

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

**PARTE II: ELABORAZIONE E DISCUSSIONE
DEI DATI SPERIMENTALI**

Elena Ferretti – Roberto Carli

Nota Tecnica N° 33
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.^{le} Risorgimento, 2 – 40136 Bologna

PROGRAMMA SPERIMENTALE SUL COMPORTAMENTO IN COMPRESSIONE MONOASSIALE DEL CALCESTRUZZO

PARTE II: ELABORAZIONE E DISCUSSIONE DEI DATI SPERIMENTALI

Elena Ferretti¹ – Roberto Carli²

Nota Tecnica N° 33
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 ε_l , l'effettivo legame costitutivo in compressione semplice dovrebbe esibire valori di tensione σ_{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]):

¹ 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.

² 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 ρ 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 Bazant, 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 ([5] e [6]), 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 ([5] e [6]):

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

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 [6]. 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 [5], dovendo corrispondere ad una proprietà intrinseca del materiale, non dovrebbe risentire dell'effetto dimensionale. In [5] e [6] 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 [5] 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 [6]). 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".

L'elaborazione e discussione dei risultati del nuovo programma sperimentale è oggetto del presente lavoro.

3 RISULTATI SPERIMENTALI

3.1. Rilievo della superficie di crack principale

Il tipo di identificazione del legame costitutivo del materiale integro proposto trova la sua giustificazione nel fatto che il materiale non è stato ipotizzato di tipo degradante. Infatti, gli Autori considerano che l'effetto softening osservato nei diagrammi carico/abbassamento sia da imputare, principalmente, alla formazione di una superficie di crisi tronco-conica, detta "superficie di crack principale", che separa i provini in due porzioni: la parte centrale, detta "nocciolo resistente", viene considerata sostanzialmente integra, mentre la parte periferica viene considerata sede di tutto il complesso fessurativo proprio del processo di carico.

La superficie di crisi tronco-conica avrebbe origine nelle zone direttamente caricate e si estenderebbe progressivamente verso la parte centrale dei provini. Inoltre, la pendenza delle sue

generatrici rispetto alla verticale assumerebbe un valore dipendente solo dal tipo di materiale e non dalla geometria del provino.

La struttura resistente vera e propria sarebbe rappresentata dal solo nocciolo resistente. In seguito all'avanzare della superficie di crisi, le dimensioni della sezione minima del nocciolo resistente diminuirebbero progressivamente. Proprio a questa progressiva modifica della struttura resistente, e non ad una proprietà costitutiva del materiale, viene imputata la comparsa del ramo a pendenza negativa nel diagramma carico/abbassamento. Il passaggio dai diagrammi carico/abbassamento a quelli tensione/deformazione, quindi, avrebbe senso solo per il nocciolo resistente. In questo senso si è introdotto il concetto di area resistente, definita numericamente dalle espressioni riportate al § 2.

Essendo la pendenza della superficie di crisi costante e la zona di enucleazione sempre coincidente con le superfici caricate, secondo questo modello di crisi è lecito aspettarsi che, a parità di sezione nominale, i provini esibiscano sezioni resistenti di dimensioni decrescenti al crescere dell'altezza.

Le immagini 3.1.1., 3.1.2. e 3.1.3. sono relative al cilindro tipo 1 della terza serie e mostrano il provino, rispettivamente, prima della prova di carico, a prova di carico ultimata e in seguito alla rimozione di tutto il materiale degradato. Per rimozione del materiale degradato, si intende che, a prova di carico ultimata, si è rialzato il piatto superiore della pressa e si è provveduto ad eliminare, manualmente, il solo materiale incoerente. Le lesioni verticali presenti sulla superficie di tutti i provini a prova ultimata (figura 3.1.2.) sono state apprezzate "ad occhio nudo" a partire dal raggiungimento del carico esterno massimo.



Figura 3.1.1. Cilindro tipo 1 della terza serie prima della prova di carico.



Figura 3.1.2. Cilindro tipo 1 della terza serie a prova di carico ultimata.



Figura 3.1.3. Cilindro tipo 1 della terza serie dopo l'eliminazione del materiale degradato.

Le immagini 3.1.4., 3.1.5. e 3.1.6. mostrano l'aspetto, dopo la rimozione del materiale degradato, del cilindro tipo 2 della seconda serie, del cilindro tipo 5 della prima serie e del cilindro tipo 5 della terza serie.

Dalle immagini relative all'aspetto dei provini dopo la rimozione del materiale degradato (3.1.3., 3.1.4., 3.1.5. e 3.1.6.), si osserva chiaramente il persistere di un nucleo di materiale sostanzialmente integro.

Dalle stesse immagini, risulta evidente anche l'indipendenza, dalla geometria dei provini, della pendenza della superficie di crack principale rispetto alla verticale. È quindi lecito assumere che tale pendenza sia una caratteristica propria del materiale. Il suo valore è risultato pari a $20 \div 25^\circ$.

Dal confronto tra le immagini 3.1.3., 3.1.4., 3.1.5. e 3.1.6., si può osservare che, al crescere dell'altezza del cilindro, le inevitabili dissimmetrie di geometria e di materiale acquistano un peso sempre maggiore nel determinare il meccanismo di crisi. Infatti, nei cilindri più bassi (figure 3.1.3. e 3.1.4.) la superficie di crack principale tronco-conica con origine dalle superfici direttamente caricate è sempre molto evidente. Nei cilindri più alti, invece, le dissimmetrie possono portare a superfici di crack principale che non necessariamente hanno origine dalle superfici direttamente caricate (figura 3.1.5. e 3.1.6.). Sempre nei cilindri più alti, inoltre, le dissimmetrie possono anche far sì che venga privilegiata una direzione di scorrimento rispetto alle altre. In questo caso, alla rottura tronco-conica si sostituisce una rottura per taglio lungo la direzione di scorrimento privilegiata (figura 3.1.6.). La pendenza della direzione di scorrimento privilegiata coincide con la pendenza delle generatrici della superficie tronco-conica.

Qualunque sia l'aspetto della superficie di crack principale, comunque, è sempre evidente il degrado subito dalla sezione resistente.



Figura 3.1.4. Cilindro tipo 2 della seconda serie dopo l'eliminazione del materiale degradato.



Figura 3.1.5. Cilindro tipo 5 della prima serie dopo l'eliminazione del materiale degradato.



Figura 3.1.6. Cilindro tipo 5 della terza serie dopo l'eliminazione del materiale degradato.

3.2. Verifica del meccanismo di crisi ipotizzato

I sensori in fibra ottica (FOS) hanno fornito grafici carico/deformazione radiale con pendenza all'origine indipendente dalla geometria dei provini (figura 3.2.1.).

I valori di deformazione forniti dai FOS possono fornire una conferma del meccanismo di crisi ipotizzato (§ 3.1.) se confrontati con quelli forniti dalle rosette estensimetriche poste alla stessa quota (rosette "A"). Tale confronto mostra, per il cilindro tipo 1 (figura 3.2.2.), un divario tra le pendenze all'origine delle rispettive curve carico/deformazione radiale molto minore del divario esibito dalle curve relative al cilindro tipo 6 (figura 3.2.3.). Per il meccanismo di crisi ipotizzato, le zone periferiche dei provini possono essere assimilate a travi appoggio-appoggio soggette a carico di punta. In questo caso, alle zone periferiche dei provini di altezza crescente sono associabili lunghezze libere di inflessione crescenti. Poiché gli spostamenti totali non possono essere considerati "piccoli", è necessario porsi nell'ambito della teoria del secondo ordine. A lunghezze libere di entità maggiore restano quindi associate inflessioni in mezzera di entità maggiore. Il maggiore divario, a parità di carico esterno, tra la deformazione radiale nel nocciolo resistente e la deformazione radiale superficiale per il provino più alto può, allora, essere interpretato come una conferma del meccanismo di crisi ipotizzato.

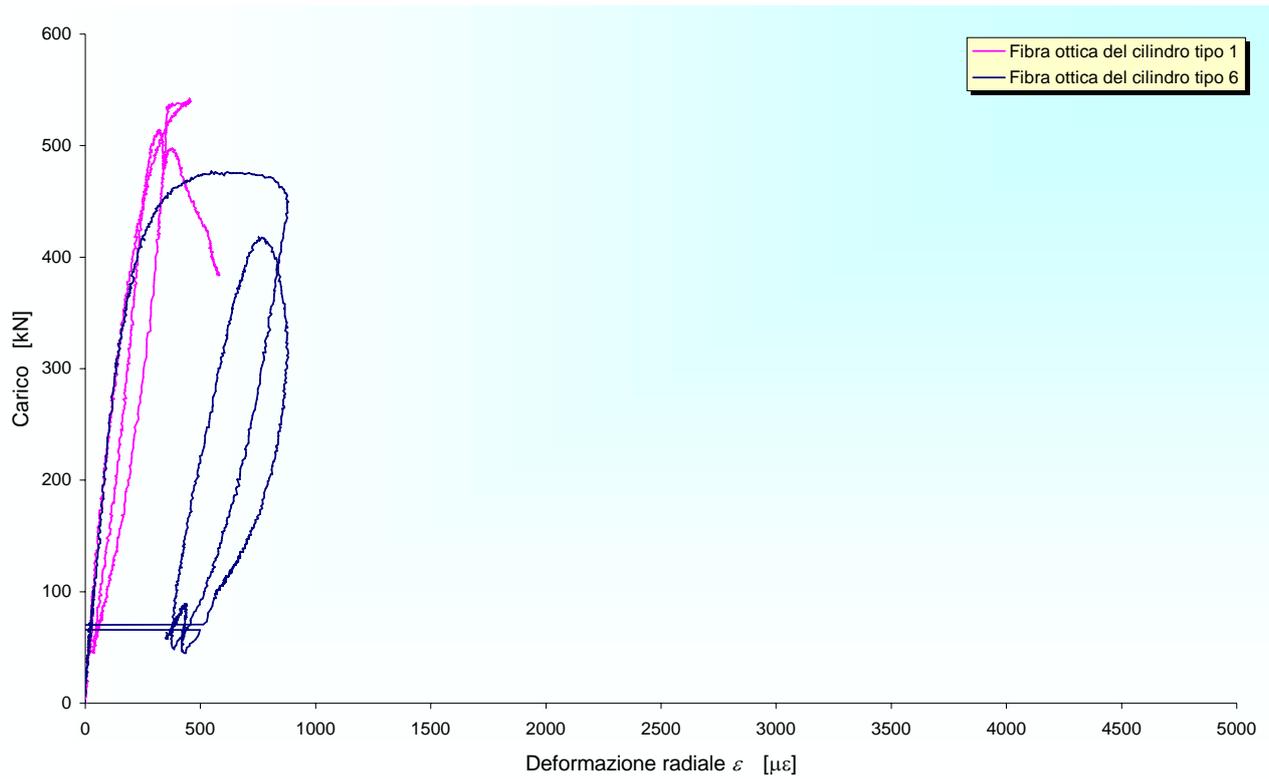


Figura 3.2.1. Curve carico/deformazione radiale per i cilindri tipo 1 e 6: valori di deformazione radiale acquisiti internamente al nocciolo resistente per mezzo di FOS.

