

**PROGRAMMA SPERIMENTALE SUL COMPORTAMENTO IN  
COMPRESSIONE MONOASSIALE DEL CALCESTRUZZO**

**PARTE I: RISULTATI SPERIMENTALI**

**Elena Ferretti – Roberto Carli**

**Nota Tecnica N° 25**  
*Bologna – 1999*



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA – FACOLTÀ DI INGEGNERIA**  
D.I.S.T.A.R.T. – DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELLE STRUTTURE,  
DEI TRASPORTI, DELLE ACQUE, DEL RILEVAMENTO E DEL TERRITORIO

V.<sup>le</sup> Risorgimento, 2 – 40136 Bologna



# PROGRAMMA SPERIMENTALE SUL COMPORTAMENTO IN COMPRESSIONE MONOASSIALE DEL CALCESTRUZZO

## PARTE I: RISULTATI SPERIMENTALI

Elena Ferretti<sup>1</sup> – Roberto Carli<sup>2</sup>

Nota Tecnica N° 25  
Anno Accademico 1998-1999

### 1 GENERALITÀ

Il programma sperimentale presentato in questa Nota Tecnica fa parte di un programma di ricerca che trae la sua giustificazione da un'osservazione sperimentale sul meccanismo di crisi di provini in calcestruzzo soggetti a carico centrato di compressione. Tali provini, come noto, raggiungono il collasso con meccanismo di crisi tronco-conico e conseguente forte riduzione di sezione resistente.

Poiché il comportamento esplosivo caratterizza solo i calcestruzzi ad alte prestazioni, mentre il meccanismo tronco-conico si manifesta indipendentemente dalla qualità del calcestruzzo, si è ipotizzato che tale meccanismo non caratterizzi il solo stato ultimo del materiale, ma evolva gradualmente a partire da un valore di carico esterno inferiore a quello di collasso.

Si è pensato, allora, che fosse necessario rivisitare l'approccio di definizione del legame costitutivo in compressione monoassiale per poter considerare l'effetto della graduale riduzione di sezione resistente, in analogia a quanto usualmente fatto per gli acciai in fase di strizione.

Secondo questo ragionamento, a parità di deformazione longitudinale  $\varepsilon_l$ , l'effettivo legame costitutivo in compressione semplice dovrebbe esibire valori di tensione  $\sigma_{eff}$  comunque maggiori di quelli esibiti dalla curva tensione media – deformazione media ( $\sigma_m - \varepsilon_m$ ), con la tensione media valutata come rapporto tra carico esterno e area nominale ( $\sigma_m = N/A_n$ ).

Come caso particolare, allora, il legame costitutivo effettivo in compressione semplice del calcestruzzo potrebbe manifestare comportamento monotono crescente, esattamente come accade per gli acciai. In quest'ultimo caso, sarebbe possibile dare giustificazione sperimentale ai numerosi lavori teorici degli inizi del secolo, nei quali, ancor prima che il ramo softening nei diagrammi carico-spostamento venisse osservato sperimentalmente, si mette in discussione l'esistenza stessa del comportamento softening nei materiali fragili, in quanto palesemente priva di significato fisico. Ad esempio, una delle evidenti contraddizioni che toglie significato fisico al comportamento softening riguarda il valore della velocità di propagazione  $v$  delle onde elastiche (Hadamard [1903]):

---

<sup>1</sup> Ingegnere Edile – Dottorato di Ricerca in “Materiali Compositi per l'Ingegneria Civile” – Sede amministrativa: Università degli Studi di Lecce; Sedi consorziate: Università degli Studi di Bologna, Istituto Universitario di Architettura di Venezia – XIII Ciclo.

<sup>2</sup> Tecnico di laboratorio – La.R.M. (Laboratorio di Resistenza dei Materiali) – D.I.S.T.A.R.T. (Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento e del Territorio) – Facoltà di Ingegneria – Università degli Studi di Bologna.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

dove  $E$  è il modulo elastico tangente e  $\rho$  è la massa volumica del materiale.

Come si vede, in fase di softening tale valore, essendo  $E$  negativo, diventa immaginario e, quindi, privo di significato fisico.

Tale asserzione ha successivamente trovato larga eco in letteratura. Una estesa bibliografia può trovarsi in Bažant, Belytschko e Chan [1984].

Tutti questi lavori sembrarono però perdere valore quando l'affinarsi delle tecniche sperimentali consentì di ottenere prove di resistenza su materiali fragili in controllo di spostamento, caratterizzate, come noto, da diagrammi carico-spostamento con ramo softening.

Già la Meccanica del Continuo con Danno tenta di superare questa incongruenza teorico-sperimentale derivando il ramo calante del legame costitutivo del materiale dall'evolvere delle microfratture interne. Tale comportamento non viene quindi assunto come proprietà del materiale su scala microscopica, bensì come risposta su scala macroscopica.

A differenza di quanto accade nella Meccanica del Continuo con Danno, però, in quanto segue le leggi di degrado dell'area resistente non vengono formulate a priori, ma identificate a posteriori con procedimento semi-empirico. Inoltre, invece che dall'evolvere delle microfratture interne, considerate uniformemente diffuse nel provino, il comportamento macroscopico con softening viene derivato dalla maggiore cedevolezza strutturale conseguente alla propagazione del crack dominante, dove per crack dominante si intende la superficie di crisi tronco-conica osservata sperimentalmente.

## 2 INTRODUZIONE

In un precedente programma sperimentale ([4] e [5]), si è connessa la variazione dei parametri microsismici (velocità di propagazione  $V$  e attenuazione  $G$ ) alla variazione di area resistente  $A_{res}$  in provini cilindrici di calcestruzzo soggetti a compressione semplice. A tal scopo, si è operato nel seguente modo:

1. si sono sfruttate le relazioni individuate da Daponte e Olivito ([1], [2] e [3]) tra variazione dei parametri microsismici ( $V$  e  $G$ ) e parametro di danno ( $D$ ):

$$D_1 = 1 - \frac{V}{V_0}, \quad D_2 = 1 - \frac{G_0}{G}$$

dove  $V$  è la velocità di propagazione delle onde elastiche di vibrazione,  $G$  è l'attenuazione,  $V_0$  e  $G_0$  sono, rispettivamente, la velocità e l'attenuazione nel provino allo stato naturale;

2. ai precedenti parametri di danno si è affiancato un parametro di danno di derivazione energetica:

$$D_3 = \frac{E_{diss}}{E_{diss_{tot}}}$$

dove  $E_{dis}$  è l'energia dissipata al generico passo di carico e  $E_{dis_{tot}}$  è l'energia dissipata totale.

3. si è sfruttata la relazione individuata dalla Meccanica del Continuo Danneggiato tra parametro di danno  $D$  e area resistente  $A_{res}$ :

$$A_{res_i} = A_n (1 - D_i), \quad i = 1, 2, 3$$

dove  $A_n$  è l'area nominale del provino.

L'acquisizione dei parametri microsismici è stata alterata dal disturbo, in termini di rumore aggiunto, provocato dal progressivo crack del materiale. Tale azione di disturbo, trascurabile nella fase iniziale del processo di carico, è diventata condizionante per alti valori di deformazione. Per questo motivo, i parametri di danno di origine microsismica hanno avuto un campo di validità limitato a deformazioni dell'ordine dei  $5 \div 6 \cdot 10^3 \mu\epsilon$ .

La valutazione del parametro di danno di origine energetica, derivando dall'integrale della curva carico-abbassamento, non ha invece avuto alcuna limitazione nel campo di validità.

I risultati sperimentali hanno mostrato che, nel campo di validità di  $D_1$  e  $D_2$ ,  $D_1$  e  $D_3$  assumono valori molto prossimi tra loro, mentre  $D_2$  si discosta in maniera apprezzabile dagli altri due parametri di danno. Si è concluso che, dei due parametri di derivazione microsismica, quello in grado di seguire meglio il processo di fessurazione sotto carico è  $D_1$ .

La stima dell'area resistente è stata utilizzata per risalire dal diagramma carico-abbassamento al legame costitutivo del materiale integro definito come segue:

$$\sigma_{eff} = \frac{N}{A_{res}}$$

Il legame costitutivo così identificato, a differenza del diagramma carico-abbassamento, ha mostrato comportamento monotono crescente. Ciò si è verificato perché, in fase di softening, la velocità di decremento del carico esterno è risultata minore della velocità di decremento dell'area resistente [5]. Si è quindi concluso che il comportamento softening non è una proprietà intrinseca del materiale ma è determinato dal forte decremento di area resistente per fessurazione.

Il legame costitutivo identificato in [4], dovendo corrispondere ad una proprietà intrinseca del materiale, non dovrebbe risentire dell'effetto dimensionale. In [4] e [5] si sono messi a confronto legami costitutivi ricavati da prove di compressione su due cilindri di ugual diametro ed altezza diversa. I notevoli problemi di identificazione incontrati in [4] sono dovuti al fatto che i due cilindri sottoposti a prova non avevano seguito la stessa storia di maturazione e, quindi, non erano direttamente confrontabili. Inoltre, poiché, prima della prova di compressione, i cilindri erano stati sottoposti a forti escursioni termiche, è stato necessario introdurre un coefficiente correttivo del parametro di danno che tenesse conto della difettosità allo stato naturale. Tale coefficiente è stato indicato col simbolo  $D_0$  (per la sua determinazione si veda [5]). Il parametro di danno comprensivo della difettosità allo stato naturale e del degrado per azione del carico esterno è stato indicato col termine "danno equivalente" ( $D_{eq}$ ) ed è risultato dato da:

$$D_{eq} = 1 - (1 - D_0)(1 - D_i) = D_0 + D_i - D_0 D_i, \quad i = 1, 3$$

Adottando  $D_{eq}$  come parametro di danno, i legami costitutivi identificati per i due cilindri hanno continuato ad esibire una diversa pendenza all'origine. Tale differenza è stata imputata alla diversa velocità di deformazione adottata nelle due prove. Correggendo i legami costitutivi in modo da eliminare l'effetto della viscosità, i due diagrammi hanno esibito valori di pendenza all'origine praticamente coincidenti. A conferma della validità del processo di identificazione seguito, le nuove pendenze all'origine hanno assunto valori del tutto simili al modulo elastico dinamico determinato prima delle prove di carico.

Per eliminare definitivamente tutte le incertezze derivanti dall'aver reso confrontabili dati sperimentali che inizialmente non lo erano, si è reso necessario approntare un nuovo programma sperimentale in cui:

- i provini cilindrici avessero tutti stesso diametro ed altezza variabile;
- i provini seguissero storie di maturazione identiche;
- i provini non fossero sottoposti, prima della prova di carico, ad azioni termo/meccaniche aggiuntive rispetto a quelle autogene che si sviluppano in fase di stagionatura;
- i provini venissero testati tutti nelle stesse condizioni di stagionatura;
- i provini venissero testati tutti con la stessa velocità di deformazione.

In queste condizioni, è lecito ipotizzare che il valore di  $D_0$  sia trascurabile e che l'effetto viscosità incida in ugual modo sulle pendenze all'origine di tutti i provini. Di conseguenza, il processo di identificazione del legame costitutivo del materiale integro, perché possa essere ritenuto valido, deve fornire diagrammi confrontabili adottando come parametro di danno  $D_{eq} = D_i$  ( $i=1, 3$ ). Si intende che i legami costitutivi così identificati risulteranno dipendenti dall'effetto viscosità.

Il nuovo programma sperimentale si è reso necessario anche per un altro motivo. Infatti, anche il modulo di Poisson, dovendo corrispondere ad una proprietà costitutiva del materiale, non dovrebbe variare col carico esterno. L'evidenza sperimentale di un modulo di Poisson indefinitamente crescente col carico esterno può essere imputata ad un'erronea interpretazione dei dati sperimentali. Infatti, le rilevazioni sperimentali non sono mai puntiformi ma necessitano sempre di una base di misura. Pertanto, nella rilevazione della deformazione circonferenziale, si acquisisce sempre, non solo l'effettivo contributo del materiale, ma anche, inevitabilmente, quello fornito dall'apertura delle fessure. Ma allora, prima di ricavare il modulo di Poisson e la deformazione volumetrica, occorrerebbe scorporare dal dato sperimentale la quota relativa all'apertura delle fessure. Con la strumentazione correntemente in uso nei laboratori, però, questa soluzione è, di fatto, impraticabile. Si è pensato, quindi, di approntare un programma sperimentale in cui, alla misura superficiale della deformazione circonferenziale, venisse affiancata una rilevazione di deformazione effettuata in una zona interna dei provini, presumibilmente non interessata dal fenomeno fessurativo. Tale zona verrà nel seguito indicata col termine "nocciolo resistente".

I risultati del nuovo programma sperimentale sono oggetto del presente lavoro.

### 3 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Sono stati confezionati 18 provini cilindrici di ugual diametro  $D$ , con  $D = 155.5$  mm, e 6 diversi rapporti altezza/diametro,  $r = H/D$ . I cilindri realizzati sono stati classificati in funzione del valore di  $r$ :

- Cilindro tipo 1:  $r = 1.5$  ;
- Cilindro tipo 2:  $r = 2$  ;
- Cilindro tipo 3:  $r = 2.5$  ;
- Cilindro tipo 4:  $r = 3$  ;
- Cilindro tipo 5:  $r = 3.5$  ;
- Cilindro tipo 6:  $r = 4$  ;

In tutto, sono stati confezionati 3 provini per ogni assegnato valore di  $r$ . I cilindri sono stati suddivisi in tre serie di 6 provini ciascuna e confezionati in tre fasi successive. In ogni serie è stato incluso un solo provino per ogni tipo. Per rendere confrontabili i risultati relativi a ciascuna fase di confezionamento, ogni serie è stata ricavata da un unico impasto.

Per tutti i provini realizzati, il disarmo è avvenuto il giorno successivo al getto.

La maturazione è avvenuta in acqua e ha avuto una durata di 14 giorni per tutte le serie di provini.

Al termine del periodo di maturazione, in tutti i provini si è provveduto a rilevare il peso, l'altezza, il diametro e la velocità di propagazione a carico nullo delle onde elastiche di vibrazione.

Sempre per ragioni di confrontabilità dei risultati, i cilindri inclusi nella stessa serie sono stati provati tutti nello stesso giorno.

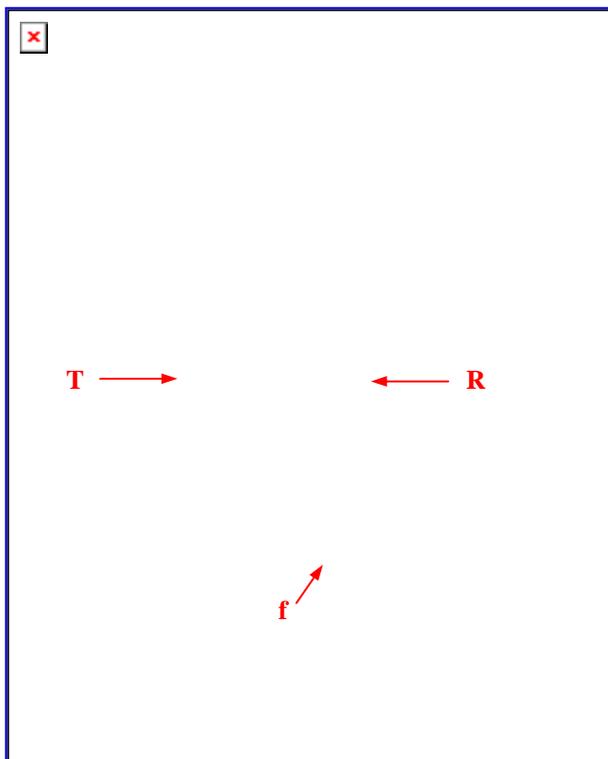
Le prove di compressione semplice sono state effettuate in controllo di spostamento relativo dei piatti della pressa con velocità di deformazione  $v$  costante, dove per  $v$  si è assunto lo stesso valore in tutti i provini ( $v = 350 \mu\epsilon/\text{min}$ ).

Lo spostamento relativo dei piatti della pressa è stato ottenuto come media dei valori rilevati da 4 trasduttori induttivi (LVDT). I trasduttori sono stati collocati in modo da monitorare le 4 generatrici individuate, sulla generica sezione trasversale dei provini, da una coppia prefissata di diametri mutualmente ortogonali.

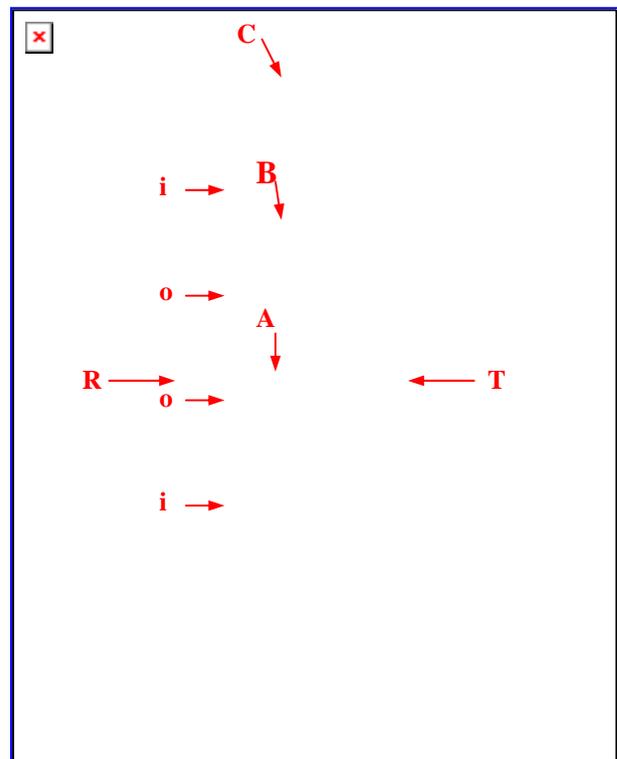
Nel punto di polarsimmetria dei provini di tipo 1 e 6 ricavati dal terzo impasto, si è rilevata la deformazione radiale per mezzo di un sensore in fibra ottica (FOS) annegato nell'impasto all'atto del getto. Il FOS utilizzato appartiene alla famiglia di sensori il cui funzionamento è basato sull'accoppiamento tra gli schemi interferometrici di Fabry-Pérot e di Fizeau (Appendice B). Il cavo a protezione della fibra ottica è stato fatto fuoriuscire lateralmente dal provino ed è stato fissato su un supporto esterno con colla a caldo. Nella figura 3.1., tale cavo è indicato dalla lettera "f".

Gli stessi provini di tipo 1 e 6, sono stati monitorati con 3 rosette triassiali poste sulla superficie laterale del cilindro e lungo la stessa generatrice (fig. 3.2.). In particolare:

- la rosetta "A" è stata collocata in corrispondenza della sezione di mezzeria;
- la rosetta "C" è stata collocata a 4 cm dalla faccia superiore del cilindro;
- la rosetta "B" è stata collocata in posizione intermedia tra le due rosette "A" e "C".



**Figura 3.1.** Strumentazione del cilindro tipo 6 della terza serie: vista anteriore.

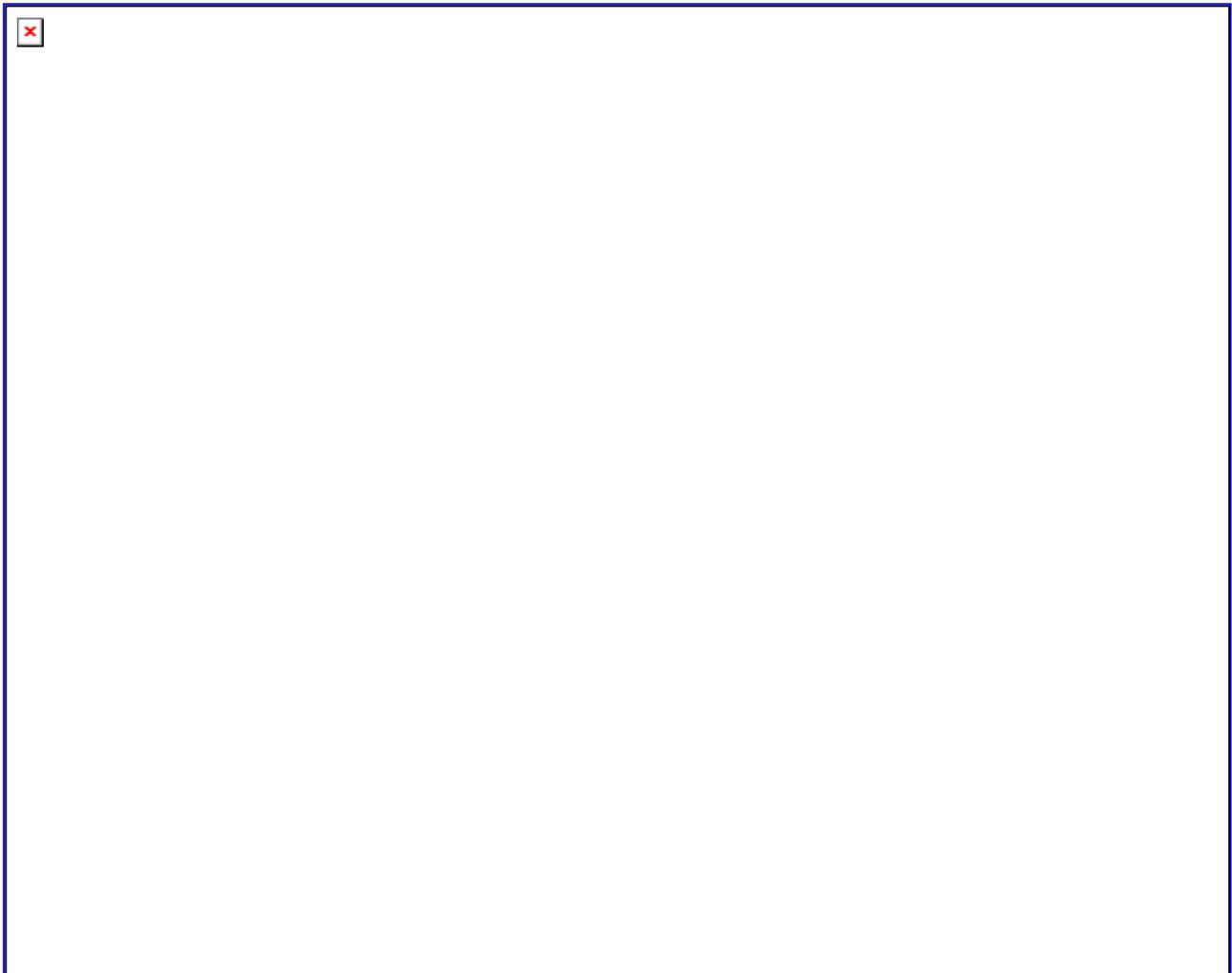


**Figura 3.2.** Strumentazione del cilindro tipo 6 della terza serie: vista posteriore.

Nel provino di tipo 6 ricavato dal terzo getto, si è effettuata una misura preliminare della variazione della resistività tra due punti prefissati (Appendice C). I punti tra i quali si è valutata la variazione di resistività sono stati posti lungo la stessa generatrice e sono indicati in figura 3.2. dalla lettera “o”. I punti collegati al generatore di ddp, allineati coi due punti “o”, sono invece indicati con la lettera “i”. Trattandosi di una misura preliminare, si è curato di posizionare ad intervalli regolari i punti “o” ed i punti “i”, ma non si è data importanza alla posizione esatta dei punti suddetti lungo la generatrice. Si sono utilizzati elettrodi a disco ricoperti da una patina di cloruro d’argento e la corrente è stata misurata mediante un voltmetro ad alta impedenza d’ingresso (Appendice C). Gli elettrodi sono stati mantenuti in posizione con nastro adesivo. L'accoppiamento elettrodi-superficie del provino è stata garantita tramite interposizione di gel.

