

DETERMINAREA CURBEI CARACTERISTICE COMPLETE A BETONULUI LA COMPRESIUNE

ESTABLISHING THE COMPLETE CHARACTERISTIC CURVE OF CONCRETE LOADED IN COMPRESSION

MIHAI BUDESCU, PETRU MIHAI, NICOLAE ȚĂRANU*, IRINA LUNGU,
OANA-MIHAELA BANU, IONUȚ-OVIDIU TOMA

¹Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, Str. D. Mangeron 1, Iași, 700050, România

În lucrare se prezintă un studiu referitor la comportarea la compresiune a betonului după atingerea tensiunii maxime, utilizând un sistem inovativ, conceput și brevetat la Facultatea de Construcții și Instalații din Iași. Sistemul mecanic proiectat se atașează la mașina universală de încercat, controlând viteza de deformare după atingerea tensiunii maxime. Sunt prezentate bazele teoretice ale sistemului adițional care se atașează la mașina de încercat, alcătuirea fizică a acestuia și utilizarea ansamblului propus la încercarea betonului, pentru stabilirea curbei caracteristice complete. În finalul lucrării este prezentat un studiu experimental extins privind determinarea curbei caracteristice complete pe o serie de cilindri din beton. Se formulează, de asemenea, recomandări privind valoarea tensiunii pentru care informațiile obținute sunt relevante pentru determinarea capacității de disipare a energiei.

The paper presents a study on the concrete compression behaviour in the post-peak range, utilising an innovative system, conceived and patented at the Faculty of Civil Engineering and Building Services from Iasi. The designed mechanical system is attached to the universal testing machine and controls the deformation rate after reaching the peak stress. The theoretical bases related to this additional system are presented, along with its design and utilisation to the concrete testing aiming to determine the complete characteristic curve. The paper is finalised with a presentation of an extended experimental study related to the complete characteristic curve, determined by testing a series of concrete cylindrical specimens. A particular value of the stress relevant to the evaluation of the energy dissipation capacity is finally recommended.

Keywords: loading rate, specimen stiffness, displacement control, post-peak range

1. Introducere

Rezultatele încercărilor experimentale pe epruvete sau elemente de construcție în domeniul inelastic sunt adesea puse sub semnul întrebării datorită energiei potențiale acumulate în sistemele de acționare care se degajă brusc atunci când apar primele pierderi de capacitate portantă a acestora. Efectul degajării bruște a energiei potențiale se materializează prin modificarea vitezei de încercare care este un parametru esențial în cazul oricărei încercări experimentale. Încercările experimentale uzuale au ca reper determinarea capacității portante maxime și nu comportarea inelastică, foarte importantă atunci când se analizează sistemele structurale supuse acțiunii seismice pentru care trebuie să țină seama de capacitatea de deformare postelastice.

Cercetările experimentale desfășurate de-a lungul timpului privind comportarea materialului au demonstrat o influență importantă a vitezei de încărcare asupra răspunsului unui sistem, sau element de încercat, fie că este vorba de o simplă epruvetă sau un element structural. Explicații sunt

1. Introduction

The results of the experimental tests on specimens or construction members in the post-peak range are often questionable due to the strain energy stored within the acting systems that is suddenly released when the first loss in their bearing capacity occurs. The effect of the sudden release of the strain energy is perceived by the modification of the loading rate that is an essential parameter of any experimental test. The regular experimental tests are aiming to the determination of the maximum bearing capacity neglecting the post-peak behaviour, that is actually very important when performing the structural analysis on framing systems subjected to seismic action that have to consider the post-peak deformation capacity.

The experimental investigations carried out until now, on material behaviour have shown that the loading rate has an important influence on the response of a system or a specimen, either when related to a simple testing sample or a structural member. There are many explanations, some clarified and other still questionable, but most of

* Autor corespondent/Corresponding author,
E-mail: taranu@ce.tuiasi.ro

multe, unele elucidate altele nu, dar în marea lor majoritate modificările răspunsului sunt datorate, tipului de acțiune (statică, dinamică sau impact), răspunsului materialului și a sistemelor de acționare [1].

Un exemplu concludent privind efectul vitezei de încărcare [2], considerată în regim static, asupra răspunsului unui material este cel observat la încercarea betonului la compresiune [3], unde se constată că o creștere a vitezei de aplicare a deformației modifică substanțial forma curbei caracteristice cu efecte asupra modulului de elasticitate și a rezistenței la compresiune. Mai mult, cu cât viteza de încercare crește cu atât răspunsul unui sistem se modifică, rezistențele cresc spectaculos cu modificarea, în consecință, a caracteristicilor elastice și post elastice. În aceste condiții cercetările desfășurate în timp au introdus prin standarde condițiile de încercare pentru fiecare material în parte. Cu toate acestea, anumite aspecte legate de comportarea postelastice, mai ales a materialelor casante [4], sunt greu de obținut cu mașinile și sistemele de încercare obișnuite [5].

2. Surse ale erorilor la determinarea curbelor caracteristice ale materialelor

O mașină de încercat obișnuită este formată dintr-un cadru metalic, un sistem de acționare hidraulic sau mecanic și o serie de componente care asigură fixarea și transmiterea acțiunii la epruvetă. La mașinile de încercat moderne există un captor de forță și un sistem de înregistrare a deplasărilor dintre extremitățile zonei de fixare a epruvetei, care are și rolul de a asigura controlul asupra vitezei de aplicare a forței sau a deplasării.

Cele mai multe mașini de încercat controlează încercarea prin aplicarea unei rate constante a încărcării. Pentru încercările uzuale privind determinarea caracteristicilor mecanice în

them agree that the modifications of the response are caused by the type of action (static, dynamic or by impact), the material response and due to the loading equipment [1].

A relevant example related to the influence of the loading rate [2], considered in the static regime, on the material response is that of the concrete compression testing [3], where it can be observed that the loading rate increase significantly influences the shape of the characteristic curve that clearly determines the values of the modulus of elasticity and the compressive strength.

Moreover, as the loading rate increases, the system response modifies leading to a spectacular increase in the compressive strength and, as a consequence, of the elastic and post-peak properties. Under these conditions, experimentally determined loading rates have been set as guidelines in material testing codes. However, some features related to the post-peak behaviour especially of brittle materials [4], are difficult to be obtained using the current testing machines and systems [5].

2. Sources of errors in the determination of materials characteristic curves

The components of a common testing machine are: a steel frame, a hydraulic or mechanical loading system, and a series of additional components which ensure that the load is transmitted to the specimen and to its fixing parts. The modern testing machines are equipped with a loading cell and with a recording system of the displacements between the end fixing parts of the specimen; they can be also utilised to control the displacement or the force rate.

