

DISPOSITIVI DI PROVA PER L' ANALISI SPERIMENTALE  
DEL COMPORTAMENTO DI CONGLOMERATI CEMENTIZI  
SOTTOPOSTI A STATI TRIASSIALI DI SOLLECITAZIONE

Gerardo Ferrara (^) - Pio Rossi (^)

Pier Paolo Rossi (^) - Luigi Ruggeri (^)

(^) Centro Ricerca Idraulica e Strutturale - DSR - ENEL - Milano

(^) ISMES - Istituto Sperimentale Modelli e Strutture - Bergamo

## SOMMARIO

Nell' ambito di un più vasto programma di ricerca che l' ENEL - CRIS ha in corso da alcuni anni sul comportamento di conglomerati cementizi sottoposti a stati pluriassiali di sollecitazione, presso l' ISMES di Bergamo, in collaborazione con il Servizio Materiali del CRIS, sono stati progettati e messi a punto due dispositivi per l' esecuzione di prove triassiali su campioni cilindrici di dimensione  $\phi = 160$  mm ed  $H = 320$  mm.

I due dispositivi consentono di applicare al campione, in modo completamente indipendente e programmabile, un contenimento radiale di tipo idrostatico unito ad una sollecitazione assiale rispettivamente di trazione e di compressione.

Il comportamento deformativo del provino viene rilevato mediante l' impiego di un' apposita strumentazione di misura che fa uso di trasduttori induttivi di spostamento.

Nella presente nota, oltre ad una dettagliata descrizione delle due apparecchiature e dei dispositivi di misura adottati, vengono riportati ed illustrati alcuni dei risultati sin qui ottenuti.

## ABSTRACT

Two equipments for triaxial tests on  $\phi 160$  H 320 mm concrete cylinders including deformation measuring system provided with inductive transducers are described.

These triaxial cells enable to span the compression-compression-compression and compression-compression-tension zone of the failure surface applying on the specimens hydrostatic confining pressure and axial compressive or tensile load respectively throughout rigid steel platens.

Some interesting results of the investigation made on concrete specimens by means of the above described equipments are reported.

This work jointly performed by ISMES (Experimental Institute for Models and Structures, Bergamo) and by the Material Service of Hydraulic and Structural Research Centre of DSR - ENEL (Milano) belongs to a wider ENEL research programme on the triaxial behaviour of concrete.

# DISPOSITIVI DI PROVA PER L' ANALISI SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO DI CONGLOMERATI CEMENTIZI SOTTOPOSTI A STATI TRIASSIALI DI SOLLECITAZIONE

Gerardo Ferrara (^) - Pio Rossi (^)

Pier Paolo Rossi (^) - Luigi Ruggeri (^)

## I - INTRODUZIONE

Il Servizio Materiali del Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale della DSR dell' ENEL svolge da oltre un decennio [1, 2] un intenso programma di ricerche sul comportamento deformativo ed a rottura di calcestruzzi sottoposti a stati complessi di sollecitazione.

Le ricerche, connesse inizialmente all' impiego del calcestruzzo nella costruzione di dighe ad arco, presentano attualmente un fondamentale interesse per i contenitori in cemento armato precompresso per reattori nucleari e per altri elementi costruttivi di particolare impegno strutturale.

In effetti, la necessità sempre più frequente di operare con stati di sollecitazione complessi sfruttando al massimo le possibilità dei materiali senza rinunciare ad un elevato grado di sicurezza, ha spinto molti ricercatori ad approfondire gli studi sul comportamento del calcestruzzo nel campo delle sollecitazioni pluriassiali. L' assenza di teorie adeguate sufficientemente esatte e complete, valide per tutte le situazioni reali possibili, ha indotto i progettisti e gli ingegneri civili impegnati in opere di grande importanza e responsabilità, a tenere sempre più in considerazione i risultati della ricerca sperimentale.

Fra i molteplici problemi connessi con la realizzazione di un' opera in cemento armato, particolare importanza riveste quello della valutazione della sua sicurezza, non soltanto rispetto al collasso definitivo ma anche rispetto alla perdita della funzionalità dell' opera stessa in relazione ai compiti che la struttura è chiamata ad assolvere [5]. E' evidente, quindi, l' importanza di acquisire la più completa conoscenza possibile del comportamento fino a rottura del calcestruzzo sotto l' azione di uno stato qualsiasi di sollecitazione applicato.

Particolare significato acquista, per la definizione dei limiti estremi d' impiego del materiale, la rappresentazione nello spazio delle tensioni principali  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , assunte come sistema di riferimento cartesiano ortogonale, della cosiddetta superficie di rottura del calcestruzzo.

