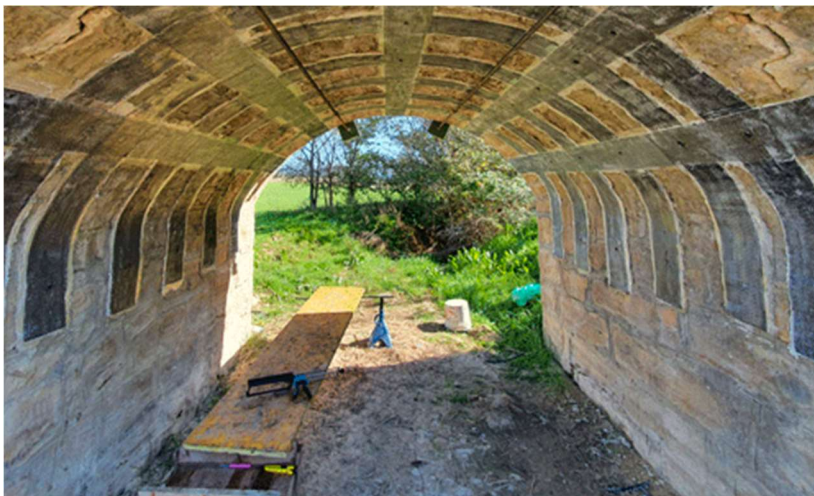


Figura 2.14 Fasce di fibra di carbonio all'intradosso

2.5.4 Santuario della Madonna dell'Ambro (FM)

Il santuario è stato sottoposto a un delicato intervento di recupero e miglioramento sismico in seguito al terremoto dell'Agosto del 2016. Per gli interventi sono state impiegate le soluzioni di tecnologia FRP e FRCM scegliendo

materiali per il recupero strutturale adatti alla presenza di affreschi o superfici antiche decorate.

In seguito al terremoto la struttura ha riportato notevoli lesioni che ne hanno compromesso la funzione statica. La messa in sicurezza ha previsto diversi interventi, tra cui consolidamento delle cappelline laterali, della volta in mattoni della navata e posizionamento di una fascia di fibre di carbonio per l'antiribaltamento dell'abside. Per il consolidamento estradossale delle volte esistenti è stato utilizzato un sistema FRCM composto da una matrice inorganica a base di calce idraulica naturale ed eco-pozzolana assieme ad una rete in fibra di basalto. Nella zona dell'abside è stato effettuato un intervento di cerchiatura con il sistema FRP, ovvero l'applicazione di tessuto unidirezionale in fibra di carbonio.



Figura 2.15 Volta della navata centrale



Figura 2.16 Puntellamento dell'abside per la cerchiatura con una fascia di FRP

3. SPERIMENTAZIONE DI UN ARCO IN MURATURA CON BFRP

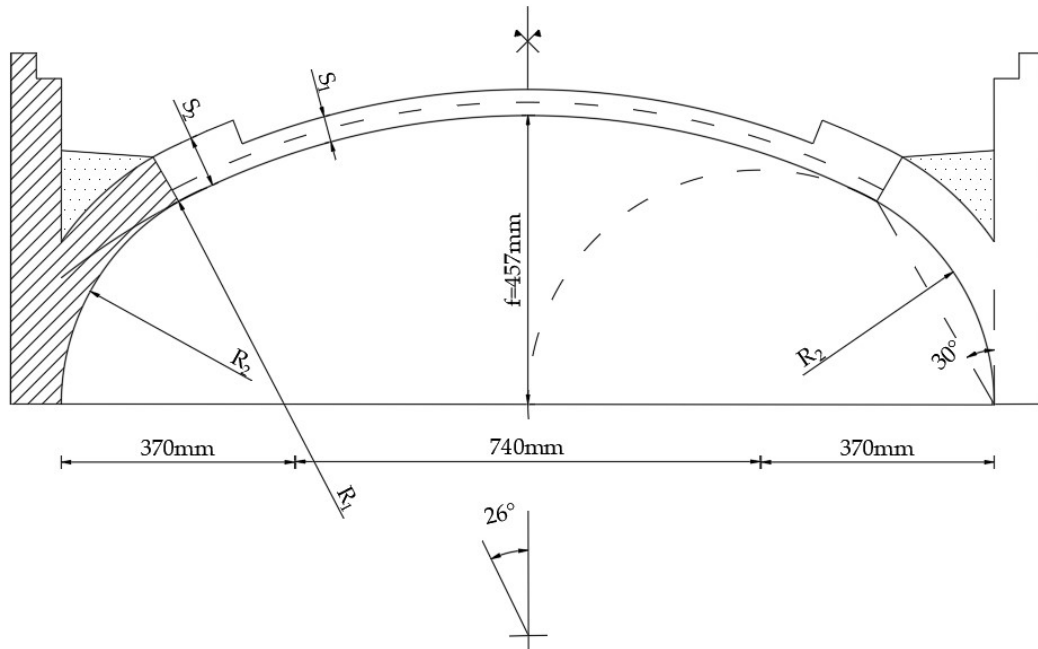
3.1 Premessa

La seguente tesi si collega alla sperimentazione di un modello di arco in muratura di un precedente studio, il quale analizza il comportamento dell'arco, sottoposto a carico crescente, in seguito all'applicazione di fibre di basalto (BFRP). L'analisi comprende la realizzazione del modello in laboratorio, le prove di carico effettuate sull'arco integro, il rinforzo in fibre di carbonio, le prove di carico sull'arco rinforzato fino a rottura.

L'arco utilizzato in laboratorio è la riproduzione, in scala 1:4, di una striscia di profondità unitaria della parte strutturale principale della volta in muratura rilevata nella ex caserma Villarey, attualmente sede della Facoltà di Economia e Commercio della città di Ancona. L'edificio, costruito tra il 1865 e il 1867, è composto da tre corpi di fabbrica simmetrici e da una corte centrale. Le volte a sesto ribassato (policentriche) caratterizzano i locali a pianta rettangolare e lo spazio architettonico del luogo, sono tutte delle stesse dimensioni, circa 6x12 m.

Il modello di arco in muratura è stato costruito cercando di rispettare il numero di mattoni presenti nella striscia di volta reale considerata. La parte centrale del modello, quella più sottile, ha uno sviluppo medio dell'intradosso pari a 89,2 cm ed è costituita da 75 mattoncini tagliati a mano, intervallati da 76

giunti di malta dello spessore medio di circa 0,25 cm. Le dimensioni nominali medie di ogni mattoncino sono circa 1x4x8.



Luce L (mm)	Profondità B (mm)	Raggio R ₁ (mm)	Raggio R ₂ (mm)	Angolo θ (°)	Spessore S ₁ (mm)	Spessore S ₂ (mm)	Freccia f (mm)
1480	250	1200	370	26	80	40	457

Figura 3.1 Geometria dell'Arco

Realizzati i conci, per assemblare l'arco è stata utilizzata una centina in metallo, esatta riproduzione del profilo dell'intradosso, e per ottenere una giacitura dei mattoni sempre perpendicolare al profilo due aste metalliche come guide, incernierate nel centro di curvatura maggiore e minore.

3.2 Carico sull'Arco

3.2.1 Prove di Carico sull'Arco Integro

Le prove di carico sono state diverse, con l'obiettivo di comprendere il comportamento dell'arco integro, partendo dal ricreare le condizioni della prova in situ, in scala. Le condizioni al contorno sono state considerate infinitamente rigide, supponendo i piedritti murari fissi, come osservato dai risultati della

prova in situ, in cui si è osservato che le estremità della volta non hanno subito spostamenti.

È stato realizzato un cuscinetto di sabbia fino alla quota del pavimento all'estradosso, per diffondere il carico con un angolo di circa 45° come nella realtà. Utilizzando tondini d'acciaio $\phi 18$, di lunghezza 25 cm, come la larghezza dell'arco, la prova è stata realizzata attraverso 10 gradini di carico, con un carico massimo di 176 daN.

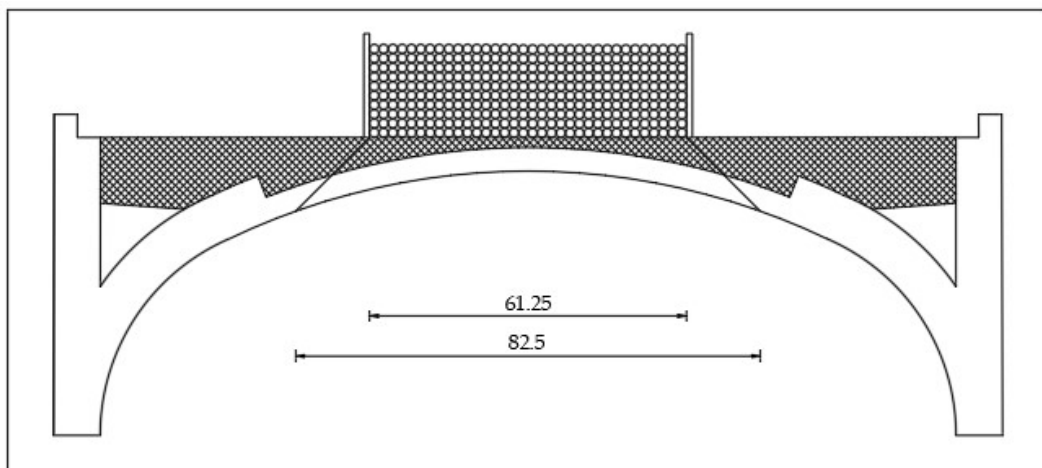


Figura 3.2 Carico Arco Non Rinforzato

La strumentazione utilizzata durante la prova è composta da:

- 13 trasduttori di spostamento induttivi, di cui 11 posizionati in mezzeria all'intradosso per gli spostamenti verticali, e 2 posizionati a destra e a sinistra dell'arco per gli spostamenti orizzontali.
- 5 estensimetri induttivi, posizionati in corrispondenza delle sezioni scelte per valutarne le deformazioni.
- 2 martinetti idraulici, applicati sui piedritti, per simulare i carichi verticali dovuti ai piani superiori.

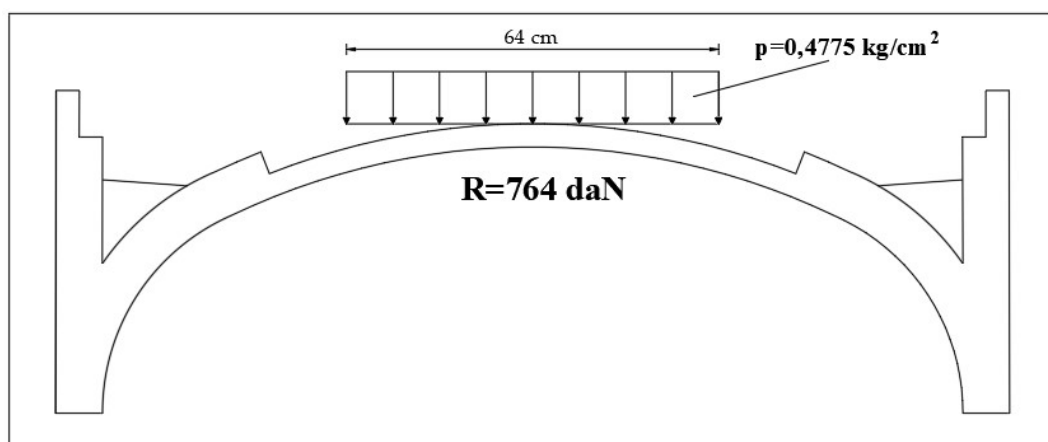
Si sono svolti 11 cicli di carico-scarico, i primi 4 per far adattare la struttura, mentre il resto dei cicli sono serviti a portare la struttura alle condizioni più vicine a quella reale.

3.2.2 Condizione di Carico Sfavorevole

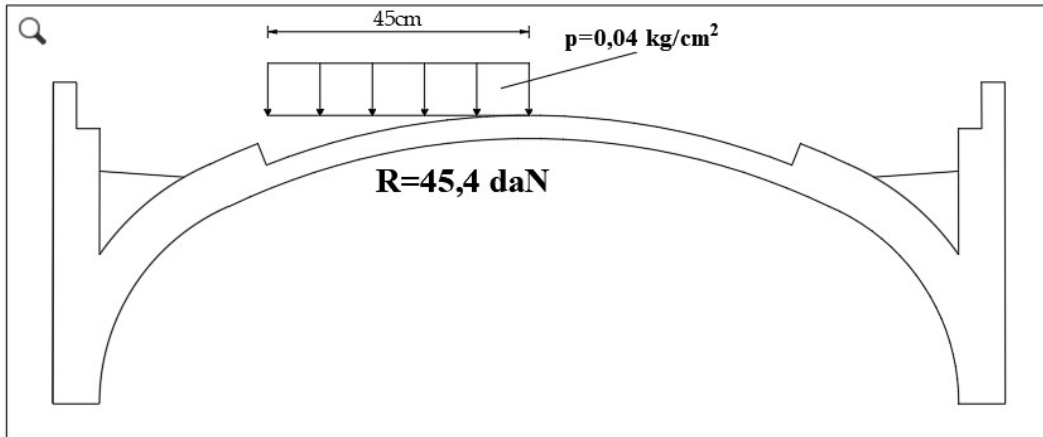
Da diversi studi, è noto che la condizione di carico più sfavorevole, ovvero in cui la struttura ad arco raggiunge con più facilità lo stato di collasso della struttura, è quella di carico non simmetrico, in particolare per carico applicato concentrato ad un quarto della campata.

Il comportamento dell'arco è stato analizzato con diverse condizioni di carico utilizzando il metodo di calcolo agli elementi finiti (FEM), da cui si sono analizzate alcune condizioni di carico per individuare e verificare quella più sfavorevole. Si è proceduto per piccoli incrementi di carico, terminando la prova alla formazione delle prime fessure e confrontando i valori per cui queste si sono aperte. Si riportano i risultati ottenuti in termini di risultante di carico alla prima fessurazione:

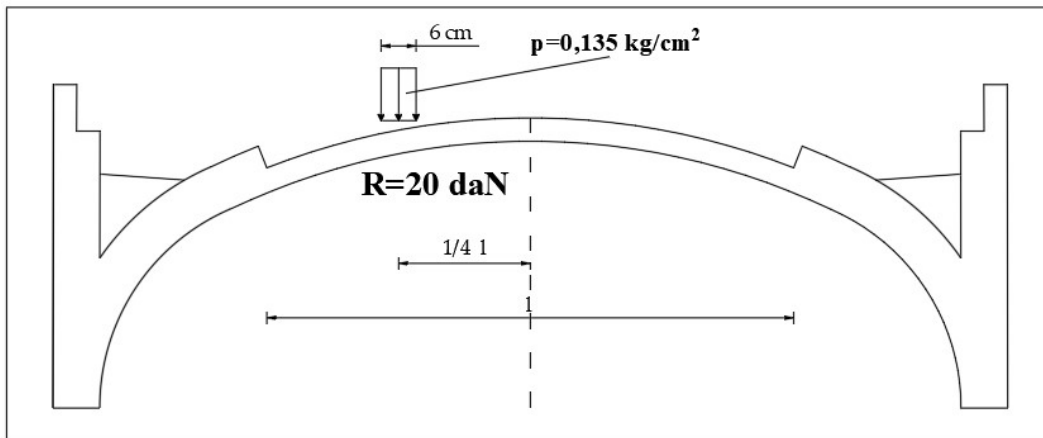
- Carico simmetrico uniformemente distribuito



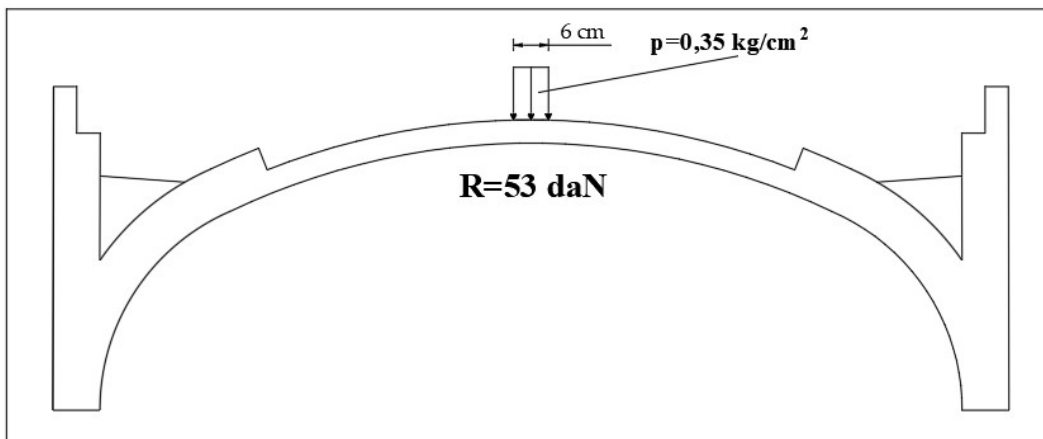
- Carico uniformemente distribuito non simmetrico



- Carico quasi concentrato simmetrico



- Carico quasi concentrato non simmetrico



È stato indicato con carico quasi concentrato, un carico distribuito su una superficie molto piccola 6x25 cm, inoltre nell'ultima condizione, il carico è stato applicato a $\frac{1}{4}$ della luce.

Si evince dai risultati che la condizione più sfavorevole è la condizione non simmetrica, infatti, sia per carico distribuito che concentrato la prima fessurazione avviene per carichi inferiori, in particolare, come sostenuto in letteratura, la condizione più sfavorevole è quella di carico concentrato non simmetrico.

3.2.3 Analisi Fessurativa

Facendo riferimento alla condizione più sfavorevole di carico concentrato non simmetrico, si è proceduto prima all'applicazione del peso proprio e poi a quella del carico concentrato incrementando di 1 daN alla volta, fino ad un massimo di 60 daN. In corrispondenza di 47 daN si può notare che la prima zona fessurata risulta proprio al di sotto del punto di applicazione del carico, per un valore di 20 daN. Incrementando fino a 25 daN, si ha una propagazione delle fessure in tale zona fino ai $\frac{2}{3}$ dello spessore, con un principio fessurativo a sinistra del carico, in corrispondenza della variazione dello spessore dell'arco.

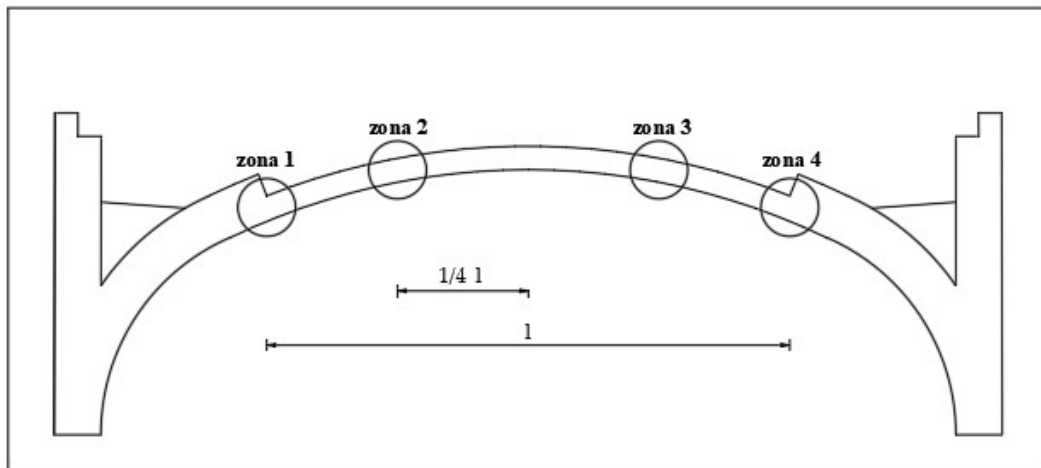


Figura 3.3 Zone fessurate nell'arco

Dopo la formazione di queste prime fessure si ha un notevole rallentamento dell'evoluzione fessurativa verso l'interno delle sezioni, fino a 39 daN di carico concentrato per il quale si hanno le prime fessure a destra del carico tra il punto di applicazione del carico e la variazione di sezione dell'arco (zona 4).

Oltre si ha una degenerazione molto repentina per piccoli incrementi di carico, incrementando di soli 2 daN il carico precedente si formano le prime fessure anche nella zona 4, mentre si propagano molto velocemente nelle zone 2 e 3. Già a 44 daN la fessurazione della zona 4 si è estesa a tutto lo spessore.

In questo caso di carico concentrato non simmetrico, il meccanismo di collasso potrebbe avvenire per la formazione di tre cerniere allineate oppure per la formazione di quattro cerniere. La cerniera indica la completa mancanza di trasferimento di qualsiasi sollecitazione flettente, le uniche sollecitazioni trasmesse attraverso una cerniera sono quelle di taglio e sforzo normale. Quando una sezione fessurata per gran parte dello spessore, la rimanente zona è soggetta a notevoli tensioni normali, che raggiungono valori massimi di resistenza a compressione portando ad una rottura fragile.

La fessurazione avviene all'intradosso in corrispondenza del carico, mentre all'estradosso nelle zone adiacenti uno e tre, per questo motivo le zone fessurate potrebbero allinearsi determinando un collasso. In realtà ciò non avviene perché si hanno sempre piccoli spostamenti fino alla formazione della quarta zona fessurata. Quindi l'unico modo di collasso possibile avviene per formazione di quattro cerniere, soprattutto dopo i 44 daN di carico applicato, che per questo viene assunto come carico di collasso, oltre il quale si registra un repentino aumento degli spostamenti.

3.3 Sperimentazione con BFRP

3.3.1 Rinforzo in Fibra di Basalto

La struttura degradata è stata rinforzata impiegando materiali compositi, i cosiddetti FRP, in particolare la fibra di basalto BFRP. Successivamente all'applicazione del rinforzo si è eseguita la prova a carico quasi concentrato non simmetrico, incrementandolo fino a rottura della struttura.

Il basalto è una roccia effusiva di natura vulcanica di colore scuro o nero con un contenuto di silice relativamente basso, proviene da un magma solidificatosi velocemente a contatto di aria o acqua ed è la principale roccia costituente la parte superiore della crosta oceanica. Le fibre di basalto sono molto sottili, appartengono alla categoria delle fibre minerali assieme alle fibre di carbonio ed alle fibre di vetro, ma rispetto a quest'ultime, hanno migliori proprietà meccaniche e fisiche, e un costo significativamente inferiore rispetto alle prime. Sono ottimi isolanti termici e acustici, mantengono le proprietà meccaniche anche ad alte temperature e sono molto stabili chimicamente, sia in ambiente acido che alcalino. La fibra di basalto è molto utilizzata come fibra di rinforzo di sistemi compositi FRP per il consolidamento e rinforzo strutturale di

elementi in muratura o in cemento armato, oltre che, come materiale isolante nel settore dell'edilizia e della bioedilizia.

Per la sperimentazione in laboratorio è stato utilizzato il tessuto unidirezionale in fibra di basalto FIDBASALT UNIDIR 400 C95, della ditta Fidia (vedi scheda tecnica). Il tessuto è termosaldato con fili di poliestere per evitare sfilacciamenti e semplificare la posa in opera. I vantaggi offerti sono:

- resistenza a usura per sfregamento;
- stronza non suscettibilità a fenomeni di idrolisi;
- resistenza corrosione; elevata tenacità, resistenza ad urti e impatti violenti;
- elevata resistenza a fatica e vibrazioni;
- durabilità e leggerezza;
- Scarsa conducibilità termica ed elettrica.

FIDBASALT UNIDIR 400 C95®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI BASALTO AD ALTA RESISTENZA PER IL RINFORZO STRUTTURALE



FIDIA srl
Technical Global Services



Proprietà geometriche e meccaniche*

-Luglio 2012-

Fibra secca (filato)

Tensione caratteristica a trazione, σ_{fibre}	3080 MPa
Modulo elastico, E_{fibre}	100 GPa
Deformazione a rottura, ϵ_{fibre}	3,15 %
Densità	2,80 g/cm ³

Tessuto impregnato (valori per il calcolo)

Titolo filato	1200 Tex
n° fili/cm	3,3 Fili/cm
Massa	400 g/m ²
Spessore equivalente del rinforzo FRP, t_r	0,140 mm
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, f_{tk}	2000 MPa
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, E_r	95 GPa
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, ϵ_r	2,30 %

*Le proprietà del tessuto impregnato con resina FIDSATURANT sono state determinate secondo le direttive delle norme UNI e ASTM di riferimento così come indicato nel documento CNR-DT 200/2004 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati". Il sistema è classificato di **TIPO A**, come riportato nel documento CNR-DT 200/2004 al cap.2 paragrafo 2.5. I valori caratteristici vengono ricavati dal valore medio meno due volte la deviazione standard.

CARATTERISTICHE MATERIALE

Descrizione

Il tessuto unidirezionale **FIDBASALT UNIDIR 400 C95®** in fibra di basalto ad alta resistenza ed elevata stabilità grazie alla particolare termosaldatura in grado di garantire un'ottima lavorabilità in cantiere. Il tessuto viene installato mediante matrici organiche di tipo epossidico.

Ideale per:

- Adeguamento statico e sismico di elementi strutturali in cemento armato, acciaio, muratura di mattoni, pietra naturale, legno;
- Rinforzo di nodi trave-pilastro;
- Rinforzo a pressoflessione e taglio di pilastri e setti;
- Rinforzo di travi a flessione e taglio;
- Limitazione di stati fessurativi;
- Confinamento e cerchiatura;

Vantaggi:

- ottima resistenza a trazione;
- incremento trascurabile di spessore;
- facilità e rapidità d'installazione;
- compatibilità con diverse tipologie di matrici organiche;
- durabilità e leggerezza;
- trasparenza elettromagnetica.

SEDE LEGALE:

Via Gerardo Dottori, 85 06132 San Sisto (PG) Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A.: 181644 Iscr. Trib. PG 28053—Cap.Soc. € 118.000

SEDE OPERATIVA:

Via Y. Gagarin, 61/63 06070 San Mariano (PG) Tel. (+39) 075 5173078 Fax. (+39) 075 5178358

DIREZIONE TECNICA E COMMERCIALE

Piazza del Duomo, 17 20121 Milano Tel. (+39) 02 72093424 Fax. (+39) 02 45471830

Website: www.fiditaglobalaservice.com—E-mail: tecnico@fiditaglobalaservice.com

Pag. 1 di 3



FIDBASALT UNIDIR 400 C95®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI BASALTO AD ALTA RESISTENZA PER IL RINFORZO STRUTTURALE



FIDIA srl
Technical Global Services

MODALITA' DI APPLICAZIONE

L'applicazione del tessuto FIDBASALT UNIDIR 400 C95® può essere effettuata, solamente mediante:

• **Matrici Organiche:**

- **resine epossidiche bi componenti tixotropica (FIDSATURANT) ottenendo così il composito BFRP (Basalt Reinforced Polymer);**

Per maggiori informazioni nello specifico di ogni tipologia di impiego, fare riferimento alle voci di capitolato e per qualsiasi approfondimento contattare il nostro staff tecnico a tecnico@fidialabalservice.com.

Vengono di seguito elencate per punti le fasi di lavorazione:

1) Preparazione del sottofondo (per ulteriori approfondimenti si rimanda alla scheda tecnica del prodotto impiegato).

Per supporti murari: il supporto deve essere coeso e consistente, preparato asportando polvere, efflorescenze saline, parti inconsistenti, materiale organico, muffe e disarmani, ed eventualmente trattato con opportuno sistema di protezione dalla formazione di sali idrosolubili da concordare con la D.L.

Per supporti in c/c: il supporto dovrà essere trattato con sabbatura o idro-sabbatura al fine di asportare il calcestruzzo degradato, contaminato dagli agenti aggressivi e/o soggetto a carbonatazione o eliminare le parti poco coese e allo scopo di creare una ruvidità artificiale che favorisca l'aggrappo della malta da ripristino. Le barre d'armatura affioranti e soggette a corrosione (se presenti) dovranno essere pulite fino all'eliminazione della ruggine e successivamente trattate con passivante.

2) Rasatura della superficie

Eseguire la rasatura della superficie mediante malta (seguendo le prescrizioni della scheda tecnica del produttore) al fine di eliminare eventuali asperità e materiali incoerenti, e fino a ripristinare la sezione e garantire una superficie piana senza concavità.

3) Stesura primo strato

Applicare una prima mano di resina epossidica adesivo-impregnante (FIDSATURANT), avendo cura di inglobare il materiale all'interno della matrice assicurandosi che la resina fuoriesca tra i filamenti.

4) Stesura e impregnazione del tessuto

Assicurandosi che lo strato sia ancora "fresco", applicare il tessuto prestando attenzione a non formare grinze, spianandolo manualmente oppure a mezzo di rullo per eliminare eventuali bolle d'aria.

5) Stesura secondo strato

Applicare una seconda mano di resina (FIDSATURANT) sino al completo inglobamento del tessuto nella matrice, senza che nessun filamento rimanga visibile ed esposto.

6) Finitura e protezione del sistema

Nel caso di matrice epossidica terminare con un eventuale spolvero di sabbia al quarzo di opportuna granulometria per garantire l'aggrappo di un eventuale successivo intonaco. Qualora il sistema di rinforzo venga installato in ambienti particolarmente aggressivi, e qualora non sia previsto un ulteriore intonacatura/protezione del sistema, si consiglia l'applicazione di una pittura epossidica/poliuretana per un'ulteriore protezione del sistema di rinforzo, secondo prescrizioni progettuali.