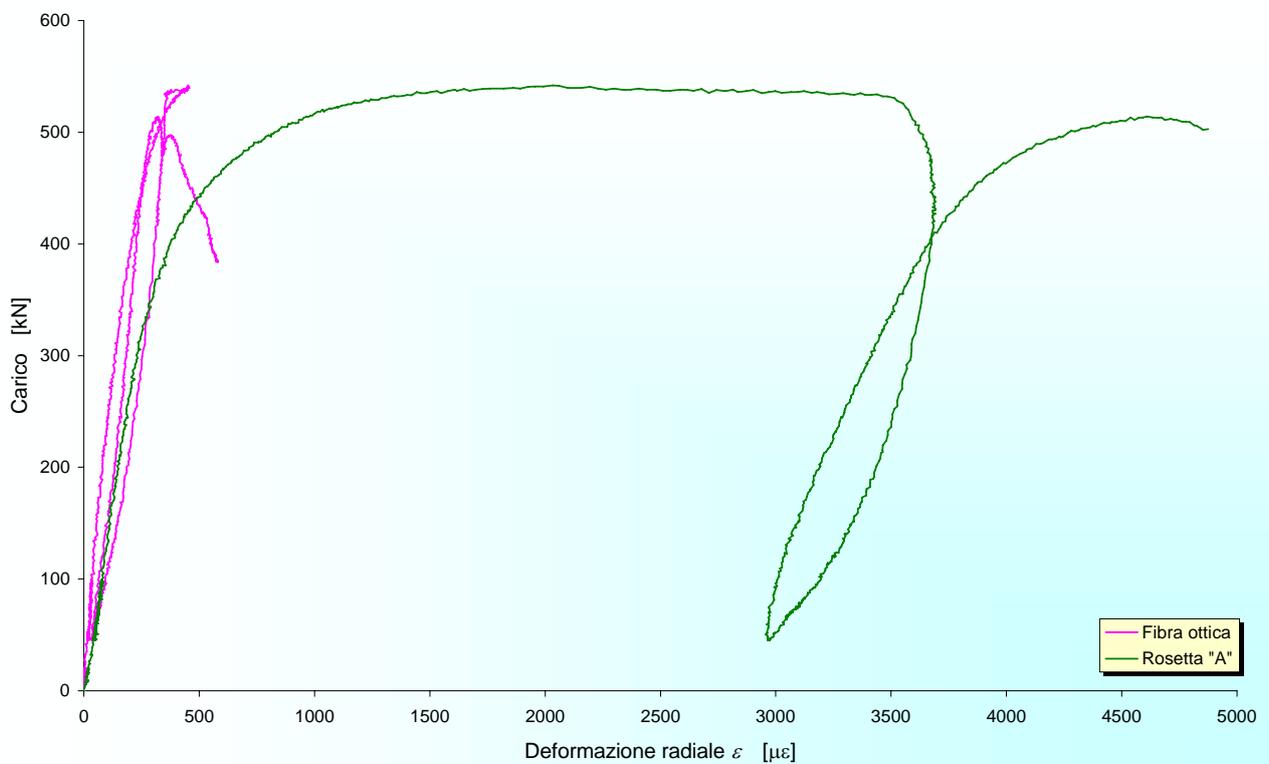


Figura 3.2.2. Confronto fra i valori di deformazione radiale acquisiti internamente al nocciolo resistente e sulla superficie esterna: cilindro tipo 1.

In figura 3.2.4. vengono messe a confronto le curve carico/deformazione radiale superficiale per i provini tipo 1 e 6. È immediato verificare come, spostandosi dal nocciolo resistente verso le zone

periferiche, le pendenze all'origine non coincidono più, ma denotano una maggiore deformabilità nel provino più alto.

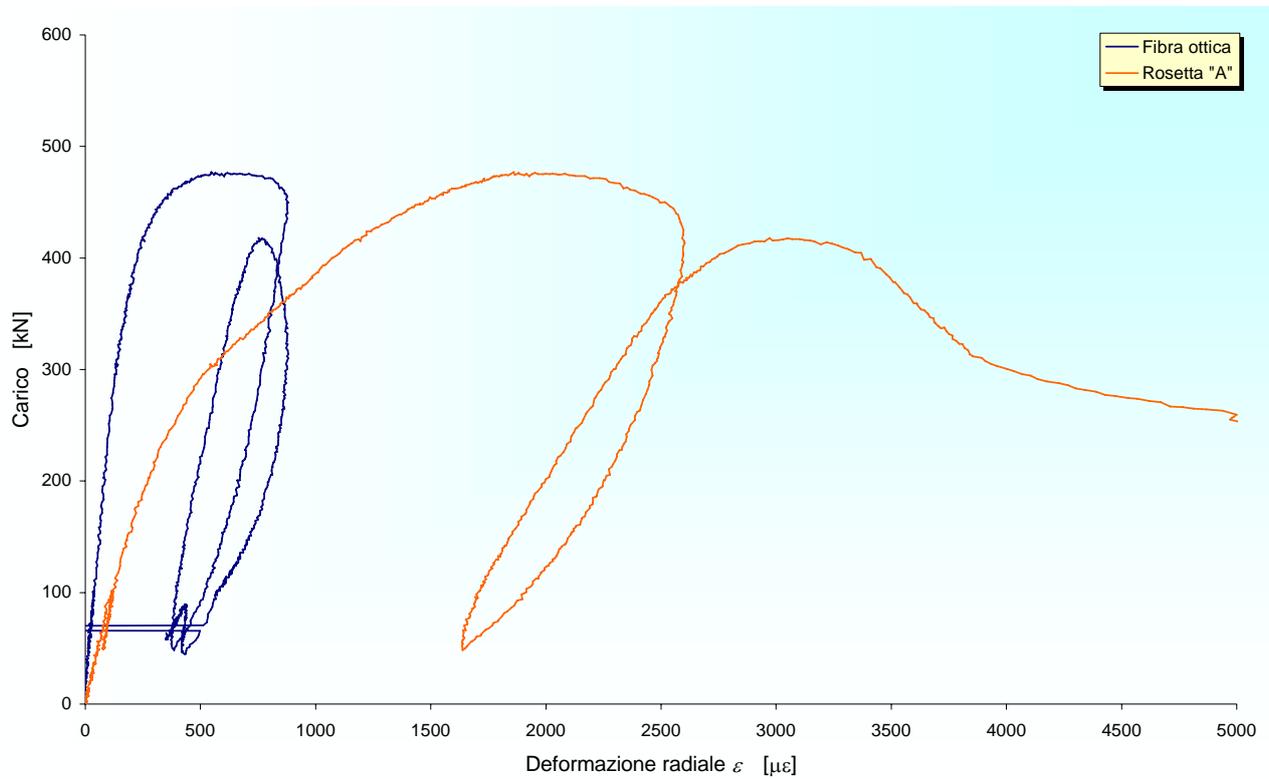


Figura 3.2.3. Confronto fra i valori di deformazione radiale acquisiti internamente al nocciolo resistente e sulla superficie esterna: cilindro tipo 6.

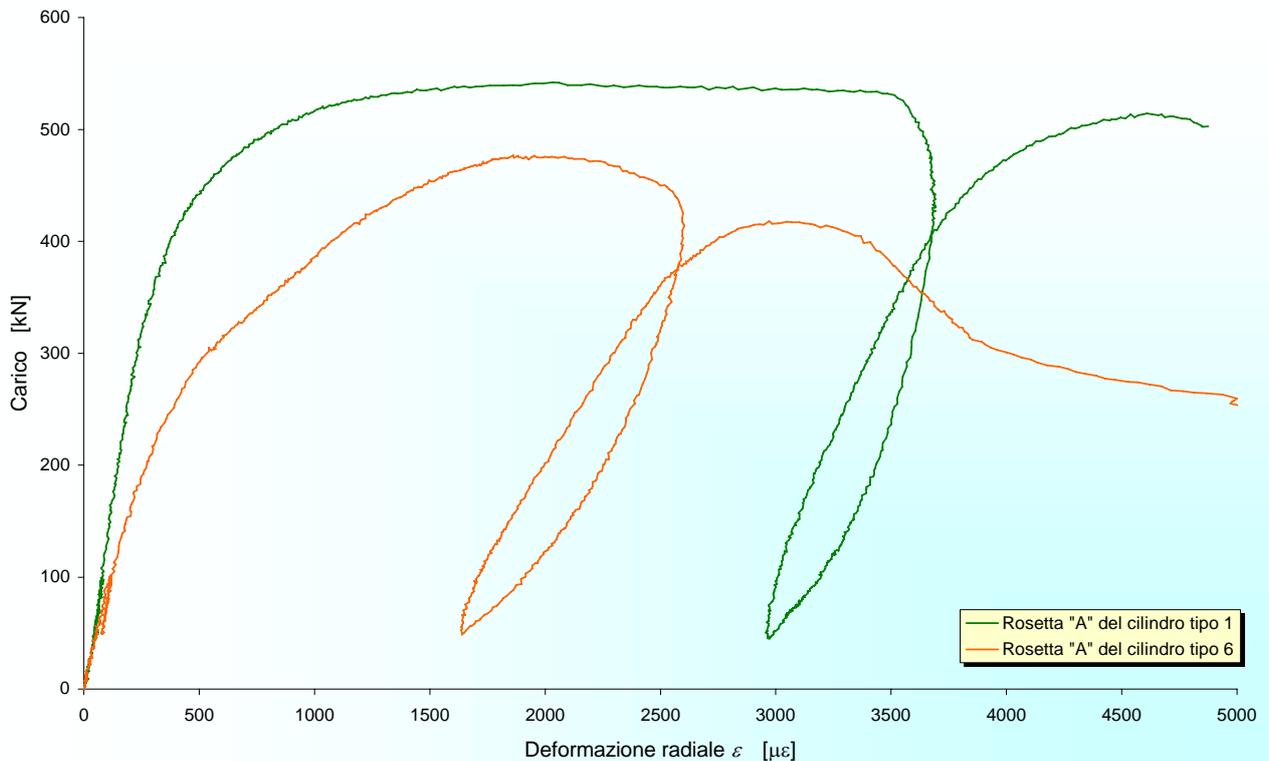


Figura 3.2.4. Curve carico/deformazione radiale per i cilindri tipo 1 e 6: valori di deformazione radiale acquisiti sulla superficie esterna per mezzo di rosette estensimetriche.

Anche la maggiore deformazione radiale esibita dal FOS del cilindro tipo 6 al raggiungimento del carico massimo (figura 3.2.1.) può essere interpretata come una conferma del meccanismo di crisi ipotizzato. In effetti, l'analisi visiva dei cilindri ha permesso di rilevare che, a prova ultimata, il sensore del cilindro tipo 6 si è completamente sfilato dal nucleo resistente, mentre ciò non è accaduto per il sensore del cilindro tipo 1.

Anche questo risultato può essere fatto risalire alla maggiore deformabilità in direzione radiale del cilindro tipo 6 in quanto è logico ipotizzare che la parte esterna, instabilizzandosi per carico di punta, abbia trascinato con sé il sensore, provocandone lo sfilamento. Si può assumere che lo sfilamento del sensore abbia avuto inizio per il valore di deformazione radiale al quale le due curve si differenziano in modo significativo.

3.3. Identificazione del legame costitutivo del materiale integro

3.3.1. Utilizzo dei parametri di danno microsismici e del parametro di danno energetico

Nelle figure 3.3.1.1., 3.3.1.2, e 3.3.1.3., si richiamano i grafici carico-abbassamento [7] relativi alle tre serie di provini.

Per tutti i provini, si sono utilizzati i due parametri di danno microsismici ed il parametro di danno energetico per ricavare il legame costitutivo del materiale integro, così come mostrato nel § 2. Anche in questo programma sperimentale, la velocità di decremento del carico esterno in fase di softening è risultata, in tutti i provini, non maggiore della velocità di decremento dell'area resistente [6]. Ciò ha comportato legami costitutivi del materiale integro di tipo monotono crescente.