Per tutti i provini, durante tutte la prova di carico è stato effettuato un rilievo microsismico sul percorso diametrale a metà altezza. Le variazioni di tempo di attraversamento  $T$  e di attenuazione  $G$  delle onde elastiche di vibrazione in ricezione sono state rilevate in continuo al variare del carico esterno. La sonda trasmittente e la sonda ricevente sono indicate nelle figure 3.1. e 3.2., rispettivamente, dalle lettere “T” e “R”.

La figura 3.3. mostra una panoramica della strumentazione utilizzata durante le prove.



**Figura 3.3.** Vista complessiva della strumentazione utilizzata durante le prove.

In tutte le prove di resistenza, è stato effettuato un ciclo di scarico-ricarico di stabilizzazione in corrispondenza del valore di carico esterno pari a 10 ton. Nei provini della terza serie, oltre al ciclo di stabilizzazione, sono stati effettuati altri due cicli di scarico-ricarico, rispettivamente, in corrispondenza del carico esterno massimo e in fase di avanzato softening.

#### 4 CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI

Poiché si temeva che, ricavando i provini per taglio da un unico getto, il disturbo arrecato a quelli più bassi potesse essere di entità tale da compromettere l'esito della prova, si è deciso di gettare singolarmente tutti i cilindri da sottoporre a prova.

Come cassaforma, si sono utilizzati tubi in PVC tagliati a misura, secondo i valori di  $r$  prefissati, da tubi di diametro esterno  $D_e = 160 \text{ mm}$  e diametro interno  $D_i = 154 \text{ mm}$ . Il tipo di plastica ed il rapporto tra diametro esterno e diametro interno dei tubi sono stati scelti in modo tale da garantire una sufficiente rigidità delle casseforme in fase di confezionamento.

Per quanto riguarda la miscela, il tipo di inerti, il cemento utilizzato, il rapporto sabbia/cemento e il rapporto acqua/cemento, si veda l'Appendice A.

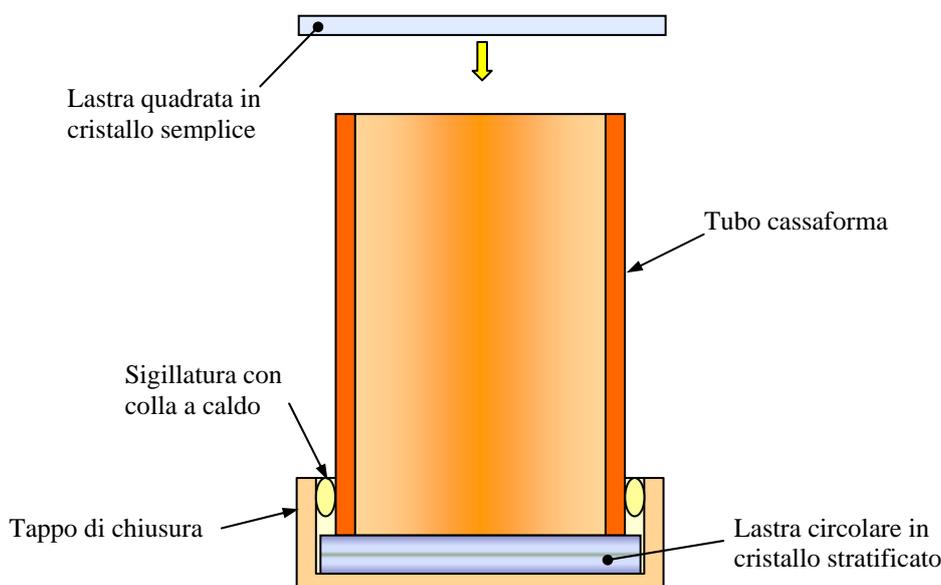
Il getto è stato costipato con sonda vibrante (Appendice A).

Le casseforme sono state preparate in modo da ottenere provini con basi a buona planarità e ortogonalità rispetto all'asse di simmetria.

L'ortogonalità rispetto all'asse di simmetria è stata garantita in fase di taglio dei tubi utilizzando una sega a controllo di avanzamento.

La planarità della faccia inferiore è stata garantita per mezzo di una lastra circolare di vetro, posta al di sotto del tubo in PVC e utilizzata come cassero inferiore (figura 4.1.). Per evitare che la lastra di vetro si danneggiasse durante le fasi di getto e costipazione, si è utilizzato un cristallo stratificato a doppio strato dello spessore complessivo di  $7 \text{ mm}$ .

Per rendere solidali i due casseri, la lastra di vetro, di diametro  $D = 160 \text{ mm}$ , è stata stretta contro il tubo per mezzo di un tappo di chiusura in PVC (figura 4.1.). Tale tappo è stato a sua volta solidarizzato al tubo in PVC tramite sigillatura con colla a caldo.



**Figura 4.1.** Vista in sezione delle casseforme utilizzate.

La planarità della faccia superiore è stata garantita per mezzo di una seconda lastra di vetro, poggiata direttamente sul tubo di PVC e utilizzata come cassero superiore. Questa seconda lastra di vetro, non richiedendo particolari requisiti di resistenza, è stata realizzata con un cristallo semplice dello spessore di  $5\text{ mm}$ . Dovendo svolgere solo un compito di chiusura superiore, la lastra non era soggetta a particolari restrizioni geometriche. Si è pertanto deciso di darle forma quadrata, con lato  $L$  maggiore del diametro esterno del tubo cassaforma ( $L = 200\text{ mm}$ ).

Nei due tubi destinati al getto dei provini di tipo 1 e 6 del terzo impasto, è stato praticato un foro, a metà altezza, per la fuoriuscita della fibra ottica (si veda la figura 4.2. per il caso del cilindro tipo 1). Il foro è stato realizzato con diametro di poco superiore a quello del cavo a protezione della fibra ottica.

La fibra ottica, il cui sensore situato nella parte terminale, dovendo misurare una deformazione radiale, andava collocato in posizione orizzontale, è stata fatta fuoriuscire lateralmente attraverso la cassaforma e non da una delle basi per evitare i problemi di alterazione del segnale connessi alle elevate curvature (Appendice B).



**Figura 4.2.** Particolare del foro di fuoriuscita della fibra ottica nel cilindro tipo 1.

Dopo l'inserimento del sensore in fibra ottica, il foro di fuoriuscita è stato sigillato con colla a caldo.

Come mostrato in Appendice B, per il rapporto tra dimensione del sensore di Fabry-Pérot e raggio dei provini utilizzati in questo programma sperimentale, il punto di fuoriuscita della fibra ottica dalla cassaforma è un punto ad altissima fragilità per la stessa fibra. Si è quindi ritenuto opportuno irrigidire la fibra alla fuoriuscita dalla cassaforma, sostenendola con un supporto esterno solidale al tubo (figure 4.3. e 4.4.). Come supporto esterno, si è utilizzato un profilato metallico a L di  $30 \times 30 \times 2\text{ mm}$ . Le solidarizzazioni tra supporto e tubo cassaforma e tra supporto e fibra ottica (figura 4.3.) sono state ottenute con colla a caldo.

Dal momento che, a tutt'oggi, i dati relativi ad inserimento di sensori in fibra ottica all'interno di getti in calcestruzzo sono ancora scarsi, al momento del confezionamento dei provini non si era in

possesso di informazioni precise sull'interazione tra sensore e calcestruzzo. Si temeva quindi che, durante le fasi di getto e costipazione, gli urti con gli inerti del calcestruzzo potessero danneggiare il sensore o modificarne la posizione. Inoltre, gli urti avrebbero potuto creare zone ad elevata curvatura con forte dispersione ed alterazione del segnale trasmesso (Appendice B). Per risolvere questo problema, la porzione di fibra ottica da inserire nel getto è stata preventivamente protetta inserendola in un tutore metallico cavo e lasciando scoperta solo la zona occupata dal sensore. Il tutore metallico è stato poi fissato con colla a caldo al supporto esterno, contribuendo ad irrigidire la fibra ottica nel punto di fuoriuscita dalla cassaforma. La solidarizzazione col supporto esterno ha permesso anche di evitare eventuali rotazioni rispetto alla posizione radiale in seguito agli urti.

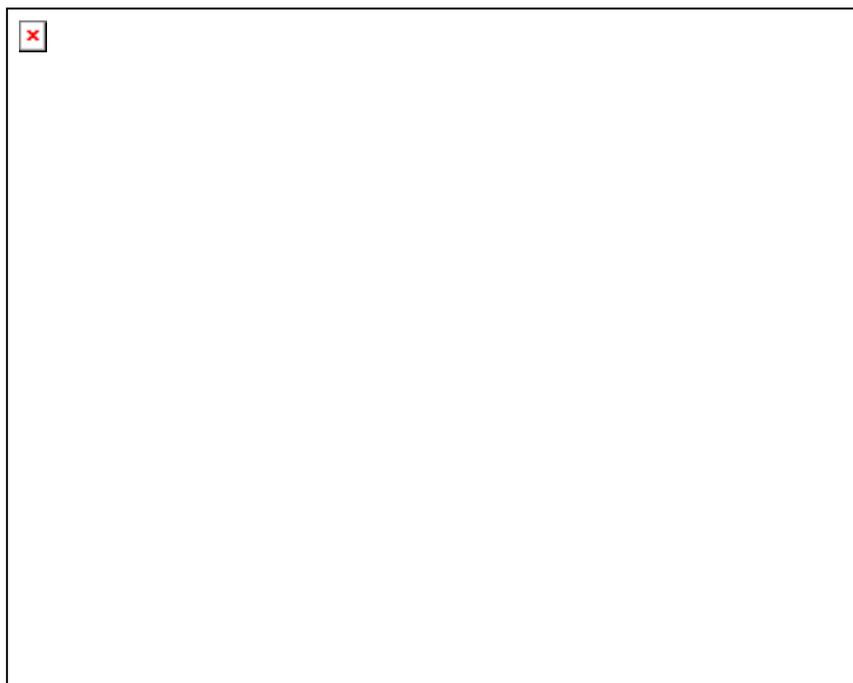
La validità dell'accorgimento adottato è stata verificata controllando il corretto funzionamento del sensore durante le fasi di getto e costipazione.

Per il getto dei provini 1 e 6 del terzo impasto, si è operato nel seguente modo:

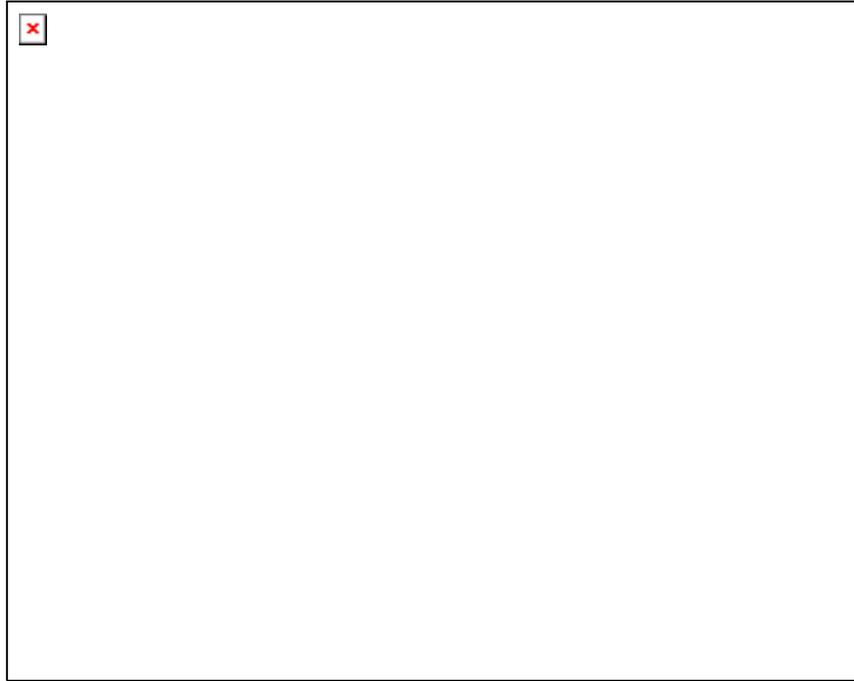
1. si è fissato il supporto al tubo cassaforma immediatamente al di sotto del foro per la fuoriuscita della fibra ottica;
2. si è gettato il calcestruzzo nel tubo cassaforma fino all'altezza corrispondente al foro per la fuoriuscita della fibra ottica;
3. si è inserito il tutore metallico contenente il sensore adagiandolo, esternamente, sul supporto esterno e, internamente, sull'impasto già gettato;
4. si è fissato il cavo protettivo della fibra ottica al supporto esterno, controllando il corretto posizionamento in direzione radiale del sensore di Fabry-Pérot (figura 4.3.);
5. si è ultimato il getto;
6. si è costipato il calcestruzzo con sonda vibrante (figura 4.5.);
7. si è rasata la superficie superiore dei provini;
8. si è coperta la superficie superiore dei provini con la seconda lastra di vetro (figura 4.5.).

Per gli altri provini, il getto è avvenuto in modo del tutto analogo saltando, ovviamente, le prime 4 fasi.

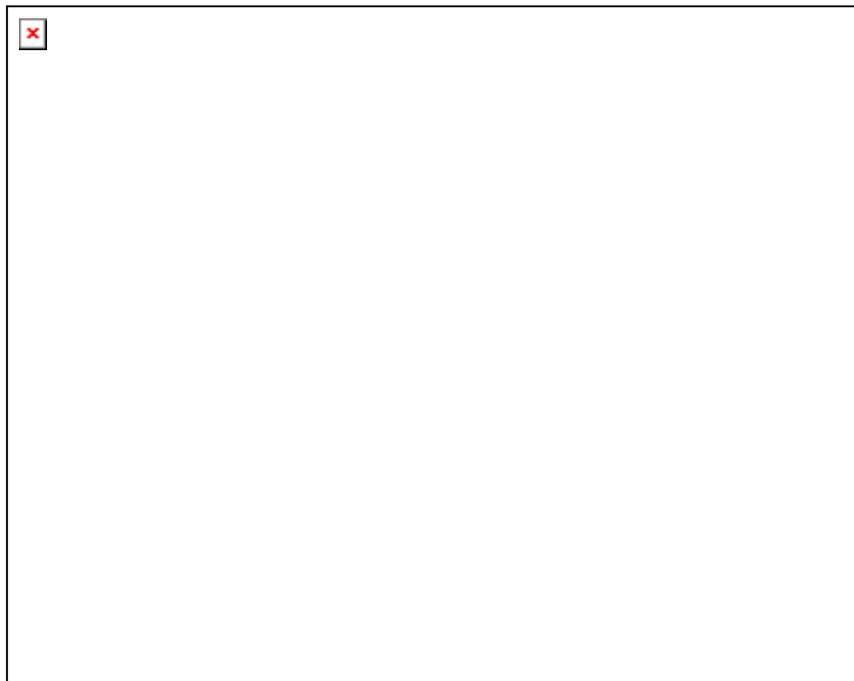
All'atto del disarmo dei provini 1 e 6, il tubo cassaforma è stato tagliato in modo da lasciare in sede la porzione sulla quale era stato fissato il supporto metallico (figura 3.1.). Tale porzione è stata fissata al provino con nastro adesivo.



**Figura 4.3.** Fissaggio del cavo protettivo della fibra ottica al supporto esterno.



**Figura 4.4.** Particolare del supporto esterno a fissaggio ultimato.



**Figura 4.5.** Costipamento del calcestruzzo con sonda vibrante.

Un altro timore derivante dai pochi dati a disposizione sui sensori in fibra ottica inseriti in getti, era che l'ambiente fortemente alcalino, tipico della fase di stagionatura del calcestruzzo, potesse danneggiare il coating del sensore (Appendice B). Per questo motivo, si è controllato il corretto funzionamento del sensore, periodicamente, anche durante la fase di stagionatura. Anche questo secondo controllo ha dato esito positivo.

## 5 NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO

### 5.1. Confezionamento dei provini

- UNI 8520/5, Aggregati per confezione di calcestruzzi - Analisi granulometrica;
- UNI 8520/13, Determinazione della massa volumica e dell'assorbimento degli aggregati fini;
- UNI 6128, Confezione in laboratorio di calcestruzzi sperimentali;
- UNI 6127, Provini di calcestruzzo - Preparazione e stagionatura;
- UNI 9418, Calcestruzzo fresco - Determinazione della consistenza - Prova di abbassamento al cono (slump test).

### 5.2. Prove microsismiche

Le caratteristiche della strumentazione e le modalità di misura sono stabilite dalla norma UNI 9524.

## 6 RISULTATI SPERIMENTALI

### 6.1. Rilevazioni a carico nullo

Nelle tabelle 6.1.1., 6.1.2. e 6.1.3. si sono riportate le caratteristiche geometriche, la massa volumica e le quantità microsismiche a carico nullo per le tre serie di provini.

Tipo di cilindro	Diametro (cm)	Altezza (cm)	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Velocità (km/sec)	Attenuazione (dB)
1	15.5	23.20	2450	4.427	47
2	15.5	30.75	2445	4.562	53
3	15.5	38.60	2440	4.525	54
4	15.5	46.40	2443	4.571	60
5	15.5	54.00	2438	4.596	62
6	15.5	61.70	2427	4.547	69

Tabella 6.1.1. Caratteristiche geometriche, massa volumica e quantità microsismiche: cilindri della prima serie.

Tipo di cilindro	Diametro (cm)	Altezza (cm)	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Velocità (km/sec)	Attenuazione (dB)
1	15.0	23.25	2604	4.568	51
2	15.0	30.90	2606	4.585	55
3	15.0	38.65	2611	4.623	57
4	15.0	46.60	2595	4.551	57
5	15.0	54.50	2586	4.561	60
6	15.0	62.00	2591	4.569	64

Tabella 6.1.2. Caratteristiche geometriche, massa volumica e quantità microsismiche: cilindri della seconda serie.

Tipo di cilindro	Diametro (cm)	Altezza (cm)	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Velocità (km/sec)	Attenuazione (dB)
1	15.5	23.50	2474	4.519	51
2	15.5	31.00	2428	4.606	54
3	15.5	38.65	2420	4.590	58
4	15.5	46.50	2426	4.537	63
5	15.5	54.20	2425	4.585	63
6	15.5	62.00	2452	4.569	70

**Tabella 6.1.3.** Caratteristiche geometriche, massa volumica e quantità microsismiche: cilindri della terza serie.

La velocità di propagazione riportata nelle tabelle è quella relativa al primo fronte d'onda rilevato dall'oscilloscopio. Poiché, nel calcestruzzo, la velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P) è notevolmente maggiore rispetto a quella delle onde di taglio (onde S), i valori riportati corrispondono al tempo di attraversamento delle onde P.

In tabella 6.1.4. si è riportato il valore del modulo elastico dinamico  $E_d$ , calcolato, per tutti i provini, secondo la relazione:

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)},$$

dove:  $\rho$  è la massa volumica ( $kg/m^3$ );

$V$  è la velocità di propagazione delle onde longitudinali ( $km/sec$ );

$\nu$  è il coefficiente di Poisson.

Tipo di cilindro	Modulo elastico dinamico $E_d$ (MPa)			
	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Valori medi
1	40021	45281	42105	42469
2	42405	45645	42923	43657
3	41645	46498	42495	43546
4	42536	44785	41615	42979
5	42908	44831	42489	43409
6	41818	45076	42646	43180
	41889	45353	42379	43207

**Tabella 6.1.4.** Modulo elastico dinamico.

## 6.2. Risultati delle prove di carico

### 6.2.1. Diagrammi carico-abbassamento

Si riportano, di seguito, i grafici carico-abbassamento relativi alle tre serie di provini.

L'effetto dimensionale sul comportamento macroscopico esibito da questi provini è evidente, sia in termini di abbattimento del carico massimo all'aumentare della snellezza, sia in termini di abbattimento della tangente all'origine sempre all'aumentare della snellezza.