SEDE LEGALE:

Via Gerardo Dottori, 85 06132 San Sisto (PG) Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A.: 181644 Iscr. Trib. PG 28053—Cap.Soc. € 118.000

SEDE OPERATIVA:

Via Y. Gagarin, 61/63 06070 San Mariano (PG) Tel. (+39) 075 5173078 Fax. (+39) 075 5178358

DIREZIONE TECNICA E COMMERCIALE:

Piazza del Duomo, 17 20121 Milano Tel. (+39) 02 72093424 Fax. (+39) 02 45471830

Website: www.fidialabalservice.com—E-mail: tecnico@fidialabalservice.com

Pag. 2 di 3



FIDBASALT UNIDIR 400 C95®

TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI BASALTO AD ALTA RESISTENZA PER IL RINFORZO STRUTTURALE



FIDIA srl
Technical Global Services

CONFEZIONI

Il tessuto viene solitamente fornito in rotoli da 10, 20, 50cm di larghezza e 50m di lunghezza.

RACCOMANDAZIONI

Maneggiando il tessuto indossare indumenti protettivi ed occhiali ed attenersi alle istruzioni concernenti le modalità di applicazione del materiale.

Contatto con pelle: non è richiesta alcuna misura speciale.

Stoccaggio in cantiere: conservare in luogo coperto ed asciutto e lontano da sostanze che ne possano compromettere l'integrità

ESEMPI DI APPLICAZIONE

Per conoscere progetti di rinforzo strutturale mediante tessuti in basalto consultare la sezione Applicazioni al sito www.fidiaglobalservice.com oppure contattare lo staff tecnico all'indirizzo di posta elettronica tecnico@fidiaglobalservice.com.

QUALITA' & CERTIFICAZIONI

La fornitura del materiale, su richiesta, è accompagnata dal certificato di origine del materiale e dal certificato di caratterizzazione delle proprietà meccaniche rilasciato da un laboratorio italiano autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. del 380/2001 per i materiali da costruzione ai sensi della legge n.1086/71, con Decreto n.38194 del 14/01/1992 e successivi.

VOCI DI CAPITOLATO

BFRP®

Esecuzione di rinforzo strutturale di elementi in cemento armato, meratura o acciaio mediante l'utilizzo di un sistema composto a base di tessuto unidirezionale in fibra di basalto ad alta resistenza tipo FIDBASALT UNIDIR 400 C95 impregnato con una matrice organica tipo FIDSATURANT epossidica bi componente tixotropica, da applicarsi direttamente alla struttura da rinforzare, previo eventuale trattamento di ripristino delle superfici degradate, fornito e posto in opera da appaltatori specializzati e di comprovata esperienza. L'intervento si svolge nelle seguenti fasi: (1) eventuale regolarizzazione della superficie con malta strutturale di calce idraulica naturale tipo FIDCALX NHLS o cementizia tipo FIDGROUT; (2) stesura di un primo strato di resina epossidica bi componente tipo FIDSATURANT da impregnazione; (3) posa del tessuto in fibra di basalto ad alta resistenza tipo FIDBASALT UNIDIR 400 C95, del peso netto di fibra di ca 400 g/mq avente le seguenti caratteristiche prestazionali meccaniche: tensione caratteristica a trazione 2000 MPa; modulo elastico 95 GPa; deformazione ultima a rottura 2,30%, avendo cura di garantire una completa impregnazione del tessuto evitando la formazione di eventuali vuoti; (4) esecuzione del secondo strato di resina epossidica bi componente tixotropica tipo FIDSATURANT; (5) l'eventuale ripetizione delle fasi (3) e (4) per tutti gli strati previsti da progetto, sia in semplice sovrapposizione che in direzione ortogonale alla precedente; (6) la rimozione delle eventuali parti eccedenti di resina. Il sistema di rinforzo deve garantire le caratteristiche minime prestazionali di progetto e i materiali devono essere certificati da laboratori riconosciuti a livello nazionale od internazionale. E' compresa la fornitura e posa in opera di tutti i materiali sopra descritti e quanto altro occorre per dare il lavoro finito. Sono esclusi: l'eventuale bonifica delle zone degradate e il ripristino del substrato; le prove di accettazione del materiale; le indagini e le prove pre e post intervento; tutti i sussidi necessari per l'esecuzione dei lavori (bybridge, opere provvisorie, etc). Il prezzo è ad unità di superficie di rinforzo effettivamente posto in opera comprese le sovrapposizioni e zone di ancoraggio.

NOTE LEGALI

I consigli tecnici che FIDIA S.r.l. Technical Global Services fornisce, verbalmente o per iscritto come assistenza al cliente o all'applicatore in base alle sue esperienze, corrispondenti allo stato attuale delle conoscenze scientifiche e pratiche, non sono impegnativi e non dimostrano alcuna relazione legale contrattuale né obbligo accessorio col contratto di compravendita. Essi non dispensano l'acquirente dalla propria responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per quanto concerne la loro idoneità relativamente all'uso previsto. Per il resto sono valide le nostre condizioni commerciali. Diffornità dall'originale predetto per contenuto e/o utilizzo non implicherà alcuna responsabilità da parte dell'azienda FIDIA S.r.l. Il cliente è inoltre tenuto a verificare che la presente scheda e gli eventuali valori riportati siano validi per la partita di prodotto di suo interesse e non siano superati in quanto sostituiti da edizioni successive e/o nuove formulazioni del prodotto. Nel dubbio, contattare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico.

SEDE LEGALE:

Via Gerardo Dottori, 85 06132 San Sisto (PG) Part. IVA 02140130549 C.C.I.A.A.: 181644 Iscr. Trib. PG 28053—Cap.Soc. € 118.000

SEDE OPERATIVA:

Via Y. Gagarin, 61/63 06070 San Mariano (PG) Tel. (+39) 075 5173078 Fax. (+39) 075 5178358

DIREZIONE TECNICA E COMMERCIALE:

Piazza del Duomo, 17 20121 Milano Tel. (+39) 02 72093424 Fax. (+39) 02 45471830

Website: www.fidiaglobalservice.com—E-mail: tecnico@fidiaglobalservice.com

Pag. 3 di 3



Il rinforzo è composto, oltre che dalla fibra di basalto, da primer e adesivo, di cui si descrivono le relative caratteristiche prestazionali.

Il primer è una resina bicomponente epossipoliamicca a bassa viscosità, utilizzata per preparare la superficie sulla quale verrà applicata la fibra. I due componenti A e B si presentano in forma liquida, separati, e si solidificano in breve termine se miscelati fra loro.

MBT - MBrace® Primer

Primer a base epossipoliamicca del sistema MBT - MBrace FRP (Fiber Reinforced Polymer)

Definizione del materiale

MBT-MBrace Primer è un prodotto bicomponente, epossipoliamicco, a bassa viscosità, indicato per migliorare l'efficienza d'aggrappo al supporto del sistema MBT-MBrace FRP.



Principali campi di applicazione

MBrace Primer è indicato come consolidante e promotore di adesione per tutti i tipi di supporto (ad eccezione dell'acciaio per il quale non è necessario alcun intervento di priming) per i quali MBrace può essere applicato (calcestruzzo, muratura, legna, pietra naturale, ecc).

Prestazioni

Le prestazioni sotto riportate sono ottenute a T=20°C; Ur > 90%

Aderenza al calcestruzzo a 7 gg, UNI EN 1542 (calcestruzzo tipo TC0,40)	> 3,5 MPa (rottura supporto)
Caratteristiche a trazione diretta a 7 gg, ASTM D638 - Resistenza - Modulo elastico	> 20 MPa 1200 MPa
Resistenza a trazione per flessione a 7 gg, ASTM D790	> 35 MPa
Caratteristiche a compressione a 7 gg, ASTM D695 - Resistenza - Modulo elastico	> 40 MPa 1900 MPa
Coefficiente di dilatazione termica lineare a 7 gg, ASTM D696	$6,21 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Consumo e confezione

0,2 litri/m².

Unità da 10 litri: comp A secchio da 7,5 litri; comp B secchio da 2,5 litri.

Dati specifici

Rapporto di miscelazione	<ul style="list-style-type: none">• in volume 75% A; 25% B• in peso 77% A; 23% B
Densità singoli componenti A e B	A: $1 \pm 0,05$ kg/litro B: $1,1 \pm 0,05$ kg/litro
Colore	Trasparente ambrato
Numero strati consigliati	1
Tempo di lavorabilità a	
5°C	2 ore
20°C	45 min
30°C	25 min
Fuori tatto	
5°C	9 ore
20°C	5 ore
30°C	3 ore
Stoccaggio ottimale	10 + 35 °C
Pulizia attrezzi	Diluyente per epossidiche

Applicazione MBT-MBrace Primer

- Miscelare meccanicamente il componente A prima di aggiungere il componente B.
- Mescolare con un trapano a frusta a bassa velocità il componente A con il componente B nel rapporto prescritto nelle confezioni per circa un minuto fino ad ottenere un impasto di colorazione uniforme;
- Il tempo utile di applicazione può variare in funzione della temperatura ambiente e della quantità di Primer applicato, fattori di cui occorrerà pertanto tener conto.
- Il Primer verrà applicato in maniera regolare a pennello o a rullo.

SCHEDA APPLICATIVA

Stoccaggio

Conservare il prodotto in luogo coperto, fresco ed asciutto (10+30 °C) lontano dal contatto diretto con il sole, fuoco o fiamme libere. Qualora la temperatura scendesse al di sotto dei 10°C la resina potrebbe presentare un aumento della viscosità e la formazione di grumi. In questi casi prima di utilizzarla, scaldare le confezioni immergendo (a confezione chiusa) parte della latta in acqua calda fino alla scomparsa dei grumi.

Preparazione del supporto

- Nel caso di strutture degradate si procederà alla rimozione dell'intero strato ammalorato mediante idrodemolizione o uso di martelletti ad aria compressa ed al successivo ripristino strutturale con malte della linea EMACO FORMULA. Successivamente al ripristino non è necessaria alcuna sabbatura.
- Eventuali protuberanze superficiali del calcestruzzo dovranno essere levigate. Gli spigoli vivi presenti nel calcestruzzo devono essere arrotondati. Il raggio di curvatura dovrà misurare almeno 20 mm, considerato che, quanto maggiore sarà il raggio, tanto migliore sarà la preparazione.
- In caso di strutture non degradate la preparazione del supporto avverrà mediante sabbatura;
- pulire la superficie sabbata mediante aria compressa.



Figura 3.4 Scheda tecnica MBT-MBrace Primer

L'adesivo è una resina bicomponente epossidica, che garantisce un'ottima aderenza delle fibre al supporto. Analogamente i componenti A e B sono liquidi, ed una volta mescolati solidificano.

MBrace[®] Adesivo (Saturant)

Adesivo a base epossidica del sistema MBrace FRP (Fiber Reinforced Polymer)

Definizione del materiale

MBrace Adesivo è un prodotto bicomponente a base epossidica, ad alto contenuto di solidi, indicato per garantire l'impregnazione e l'adesione al supporto MBrace Fibre.



Principali campi di applicazione

MBrace Adesivo è indicato come matrice di rinforzo del sistema MBrace FRP per tutti i tipi di supporti ai quali MBrace può essere applicato (calcestruzzo muratura, legno, pietra naturale, ecc).



Prestazioni

Le prestazioni sotto riportate sono ottenute a T=20°C; Ur > 90%

Aderenza al calcestruzzo (tipo TC0,40) a 7 gg, UNI EN 1542	> 3,5 MPa (rottura supporto)
Caratteristiche a trazione diretta a 7 gg, ASTM D638	
- Resistenza	> 25 MPa
- Modulo elastico	3300 MPa
Resistenza a trazione per flessione a 7 gg, ASTM D790	> 45 MPa
Caratteristiche a compressione a 7 gg, ASTM D695	
- Resistenza	> 80 MPa
- Modulo elastico	3100 MPa
Coefficiente di dilatazione termica lineare a 7 gg, ASTM D696	$6,01 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Dati specifici

Rapporto di miscelazione	<ul style="list-style-type: none">in volume 75%A / 25%Bin peso 77%A / 23%B
Densità dei singoli componenti A e B	A: $1,1 \pm 0,05$ kg/litro B: $1 \pm 0,05$ kg/litro
Densità (A+B)	$1,08 \pm 0,05$ kg/litro
Tempo di lavorabilità a	
5 °C	120 min
10 °C	60 min
20 °C	30 min
35 °C	15 min
Pulizia attrezzi	Diluente per epossidiche

Consumo e confezione

0,67 litri/m².

Unità da 10 litri: comp A secchio da 7,5 litri; comp B secchio da 2,5 litri.

SCHEDA APPLICATIVA

Stoccaggio

Conservare il prodotto in luogo coperto, fresco ed asciutto (10+30 °C) lontano dal contatto diretto con il sole, fuoco o fiamme libere. Qualora la temperatura scendesse al di sotto dei 10°C la resina potrebbe presentare un aumento della viscosità e la formazione di grumi. In questi casi prima di utilizzarla, scaldare le confezioni immergendo (a confezione chiusa) parte della latta in acqua calda fino alla scomparsa dei grumi.

Applicazione

- L'applicazione avverrà mediante rullo, fresco su fresco sulla rasatura o nel caso di assenza di rasatura quando il primer non risulterà più appiccicoso al tatto e comunque entro le 24 ore dall'applicazione di quest'ultimo;



- Miscelare meccanicamente il componente A dell' Adesivo prima di aggiungere il componente B.
- Mescolare con un trapano a frusta a bassa velocità il componente A con il componente B nel rapporto prescritto nelle confezioni per

circa un minuto fino ad ottenere un impasto di colorazione uniforme;

- Dopo avere applicato il primo strato di adesivo, si stenderà il tessuto unidirezionale avendo cura di premerlo per due o tre volte nella direzione longitudinale della fibra usando un rullino a denti smussati e paralleli alla direzione delle fibre per eliminare l'aria dallo strato di resina. Per congiungere più strisce nella direzione longitudinale della fibra è necessario sovrapporle per una lunghezza di 20 cm. In corrispondenza del punto di sovrapposizione si applicherà una ulteriore mano di MBrace Adesivo sulla superficie esterna dello strato di foglio su cui aderirà il tratto sovrapposto. Non è necessaria alcuna sovrapposizione nella direzione laterale della fibra.
- La seconda mano di MBrace Adesivo deve essere stesa sulla superficie del foglio.
- Dovendo incollare anche il secondo strato di tessuto, si applicherà lo strato ulteriore di tessuto e quindi una ulteriore mano di adesivo seguente le indicazioni di cui sopra.

Stagionatura

- Una volta completata la fase di incollaggio, è preferibile proteggere il manufatto dalla eventuale pioggia con teli di plastica.
- MBrace FRP dovrà essere lasciato indurire per un tempo non inferiore alle 24 ore (a 20°C) prima di poter destinare al servizio l'elemento rinforzato. Per temperature inferiori a 20°C sarà necessario attendere un tempo superiore alle 24 ore.

Protezione dai raggi UV

- Proteggere le superfici rinforzate con MBrace FRP mediante un rivestimento della linea MASTERSEAL resistente all'azione degli agenti atmosferici.
- L'applicazione del sistema protettivo dovrà avvenire dopo l'indurimento dell'ultimo strato di adesivo.

Figura 3.5 Scheda tecnica MBrace Adesivo

3.3.2 Applicazione del Rinforzo

Il rinforzo prevede l'applicazione di due strisce di BFRP in corrispondenza dell'intradosso dell'arco. Si è proceduto alla preparazione del primer, stendendolo con un pennello sulla superficie. Entro le 24 ore successive sono state applicate, insieme, resina e fibra, prestando attenzione ad eliminare

bolle d'aria tra fibra e supporto, per ottenere una adesione massima tra arco e rinforzo.

Sia per il primer che per l'adesivo, il componente A viene prima miscelato da solo e successivamente viene aggiunto il componente B, dopodiché vengono stesi seguendo le indicazioni delle schede tecniche.



Figura 3.6 Arco rinforzato con BFRP



Figura 3.7 Arco rinforzato con estensimetro applicato alla fibra

3.3.3 Prove di Carico a Rottura

Il modello è stato portato a rottura in condizione di carico più sfavorevole, ovvero carico quasi concentrato non simmetrico. Sollecitando l'arco già fessurato, si studia il riaprirsi delle fessure, verificando un miglioramento del comportamento sotto carico dell'arco rinforzato in fibre di basalto.

Sono stati posizionati trasduttori di spostamento verticale, estensimetri per valutare la deformazione delle fibre e della struttura, e martinetti idraulici in corrispondenza del punto di applicazione del carico e dei piedritti per conferire tensioni di compressione nella muratura.

Sono stati eseguiti sette cicli di carico/scarico, da 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 N, in cui la prova è stata interrotta per non compromettere ulteriormente la stabilità dell'arco. Durante ogni ciclo le fessure già presenti sono state monitorate, individuando il livello di carico per cui si sono riaperte. La formazione di cerniere è stata evidente prima nella zona estradossale simmetrica rispetto al carico, osservando l'aprirsi della fessura già ad un carico di 3000 N, mentre il resto delle fessure si sono allargate dopo i 4000 N.

3.3.4 Risultati Sperimentali

Si riportano le tabelle con i valori registrati durante la prova di carico e rispettivi grafici, rappresentativi dell'andamento delle deformazioni (ϵ) e degli spostamenti (δ) che hanno interessato il sistema fibra-struttura.

Per la prova di carico sull'arco rinforzato sono stati utilizzati:

- 5 trasduttori di spostamento per misurare gli spostamenti verticali, posizionati principalmente in corrispondenza del carico nei punti T1, T2, T3, T4, T5.

- 2 estensimetri a variazione di resistenza per valutare la deformazione della fibra, posizionati all'intradosso in corrispondenza della fibra anteriore, al di sotto del carico e dalla parte opposta, rispettivamente E1 ed E2.
- 1 estensimetro induttivo LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) posto all'estradosso dalla parte opposta al carico E3, per rilevare le deformazioni della struttura.
- 1 martinetto idraulico per l'applicazione del carico ed altri 2 in posizione verticale sui piedritti per conferire una tensione di compressione analoga al modello reale.

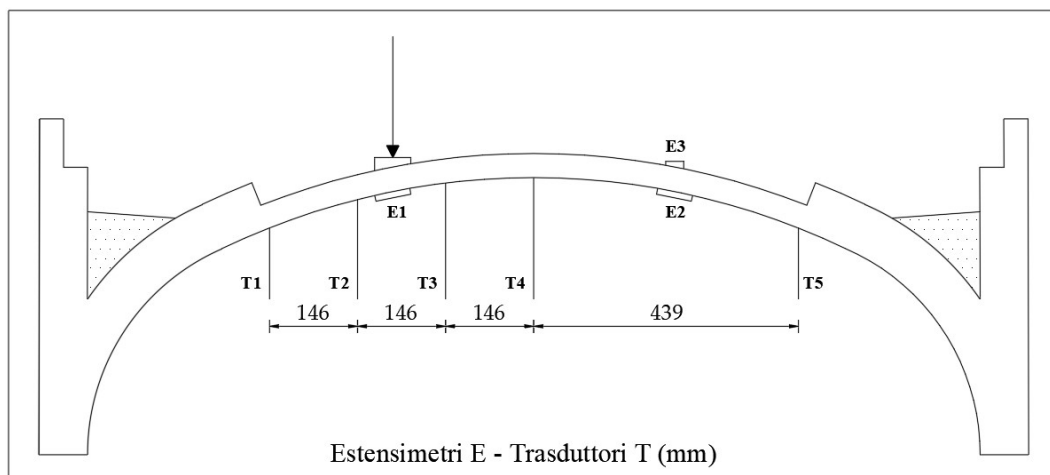


Figura 3.8-Strumentazione prova di carico

Estensimetri- primo ciclo (fino 500 N)

Tabella 3.1-Deformazioni

Forza N	deformazioni		
	Est 1 um/m	Est 2 um/m	Est 3 (LVDT1) um/m
0	0	0	0
50	6	-3	1
109	20	-7	4
214	51	-18	8
307	81	-27	12
408	118	-37	15
500	156	-47	18

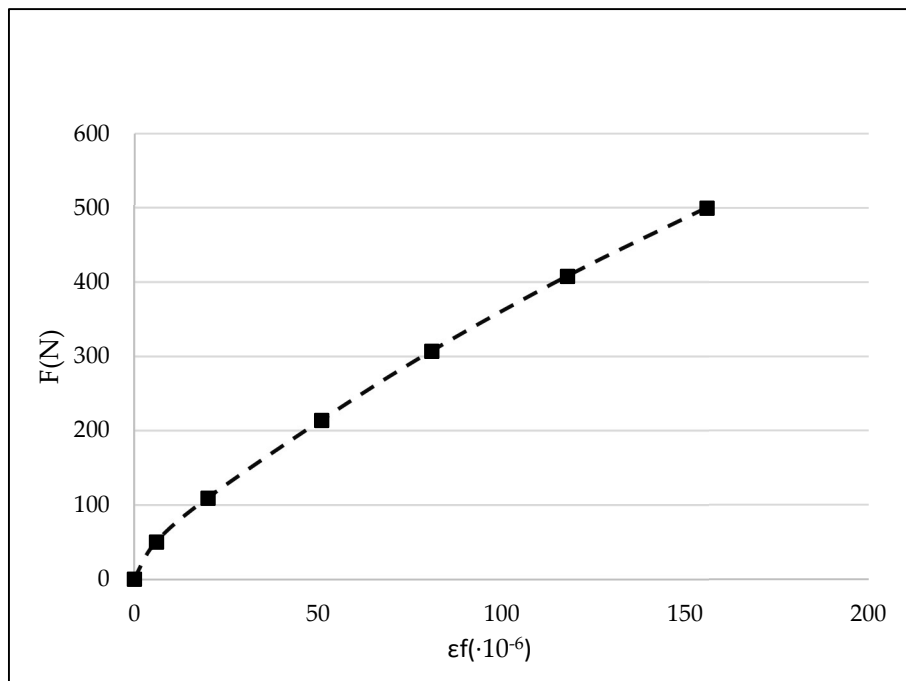


Figura 3.9-Diagramma sperimentale carico F, deformazione ϵ (punto E1)

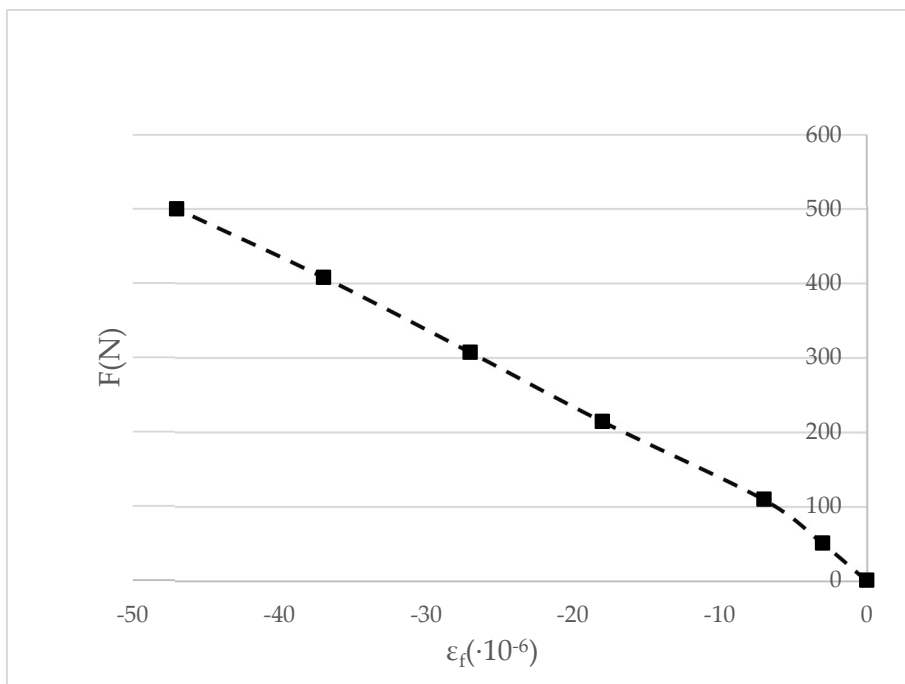


Figura 3.10-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ε (punto E2)

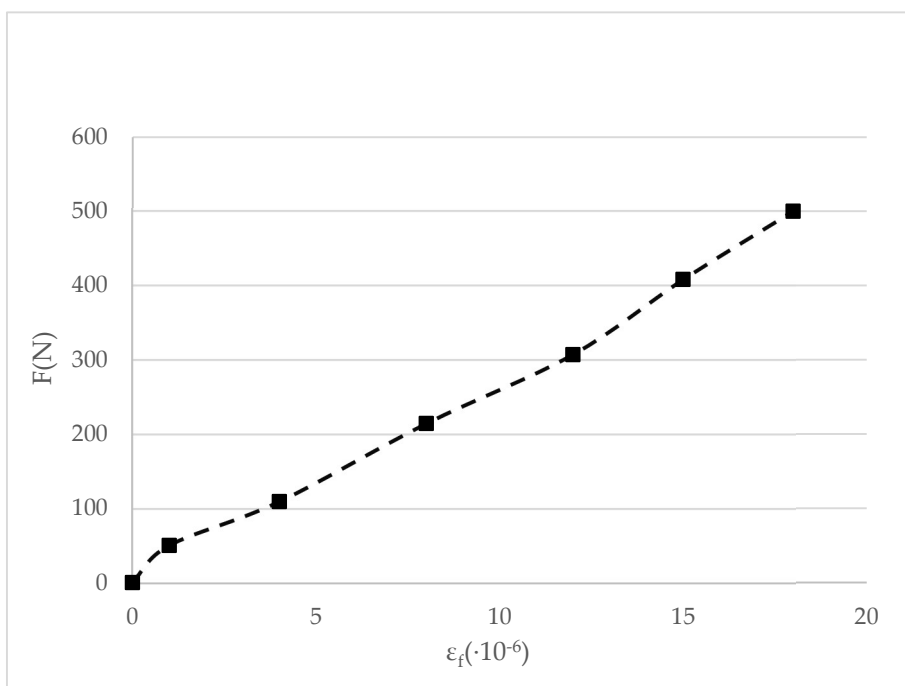


Figura 3.11-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ε (punto E3)

Trasduttori- primo ciclo (fino 500 N)

Tabella 3.2-Spostamenti

Forza N	spostamenti				
	Spost 1 mm	Spost 2 mm*10 ⁻²	Spost 3 mm*10 ⁻²	Spost 4 mm*10 ⁻²	Spost 5 mm
0	0	0	8,67362E-17	0,3125	0
50	0	0	0	0	0
109	0	0	0	0	0
214	0	0,3125	0	0,3125	0
307	0	4,375	0	0,625	0
408	0	9,375	0	0,9375	0
500	0	14,0625	0,3125	0,9375	0
403	0	15	0,3125	0,9375	0
332	0	15	0,3125	0,9375	0
265	0	15	0,3125	0,9375	0
206	0	14,6875	0,3125	0,625	0
151	0	14,0625	0,3125	0,625	0
105	0	11,875	0,3125	0,625	0

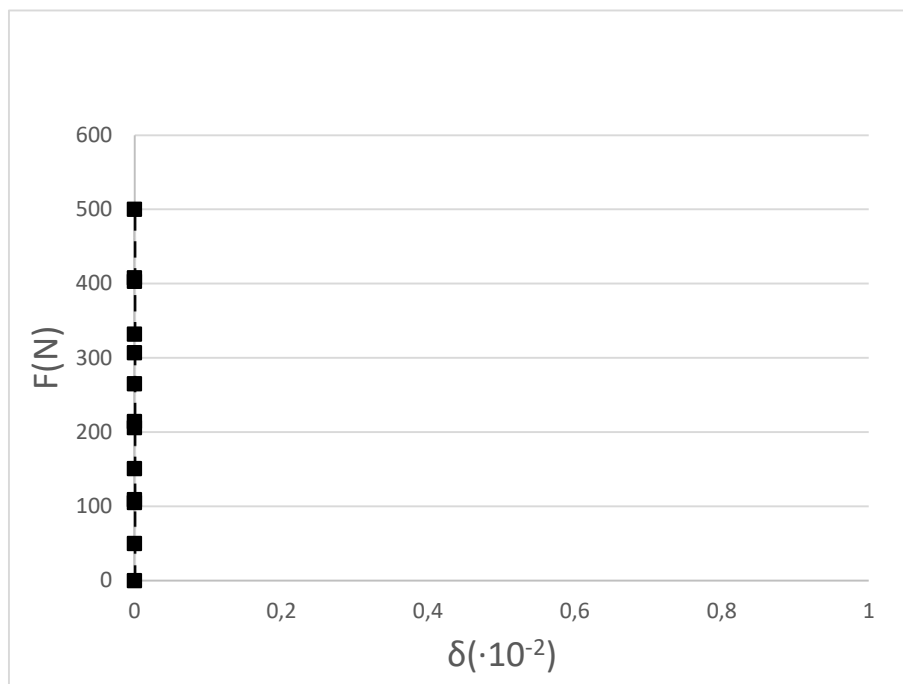


Figura 3.12-Diagramma sperimentale carico F, spostamento delta (punto T1)