---

(^) Centro Ricerca Idraulica e Strutturale - DSR - ENEL - Milano

(^) ISMES - Istituto Sperimentale Modelli e Strutture - Bergamo

Tale superficie di rottura è il luogo geometrico dei punti rappresentativi di tutte le combinazioni delle tensioni principali  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , in grado di provocare la rottura del materiale.

In precedenti memorie [3, 4] è già stato riferito sui risultati di una serie di esperienze eseguite presso il CRIS su provini cubici da 10 e 16 cm di lato nella zona compressione-compressione-compressione attr verso le quali si è pervenuti alla definizione della superficie di rottura per la suddetta zona. L' utilità di estendere la determinazione di detta superficie anche nella zona compressione-compressione-trazione ha portato al la realizzazione presso l' ISMES, su richiesta dell' ENEL - DSR, di un nuovo dispositivo in grado di applicare a campioni cilindrici una tensione principale di trazione. D' altro canto, la necessità di valutare l' influenza della dimensione e forma del campione (anche in considerazione della grandezza degli aggregati impiegati) sui risultati già acquisiti per i provi ni cubici, ha consigliato la realizzazione parallela di un ulteriore disposi tivo triassiale di compressione su cilindri della stessa dimensione ( $\phi$  160, H 320 mm).

Nella presente nota, oltre ad una dettagliata descrizione delle due apparecchiature di prova e dei dispositivi di misura adottati, vengono ri portati ed illustrati brevemente alcuni risultati conseguiti.

## II - DESCRIZIONE DEI DISPOSITIVI DI PROVA

I due dispositivi illustrati nella presente nota, consentono di applli care a campioni cilindrici di diametro  $\phi = 160$  mm e altezza  $H = 320$  mm un contenimento radiale di compressione di tipo idrostatico ed una solleci tazione assiale rispettivamente di trazione e di compressione.

### II.1 - Attrezzature per l' applicazione dei carichi

Il dispositivo di prova triassiale per l' applicazione al campione di una componente assiale di trazione ( $\sigma_1 < 0$ ) e contenimento radiale di compressione  $\sigma_2 = \sigma_3 \geq 0$  è illustrato in fig. 1. Il carico di contenimen to è applicato al provino per mezzo di liquido in pressione, fino ad un valo re massimo di  $400 \text{ Kg/cm}^2$ , mentre la componente assiale viene fornita da un martinetto idraulico ricavato sulla parte superiore della camera di prova. La sollecitazione assiale di trazione viene trasmessa al campione per mezzo di tiranti in acciaio collegati, tramite snodi sferici, a teste me talliche incollate alle basi del campione. L' incollaggio viene eseguito me diante resine epossidiche dopo accurata operazione di pulitura delle super fici del conglomerato.

La zona di contatto tra provino e teste metalliche ha richiesto uno studio accurato. In particolare si è inteso evitare che, a causa della di versa deformabilità del calcestruzzo e dell' acciaio, potessero insorgere, per azione del carico di contenimento, delle sollecitazioni di taglio tali da provocare la rottura del provino in prossimità delle superfici incollate.