Most testing machines control the test by applying a constant loading rate. In case of

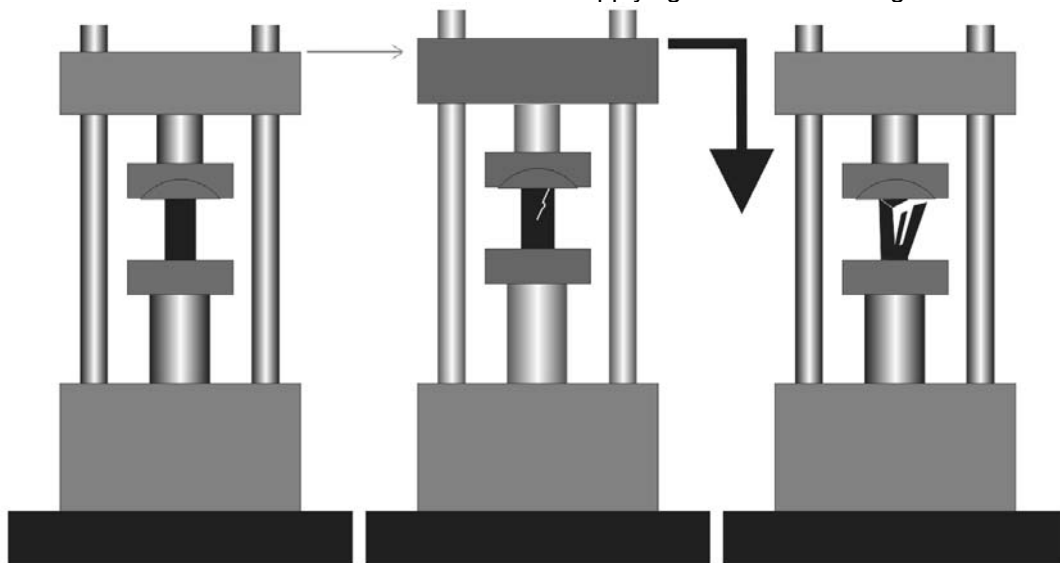


Fig. 1 - Cederea casantă a unei epruvete din beton în mașina de încercat / Brittle failure of a concrete specimen in the testing machine.

domeniul linear elastic, sau pentru determinarea rezistenței la compresiune, controlul asupra vitezei de aplicare a forței dă rezultate satisfăcătoare [6].

Cu toate acestea sunt multe situații, când la stabilirea caracteristicilor mecanice ale unor materiale nu este indicat controlul la nivelul forțelor [7], deoarece apar fenomene de instabilitate greu de controlat, iar rezultatele pot fi incerte [8]. Astfel, în cazul betonului de clasă medie și superioară se constată o cedare bruscă cu caracter exploziv a tuturor probelor experimentale (fig. 1).

Pentru stabilirea cauzelor care conduc la acest mod de cedare, ansamblul componentelor unei mașini de încercat se poate considera ca un sistem elastic reprezentat simplificat printr-un resort. Această abordare este adecvată deoarece toate componentele mașinii (cadru metalic, sistemul de acționare, hidraulic sau mecanic etc.), înmagazinează energie potențială în timpul încercării datorită forțelor care se dezvoltă în sistem.

Dacă avem în vedere și epruveta, în acest ansamblu se pot reprezenta simplificat cele două componente, mașina de încercat și epruveta ca două resorturi cuplate în serie (fig. 2a). În timpul unei încercări experimentale, în cele două resorturi se acumulează energie potențială [9]. Cantitatea de energie, precum și degajarea bruscă a acesteia influențează răspunsul epruvetei.

În aceste condiții se pot considera două sisteme, unul al ansamblului mașină – epruvetă, figura 2a și unul care se referă doar la epruvetă, figura 2b.

Viteza de aplicare a forței asupra epruvetei (v_e), ilustrată în figura 2b, se poate exprima în funcție de deformația epruvetei, (Δl_e), și de intervalul corespunzător duratei de încărcare, (t):

$$v_e = \frac{\Delta l_e}{t} \quad (1)$$

de unde :

$$t = \frac{\Delta l_e}{v_e} \quad (2)$$

common tests performed for the evaluation of the mechanical properties of materials in the linear-elastic range, or to determine the compressive strength, the loading rate control method provides satisfactory results [6].

However, there are many situations when for the determination of the mechanical properties of materials the force control method is not recommended [7], since some instability phenomena that cannot be easily controlled occur, leading to a poor accuracy of the experimental results [8]. For instance, in case of medium or high strength concrete, a sudden explosive failure of the specimens is observed, Figure 1.

To establish the causes of this type of failure, the components of a testing machine can be considered as an elastic system schematically represented as a spring. This approach is appropriate, since all the machine components (the steel frame, the hydraulic or mechanical loading system etc.) store strain energy during testing due to the forces developed within the system.

If the specimen is also considered, both the testing machine and the specimen can be represented as two serial springs, Figure 2a. During an experimental test, the strain energy will be stored by the two springs [9]. The amount of this strain energy and its sudden release affects the response of the specimen.

Under these circumstances, two systems can be considered, one representing the ensemble testing machine-specimen, Figure 2a and another one representing only the specimen, Figure 2b.

The loading speed (v_e) of the specimen, shown in Figure 2b, can be expressed as a function depending on the specimen axial deformation (Δl_e) and the corresponding loading time (t):

$$v_e = \frac{\Delta l_e}{t} \quad (1)$$

from which:

$$t = \frac{\Delta l_e}{v_e} \quad (2)$$

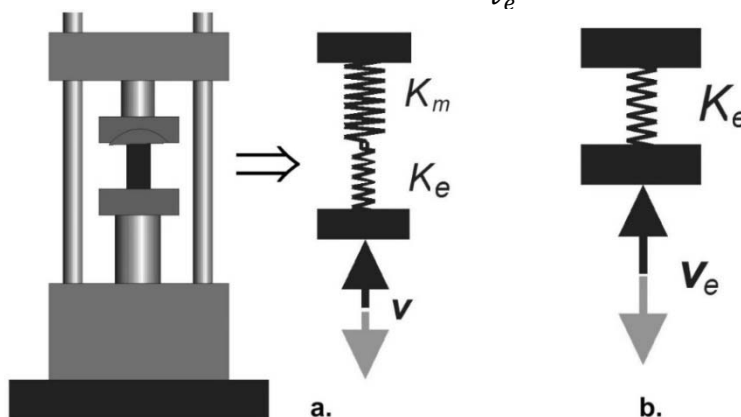


Fig. 2 - Modelul simplificat al ansamblului mașină de încercat-epruvetă / The simplified model of the ensemble of testing machine-specimen: a – rigiditatea și viteza de încărcare a ansamblului / the ensemble stiffness and the loading speed; b – rigiditatea și viteza de încărcare a epruvetei / the specimen stiffness and the loading speed.