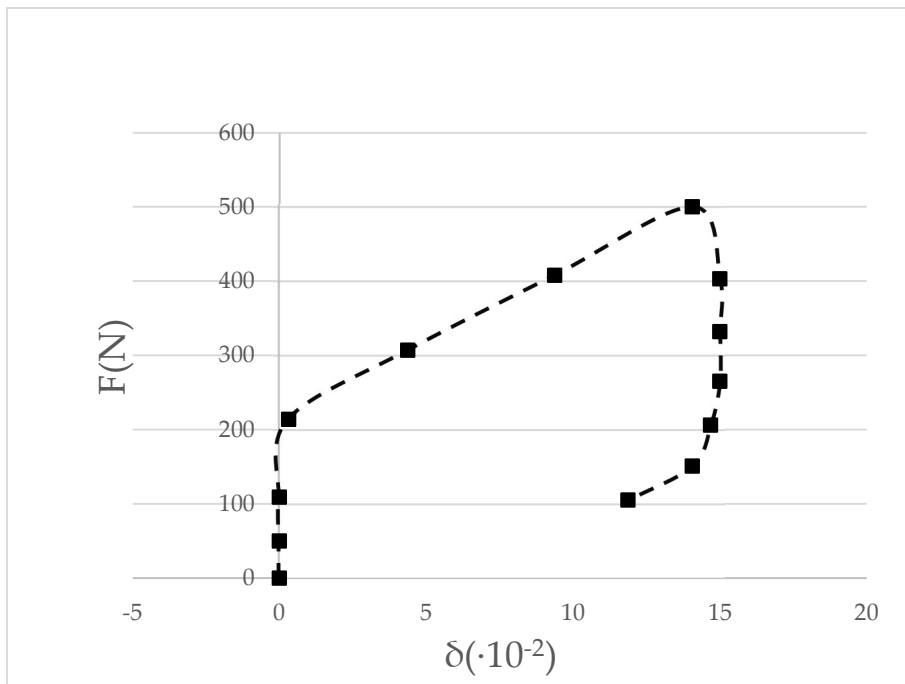


Figura 3.13-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T2)

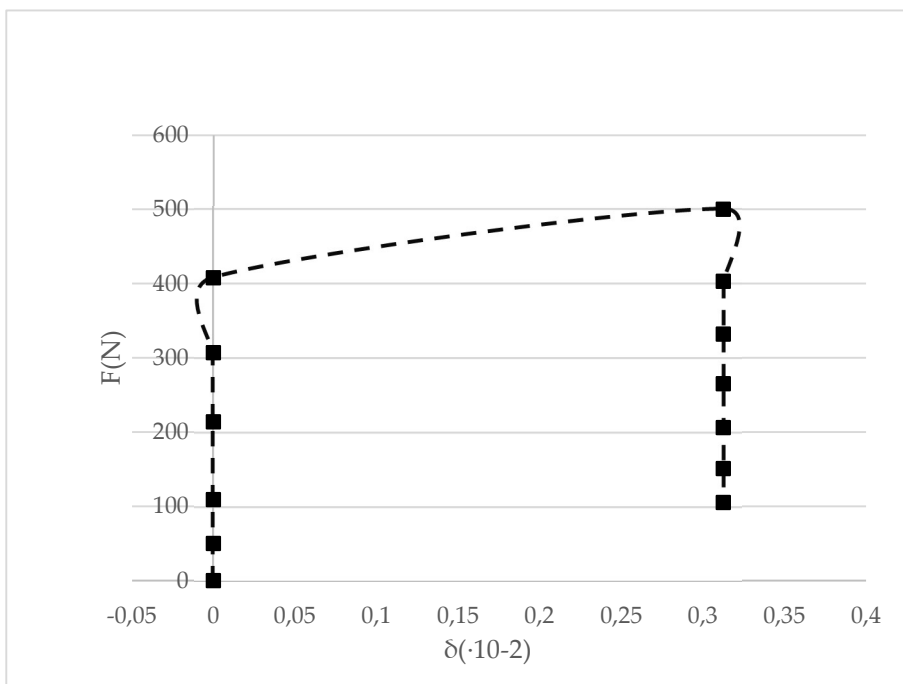


Figura 3.14-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T3)

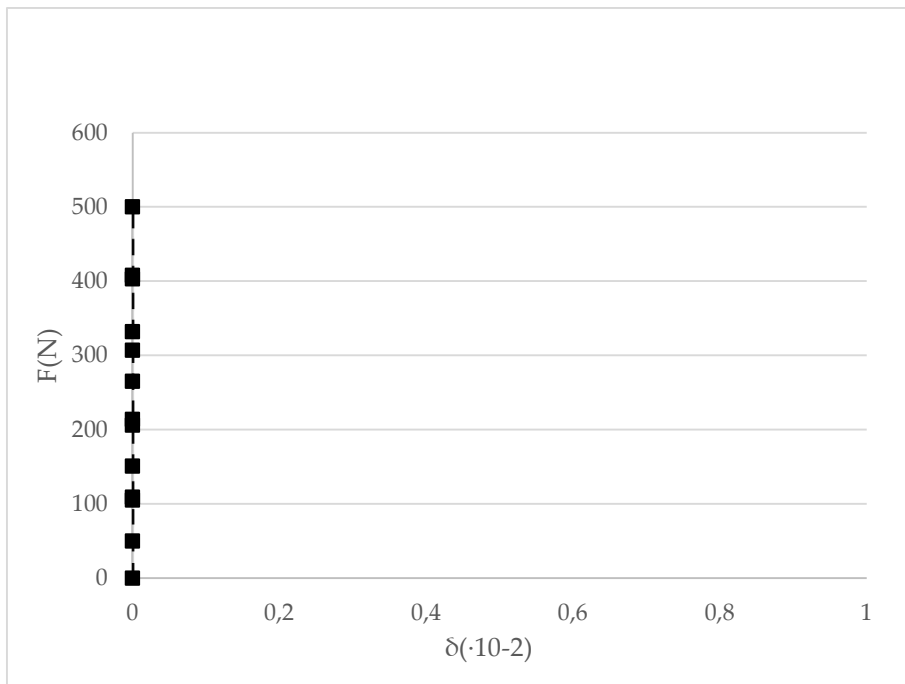


Figura 3.15-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T5)

Estensimetri- secondo ciclo (fino 1000 N)

Tabella 3.3-Deformazioni

Forza N	deformazioni		
	Est 1 um/m	Est 2 um/m	Est 3 (LVDT1) um/m
0	0	0	0
50	6	-3	1
109	20	-7	4
214	51	-18	8
307	81	-27	12
408	118	-37	15
500	156	-47	18
605	202	-57	21
752	264	-71	23
841	316	-81	25
908	353	-88	26
1000	414	-98	26

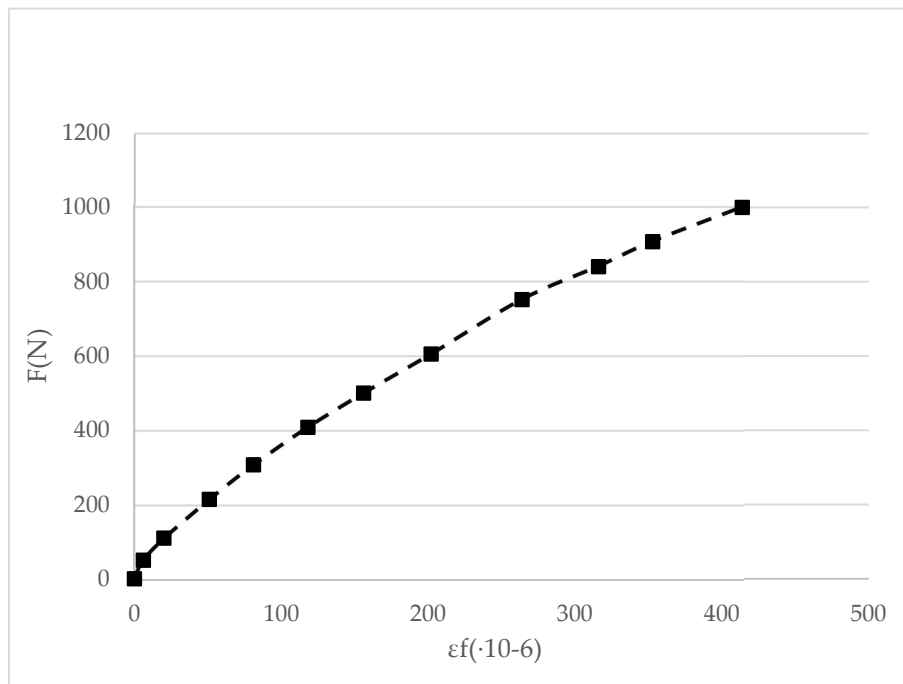


Figura 3.16-Diagramma sperimentale carico F, deformazione ϵ (punto E1)

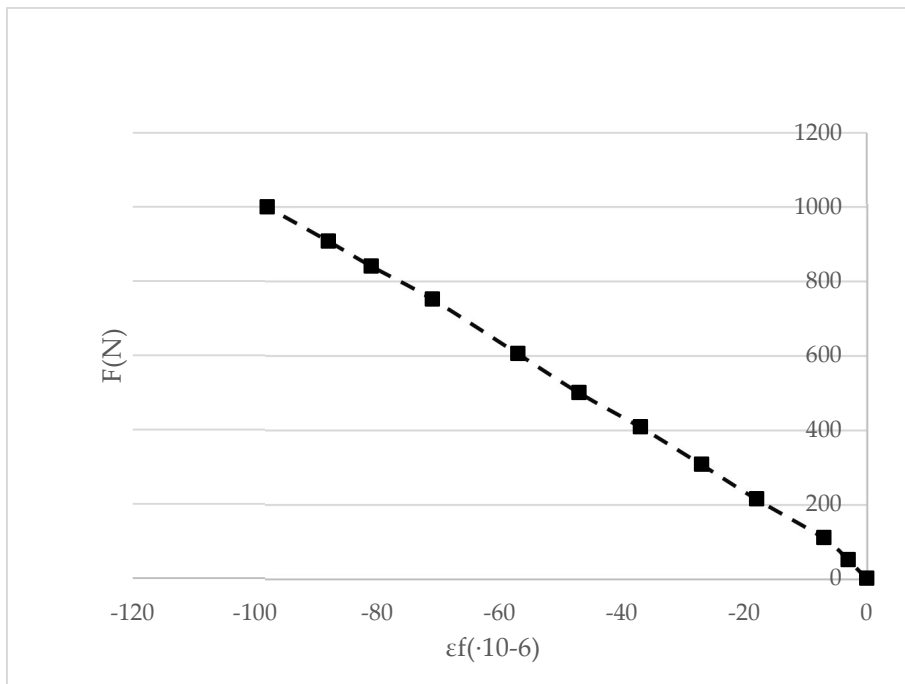


Figura 3.17-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ϵ (punto E2)

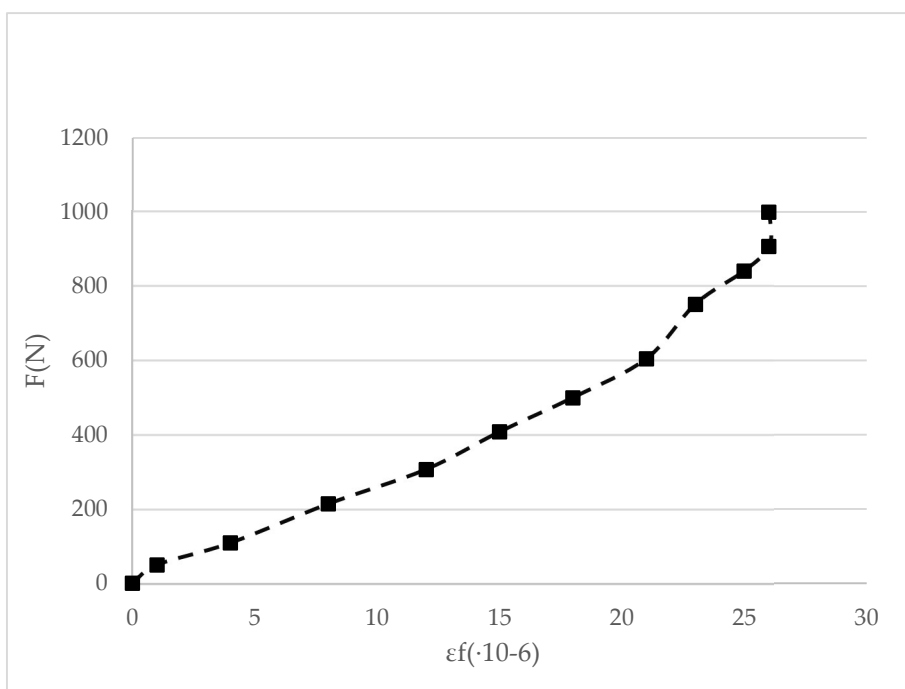


Figura 3.18-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ϵ (punto E3)

Trasduttori- secondo ciclo (fino 1000 N)

Tabella 3.4-Spostamenti

Forza	spostamenti				
	Spost 1	Spost 2	Spost 3	Spost 4	Spost 5
N	mm	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm
0	0	0	8,67362E-17	0,3125	0
50	0	0	0	0	0
109	0	0	0	0	0
214	0	0,3125	0	0,3125	0
307	0	4,375	0	0,625	0
408	0	9,375	0	0,9375	0
500	0	14,0625	0,3125	0,9375	0
403	0	15	0,3125	0,9375	0
332	0	15	0,3125	0,9375	0
265	0	15	0,3125	0,9375	0
151	0	14,0625	0,3125	0,625	0
214	0	10,625	0,3125	0,625	0
307	0	10,625	0,3125	0,9375	0
412	0	10,9375	0,3125	0,9375	0
504	0	15	0,3125	0,9375	0
605	0	18,75	0,3125	0,9375	-0,3125
752	0	24,0625	0,9375	0,9375	-0,3125
841	0	28,75	2,8125	0,9375	-0,3125
908	0	32,1875	10	0,9375	-0,3125
1000	0	36,25	12,8125	0,625	-0,3125
912	0	36,875	14,0625	0	-0,3125
799	0	36,875	14,0625	0	-0,3125
693	0	36,875	14,0625	-0,3125	-0,3125
521	0	34,6875	14,0625	-0,3125	-0,3125
399	0	30,3125	14,0625	-0,3125	-0,3125
286	0	26,25	14,0625	-0,3125	-0,3125
101	0	16,25	13,4375	-0,3125	-0,3125

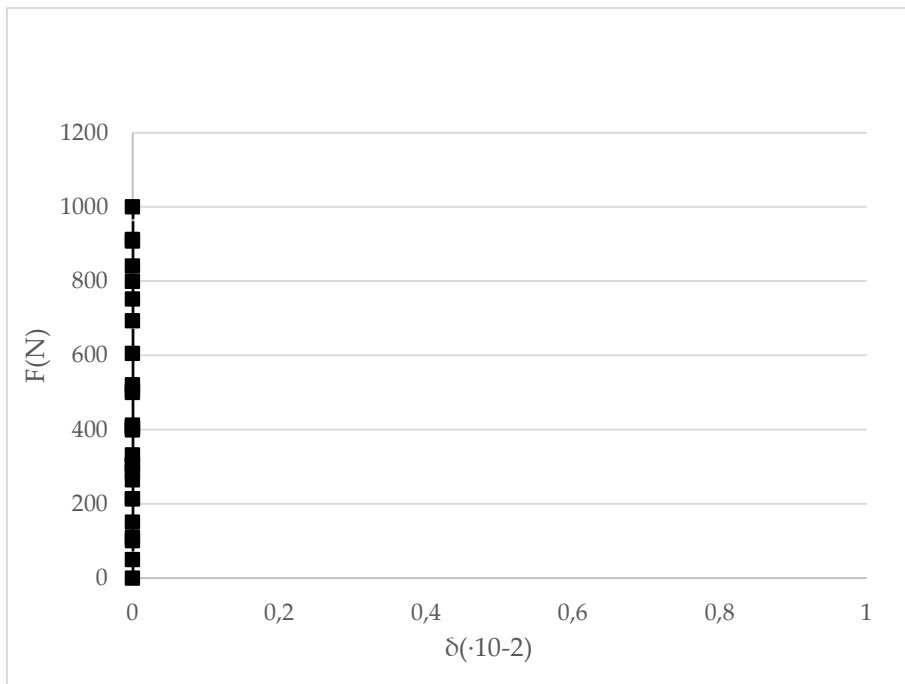


Figura 3.19-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T1)

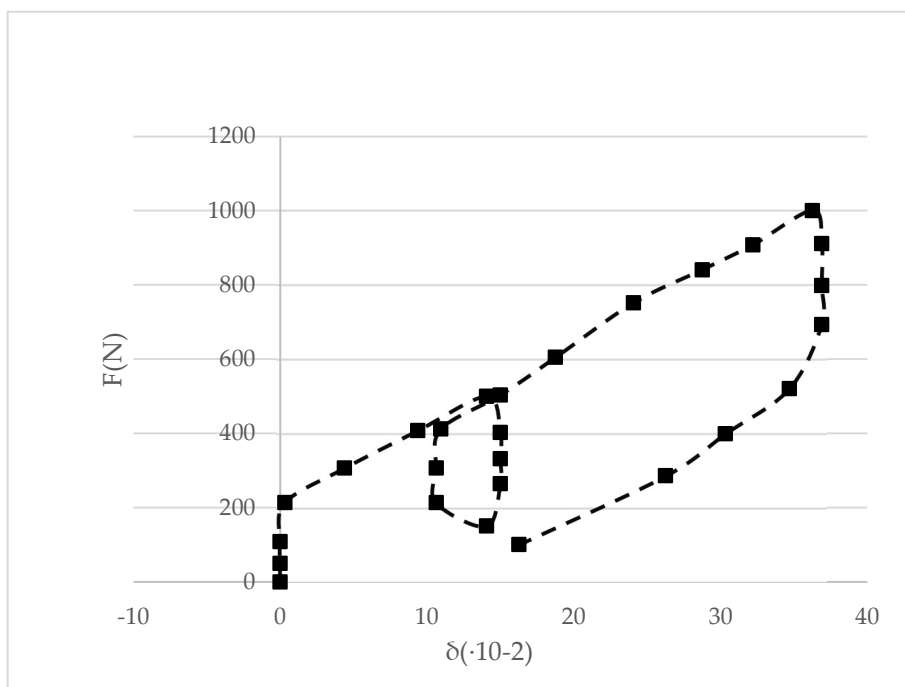


Figura 3.20-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T2)

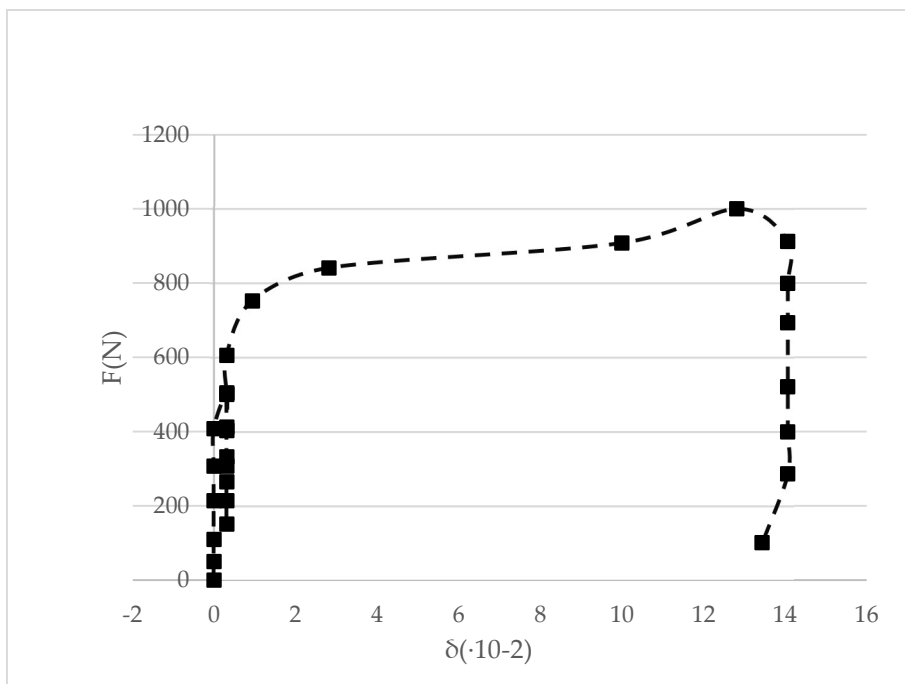


Figura 3.21-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T3)

Estensimetri- terzo ciclo (fino 2000 N)

Tabella 3.5-Deformazioni

Forza	Est 1	Est 2	Est 3 (LVDT1)
N	um/m	um/m	um/m
0	0	0	0
50	6	-3	1
109	20	-7	4
214	51	-18	8
307	81	-27	12
408	118	-37	15
500	156	-47	18
605	202	-57	21
752	264	-71	23
841	316	-81	25
908	353	-88	26
1000	414	-98	26
1013	441	-99	25
1118	492	-108	25
1210	549	-117	26
1324	618	-127	25
1421	683	-136	25
1505	775	-145	24
1622	879	-154	22
1719	985	-164	20
1811	1073	-172	18
1916	1185	-182	15
1996	1284	-190	12
1858	1302	-186	10

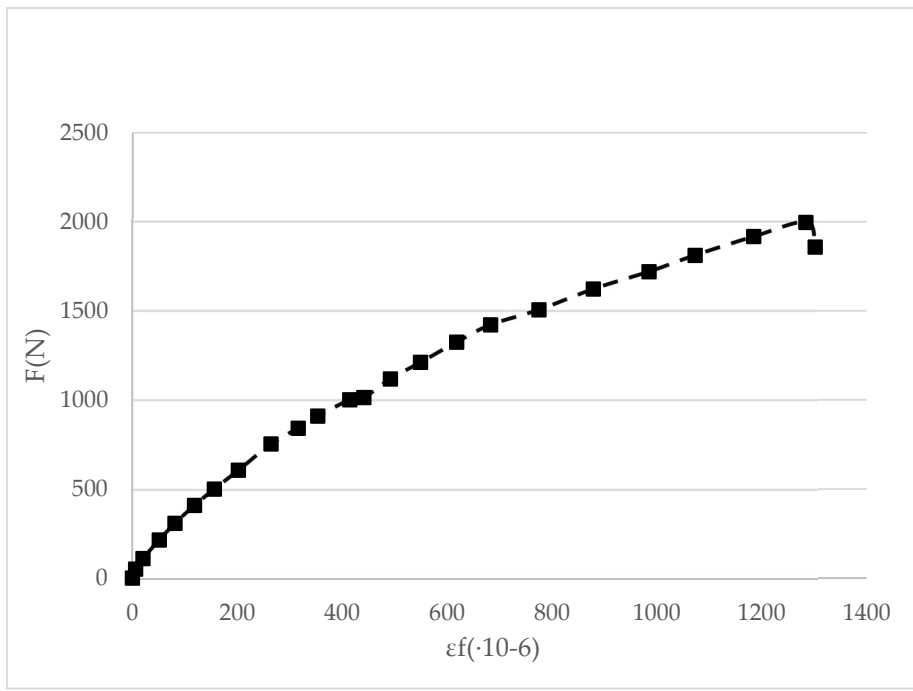


Figura 3.22-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ε (punto E1)

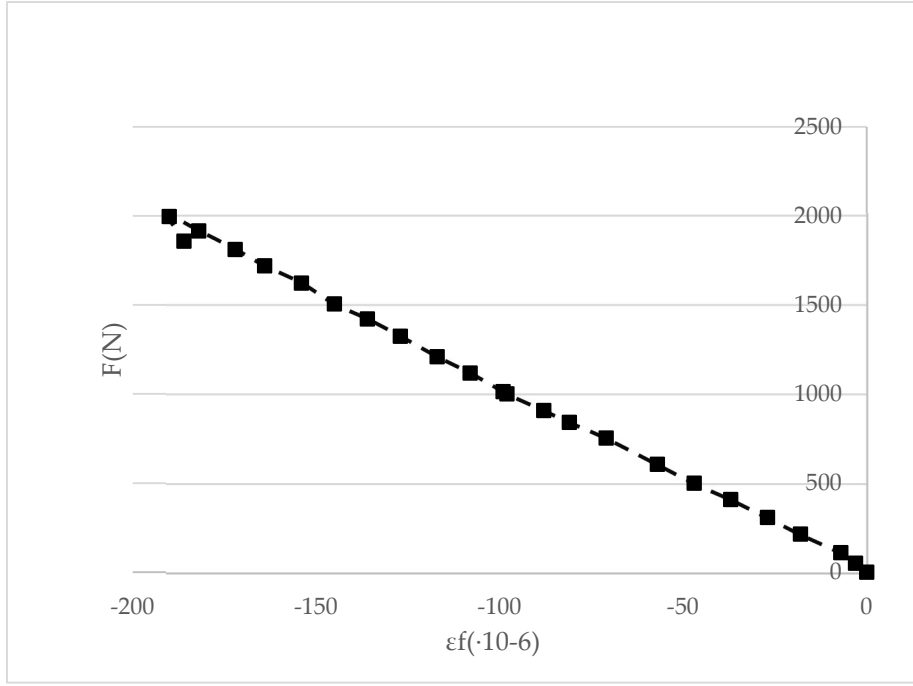


Figura 3.23-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ε (punto E2)

Trasduttori- terzo ciclo (fino 2000 N)

Tabella 3.6-Spostamenti

Forza	spostamenti				
	Spost 1	Spost 2	Spost 3	Spost 4	Spost 5
N	mm	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm
0	0	0	8,67362E-17	0,3125	0
214	0	0,3125	0	0,3125	0
408	0	9,375	0	0,9375	0
504	0	15	0,3125	0,9375	0
605	0	18,75	0,3125	0,9375	-0,3125
752	0	24,0625	0,9375	0,9375	-0,3125
841	0	28,75	2,8125	0,9375	-0,3125
908	0	32,1875	10	0,9375	-0,3125
693	0	36,875	14,0625	-0,3125	-0,3125
286	0	26,25	14,0625	-0,3125	-0,3125
101	0	16,25	13,4375	-0,3125	-0,3125
504	0	20	11,875	0,3125	-0,3125
719	0	27,8125	11,875	0,3125	-0,3125
815	0	31,875	11,875	0	-0,3125
1013	0	38,4375	12,1875	-0,3125	-0,3125
1210	0	46,25	16,5625	-0,9375	-2,8125
1324	0	50,625	21,5625	-1,5625	-2,8125
1421	0	54,375	24,375	-2,1875	-4,0625
1505	0,3125	58,4375	27,5	-3,125	-5
1622	9,0625	63,125	30	-4,6875	-5,625
1811	12,1875	70,9375	35,3125	-7,1875	-7,5
1996	16,5625	80,3125	41,5625	-10,9375	-10
1858	17,5	80,9375	42,5	-11,875	-10,3125
1194	17,5	72,8125	42,5	-11,25	-10,3125
710	17,5	54,375	40,3125	-8,75	-10,3125
593	17,5	50	35	-8,125	-10
328	17,1875	37,8125	26,5625	-6,875	-10
113	17,1875	23,75	16,5625	-5	-10

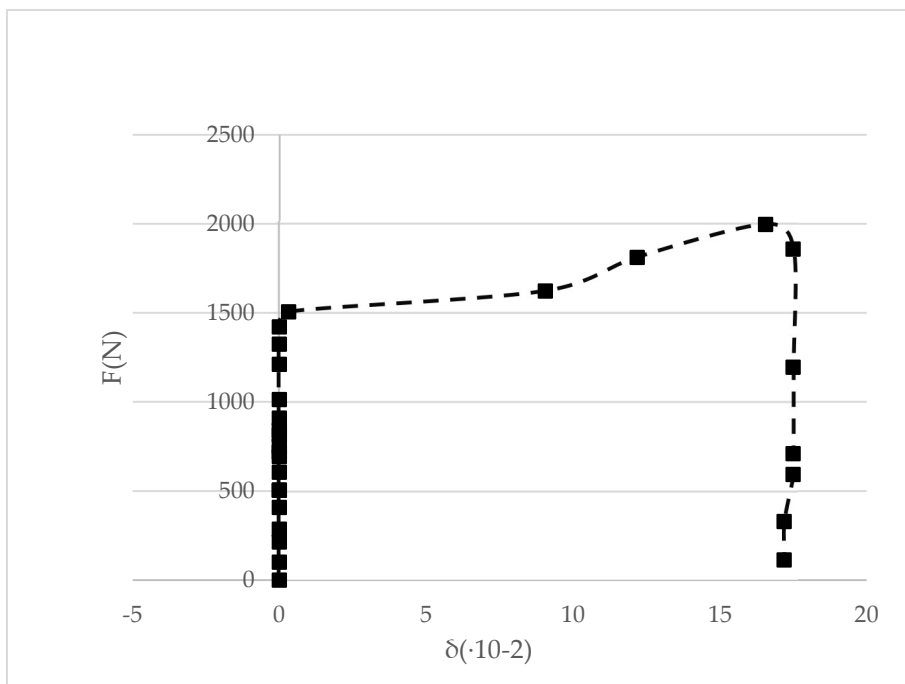


Figura 3.24-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T1)