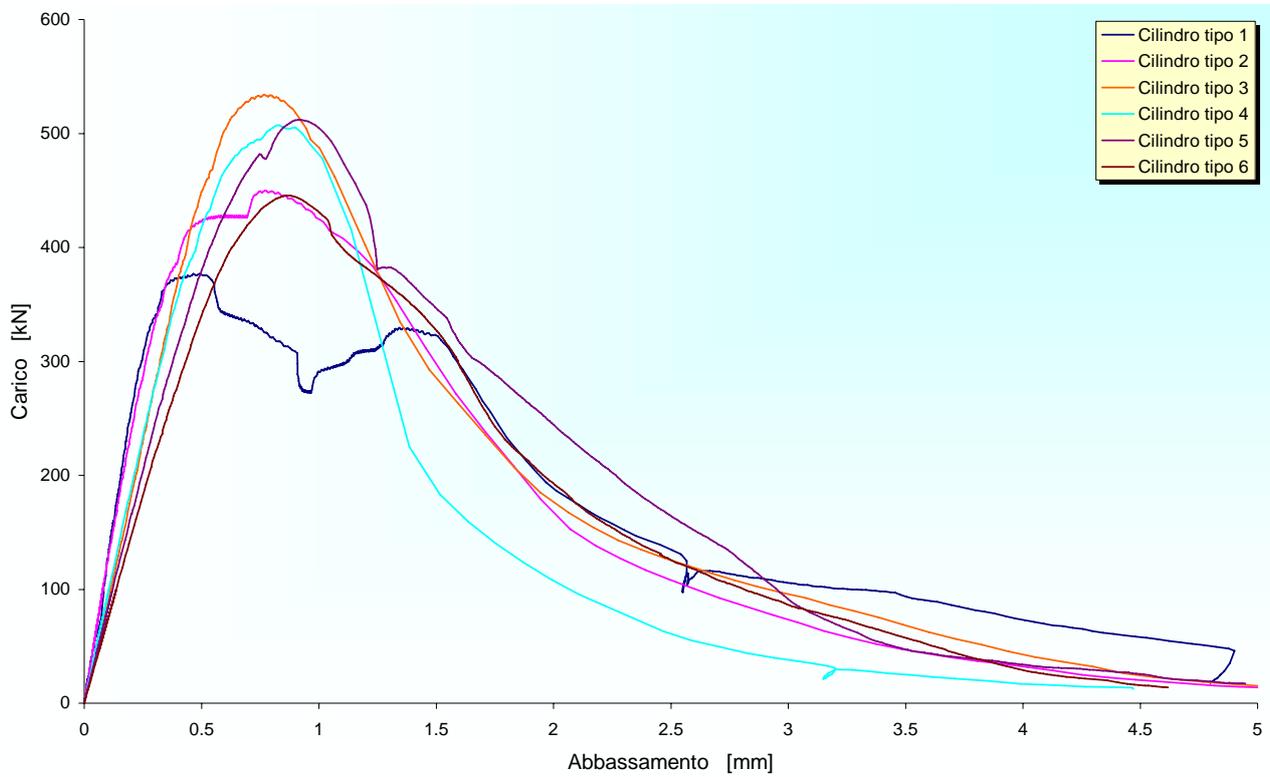


Figura 1.1. Curve carico-abbassamento relative alle prove di carico sulla prima serie di provini.

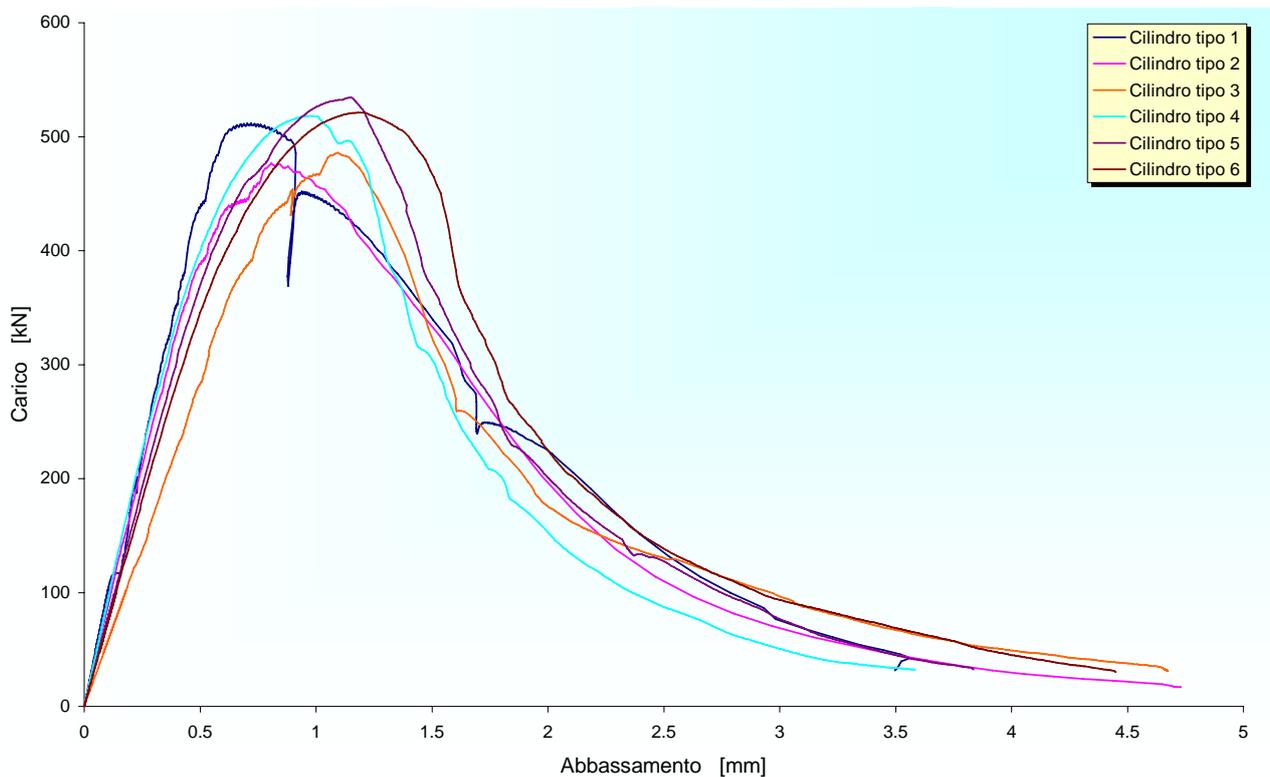
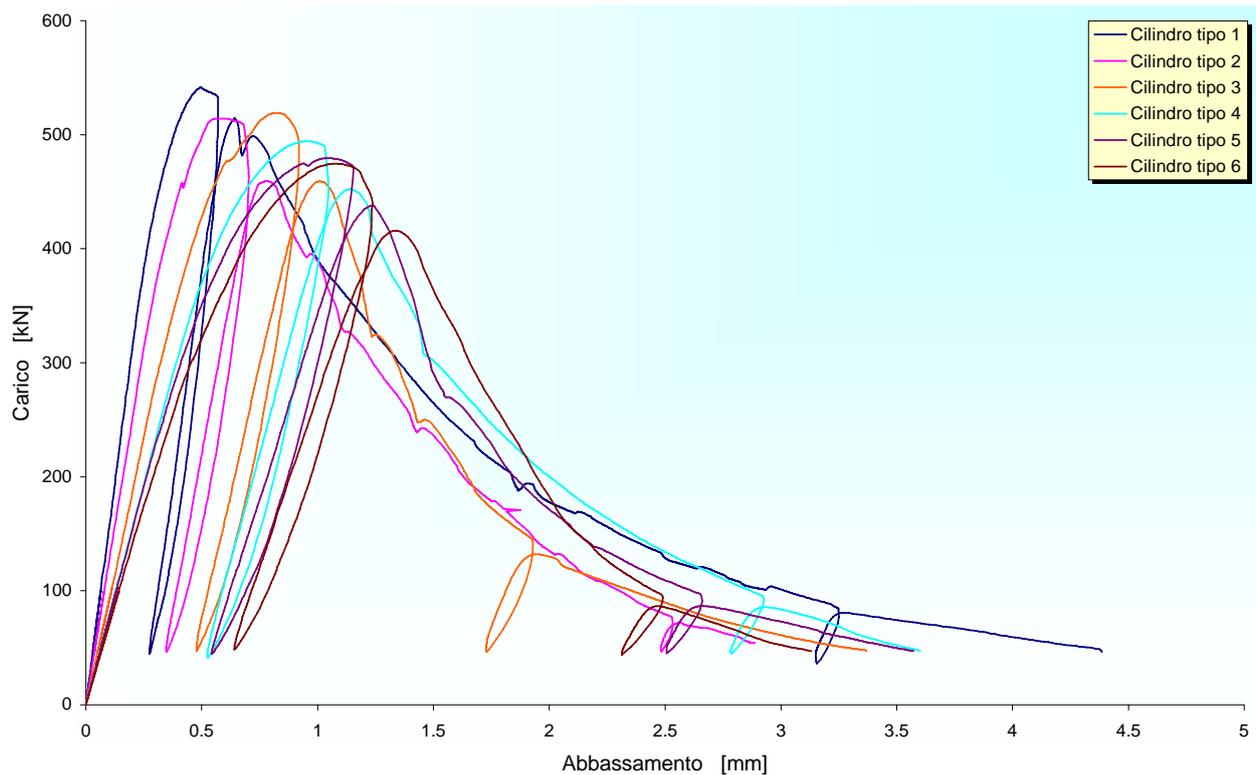


Figura 1.2. Curve carico-abbassamento relative alle prove di carico sulla seconda serie di provini.



**Figura 1.3.** Curve carico-abbassamento relative alle prove di carico sulla terza serie di provini.

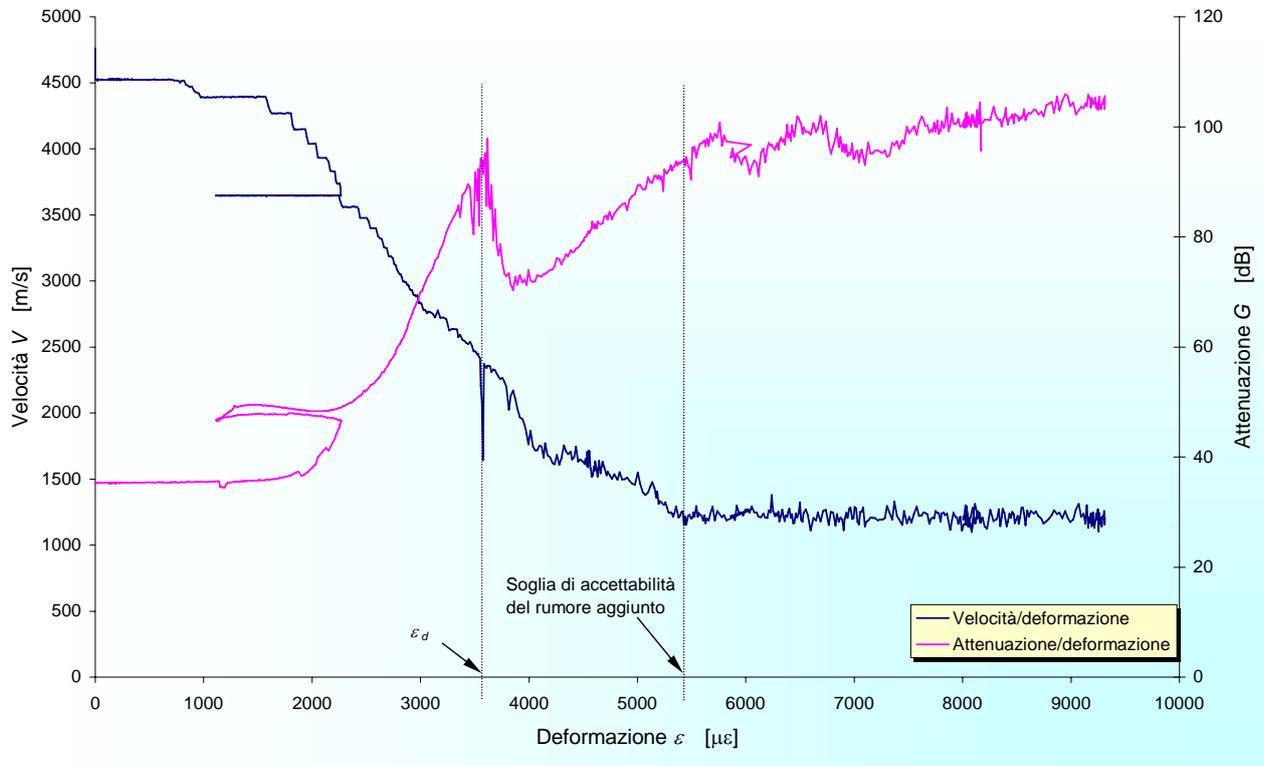
### 6.1.1. Rilevazioni microsismiche

A titolo di esempio, nelle figure 6.2.2.1., 6.2.2.2. e 6.2.2.3. si riportano, per il cilindro tipo 2 della terza serie e in funzione della deformazione media, la variazione delle quantità microsismiche, il decremento percentuale stimato di area resistente desunto dai tre parametri di danno ed il confronto tra i diagrammi tensione/deformazione identificati tramite i parametri di danno ed il diagramma tensione/deformazione di derivazione classica.

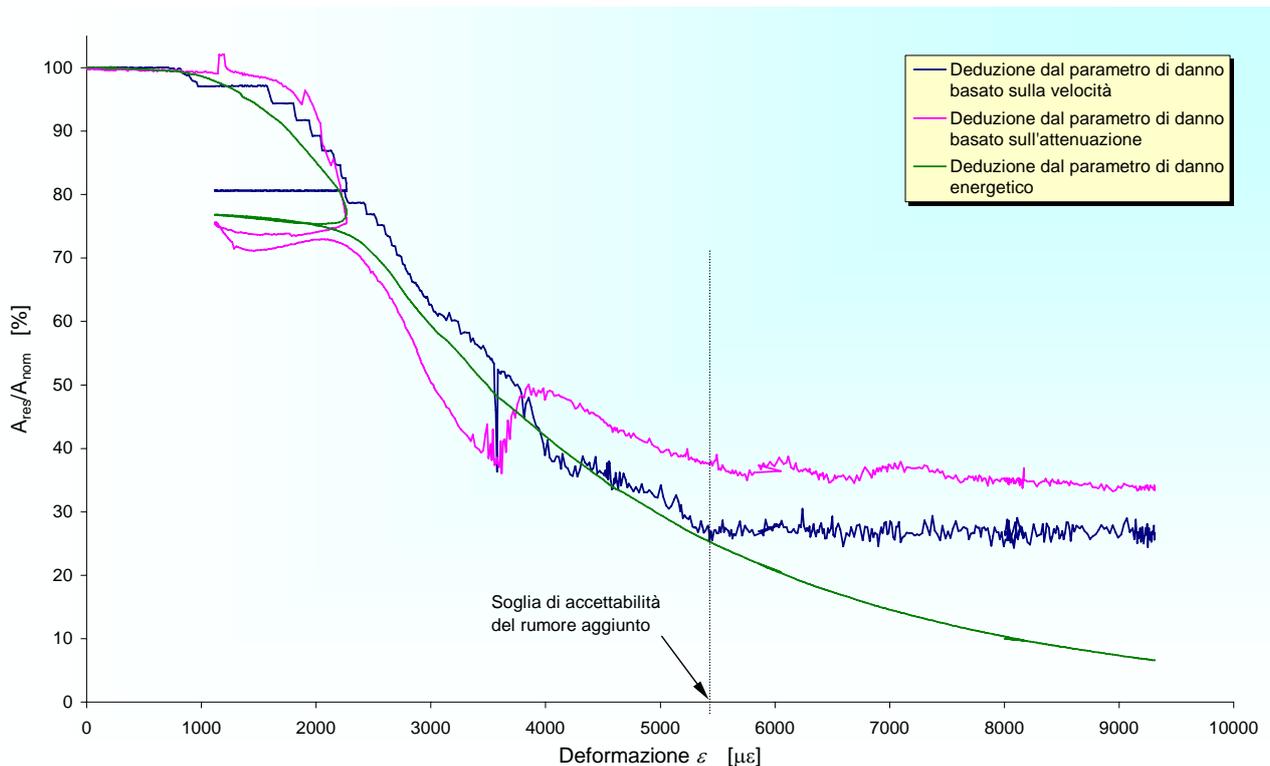
Come già in [4] e [5], anche per questa serie di prove l'acquisizione dei parametri microsismici è stata alterata dal disturbo, in termini di rumore aggiunto, provocato dal progressivo crack del materiale. Nelle figure 6.2.2.1., 6.2.2.2. e 6.2.2.3. è stata riportata la soglia di accettabilità del rumore aggiunto. Tale soglia è stata identificata come quel particolare valore di deformazione oltre al quale il disturbo arrecato è di entità tale da non poter più far apprezzare sensibili variazioni del segnale microsismico. Per il legame tra parametro di danno e area resistente, oltre la soglia di accettabilità del rumore aggiunto non è possibile apprezzare nemmeno sensibili variazioni dell'area resistente percentuale, qualora questa venga stimata tramite i parametri di danno di derivazione microsismica ( $D_1$  e  $D_2$ ) (figura 6.2.2.2.). I legami costitutivi identificati per mezzo dei parametri microsismici, quindi, sono da ritenere attendibili solo fino alla soglia di accettabilità del rumore aggiunto. Nel legame costitutivo identificato per mezzo del parametro energetico non interviene, invece, nessuna limitazione di accettabilità.

Come già fatto osservare in [5] dalla figura 6.2.2.1. si nota che, dei due parametri microsismici, l'attenuazione  $G$  è molto più sensibile ai disturbi arrecati dai microcrack di quanto non sia la velocità  $V$ . Infatti, le due curve velocità/deformazione e attenuazione/deformazione esibiscono un picco in corrispondenza del valore di deformazione  $\varepsilon_d$ . Ciò significa che, per valori di deformazione prossimi a  $\varepsilon_d$ , il rapido susseguirsi dei fenomeni fessurativi ha comportato un temporaneo disturbo alle rilevazioni microsismiche. In seguito a questo disturbo, però, la curva relativa alla variazione di velocità si è riassetata velocemente sui valori precedenti, mentre la curva

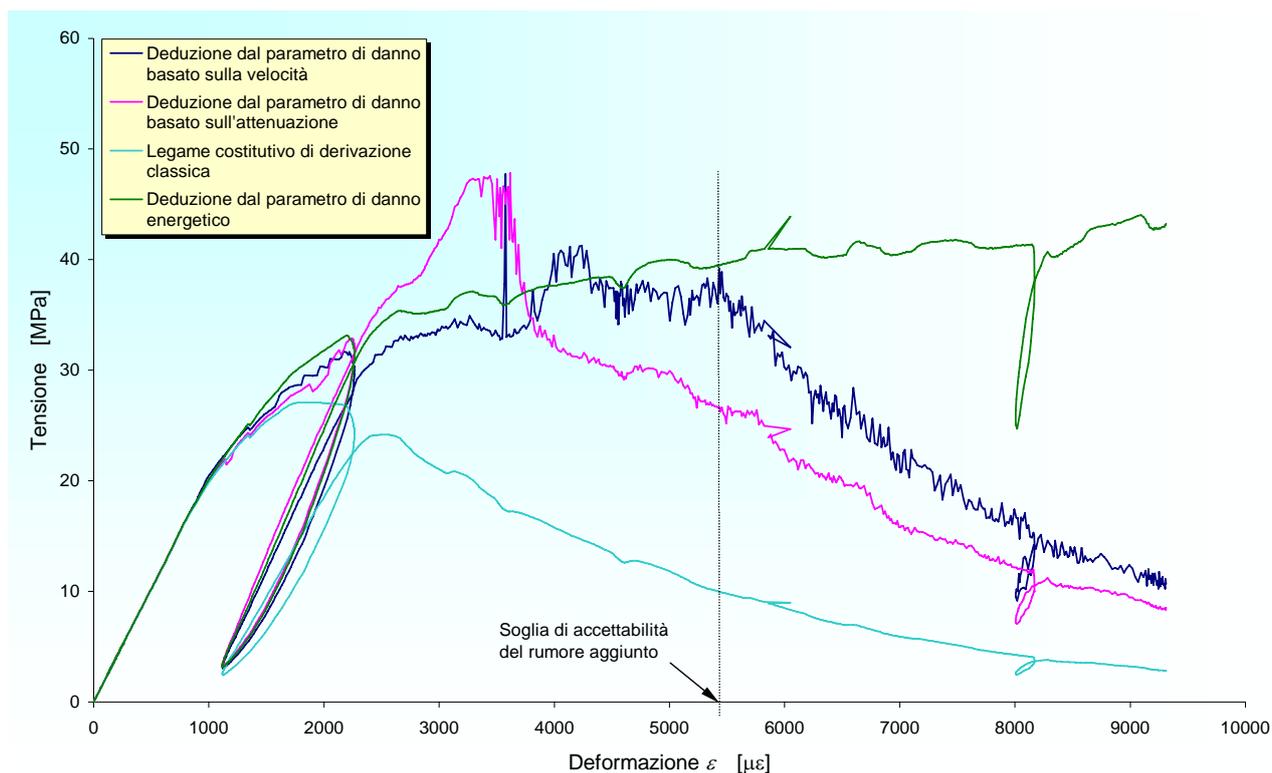
relativa alla variazione di attenuazione non si è stabilizzata altrettanto rapidamente. Ciò comporta, a tutti i livelli di deformazione, una maggiore dispersione dei risultati per la seconda curva, al punto che questa, non solo risulta di più difficoltosa identificazione, ma viene addirittura a perdere l'andamento monotono.



**Figura 6.1.1.1.** Variazione sotto carico delle quantità microsismiche: cilindro tipo 2 della terza serie.



**Figura 6.1.1.2.** Decremento percentuale stimato di area resistente: cilindro tipo 2 della terza serie.



**Figura 6.1.1.3.** Identificazione del legame costitutivo del materiale integro e confronto col legame costitutivo di derivazione classica: cilindro tipo 2 della terza serie.