Dacă se ia în considerare și apariția unei deformații a resortului ce definește componentele mașinii de încercat (Δl_m), viteza de aplicare a forței în ansamblul celor două componente, definite conform figurii 2a este:

$$v = \frac{\Delta l_e + \Delta l_m}{t} \quad (3)$$

de unde:

$$t = \frac{\Delta l_e + \Delta l_m}{v} \quad (4)$$

Înlocuind timpul (t) din expresia (2) în (4) rezultă:

$$\frac{\Delta l_e}{v_e} = \frac{\Delta l_e + \Delta l_m}{v} \quad (5)$$

adică:

$$v_e = v \frac{\Delta l_e}{\Delta l_e + \Delta l_m} \quad (6)$$

Dacă se consideră deplasările (Δl_e) și (Δl_m) corespunzătoare unei acțiuni egale cu unitatea se poate defini:

- rigiditatea epruvetei:

$$K_e = \frac{1}{\Delta l_e} \quad \text{din care } \Delta l_e = \frac{1}{K_e} \quad (7)$$

și,

- rigiditatea mașinii de încercat:

$$K_m = \frac{1}{\Delta l_m} \quad \text{din care } \Delta l_m = \frac{1}{K_m} \quad (8)$$

Astfel că expresia (5) poate fi scrisă sub forma:

$$v_e = v \frac{\frac{1}{K_e}}{\frac{1}{K_e} + \frac{1}{K_m}} \quad (9)$$

sau:

$$v_e = v \frac{1}{1 + \frac{K_e}{K_m}} \quad (10)$$

Din expresia (10) rezultă că viteza de aplicare a forței asupra epruvetei este funcție de viteza pe care o produce mașina de încercat și rigiditatea celor două componente, mașina de încercat și epruveta.

Atunci când rigiditatea epruvetei scade, datorită apariției fisurilor, sunt generate fenomene de instabilitate. Panta curbei tensiune-deformație specifică este descrescătoare, iar cele două rigidități devin egale și de semn contrar (fig. 3), adică:

Taking also into account the deformation that may occur in the spring representing the testing machine components (Δl_m), the loading speed for the system shown in Figure 2a can be defined as:

$$v = \frac{\Delta l_e + \Delta l_m}{t} \quad (3)$$

from which:

$$t = \frac{\Delta l_e + \Delta l_m}{v} \quad (4)$$

By equating the equations, (2) and (4), it follows:

$$\frac{\Delta l_e}{v_e} = \frac{\Delta l_e + \Delta l_m}{v} \quad (5)$$

that is:

$$v_e = v \frac{\Delta l_e}{\Delta l_e + \Delta l_m} \quad (6)$$

Assuming that (Δl_e) and (Δl_m) are the displacements caused by a unit load, one can define:

- the stiffness of the specimen:

$$K_e = \frac{1}{\Delta l_e} \quad \text{resulting} \quad \Delta l_e = \frac{1}{K_e} \quad (7)$$

and,

- the stiffness of the testing machine:

$$K_m = \frac{1}{\Delta l_m} \quad \text{resulting} \quad \Delta l_m = \frac{1}{K_m} \quad (8)$$

Thus, equation (5) can be expressed as:

$$v_e = v \frac{\frac{1}{K_e}}{\frac{1}{K_e} + \frac{1}{K_m}} \quad (9)$$

or:

$$v_e = v \frac{1}{1 + \frac{K_e}{K_m}} \quad (10)$$

From equation (10) it follows that the loading rate on the specimen depends on the speed provided by the testing machine and by the stiffness of the two components, the testing machine and the specimen.

When the stiffness of the specimen decreases, due to the occurrence of cracks, some instability phenomena may develop. The slope of the stress-strain curve becomes negative and the two stiffnesses become equal but opposite in sign, Figure 3, meaning that:

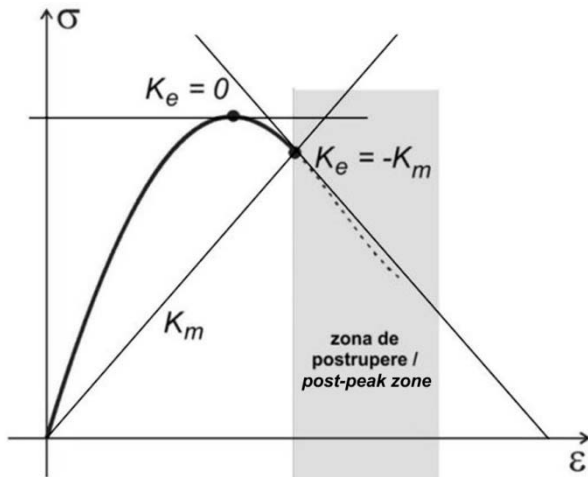


Fig. 3 - Curba caracteristică a betonului cu zona de instabilitate
The concrete stress-strain curve with the instability zone.

$$K_e = -K_m \quad (11)$$

Viteza de încărcare a epruvetei, dată de expresia (10) devine:

$$v_e = v \frac{1}{1 + \frac{-K_m}{K_m}} = v \frac{1}{1-1} = v \frac{1}{0} = \infty \quad (12)$$

În cazul încercării la compresiune a epruvetelor din beton cu rezistență mare, curba tensiune - deformație specifică (σ - ϵ) este mai puternic influențată [10]. Astfel relația (σ - ϵ), după atingerea valorii maxime, în așa-numita zonă de postrupere este semnificativ alterată ca urmare a creșterii bruște a vitezei de aplicare a încărcării datorate eliberării energiei potențiale acumulate în ansamblul mașinii de încercat. De aceea cu mașinile uzuale de încercat, la epruvetele standardizate din beton, zona de postrupere nu poate fi clar conturată, sistemele de preluare ale deplasărilor la nivelul epruvetei nemaifiind capabile să înregistreze date experimentale suficiente [11].

3. Soluții de eliminare a deficiențelor în determinarea curbei caracteristice

Corectarea acestor deficiențe poate fi obținută prin acumularea energiei potențiale din mașina de încercat în alte componente adiționale ale acesteia.

Evitarea eliminării bruște a energiei acumulate se poate realiza în două moduri:

- prin creșterea rigidității componentelor mașinii de încercat, astfel încât să se diminueze cantitatea de energie potențială acumulată;
- prin introducerea în paralel cu epruveta a unui sistem compensator format din două elemente cu rigiditatea adițională (K_a), care să suplinească pierderea capacității portante a epruvetei (fig. 4).

$$K_e = -K_m \quad (11)$$

The loading rate of the specimen, given by equation (10) becomes:

$$v_e = v \frac{1}{1 + \frac{-K_m}{K_m}} = v \frac{1}{1-1} = v \frac{1}{0} = \infty \quad (12)$$

In case of the compression test, for high strength concrete specimens, the stress-strain curve is even more influenced [10]. Therefore, the stress-strain relationship (σ - ϵ) is significantly altered after reaching the strength of the material, in the so called post-peak zone, by the sudden increase in the loading speed as a consequence of the release of strain energy stored by the testing machine. Thus the post-peak zone of the characteristic curve of concrete cannot be accurately obtained using the common testing machines, because the displacement measuring devices are no longer able to record enough experimental data [11].

3. Solutions to eliminate the deficiencies in the establishing the characteristic curve

The correction of such deficiencies can be achieved by storing the strain energy of the testing machine within some additional components.