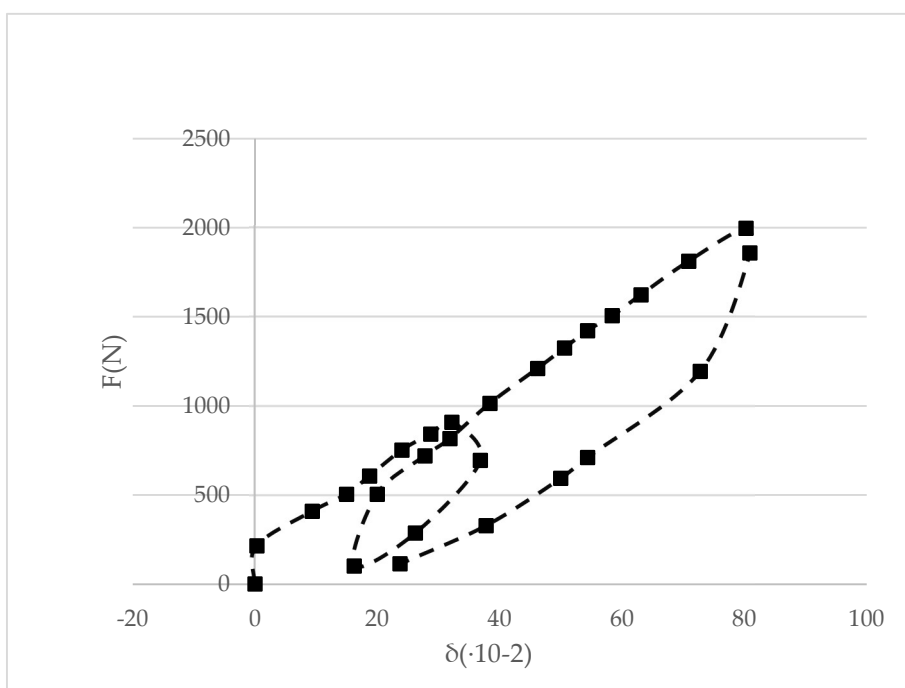


Figura 3.25-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T2)

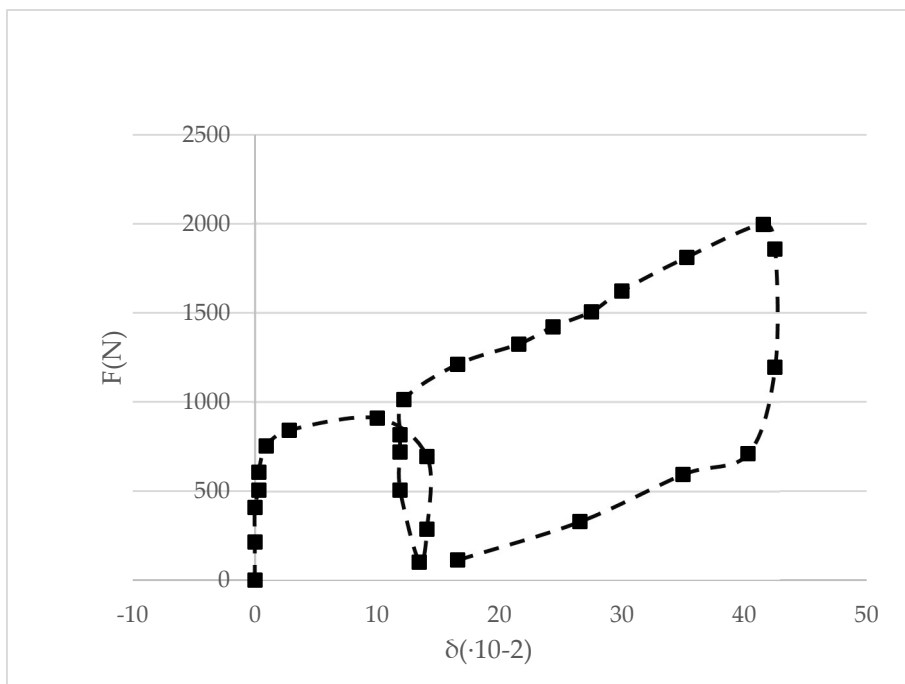


Figura 3.26-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T3)

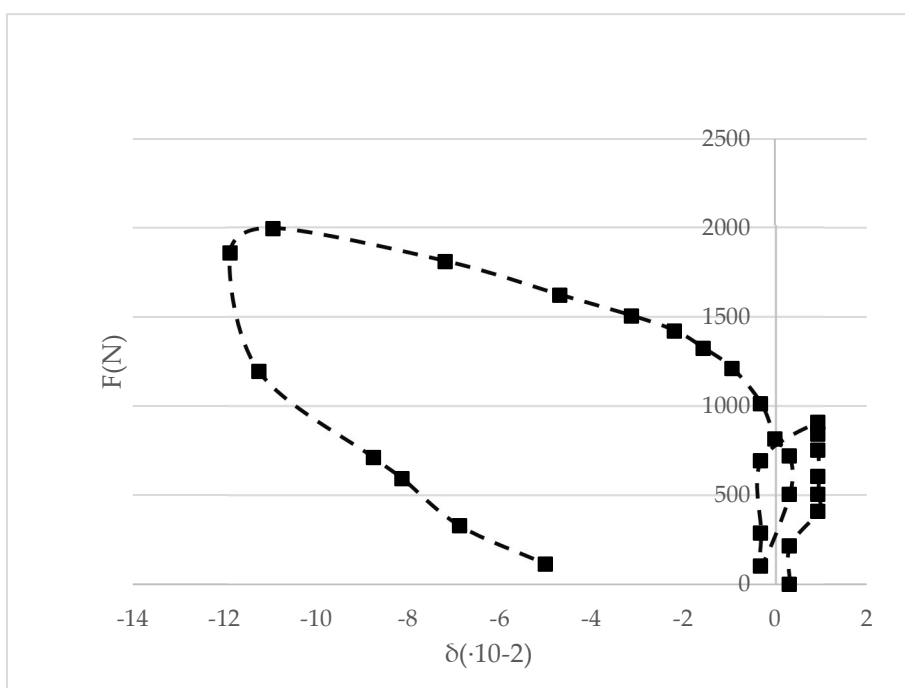


Figura 3.27-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T4)

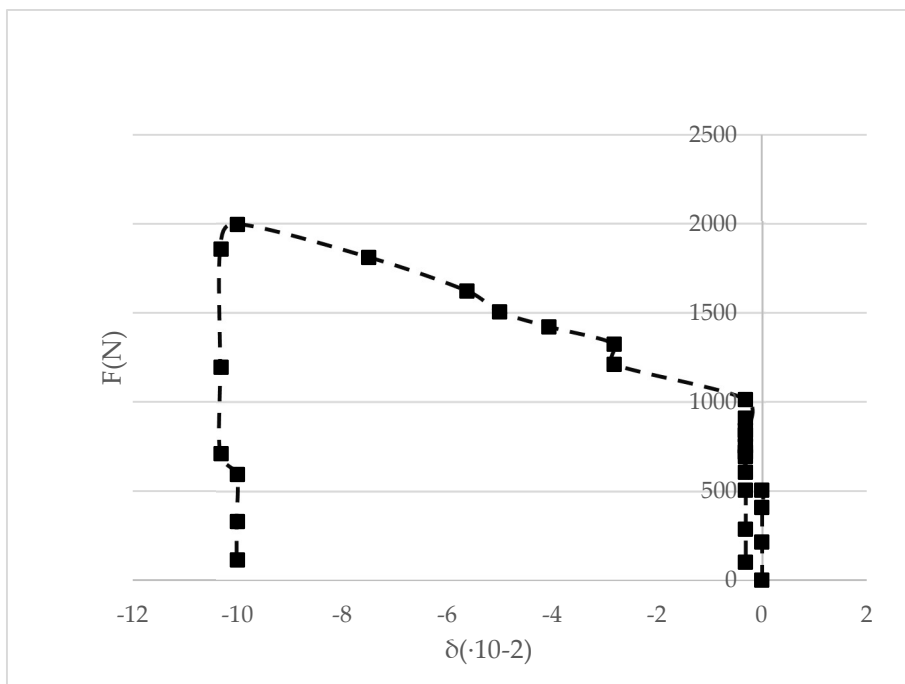


Figura 3.28-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T5)

Estensimetri- quarto ciclo (fino 3000 N)

Tabella 3.7-Deformazioni

Forza	deformazioni		
	Est 1	Est 2	Est 3 (LVDT1)
N	um/m	um/m	um/m
0	0	0	0
50	6	-3	1
214	51	-18	8
408	118	-37	15
605	202	-57	21
841	316	-81	25
1000	414	-98	26
1210	549	-117	26
1421	683	-136	25
1622	879	-154	22
1811	1073	-172	18
1858	1302	-186	10
2013	1349	-192	9
2236	1518	-210	7
2433	1689	-225	4
2660	1912	-244	0
2829	2068	-258	-3
2992	2311	-274	-7

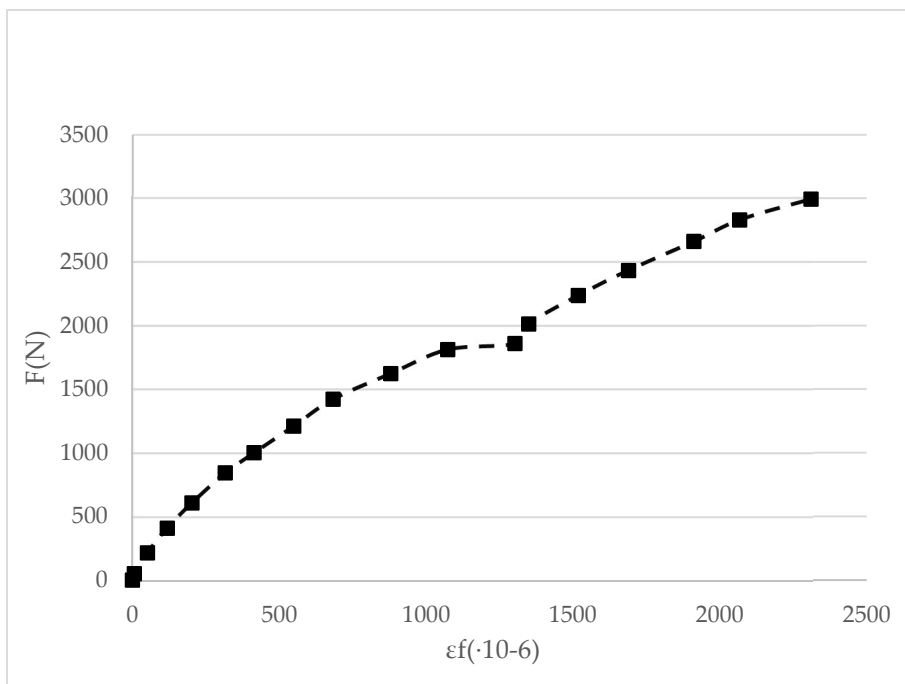


Figura 3.29-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ε (punto E1)

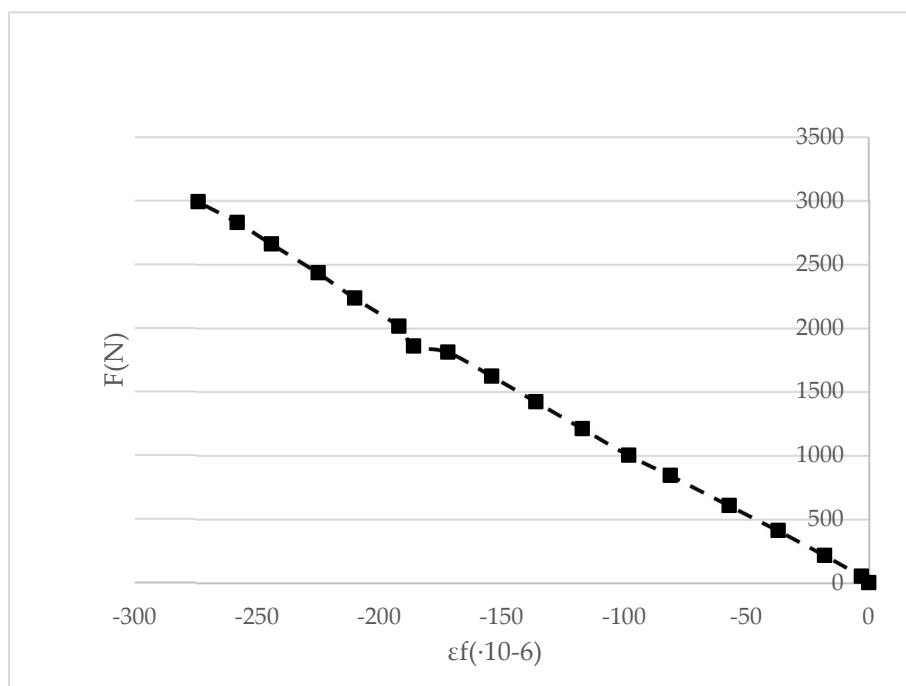


Figura 3.30-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ε (punto E2)

Trasduttori- quarto ciclo (fino 3000 N)

Tabella 3.8-Spostamenti

Forza	spostamenti				
	Spost 1	Spost 2	Spost 3	Spost 4	Spost 5
N	mm	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm
0	0	0	8,67362E-17	0,3125	0
50	0	0	0	0	0
214	0	0,3125	0	0,3125	0
408	0	9,375	0	0,9375	0
403	0	15	0,3125	0,9375	0
265	0	15	0,3125	0,9375	0
214	0	10,625	0,3125	0,625	0
412	0	10,9375	0,3125	0,9375	0
605	0	18,75	0,3125	0,9375	-0,3125
841	0	28,75	2,8125	0,9375	-0,3125
1000	0	36,25	12,8125	0,625	-0,3125
799	0	36,875	14,0625	0	-0,3125
605	0	36,875	14,0625	-0,3125	-0,3125
399	0	30,3125	14,0625	-0,3125	-0,3125
240	0	15,3125	11,5625	0	-0,3125
412	0	15,9375	11,5625	0,3125	-0,3125
593	0	23,75	11,875	0,3125	-0,3125
815	0	31,875	11,875	0	-0,3125
1013	0	38,4375	12,1875	-0,3125	-0,3125
1210	0	46,25	16,5625	-0,9375	-2,8125
1421	0	54,375	24,375	-2,1875	-4,0625
1622	9,0625	63,125	30	-4,6875	-5,625
1811	12,1875	70,9375	35,3125	-7,1875	-7,5
1996	16,5625	80,3125	41,5625	-10,9375	-10
1542	17,5	80,9375	42,5	-11,875	-10,3125
1475	17,5	80,625	42,5	-11,5625	-10,3125
1194	17,5	72,8125	42,5	-11,25	-10,3125
1042	17,5	68,125	42,5	-10,3125	-10,3125
593	17,5	50	35	-8,125	-10
328	17,1875	37,8125	26,5625	-6,875	-10
227	17,1875	32,1875	22,1875	-5,9375	-10
113	17,1875	23,75	16,5625	-5	-10
454	17,1875	25,3125	15	-4,0625	-10
630	17,1875	33,125	15	-4,0625	-10
824	17,1875	40,9375	15,3125	-5	-10
1021	17,1875	49,0625	15,625	-5,9375	-10
1425	17,5	63,75	26,5625	-8,4375	-10

1622	17,5	70	31,5625	-9,6875	-10
1832	17,5	76,875	35,9375	-10,9375	-10
2013	17,5	83,125	40,625	-12,1875	-10
2236	21,5625	90,9375	45,9375	-14,375	-12,8125
2433	24,0625	98,75	50,3125	-16,875	-14,375
2660	28,125	108,125	55	-21,25	-16,875
2829	30,625	114,6875	59,0625	-24,0625	-18,75
2908	32,1875	118,4375	61,25	-26,25	-20
2992	34,375	123,4375	64,375	-29,6875	-21,5625
2736	35,3125	124,375	65,3125	-31,5625	-22,5
2429	35,3125	124,0625	65,3125	-31,5625	-22,5
2164	35,3125	117,1875	65,3125	-31,25	-22,5
1967	35,3125	112,8125	65,3125	-30,3125	-22,5
1673	35,3125	102,8125	65	-28,125	-22,5
1454	35,3125	95,3125	63,125	-25,9375	-22,1875
1265	35,3125	88,4375	56,25	-24,375	-22,1875
1084	35,3125	80,9375	51,5625	-22,5	-22,1875
824	35,3125	69,375	44,375	-19,375	-22,1875
609	34,6875	58,4375	37,8125	-16,875	-22,1875
378	30,9375	46,5625	30	-14,0625	-22,1875
202	26,5625	35	22,5	-11,5625	-20
101	23,75	27,5	17,1875	-10	-18,4375

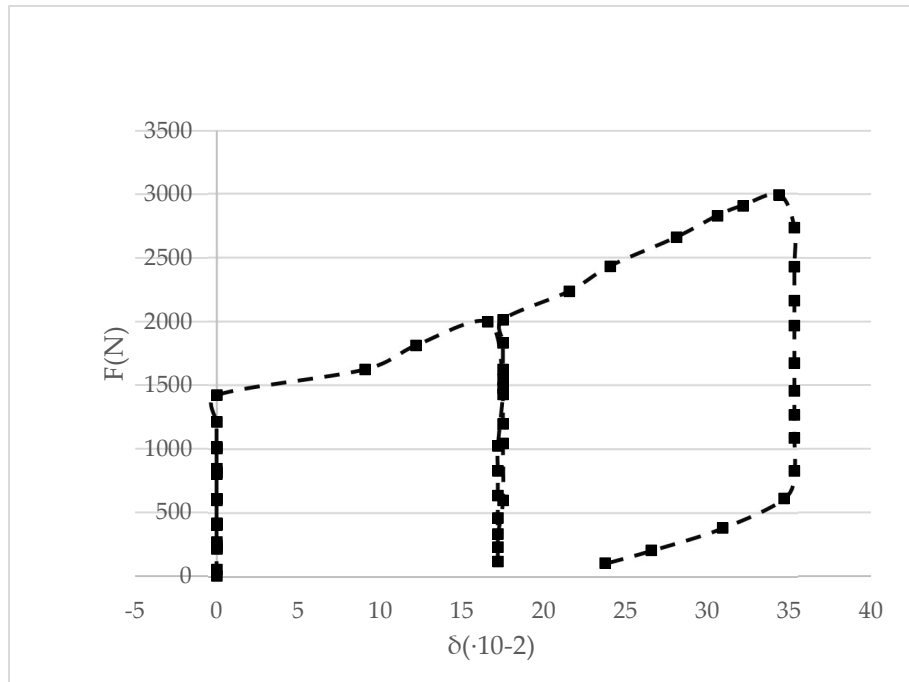


Figura 3.31-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T1)

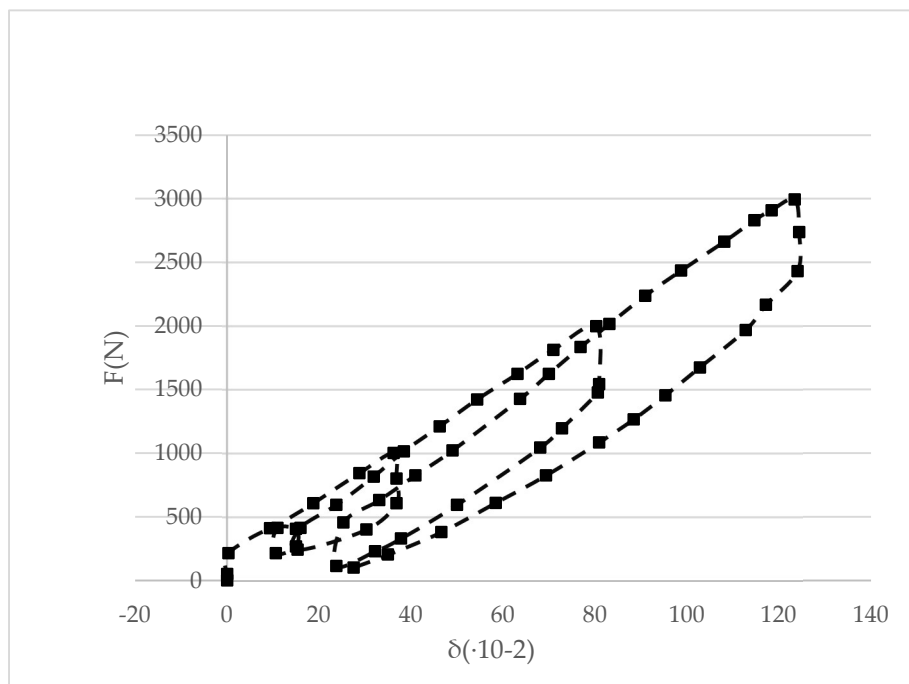


Figura 3.32-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T2)

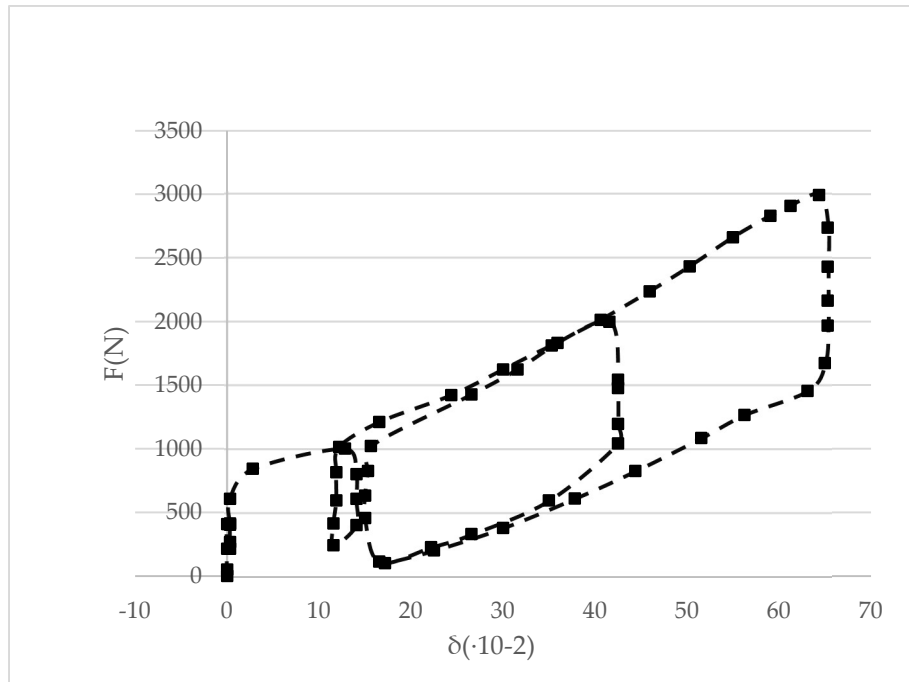


Figura 3.33-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T3)

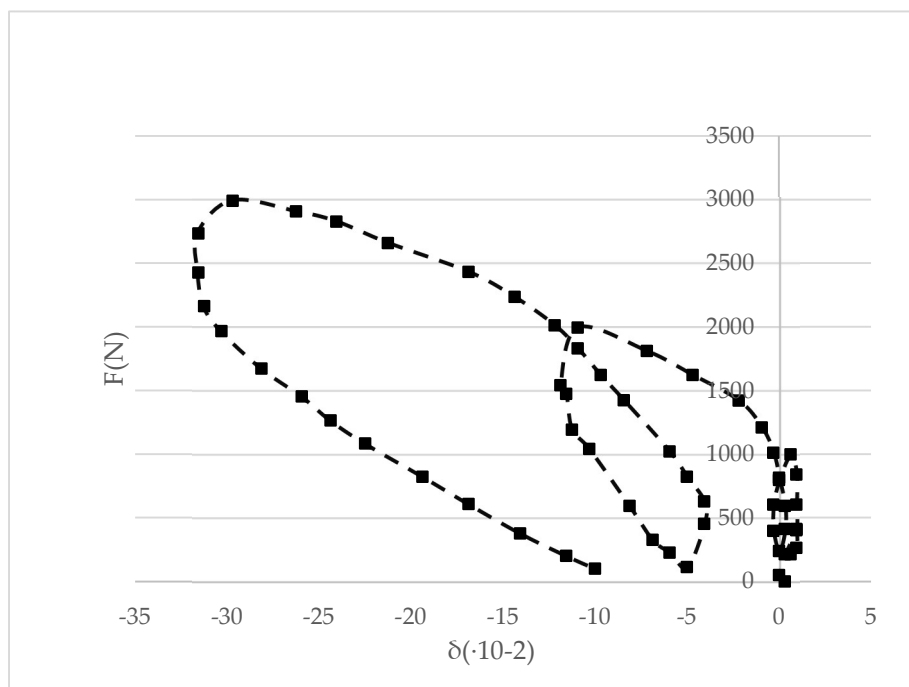


Figura 3.34-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T4)

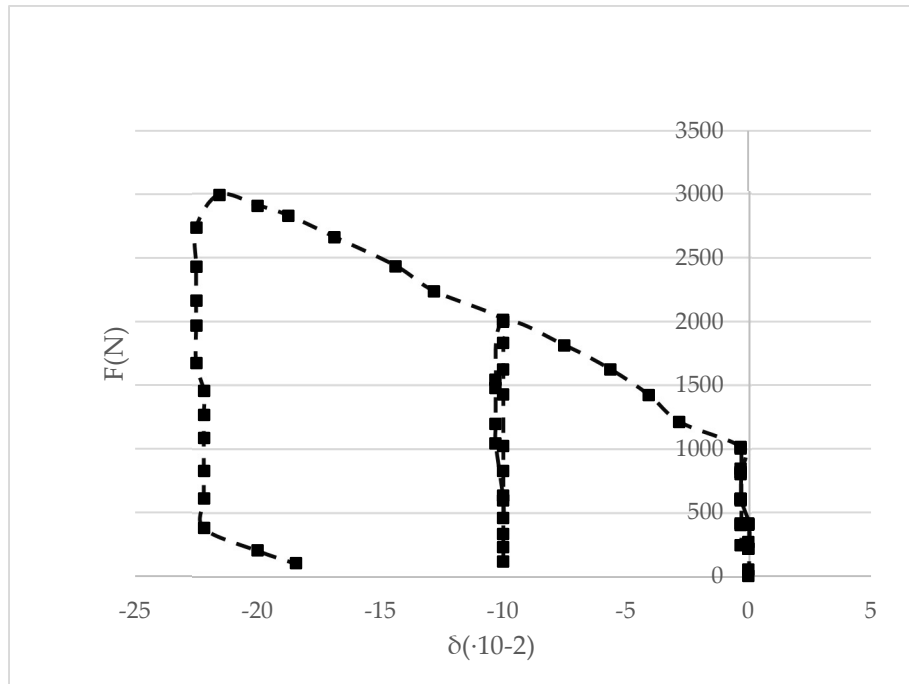


Figura 3.35-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T5)

Estensimetri- quinto ciclo (fino 4000 N)

Tabella 3.9-Deformazioni

Forza	deformazioni		
	Est 1	Est 2	Est 3 (LVDT1)
N	um/m	um/m	um/m
0	0	0	0
50	6	-3	1
214	51	-18	8
408	118	-37	15
403	152	-45	18
412	130	-39	16
605	202	-57	21
841	316	-81	25
1000	414	-98	26
1013	441	-99	25
1210	549	-117	26
1421	683	-136	25
1622	879	-154	22
1811	1073	-172	18
1996	1284	-190	12
2013	1349	-192	9
2236	1518	-210	7
2433	1689	-225	4
2660	1912	-244	0
2829	2068	-258	-3
2992	2311	-274	-7
3030	2443	-278	-10
3224	2622	-293	-12
3635	2989	-323	-15
3778	3179	-337	-18
3993	3443	-354	-22

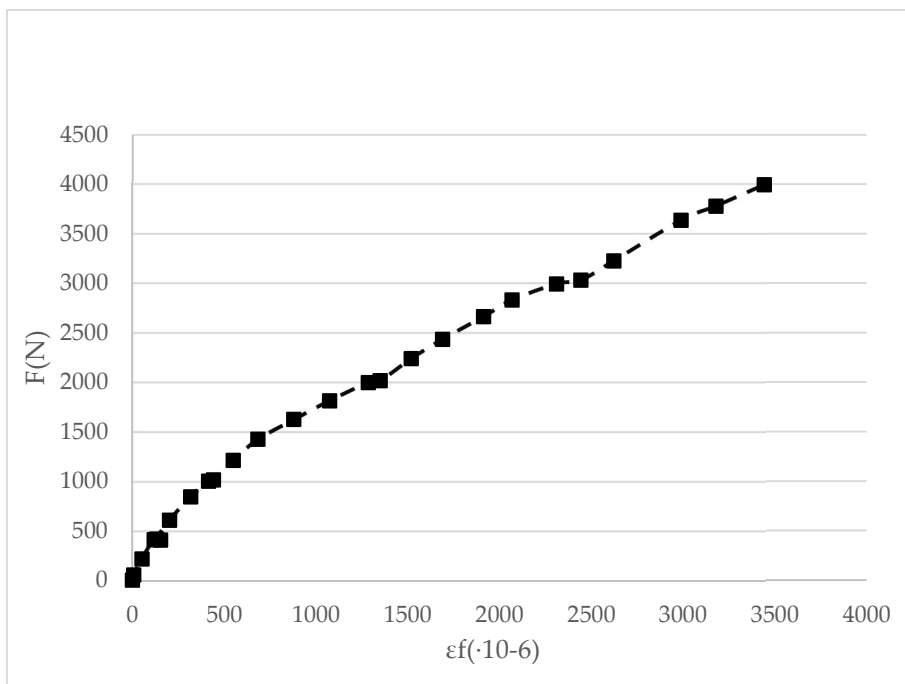


Figura 3.36-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ϵ (punto E1)