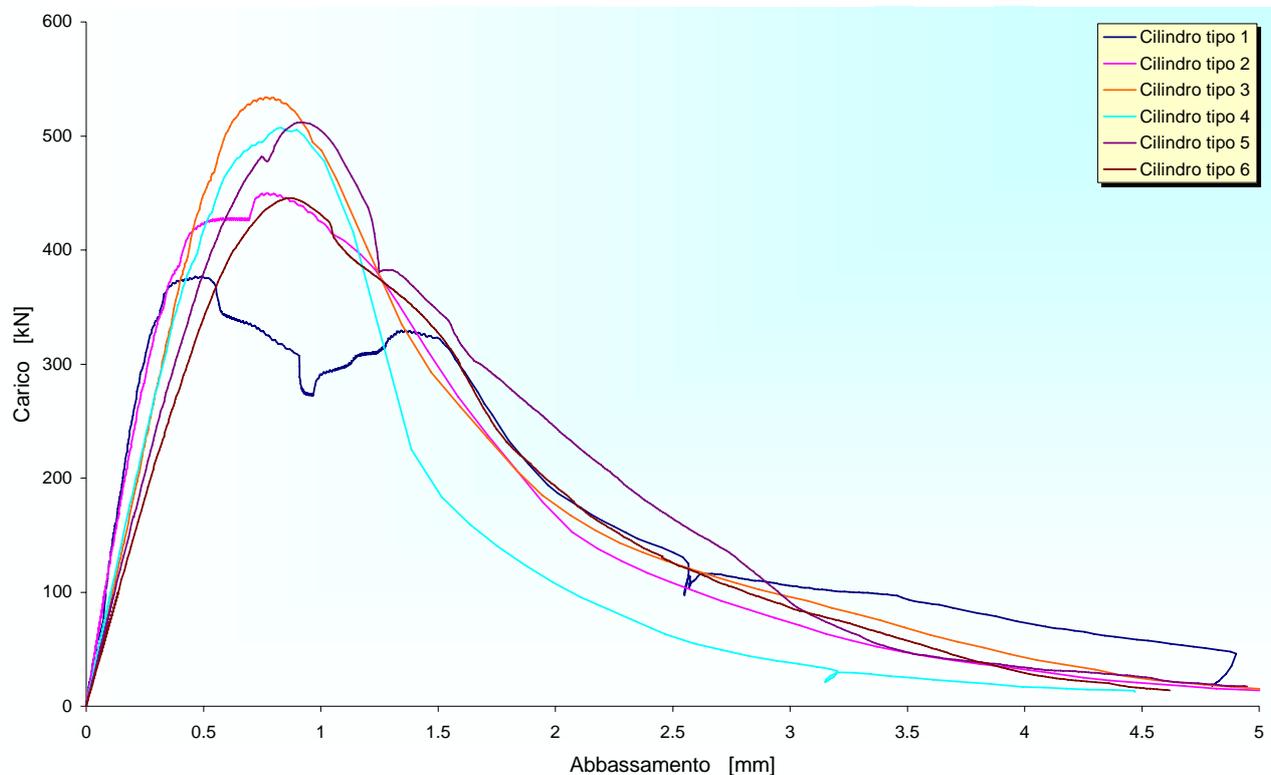


Figura 3.3.1.1. Curve carico-abbassamento relative alle prove di carico sulla prima serie di provini.

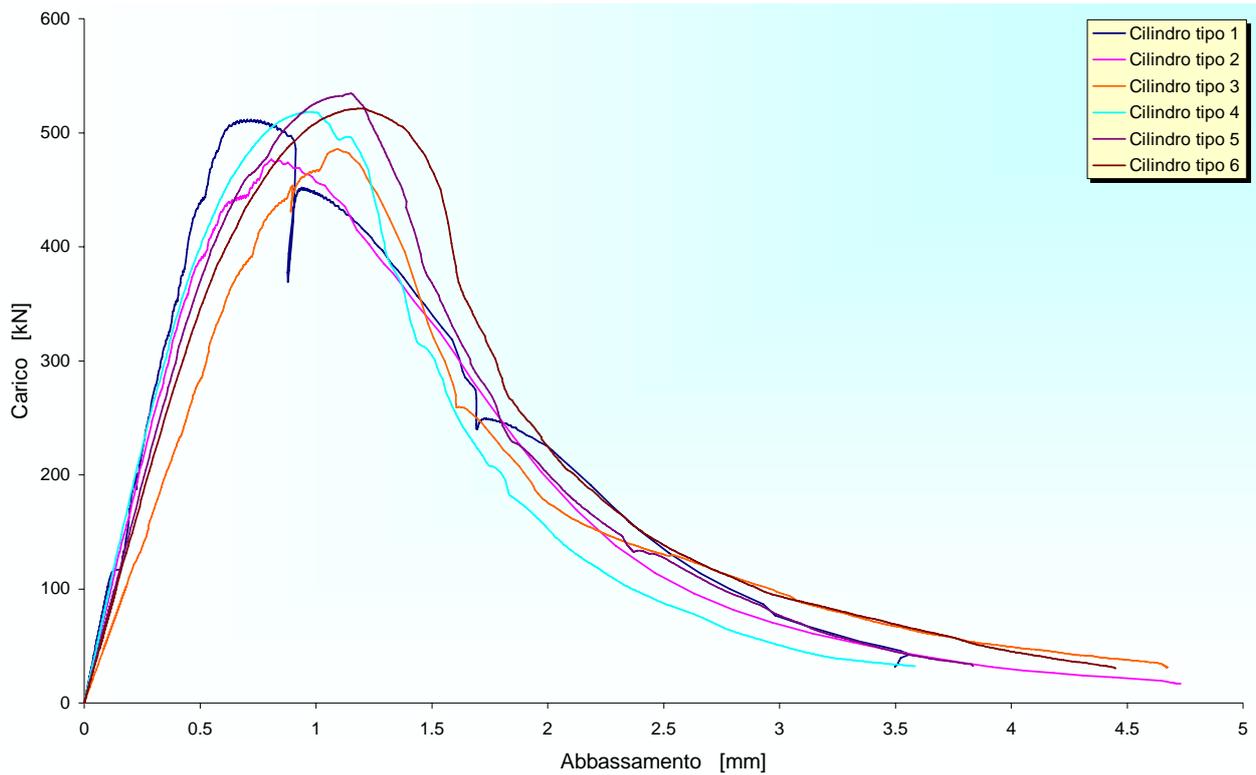


Figura 3.3.1.2. Curve carico-abbassamento relative alle prove di carico sulla seconda serie di provini.

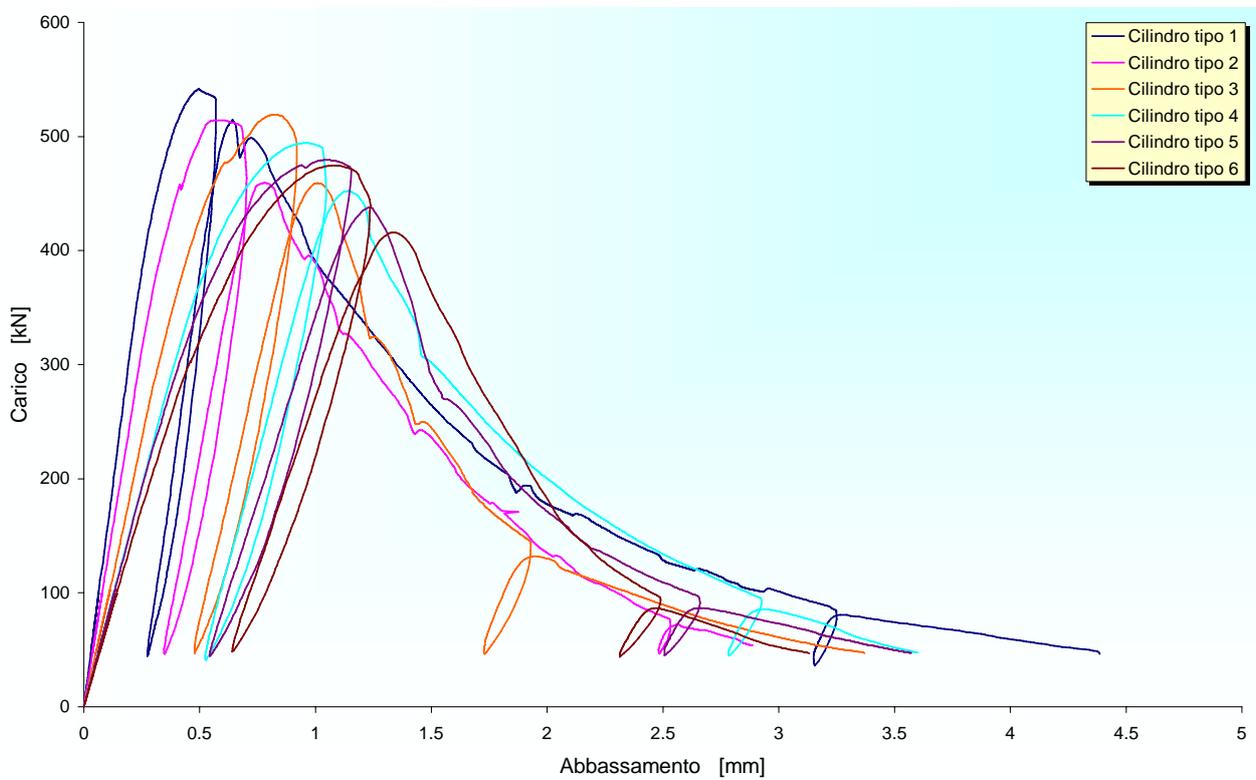


Figura 3.3.1.3. Curve carico-abbassamento relative alle prove di carico sulla terza serie di provini.

Come già fatto osservare in [7], i due parametri di danno D_1 e D_3 , entro la soglia di accettabilità del rumore aggiunto e per tutti i provini, forniscono valori molto prossimi tra loro.

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 si è assunto D_3 come unico parametro di danno.

Nella determinazione del parametro di danno energetico, la pendenza media del ramo di scarico-ricarico al generico valore di abbassamento è stata considerata costante e pari al valore assunto nel ciclo di stabilizzazione [7]. Questa approssimazione è stata ritenuta lecita in quanto, ai fini della determinazione del legame costitutivo del materiale integro, la variazione di pendenza media del ciclo di scarico-ricarico non incide in modo significativo sul risultato finale. Infatti, si prendano in considerazione i dati sperimentali relativi al provino tipo 1 della terza serie. Per questo provino, come per tutti i provini della terza serie [7], sono stati effettuati tre cicli di scarico-ricarico. È quindi possibile ricavare, per interpolazione, una curva che descriva il decremento della pendenza media dei cicli di scarico-ricarico al variare dell'abbassamento. In figura 3.3.1.4. viene riportato il caso di curva interpolante del secondo ordine.

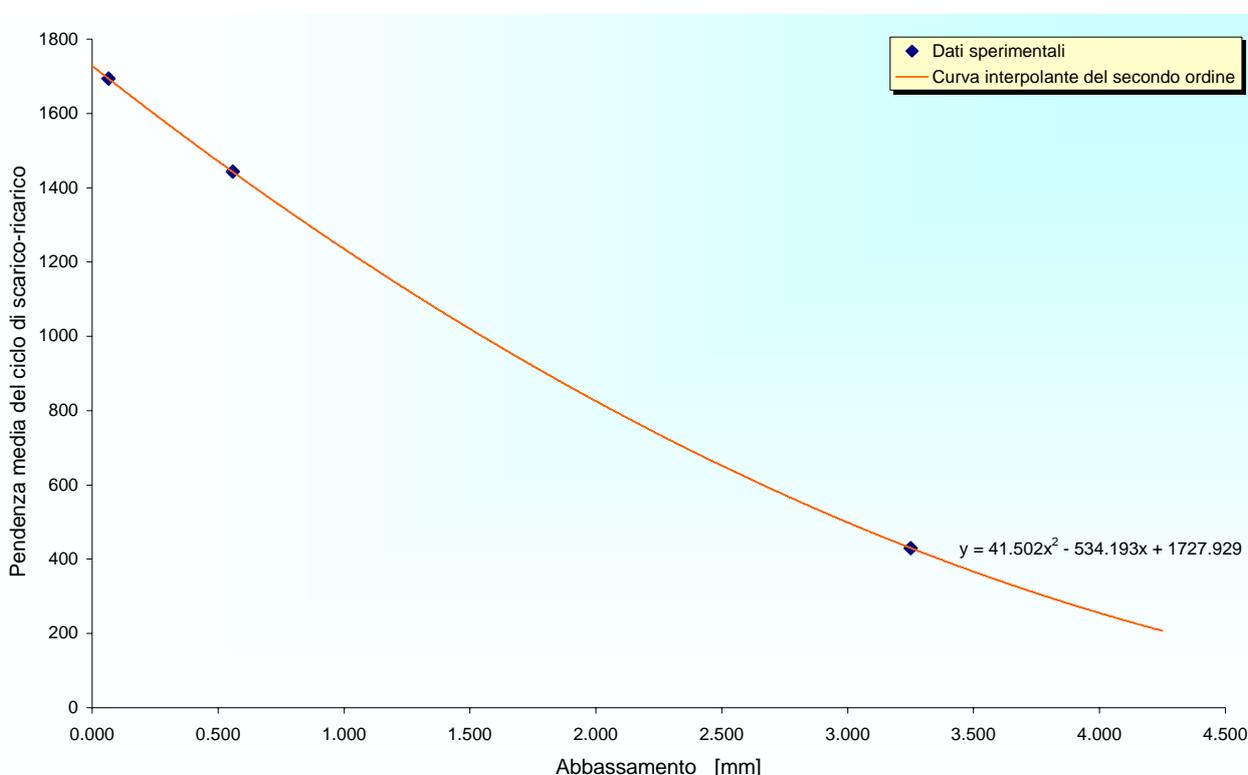


Figura 3.3.1.4. Decremento della pendenza media dei cicli di scarico-ricarico in funzione dell'abbassamento: cilindro tipo 1 della terza serie.