Basically, the sudden release of the stored energy can be avoided by one of the following modes:

- by increasing the stiffness of the testing machine components so that the stored strain energy is diminished;
- by introducing a compensating system made of two elements, parallel to the specimen, with an additional stiffness (K_a), that substitute the loss of the bearing capacity of the specimen (Figure 4).

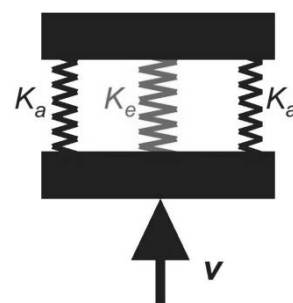


Fig. 4 - Introducerea sistemului compensator cu rigidități adiționale / Insertion of the compensating system with additional stiffnesses.

Cel de al doilea caz, care se referă la introducerea unor dispozitive adiacente, se poate analiza utilizând curba caracteristică a betonului [12]. Astfel, introducerea componentelor adiționale conduce la modificarea vitezei de aplicare a forței asupra epruvetei conform relației:

$$v_e = v \frac{1}{1 + \frac{K_e + K_a}{K_m}} \quad (13)$$

În felul acesta încercarea devine stabilă, viteza de încercare este ușor de controlat, indiferent dacă $K_e = 0$ sau $K_e = -K_m$, ceea ce înseamnă că energia înmagazinată în mașina de încercat nu se mai degajează necontrolat.

Această soluție de rezolvare a deficiențelor mașinilor de încercat se bazează pe principiul acumulării energiei potențiale din sistemele de încercare.

Producătorii mașinilor de încercat nu iau în considerare aspectele legate de acest principiu deoarece principalul interes al utilizatorilor este determinarea rezistenței materialelor [13] și nu sunt interesați de comportarea în așa-numitul domeniu post rupere. Acest domeniu este important doar în cazul sistemelor la care este necesară analiza în domeniul plastic, considerându-se capacitatea de disipare a energiei și ductilitatea [14].

La Facultatea de Construcții și Instalații, din Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, a fost conceput și brevetat [15] un dispozitiv care poate fi atașat unei mașini de încercat (fig. 5) și care permite determinarea curbei caracteristice complete a betonului la compresiune.

Principiul de funcționare constă în încărcarea celor doi cilindri hidraulici suplimentari cu o forță apropiată de capacitatea maximă a

The second case, referring to the insertion of some supplementary devices, can be analysed by using the characteristic curve of concrete [12]. Thus, by introducing the additional components, the loading speed of the specimen is changed as given by the next equation:

$$v_e = v \frac{1}{1 + \frac{K_e + K_a}{K_m}} \quad (13)$$

This way, the test becomes stable and the loading speed can be easily controlled even if $K_e = 0$ or $K_e = -K_m$, meaning that the stored strain energy of the testing machine will not be uncontrollably released.

This solution of solving the testing machine deficiencies is based on the strain energy principle applied to the testing systems.

The testing machines producers don't take into account the issues related to this principle because the main interest of the users is to obtain the strength of the materials [13] and they are not aware of the material behaviour in the so-called post-peak range. This domain is important only in the case of systems for which the analysis in the plastic range is required, when the energy dissipation capacity and materials' ductility are considered [14].

A special mechanical system was conceived at and patented [15] at the Faculty of Civil Engineering and Building Services, from the Technical University „Gheorghe Asachi” of Iasi; this device can be attached to a common testing machine (Fig. 5) and enables the establishing of the complete characteristic curve of concrete loaded in compression.

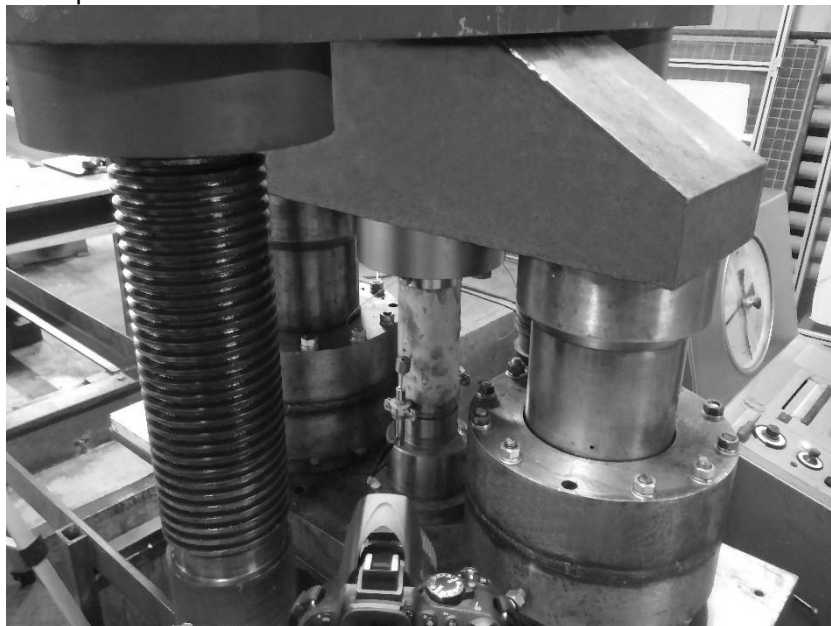


Fig. 5 - Dispozitivul brevetat folosit pentru determinarea curbei caracteristice complete / The patented device utilized to establish the complete characteristic curve.

mașinii de încercat. Ulterior între cei doi cilindri se introduce epruveta echipată cu traductorii de deplasare și un captor de forță. Prin intermediul unei valve de evacuare se elimină progresiv ulei din cei doi cilindri ai dispozitivului, iar o parte din forța preluată de aceștia este transferată epruvetei. Încercarea se desfășoară continuu, energia înmagazinată în sistem fiind preluată treptat de cei doi cilindri hidraulici.

4. Studiu de caz. Determinarea curbei caracteristice complete a betonului la compresiune

Pentru determinarea curbei caracteristice complete a betonului cu dispozitivul brevetat [15], în cadrul Facultății de Construcții și Instalații din Iași a fost realizat un program experimental pe un grup de 30 de probe cilindrice cu diametrul de 100 mm și înălțimea de 200 mm, realizate din beton de clasă C30/37. Întrucât modul de păstrare al epruvetelor înaintea testării [16] are o influență hotărâtoare asupra caracteristicilor finale ale betonului, probele au fost turnate și păstrate în conformitate cu normele în vigoare [17], iar încercarea acestora a fost efectuată la 28 de zile [18].

Sistemul de achiziție a datelor a fost compus dintr-un captor de forță și trei traductori inductivi pentru măsurarea deplasărilor montați pe generatoarea epruvetei la 120° pe circumferința acesteia.