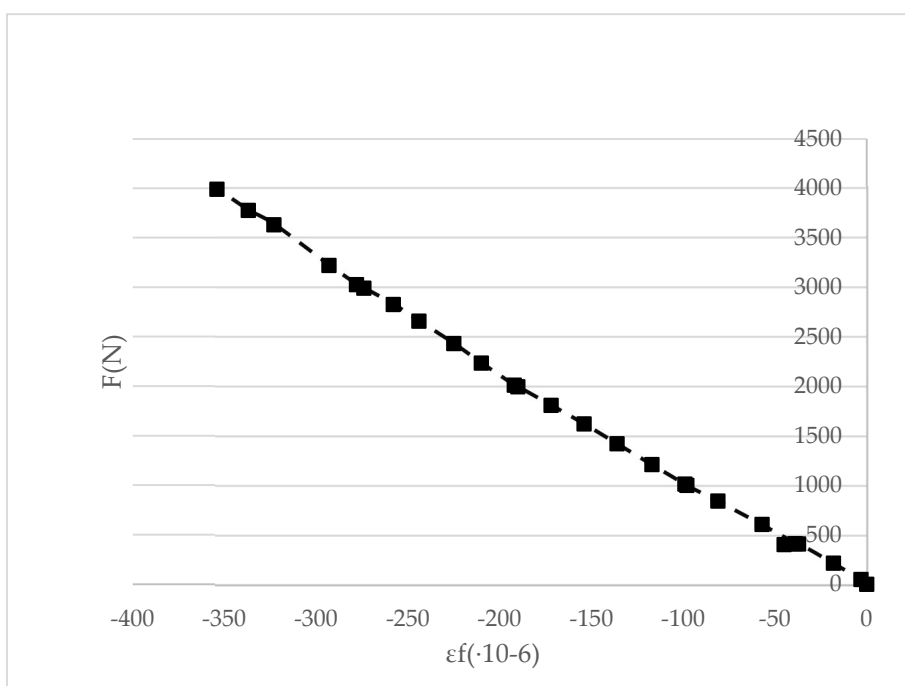


Figura 3.37-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ϵ (punto E2)

Trasduttori- quinto ciclo (fino 4000 N)

Tabella 3.10-Spostamenti

Forza	spostamenti				
	Spost 1	Spost 2	Spost 3	Spost 4	Spost 5
N	mm	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm
0	0	0	8,67362E-17	0,3125	0
50	0	0	0	0	0
214	0	0,3125	0	0,3125	0
408	0	9,375	0	0,9375	0
403	0	15	0,3125	0,9375	0
206	0	14,6875	0,3125	0,625	0
214	0	10,625	0,3125	0,625	0
412	0	10,9375	0,3125	0,9375	0
605	0	18,75	0,3125	0,9375	-0,3125
841	0	28,75	2,8125	0,9375	-0,3125
1000	0	36,25	12,8125	0,625	-0,3125
799	0	36,875	14,0625	0	-0,3125
605	0	36,875	14,0625	-0,3125	-0,3125
399	0	30,3125	14,0625	-0,3125	-0,3125
240	0	15,3125	11,5625	0	-0,3125
412	0	15,9375	11,5625	0,3125	-0,3125
593	0	23,75	11,875	0,3125	-0,3125
815	0	31,875	11,875	0	-0,3125
1013	0	38,4375	12,1875	-0,3125	-0,3125
1210	0	46,25	16,5625	-0,9375	-2,1875
1421	0	54,375	24,375	-2,1875	-4,0625
1622	9,0625	63,125	30	-4,6875	-5,625
1811	12,1875	70,9375	35,3125	-7,1875	-7,5
1996	16,5625	80,3125	41,5625	-10,9375	-10
1681	17,5	80,9375	42,5	-11,875	-10,3125
1475	17,5	80,625	42,5	-11,5625	-10,3125
1194	17,5	72,8125	42,5	-11,25	-10,3125
1042	17,5	68,125	42,5	-10,3125	-10,3125
593	17,5	50	35	-8,125	-10
227	17,1875	32,1875	22,1875	-5,9375	-10
151	17,1875	23,125	15	-4,0625	-10
454	17,1875	25,3125	15	-4,0625	-10
630	17,1875	33,125	15	-4,0625	-10
824	17,1875	40,9375	15,3125	-5	-10
1021	17,1875	49,0625	15,625	-5,9375	-10
1231	17,1875	56,875	20,625	-6,875	-10
1425	17,5	63,75	26,5625	-8,4375	-10

1622	17,5	70	31,5625	-9,6875	-10
1832	17,5	76,875	35,9375	-10,9375	-10
2013	17,5	83,125	40,625	-12,1875	-10
2236	21,5625	90,9375	45,9375	-14,375	-12,8125
2433	24,0625	98,75	50,3125	-16,875	-14,375
2660	28,125	108,125	55	-21,25	-16,875
2829	30,625	114,6875	59,0625	-24,0625	-18,75
2992	34,375	123,4375	64,375	-29,6875	-21,5625
2551	35,3125	124,375	65,3125	-31,5625	-22,5
2429	35,625	124,0625	65,3125	-31,5625	-22,5
2164	35,3125	117,1875	65,3125	-31,25	-22,5
2055	35,3125	115,3125	65,3125	-30,9375	-22,5
1866	35,3125	109,375	65	-29,6875	-22,5
1673	35,3125	102,8125	65	-28,125	-22,5
1454	35,3125	95,3125	63,125	-25,9375	-22,1875
1265	35,3125	88,4375	56,25	-24,375	-22,1875
1084	35,3125	80,9375	51,5625	-22,5	-22,1875
824	35,3125	69,375	44,375	-19,375	-22,1875
609	34,6875	58,4375	37,8125	-16,875	-22,1875
378	30,9375	46,5625	30	-14,0625	-21,875
202	26,5625	35	22,5	-11,5625	-20
101	23,75	27,5	17,1875	-10	-18,4375
483	23,125	32,5	15,9375	-9,0625	-16,875
815	23,125	47,5	16,25	-10,9375	-16,875
1025	23,125	55,9375	16,5625	-12,5	-16,875
1467	23,125	72,1825	28,125	-16,5625	-16,875
2101	28,125	96,25	45	-23,125	-18,75
2438	32,1875	107,5	51,875	-27,1875	-20,625
2837	35,3125	119,6875	59,6875	-31,25	-23,125
3030	37,1875	126,875	63,75	-34,375	-25,3125
3224	40,625	134,375	68,125	-37,8125	-27,5
3635	46,5625	149,0625	75,625	-45,3125	-31,25
3778	49,6875	156,5625	80,3125	-49,6875	-34,0625
3993	53,4375	166,25	85,3125	-57,5	-37,8125
3804	54,375	167,8125	86,25	-60,625	-38,125
3665	55	170	86,5625	-65,3125	-40,3125
3287	55	167,8125	86,5625	-64,375	-40,3125
3182	55	166,25	86,5625	-64,0625	-40,3125
3064	55	163,125	86,5625	-63,4375	-40,3125
2896	55	158,75	86,25	-61,875	-40,3125
2438	55	146,25	85,9375	-56,875	-40,3125
2282	55	140,9375	85,625	-55	-40,3125
2089	55	134,0625	80	-52,1875	-40,3125
1887	55	126,875	75,3125	-49,375	-40,3125
1496	53,75	110,9375	65,625	-43,125	-40,3125

778	42,5	78,4375	47,1875	-31,875	-35
639	39,6875	70,9375	42,5	-29,375	-32,8125
235	30,9375	47,1875	27,8125	-21,875	-24,6875

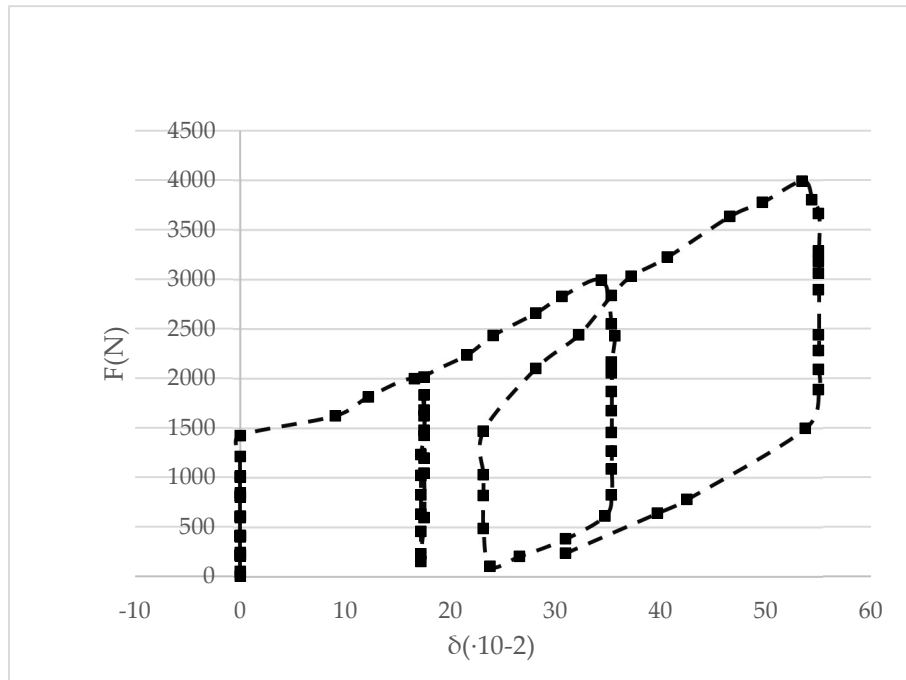


Figura 3.38-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T1)

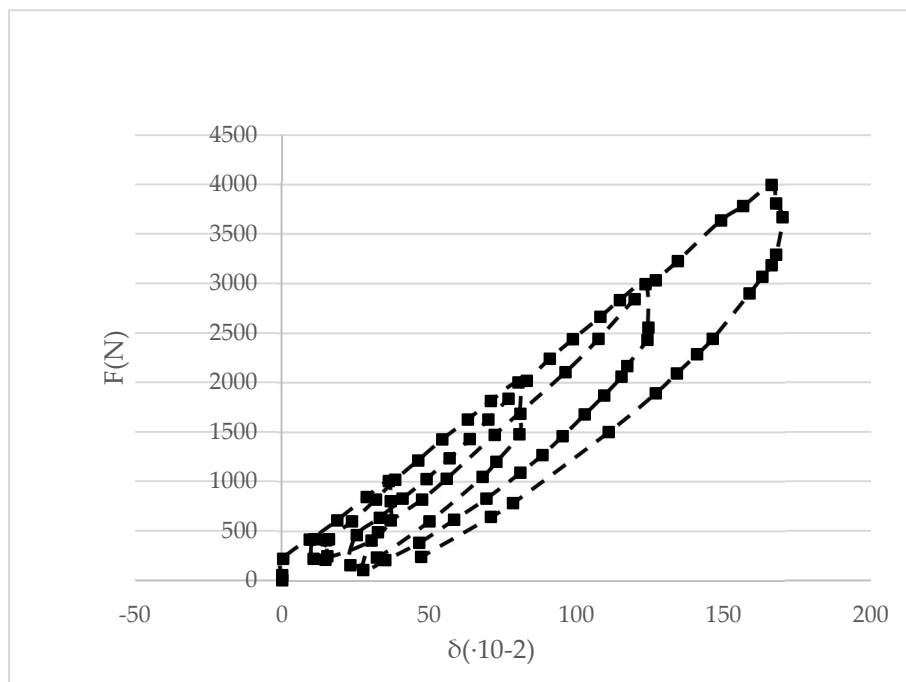


Figura 3.39-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T2)

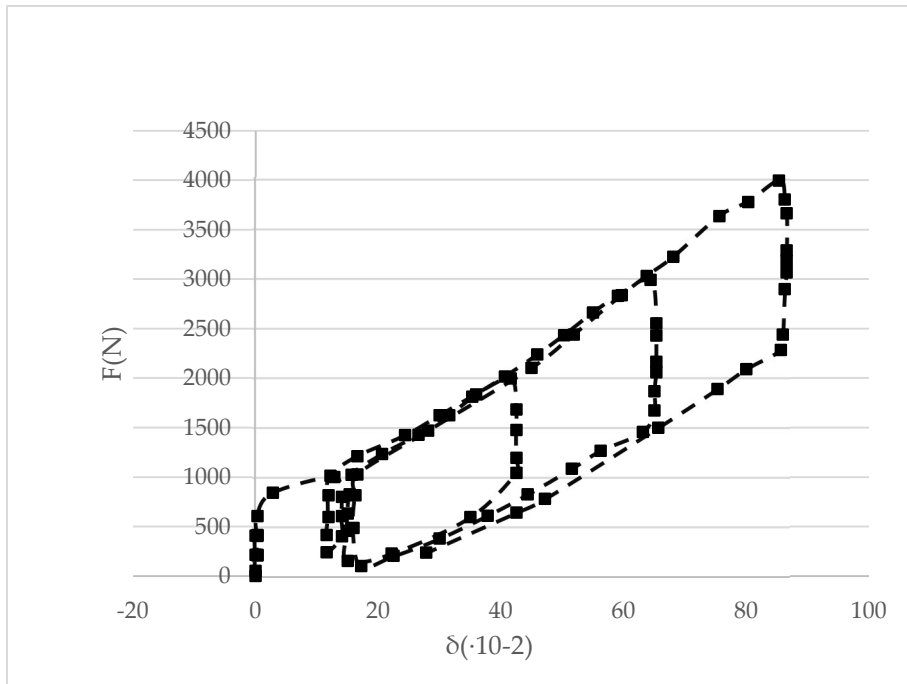


Figura 3.40-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T3)

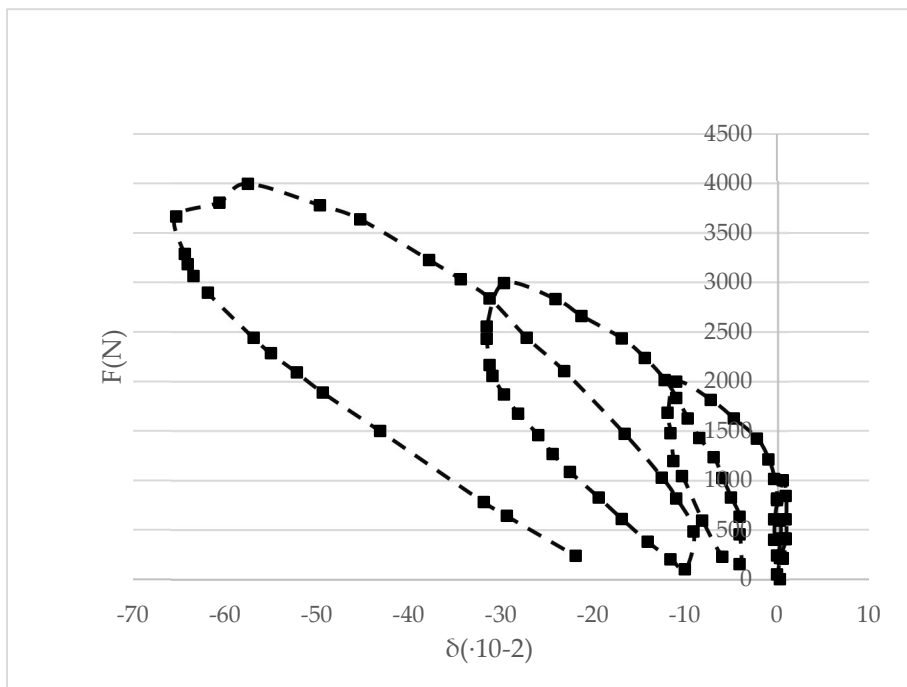


Figura 3.41-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T4)

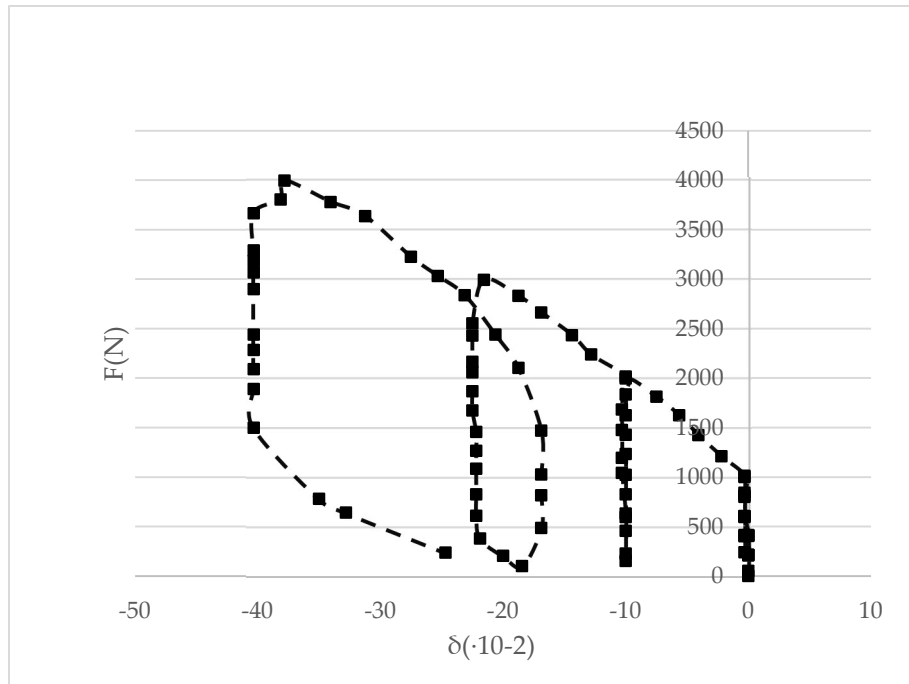


Figura 3.42-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T5)

Estensimetri- sesto ciclo (fino 5000 N)

Tabella 3.11-Deformazioni

Forza N	deformazioni		
	Est 1 um/m	Est 2 um/m	Est 3 (LVDT1) um/m
0	0	0	0
50	6	-3	1
500	156	-47	18
504	164	-48	18
1000	414	-98	26
1013	441	-99	25
1505	775	-145	24
1996	1284	-190	12
2013	1349	-192	9
2992	2311	-274	-7
3030	2443	-278	-10
3455	2827	-310	-14
3993	3443	-354	-22
4064	3602	-359	-25
4526	4116	-392	-31
5001	4638	-424	-36

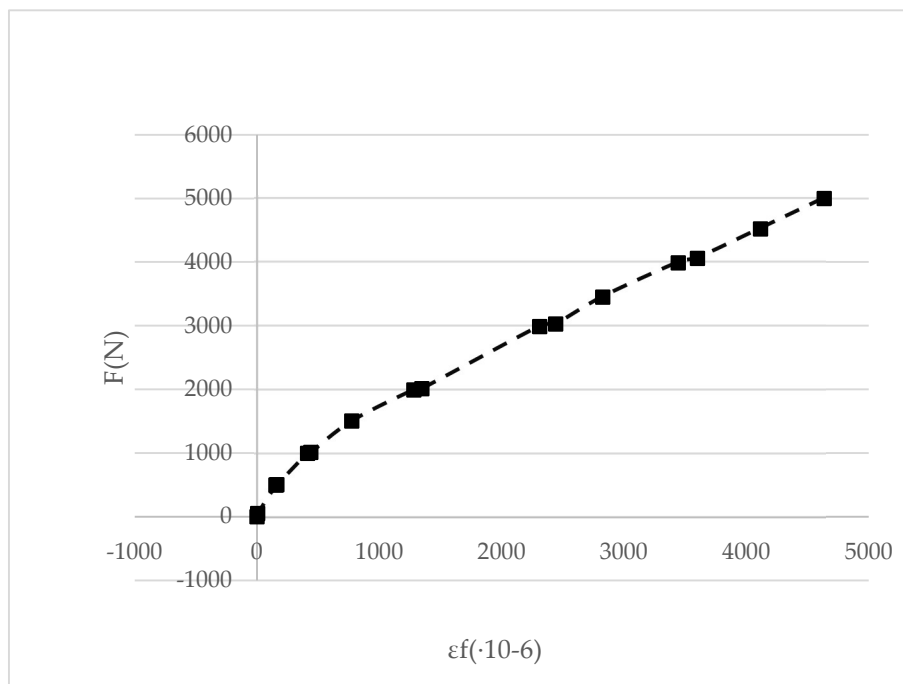


Figura 3.43-Diagramma sperimentale carico F, deformazione ϵ (punto E1)

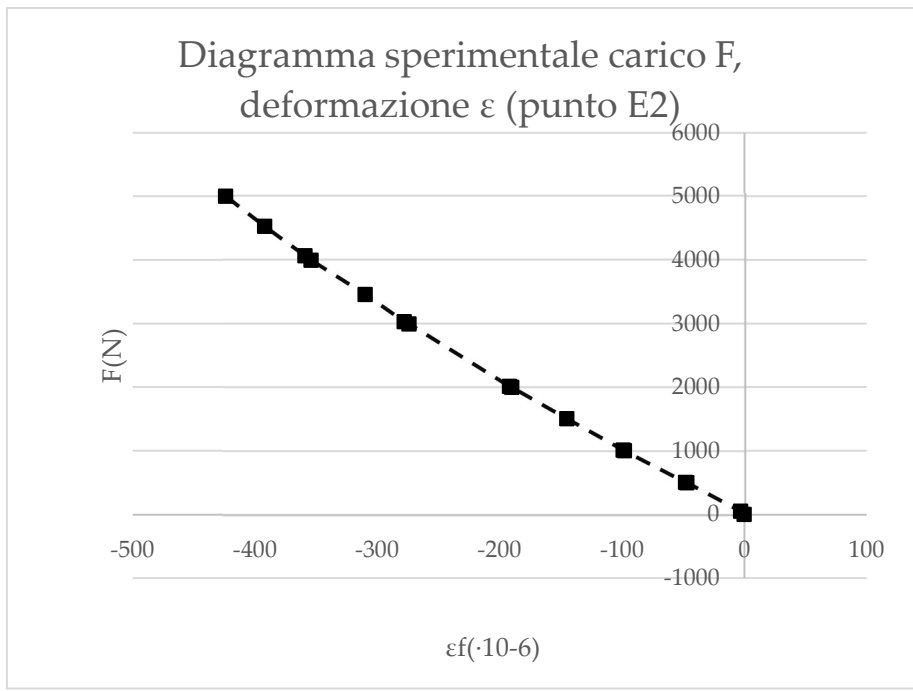


Figura 3.44-Diagramma sperimentale carico F, deformazione ε (punto E2)

Trasduttori- sesto ciclo (fino 5000 N)

Tabella 3.12-Spostamenti

Forza	spostamenti				
	Spost 1	Spost 2	Spost 3	Spost 4	Spost 5
N	mm	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm
0	0	0	8,67362E-17	0,3125	0
50	0	0	0	0	0
500	0	14,0625	0,3125	0,9375	0
105	0	11,875	0,3125	0,625	0
504	0	15	0,3125	0,9375	0
1000	0	36,25	12,8125	0,625	-0,3125
521	0	34,6875	14,0625	-0,3125	-0,3125
101	0	16,25	13,4375	-0,3125	-0,3125
504	0	20	11,875	0,3125	-0,3125
1013	0	38,4375	12,1875	-0,3125	-0,3125
1505	0,3125	58,4375	27,5	-3,125	-5
1996	16,5625	80,3125	41,5625	-10,9375	-10
1042	17,5	68,125	42,5	-10,3125	-10,3125
113	17,1875	23,75	16,5625	-5	-10
525	17,1875	28,4375	15	-4,0625	-10
1021	17,1875	49,0625	15,625	-5,9375	-10
2013	17,5	83,125	40,625	-12,1875	-10
2992	34,375	123,4375	64,375	-29,6875	-21,5625
2551	35,3125	124,375	65,3125	-31,5625	-22,5
2055	35,3125	115,3125	65,3125	-30,9375	-22,5
1521	35,3125	97,8125	64,0625	-26,875	-22,1875
1084	35,3125	80,9375	51,5625	-22,5	-22,1875
525	33,75	55	35,625	-15,9375	-22,1875
101	23,75	27,5	17,1875	-10	-18,4375
492	23,125	32,8125	15,9375	-9,0625	-16,875
1025	23,125	55,9375	16,5625	-12,5	-16,875
2101	28,125	96,25	45	-23,125	-18,75
3030	37,1875	126,875	63,75	-34,375	-25,3125
3455	43,75	142,8125	72,5	-41,875	-29,6875
3993	53,4375	166,25	85,3125	-57,5	-37,8125
3547	55	170	86,5625	-65	-40,3125
3064	55	163,125	86,5625	-63,4375	-40,3125
2438	55	146,25	85,9375	-56,875	-40,3125
2089	55	134,0625	80	-52,1875	-40,3125
1496	53,75	110,9375	65,625	-43,125	-40,3125
1076	47,5	93,75	55,9375	-37,1875	-38,4375
639	39,6875	70,9375	42,5	-29,375	-32,8125

328	33,4375	53,4375	32,1875	-23,4375	-27,1875
105	27,5	36,875	21,5625	-19,375	-21,5625
588	25,9375	42,5	19,0625	-15	-20,625
983	25,9375	61,5625	19,6875	-18,75	-20,625
1521	26,25	83,4375	31,25	-23,3125	-20,625
2022	31,25	103,125	44,375	-32,5	-21,875
3030	44,6875	139,375	65	-48,4375	-31,875
3383	50	152,1875	72,1875	-54,375	-35,625
3640	52,8125	159,375	75,3125	-58,125	-37,1875
4064	56,875	171,875	82,8125	-64,375	-45,625
4526	64,0625	190	91,5625	-76,25	-51,25
5001	71,25	207,8125	99,6875	-89,6875	-52,1875
4497	72,1875	209,0625	101,25	-94,6875	-52,1875
3455	72,1875	192,1875	100,9375	-87,8125	-52,1875
3098	72,1875	180,9375	100,625	-82,5	-52,1875
2509	71,875	160	91,25	-72,1875	-52,1875
2001	65	140	80	-62,1875	-51,875
1471	57,8125	119,6875	68,75	-53,4375	-47,8125
1047	49,6875	99,6875	57,1875	-45,3125	-41,25
504	38,4375	70,3125	40,3125	-34,0625	-32,5
97	27,8125	41,25	23,125	-24,6875	-23,4375

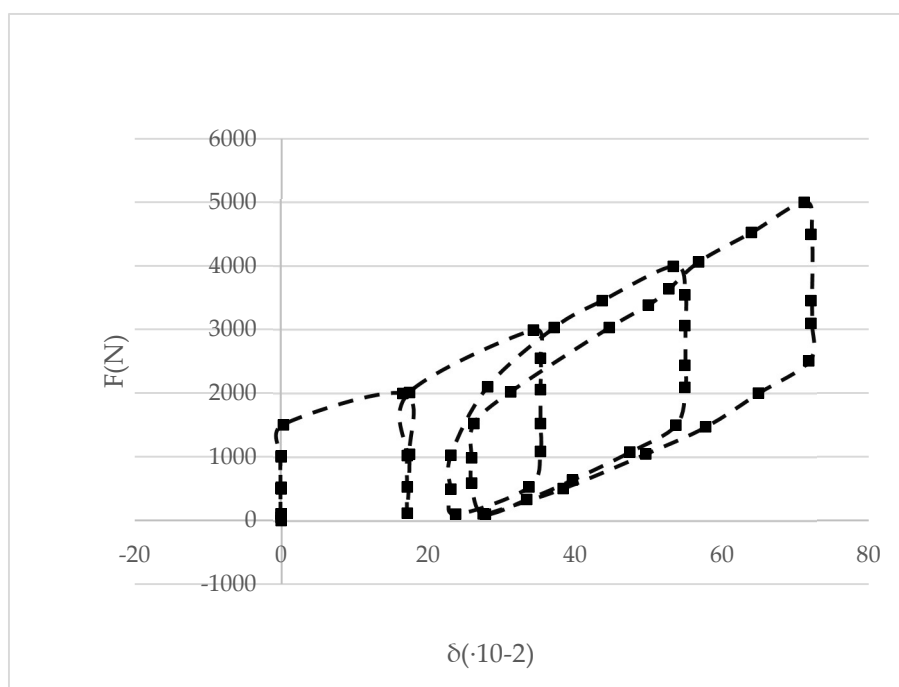


Figura 3.45-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T1)