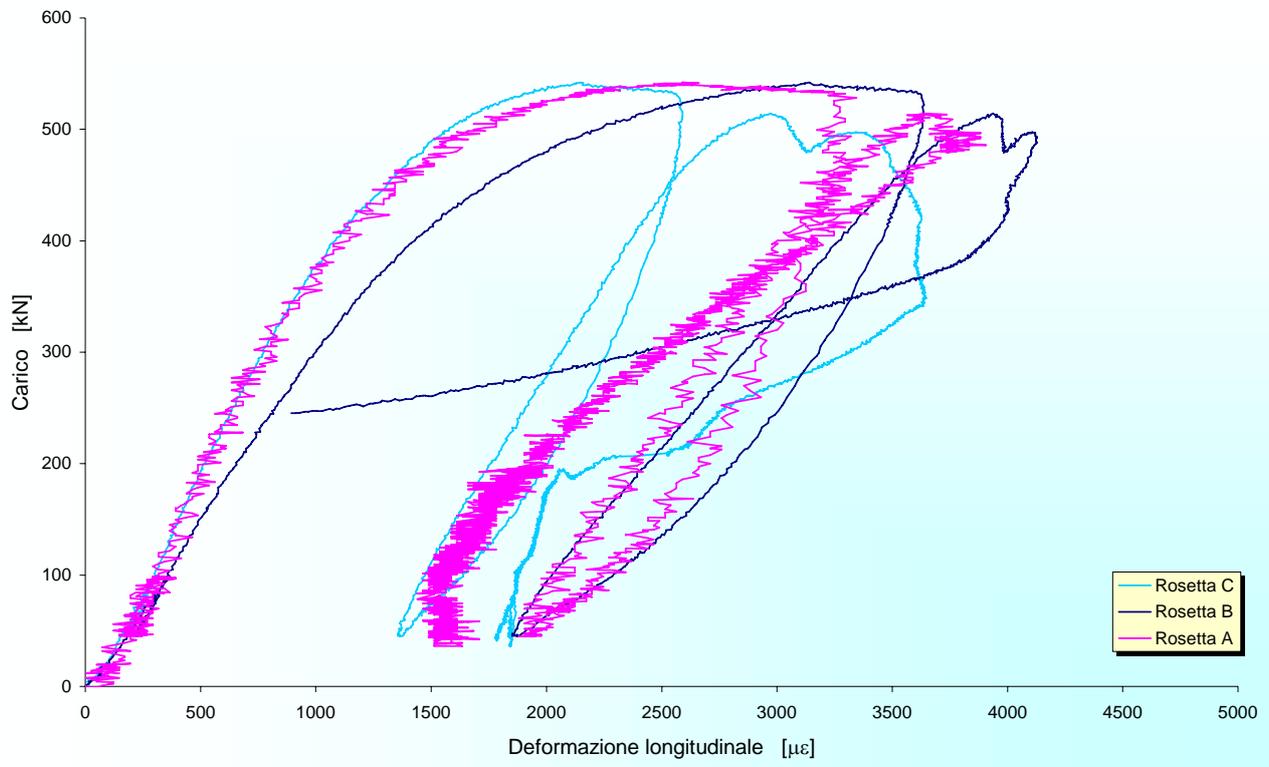
L'osservazione precedente, relativa al cilindro tipo 2 della terza serie, si ripete identica per tutti gli altri cilindri sottoposti a prova. Poiché l'andamento monotono (almeno in media) è auspicabile in un parametro che deve essere rappresentativo dell'evoluzione del livello medio di danno, se ne conclude che il parametro di danno basato sulla variazione percentuale dell'attenuazione perde validità ancor prima della soglia di accettabilità del rumore aggiunto e per un valore di deformazione minore di  $\varepsilon_d$ . Per l'eccessiva sensibilità al disturbo arrecato dai microcrack a tutti i livelli di deformazione, derivante dal tipo di strumentazione utilizzata, l'attenuazione sembra quindi non poter fornire un parametro di danno attendibile.

I due parametri di danno rimasti,  $D_1$  e  $D_3$ , entro la soglia di accettabilità del rumore aggiunto e per tutti i provini, forniscono valori molto prossimi tra loro (figura 6.2.2.2.). Tuttavia, poiché il parametro di danno di derivazione energetica non ha limitazioni nel campo di validità e non risente dei disturbi arrecati dai microcrack, nella ricerca del legame costitutivo del materiale integro è lecito assumere  $D_3$  come unico parametro di danno.

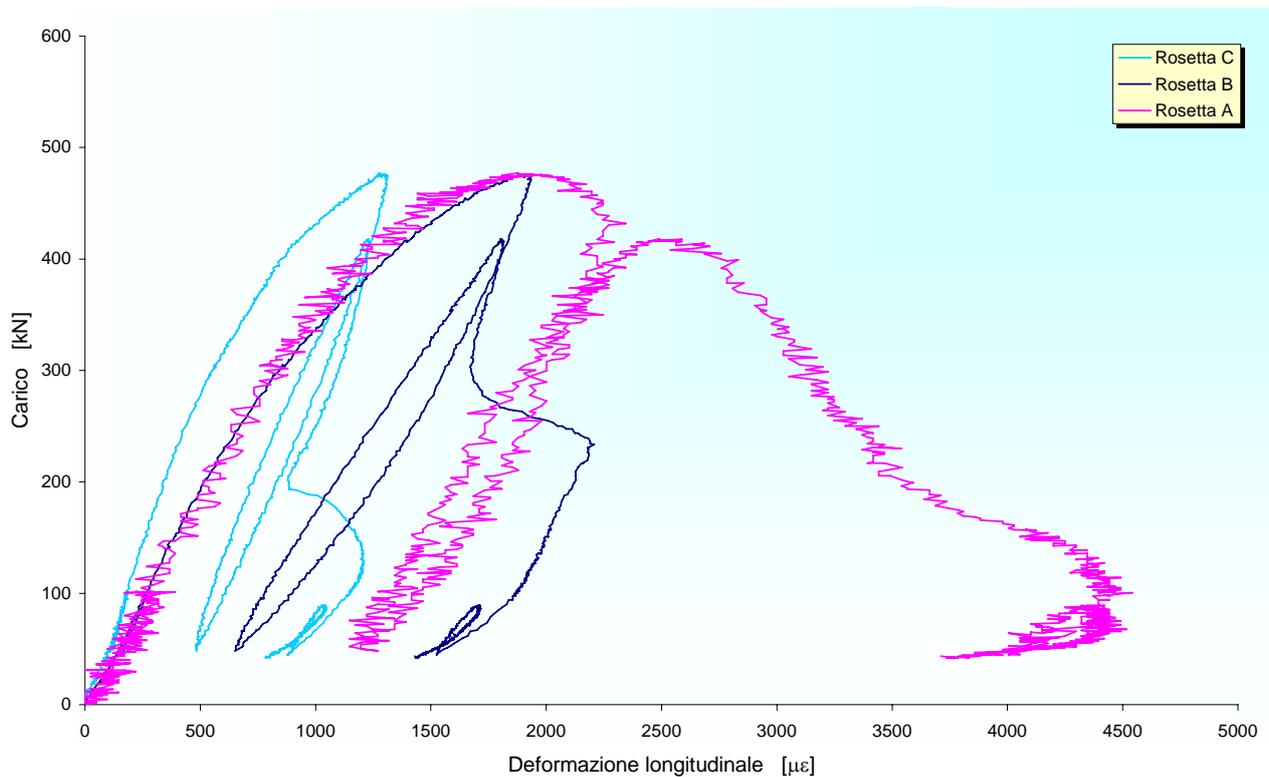
### 6.1.2. Misure di deformazione: estensimetri e sensori in fibra ottica (FOS)

Come si osserva dal confronto sui dati sperimentali relativi ai cilindri 1 e 6 della terza serie (figure 6.2.3.1., 6.2.3.2., 6.2.3.3., 6.2.3.4., 6.2.3.5 e 6.2.3.6.), non è possibile identificare in modo univoco, per ogni valore di carico esterno, una legge di distribuzione della deformazione (longitudinale, circonferenziale e diagonale) in funzione dell'altezza del provino. Infatti, focalizzando per esempio l'attenzione sulla variazione di deformazione longitudinale con l'altezza (figure 6.2.3.1. e 6.2.3.2.), si vede subito che, mentre nel cilindro tipo 1 l'andamento della deformazione longitudinale alla quota della rosetta "A" è prossimo a quello registrato alla quota

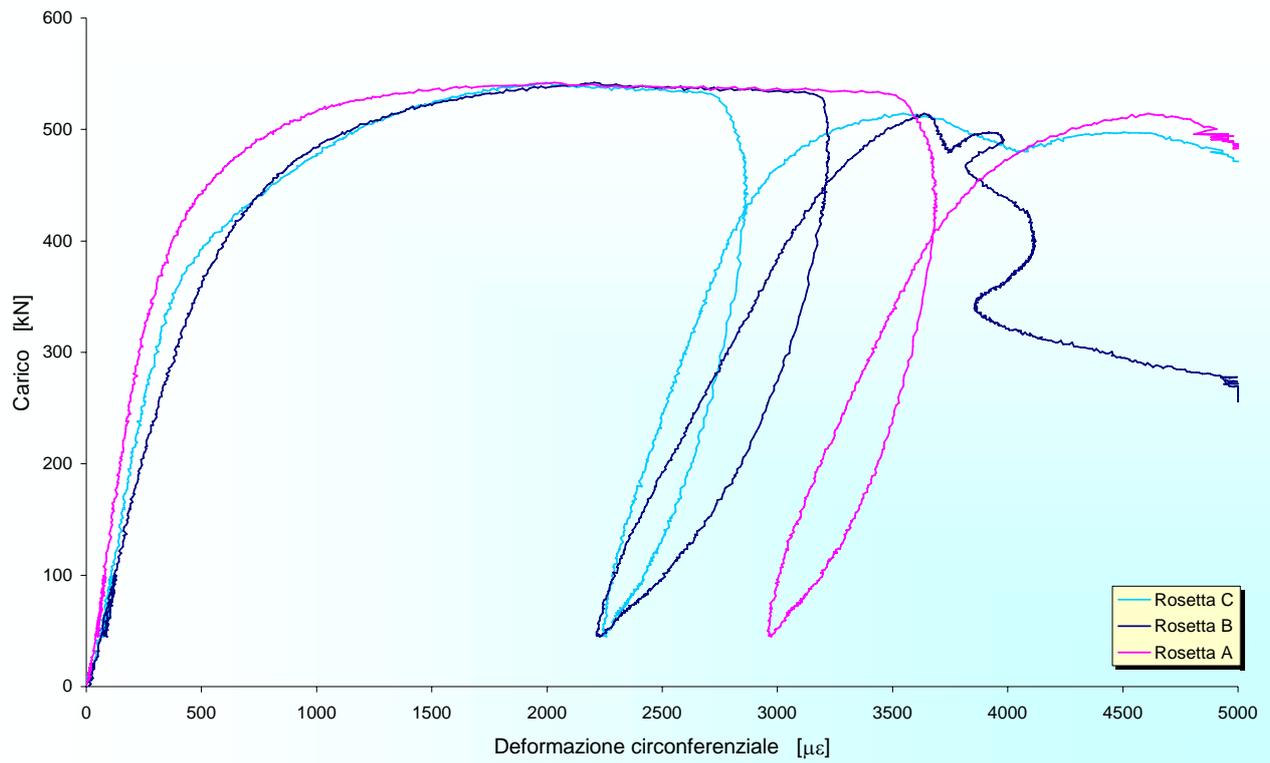
della rosetta “C”, nel cilindro tipo 6 il comportamento della rosetta “A” si differenzia sensibilmente da quello della rosetta “C” avvicinandosi molto, invece, a quello della rosetta “B”.



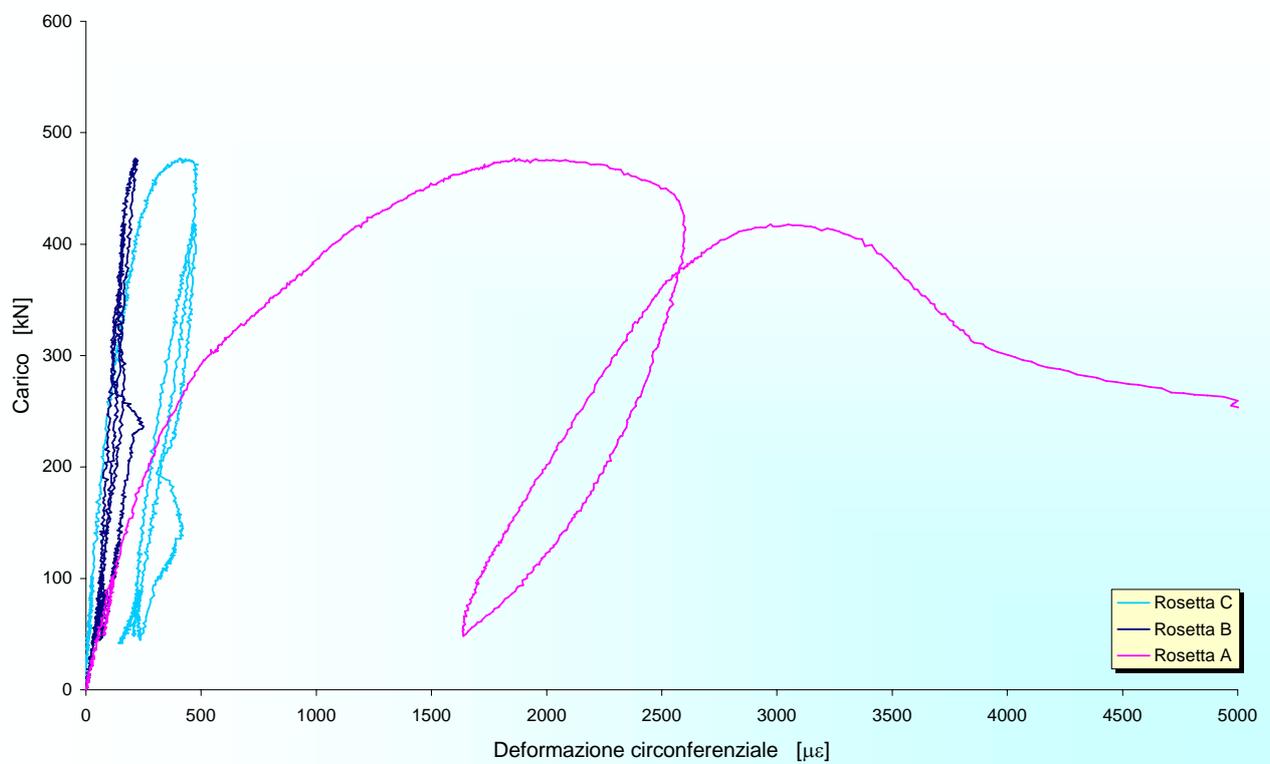
**Figura 6.1.2.1.** Rilevazioni estensimetriche in direzione longitudinale: cilindro tipo 1 della terza serie.



**Figura 6.1.2.2.** Rilevazioni estensimetriche in direzione longitudinale: cilindro tipo 6 della terza serie.



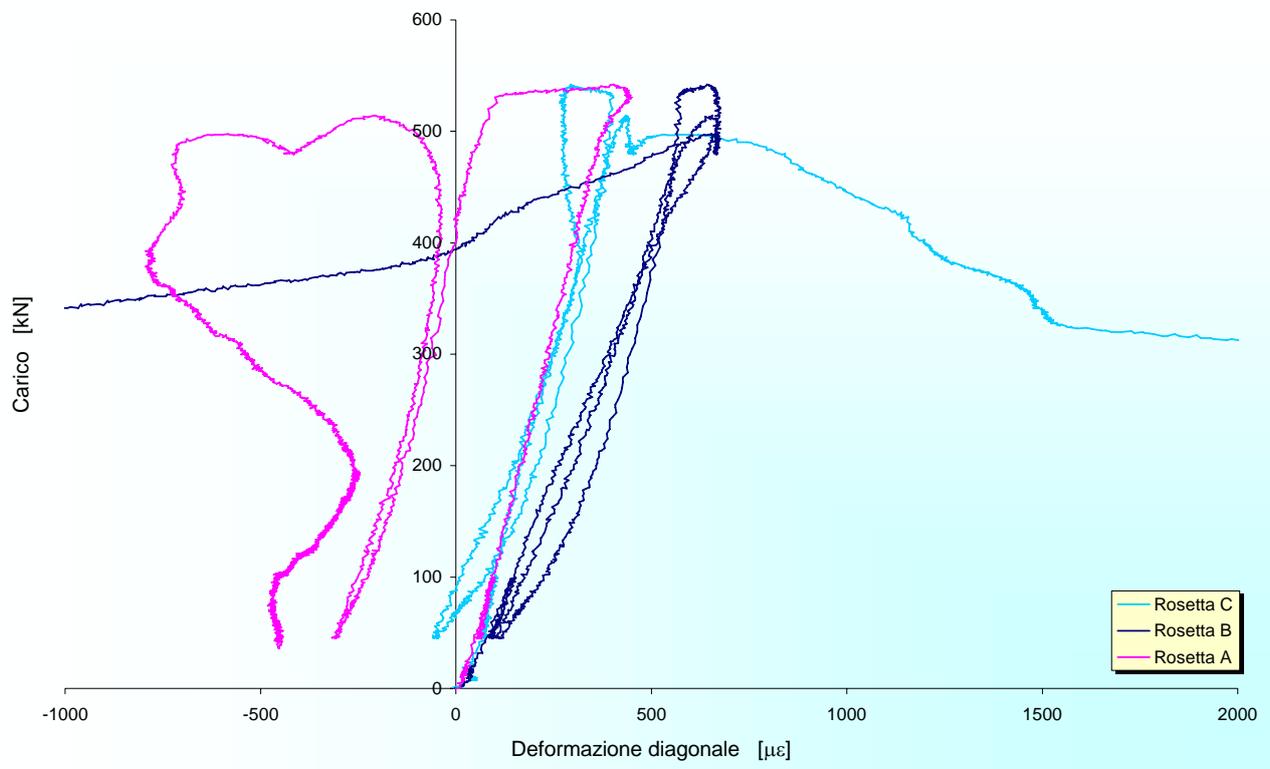
**Figura 6.1.2.3.** Rilevazioni estensimetriche in direzione circonferenziale: cilindro tipo 1 della terza serie.



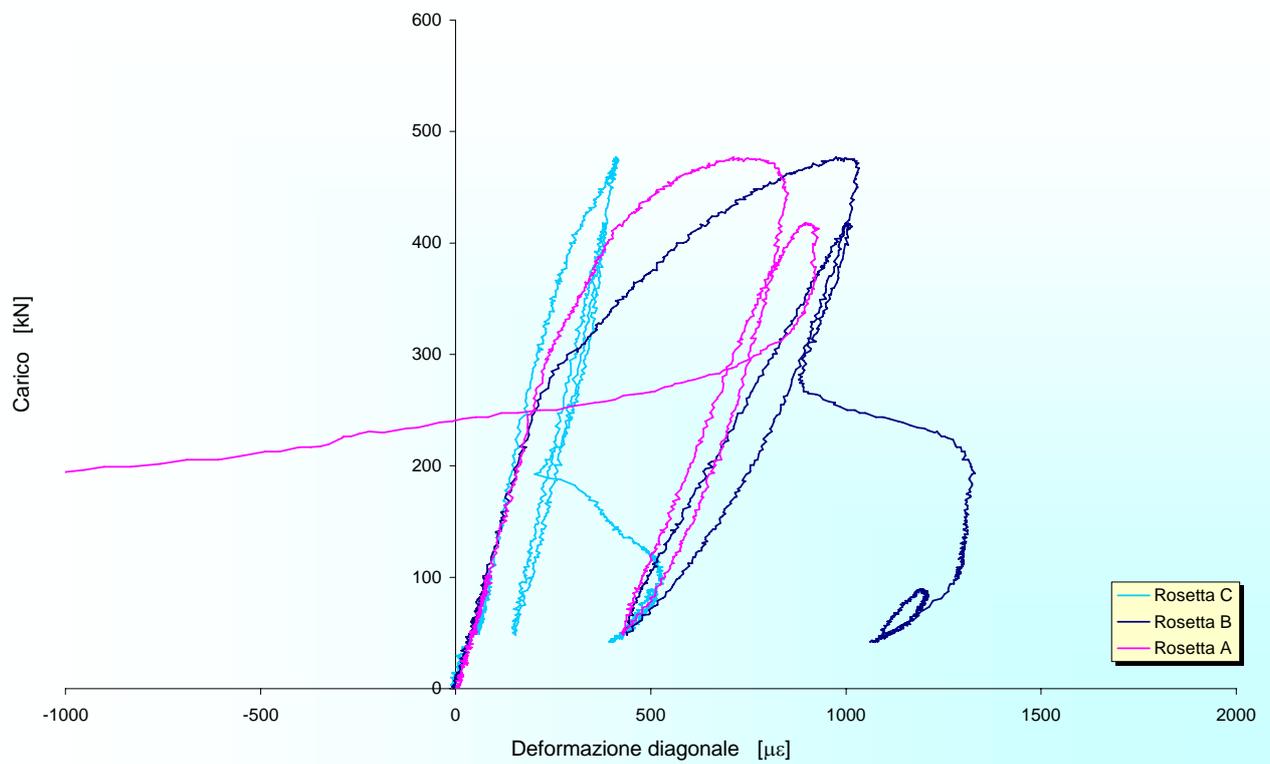
**Figura 6.1.2.4.** Rilevazioni estensimetriche in direzione circonferenziale: cilindro tipo 6 della terza serie.