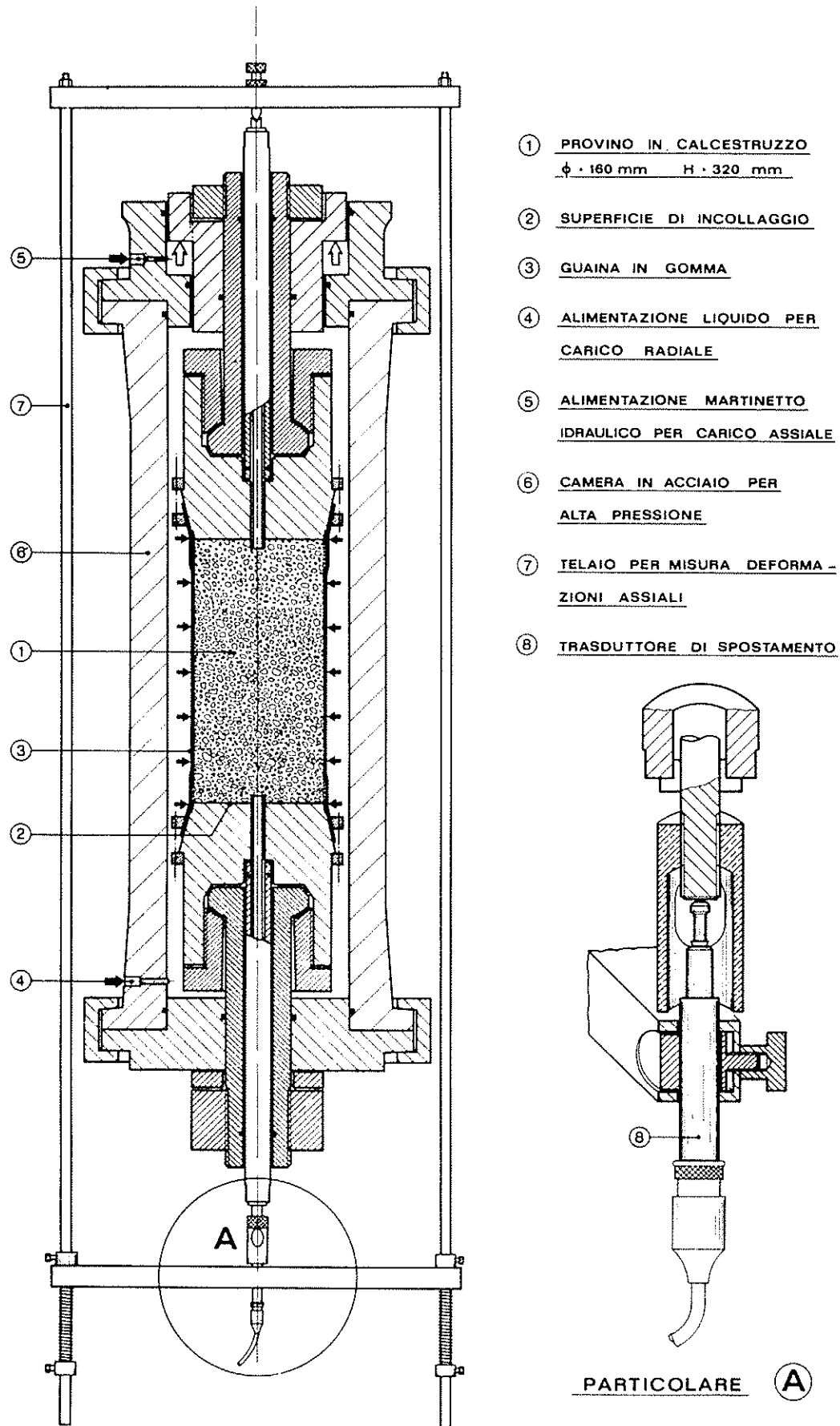


Fig. 1 Schema dell' attrezzatura per prove triassiali del tipo:  
 COMPRESSIONE - COMPRESSIONE - TRAZIONE