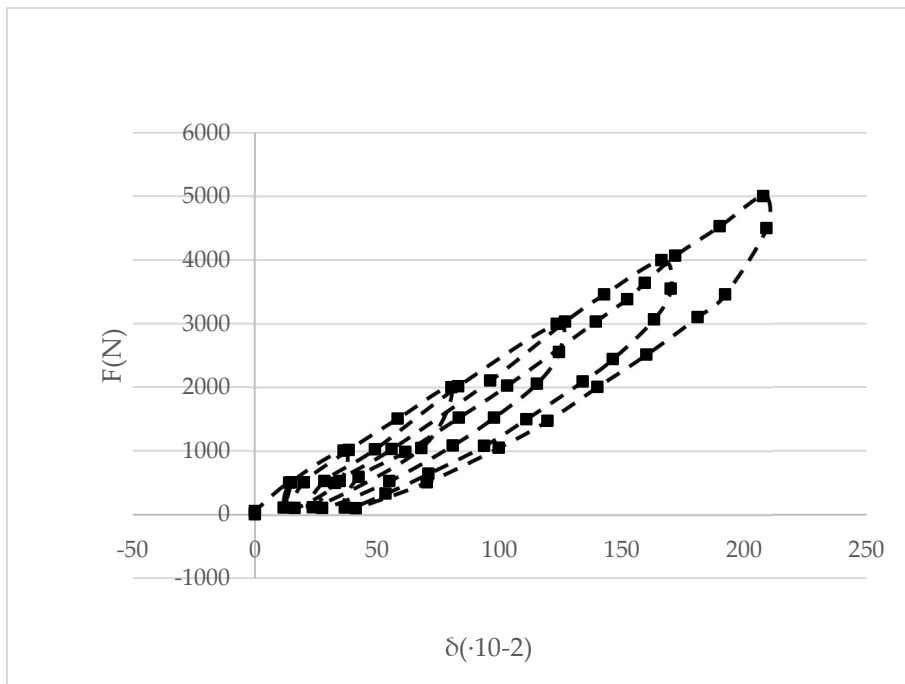


Figura 3.46-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T2)

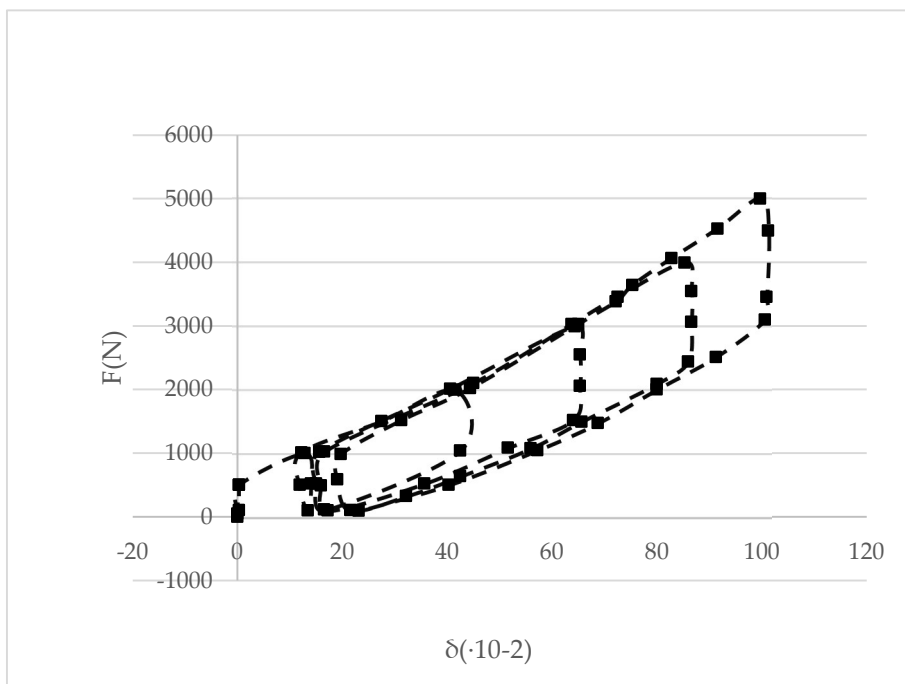


Figura 3.47-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T3)

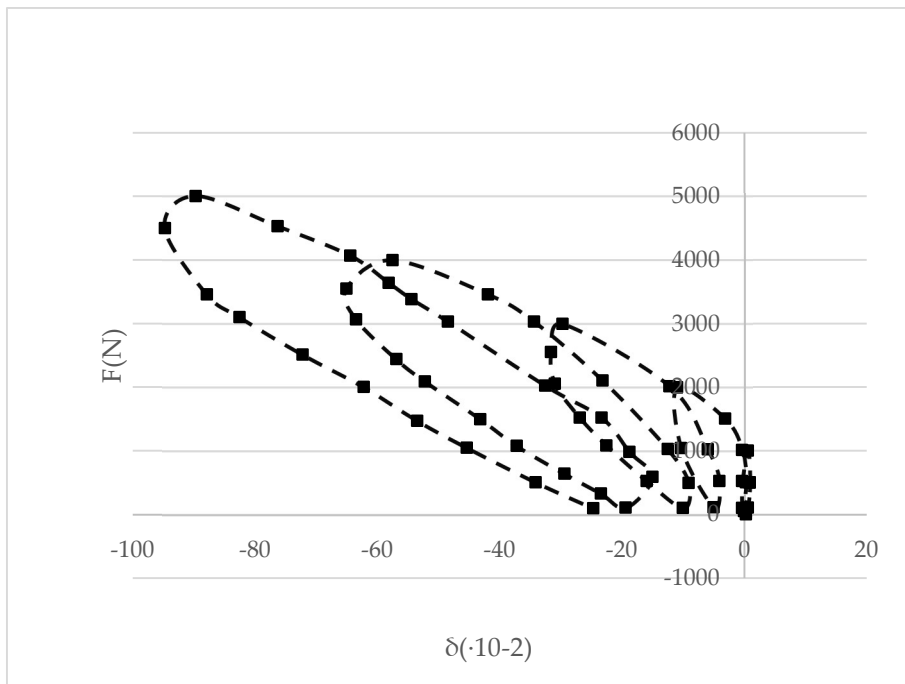


Figura 3.48-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T4)

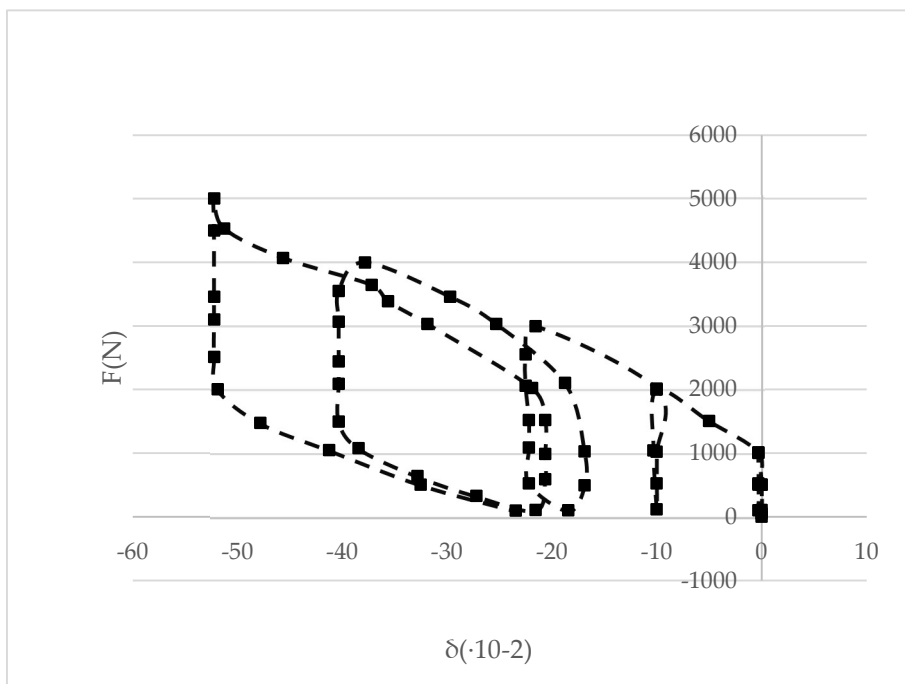


Figura 3.49-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T5)

Estensimetri- settimo ciclo (fino 6000 N)

Tabella 3.13-Deformazioni

Forza	deformazioni		
	Est 1	Est 2	Est 3 (LVDT1)
N	um/m	um/m	um/m
0	0	0	0
50	6	-3	1
500	156	-47	18
504	164	-48	18
1000	414	-98	26
1013	441	-99	25
1505	775	-145	24
1996	1284	-190	12
2013	1349	-192	9
2433	1689	-225	4
2992	2311	-274	-7
3030	2443	-278	-10
3455	2827	-310	-14
3993	3443	-354	-22
4064	3602	-359	-25
4526	4116	-392	-31
5001	4638	-424	-36
5018	4851	-427	-40
5502	5438	-456	-46
6006	7916	-483	-54

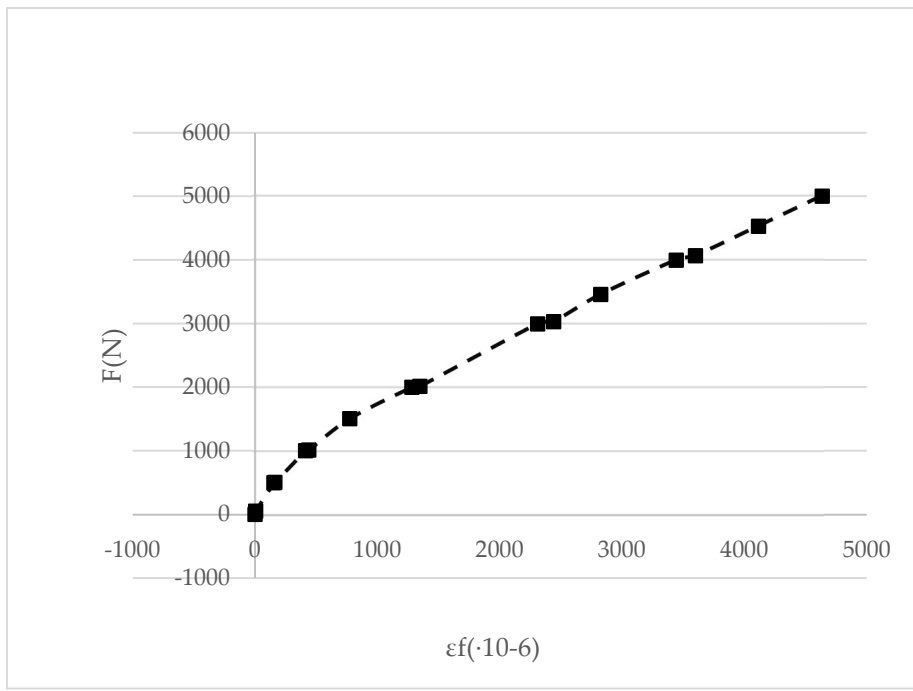


Figura 3.50-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ϵ (punto E1)

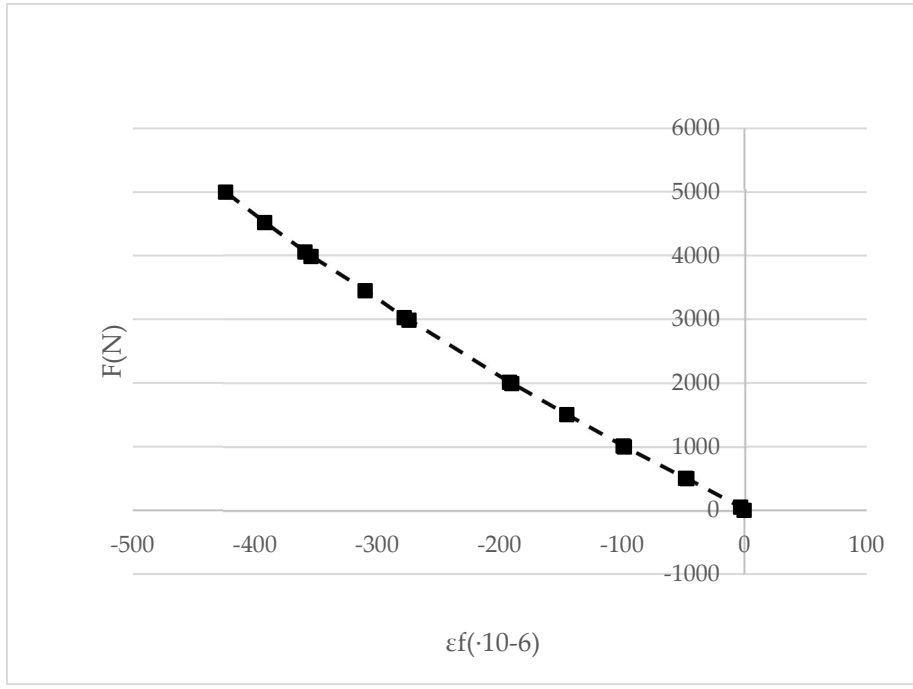


Figura 3.51-Diagramma sperimentale carico F , deformazione ϵ (punto E2)

Trasduttori- settimo ciclo (fino 6000 N)

Tabella 3.14-Spostamenti

Forza	spostamenti				
	Spost 1	Spost 2	Spost 3	Spost 4	Spost 5
N	mm	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm
0	0	0	8,67362E-17	0,3125	0
50	0	0	0	0	0
500	0	14,0625	0,3125	0,9375	0
105	0	11,875	0,3125	0,625	0
504	0	15	0,3125	0,9375	0
1000	0	36,25	12,8125	0,625	-0,3125
521	0	34,6875	14,0625	-0,3125	-0,3125
101	0	16,25	13,4375	-0,3125	-0,3125
504	0	20	11,875	0,3125	-0,3125
1013	0	38,4375	12,1875	-0,3125	-0,3125
1505	0,3125	58,4375	27,5	-3,125	-5
1996	16,5625	80,3125	41,5625	-10,9375	-10
1475	17,5	80,625	42,5	-11,5625	-10,3125
1042	17,5	68,125	42,5	-10,3125	-10,3125
593	17,5	50	35	-8,125	-10
113	17,1875	23,75	16,5625	-5	-10
525	17,1875	28,4375	15	-4,0625	-10
1021	17,1875	49,0625	15,625	-5,9375	-10
1425	17,5	63,75	26,5625	-8,4375	-10
2013	17,5	83,125	40,625	-12,1875	-10
2433	24,0625	98,75	50,3125	-16,875	-14,375
2992	34,375	123,4375	64,375	-29,6875	-21,5625
2551	35,3125	124,375	65,3125	-31,5625	-22,5
2055	35,3125	115,3125	65,3125	-30,9375	-22,5
1521	35,3125	97,8125	64,0625	-26,875	-22,1875
1084	35,3125	80,9375	51,5625	-22,5	-22,1875
525	33,75	55	35,625	-15,9375	-22,1875
101	23,75	27,5	17,1875	-10	-18,4375
492	23,125	32,8125	15,9375	-9,0625	-16,875
1025	23,125	55,9375	16,5625	-12,5	-16,875
1467	23,125	72,1875	28,125	-16,5625	-16,875
2101	28,125	96,25	45	-23,125	-18,75
2438	32,1875	107,5	51,875	-27,1875	-20,625
3030	37,1875	126,875	63,75	-34,375	-25,3125
3455	43,75	142,8125	72,5	-41,875	-29,6875
3993	53,4375	166,25	85,3125	-57,5	-37,8125
3547	55	170	86,5625	-65	-40,3125

3064	55	163,125	86,5625	-63,4375	-40,3125
2438	55	146,25	85,9375	-56,875	-40,3125
2089	55	134,0625	80	-52,1875	-40,3125
1496	53,75	110,9375	65,625	-43,125	-40,3125
1076	47,5	93,75	55,9375	-37,1875	-38,4375
639	39,6875	70,9375	42,5	-29,375	-32,8125
105	27,5	36,875	21,5625	-19,375	-21,5625
433	25,9375	35,3125	19,0625	-14,6875	-20,625
983	25,9375	61,5625	19,6875	-18,75	-20,625
1521	26,25	83,4375	31,25	-25,3125	-20,625
2022	31,25	103,125	44,375	-32,5	-21,875
2421	36,5625	118,125	52,5	-39,0625	-25,3125
3030	44,6875	139,375	65	-48,4375	-31,875
3383	50	152,1875	72,1875	-54,375	-35,625
4064	56,875	171,875	82,8125	-64,375	-40
4526	64,0625	190	91,5625	-76,25	-45,625
5001	71,25	207,8125	99,6875	-89,6875	-51,25
4497	72,1875	209,0625	101,25	-94,6875	-52,1875
3455	72,1875	192,1875	100,9375	-87,8125	-52,1875
3098	72,1875	180,9375	100,625	-82,5	-52,1875
2509	71,875	160	91,25	-72,1875	-52,1875
2001	65	140	80	-62,1875	-51,875
1471	57,8125	119,6875	68,75	-53,4375	-47,8125
1047	49,6875	99,6875	57,1875	-45,3125	-41,25
504	38,4375	70,3125	40,3125	-34,0625	-32,5
97	27,8125	41,25	23,125	-24,6875	-23,4375
504	27,1875	45,9375	21,25	-22,8125	-22,5
979	27,1875	67,1875	21,875	-26,5625	-22,5
1475	27,5	90,625	31,875	-34,375	-22,8125
2030	34,6875	112,25	45,625	-43,125	-26,25
2522	41,25	130	55,9375	-50,9375	-31,9375
2904	47,5	145,9375	64,6875	-58,75	-35,3125
3556	55,3125	166,25	75,625	-69,6875	-41,25
3984	61,875	181,5625	84,0625	-78,125	-45,9375
4514	68,4375	198,4375	92,5	-88,125	-50,3125
5018	73,4375	214,6875	100,3125	-99,0625	-55,9375
5502	81,5625	235	110	-114,375	-59,6875
6006	91,875	263,4375	118,4375	-145,938	-67,8125
5384	92,1875	264,0625	118,4375	-146,25	-69,375
5039	92,1875	259,6875	118,4375	-144,063	-69,375
4447	91,875	243,4375	118,4375	-135,938	-69,375
4287	91,875	239,0625	118,4375	-133,438	-69,375
3976	91,875	231,875	118,4375	-129,688	-69,375
3589	91,875	219,6875	117,8125	-122,5	-69,375
3013	86,5625	197,8125	104,375	-110,313	-69,0625

2513	79,0625	176,875	93,4375	-98,4375	-67,8125
2093	72,1875	159,0625	84,375	-88,125	-61,875
1563	63,125	135,3125	71,875	-74,6875	-53,75
1055	53,75	110,9375	58,75	-63,125	-45,9375
538	42,5	80,9375	42,1875	-50	-37,1875
105	30,625	49,6875	24,0625	-38,4375	-27,5

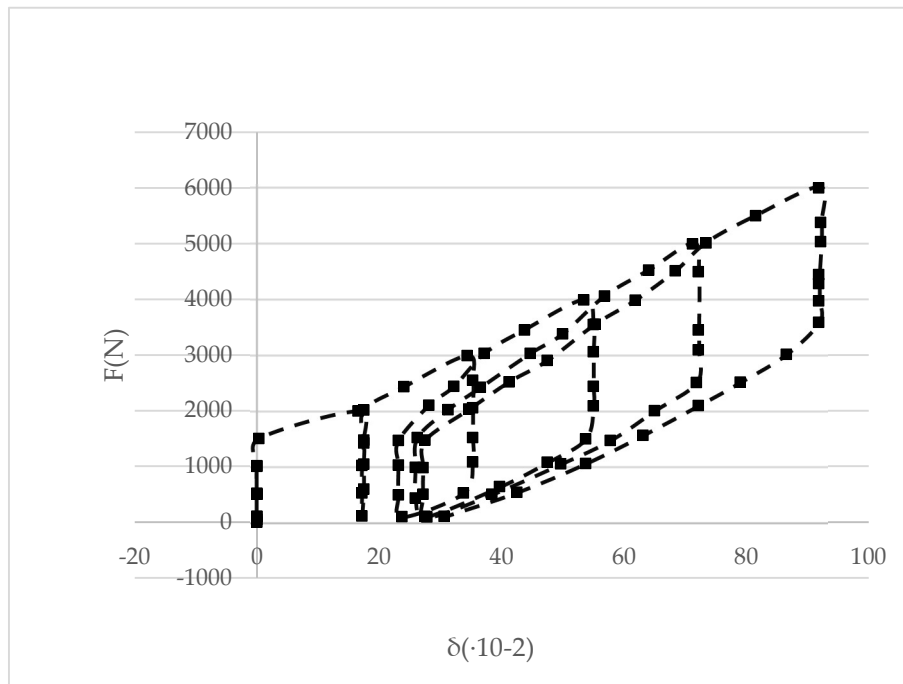


Figura 3.52-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T1)

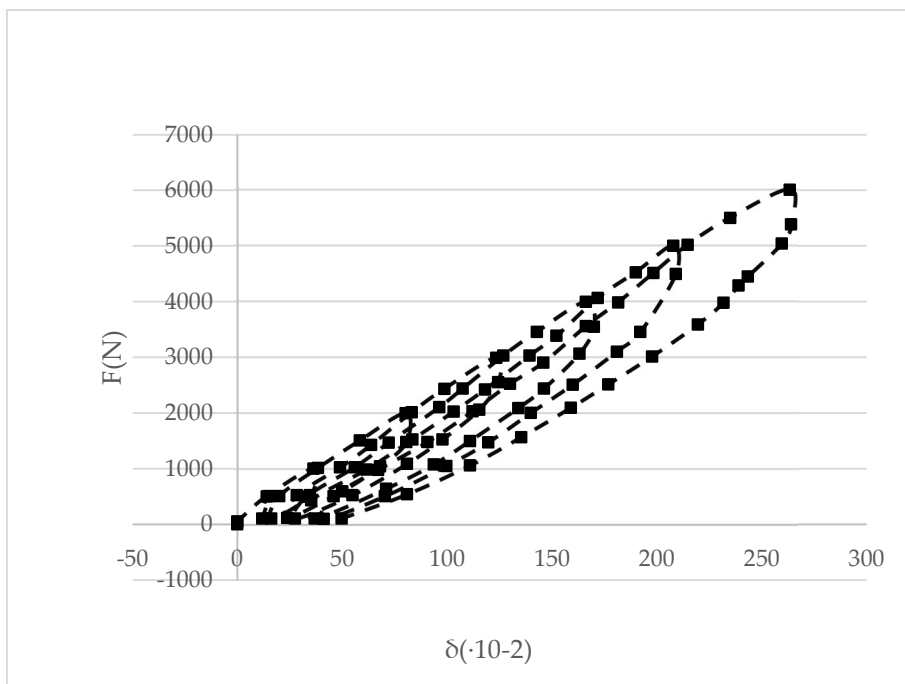


Figura 3.53-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T2)

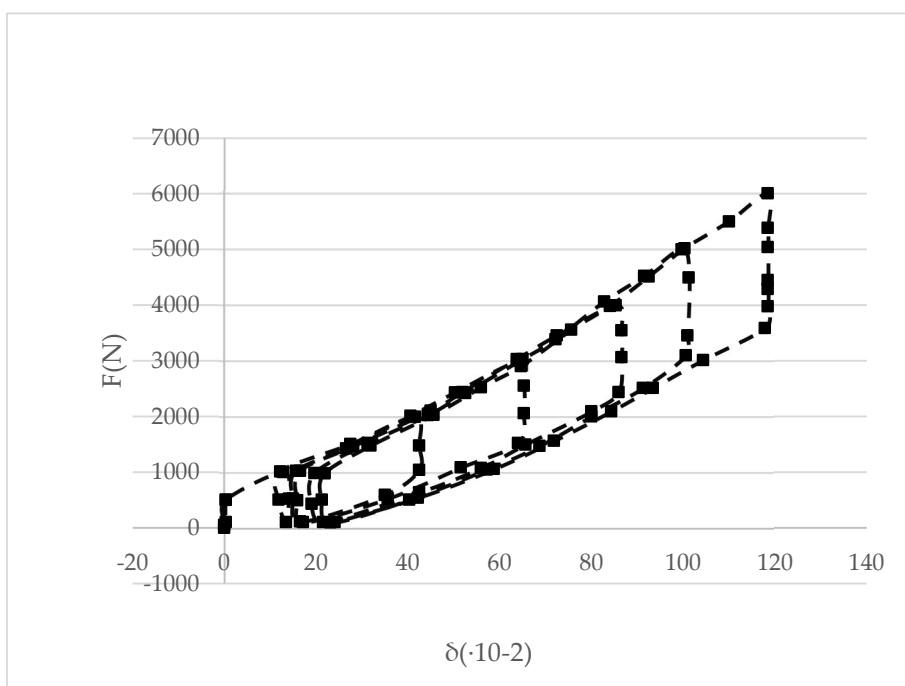


Figura 3.54-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T3)

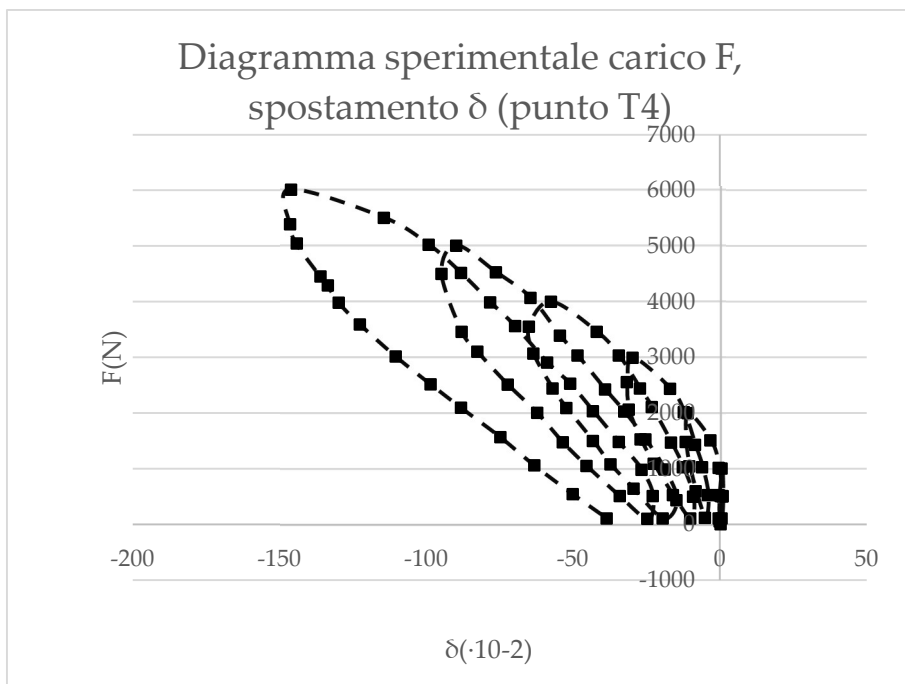


Figura 3.55-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T4)

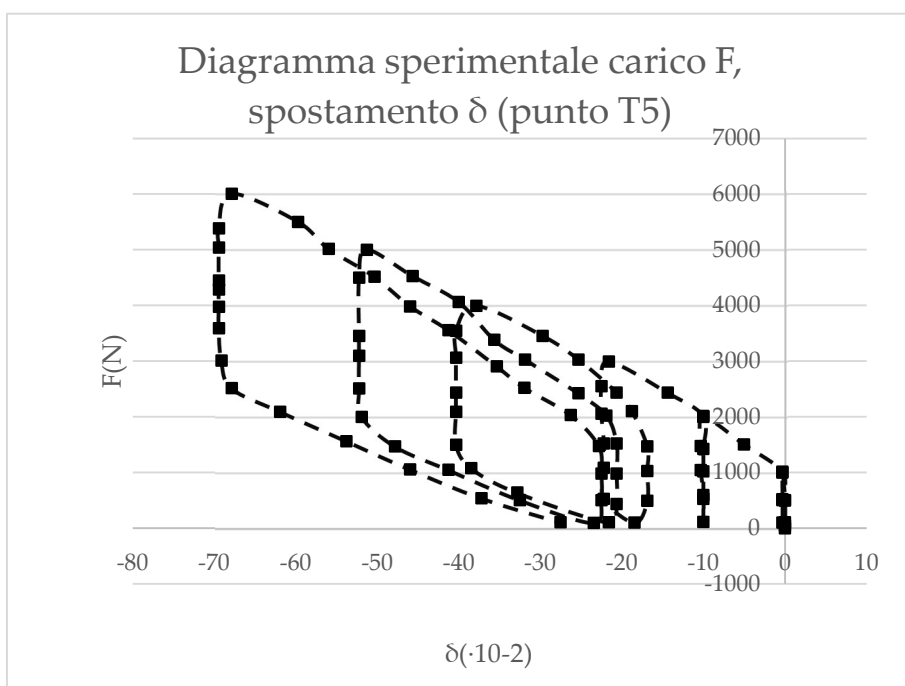


Figura 3.56-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T5)

Estensimetri- ottavo ciclo (fino 7800 N)

Tabella 3.15-Deformazioni

Forza	deformazioni		
	Est 1	Est 2	Est 3 (LVDT1)
N	um/m	um/m	um/m
0	0	0	0
50	6	-3	1
500	156	-47	18
1000	414	-98	26
1505	775	-145	24
1996	1284	-190	12
2433	1689	-225	4
2992	2311	-274	-7
3030	2443	-278	-10
3993	3443	-354	-22
4526	4116	-392	-31
5001	4638	-424	-36
5502	5438	-456	-46
6002	6076	-480	-50
6468	7916	-509	-61
7015	7916	-535	-65
7502	7916	-557	-120
7700	7916	-552	-271
7805	7916	-545	-289