Analoghe considerazioni di non ripetitività delle rilevazioni estensimetriche emergono anche dal confronto, a parità di quota di rilevazione, fra le deformazioni circonferenziali e diagonali dei

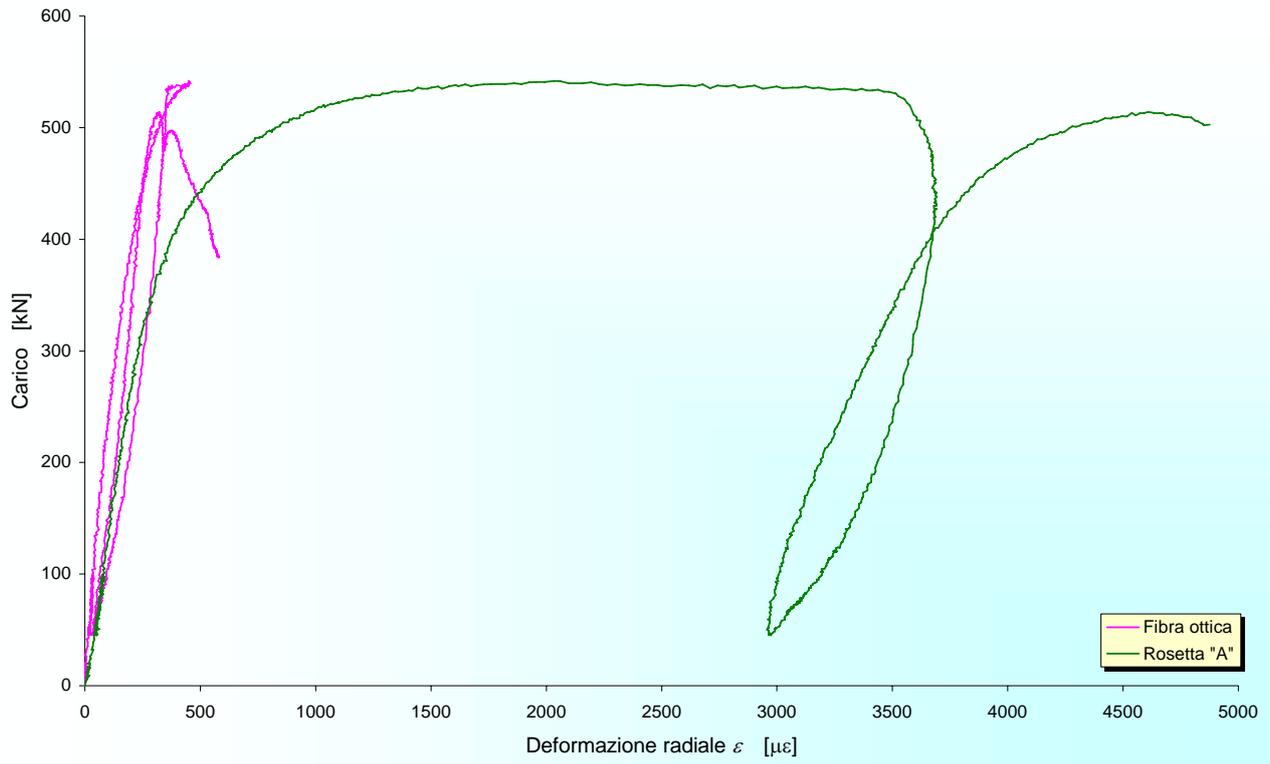
cilindri tipo 1 e 6 (figure 6.2.3.3., 6.2.3.4., 6.2.3.5. e 6.2.3.6.) e fra le deformazioni longitudinali, circonferenziali e diagonali esibite dai cilindri tipo 1, 4 e 6 (non riportato per brevità).



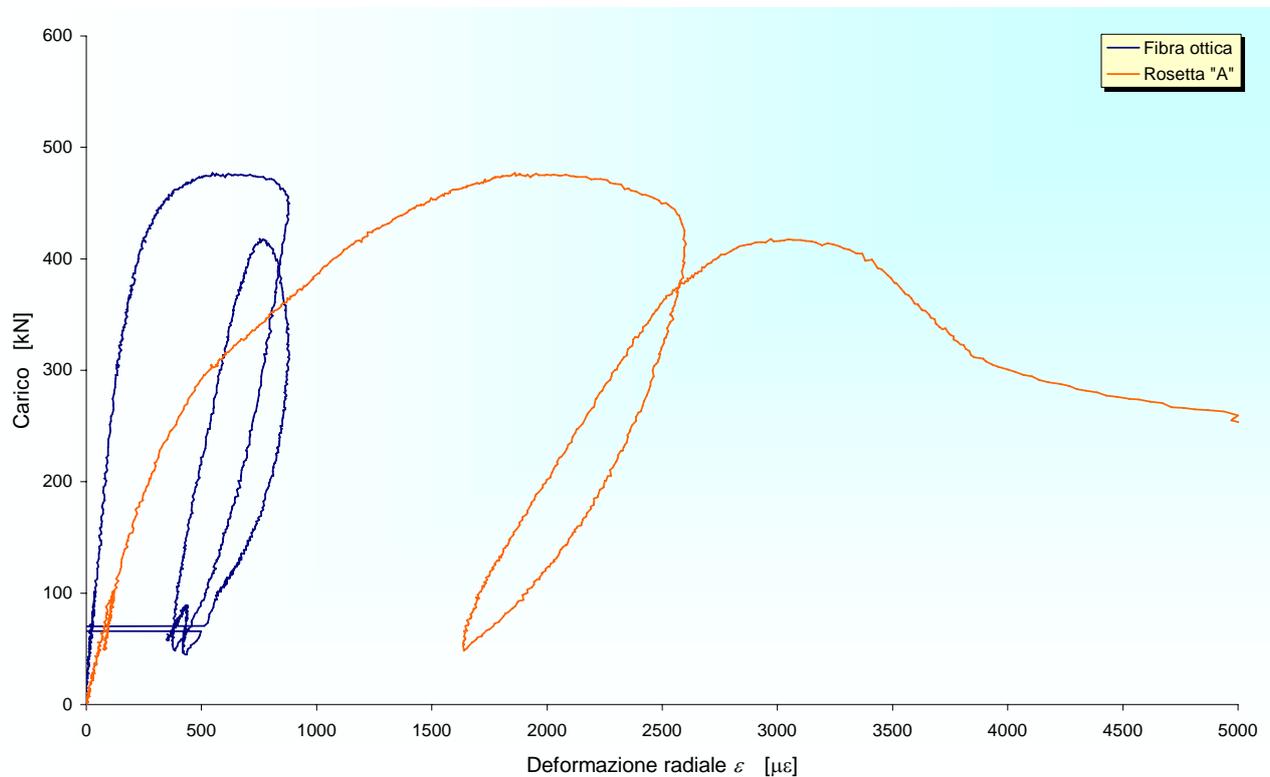
**Figura 6.1.2.5.** Rilevazioni estensimetriche in direzione diagonale: cilindro tipo 1 della terza serie.



**Figura 6.1.2.6.** Rilevazioni estensimetriche in direzione diagonale: cilindro tipo 6 della terza serie.



**Figura 6.1.2.7.** Confronto fra i valori di deformazione acquisiti dai FOS e dalle rosette estensimetriche “A”: cilindro tipo 1 della terza serie.

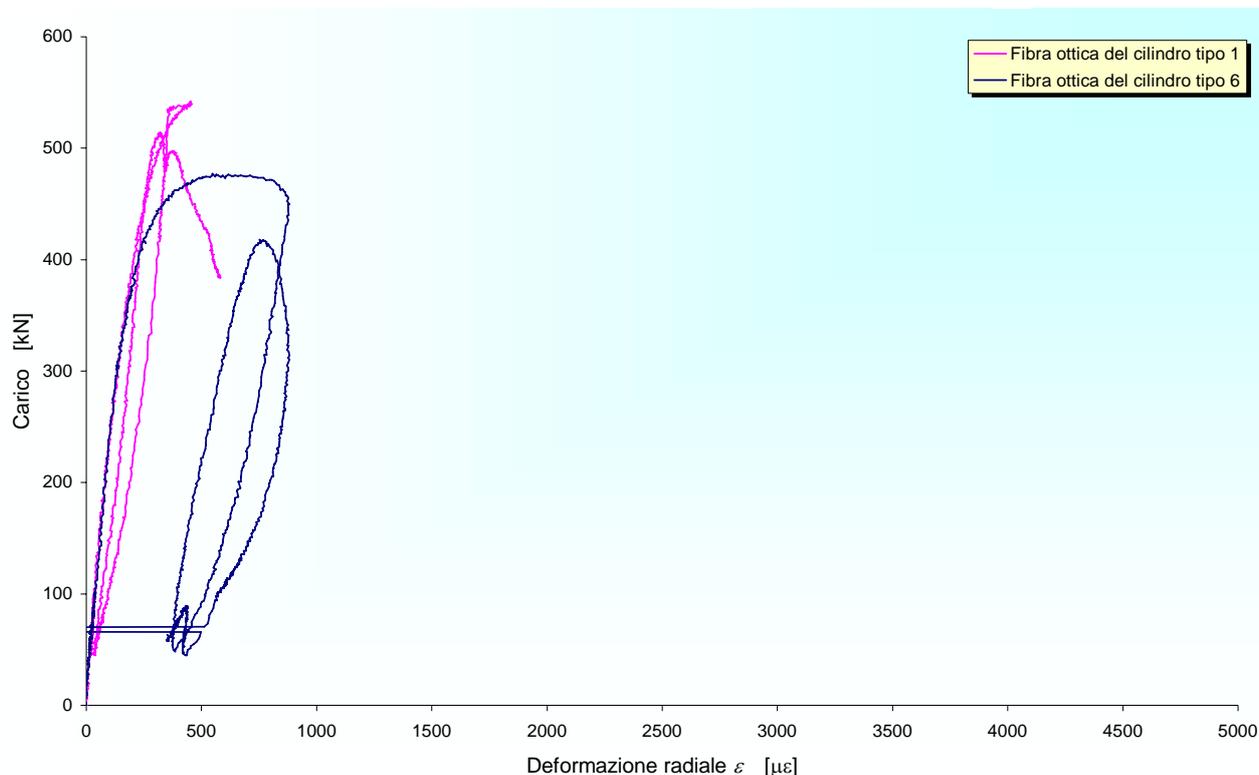


**Figura 6.1.2.8.** Confronto fra i valori di deformazione acquisiti dai FOS e dalle rosette estensimetriche “A”: cilindro tipo 6 della terza serie.

Per quello che riguarda i dati acquisiti dai sensori in fibra ottica, nelle figure 6.2.3.7. e 6.2.3.8. si è riportato il confronto fra i valori di deformazione acquisiti dai FOS e dalle rosette estensimetriche

“A”, poste alla stessa quota dei FOS. In figura 6.2.3.9., invece, si è riportato il confronto fra i valori di deformazione acquisiti dai FOS nei due cilindri tipo 1 e 6.

Come si osserva dai grafici riportati, benché la risposta dei FOS sia, per entrambi i cilindri, sensibilmente più rigida di quella delle rosette poste alla stessa quota, il confronto fra le rilevazioni dei FOS nei cilindri tipo 1 e 6 mostra una buona ripetitività dei dati acquisiti al variare della geometria, almeno fino al 90% del carico massimo.



**Figura 6.1.2.9.** Confronto fra i valori di deformazione acquisiti dai FOS nei due cilindri tipo 1 e 6 della terza serie.

Il confronto fra i valori di deformazione acquisiti dai FOS e quelli acquisiti dalle rosette estensimetriche, conferma il corretto funzionamento dei sensori in fibra ottica preinseriti all'interno di un getto in calcestruzzo.

### 6.1.3. *Variazione di resistività*

In figura 6.2.4.1. si è riportato il grafico della variazione sotto carico della resistività nel cilindro tipo 6 della terza serie.

Come evidenziato in Appendice C, la variazione sotto carico della resistività è dovuta al contributo di due fattori:

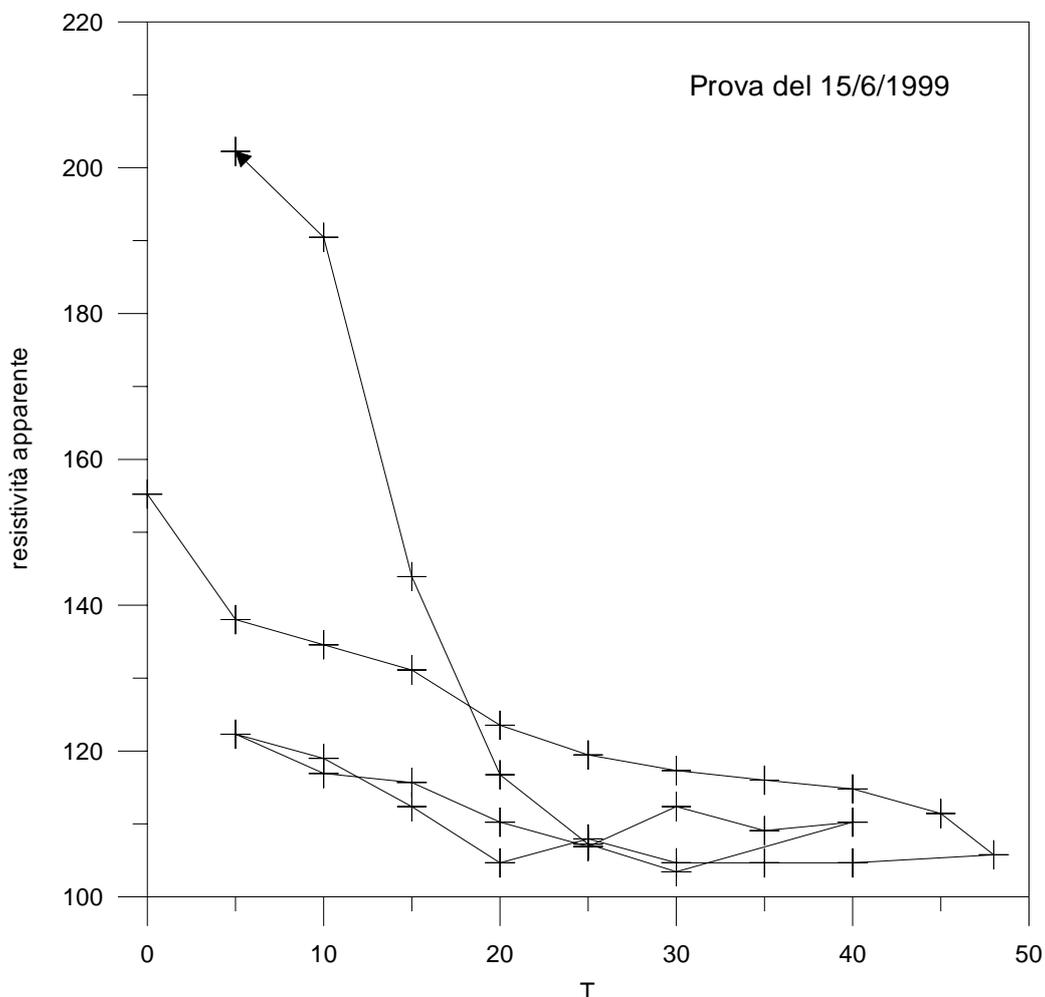
- a) progressiva saturazione dei pori della pasta di cemento con eliminazione dell'aria contenuta;
- b) progressivo danneggiamento del solido di prova.

Al fattore a) è connessa una variazione negativa di resistività, mentre al fattore b) è connessa una variazione positiva di resistività. Il grafico mostrato in figura 6.2.4.1. risulta, quindi, dalla somma dei due contributi, uno positivo e uno negativo, connesso a questi due fattori.

In particolare, è lecito aspettarsi che il contributo del primo fattore sia massimo all'inizio della prova di carico e cali con il valore di abbassamento. Analogamente, è lecito aspettarsi che il

contributo del secondo fattore sia nullo all'inizio della prova di carico e cresca con il valore di abbassamento.

Poiché tutti i provini sottoposti a prova di carico sono stati tenuti in acqua fino al momento della prova, è logico aspettarsi che il contributo del primo fattore sia rilevante. D'altro canto, l'alta percentuale di acqua contenuta nel provino tipo 6 della terza serie è confermata anche dai bassi valori di resistività elettrica registrati durante la prova (Appendice C).



**Figura 6.1.3.1.** Variazione col carico della resistività nel cilindro tipo 6 della terza serie.

Allora, poiché, per quanto detto, il contributo del primo fattore è rilevante, si può facilmente interpretare l'andamento del grafico riportato in figura 6.2.4.1., decrescente nella parte iniziale e crescente nella parte finale.

## RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato svolto con il contributo finanziario del MURST 40%.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] **Daponte, P., Maceri, F., and Olivito, R. S.**, “Frequency-Domain Analysis of Ultrasonic Pulses for the Measure of Damage Growth in Structural Materials”, *1990 Ultrasonic Symposium*, 1990, pp. 1113-1118.
- [2] **Daponte, P., and Olivito, R. S.**, “Metodi Ultrasonici per il Rilevamento del Danno nel Calcestruzzo: Analisi nel Dominio del Tempo e della Frequenza”, *Meccanica dei Materiali e delle Strutture, Atti del Convegno Nazionale in Ricordo di Riccardo Baldacci e Michele Capurso*, 25-27 Ottobre 1989, pp. 297-306.
- [3] **Daponte, P., and Olivito, R. S.**, “Crack Detection Measurements in Concrete”, *Proceedings of the ISMM International Conference Microcomputers Applications*, December 14-16, 1989, pp.123-127.
- [4] **Ferretti, E., Viola, E., and Di Leo, A.**, “Comportamento Macroscopico in Compressione dei Calcestruzzi e Nuove Assunzioni Costitutive”, *Atti del Congresso su “La Sicurezza delle Strutture in Calcestruzzo ad Alte Prestazioni”*, Progetto Nazionale Cofinanziato dal Murst – 1997-98, 11-12 Marzo 1999.
- [5] **Ferretti, E., Viola, E., and Di Leo, A.**, “Deduzione di Nuove Leggi Costitutive per il Calcestruzzo a partire dal Comportamento Macroscopico in Compressione”, *Nota Tecnica N° 24*, DISTART, Facoltà di Ingegneria di Bologna, Anno Accademico 1998-1999.



## APPENDICE A

### DOSAGGI E MISCELA

#### Virna Bonora\*

#### A.1. Materiali e provini

Il calcestruzzo ( $R_{ck} = 25$ ) è stato studiato attraverso la preparazione di provini di forma cilindrica con diametro ( $\phi$ ) pari a 15.4 cm e altezza variabile: 1.5  $\phi$ , 2.0  $\phi$ , 2.5  $\phi$ , 3.0  $\phi$ , 3.5  $\phi$ , 4.0  $\phi$ . Per ogni altezza sono stati preparati tre provini.

Utilizzando un programma informatico è stato possibile ricavare le quantità dei componenti impiegati per mc e per ogni singolo impasto (tab. A.1.1.).

	Dos./mc (Kg)	Dos. Compl. (Kg)	Dos. Beton. (Kg)
<b>Cemento</b>	350	49.7	21.0
<b>Acqua</b>	162	23.0	10.2
<b>Sabbia</b>	822	116.7	49.3
<b>Pietrischetto</b>	524	74.4	31.4
<b>Pietrisco</b>	527	74.8	31.6

**Tabella A.1.1.** Quantità dei componenti impiegati per mc e per ogni singolo impasto.

Per la realizzazione dei suddetti provini sono stati confezionati tre impasti.

#### Materiali:

- Cemento CEM I 42.5 R, proveniente dalla cementeria di Merone (CO);
- Aggregato, formato da tre frazioni:
  - 1) sabbia fine 0-5 mm, proveniente dalla Cava AGES di Castenaso (BO),
  - 2) pietrischetto 5-15 mm, proveniente dalla Cava AGES di Castenaso (BO),
  - 3) pietrisco 15-22 mm, proveniente dalla Cava AGES di Castenaso (BO).

La curva granulometrica dell'aggregato (§ 5.1. – UNI 8520/5) è riportata nella figura A.1.1.

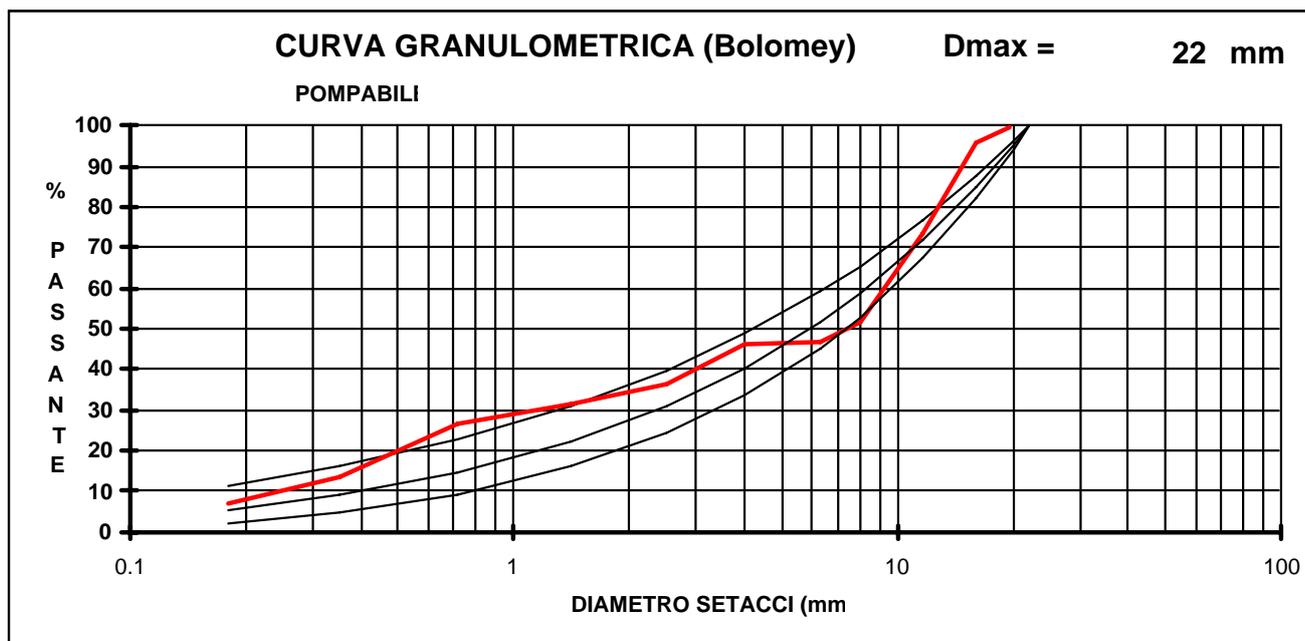
I valori delle masse volumiche sature a superficie asciutta ( $M_vSSA$ , § 5.1. – UNI 8520/13), dell'assorbimento di acqua dopo 24 ore (§ 5.1. – UNI 8520/13) e dell'umidità delle tre frazioni sono riportati in tabella A.1.2.

---

\* Ricercatore confermato – Dipartimento di chimica applicata e scienza dei materiali – Facoltà di Ingegneria – Università degli Studi di Bologna.