Nelle figure 3.3.1.5. e 3.3.1.6. si sono riportati, rispettivamente, il decremento stimato di area resistente ed il legame costitutivo stimato del materiale integro, nei due casi di pendenza media costante e pendenza media variabile del ramo di scarico-ricarico.

Dal confronto fra i due casi, risulta evidente come l'area resistente e la tensione siano poco sensibili a variazioni, anche notevoli, di pendenza media del ramo di carico-ricarico.

Nelle stesse figure 3.3.1.5. e 3.3.1.6. si sono riportate anche le curve dedotte dal parametro di danno basato sulla velocità. Anche in questo caso, l'accordo fra i risultati forniti dal parametro di danno microsismico e da quello energetico è più che buono.

Il legame costitutivo del materiale integro è stato ricercato nel modo seguente:

1. identificando il legame costitutivo del materiale integro per tutti i cilindri sottoposti a prova;

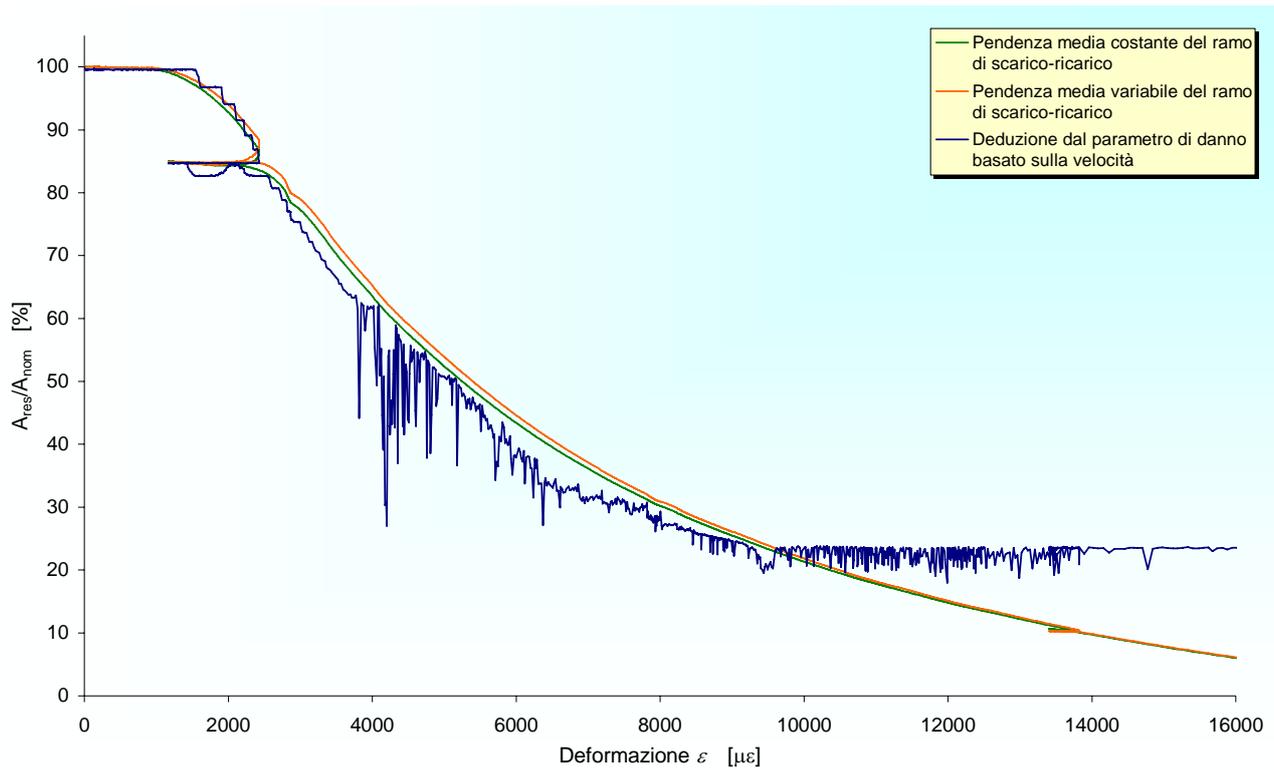


Figura 3.3.1.5. Confronto tra le curve del decremento di area resistente percentuale derivate dal parametro di danno energetico, nei due casi di pendenza media costante e pendenza media variabile del ramo di scarico-ricarico.

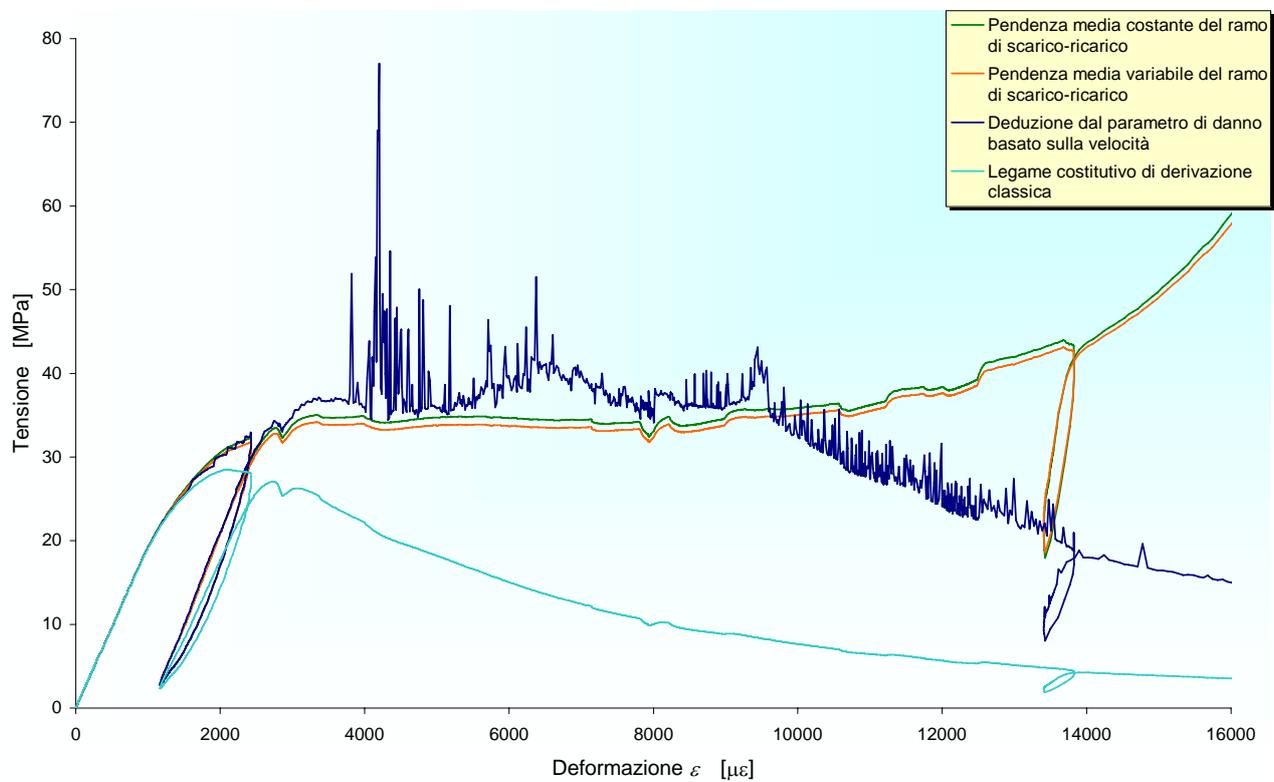


Figura 3.3.1.6. Confronto tra le curve costitutive effettive derivate dal parametro di danno energetico, nei due casi di pendenza media costante e pendenza media variabile del ramo di scarico-ricarico.

2. ricercando la curva media tensione/deformazione per ogni terna di provini con le stesse caratteristiche geometriche;
3. ricercando la curva media tra le curve medie del punto precedente (fig. 3.3.1.7.).

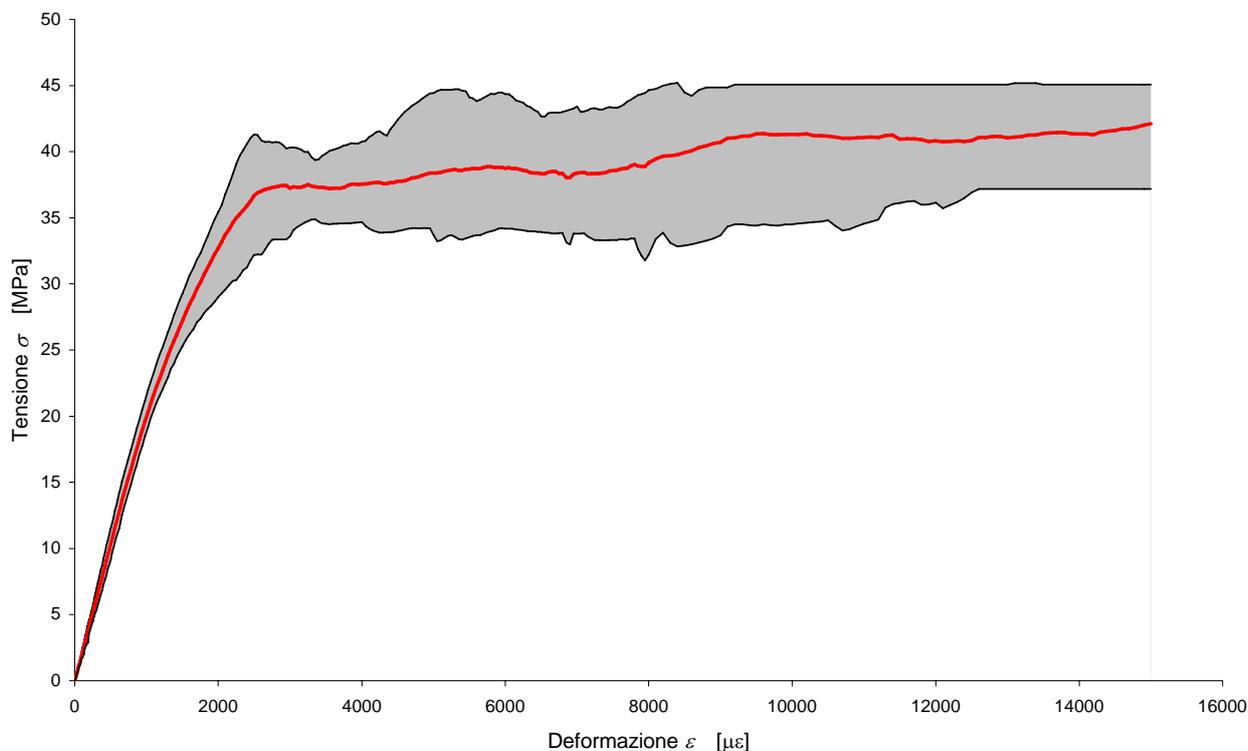


Figura 3.3.1.7. Identificazione della curva media tensione/deformazione al variare della geometria dei provini e relativo campo di dispersione di risultati.