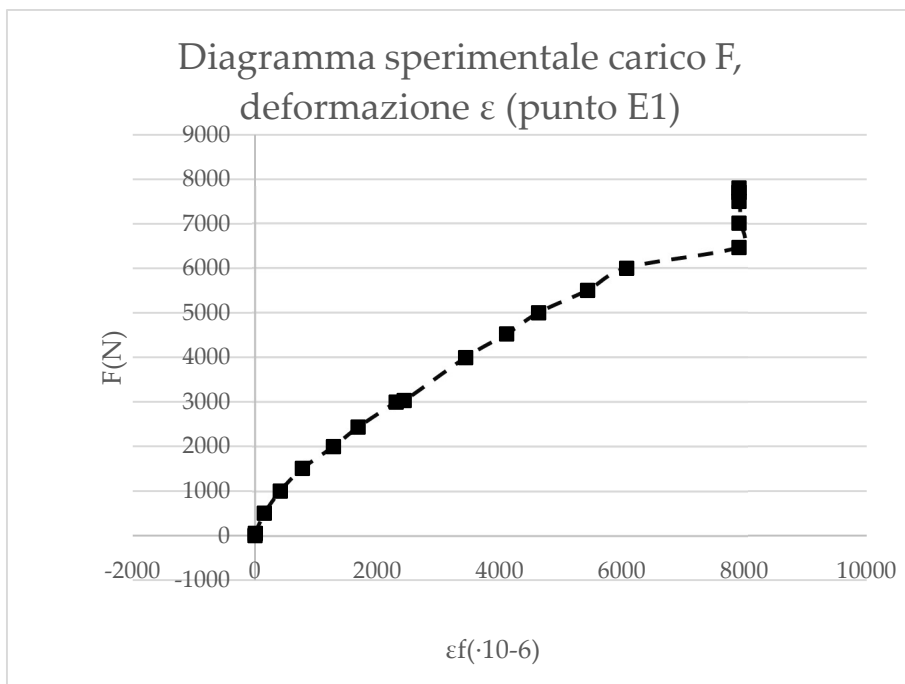


Figura 3.57-Diagramma sperimentale carico F, deformazione ε (punto E1)

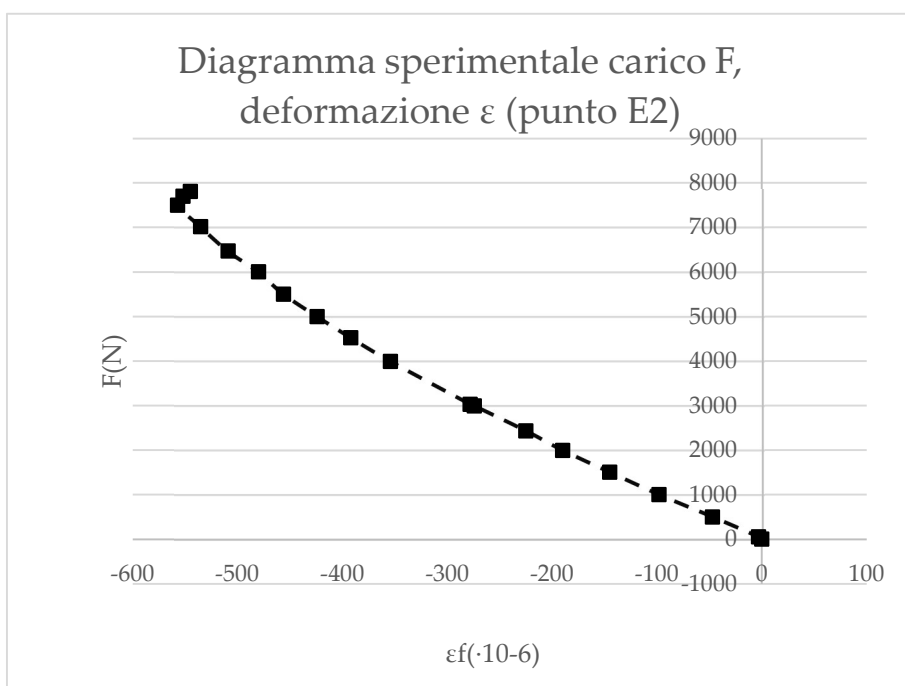


Figura 3.58-Diagramma sperimentale carico F, deformazione ε (punto E2)

Trasduttori- ottavo ciclo (fino 7800 N)

Tabella 3.16-Spostamenti

Forza	spostamenti				
	Spost 1	Spost 2	Spost 3	Spost 4	Spost 5
N	mm	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm*10 ⁻²	mm
0	0	0	8,67362E-17	0,3125	0
50	0	0	0	0	0
1000	0	36,25	12,8125	0,625	-0,3125
1996	16,5625	80,3125	41,5625	-10,9375	-10
1042	17,5	68,125	42,5	-10,3125	-10,3125
113	17,1875	23,75	16,5625	-5	-10
1021	17,1875	49,0625	15,625	-5,9375	-10
2013	17,5	83,125	40,625	-12,1875	-10
2992	34,375	123,4375	64,375	-29,6875	-21,5625
2055	35,3125	115,3125	65,3125	-30,9375	-22,5
1084	35,3125	80,9375	51,5625	-22,5	-22,1875
101	23,75	27,5	17,1875	-10	-18,4375
1025	23,125	55,9375	16,5625	-12,5	-16,875
2101	28,125	96,25	45	-23,125	-18,75
3030	37,1875	126,875	63,75	-34,375	-25,3125
3993	53,4375	166,25	85,3125	-57,5	-37,8125
2089	55	134,0625	80	-52,1875	-40,3125
1076	47,5	93,75	55,9375	-37,1875	-38,4375
105	27,5	36,875	21,5625	-19,375	-21,5625
983	25,9375	61,5625	19,6875	-18,75	-20,625
2022	31,25	103,125	44,375	-32,5	-21,875
3030	44,6875	139,375	65	-48,4375	-31,875
4064	56,875	171,875	82,8125	-64,375	-40
5001	71,25	207,8125	99,6875	-89,6875	-51,25
3098	72,1875	180,9375	100,625	-82,5	-52,1875
2001	65	140	80	-62,1875	-51,875
1047	49,6875	99,6875	57,1875	-45,3125	-41,25
97	27,8125	41,25	23,125	-24,6875	-23,4375
979	27,1875	67,1875	21,875	-26,5625	-22,5
2030	34,6875	112,25	45,625	-43,125	-26,25
3106	49,6875	151,875	66,875	-62,5	-37,5
3984	61,875	181,5625	84,0625	-78,125	-45,9375
5018	73,4375	214,6875	100,3125	-99,0625	-55,9375
6002	89,0625	256,25	115,9375	-134,375	-65,625
5039	92,1875	259,6875	118,4375	-144,063	-69,375
4447	91,875	243,4375	118,4375	-135,938	-69,375
2093	72,1875	159,0625	84,375	-88,125	-61,875

105	30,625	49,6875	24,0625	-38,4375	-27,5
1967	36,875	118,125	45,9375	-54,0625	-29,6875
4102	67,1875	196,875	86,5625	-98,4375	-51,875
6035	92,1875	264,375	116,5625	-146,875	-69,375
7015	109,0625	309,0625	132,1875	-189,063	-80
7805	195,625	526,25	168,75	-474,375	-114,063
6027	199,6875	519,375	170,625	-482,188	-114,688
4976	193,75	467,8125	157,0625	-443,438	-114,688
4052	172,1875	414,0625	131,875	-399,063	-114,688
3005	145,625	344,0625	104,375	-339,063	-103,125
2059	121,25	282,1875	78,75	-290,938	-89,0625
1042	93,75	211,25	47,5	-239,375	-70
92	62,8125	130,3125	5,9375	-193,125	-48,75
0	56,5625	113,4375	-3,75	-184,688	-43,125

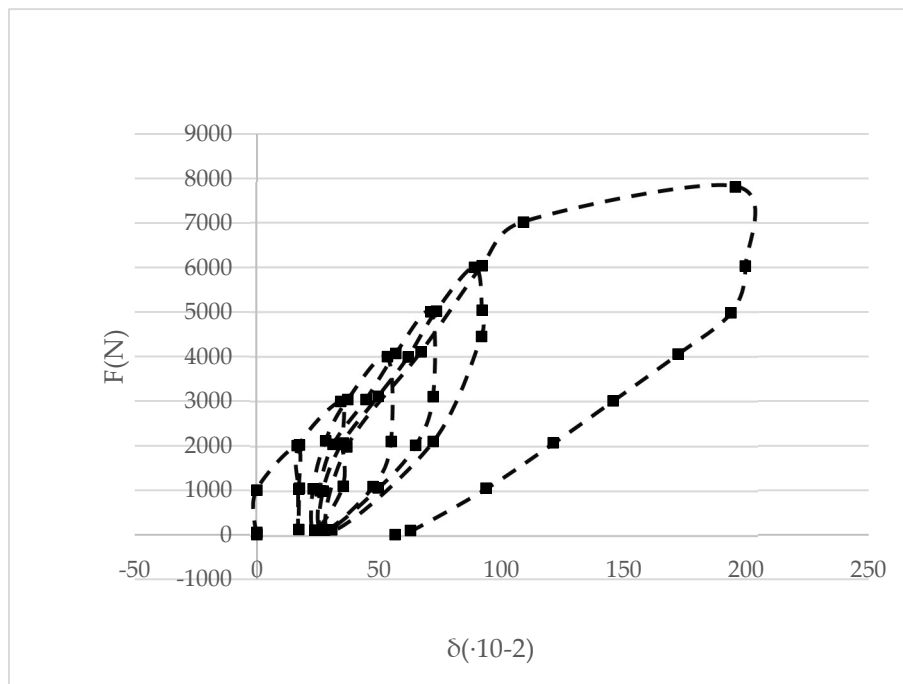


Figura 3.59-Diagramma sperimentale carico F, spostamento δ (punto T1)

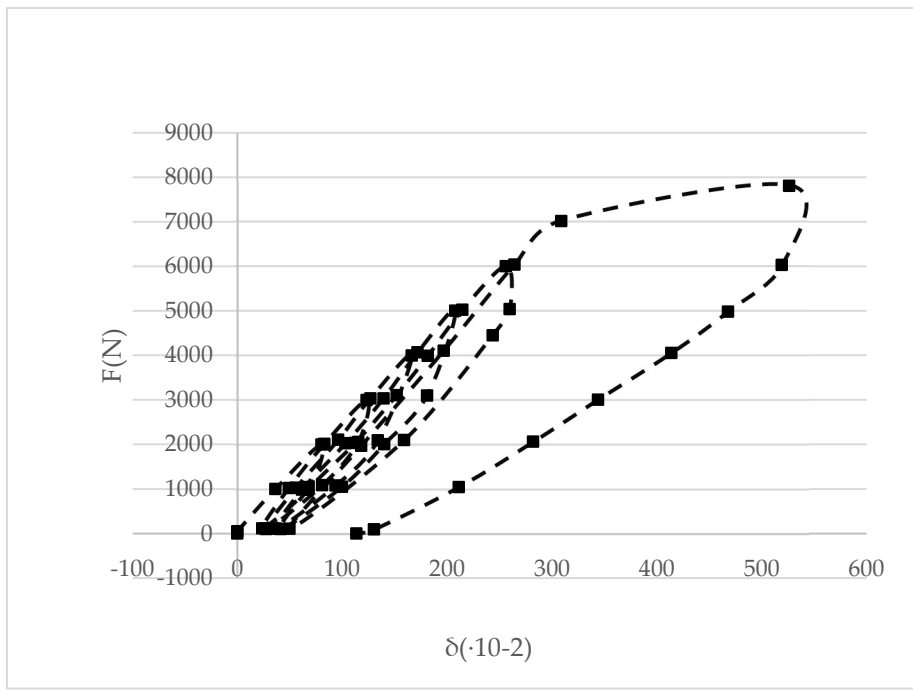


Figura 3.60-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T2)

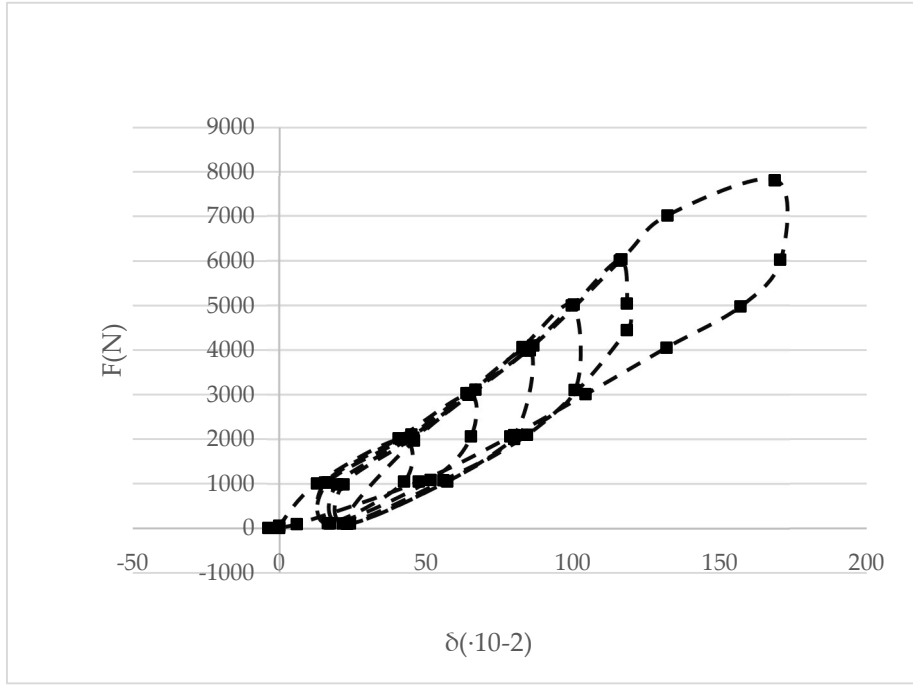


Figura 3.61-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T3)

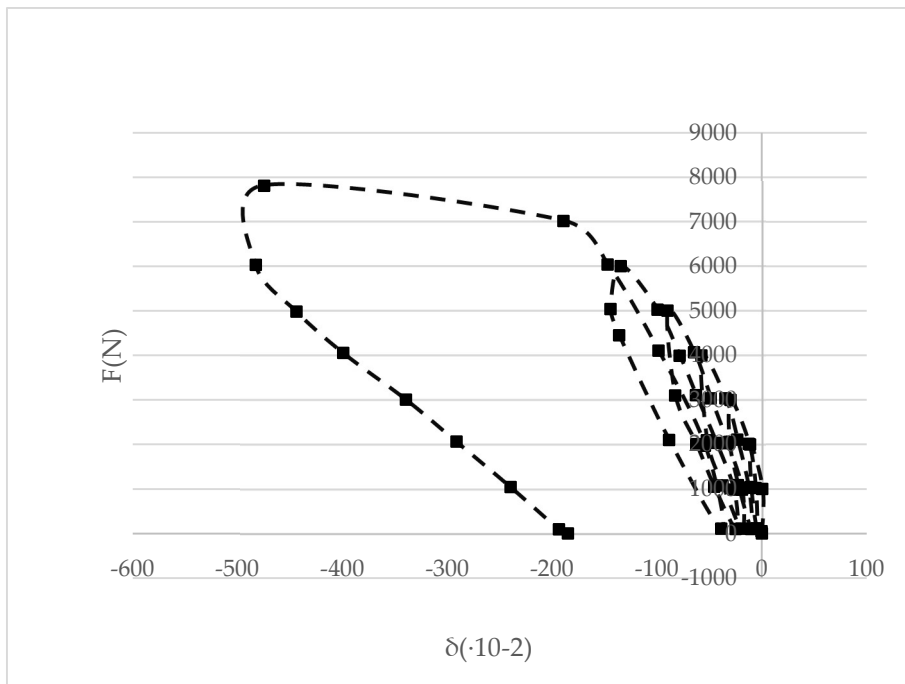


Figura 3.62-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T4)

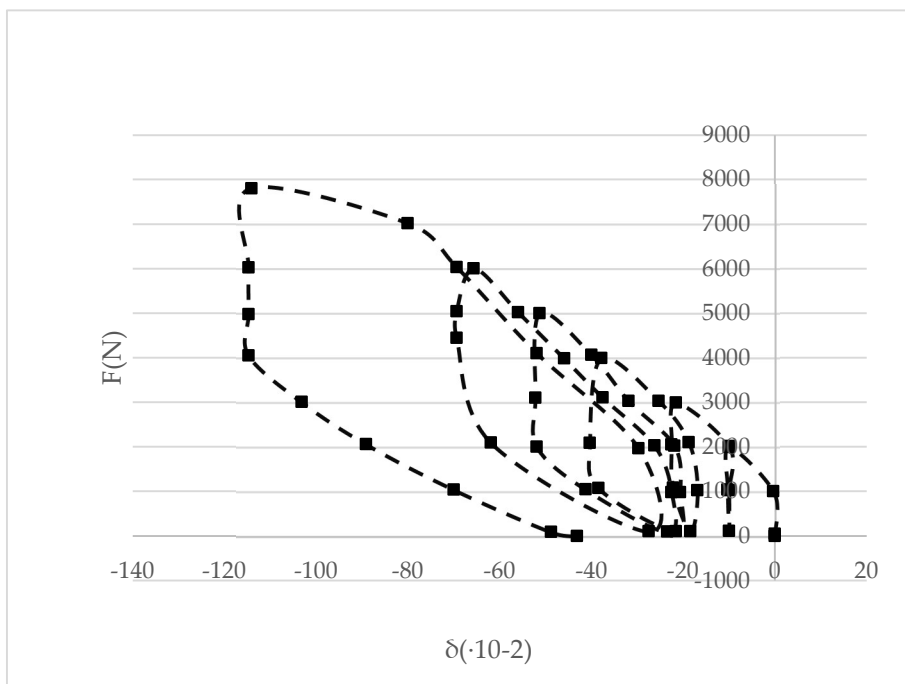
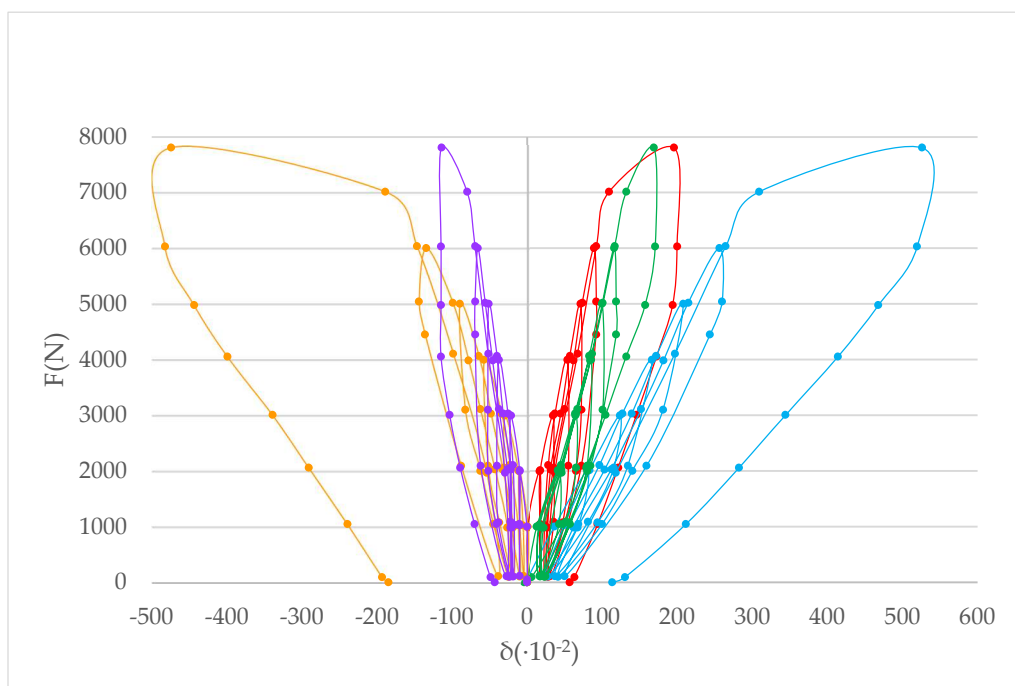


Figura 3.63-Diagramma sperimentale carico F , spostamento δ (punto T5)

Diagramma sperimentale degli spostamenti di tutti i cicli di carico



**Figura 3.64-Diagramma sperimentale carico F, spostamenti δ
(punti T1, T2, T3, T4, T5)**

3.3.5 Schemi Deformativi

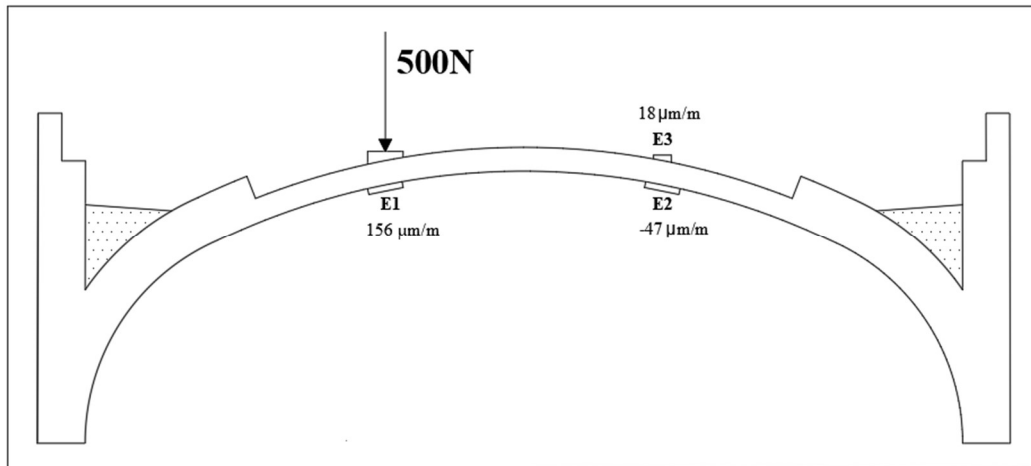


Figura 3.65 Estensimetri (+ trazione, - compressione)

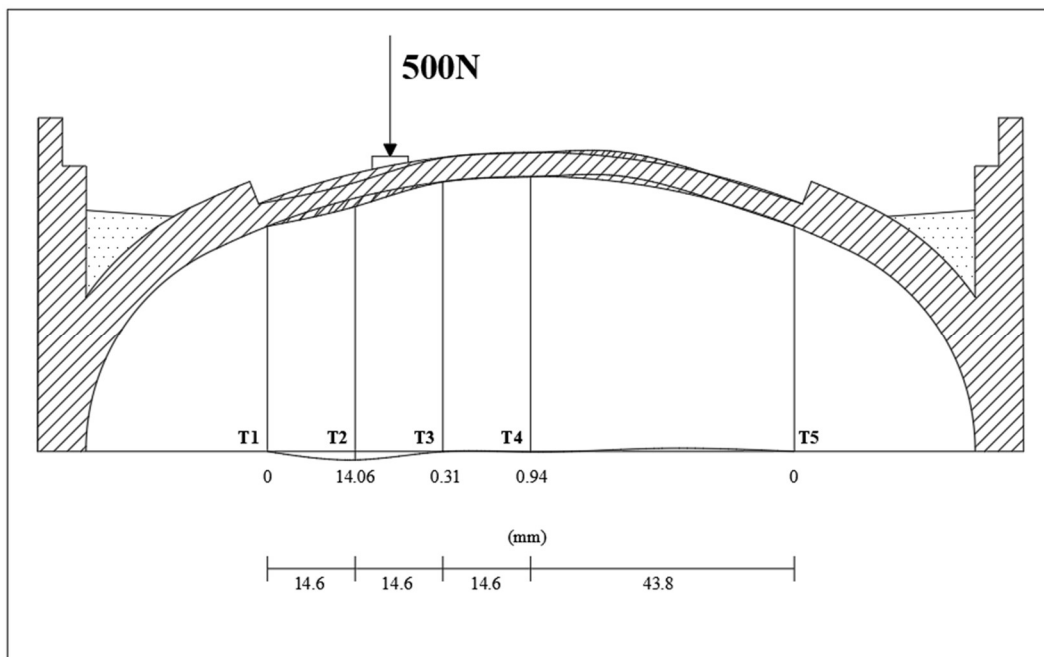


Figura 3.66 Trasduttori (+ spostamento verso il basso, - spostamento verso l'alto)

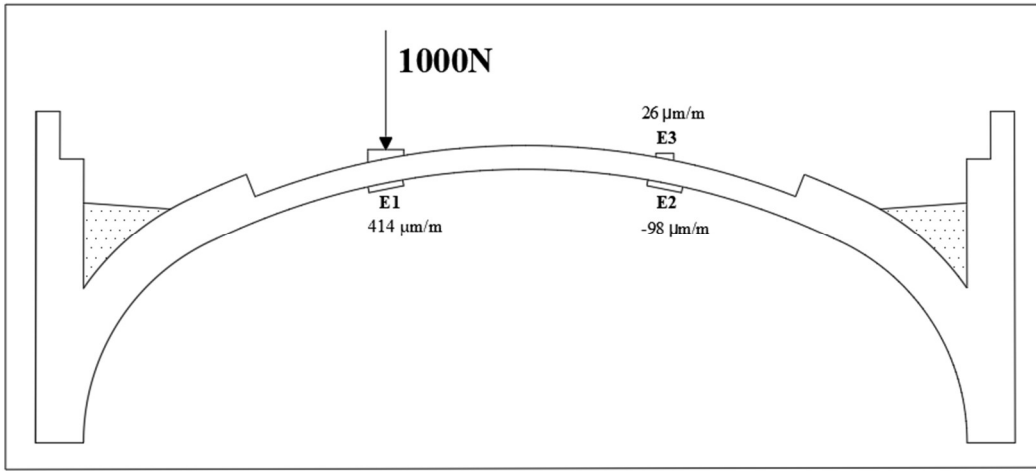


Figura 3.67 Estensimetri (+ trazione, - compressione)

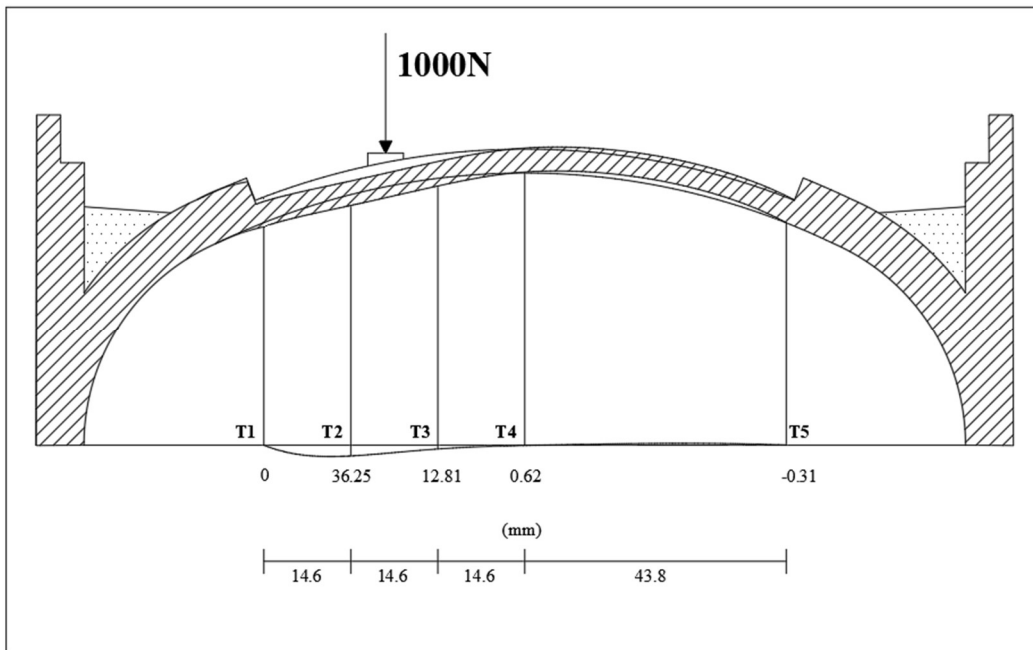


Figura 3.68 Trasduttori (+ spostamento verso il basso, - spostamento verso l'alto)

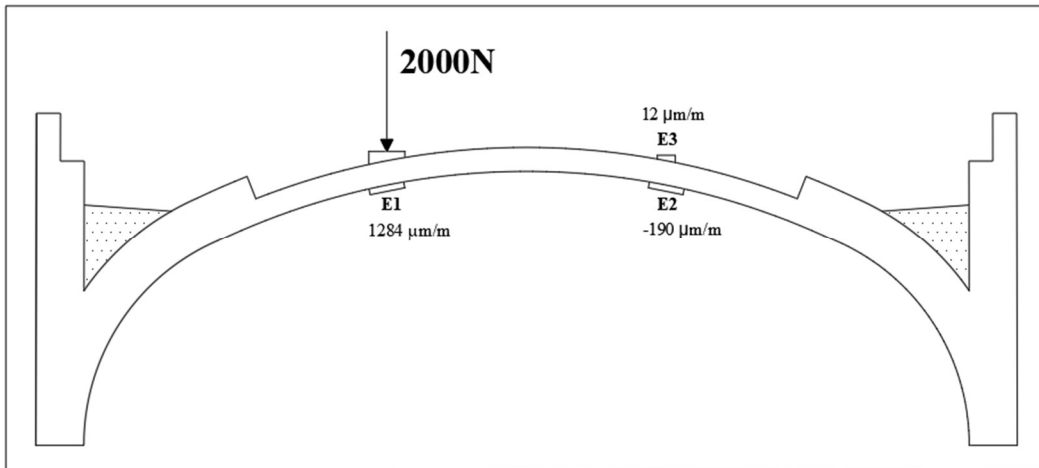


Figura 3.69 Estensimetri (+ trazione, - compressione)