Pentru evitarea influenței frecării care apare în zonelor de capăt ale epruvetei, într-o primă fază s-a decis ca traductorii inductivi să fie fixați direct de proba de beton cu ajutorul unor ploturi metalice (fig. 6a). În urma testelor preliminare s-a ajuns la concluzia că această soluție nu oferă informații viabile decât pentru partea ascendentă a curbei tensiune-deformație specifică. Apariția și dezvoltarea

The working principle consists of loading the two additional hydraulic cylinders with a load almost equal to the maximum capacity of the testing machine. After that, the concrete specimen equipped with a loading cell and displacement transducers is positioned between the two cylinders. By means of a release valve, the oil is gradually drained from the two cylinders, so that a part of the compressive load is transferred to the concrete specimen. This test is performed continuously, and the stored strain energy of the system is progressively taken over by the two hydraulic cylinders.

4. Case study. Establishing the complete characteristic curve of concrete loaded in compression

An experimental program has been performed at the Faculty of Civil Engineering and Building Services from Iasi on a set of 30 cylindrical specimens, made of C30/37 concrete, having the dimensions of 100mm by 200mm to establish the complete characteristic curve of the material by means of the patented system [15]. Since the specimens curing conditions before testing [16] play a critical role upon the concrete final characteristics, the specimens have been cast and cured in accordance with the standard recommendations [17], and the test has been carried out at the age of 28 days [18].

The data acquisition system consisted of a load cell and three LVDTs mounted on the specimen generatrix at 120° on the circumference of the cylindrical sample.

To avoid the influence of friction between the loading plates and the two ends of the specimen, it was decided first to fix the LVDTs directly on the concrete cylinder by means of steel plots, Figure 6a. After performing the preliminary

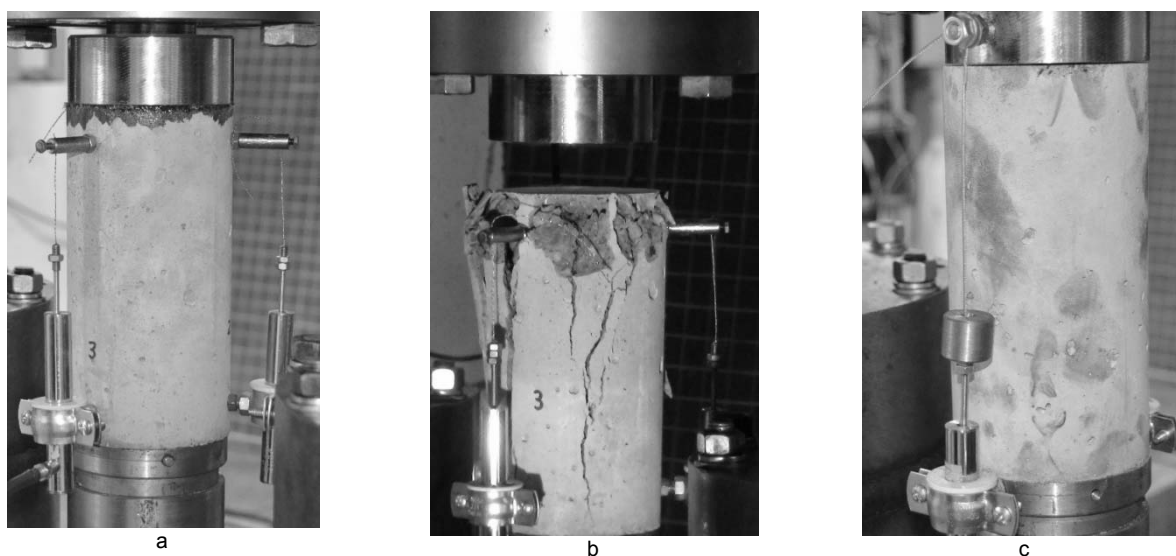


Fig. 6 - Moduri de fixare a traductorilor inductivi pe epruveta cilindrică / Modes of connecting the LVDTs on the cylindrical specimen: a, b - pe epruvetă / on the specimen; c - pe platanele preseii / on the testing machine plates.

țarea fisurilor influențează fixarea ploturilor, fapt ce conduce la obținerea unor date eronate, pe porțiunea descendentă a curbei caracteristice (fig. 6b).

Pentru a asigura achiziția adecvată a datelor experimentale s-a considerat necesară prinderea traductorilor de deplasare pe elementele mașinii de încercat, evitându-se astfel erorile de măsurare induse de apariția și dezvoltarea fisurilor în beton (fig. 6c). Pentru minimizarea influenței frecării platan-epruvetă, fețele superioare și inferioare ale probelor din beton au fost rectificat prin prelucrare mecanică [19].

Pentru a evidenția eficiența prelucrării mecanice a epruvetelor asupra influenței frecării, s-au efectuat teste comparative cu diferite modalități de prindere a traductorilor de deplasare. Astfel, un prim studiu a urmărit modul de variație a rezultatelor obținute cu traductorii fixați pe epruvetă la distanța de 160 mm, comparativ cu cele determinate pe probele cu traductorii fixați pe platanele presei la o distanță de 200 mm. Comparația s-a efectuat pe ramura ascendentă a curbei caracteristice până la apariția fisurilor.

Rezultatele acestui studiu de caz sunt ilustrate în figura 7, evidențiindu-se diferența extrem de redusă între valorile obținute prin cele două condiții de măsurare. Comparând deformațiile specifice determinate la atingerea tensiunilor maxime se constată că diferența este sub 2%. Se poate afirma că modul de prindere a traductorilor pe platanele presei nu influențează semnificativ rezultatele măsurătorilor dacă probele sunt prelucrate corespunzător la capete.

Un al doilea studiu efectuat pentru a analiza modul în care prinderea de platanele presei influențează rezultatele obținute pe probe prelucrate mecanic, a fost realizat cu ajutorul unui compresometru [20], distanța dintre punctele de măsurare fiind egală cu 135 mm (fig. 8a). Probele au fost echipate atât cu sistemul de achiziție a datelor prin traductorii montați pe platanele presei, cât și cu compresometrul (fig. 8b). Testarea

tests, it was concluded that this solution provides reliable information only for the ascending part of the stress-strain curve. The occurrence and development of cracks affects the connection of the plots, leading to inaccurate data on the descending part of the characteristic curve, Figure 6b.

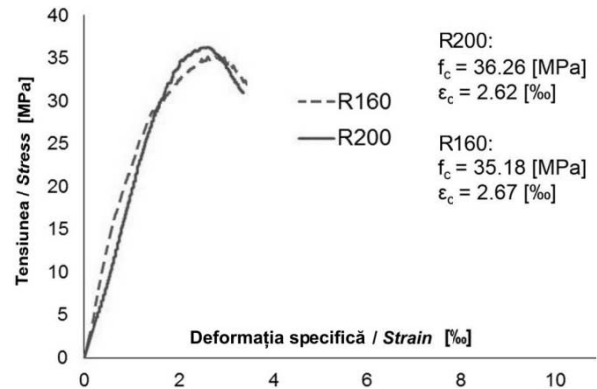


Fig. 7 - Rezultate obținute pentru diferite variante de fixare a traductorilor / Results determined for different connection modes of LVDTs.