	Mv SSA (g/cm <sup>3</sup> )	Assorb. H <sub>2</sub> O (24h)(%)	umidità (%)
<b>Sabbia fine</b>	2.70	0.23	3.84
<b>Pietrischetto</b>	2.74	0.71	0.68
<b>Pietrisco</b>	2.66	1.22	1.14

**Tabella A.1.2.** Valori delle masse volumiche saturi a superficie asciutta (MvSSA, § 5.1. – UNI 8520/13), dell'assorbimento di acqua dopo 24 ore (§ 5.1. – UNI 8520/13) e dell'umidità delle tre frazioni.



**Figura A.1.1.** Curva granulometrica dell'aggregato.

Gli impasti sono stati eseguiti secondo le seguenti modalità (§ 5.1. – UNI 6127, UNI 6128, UNI 9418):

- si aggiunge il pietrisco
- si aggiunge il pietrischetto
- si aggiunge il cemento
- eseguito il riempimento, si avvia la betoniera per 5 minuti
- Viene introdotta acqua fino a raggiungere la consistenza voluta (150 mm), rilevata con lo slump test mediante l'impiego del cono di Abrams.

Durante il riempimento gli stampi sono stati sottoposti a vibrazione, mediante ago vibrante, per poter facilitare l'uscita dell'aria e raggiungere una buona costipazione.

Ultimata la fase di riempimento, gli stampi sono stati collocati in ambiente a 20°C e umidità relativa non inferiore al 90%. Dopo 24h i provini sono stati sformati, numerati e posti a maturare in acqua.

## **A.2. Vibratore portatile ad ago - motore elettrico**

Il vibratore portatile ad ago con motore elettrico è stato utilizzato per la compattazione del calcestruzzo negli stampi.

Caratteristiche del vibratore: ago vibrante  $\phi 22$  lungo 240 mm con trasmissione flessibile da m 2 - 12.000 vibrazioni/minuto; motore elettrico da Hp 0.5; funzionamento: 220 V - 50 Hz - monofase - 400 Watts; peso 7.5 Kg; dimensioni 300x200x400 mm.

## Appendice B

### SENSORI IN FIBRA OTTICA

Barbara Bonfiglioli\*

#### B.1. Generalità

I sensori in fibra ottica, meglio conosciuti come FOS (acronimo per Fiber Optic Sensor) rientrano fra numerose tecniche innovative che si sono sviluppate negli ultimi anni per realizzare un buon monitoraggio strutturale. Secondo i principi tradizionali, un buon progettista, nel momento in cui si trova a lavorare ad un qualsiasi progetto, deve considerare sempre e, comunque, l'eventualità peggiore. Il progetto nascerà con ampi margini di sicurezza, quali, ad esempio, rinforzi, sottounità ridondanti, sistemi di sicurezza, et.

Naturalmente questi metodi richiedono un impiego di risorse naturali maggiore dello stretto necessario, un maggior consumo di energia per produrre e conservare la struttura. Comportano anche un maggior impegno per prevedere quali siano le circostanze a cui la struttura dovrà far fronte. Negli ultimi tempi si è osservato un notevole risparmio, anche in termini economici, se si era in grado di prevenire tutti quegli eventi che potevano trasformarsi in disastri, qualora non fossero stati localizzati tempestivamente. In questo giocano un ruolo rilevante le fibre ottiche. Le fibre ottiche inserite in un materiale intelligente possono fornire dati in due modi differenti: possono semplicemente inviare un segnale luminoso stabile e, quindi, un'interruzione del segnale indica che la fibra è stata intaccata da un difetto strutturale, oppure, il secondo metodo, più fine, comporta l'osservazione delle caratteristiche fondamentali della luce, quali l'intensità, la fase, la polarizzazione al fine di ottenere una più ampia informazione sullo stato del sistema.

Dopo le prime applicazioni in laboratorio, sono ormai numerose le applicazioni su progetti reali sia nell'ambito dell'ingegneria civile sia in altri settori (aeronautico, meccanico, et.).

Nell'ambito dell'ingegneria civile strutturale, si è focalizzata l'attenzione su una particolare famiglia di sensori in fibra ottica: **i sensori in fibra ottica per la misura delle deformazioni**. Le caratteristiche particolarmente favorevoli di questi sensori sono:

- piccole dimensioni del diametro dell'ordine di grandezza di alcune centinaia di micron
- risoluzione = 0.01%
- immunità ai campi elettromagnetici e radiofrequenziali (EMI\RFI)
- ampio range di temperatura operativo
- bassissima attenuazione del segnale
- buona resistenza in ambienti 'difficili' (ambienti alcalini, presenza di acqua ed umidità, et.),
- stabilità,
- passività elettrica,
- realizzazione di una rete di sensori.

Una delle prime applicazioni in Italia riguarda la diga di Corfino. E' stato realizzato un sistema strumentale basato su estensimetri in fibra ottica di tipo coerente, adatto per il monitoraggio dello stato vibrazionale di grandi strutture civili [B1]. I risultati avuti erano conformi con quelli ottenuti con gli usuali estensimetri. A vantaggio degli estensimetri in fibra ottica rimaneva la posa in opera

---

\* Ingegnere Nucleare – Dottorato di Ricerca in “Materiali Compositi per le Costruzioni Civili” – Sede amministrativa: Università degli Studi di Lecce; Sedi consorziate: Università degli Studi di Bologna, Istituto Universitario di Architettura di Venezia – XIV Ciclo.

di gran lunga più semplice e veloce e l'immunità a disturbi di tipo elettromagnetico. Sempre grazie a sensori in fibra ottica si sono studiati gli effetti su una struttura in cemento armato soggetta ad una dilatazione termica [B2].

Questi sensori cominciano a diffondersi anche in relazione alla buona compatibilità con i materiali normalmente utilizzati nel settore civile (acciaio, calcestruzzo e materiali compositi) ma anche per la loro durabilità che permette una forte riduzione dei costi per la manutenzione.

Le applicazioni già realizzate stanno diventando sempre più numerose e sono caratterizzate da una fase progettuale sempre più accurata, visto l'elevato numero di sensori utilizzati, e da un investimento di capitali sempre più impegnativo. Inoltre il loro impiego permette di valutare lo stato deformativo per un periodo molto lungo, realizzando già in fase di progetto un piano di monitoraggio per la struttura o l'opera in cui vengono inseriti diversi strumenti di misura ed ovviamente anche i FOS.

In Nord America, nel progetto di una qualsiasi struttura si trova anche un suo progetto di monitoraggio. Questa tendenza trova il suo fondamento nel fatto che risulta più conveniente, soprattutto in termini economici, intervenire sulla struttura prima che questa venga seriamente danneggiata. A titolo di esempio, si ricordano alcune applicazioni canadesi del Norwood Bridge (figura B.1.1.) e del Taylor Bridge a Winnipeg [B3], in Manitoba, il Confederation Bridge (figura B.1.2.) [B4] nel New Brunswick o quella dello Stork Bridge, in Svizzera[B5].



**Figura B.1.1.** Norwood Bridge.

Nella specifica applicazione presentata in questa Nota Tecnica, il fattore che particolarmente ha portato al loro impiego è stato quello relativo alle loro dimensioni.

Con i tradizionali sistemi di misura, non si riesce, senza falsare l'acquisizione, a valutare un parametro, quale la deformazione, all'interno della struttura. Infatti, in generale, un loro inserimento crea delle distorsioni legate alle loro dimensioni: i tradizionali sensori sono fortemente invasivi. La presenza del sensore all'interno della struttura modifica il dato valutato. Ovviamente questo

fenomeno di disturbo è senza dubbio influenzato da un fattore di scala: è differente pensare di inserire un sensore all'interno di una soletta di un ponte rispetto all'inserimento in un provino da laboratorio.



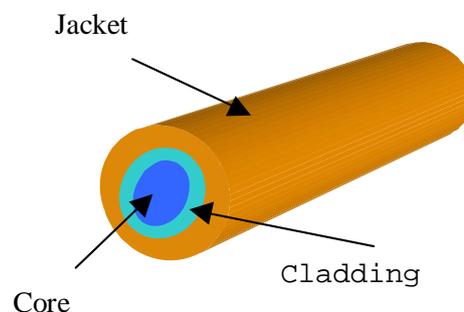
**Figura B.1.2.** Confederation Bridge.

Riuscire ad avere un dato riguardo allo stato deformativo all'interno di una struttura senza che il sensore risulti invasivo per la struttura stessa è un risultato che si rincorre e da questo punto di vista i sensori di fibra ottica soddisfano questi requisiti.

## **B.2. FOS : Fisica e principio di funzionamento**

Le peculiarità di questi sensori, che li distingue dai tradizionali utilizzabili, consiste:

- nel principio fisico che utilizzano per memorizzare il parametro che stanno valutando,
- nel mezzo che utilizzano per trasmettere il segnale.



**Figura B.2.1.** Schema fibra ottica.

Il mezzo che è utilizzato per trasmettere è una fibra ottica che, da un punto di vista strutturale consiste in più strati cilindrici di vetro o silice. Come si può vedere in figura B.2.1., il cilindro

interno, chiamato nucleo o core, è caratterizzato da un diametro piuttosto piccolo ed è costituito, nel caso specifico, da silice drogata. Attorno al nucleo, è avvolto un mantello cilindrico, chiamato guaina o cladding, che è costituito sempre da silice drogata ma con un indice di rifrazione minore. Infine possiamo trovare uno o più strati esterni chiamati jacket.

Il compito di trasmettere il segnale luminoso è affidato al core e al cladding; mentre, il compito del jacket è di resistere alle tensioni meccaniche.

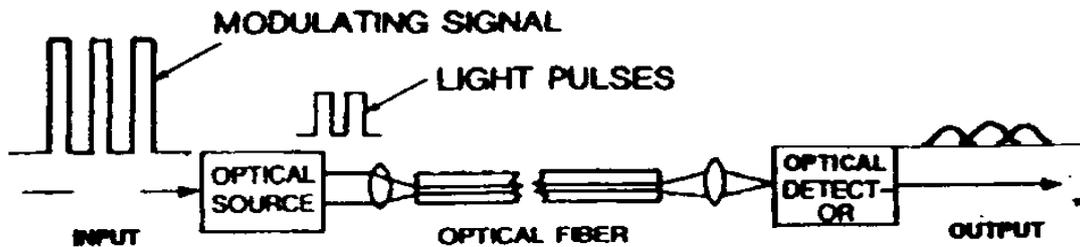


Figura B.2.2. Schema base di funzionamento.

Facendo riferimento alla figura B.2.2., si può avere un'idea, seppur semplificata, di come funziona il sistema di misurazione delle deformazioni basato su un principio ottico. Esso consiste in una sorgente ottica che emette degli impulsi modulati. Il segnale in ingresso rappresenta l'informazione che si vuole trasmettere, la quale viene impressa nel raggio di luce, e, tramite una lente, viene convogliata su un capo della fibra ottica, la attraversa, esce dall'altro capo ove, grazie ad una seconda lente, il segnale viene focalizzato su un fotorilevatore che va ad elaborare un'uscita.

Dalla descrizione di detto schema si avverte l'importanza di avere a disposizione una 'buona' fibra ottica.

La bontà di una fibra ottica è valutata in base a quattro requisiti:

- ❖ la quantità di luce disponibile trasferita,
- ❖ la perdita di parte del segnale luminoso,
- ❖ la capacità di trasmissione del segnale luminoso,
- ❖ le tensioni che si sviluppano nella fibra.

La trasmissione del segnale luminoso all'interno delle fibre ottiche si basa sul fenomeno della riflessione totale.

Un raggio luminoso che incide la superficie che separa due mezzi trasparenti caratterizzati da due diversi indici di rifrazione è, in parte, riflesso, ed, in parte, è rifratto, come si osserva in figura B.2.3. Le loro rispettive intensità dipendono dall'indice di rifrazione dei due mezzi.

L'indice di rifrazione è definito come il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la velocità della luce nel mezzo[B6].

Le relazioni tra gli angoli di incidenza e di trasmissione sono date da

$$\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

ove  $n_1$  e  $n_2$  sono i due indici di rifrazione e  $v_1$  e  $v_2$  rappresentano la velocità della luce nei due mezzi. Si faccia riferimento alla figura B.2.4. Se il mezzo da cui proviene il raggio ha un indice di rifrazione maggiore di quello del secondo mezzo, allora esiste un angolo particolare, detto angolo critico ( $\theta_c$ ), tale che per angoli maggiori dell'angolo critico, all'interfaccia, non si ha il fenomeno della rifrazione ma solo quello della riflessione.

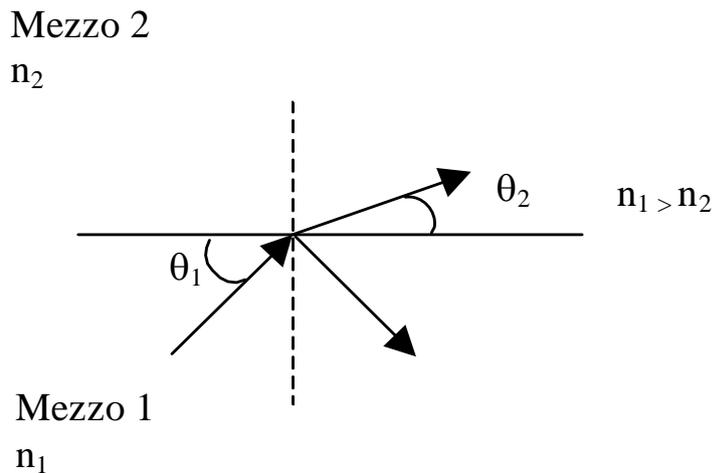


Figura B.2.3. Raggio luminoso all'interfaccia.

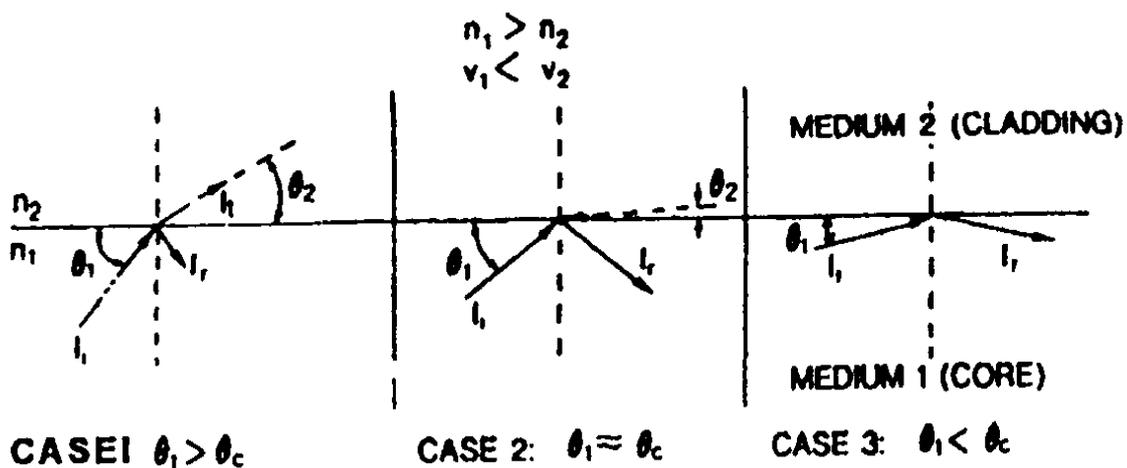


Figura B.2.4. Riflessioni al variare dell'angolo di incidenza.

Questo si spiega supponendo di essere nel caso  $n_1 > n_2$  e supponendo che l'angolo di incidenza decresce progressivamente. Per la conservazione dell'energia, la somma delle energie cinetiche dei due raggi (riflesso e rifratto) dovrà essere uguale all'energia cinetica del raggio incidente. Più il raggio incidente si piega verso la superficie di separazione e più il raggio rifratto che entra nel mezzo 2 si piega anche esso verso la superficie di separazione fino a raggiungere lo zero. Contemporaneamente, l'intensità del raggio di luce che entra nel mezzo 2 decresce e si avvicina allo zero al diminuire dell'angolo rifratto. Il valore dell'angolo incidente che corrisponde al valore limite dell'angolo rifratto prende il nome di angolo critico.

Il valore dell'angolo critico è un valore limite ed è dato dalla seguente espressione:

$$\theta_c = \cos^{-1} \frac{n_2}{n_1}.$$

Un raggio luminoso, che attraversa il core con un angolo di incidenza pari all'angolo critico, è completamente riflesso ogni volta che incide la superficie di separazione core-cladding e quindi rimane praticamente intrappolato (trapped) nel nucleo. Per contro, i raggi che incidono la superficie di separazione con un angolo maggiore dell'angolo critico saranno parzialmente trasmessi al cladding, ogni volta che incidono la superficie di separazione. Come conseguenza si avrà che la loro intensità diminuirà rapidamente e quindi non contribuiranno alla propagazione a lunga distanza[B7]. Questo secondo caso è da evitare visto che l'informazione, che si trasmette e che è correlata al parametro che si sta valutando, è memorizzata nei parametri del raggio luminoso (lunghezza d'onda, fase, intensità, et.). Da qui nasce l'esigenza di mantenere costantemente più basso l'indice di rifrazione del cladding rispetto a quello del nucleo. La manipolazione dell'indice di rifrazione si effettua mediante la tecnica del drogaggio che consiste nella manipolazione del reticolo cristallino dell'elemento di partenza (la silice) in modo da potenziare alcune delle sue caratteristiche. Il nucleo ha un indice di rifrazione  $n_1$  costante oppure variabile con continuità tra il suo valore massimo e quello del rivestimento  $n_2$ . Nel primo caso, si parla di fibre a salto d'indice, o fibre step index, nel secondo di fibre a indice graduale, o graded index (figura B.2.5.).

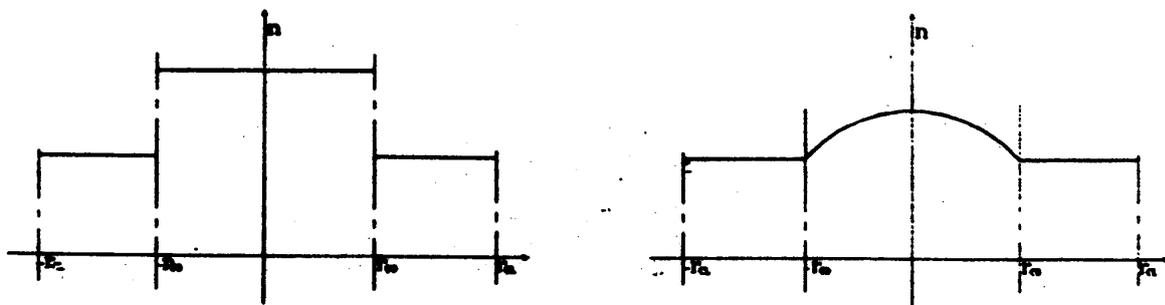


Figura B.2.5. Profili degli indici di rifrazione più comuni.

Lo studio della propagazione della luce in una fibra ottica ha come punto di partenza le equazioni di Maxwell in quanto queste descrivono correttamente l'interdipendenza spazio-tempo del campo elettrico e del campo magnetico in un mezzo lineare, omogeneo, isotropo e senza sorgenti. Le fibre ottiche sono guide d'onda dielettriche e cilindriche.

Una volta che si introducono le condizioni al contorno che in genere sono di natura geometrica e sono legate alla superficie di separazione del nucleo-guaina, si possono calcolare solo particolari soluzioni, quelle discrete.

Possono esistere solo questi valori, ciascuno designato da un'ampiezza  $E_1(r, \phi)$  e corrispondente a un valore discreto della costante di propagazione  $\beta_1$  e la velocità di propagazione di ogni onda

lungo l'asse della guida d'onda è data da  $\frac{\omega}{\beta_1}$ . Quindi, il risultato analitico che ne deriva non è altro

che un insieme discreto di soluzioni che, fisicamente, rappresentano onde discrete con ampiezze discrete che si propagano lungo l'asse della guida, ognuna con una velocità discreta. Ed, in particolare, per caratterizzare la propagazione della luce in una fibra ottica a step-index è conveniente riferirsi al parametro  $V$  che si definisce qui a seguire.

$$V = \frac{2\pi \cdot a(n_1^2 - n_2^2)}{\lambda_0} = \frac{2\pi \cdot a \cdot N.A.}{\lambda_0}, \text{ ove } a \text{ è il raggio del nucleo; N.A. è l'apertura numerica della}$$

fibra ed è funzione degli indici di rifrazione del nucleo e della guaina;  $\lambda_0$  è la lunghezza del fascio incidente nel vuoto ed, in genere,  $\lambda_0 = \lambda_{aria}$ . Dalla definizione, risulta evidente che il parametro  $V$  varia in maniera direttamente proporzionale al raggio del nucleo e a N.A. ed in maniera

inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della luce nel vuoto. Se il parametro  $V$  cresce, allora aumenta il numero di modi possibili, in particolare si arriva alla seguente classificazione. Per  $V$  inferiore a determinati valori si ha un solo modo od onda, per cui la fibra viene definita monomodale; se  $V$  supera determinati valori si ammettono più modi e quindi la fibra è detta multimodale.

Fra le proprietà delle fibre risultano particolarmente importanti:

1. l'attenuazione
2. la dispersione della velocità

Questo perché una loro cattiva gestione sia in fase realizzativa sia in fase applicativa potrebbe comportare una perdita di segnale e quindi di deformazione.

Si consideri l'impulso di luce della figura B.2.6. Esso viene iniettato da sinistra nel nucleo e ha intensità massima pari a  $I_0$ .

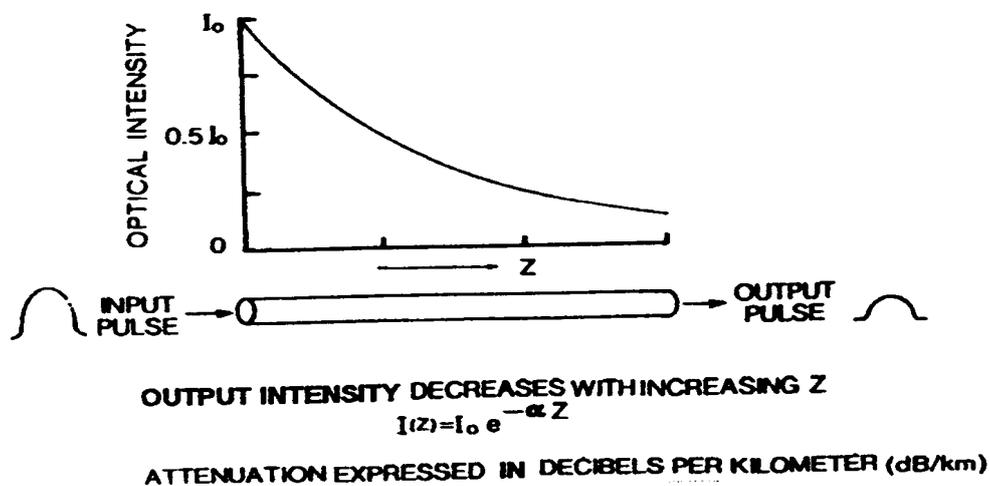


Figura B.2.6. Attenuazione di un'onda luminosa.