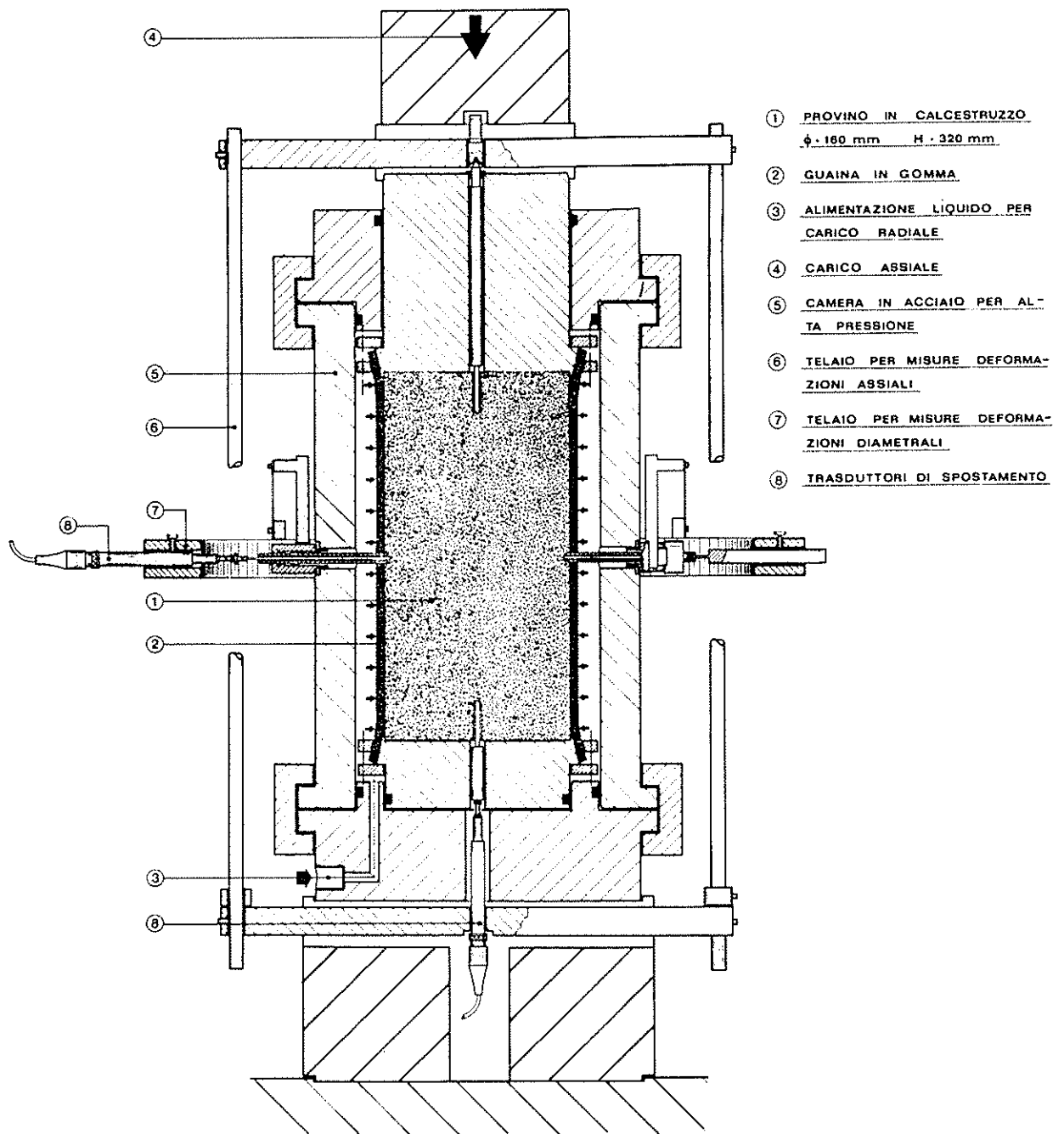


Fig. 2 Schema dell' attrezzatura per prove triassiali del tipo: COMPRESSIONE - COMPRESSIONE - COMPRESSIONE

Dopo una serie di esperienze preliminari questo problema è stato risolto in modo più che soddisfacente proteggendo le parti terminali del provino mediante anelli metallici a sezione variabile appositamente studiati.

La superficie laterale del provino soggetta all' azione del carico di contenimento, dopo un' accurata sabbiatura e stuccatura, viene protetta da una membrana in gomma tenera dello spessore di 5 mm che ha lo scopo di evitare effetti di permeazione del liquido in pressione all' interno del conglomerato.

Occorre rilevare inoltre che la geometria della camera è stata studiata in modo da evitare che il liquido in pressione, utilizzato per l' applicazione del contenimento radiale, induca nel campione sollecitazioni assiali di tipo parassitario sia pure di lieve entità.

In fig. 2 è illustrato invece il dispositivo per l' esecuzione di prove di compressione triassiale. Il contenimento radiale è applicato al provino mediante liquido in pressione, fino ad un valore massimo di  $400 \text{ Kg/cm}^2$ , in modo analogo a quanto in precedenza descritto. La componente assiale di compressione è fornita da un martinetto idraulico in grado di applicare al provino una sollecitazione massima di circa  $2500 \text{ Kg/cm}^2$ . Un rigido telaio di contrasto completa l' attrezzatura di carico.

In entrambi i dispositivi di prova, le componenti di sollecitazione sono applicate in modo programmabile mediante l' impiego di centrali oleodinamiche a regolazione automatica del carico.

## II. 2 - Strumentazione

I dispositivi di misura installati sulle camere di prova costituiscono la parte più interessante ed originale dell' attrezzatura in quanto consentono di seguire i processi deformativi del provino durante l' intero arco dell' esperienza fino a rottura.

In entrambe le camere le deformazioni assiali vengono rilevate attraverso la misura dello spostamento relativo di due punti interni del provino posti lungo il suo asse in prossimità delle teste. In corrispondenza di tali punti vengono fissate astine metalliche rigide, le quali, dopo aver attraversato parte dei dispositivi di carico della camera, fanno capo ad un telaio metallico su cui è montato un trasduttore di spostamento (figg. 1, 2). Nelle prove di compressione-compressione-compressione i suddetti punti di riferimento per la misura delle deformazioni vengono ricavati nel provino ad una maggior profondità dalle teste in modo da evitare che le misure possano essere interessate dalle perturbazioni che si sviluppano in prossimità delle superfici di carico (fig. 2).

Relativamente a quest' ultimo tipo di prova si è in grado di eseguire anche misure di deformazione diametrale del campione utilizzando allo scopo il dispositivo illustrato in fig. 2. In corrispondenza di due punti diametralmente opposti della sezione mediana del provino vengono fissate due sottili astine metalliche le quali attraversano la parete della camera e fanno capo ad un trasduttore di spostamento montato su un telaio metallico rigido.

Accurate operazioni di taratura hanno permesso di verificare che i dispositivi adottati consentono di effettuare misure di spostamento con sensibilità dell'ordine del micron.