To ensure an adequate data acquisition, the fixing of the LVDTs on the testing machine plates has been considered the most appropriate solution, thus avoiding the measuring errors induced by the occurrence and developing pattern of cracks in concrete, Figure 6c. The upper and bottom sides of the concrete specimens have been machined to mitigate the plate-sample friction influence [19].

The effectiveness of the specimen machining on the influence of friction has been proven by carrying out comparative tests with different modes of LVDTs connections. A first case study has been carried out to compare the results obtained with the LVDTs directly fixed on the specimen at a distance of 160 mm, with the ones recorded with



a



b

Fig. 8 - Montajul testării comparative / The comparative experimental set-up: a - compresometru / compressometer; b - epruveta echipată cu compresometru / the specimen instrumented with the compressometer.

epruvetelor s-a efectuat doar în prima jumătate a curbei caracteristice până la tensiunea maximă pentru a nu deteriora dispozitivul de măsurare.

Întrucât rezultatele obținute prin cele două sisteme de măsurare au fost similare (fig. 9), se poate afirma că, după prelucrarea mecanică a suprafețelor epruvetelor, prinderea traductorilor de platanele preseii nu afectează acuratețea măsurătorilor.

the LVDTs fixed on the testing machine plates at a distance of 200 mm. The comparison has been performed on the initial ascending branch of the characteristic curve up to the cracks occurrence.

The results of this case study are illustrated in Figure 7. An extremely small difference between the results of the two measuring conditions has been noticed. Comparing the strains corresponding to the peak stresses, it was realised

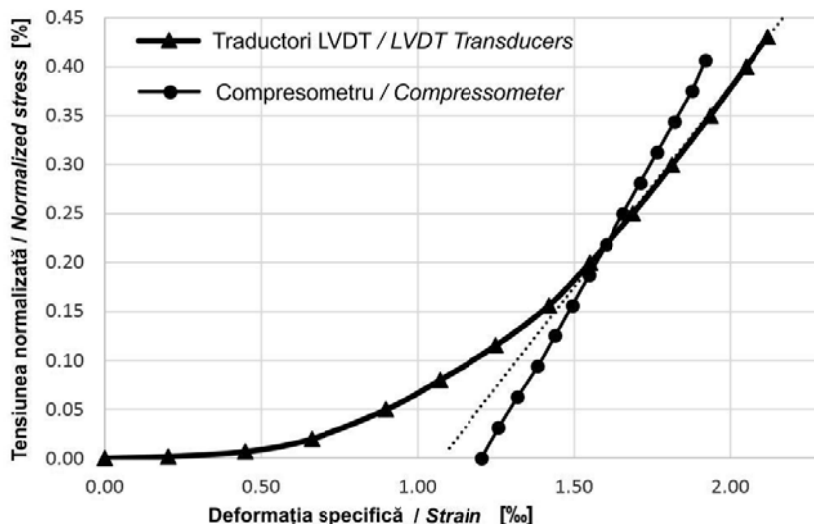


Fig. 9 - Rezultate obținute cu traductori inductivi și compresometru / Results obtained with LVDT transducers and compressometer.

Pentru a rectifica neliniaritatea de pe prima porțiune a curbei tensiune-deformație specifică (fig. 9) datorată așezării inițiale a probei, este necesară o corecție a diagramei pe această zonă. Fenomenul este cunoscut în literatura de specialitate [21], fiind prevăzute în anumite situații, o serie de etape de preîncărcare a probei pentru eliminarea acestei influențe.

Confirmându-se corectitudinea rezultatelor experimentale obținute prin testele preliminare, s-a putut determina curba caracteristică completă (fig. 10). Aceasta oferă informații relevante privind zona de post rupere. Se menționează faptul că a fost necesară corecția curbei caracteristice pe prima porțiune pentru eliminarea influenței așezării inițiale a probei.

that the recorded difference was less than 2%. Thus, it can be stated that the transducers fixing solution on the testing machine plates, does not affect the measuring results when the specimens are previously machined on both sides.

A second case study, to reveal the influence of the LVDTs fixing on the machine plates, has been carried out using a compressometer [20], with the distance between the measuring points of 135 mm, Figure 8a. The specimens have been instrumented with the LVDTs set-up mounted on the testing machine plates, and with the compressometer, Figure 8b. To avoid the damage of the compressometer, the testing was performed only on the first part of the stress-strain curve up to the peak stress.

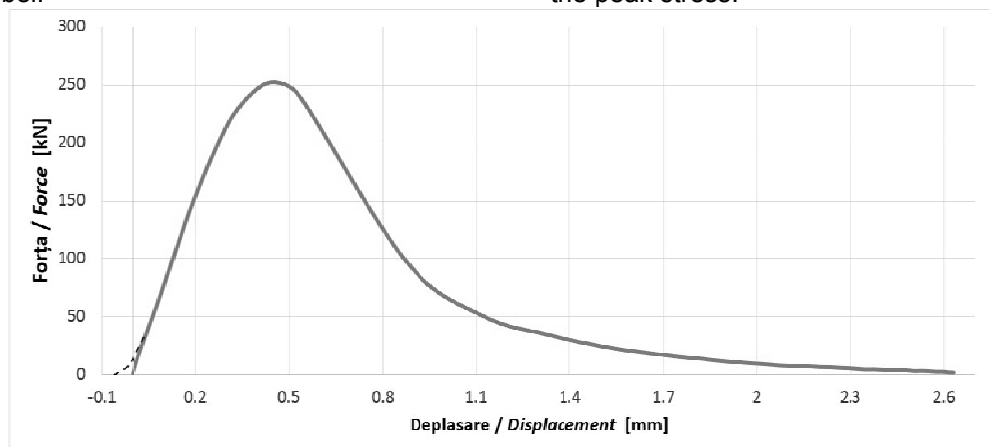


Fig. 10 - Curba caracteristică completă / The complete characteristic curve.

Capacitatea de disipare a energiei poate fi evidențiată prin determinarea ariei cuprinse între axa orizontală și curba caracteristică (fig. 10). Deoarece capacitatea de disipare a energiei este redusă semnificativ pe ultima porțiune descendentă a curbei caracteristice, este necesară stabilirea limitei până la care informațiile obținute sunt relevante. În literatura de specialitate se propune ca trasarea curbei caracteristice pentru capacitatea de disipare a energiei să se limiteze la o valoare a deformației specifice egală cu 6 ‰ [22]. Această abordare nu este întotdeauna concludentă în condițiile în care deformațiile specifice variază în funcție de clasa betonului.

În aceste condiții, se consideră că o abordare mai corectă ar fi aceea în care criteriul de decizie să fie stabilit pe baza tensiunii normalizate. Utilizarea tensiunilor normalizate oferă avantajul că valoarea stabilită este aceeași, indiferent de clasa de beton. În figura 11 se prezintă curba normalizată tensiune-deformație specifică, evidențiindu-se procentual capacitatea de disipare a energiei.