Esso si propaga lungo la fibra con un'intensità  $I$  che decresce esponenzialmente, così che l'intensità in un generico punto sull'asse, posto ad una distanza  $z$  è data da  $I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$ , ove  $\alpha$  è il coefficiente di attenuazione dell'intensità. Nelle fibre ottiche per definire questo tipo di perdita, si fornisce il rapporto di attenuazione che, di solito, viene espresso in dB/km. Per definizione, il rapporto di attenuazione è definito da:  $-10 \log_{10} \left( \frac{I_1}{I_0} \right)$ . Ad esempio, con un rapporto di attenuazione

di 10 dB/km, l'intensità dopo avere percorso un chilometro deve essere un centesimo di quella iniziale. In figura B.2.7. è riportata la riduzione del fenomeno dell'attenuazione negli anni.

Questo dato è rilevante: prima degli anni sessanta l'uso delle fibre ottiche quale mezzo per trasferire informazioni risultava quantomeno assurdo visto che i rapporti di attenuazione appartenevano ad intervalli compresi tra i 100 e i 1000 dB/km, la qualcosa significa che l'intensità, dopo avere percorso dai 10 ai 100 m, si riduce di un fattore 100 rispetto al valore iniziale.

Un vero salto in avanti fu fatto attorno agli anni settanta grazie all'introduzione di una nuova tecnica di fabbricazione delle fibre che ha portato il rapporto di attenuazione nell'intervallo tra gli 0,2 e i 10 dB/km. I motivi che danno luogo al fenomeno dell'attenuazione si dividono essenzialmente in tre categorie. La prima si distingue sotto il nome di assorbimento da parte del materiale ed è causato da eventuali impurità presenti nel reticolo che assorbono l'energia della luce riemettendola, poi, sotto forma di calore. Il secondo motivo che causa l'attenuazione è legato alle perdite per piegamento. A sua volta questa categoria si suddivide in due 'sottocategorie', in quanto

questo piegamento può riguardare l'intera fibra lungo il raggio nominale oppure ci si riferisce ad esso nei termini di micropiegamento che è dovuto a delle forze esterne, a delle imperfezioni della guaina, a piccole increspature, et. Comunque, in entrambi i casi, la luce passerà dal nucleo alla guaina con conseguente diminuzione dell'intensità della luce trasmessa lungo il nucleo. L'ultima, ma non per questo, meno importante è legata al fenomeno dello scattering.

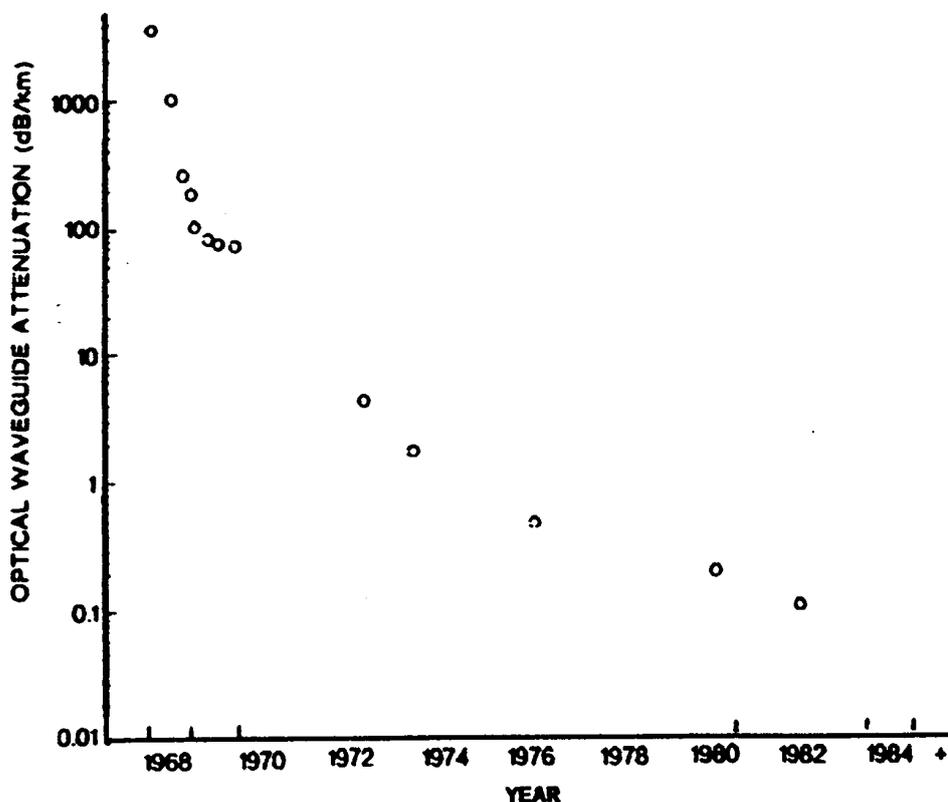


Figura B.2.7. Andamento dell'attenuazione nel corso degli anni.

Anche in questo si evidenziano tre 'sottogruppi', a seconda delle caratteristiche di scattering. Si parla dello scattering di Rayleigh che è indotto da fluttuazioni microscopiche della densità che si originano all'interno della struttura molecolare a caso, durante la fabbricazione della fibra medesima. Si evidenzia anche lo scattering di Brioullin nel quale in aggiunta alle fluttuazioni statiche della densità sono presenti delle fluttuazioni dinamiche della densità, indotte da onde sonore termiche. E, per ultimo, si presenta lo scattering di Raman in cui la luce è scatterata, prima, a causa dell'assorbimento e poi a causa della riemissione dai livelli atomici dell'energia vibrazionale e rotazionale[B7].

La figura B.2.8. illustra il fenomeno della propagazione dell'onda luminosa nel caso di piegamento della fibra. Il raggio luminoso attraversa la fibra verso destra con un angolo  $\vartheta < \vartheta_c$ , quando giunge nella regione piegata il raggio interseca la superficie di separazione nucleo-guaina con un angolo  $\vartheta > \vartheta_c$  e, quindi, parte del raggio può essere trasmesso nella guaina. Ovviamente questo accade per ogni riflessione e di conseguenza le perdite sono grandi.

Nella figura B.2.9., si può notare l'effetto indotto da una microcurvatura sulla propagazione dell'onda. Il raggio, inizialmente, si propaga nel nucleo con un angolo  $\vartheta < \vartheta_c$  venendo completamente riflesso e solo quando raggiunge una sezione di fibra deformata da una piccola imperfezione l'angolo di incidenza  $\theta > \vartheta_c$  con la conseguenza che parte della energia del raggio

luminoso é trasmessa alla guaina[B7]. E' bene precisare che anche se queste perdite singolarmente prese sono di piccola entità, portano comunque a perdite cumulative anche di una certa rilevanza.

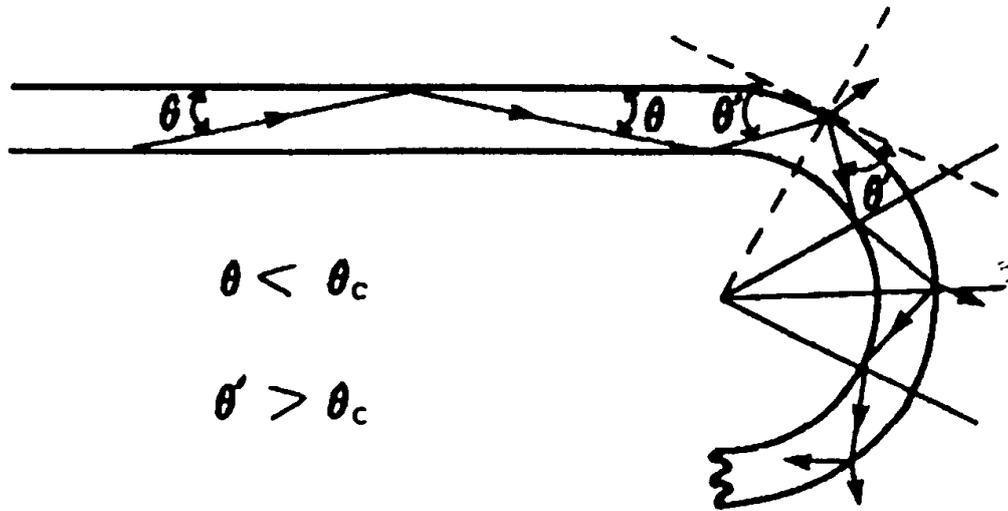


Figura B.2.8. Propagazione dell'onda luminosa nel caso di un piegamento.

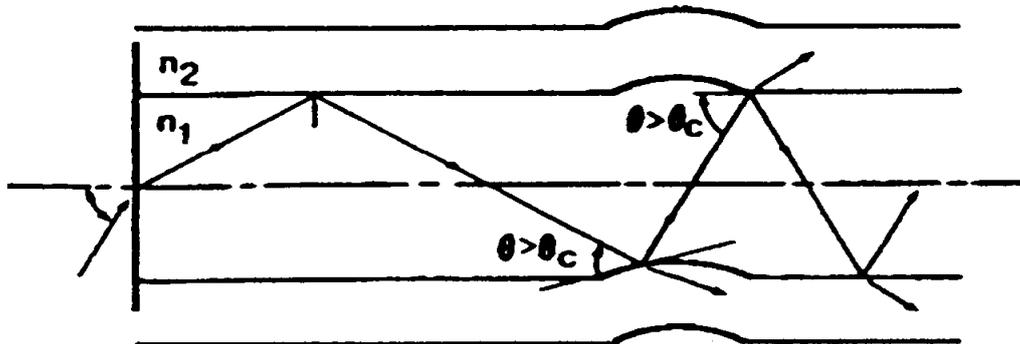


Figura B.2.9. Effetto dovuto alla microcurvatura.

Il secondo concetto prima menzionato è la dispersione della velocità di propagazione dell'onda. In realtà sono diverse le cause che danno vita a questo fenomeno e non tutte imputabili alla velocità. E' un fenomeno in genere collegato allo spessore della banda nel collegamento dei dati o nelle altre applicazioni legate alla comunicazione. Si é sempre posto l'accento sull'importanza che, in fase di progettazione, riveste l'obiettivo di mantenere l'informazione impressa nel raggio di luce durante la propagazione della luce nella fibra, senza che subisca il fenomeno di radiodiffusione. Uno dei fenomeni che é alla base del principio di radiodiffusione: la 'dispersione modale'. Essa nasce per il fatto che l'impulso iniettato nella fibra divide la sua energia fra più modi, ciascun modo attraversa la fibra ad una particolare velocità e, quindi, arriva al termine della fibra in tempi diversi che dipendono appunto dalla velocità e dalla lunghezza del percorso[B7].

Esistono moltissime tecnologie che sono in grado di modulare il segnale e poi di demodularlo. Per questa applicazione erano stati presi in considerazione in particolare due tipi di FOS:

- Bragg grating sensor (BGS)

➤ Fabry-Pérot Sensor (FPS)

I sensori che si basano sul principio del reticolo di Bragg (Bragg Grating) sono moltissimi. Come tecnica di realizzazione si risale ad almeno due decenni fa. Il reticolo di Bragg è realizzato modulando in maniera permanente e periodica l'indice di rifrazione del nucleo della fibra (figura B.2.10.). Questa 'scrittura' (negli articoli viene usato non a caso il verbo to write) è realizzata mediante l'ausilio di due laser disposti fra loro secondo un certo angolo oppure mediante un solo laser ed un'opportuna maschera. In accordo con la legge di Bragg, il reticolo potrà riflettere solo una specifica lunghezza d'onda chiamata lunghezza d'onda di Bragg che è data da

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

ove con  $n$  si indica l'indice di rifrazione e con  $\Lambda$  si indica il periodo della modulazione dell'indice di rifrazione.

La lunghezza d'onda di Bragg si assesta in un range attorno ai 1300 nm.

Dalla formula si deduce che un qualsiasi cambiamento nell'indice di rifrazione  $n$  o nel periodo di modulazione  $\Lambda$  implica una variazione nella lunghezza d'onda di Bragg: il reticolo di Bragg è, quindi, un sensore intrinseco che codifica l'informazione nella lunghezza d'onda.

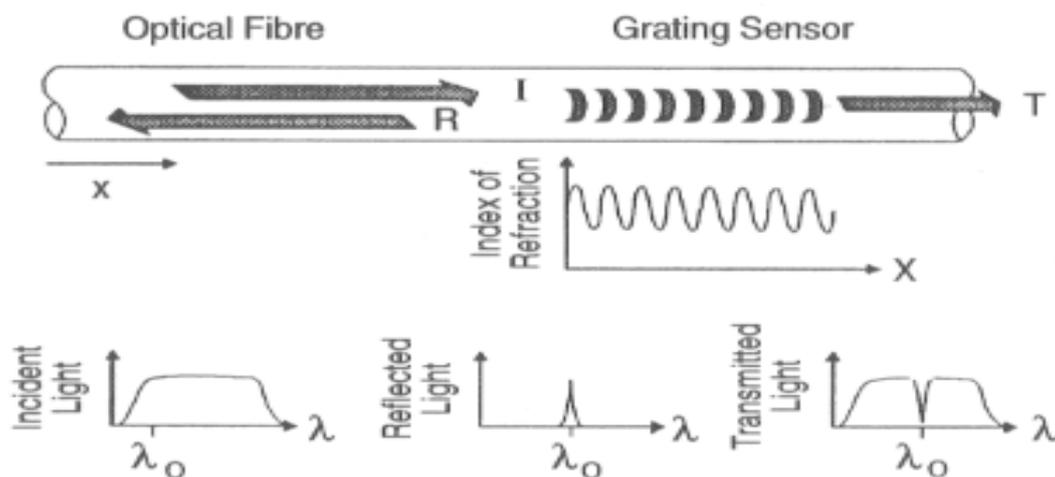


Figura B.2.10. Schema di un BGS.

Volendo dare una formulazione matematica di quanto sopra esposto si scrive

$$\lambda_{B-shift} = \lambda_B \left( \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} \right)$$

ove il termine al primo membro indica la variazione che subisce la lunghezza d'onda di Bragg; mentre i termini al secondo evidenziano che tale variazione è dovuta o alla variazione dell'indice di rifrazione o del periodo di modulazione.

La lettura del parametro che si sta valutando è, quindi, ottenuta da un semplice confronto tra il valore cambiato della lunghezza d'onda di Bragg e la lunghezza d'onda di Bragg originaria.

$$\Delta(\text{parametro}) = \frac{\lambda_{B-shift}}{\lambda_B}$$

In campo civile-strutturale, il parametro più significativo da acquisire è la deformazione. I sensori basati su questo tipo di tecnologia si trovano spesso indicati con la sigla BGS (Bragg Grating Sensor). Questi sensori sono poi resi solidali con la struttura in modo da poterne acquisire la deformazione, deformandosi con essa.

La lunghezza d'onda di Bragg di questi reticoli subirà delle variazioni in seguito a carichi sia di natura meccanica sia di natura termica. L'effetto combinato di questi due carichi si evidenzia sul sensore come segue:

$$\frac{\lambda_{B-shift}}{\lambda_B} = \left( \alpha_F + \frac{i}{n} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T + (1 - \rho) (\Delta \varepsilon_{TS} + \Delta \varepsilon_{SS})$$

ove  $\alpha_F$  indica il coefficiente di dilatazione termico della fibra,  $n$  indica l'indice di rifrazione della fibra,  $\rho$  indica il coefficiente fotoelastico e  $\varepsilon$  la deformazione.

Dalla formula precedente si nota che sono quattro i fattori che influenzano il cambiamento del valore della lunghezza d'onda di Bragg.

Nella prima parentesi si evidenzia l'influenza del carico termico. Questo induce delle dilatazioni o contrazioni sulla fibra in quanto la fibra ottica ha un suo coefficiente di dilatazione termico. Ed inoltre lo stesso indice di rifrazione è dipendente dalle variazioni di temperatura (effetti termo ottici).

Nel secondo addendo si evidenzia un coefficiente fotoelastico  $\rho$  che per le fibra normalmente usate assume un valore pari a 0.22.

Inoltre si è evidenziata la dipendenza dalle deformazioni longitudinali  $\varepsilon$  che sono stati suddivise nei due contributi: quello derivante da carichi termici TS e quello derivante da carichi meccanici SS [B8].

Le variazioni di temperatura influenzano notevolmente le variazioni della lunghezza d'onda di Bragg, da cui si evince che è estremamente importante riuscire a depurare il valore della deformazione totale dal valore della deformazione dovuta al solo carico termico, come si può trovare ampiamente descritto in letteratura[B9].

I sensori di Fabry-Pérot si basano sulla cavità di Fabry-Pérot (FPC). Questa scelta è collegata ad alcuni vantaggi:

1. semplicità,
2. piccole dimensioni,
3. basso costo,
4. facilità di fabbricazione ed assemblaggio.

Lo schema interferometrico che si basa sulla cavità di Fabry-Pérot è decisamente attraente vista l'elevata versatilità, l'alta precisione, l'ampio intervallo dinamico [B10].

Facendo riferimento alla figura B.2.11., si osserva che la fibra ottica è inserita in un microcapillare a cui è resa solidale mediante quattro punti di saldatura. Questa saldatura a punti migliora la resistenza del sensore durante la manipolazione e l'installazione. Le parti terminali delle fibre sono trattate in modo tale da essere due specchi semiriflettenti. La distanza che separa i due punti di saldatura diviene la base di misura del sensore; mentre la distanza tra le due superfici semiriflettenti prende il nome di cavità di Fabry-Pérot.

La lunghezza della cavità di Fabry-Pérot si trova misurando lo spettro  $\chi(\lambda)$  della luce: infatti la luce riflessa nel FPI ha una lunghezza d'onda modulata in accordo con la lunghezza della cavità. Quindi un buon uso del FPI consiste nel trovare misurazioni della lunghezza della cavità di Fabry-Pérot precise ed attendibili.

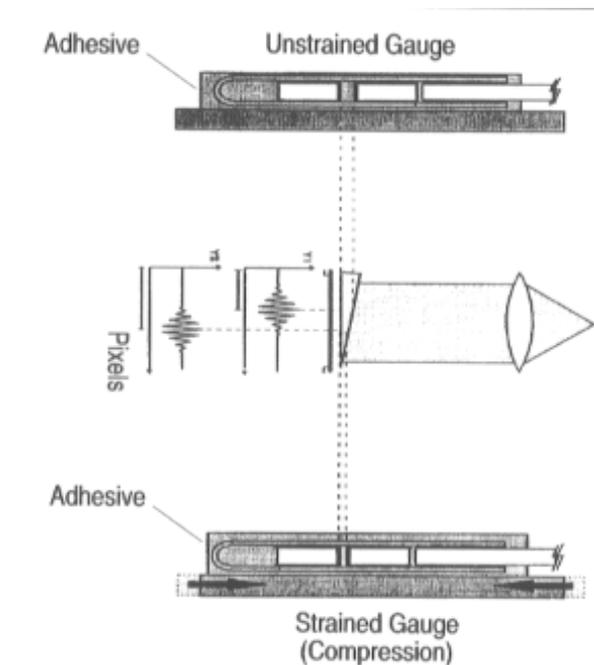
Questo si realizza tramite l'impiego di una cross-correlazione tra lo spettro misurato  $\chi(\lambda)$  e la funzione di trasmittanza semplificata  $T(\lambda, d)$  del sensore FP. La funzione di trasmittanza è riportata qui di seguito ove si è indicato con  $d$  la lunghezza della cavità, con  $F$  la risoluzione della cavità, con  $\lambda$  la lunghezza d'onda del raggio luminoso.

$$T(\lambda, d) = \frac{1}{1 + F \sin^2 \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \right)}$$

Il coefficiente di cross-correlazione può essere determinato, una volta che è assegnato il valore di  $d$ , tramite la relazione seguente.

$$C(d) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \chi(\lambda_0 + n\Delta\lambda) \frac{1}{1 + F \sin^2 \left( \frac{2\pi d}{\lambda_0 + n\Delta\lambda} \right)}$$

Vista la difficoltà dei calcoli per determinare di volta in volta il valore della funzione di cross correlazione, si è studiato e realizzato un cross-correlatore ottico (un interferometro di Fizeau).



**Figura B.2.11.** Schema di un FPS.

Quindi lo schema completo accoppia l'interferometro di Fizeau alla cavità di Fabry-Pérot. In questo modo il segnale luminoso è modulato in base alla deformazione che subisce il corpo nella cavità FP, è quindi riflesso ed inviato all'interferometro di Fizeau che lo demodula.

La demodulazione avviene come segue quando la lunghezza della cavità di Fabry-Pérot uguaglia la distanza tra gli specchi inclinati dell'interferometro di Fizeau, allora, è segnalato un picco.

Visto che lo spazio nella cavità di Fabry-Pérot varia in base alle sollecitazioni esterne, allora il picco si sposta mantenendo la corrispondenza e realizzando le diverse letture.

La deformazione è valutata come  $\varepsilon = \frac{\Delta L_{cavità}}{L_{gauge}}$  ove  $L_{cavità}$  è la variazione della lunghezza della cavità

di Fabry-Pérot e  $L_{gauge}$  è la base di misura[B11].

Nella sperimentazione in oggetto a questa nota tecnica l'obiettivo era la determinazione di una misura locale di deformazione. In questa ottica, la scelta di uno dei sensori qui sopra descritti non è

da farsi in base a particolari qualità che superano l'uno rispetto all'altro. La scelta di operare con i sensori di Fabry-Pérot è stata dettata solo dal fatto che il Laboratorio Resistenza Materiali dell'Università di Bologna ha, in dotazione, l'apparecchio che consente l'utilizzo dei FPS.