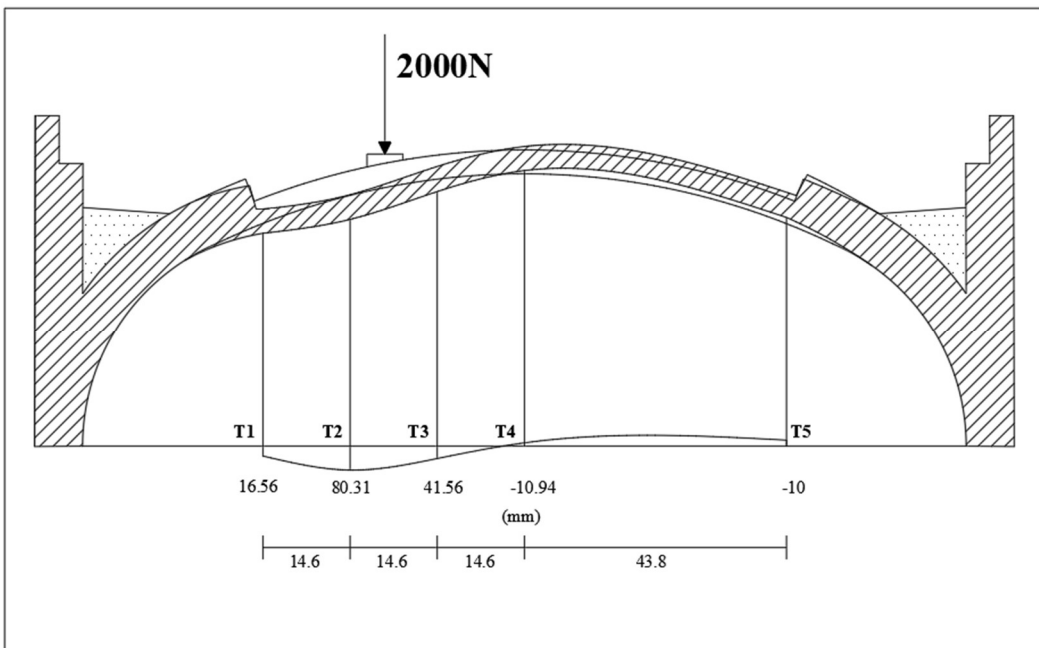


Figura 3.70 Trasduttori (+ spostamento verso il basso, - spostamento verso l'alto)

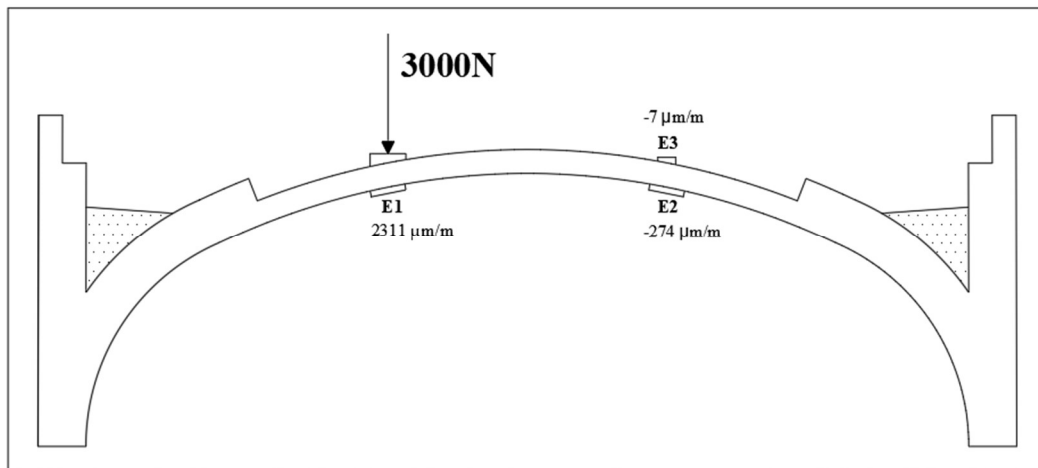


Figura 3.71 Estensimetri (+ trazione, - compressione)

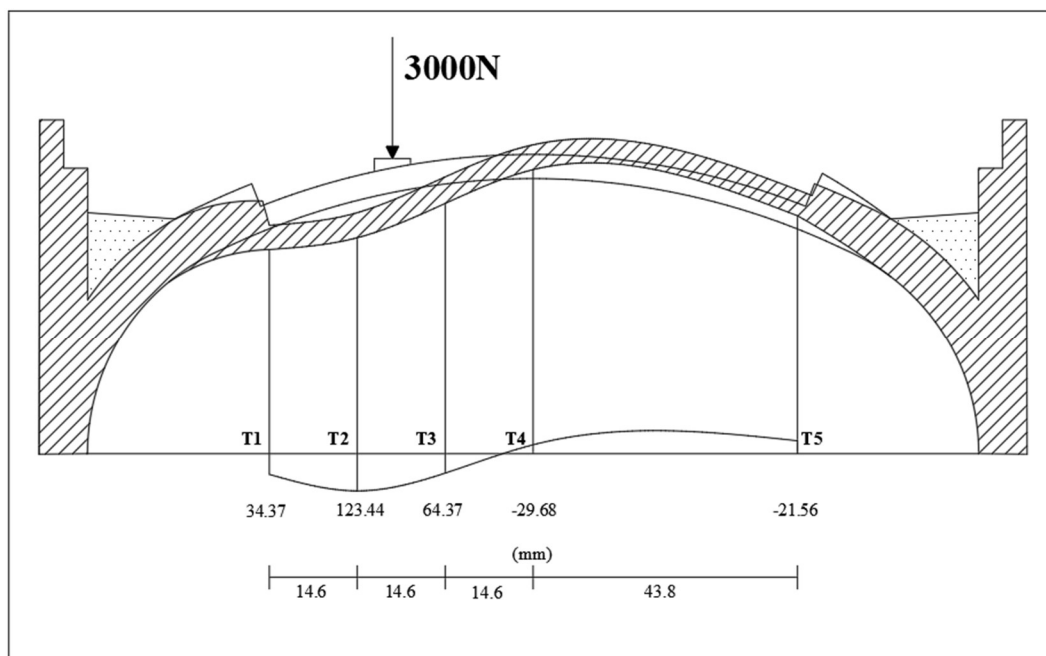


Figura 3.72 Trasduttori (+ spostamento verso il basso, - spostamento verso l'alto)

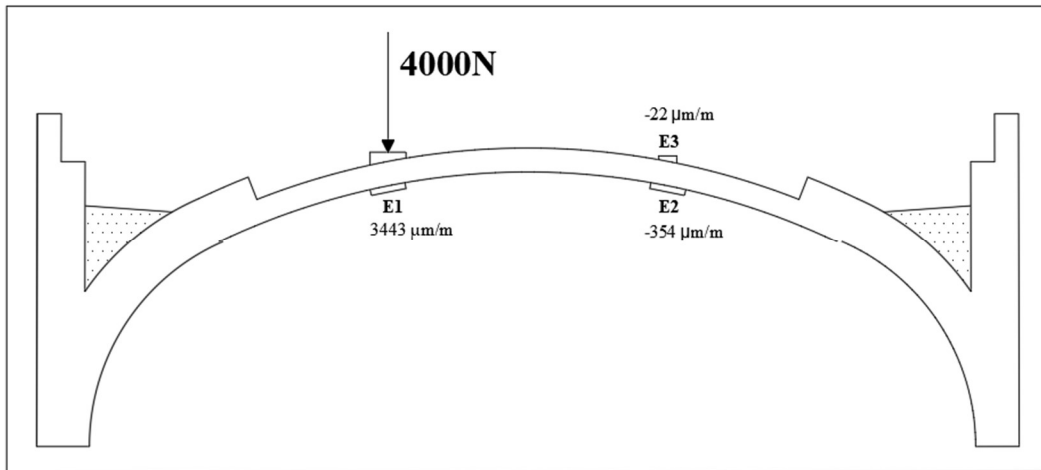


Figura 3.73 Estensimetri (+ trazione, - compressione)

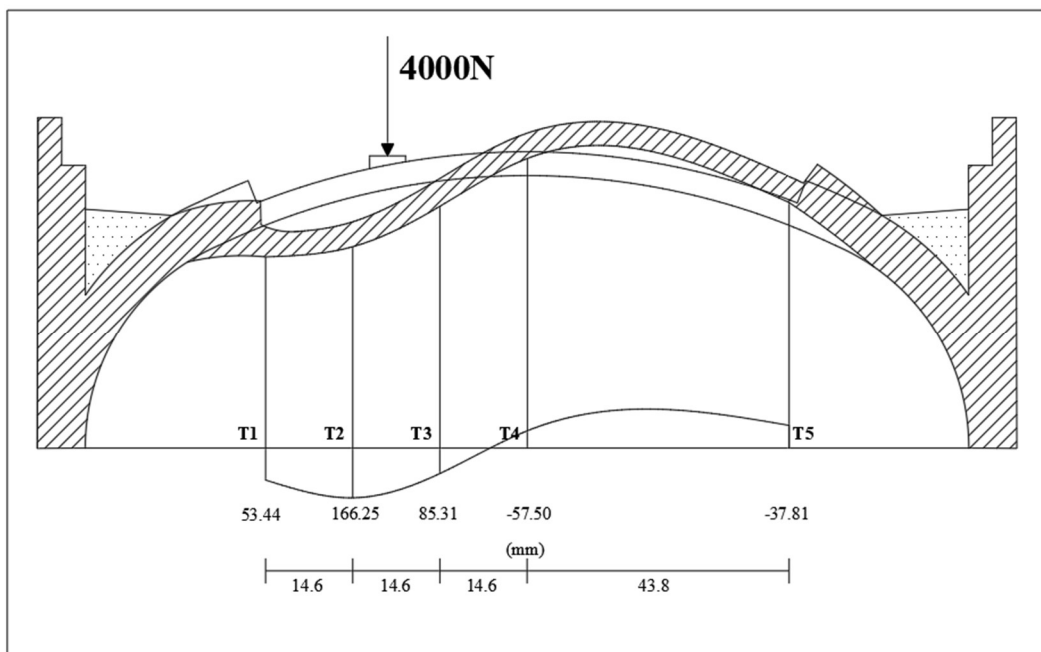


Figura 3.74 Trasduttori (+ spostamento verso il basso, - spostamento verso l'alto)

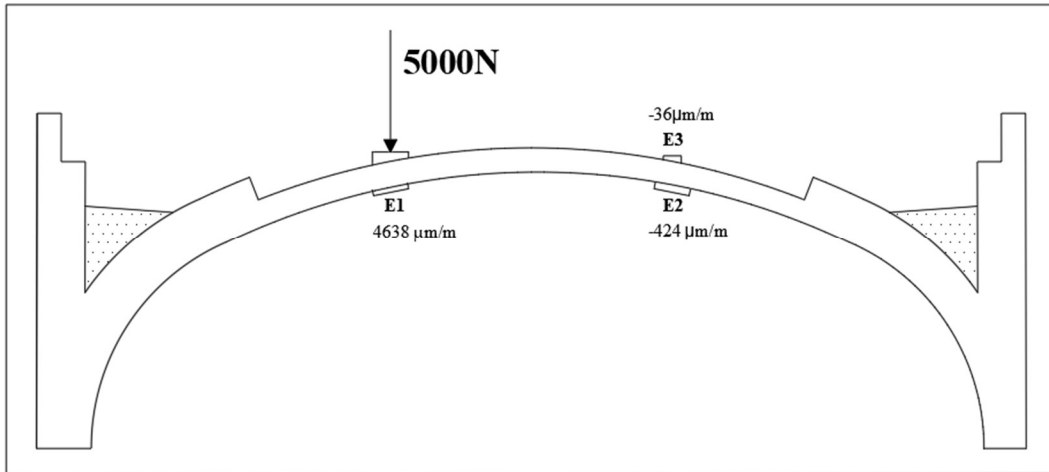


Figura 3.75 Estensimetri (+ trazione, - compressione)

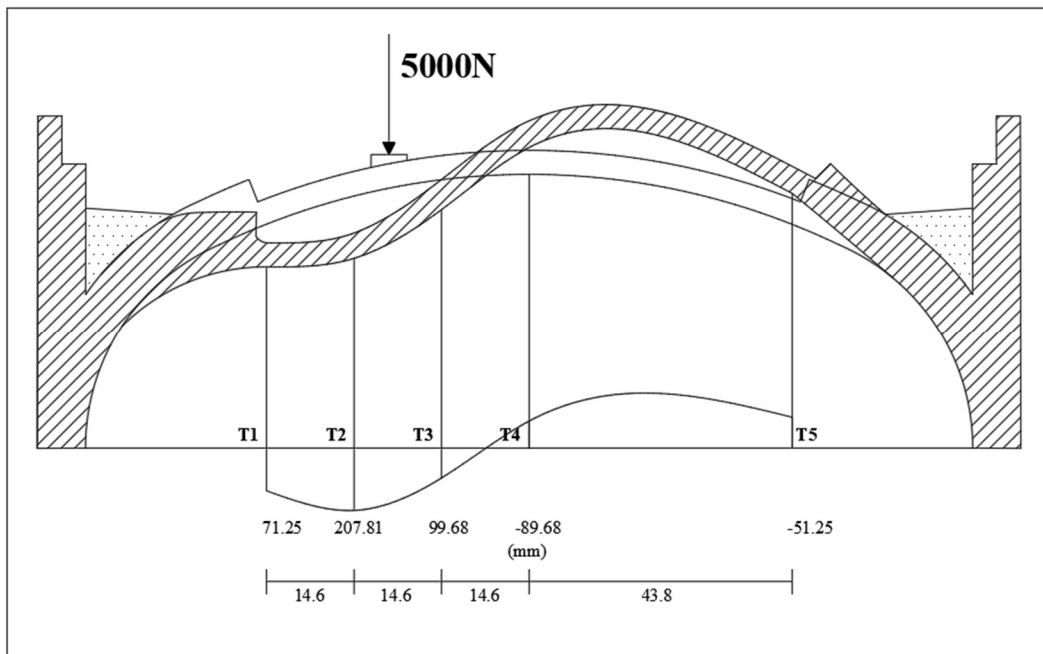


Figura 3.76 Trasduttori (+ spostamento verso il basso, - spostamento verso l'alto)

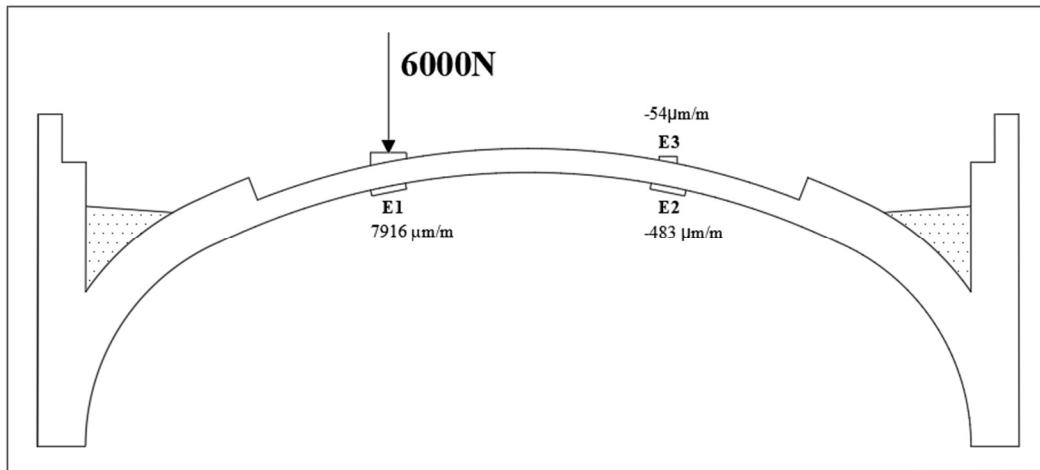


Figura 3.77 Estensimetri (+ trazione, - compressione).

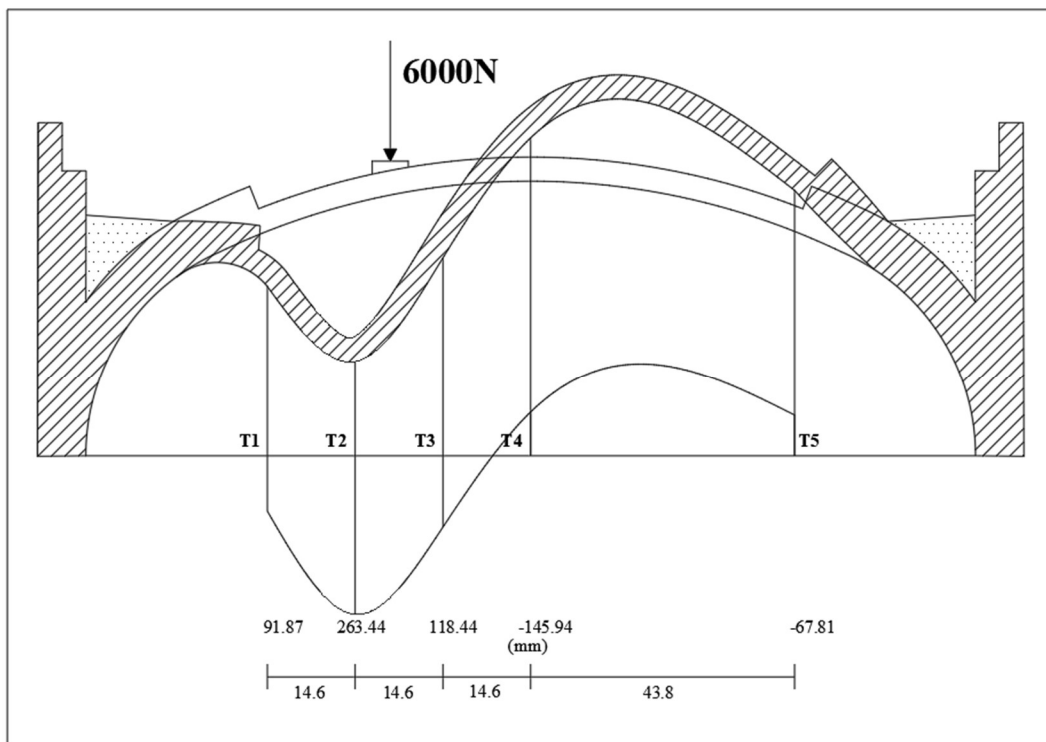


Figura 3.78 Trasduttori (+ spostamento verso il basso, - spostamento verso l'alto)

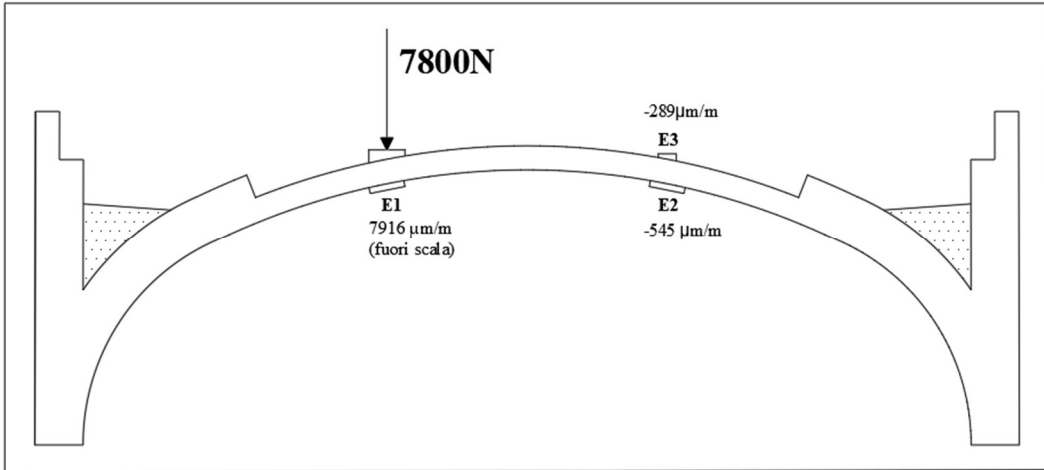


Figura 3.79 Estensimetri (+ trazione, - compressione)

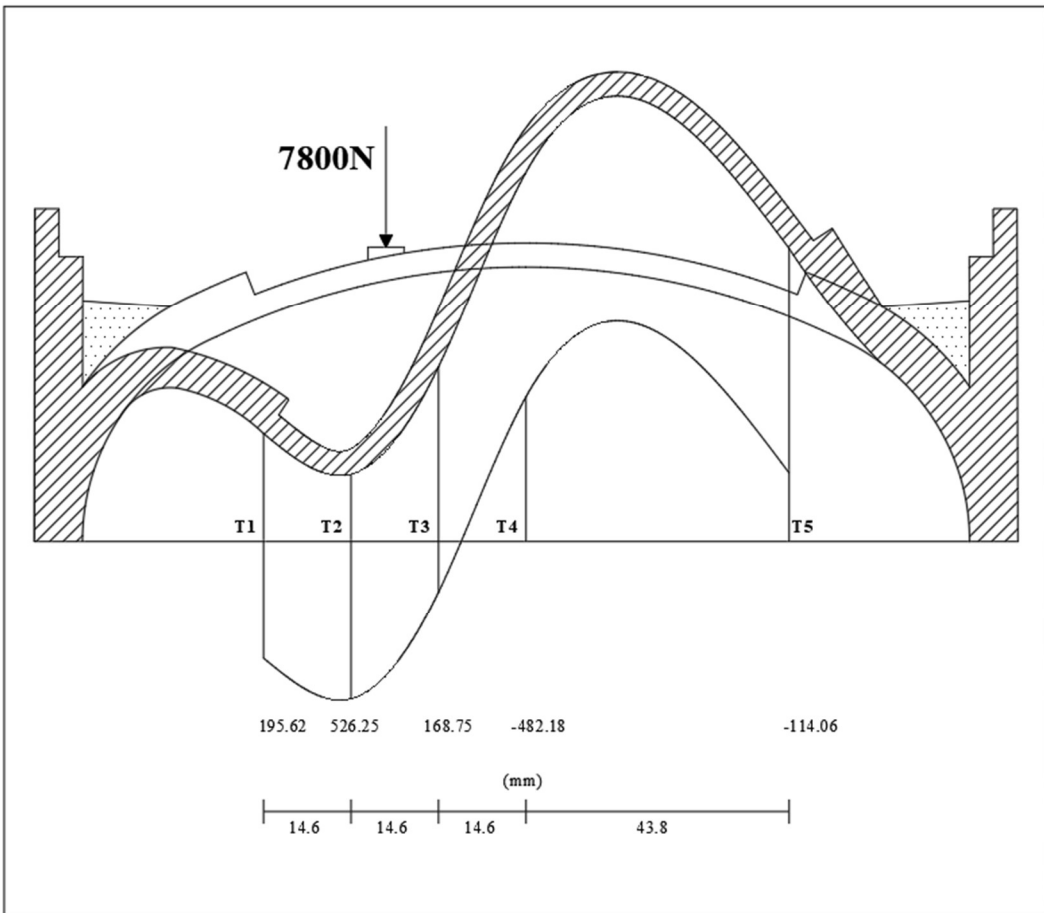


Figura 3.80 Trasduttori (+ spostamento verso il basso, - spostamento verso l'alto)

4. CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi elaborato si è posto come scopo l'analisi di un arco in muratura, i carichi e gli stati tensionali ammissibili, soffermandosi sull'utilizzo dei rinforzi con materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica per gli archi. È stato evidenziato come una struttura che lavora esclusivamente a compressione, rinforzata con FRP, possa ammettere anche sollecitazioni di trazione, ciò permette di ritardare la formazione di cerniere e quindi di labilità che portano al collasso della struttura.

Inoltre, sono stati descritti i requisiti di progetto ed i criteri per una corretta progettazione agli stati limite ultimi, osservando le problematiche che caratterizzano l'arco e le soluzioni opportune per ottenere un rinforzo efficace per una struttura danneggiata. In particolare, si è posta attenzione sul distacco del rinforzo, ovvero il fenomeno della delaminazione: un rinforzo, soggetto a trazione, produce tensioni normali all'interfaccia FRP-muratura a causa della curvatura dell'arco. All'intradosso le tensioni normali sono di trazione e causano delaminazione per stati tensionali e deformativi molto inferiori a quelli di stato ultimo a rottura del materiale di rinforzo; perciò, si deve preferire un rinforzo all'estradosso se possibile.

Infine, è stata analizzata la sperimentazione su un arco in muratura danneggiato e rinforzato con BFRP. Si è analizzato il comportamento dell'arco integro individuando la condizione di carico più sfavorevole, prima attraverso il metodo di calcolo agli elementi finiti (FEM), successivamente per incrementi di carico, confrontando i carichi di prima fessurazione delle diverse condizioni di carico. Utilizzando la condizione di carico concentrato non simmetrico, si è proceduto ad analizzare l'evoluzione fessurativa durante l'aumento del carico. Il

comportamento dell'arco ha evidenziato come il collasso avvenga per formazione di 4 cerniere.

All'intradosso dell'arco fessurato sono state applicate due strisce di BFRP; sempre in condizioni di carico concentrato non simmetrico, si è sottoposto l'arco a 7 cicli di carico e scarico osservando ogni volta l'andamento fessurativo, fino alla rottura della struttura. Si è evidenziato un allargamento delle fessure dapprima in zona estradosale, dove in assenza di rinforzo, la resistenza a trazione è nulla, e solo successivamente all'intradosso, in particolare al di sotto del carico. La struttura dopo i 7 cicli di carico si è deformata producendo cerniere, comunque legate dal rinforzo che ha assicurato la stabilità dell'arco. La prova non è conclusa con la rottura dell'arco ma si è potuto notare come il collasso sarebbe potuto avvenire a causa del processo di distacco muratura-BFRP, piuttosto che per rottura del rinforzo a trazione.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Capozucca R. (1997) “*Analysis of thin composite masonry vaults*”, *Mason Int*, 11, 19-25.
- Capozucca R. (2016) “*Double-leaf masonry walls under in-plane loading strengthened with GFRP/SRG strips*, *Engineering Structures*”, 128: 453-473.
- Capozucca R. (2017) “*Experimental response of historic brick masonry under biaxial loading*, *Construction and Building Materials*”, 154: 539-556.
- Capozucca R. (2014) “*Teoria e Tecnica delle Strutture in Muratura*”, Pitagora Editrice, Bologna.
- Como M. (2010) “*Statica delle Costruzioni Storiche in Muratura*”, ARACNE editrice, Roma, Italia.
- Focacci F. (2008) “*Rinforzo delle Murature con Materiali Compositi*”, Dario Flaccovio Editore, Palermo, Italia.
- Foraboschi P. (2004) “*Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips*”, *J. Compos Constr*, 8(3), 191–202
- Heyman J. (1982) “*The Masonry Arch*”, Ellis Horwood, Chichester, England.
- Heyman J. (1966) “*The stone skeleton*”, *Int. Journal of Solid and Structures*, 2, 249-79

- Hendry AW, Sinha BP (1971) *“Shear tests on full scale single storey brickwork structures subjected to pre-compression”*, J Civil Engineering and Public Works Review, 1339-34
- Hendry AW (1978) *“A note on the strength of brickwork in combined racking shear and compression”*, Proc. British Cer. Soc., Load Bearing Brickwork, 6(27), 47-52
- Istruzioni CNR DT 200/2004
- Revisione DT 200 R1 delle Istruzioni CNR DT 200/2004
- <http://www.fidiaglobalservice.com/>
- <https://www.mapei.com/it/it/realta-mapei>
- <https://www.draco-edilizia.it/referenze/>

RINGRAZIAMENTI

Voglio ringraziare innanzi tutto i miei genitori, che con le loro scelte coraggiose e la fatica di tutti questi anni, mi hanno permesso di studiare e di ambire ad un futuro migliore che tanto hanno sognato per me: spero di rendervi fieri per i risultati raggiunti e per quelli all'orizzonte.

Ringrazio la mia fidanzata, Elisa; esserle accanto mi ha dato la forza di non abbattemi e di impegnarmi con tutto me stesso per i miei obiettivi. Spero che tutti i sacrifici fatti ci porteranno a raggiungere i nostri sogni, ancora insieme.

Un pensiero va ai miei amici, con cui ho condiviso alti e bassi dell'università e della vita, vi auguro il meglio.

Infine, ci tengo a ringraziare tutta la mia famiglia che sempre, anche se lontana, mi ha fatto sentire amato ed ha creduto in me.