Since the results of the two measuring systems were similar (Figure 9), it can be stated that, after the machining of the specimens, the fixing of the LVDTs on the testing machine plates does not affect the measurements accuracy.

To rectify the non-linear shape on the first branch of the stress-strain curve (Figure 9) due to the initial settlement of the specimen between the loading plates, a correction of the curve on this zone is necessary. This phenomenon is mentioned in the specialised literature [21], and for some situations a series of preloading cycles is indicated to eliminate this inconvenience.

After validation of the experimental results obtained in the preliminary tests, the complete characteristic curve could be determined (Figure 10). The curve provides relevant information related to the post-peak range. It must be mentioned that the correction of the characteristic curve on the first portion was required to eliminate the influence of the initial sitting of the specimen.

The energy dissipation capacity may be established by determining the area between the

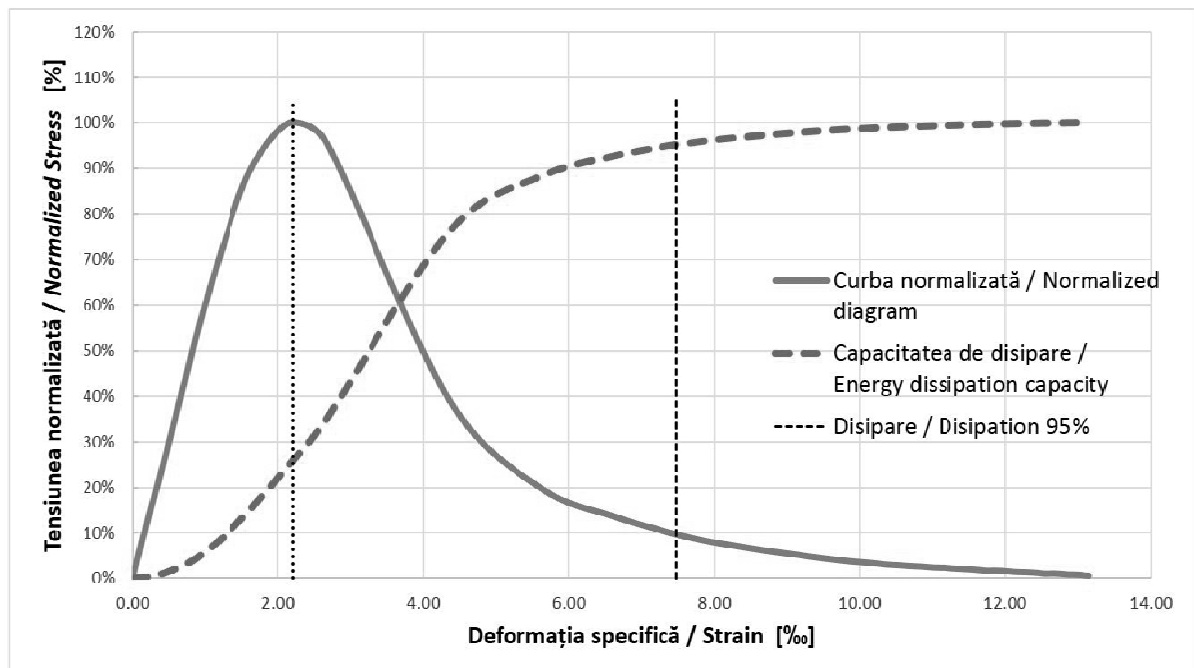


Fig. 11 - Curba caracteristică normalizată și capacitatea de disipare a energiei / The normalized stress-strain curve and the energy dissipation capacity.

Se poate remarca faptul că la atingerea efortului unitar maxim în beton, capacitatea acestuia de a disipa energia este utilizată doar în proporție de 25%, existând rezerve suplimentare serioase în domeniul post-elastic.

Deoarece în normele actuale privind comportarea betonului la compresiune este utilizat fractilul de 95%, se propune luarea în considerare a aceleiași valori și în cazul trasării diagramei complete tensiune-deformație specifică. Astfel, considerând un fractil de 95% al capacității materialului de disipare a energiei, rezultă că

horizontal axis and the characteristic curve, Figure 10. Since the energy dissipation capacity is significantly reduced on the last descending portion of the characteristic curve, it is necessary to establish the limit strain for the relevant information. The specialised literature [22] indicates a value of strain equal to 6 ‰ to plot the characteristic curve for useful data relevant to dissipation capacity. This approach is not always a suitable procedure, since the variation of the concrete strains depends on the strength class. Under these circumstances, it was established that

trasarea curbei caracteristice pe ramura descendentă se poate opri la o valoare egală cu 10% din tensiunea maximă. Peste această limită valorile determinate pentru capacitatea de disipare a energiei sunt neglijabile (fig. 12).

a more appropriate approach is to consider the normalized stress as the decisional factor. The advantage of this approach is that the established value of the normalized stress is the same, regardless the concrete class. The normalized

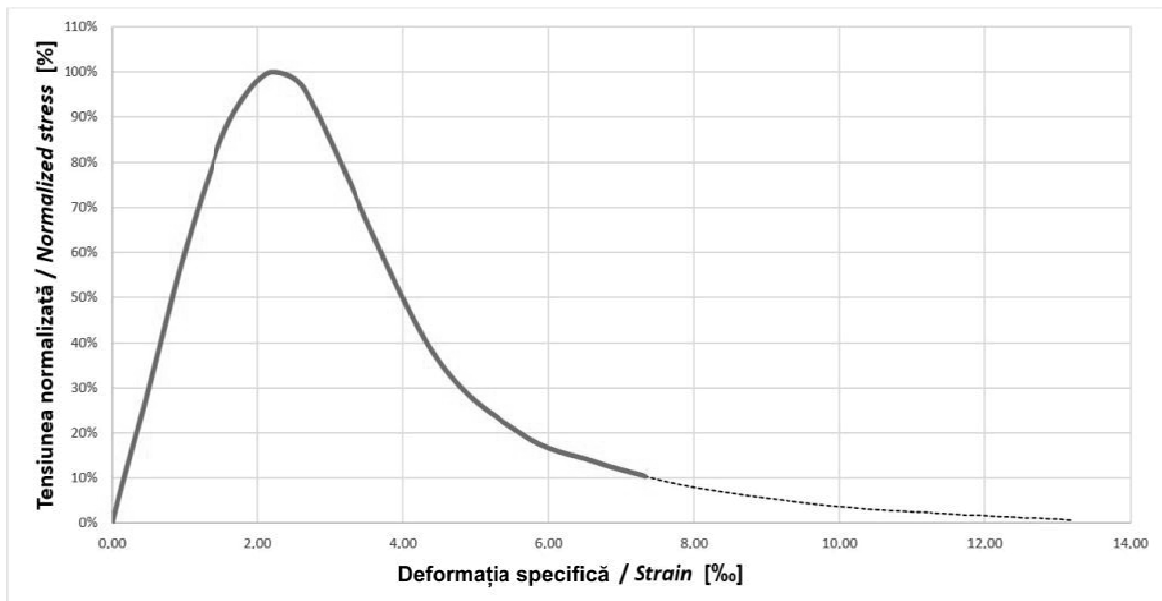


Fig. 12 - Curba caracteristică normalizată utilizată pentru capacitatea de disipare a energiei / The stress-strain normalized curve utilized for the energy dissipation capacity.