### **B.3. Particolari problematiche tecnologiche**

Per l'applicazione in oggetto alla nota tecnica si sono stati utilizzati due FPS e sono stati inseriti all'interno di due cilindri dello stesso diametro ma di altezza differente.

Il primo problema concerneva un corretto posizionamento del sensore. Si voleva leggere la deformazione lungo una direzione ortogonale all'asse del cilindro, sull'asse del cilindro ed a metà altezza. Per poterlo inserire, è stato preventivamente fatto un foro di piccole dimensioni, lateralmente, sulla cassaforma cilindrica usata per il getto.

Il secondo problema poteva derivare dagli inerti presenti nel calcestruzzo ma, per tutta la durata della fase del getto ed, in particolare durante la fase di vibrazione, il FOS è stato controllato. Si sono fatte diverse letture durante le varie fasi osservando che i valori cambiavano di pochi microstrain oppure di diverse decine di microstrain durante la fase di vibrazione, tornando poi a valori regolari quando lo strumento si allontanava. Questo controllo ha dato esito positivo.

Durante la fase di stagionatura, il sensore è stato controllato facendo alcune letture per verificare che l'ambiente fortemente alcalino che si sviluppa durante la maturazione non intaccasse il coating del sensore danneggiandolo. Anche questo secondo controllo ha dato esito positivo. Durante la fase di maturazione in acqua, si sono verificate le uniche variazioni di deformazione a causa di variazioni termiche che venivano risentite dal provino cilindrico.

Dal punto di vista tecnologico il problema maggiore derivava da una forte discontinuità presente a una decina di centimetri dalla testa della fibra ottica.

Questi sensori sono venduti con la parte terminale dove è presente il sensore vero e proprio con solo i tre strati sù menzionati (core-cladding-jacket) mentre la maggior parte della lunghezza della fibra ottica, quella che ha il compito di trasferire il segnale alla centralina, è ricoperta con molteplici strati che devono ulteriormente salvaguardare la parte interna da eventuali attacchi di natura meccanica. Questo comporta che ci sia una forte discontinuità nel diametro in una determinata posizione ove quindi è estremamente facile si crei una rottura anche in presenza di carichi veramente bassi. Si è ovviato a tale problema inserendo il sensore in un sottile tubicino di acciaio del diametro di poco superiore a quello della fibra ottica priva di alcun ulteriore rivestimento esterno ( poche centinaia di micron). Questo ha inoltre permesso

1. di proteggere la fibra dagli urti con gli inerti del calcestruzzo;
2. di garantire un buon allineamento del sensore;
3. di garantire che l'unica parte della fibra ottica solidale con la struttura fosse quella sensibile.
4. per proteggere in uscita dalla cassaforma il sensore, visto il forte grado di discontinuità delle sezioni con conseguente rischio di rottura della fibra ottica;
5. per garantire l'allineamento nella direzione lungo la quale si voleva rilevare la deformazione.

Le prove di laboratorio fino ad ora condotte hanno dato buoni risultati. In particolare, si sono apprezzati molto i risultati ottenuti in questa campagna sperimentale perché forniscono una buona base d'appoggio per studiare altre problematiche ma soprattutto migliorare l'aspetto tecnologico dell'inserimento e dell'allineamento. Queste prove sperimentali hanno confermato la scarsa influenza dei sensori sul corpo preso in esame.

### **Ringraziamenti**

Il mio vivo ringraziamento al Prof. Giovanni Pascale, docente di Scienza delle Costruzioni presso l'Università degli Studi di Bologna, per il suo continuo supporto e la sua viva partecipazione ed ai tecnici del laboratorio LaRM della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna per la loro pazienza e la loro perizia nel seguire queste prime ricerche.

## Bibliografia

- [B1]: Gusmeroli, Mariottini, Martinelli, Barberis, Galimberti, Gamberoni – XXIV Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'analisi delle Sollecitazioni – Parma, 27-30 settembre 1995
- [B2]:Gusmeroli, Martinelli, Barberis, Escobar, Morabito – Articolo presentato alla II conferenza Europea – Glasgow,1994 – Sessione 6
- [B3]:
- [B4]:
- [B5]:
- [B6]: Nathaniel H. Frank, Sc.D. – ‘Elettromagnetismo e Ottica’ – Editrice Ambrosiana (Mi)
- [B7]: R.E.Einzig – ‘Fiberoptic Sensor Technology Handbook’ – Publisher and Distributor: OPTEC (Optical Technologies – A Division of Dynamic System Inc. )
- [B8]: Spammer S.J.,Fuhr,P.L.; ‘Concrete embedded optical fibre Bragg grating strain sensor’, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE. Part 1 of 2 – Jul 7-10, 1998 – Pretoria
- [B9]: Morey W.W., ‘Fiber Optic Grating Technology’, Proceedings of SPIE, 1995, Vol. 2574, pag. 22
- [B10]: C. Belleville e G.Duplain – ‘White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor’ – Opt. Lett. – Vol. 18 n°1, pg 78-79, 1-1-1993
- [B11]: Tesi di laurea di Barbara Bonfiglioli – ‘L’impiego di fibre ottiche nel monitoraggio di rinforzi in FRP per elementi strutturali’ – Relatore: Prof. Giovanni Pascale – DISTART – Università di Bologna.

- ❖ ISIS Canada - Rapporto annuale 1996
- ❖ ISIS Canada - Rapporto annuale 1997
- ❖ ISIS Innovator - Newsletter of ISIS Canada - Gennaio 1998
- ❖ ISIS Innovator - Newsletter of ISIS Canada – Gennaio 1999

## APPENDICE C

### MISURE DI RESISTIVITÀ SU SOLIDI DI CALCESTRUZZO IN COMPRESSIONE SEMPLICE

Giovanni Santarato\*

La resistività elettrica di un corpo è la resistenza che un'unità di volume del materiale di cui è costituito oppone al passaggio di una corrente elettrica.

I corpi sono più o meno conduttori in funzione della presenza di particelle cariche (elettroni, protoni, ioni) in grado di muoversi nel corpo, con maggiore o minore libertà. Nelle rocce, come in tutti i materiali composti da minerali carbonatici o silicatici, la conduzione elettrica è in genere difficoltosa, per la penuria di particelle cariche libere e pertanto vengono considerate isolanti. Ciò non toglie che, sia pure a valori elevati, non si possa parlare di resistività delle rocce e tentare di discriminarle in base a quella. In generale, la conduzione elettrica migliora di molto se la roccia è porosa e nei pori circola acqua. In questo caso infatti la carica elettrica viene trasportata con facilità dagli ioni che sempre sono presenti, in maggiore o minore quantità nell'acqua stessa.

La misura della resistività elettrica di un corpo avviene utilizzando un sistema di 4 elettrodi. Ad una coppia viene applicata una sorgente di differenza di potenziale  $-ddp$  (es. una pila) che fa circolare una corrente  $I$  nel corpo. Per effetto di questa sorgente, nel corpo si stabilisce un campo elettrico. Ad un'altra coppia di elettrodi, questo campo genera una  $ddp$ , misurabile con un voltmetro; si dimostra che la resistività  $\rho$  del corpo è data da:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I}$$

dove  $k$  dipende dalla posizione reciproca dei 4 elettrodi. Si noti che la resistività data dalla suddetta formula è quella vera del corpo solo se il corpo stesso è omogeneo dal punto di vista elettrico od almeno lo è nella regione dove fluisce la maggior parte della corrente  $I$ . In ogni altro caso si deve parlare di resistività apparente, combinazione delle varie resistività reali presenti all'interno del corpo, in funzione del rispettivo coinvolgimento nel passaggio della corrente per ogni particolare disposizione del quadripolo elettrodico di misura.

Nell'indagine effettuata sul provino tipo 6, in data 15/6/1999, i 4 elettrodi, a forma di disco, ricoperti da una patina di cloruro d'argento, sono stati disposti sul corpo lungo un asse longitudinale, alla distanza reciproca di 1 cm. La corrente è stata iniettata nella coppia esterna, la  $ddp$  risultante è stata misurata nella coppia interna, mediante un voltmetro ad alta impedenza d'ingresso. Quest'ultimo è stato utilizzato in ragione delle elevate resistenze attese alla coppia di elettrodi di potenziale, dato il carattere resistivo del provino analizzato (calcestruzzo maturo), per evitare che la resistenza interna del voltmetro sia confrontabile con quella del carico su cui misurare la  $ddp$ .

E' stato ottenuto il grafico di figura C.1.: come si può vedere, la resistività elettrica evolve sensibilmente durante i cicli di carico e scarico, diminuendo progressivamente all'aumentare del carico, per aumentare moderatamente nelle fasi di scarico intermedie. Nella fase di scarico finale la resistività aumenta in maniera vistosa. Si noti inoltre che i valori di resistività elettrica sono piuttosto bassi per il tipo di materiale considerato (miscela di minerali carbonatici e silicatici, con

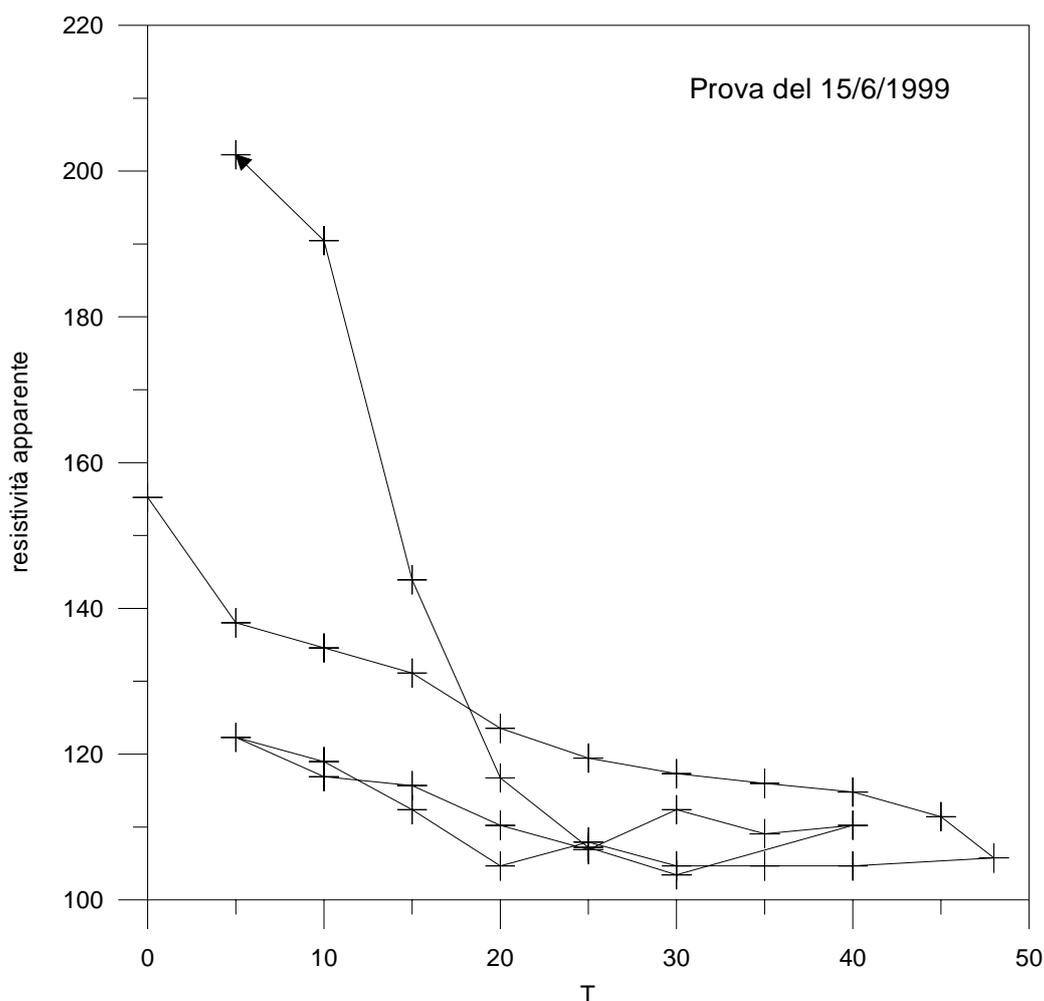
---

\* Ricercatore confermato – Istituto di Mineralogia – Università degli Studi di Ferrara.

ghiaie di natura eterogenea ma sostanzialmente silicatica), il che denota la presenza di abbondante quantità di acqua. In questo esperimento quindi la conduzione elettrica è assicurata dalla presenza di ioni nei pori.

L'interpretazione delle misure è pertanto relativamente semplice: all'aumentare del carico la conduzione elettrica è facilitata dal movimento dell'acqua nei pori, che sotto la pressione tendono a saturarsi, perdendo l'aria residua; al diminuire del carico, l'aria viene riassorbita dal provino e la resistività elettrica conseguentemente cresce. Il processo è sostanzialmente reversibile fino a quando non si arriva all'aumento vistoso della resistività stessa, fase a cui corrisponde il tracollo del campione, evidenziato dalla fessurazione macroscopica dello stesso.

Il risultato più significativo dell'esperimento non consiste forse tanto nell'evoluzione, peraltro limitata, della resistività misurata al variare del carico, quanto nella sua forte variazione in fase di fratturazione macroscopica. La prima infatti è connessa a modifiche secondarie della conduzione elettrica dovuta all'acqua residua presente nel provino, e quindi di nulla importanza ai fini del monitoraggio della resistenza meccanica dello stesso; la fase finale invece, connessa al suo collasso, ne è un sintomo evidente, fisicamente collegato al progressivo aumento dell'aria che penetra all'interno ed all'interruzione dei pori connessi. L'ampio intervallo di variazione riscontrato in questa fase comporta che misure condotte in modalità tomografica dovrebbero essere in grado di osservare, all'interno del campione, il processo di fratturazione mentre questo avviene.



**Figura C.1.** Andamento della resistività elettrica (apparente) in funzione del carico, espresso in tonnellate.

# SOMMARIO

<b>1</b>	<b>GENERALITÀ .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>PROGRAMMA SPERIMENTALE.....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI.....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>11</b>
5.1.	CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI .....	11
5.2.	PROVE MICROSISMICHE .....	11
<b>6</b>	<b>RISULTATI SPERIMENTALI.....</b>	<b>11</b>
6.1.	RILEVAZIONI A CARICO NULLO .....	11
6.2.	RISULTATI DELLE PROVE DI CARICO .....	12
6.2.1.	<i>Diagrammi carico-abbassamento.....</i>	<i>12</i>
6.2.2.	<i>Rilevazioni microsismiche .....</i>	<i>14</i>
6.2.3.	<i>Misure di deformazione: estensimetri e sensori in fibra ottica (FOS).....</i>	<i>16</i>
6.2.4.	<i>Variazione di resistività.....</i>	<i>21</i>
	<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>22</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>23</b>
	<b>APPENDICE A: DOSAGGI E MISCELA .....</b>	<b>25</b>
A.1.	MATERIALI E PROVINI.....	25
A.2.	VIBRATORE PORTATILE AD AGO - MOTORE ELETTRICO.....	26
	<b>APPENDICE B: SENSORI IN FIBRA OTTICA.....</b>	<b>27</b>
B.1.	GENERALITÀ .....	27
B.2.	FOS : FISICA E PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO .....	29
B.3.	PARTICOLARI PROBLEMATICHE TECNOLOGICHE .....	39
	<b>APPENDICE C: MISURE DI RESISTIVITÀ SU SOLIDI DI CALCESTRUZZO IN COMPRESIONE SEMPLICE .....</b>	<b>41</b>



## INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 3.1. STRUMENTAZIONE DEL CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE: VISTA ANTERIORE. ....	5
FIGURA 3.2. STRUMENTAZIONE DEL CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE: VISTA POSTERIORE. ....	5
FIGURA 3.3. VISTA COMPLESSIVA DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA DURANTE LE PROVE. ....	6
FIGURA 4.1. VISTA IN SEZIONE DELLE CASSEFORME UTILIZZATE.....	7
FIGURA 4.2. PARTICOLARE DEL FORO DI FUORIUSCITA DELLA FIBRA OTTICA NEL CILINDRO TIPO 1. ....	8
FIGURA 4.3. FISSAGGIO DEL CAVO PROTETTIVO DELLA FIBRA OTTICA AL SUPPORTO ESTERNO. ....	9
FIGURA 4.4. PARTICOLARE DEL SUPPORTO ESTERNO A FISSAGGIO ULTIMATO. ....	10
FIGURA 4.5. COSTIPAMENTO DEL CALCESTRUZZO CON SONDA VIBRANTE.....	10
FIGURA 6.2.1.1. CURVE CARICO-ABBASSAMENTO RELATIVE ALLE PROVE DI CARICO SULLA PRIMA SERIE DI PROVINI. ....	13
FIGURA 6.2.1.2. CURVE CARICO-ABBASSAMENTO RELATIVE ALLE PROVE DI CARICO SULLA SECONDA SERIE DI PROVINI. ....	13
FIGURA 6.2.1.3. CURVE CARICO-ABBASSAMENTO RELATIVE ALLE PROVE DI CARICO SULLA TERZA SERIE DI PROVINI. ....	14
FIGURA 6.2.2.1. VARIAZIONE SOTTO CARICO DELLE QUANTITÀ MICROSMICHE: CILINDRO TIPO 2 DELLA TERZA SERIE... ..	15
FIGURA 6.2.2.2. DECREMENTO PERCENTUALE STIMATO DI AREA RESISTENTE: CILINDRO TIPO 2 DELLA TERZA SERIE. ....	15
FIGURA 6.2.2.3. IDENTIFICAZIONE DEL LEGAME COSTITUTIVO DEL MATERIALE INTEGRO E CONFRONTO COL LEGAME COSTITUTIVO DI DERIVAZIONE CLASSICA: CILINDRO TIPO 2 DELLA TERZA SERIE. ....	16
FIGURA 6.2.3.1. RILEVAZIONI ESTENSIMETRICHE IN DIREZIONE LONGITUDINALE: CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE.. ..	17
FIGURA 6.2.3.2. RILEVAZIONI ESTENSIMETRICHE IN DIREZIONE LONGITUDINALE: CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE.. ..	17
FIGURA 6.2.3.3. RILEVAZIONI ESTENSIMETRICHE IN DIREZIONE CIRCONFERENZIALE: CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE. .....	18
FIGURA 6.2.3.4. RILEVAZIONI ESTENSIMETRICHE IN DIREZIONE CIRCONFERENZIALE: CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE. .....	18
FIGURA 6.2.3.5. RILEVAZIONI ESTENSIMETRICHE IN DIREZIONE DIAGONALE: CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE. ....	19
FIGURA 6.2.3.6. RILEVAZIONI ESTENSIMETRICHE IN DIREZIONE DIAGONALE: CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE. ....	19
FIGURA 6.2.3.7. CONFRONTO FRA I VALORI DI DEFORMAZIONE ACQUISITI DAI FOS E DALLE ROSETTE ESTENSIMETRICHE “A”: CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE. ....	20
FIGURA 6.2.3.8. CONFRONTO FRA I VALORI DI DEFORMAZIONE ACQUISITI DAI FOS E DALLE ROSETTE ESTENSIMETRICHE “A”: CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE. ....	20
FIGURA 6.2.3.9. CONFRONTO FRA I VALORI DI DEFORMAZIONE ACQUISITI DAI FOS NEI DUE CILINDRI TIPO 1 E 6 DELLA TERZA SERIE. ....	21
FIGURA 6.2.4.1. VARIAZIONE COL CARICO DELLA RESISTIVITÀ NEL CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE.....	22
FIGURA A.1.1. CURVA GRANULOMETRICA DELL'AGGREGATO. ....	26
FIGURA B.1.1. NORWOOD BRIDGE. ....	28
FIGURA B.1.2. CONFEDERATION BRIDGE. ....	29
FIGURA B.2.1. SCHEMA FIBRA OTTICA. ....	29
FIGURA B.2.2. SCHEMA BASE DI FUNZIONAMENTO.....	30
FIGURA B.2.3. RAGGIO LUMINOSO ALL'INTERFACCIA. ....	31
FIGURA B.2.4. RIFLESSIONI AL VARIARE DELL'ANGOLO DI INCIDENZA. ....	31
FIGURA B.2.5. PROFILI DEGLI INDICI DI RIFRAZIONE PIÙ COMUNI.....	32
FIGURA B.2.6. ATTENUAZIONE DI UN'ONDA LUMINOSA.....	33
FIGURA B.2.7. ANDAMENTO DELL'ATTENUAZIONE NEL CORSO DEGLI ANNI. ....	34
FIGURA B.2.9. EFFETTO DOVUTO ALLA MICROCURVATURA. ....	35
FIGURA B.2.10. SCHEMA DI UN BGS. ....	36
FIGURA B.2.11. SCHEMA DI UN FPS. ....	38
FIGURA C.2. ANDAMENTO DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA (APPARENTE) IN FUNZIONE DEL CARICO, ESPRESSO IN TONNELLATE. ....	42



## INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 6.1.1. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE, MASSA VOLUMICA E QUANTITÀ MICROSMICHE: CILINDRI DELLA PRIMA SERIE. ....	11
TABELLA 6.1.2. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE, MASSA VOLUMICA E QUANTITÀ MICROSMICHE: CILINDRI DELLA SECONDA SERIE. ....	11
TABELLA 6.1.3. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE, MASSA VOLUMICA E QUANTITÀ MICROSMICHE: CILINDRI DELLA TERZA SERIE. ....	12
TABELLA 6.1.4. MODULO ELASTICO DINAMICO.....	12
TABELLA A.1.1. QUANTITÀ DEI COMPONENTI IMPIEGATI PER MC E PER OGNI SINGOLO IMPASTO. ....	25
TABELLA A.1.2. VALORI DELLE MASSE VOLUMICHE SATURI A SUPERFICIE ASCIUTTA (MvSSA) <sup>2</sup> , DELL'ASSORBIMENTO DI ACQUA DOPO 24 ORE <sup>2</sup> E DELL'UMIDITÀ DELLE TRE FRAZIONI. ....	26