L'inserimento di trasduttori di pressione nei circuiti idraulici di alimentazione delle due camere rende inoltre possibile la registrazione continua delle deformazioni in funzione delle sollecitazioni applicate nel corso della prova.

### III - RISULTATI SPERIMENTALI

#### III.1 - Stati tensionali di rottura

Per meglio illustrare i risultati ottenuti con i dispositivi di prova sopra descritti, si è fatto ricorso alla loro rappresentazione nello spazio delle tensioni principali  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  con la convenzione di assumere valori positivi per le compressioni e negativi per le trazioni. Si è utilizzato in particolare il piano individuato da uno degli assi di riferimento ( $\sigma_1$ ) e dalla bisettrice degli altri due ( $\sqrt{2} \cdot \sigma_2 = \sqrt{2} \cdot \sigma_3$ ) venendo in tal modo a determinare una sezione meridiana della superficie di rottura del materiale.

Di tale sezione meridiana le esperienze effettuate con l'apparato di compressione triassiale consentono di costruire, per un tratto significativo, la parte di curva relativa agli stati tensionali di tipo:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \geq 0$$

L'andamento di tale braccio di curva, ottenuta sperimentalmente su di un calcestruzzo di laboratorio, è riportato in fig. 3. Ciascun punto sperimentale è stato ottenuto raggiungendo dapprima con sollecitazione di tipo isotropo ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) il livello di carico prefissato per il contenimento radiale ed incrementando successivamente la sola componeute assiale ( $\sigma_1$ ) fino a rottura del provino.

Anche i risultati ottenuti con l'altro apparato di prova triassiale capace di sottoporre il provino a stati tensionali tipo:

$$\sigma_1 \leq 0 \leq \sigma_2 = \sigma_3$$

sono rappresentati in modo analogo nella curva di fig. 4, ottenuta sperimentalmente su un calcestruzzo di laboratorio. In questo caso si è pervenuti allo stato di rottura incrementando dapprima il carico di contenimento laterale fino al valore prefissato ed applicando successivamente la componeute di trazione. Per ciascun valore del carico di contenimento radiale sono state eseguite 4 prove di cui sono rappresentati in fig. 4 i valori medi e le relative deviazioni standard.

Nelle figg. 3 e 4 è inoltre indicata con linea tratteggiata la successione degli stati tensionali applicati al provino.