In figura 3.3.1.7. è stata riportata la curva media tra le curve medie relative alle varie geometrie. La zona ombreggiata indica il campo di variabilità delle curve medie. Come si può osservare, già mediando su soli tre provini i risultati relativi ad ogni geometria, è possibile ottenere una dispersione dei risultati più che accettabile.

La scarsa dispersione dei risultati esibita in figura 3.3.1.7. permette di confermare l'ipotesi iniziale secondo la quale, interpretando i risultati delle prove di carico monoassiale tramite la teoria del “nocciolo resistente”, è possibile identificare un legame costitutivo del materiale integro che, non solo è di tipo monotono crescente, ma risulta anche indipendente dall'effetto dimensionale. Tanto l'effetto softening quanto l'effetto dimensionale sarebbero quindi da imputare non a proprietà intrinseche del materiale, ma alla meccanica dei provini in quanto strutture.

3.3.2. Utilizzo dell'analisi sulla variazione di resistività

In figura 3.3.2.1. si è riportato il grafico della variazione sotto carico della resistività nel cilindro tipo 6 della terza serie.

Come esposto in [7], la variazione sotto carico della resistività è dovuta al contributo di due fattori che coesistono fin dall'inizio della prova di carico:

- 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 3.3.2.1., 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 l'incremento dell'abbassamento. Analogamente, è lecito aspettarsi che il contributo del secondo fattore sia nullo all'inizio della prova di carico e cresca con l'incremento dell'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 (Parte I – Appendice C).

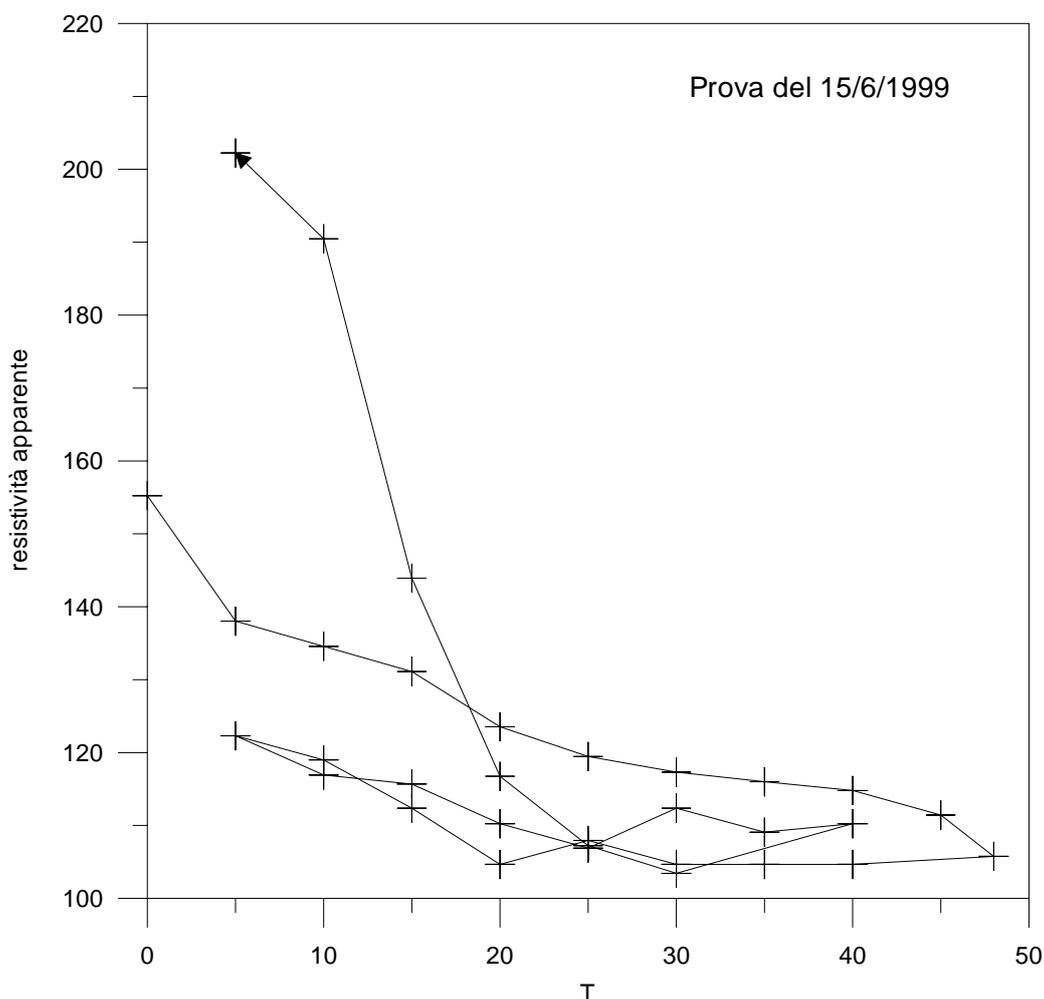


Figura 3.3.2.1. Variazione col carico della resistività nel cilindro tipo 6 della terza serie.

Allora, poiché, per quanto detto, il contributo del primo fattore è rilevante, si può facilmente interpretare l'andamento del grafico riportato in figura 3.3.2.1.: infatti, il ramo iniziale, decrescente, deriva dalla predominanza della quota negativa connessa alla saturazione dei pori, viceversa, il ramo finale, crescente, deriva dalla predominanza della quota positiva connessa al danneggiamento del solido di prova.

Se ne conclude che si potrebbe ottenere un eventuale parametro di danno dalla variazione di resistività se si fosse in grado di separare i due effetti, identificandone le relative quote e assumendo come rappresentativa dello stato di danneggiamento solo quella connessa al secondo effetto.

Inoltre, dal confronto fra il grafico in figura 3.3.2.1. e le curve della variazione di velocità, si nota che la parte terminale del primo, quella che presumibilmente è connessa prevalentemente al danneggiamento del solido di prova, ha andamento simile a quello esibito dalle seconde. È quindi lecito ipotizzare che un'eventuale separazione dei due effetti consenta di identificare la quota di resistività funzione del danneggiamento come curva monotona crescente con lo spostamento, in analogia al risultato delle prove microsismiche.

3.4. Influenza dell'effetto dimensionale sul parametro di danno

Dai grafici riportati, risulta evidente come il parametro di danno, nonché l'area resistente percentuale siano sensibili all'effetto dimensionale. In particolare, pur nelle inevitabili imperfezioni correlate all'esecuzione di una prova sperimentale, il parametro di danno (l'area resistente percentuale) risulta essere una funzione crescente (decescente) con la snellezza del provino.

Rimane quindi confermato il meccanismo di crisi ipotizzato (§ 3.2.).

Se ne può concludere che il parametro di danno introdotto è ben posto. Infatti ad un parametro di danno al quale resta associato il coefficiente correttivo dell'area nominale nei riguardi dell'area resistente si richiede proprio di essere sensibile all'effetto dimensionale, in quanto tale parametro deve essere in grado di correggere l'effetto dimensionale da cui è affetto il comportamento macroscopico, in modo da fornire un comportamento microscopico indipendente dall'effetto dimensionale e, pertanto, costitutivo.

Nelle figure 3.4.1., 3.4.2. e 3.4.3. si sono riportati i risultati relativi all'identificazione del parametro di danno, nonché dell'area resistente percentuale.

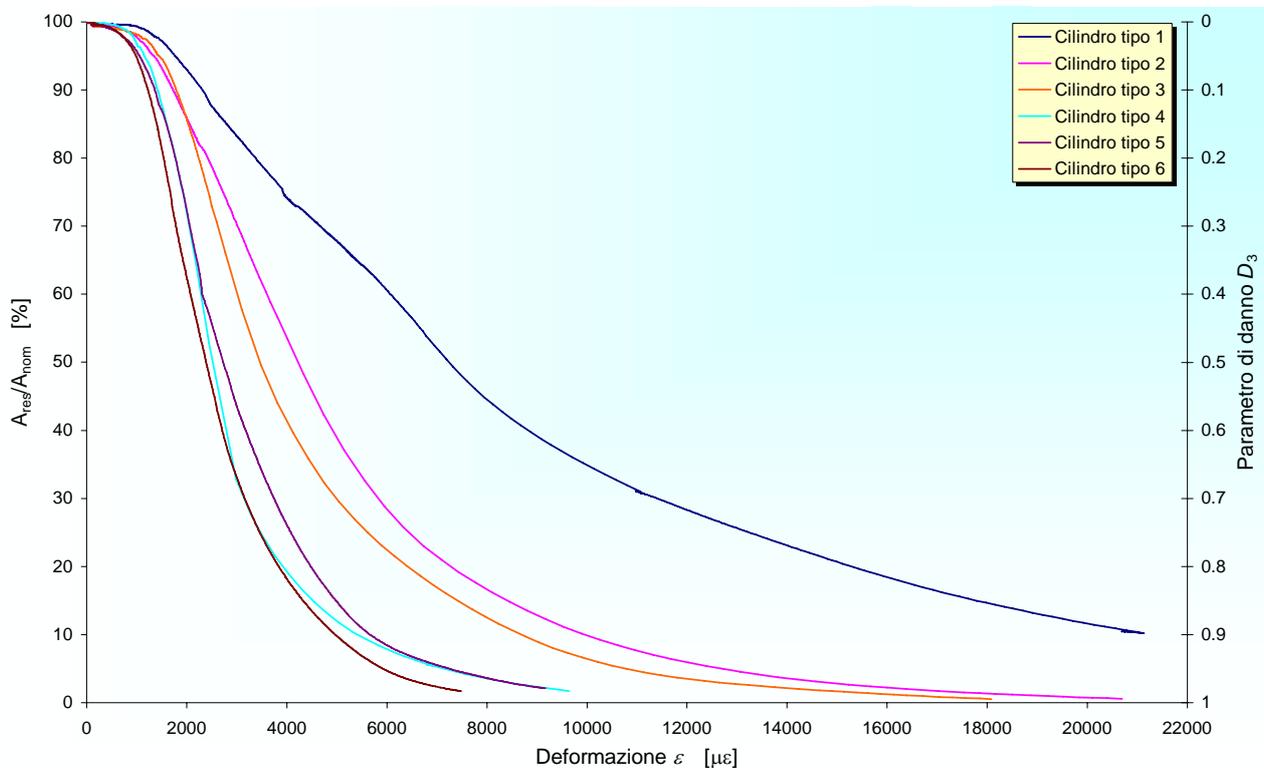


Figura 3.4.1. Curve del decremento di area resistente percentuale relative alle prove di carico sulla prima serie di provini.