6. Concluzii

Rezultatele încercărilor experimentale pe epruvete din diferite materiale pot fi alterate de energia potențială acumulată în componentele sistemelor de acționare, care se degajă brusc în momentul atingerii capacității portante a probei testate.

În lucrare sunt prezentate cauzele modificării vitezei de încercare, care nu mai poate fi controlată peste forța maximă, de la care se produce degajarea energiei potențiale acumulate în sistemul de acționare.

Pentru eliminarea rezultatelor eronate în cazul unor încercări experimentale, cauzate de imposibilitatea păstrării unei rate constate de aplicare a deformației, în lucrare se prezintă un sistem original, conceput și brevetat de autori, care asigură determinarea curbei caracteristice complete a betonului solicitat la compresiune, aplicabil la toate materialele casante.

Sistemul mecanic proiectat se atașează la mașina universală de încercat, controlând viteza de deformare după atingerea tensiunii maxime.

Se prezintă, de asemenea, bazele teoretice ale sistemului adițional care se atașează la mașina de încercat, alcătuită fizică a acestuia și utilizarea sistemului propus la încercarea betonului, pentru stabilirea curbei caracteristice complete.

Lucrarea este finalizată cu un studiu experimental extins privind determinarea curbei caracteristice complete pe o serie de cilindri din beton. Se formulează recomandări privind valoarea

stress-strain curve and the energy dissipation capacity are illustrated in Figure 11.

It can be seen that, when the concrete maximum stress is reached, when the energy dissipation capacity is about 25% and, thus, substantial supplementary resources are still available in the post-peak range.

Since the current norms for the concrete compression testing utilise a 95% fractile value, the same percentage is also proposed when plotting the complete stress-strain curve. Thus, considering a 95% fractile value of the material energy dissipation capacity, it can be seen that the stress-strain curve development can be stopped when 10% of the maximum stress is reached, on the descending branch of the diagram. Above this limit the determined values for the energy dissipation capacity are negligible, Figure 12.

6. Conclusions

The experimental results obtained on specimens made of different materials and on structural elements may be altered by the strain energy stored in the testing machine components, suddenly released when the bearing capacity of the tested specimen is reached.

The causes of the loading rate change, that becomes uncontrollable beyond the peak force, when the stored strain energy in the loading system is released, are described in the paper.

To eliminate the experimental erroneous results caused by the impossibility of maintaining a

tensiunii pentru care informațiile obținute sunt relevante pentru determinarea capacității de disipare a energiei.

REFERENCES

1. M. Budescu, N. Taranu and R. Ciornei, On postelastic testing of materials and structural elements, *Buletinul Stiintific si Tehnic al I.P. "Traian Vuia" din Timisoara*, 1979, **24** (38) (2), 29.
 2. M. Dima and C. Frâncu, Method for testing glass fibre reinforced polymer composites (GFRP'S) with polyester matrix, *Romanian Journal of Materials*, 2014, **44** (3), 304.
 3. D.J. Carreira and K.H. Chu, Stress-strain relationship for plain concrete in compression, *ACI Journal Proceedings*, 1985, **82** (6), 797.
 4. L.S. Hsu and C.T.T. Hsu, Complete stress-strain behaviour of high-strength concrete under compression, *Magazine of Concrete Research*, 1994, **46** (169), 301.
 5. M. D. Kotsivos, Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression, *Materials and Structures*, 1983, **16** (1), 3.
 6. D. Georgescu, A. Apostu and G. Miron, Experimental research for the evaluation of concrete freeze-thaw resistance, *Romanian Journal of Materials*, 2010, **40** (2), 122.
 7. A. Van Gysel and L. Taerwe, Analytical formulation of the complete stress-strain curve for high strength concrete, *Materials and Structures*, 1996, **29** (9), 529.
 8. Al. Negoită, M. Budescu and R. Ciornei, Observations regarding the establishing of the complete stress-strain curve, *Revista Transporturilor și Telecomunicațiilor*, 1978, **4**, 190.
 9. B.P. Hughes and G.P. Chapman, The complete stress-strain curve for concrete in direct tension, *RILEM Bulletin*, 1966, **30**, 95.
 10. T. Wee, M. Chin and M. Mansur, Stress-strain relationship of high-strength concrete in compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1996, **8** (2), 70.
 11. G. Opreșan, N. Țăranu, M. Budescu, and I. Ențuc, Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP plate bonding, *Romanian Journal of Materials*, 2012, **42** (4), 387.
 12. P. R. Barnard, Researches into the complete stress-strain curve for concrete, *Magazine of Concrete Research*, 1964, **16** (49), 203.
 13. T. Pascu and D. Georgescu, Experimental research for the determination of the levels of performance of materials for concrete repair, *Romanian Journal of Materials*, 2014, **44** (2), 103.
 14. S. Popovics, A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and Concrete Research*, 1973, **3** (5), 583.
- constant deformation rate, in the paper is presented an original system, conceived and patented by the authors, utilised to determine the complete characteristic curve of concrete loaded in compression, also applicable to any brittle material.
- The designed mechanical system is attached to the universal testing machine and controls the deformation rate after reaching the peak stress.
- The theoretical bases related to this additional system are presented, along with its design and utilisation to the concrete testing aiming to determine the complete characteristic curve.
- The paper is finalised with a presentation of an extended experimental study related to the complete characteristic curve, determined by testing a series of concrete cylindrical specimens. A particular value of the stress relevant to the evaluation of the energy dissipation capacity is finally recommended.
- *****
15. Al. Negoită, M. Budescu, R. Ciornei, L. Strat, N. Țăranu and I. Filipescu, Method and instalation for brittle materials post-elastic testing, *Brevet No. 77051*, 1980.
 16. M. Georgescu, I. Cătănescu and G. Voicu, Microstructure of some fly ash based geopolymer binder, *Romanian Journal of Materials*, 2011, **41** (3), 183.
 17. xxx, EN 12390-2/2009 Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests.
 18. xxx, EN 12390-3/2009 Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens.
 19. G. Opreșan, N. Țăranu, V. Munteanu, M. Budescu, C. Cozmanciuc and R. Oltean, Improvement of concrete strength through confining with composite membranes, *Romanian Journal of Materials*, 2011, **41** (4), 302.
 20. ASTM C469 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression
 21. xxx, EN 12390-13/2013 Testing hardened concrete. Determination of secant modulus of elasticity in compression
 22. P. T. Wang, S. P. Shah and A. E. Naaman, Stress-strain curves of normal and lightweight concrete in compression, *ACI Journal Proceedings*, 1978, **75** (11), 603.
- *****