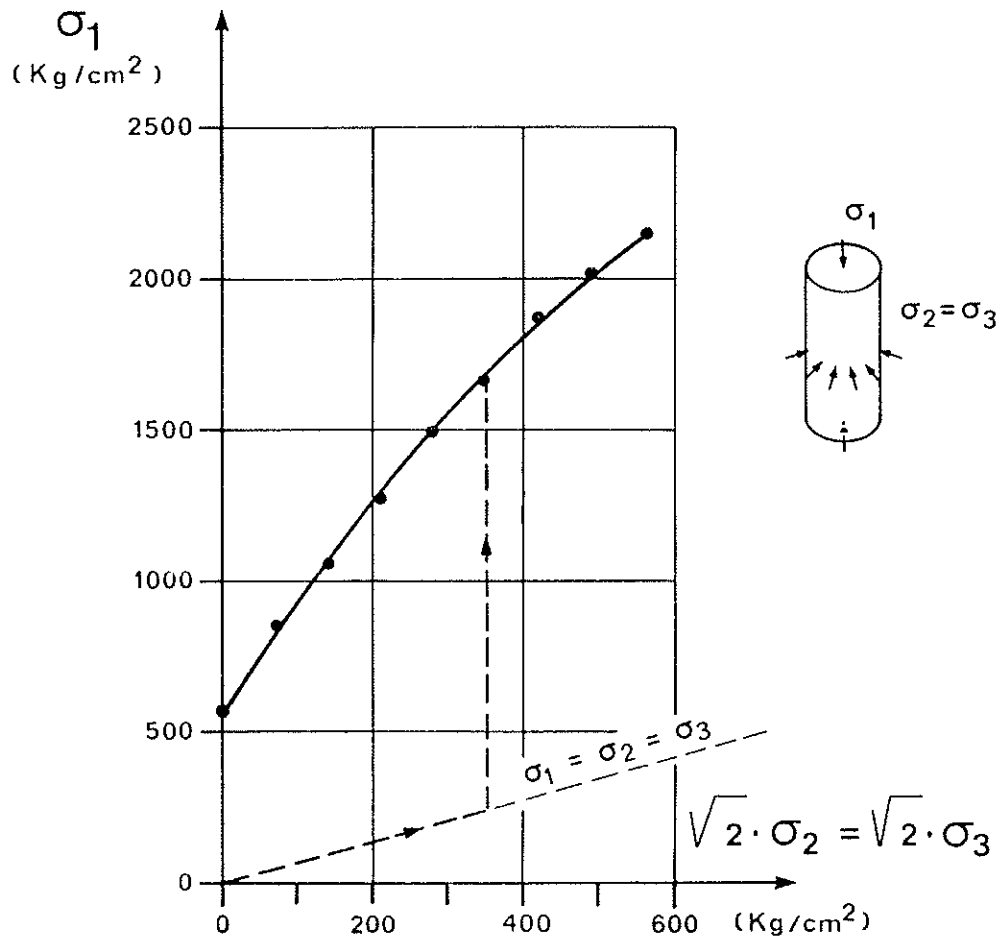


Fig. 3 Sezione meridiana della superficie di rottura nella zona: COMPRESSIONE-COMPRESSIONE-COMPRESSIONE

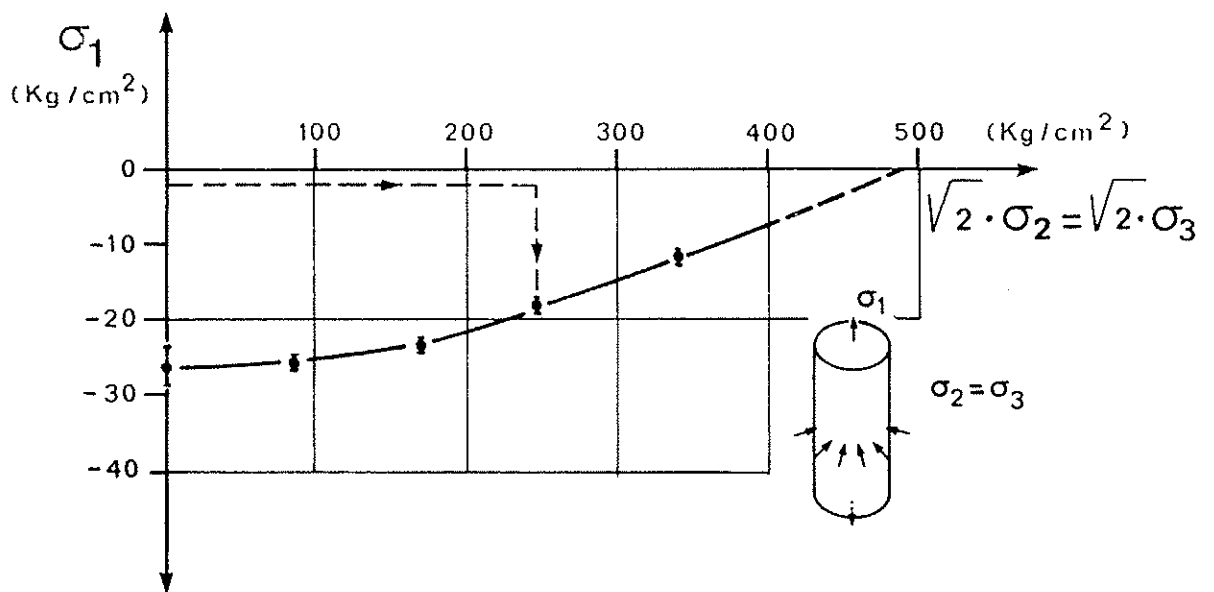


Fig. 4 Sezione meridiana della superficie di rottura nella zona: TRAZIONE-COMPRESSIONE-COMPRESSIONE

### III. 2 - Deformazioni

Come già si è avuto occasione di riferire, è possibile rilevare durante l'intero arco della prova, fino a rottura, lo stato deformativo del provino.

In fig. 5 si riportano le curve delle deformazioni registrate nel corso delle prove del tipo compressione-compressione-compressione già descritte al punto III. 1 .

In funzione del valore della tensione principale  $\sigma_1$  sono rappresentate le deformazioni assiali ( $\epsilon_1$ ) e quelle diametrali ( $\epsilon_2 = \epsilon_3$ ) per diversi valori del carico di contenimento radiale con la convenzione di assumere valori negativi per le dilatazioni.

Analoghe rappresentazioni sono possibili relativamente alle prove del tipo compressione-compressione-trazione.

I dispositivi di prova messi a punto, in virtù della versatilità del sistema di applicazione dei carichi, consentono inoltre di studiare il comportamento deformativo del calcestruzzo in funzione della velocità di applicazione dei carichi e della successione degli stati tensionali applicati.