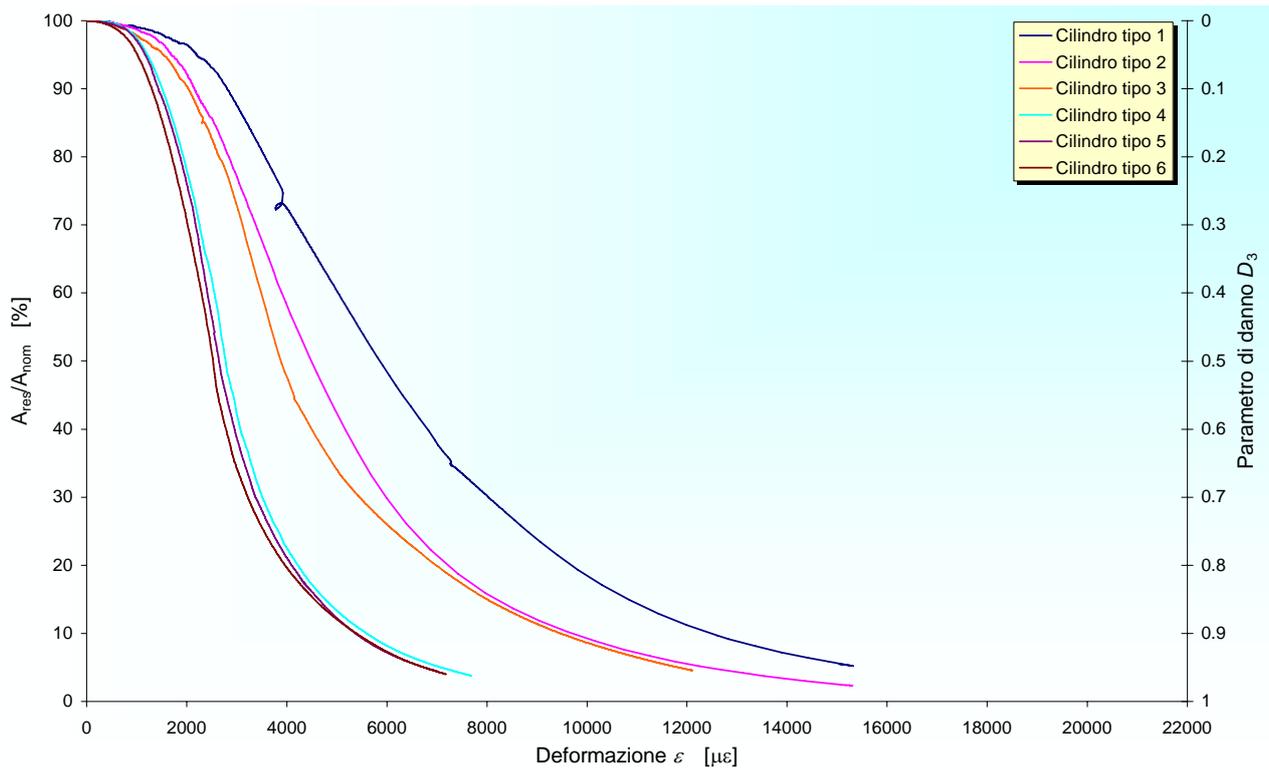


Figura 3.4.2. Curve del decremento di area resistente percentuale relative alle prove di carico sulla seconda serie di provini.

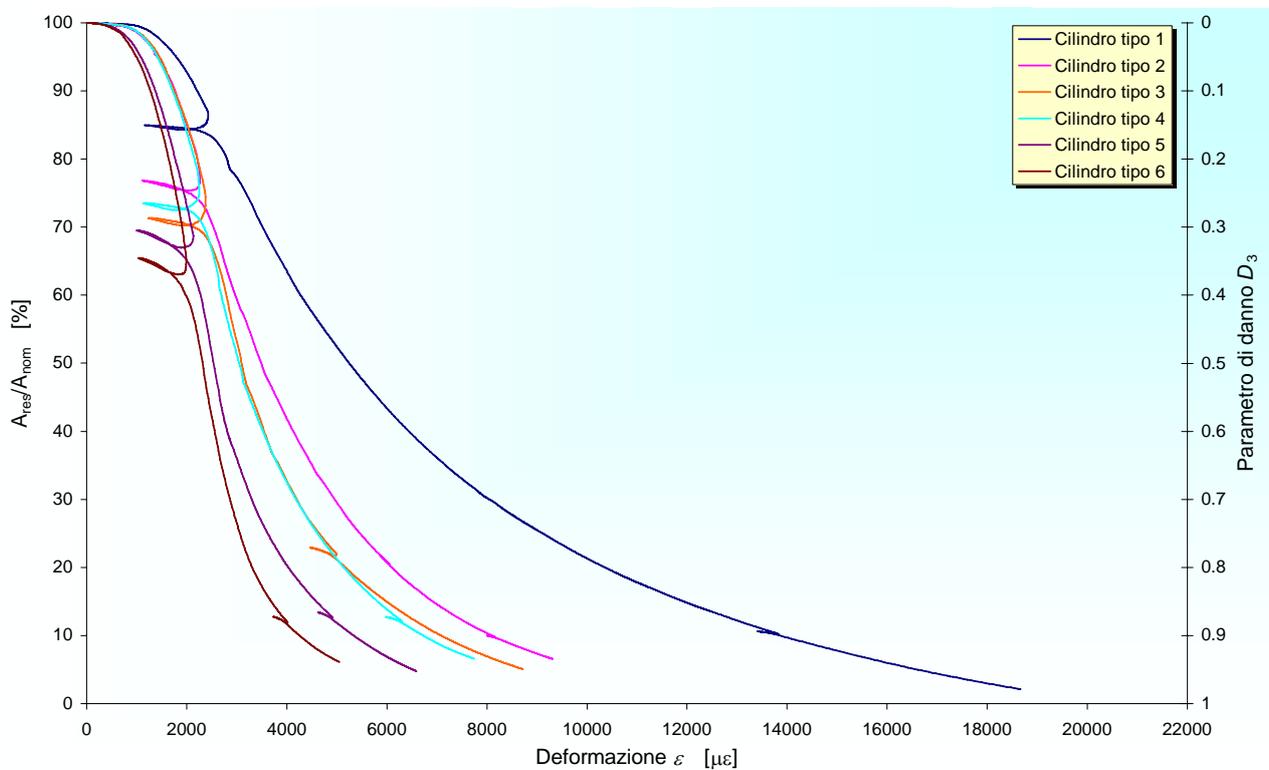


Figura 3.4.3. Curve del decremento di area resistente percentuale relative alle prove di carico sulla terza serie di provini.

3.5. Identificazione del modulo di Poisson

Alla misura della deformazione circonferenziale superficiale, assunta uguale alla deformazione radiale superficiale, si è voluto affiancare, nei provini tipo 1 e 6 del terzo getto, una rilevazione di deformazione radiale effettuata nel nocciolo resistente. La rilevazione di deformazione radiale interna è stata effettuata per mezzo di sensori in fibra ottica (FOS) preinseriti nel getto a metà altezza dei provini. La rilevazione di deformazione circonferenziale superficiale di confronto, invece, è stata effettuata per mezzo di rosette estensimetriche poste, anch'esse, a metà altezza. Tali rosette sono state indicate in figura 3.2. con la lettera "A".

Nelle figure 3.5.1. e 3.5.2. si sono riportati i grafici del rapporto tra deformazione radiale, ε_r , e deformazione longitudinale relativa alla rosetta "A", ε_l , al variare di ε_l .

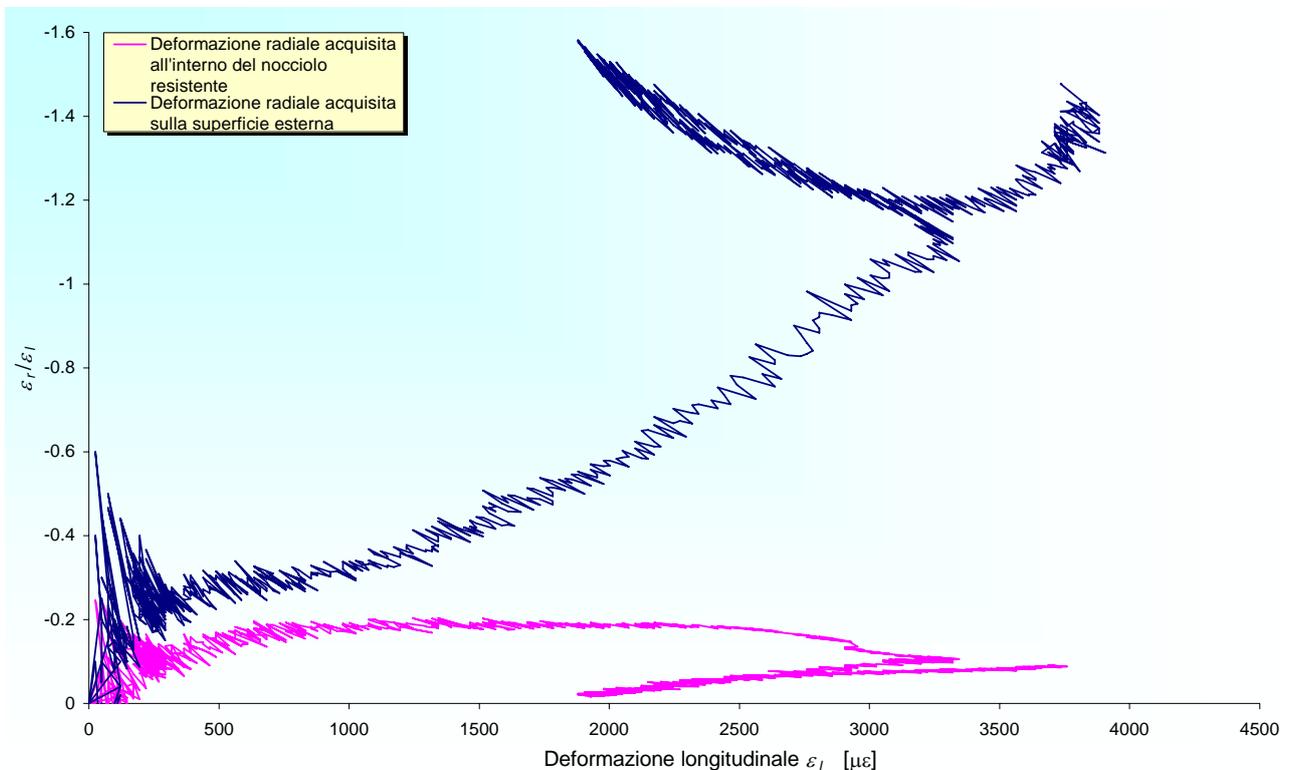


Figura 3.5.1. Curve $\varepsilon_r/\varepsilon_l$ per il cilindro tipo 1 della terza serie.

La prima cosa da notare è che i valori di deformazione radiale forniti, in fase statica, dalle fibre ottiche e dalle rosette estensimetriche sono tra loro sostanzialmente coincidenti. Ciò conferma il corretto funzionamento delle fibre ottiche preinserite nel getto e consente di fugare, definitivamente, ogni dubbio sul possibile danneggiamento arrecato ai FOS nella fase di getto-costipazione-maturazione dei provini [7]. Di conseguenza, a meno di danni intervenuti in fase di carico, è lecito considerare i valori acquisiti dai FOS effettivamente rappresentativi della deformazione radiale nel nocciolo resistente. In questo senso, i dati relativi alle rilevazioni estensimetriche e a quelle con sensori in fibra ottica possono essere considerati tra loro confrontabili.

Inoltre, dalle figure riportate si osserva che, per entrambi i provini, il rapporto $\varepsilon_r/\varepsilon_l$, con ε_r acquisito sulla superficie esterna, risulta indefinitamente crescente con ε_l . Tale rapporto si discosta

velocemente dal valore statico fino ad oltrepassare, in valore assoluto, il valore -0.5 , limite di accettabilità del modulo di Poisson. Al contrario, il rapporto $\varepsilon_r/\varepsilon_l$, con ε_r acquisito all'interno del nocciolo resistente, si mantiene all'interno del campo di accettabilità del modulo di Poisson e assume sempre valori prossimi al valore statico. Per il cilindro tipo 6 la costanza del rapporto $\varepsilon_r/\varepsilon_l$ vale fino al valore di deformazione per il quale il sensore inizia a sfilarsi dal nucleo resistente (§ 3.2.).