A titolo di esempio si riportano in fig. 6 i diagrammi delle deformazioni assiali ( $\epsilon_1$ ) relativi a due prove di compressione - compressione-trazione eseguite con modalità diverse sullo stesso tipo di calcestruzzo. Per ciascuna prova il diagramma si compone di due parti che si riferiscono rispettivamente all'applicazione del solo carico di contenimento radiale ed alla successiva applicazione della componente di trazione.

La prova relativa alla curva A è stata eseguita con velocità di incremento delle sollecitazioni pari a  $0,5 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  applicando la componente di trazione immediatamente dopo aver raggiunto il valore prefissato del contenimento radiale. La prova relativa alla curva B è stata invece eseguita con velocità di incremento delle sollecitazioni pari a  $10 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{s}$  ed il carico di contenimento radiale è stato mantenuto costante al valore prefissato di  $240 \text{ Kg/cm}^2$  per un tempo pari a circa 500 s prima dell'applicazione della componente di trazione. In tal modo la durata complessiva delle due prove è risultata all'incirca uguale. Nella stessa figura è riportato pure l'andamento delle deformazioni  $\epsilon_1$  nel tempo a carico di contenimento costante.

L'esempio illustrato mette tra l'altro chiaramente in luce come, a causa delle peculiari caratteristiche del calcestruzzo, i risultati delle prove siano strettamente legati alle modalità di esecuzione delle stesse.

### IV - CONCLUSIONI

Le prime esperienze eseguite per la messa a punto delle due apparecchiature qui descritte hanno permesso di formulare un giudizio più che positivo sia per quanto riguarda la versatilità dei sistemi di applicazione dei carichi, sia per la buona affidabilità della strumentazione di misura delle deformazioni.

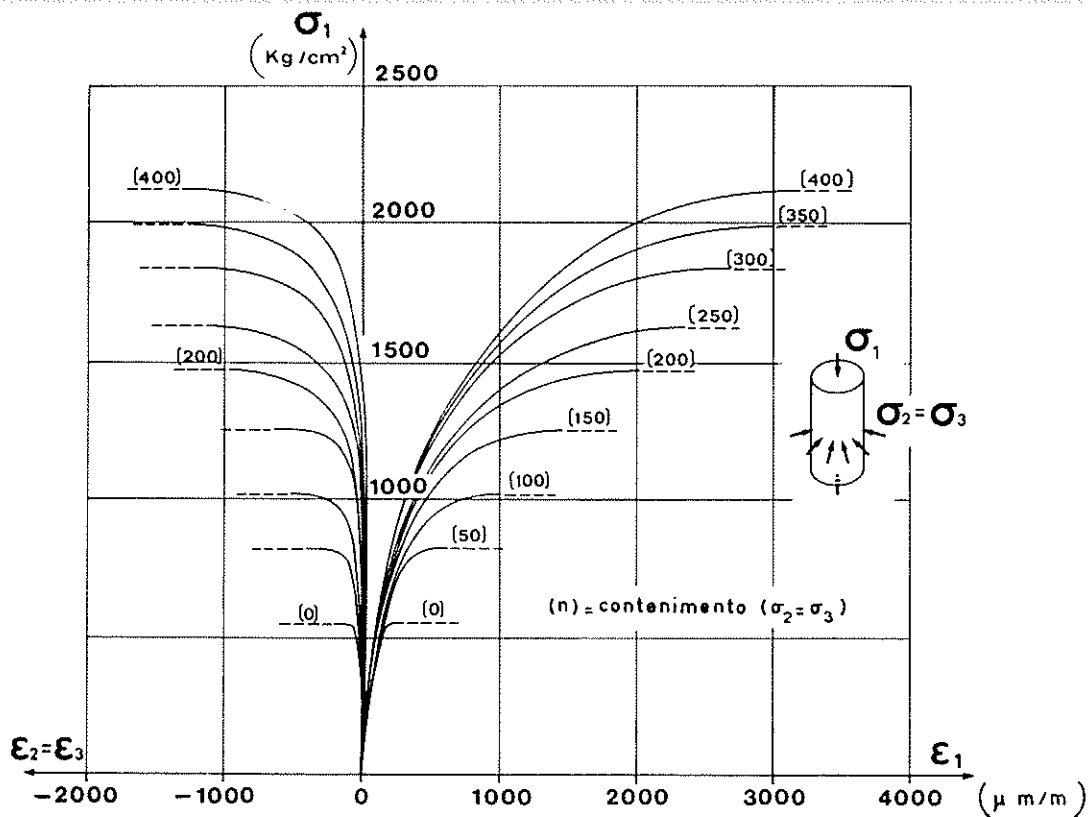


Fig. 5 Curve delle deformazioni relative a prove del tipo: compressione - compressione - compressione ottenute per divers. valori del contenimento radiale.