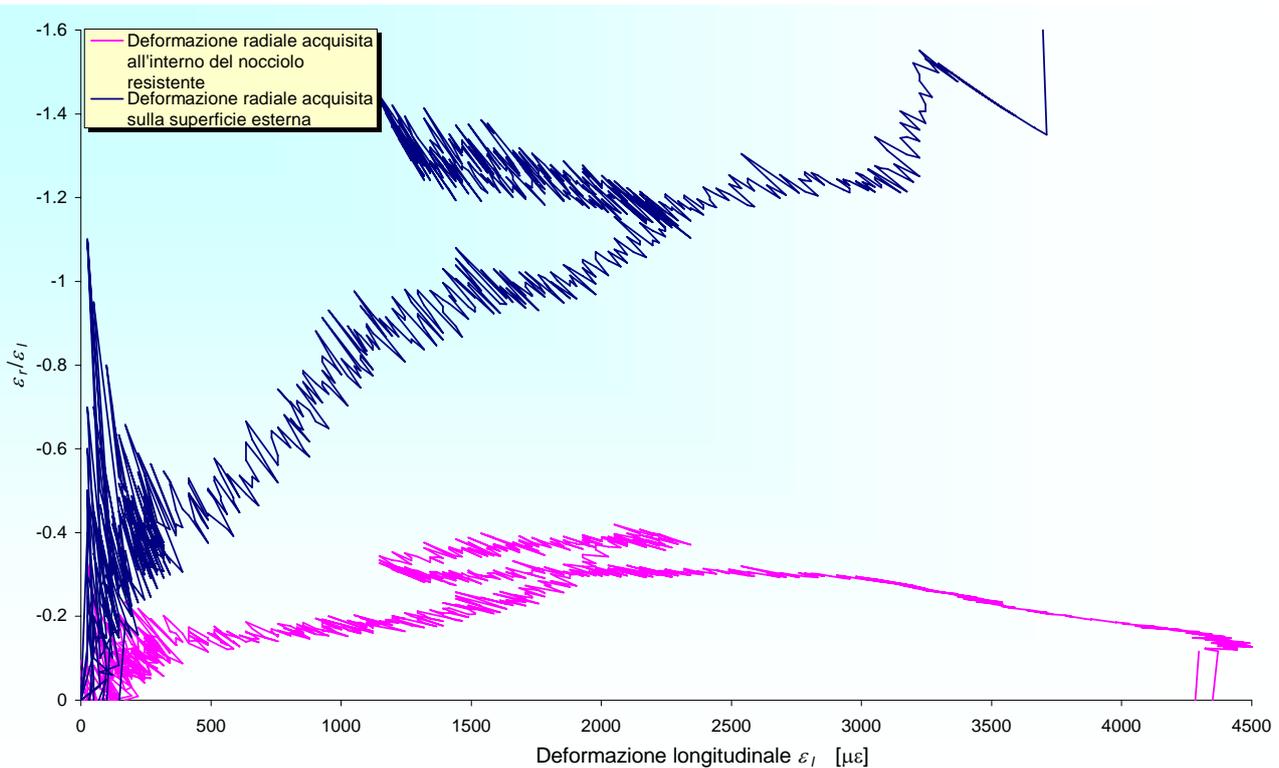


Figura 3.5.2. Curve $\varepsilon_r/\varepsilon_l$ per il cilindro tipo 6 della terza serie.

Se ne conclude che, utilizzando deformazioni radiali/circonfenziali acquisite sulla superficie esterna, si ottengono curve $\varepsilon_r/\varepsilon_l$ che non sono rappresentative del modulo di Poisson. Ciò è dovuto al fatto che le misure superficiali di deformazione circonferenziale, essendo mediate su una base di misura finita, risentono, inevitabilmente, dell'errore apportato dall'apertura delle fessure. Oltretutto, l'evidenza sperimentale (§ 3.1.) mostra chiaramente che il processo fessurativo si localizza proprio nelle zone periferiche, tramutandole in materiale incoerente e, quindi, non più rappresentativo delle proprietà costitutive del materiale.

Utilizzando misure di deformazione radiale interne al nocciolo resistente, invece, è possibile ottenere dati presumibilmente non affetti da questo errore. Inoltre, in accordo con la natura di parametro costitutivo del modulo di Poisson, tali dati portano a curve $\varepsilon_r/\varepsilon_l$ con andamento che può essere ritenuto costante con la deformazione longitudinale.

Si può quindi considerare che le curve effettivamente rappresentative del modulo di Poisson siano quelle ottenute utilizzando deformazioni radiali acquisite all'interno del nocciolo resistente.

Dalle figure 3.5.1. e 3.5.2., inoltre, si può ricavare una conferma indiretta del meccanismo di crisi ipotizzato (§ 3.1.). Infatti, si può osservare che, nel cilindro tipo 6, il rapporto $\varepsilon_r/\varepsilon_l$ si discosta dal valore statico molto più velocemente di quanto non accada nel cilindro tipo 1. Ciò può essere interpretato come un effetto del minor raggio a metà altezza che il nucleo resistente del cilindro tipo

6 esibirebbe, per effetto della maggiore altezza, rispetto al cilindro tipo 1. Infatti, nella sezione trasversale a metà altezza, un nucleo resistente con minor raggio comporta una maggiore area interessata dal complesso fessurativo e, quindi, un'apertura media delle fessure di entità maggiore. Considerando che è proprio l'apertura media delle fessure che altera l'acquisizione sperimentale della deformazione circonferenziale, è immediato interpretare la maggiore pendenza media della curva $\varepsilon_r/\varepsilon_l$ nel cilindro tipo 6 come effetto di un nucleo resistente che degrada più velocemente.

3.6. Identificazione della curva volumetrica

Dall'analisi sulle curve $\varepsilon_r/\varepsilon_l$, si è concluso che le rilevazioni superficiali di deformazione circonferenziale/radiale risultano fortemente alterate dal processo fessurativo che si localizza nelle zone periferiche dei provini. Alle tradizionali curve volumetriche ottenute utilizzando queste rilevazioni [4], si sono quindi volute affiancare le curve volumetriche ottenute utilizzando misure di deformazione acquisite internamente al nocciolo resistente.

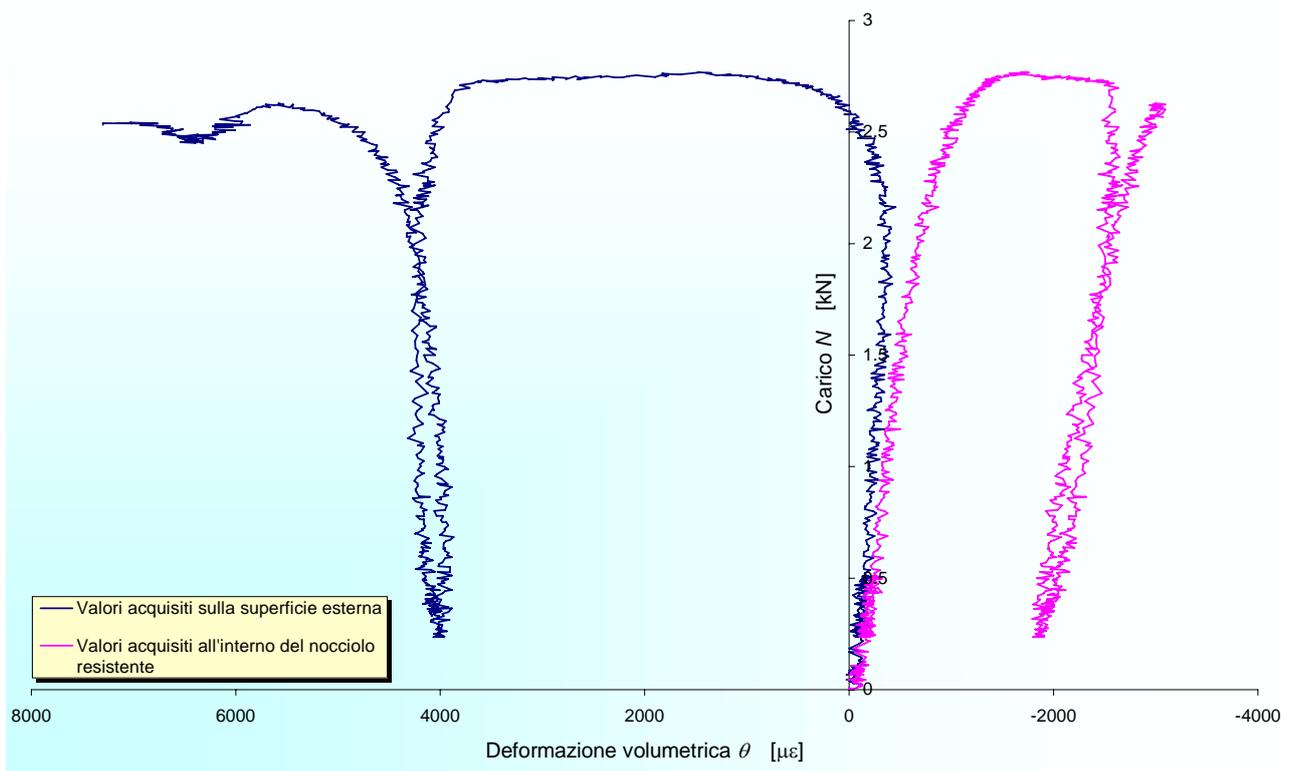


Figura 3.6.1. Curve volumetriche per il cilindro tipo 1 della terza serie.

Anche in questo caso, l'analisi dei risultati è limitata ai provini tipo 1 e 6 della terza serie.

È interessante notare come, utilizzando i valori interni di deformazione, la curva volumetrica assunta, nel provino tipo 1, valori sempre negativi e crescenti in valore assoluto (figura 3.6.1.). Andamento analogo è esibito anche dal cilindro tipo 6 (figura 3.6.2.), almeno fino a quando il sensore non inizia a sfilarsi dal nocciolo resistente (§ 3.2.).

Se ne può concludere che la variazione positiva di volume connessa alle curve volumetriche tradizionali è solo un effetto apparente, dovuto, ancora una volta, all'utilizzo di misure di

deformazione acquisite in una zona che non è più rappresentativa delle proprietà costitutive del materiale. Questa conclusione è confermata dal fatto che, nel punto in cui sicuramente le fessure non hanno ancora iniziato ad estendersi, e cioè all'origine del diagramma carico-deformazione volumetrica, le due curve in figura 3.6.1. e 3.6.2. sono tra loro tangenti.

L'andamento della curva volumetrica proposta si può considerare, con buona approssimazione, lineare fino al carico massimo.

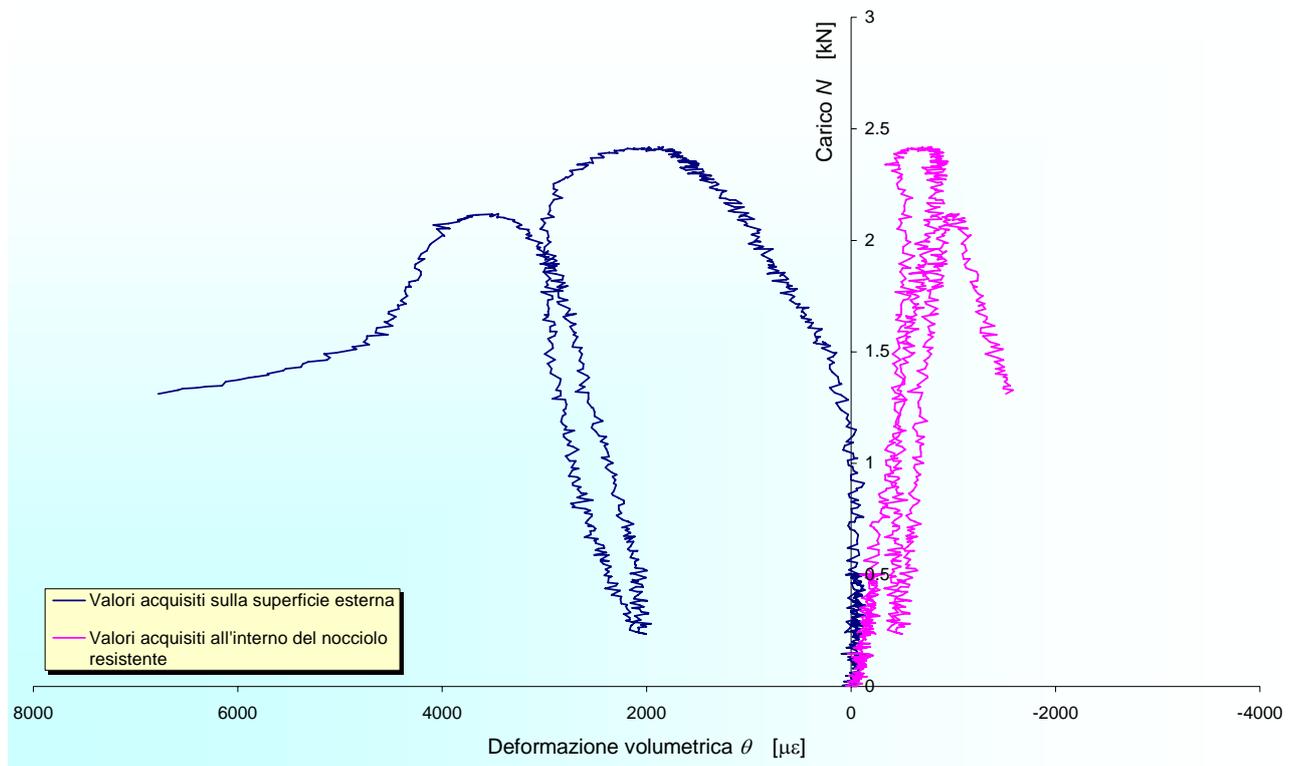


Figura 3.6.2. Curve volumetriche per il cilindro tipo 6 della terza serie.