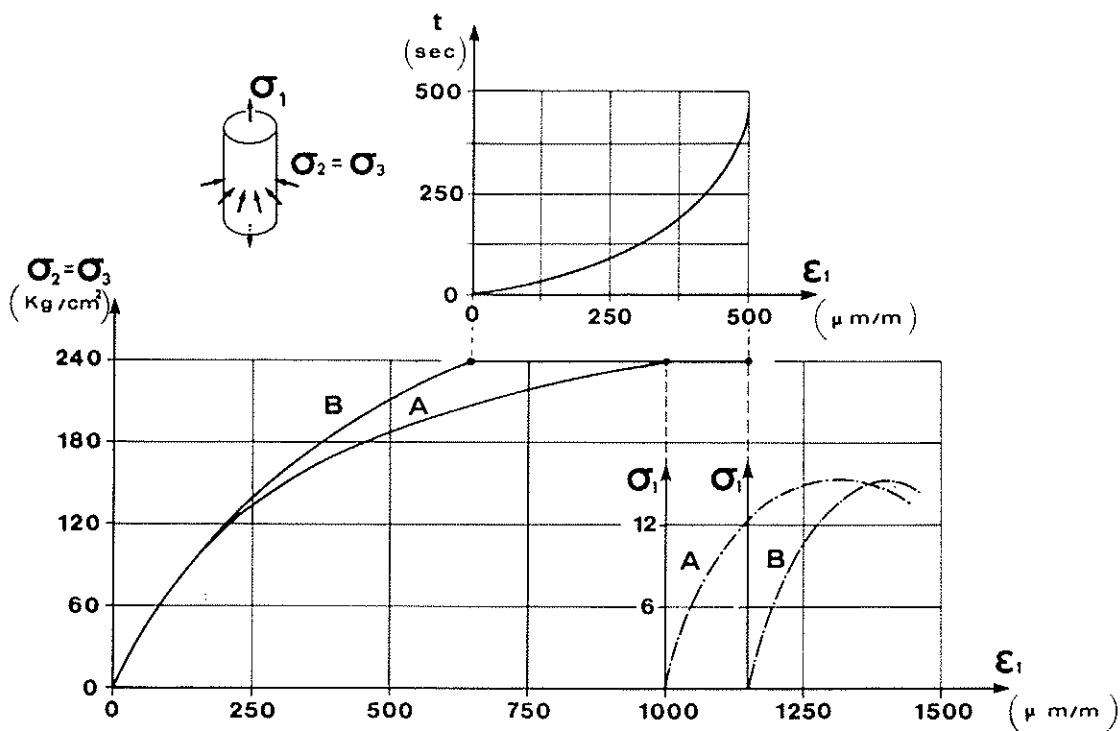


Fig. 6 Prove del tipo: compressione - compressione - trazione. In fluenza delle modalità di applicazione dei carichi sul comportamento deformativo del calcestruzzo.

Affiancandosi alle attrezzature già in uso presso il Servizio Materiali del CRIS, i dispositivi descritti, oltre a consentire di estendere la determinazione della superficie di rottura anche alla zona compressione - - compressione - trazione, costituiscono un valido strumento per approfondire lo studio del comportamento del calcestruzzo sottoposto a stati pluriassiali di sollecitazione in funzione di importanti parametri quali ad esempio la stagionatura, gli aggregati impiegati, la dimensione e forma del provino e le modalità di applicazione dei carichi.

## V - BIBLIOGRAFIA

- [ 1 ] BERTACCHI P.: "Behaviour of concrete under combined loads; a comparison of the concrete shearing strength value obtained from direct tests with the values determined from triaxial tests"  
Eighth International Congress on Large Dams - Edinburgh 1964 - Vol. III - p. 279.
- [ 2 ] FUMAGALLI E.: "Caratteristiche di resistenza dei conglomerati cementizi per stati di compressioni pluriassiali"  
Bollettino ISMES n. 30 - Ottobre 1965.
- [ 3 ] BERTACCHI P., BELLOTTI R.: "Experimental research on deformation and failure of concrete under triaxial loads" e nota complementare - RILEM International Symposium  
Cannes - October 1972 - 12, Vol. I - p. 37-52, Vol. IV, p. 54-65.
- [ 4 ] ROSSI P., BELLOTTI R.: "Comportamento del calcestruzzo sottoposto a sollecitazioni pluriassiali: indagini sperimentali per la determinazione della superficie di rottura (Failure surface)"  
Relazione n. 167 Serie Verde ENEL Giugno 1973.
- [ 5 ] BELLOTTI R., ROSSI P.: "New prospects for evaluating the degree of safety in concrete structures subjected to multi-axial stresses"  
IABSE Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses - ISMES Bergamo - May 1974 paper III-5.