Infine, la maggiore deformazione volumetrica, a parità di carico esterno, esibita dal cilindro tipo 6 rispetto al cilindro tipo 1 può essere considerata come un'ulteriore conferma del modello a trave appoggio-appoggio soggetta a carico di punta, adottato per le parti esterne dei provini (§ 3.2.).

4 CONCLUSIONI

I provini soggetti a carico normale centrato vengono separati in due porzioni delle quali, la parte centrale, rimane sostanzialmente integra, mentre, la parte periferica, è formata da materiale incoerente. Le due porzioni sono separate da una superficie di crisi con forma tronco-conica e pendenza delle generatrici dipendente solo dal tipo di materiale.

La ricerca delle proprietà costitutive del materiale ha senso solo per il nocciolo resistente.

A parità di area nominale e di deformazione longitudinale, i provini esibiscono una sezione resistente decrescente al crescere dell'altezza.

Interpretando i risultati delle prove di carico monoassiale tramite la teoria del nocciolo resistente, è possibile identificare un legame costitutivo del materiale integro che, non solo è di tipo

monotono crescente, ma risulta anche indipendente dall'effetto dimensionale. Tanto l'effetto softening quanto l'effetto dimensionale sono da imputare non a proprietà intrinseche del materiale, ma alla meccanica dei provini in quanto strutture.

Il parametro di danno energetico è sensibile all'effetto dimensionale ed è quindi in grado di correggere efficacemente l'effetto dimensionale da cui è affetto il comportamento macroscopico e di fornire un comportamento microscopico realmente costitutivo.

Utilizzando deformazioni radiali/circonfenziali acquisite sulla superficie esterna, si ottengono curve $\varepsilon_r/\varepsilon_l$ che non sono rappresentative del modulo di Poisson. Le curve effettivamente rappresentative del modulo di Poisson sono quelle ottenute utilizzando deformazioni radiali acquisite all'interno del nocciolo resistente.

La variazione positiva di volume connessa alle curve volumetriche desunte dai valori di deformazione acquisiti sulla superficie esterna è un effetto apparente dovuto all'apertura delle fessure. Utilizzando i valori di deformazione acquisiti internamente al nocciolo resistente, la curva volumetrica assume valori sempre negativi ed è, con buona approssimazione, lineare fino al carico massimo.

RINGRAZIAMENTI

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

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Daponte, P., Maceri, F., e 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., e 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., e Olivito, R. S.**, "Crack Detection Measurements in Concrete", *Proceedings of the ISMM International Conference Microcomputers Applications*, December 14-16, 1989, pp.123-127.
- [4] **Di Leo, A., Di Tommaso, A., e Merlari, R.**, "Danneggiamento per Microfessurazione di Malte di Cemento e Calcestruzzi Sottoposti a Carichi Ripetuti", *La Prefabbricazione*, N° 11, 1979, pp. 577-587.
- [5] **Ferretti, E., Viola, E., e Di Leo, A.**, "Comportamento Macroscopico in Compressione dei Calcestruzzi e Nuove Assunzioni Constitutive", *Atti del Congresso su "La Sicurezza delle Strutture in Calcestruzzo ad Alte Prestazioni"*, Progetto Nazionale Cofinanziato dal Murst – 1997-98, 11-12 Marzo 1999.

- [6] **Ferretti, E., Viola, E., e Di Leo, A.**, “Deduzione di Nuove Leggi Constitutive per il Calcestruzzo a partire dal Comportamento Macroscopico in Compressione”, *Nota Tecnica N° 24*, DISTART, Facoltà di Ingegneria di Bologna, Anno Accademico 1998-1999.
- [7] **Ferretti, E., e Carli, R.**, “Programma Sperimentale sul Comportamento in Compressione Monoassiale del Calcestruzzo – Parte I: Risultati Sperimentali”, *Nota Tecnica N° 25*, DISTART, Facoltà di Ingegneria di Bologna, Anno Accademico 1998-1999.
- [8] **Hadamard, J.**, “Leçons sur la Propagation des Ondes: Cap. VI”, Hermann et Cie, Parigi, 1903. (citato da Bazant e Cedolin, 1991).

SOMMARIO

1	GENERALITÀ	1
2	INTRODUZIONE.....	2
3	RISULTATI SPERIMENTALI.....	4
3.1.	RILIEVO DELLA SUPERFICIE DI CRACK PRINCIPALE	4
3.2.	VERIFICA DEL MECCANISMO DI CRISI IPOTIZZATO	6
3.3.	IDENTIFICAZIONE DEL LEGAME COSTITUTIVO DEL MATERIALE INTEGRO	9
3.3.1.	<i>Utilizzo dei parametri di danno microsismici e del parametro di danno energetico.....</i>	<i>9</i>
3.3.2.	<i>Utilizzo dell'analisi sulla variazione di resistività.....</i>	<i>13</i>
3.4.	INFLUENZA DELL'EFFETTO DIMENSIONALE SUL PARAMETRO DI DANNO	15
3.5.	IDENTIFICAZIONE DEL MODULO DI POISSON	17
3.6.	IDENTIFICAZIONE DELLA CURVA VOLUMETRICA.....	19
4	CONCLUSIONI.....	20
	RINGRAZIAMENTI	21
	BIBLIOGRAFIA	21

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 3.1.1. CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE PRIMA DELLA PROVA DI CARICO.....	5
FIGURA 3.1.2. CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE A PROVA DI CARICO ULTIMATA.	5
FIGURA 3.1.3. CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE DOPO L'ELIMINAZIONE DEL MATERIALE DEGRADATO.	5
FIGURA 3.1.4. CILINDRO TIPO 2 DELLA SECONDA SERIE DOPO L'ELIMINAZIONE DEL MATERIALE DEGRADATO.	6
FIGURA 3.1.5. CILINDRO TIPO 5 DELLA PRIMA SERIE DOPO L'ELIMINAZIONE DEL MATERIALE DEGRADATO.	6
FIGURA 3.1.6. CILINDRO TIPO 5 DELLA TERZA SERIE DOPO L'ELIMINAZIONE DEL MATERIALE DEGRADATO.	6
FIGURA 3.2.1. CURVE CARICO/DEFORMAZIONE RADIALE PER I CILINDRI TIPO 1 E 6: VALORI DI DEFORMAZIONE RADIALE ACQUISITI INTERNAMENTE AL NOCCIOLO RESISTENTE PER MEZZO DI FOS.	7
FIGURA 3.2.2. CONFRONTO FRA I VALORI DI DEFORMAZIONE RADIALE ACQUISITI INTERNAMENTE AL NOCCIOLO RESISTENTE E SULLA SUPERFICIE ESTERNA: CILINDRO TIPO 1.	7
FIGURA 3.2.3. CONFRONTO FRA I VALORI DI DEFORMAZIONE RADIALE ACQUISITI INTERNAMENTE AL NOCCIOLO RESISTENTE E SULLA SUPERFICIE ESTERNA: CILINDRO TIPO 6.	8
FIGURA 3.2.4. CURVE CARICO/DEFORMAZIONE RADIALE PER I CILINDRI TIPO 1 E 6: VALORI DI DEFORMAZIONE RADIALE ACQUISITI SULLA SUPERFICIE ESTERNA PER MEZZO DI ROSETTE ESTENSIMETRICHE.....	8
FIGURA 3.3.1.1. CURVE CARICO-ABBASSAMENTO RELATIVE ALLE PROVE DI CARICO SULLA PRIMA SERIE DI PROVINI.	9
FIGURA 3.3.1.2. CURVE CARICO-ABBASSAMENTO RELATIVE ALLE PROVE DI CARICO SULLA SECONDA SERIE DI PROVINI.	10
FIGURA 3.3.1.3. CURVE CARICO-ABBASSAMENTO RELATIVE ALLE PROVE DI CARICO SULLA TERZA SERIE DI PROVINI.	10
FIGURA 3.3.1.4. DECREMENTO DELLA PENDENZA MEDIA DEI CICLI DI SCARICO-RICARICO IN FUNZIONE DELL'ABBASSAMENTO: CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE.	11
FIGURA 3.3.1.5. CONFRONTO TRA LE CURVE DEL DECREMENTO DI AREA RESISTENTE PERCENTUALE DERIVATE DAL PARAMETRO DI DANNO ENERGETICO, NEI DUE CASI DI PENDENZA MEDIA COSTANTE E PENDENZA MEDIA VARIABILE DEL RAMO DI SCARICO-RICARICO.	12
FIGURA 3.3.1.6. CONFRONTO TRA LE CURVE COSTITUTIVE EFFETTIVE DERIVATE DAL PARAMETRO DI DANNO ENERGETICO, NEI DUE CASI DI PENDENZA MEDIA COSTANTE E PENDENZA MEDIA VARIABILE DEL RAMO DI SCARICO-RICARICO.	12
FIGURA 3.3.1.7. IDENTIFICAZIONE DELLA CURVA MEDIA TENSIONE/DEFORMAZIONE AL VARIARE DELLA GEOMETRIA DEI PROVINI E RELATIVO CAMPO DI DISPERSIONE DI RISULTATI.	13
FIGURA 3.3.2.1. VARIAZIONE COL CARICO DELLA RESISTIVITÀ NEL CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE.....	14
FIGURA 3.4.1. CURVE DEL DECREMENTO DI AREA RESISTENTE PERCENTUALE RELATIVE ALLE PROVE DI CARICO SULLA PRIMA SERIE DI PROVINI.....	15
FIGURA 3.4.2. CURVE DEL DECREMENTO DI AREA RESISTENTE PERCENTUALE RELATIVE ALLE PROVE DI CARICO SULLA SECONDA SERIE DI PROVINI.....	16
FIGURA 3.4.3. CURVE DEL DECREMENTO DI AREA RESISTENTE PERCENTUALE RELATIVE ALLE PROVE DI CARICO SULLA TERZA SERIE DI PROVINI.	16
FIGURA 3.5.1. CURVE $\varepsilon_r / \varepsilon_l$ PER IL CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE.	17
FIGURA 3.5.2. CURVE $\varepsilon_r / \varepsilon_l$ PER IL CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE.	18
FIGURA 3.6.1. CURVE VOLUMETRICHE PER IL CILINDRO TIPO 1 DELLA TERZA SERIE.	19
FIGURA 3.6.2. CURVE VOLUMETRICHE PER IL CILINDRO TIPO 6 DELLA TERZA SERIE.	20