



## STUDIUL COMPARATIV PRIVIND DETERMINAREA NUMĂRULUI DE CONECTORI ÎN VEDEREA ASIGURĂRII INTERACȚIUNII TOTALE A GRINZILOR MIXTE OȚEL- BETON

Cristian V. MICULAȘ<sup>1</sup>, Ștefan M. BURU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultatea de Construcții, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Cluj Napoca, [miculas\\_cristian@yahoo.com](mailto:miculas_cristian@yahoo.com)

<sup>2</sup>Facultatea de Construcții, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Cluj Napoca, , [marius.buru@mecon.utcluj.ro](mailto:marius.buru@mecon.utcluj.ro)

Prof.Dr.Ing. Cosmin G. Chiorean<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Facultatea de Construcții, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Cluj Napoca, [Cosmin.Chiorean@mecon.utcluj.ro](mailto:Cosmin.Chiorean@mecon.utcluj.ro)

### ABSTRACT - REZUMAT

În cadrul acestui articol se prezintă un studiu comparativ privind determinarea numărului de conectori, pentru grinzile compozite oțel-beton, folosind prescripțiile următoarelor norme de proiectare: EN 1994-1-1-2004 (europeană), AS 2327.1-2003 (australiană) și AISC - LRFD (americană).

Studiul are la bază ipoteza conlucrării totale între grinda metalică și placa de beton. Grinda mixtă, care face obiectul prezentului studiu, s-a preluat din literatura de specialitate, având astfel la dispoziție și rezultate obținute experimental. Aceasta s-a modelat și analizat folosind programul bazat pe metoda elementelor finite, Abaqus, iar rezultatele obținute numeric s-au comparat cu cele obținute pe cale experimentală.

### 1. INTRODUCERE

Elementele mixte (numite și elemente compozite sau hibride) sunt tot mai folosite datorită avantajelor multiple rezultate prin combinarea celor două materiale componente: beton și oțel, decât în cazul utilizării independente a fiecăruia dintre ele. Masa și rigiditatea betonului reduc vibrațiile, deplasările și, de asemenea, betonul oferă o siguranță ridicată împotriva incendiilor, în timp ce oțelul oferă avantaje din punct de vedere al raportului rigiditate-greutate, al ușurinței de manipulare și al timpului de execuție.

Părțile componente ale grinzilor cu secțiune mixtă oțel – beton sunt conectate între ele, prin intermediul unor conectori dispuși la interfața de contact dintre placa de beton și grinda metalică, rezultând astfel o comportare unitară avantajoasă din punct de vedere structural.

Prezenta lucrare cuprinde un studiu comparativ cu privire la determinarea numărului de conectori necesari pentru asigurarea conlucrării totale dintre cele două materiale componente. În acest sens, s-a preluat o grindă mixtă simplu rezemată, proiectată și încercată experimental de Chapman și Balakrishnan [1], pentru care s-a determinat numărul necesar de conectori folosind prescripțiile a trei coduri de proiectare utilizate în practica inginerescă curentă: *EN 1994 (Eurocode 4): Design of composite steel and concrete structures* [2], *Australian Standard 2327.1-2003: Composite Structures* [3] și *American Institute of Steel Construction – Load & Resistance Factor Design* [4].

De asemenea, s-a modelat și analizat grinda compozită folosind programul general de elemente finite Abaqus, iar curbele încărcare–deplasare transversală obținute numeric s-au comparat cu cea obținută pe cale experimentală.

### 2. DESCRIEREA ELEMENTULUI COMPOZIT ANALIZAT

Grinda analizată face parte dintr-un studiu experimental amplu realizat în anii '60 [1]. S-a optat pentru aceasta grindă deoarece sunt furnizate informații suficiente cu privire la caracteristicile materialelor folosite, la configurația grinzii, la modul de încărcare a acesteia și, totodată, sunt prezentate rezultate experimentale consistente.

Schema statică a grinzii precum și secțiunea transversală sunt prezentate în Figura 1.

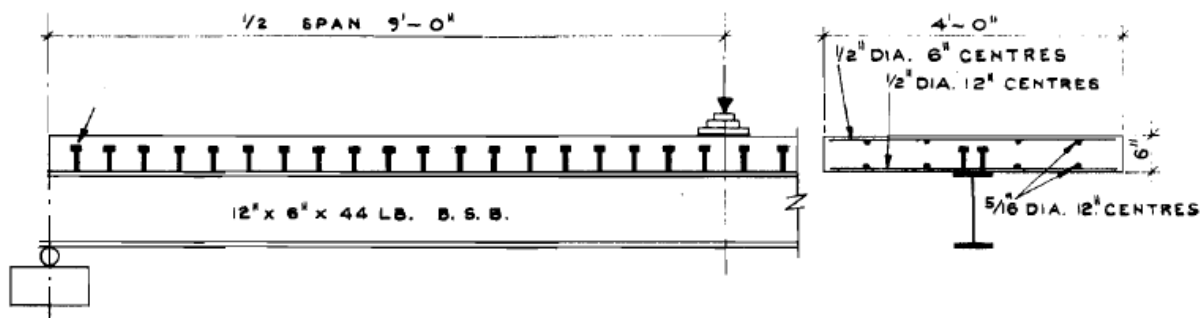


Figura 1. Schema statică și secțiunea transversală pentru grinda analizată

Profilul metalic utilizat este de tip *British Standard Beam 21* ale cărui caracteristici sunt date în Tabelul 1.

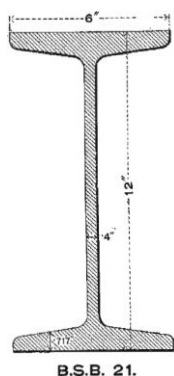


Figura 2. Secțiune B.S.B. 21

Înălțime	12 [in]	304,800 [mm]
Lățime talpă	6 [in]	152,400 [mm]
Grosime inimă	0,4 [in]	10,160 [mm]
Grosime talpă	0,717 [in]	18,212 [mm]
Greutate	44 [lb/ft]	65,479 [kg/m]

Tabelul 1. Caracteristici B.S.B. 21



Figura 3. Conector tip gujon

Placa de beton are dimensiunile secțiunii transversale de 15,24 cm (6 inch) x 121,92 cm (4 feet). Armătura longitudinală în placa de beton este de  $\Phi 7,9375$  mm (5/16 inch) la distanță de 304,80 mm (12 inch) atât la partea superioară cât și la partea inferioară, iar cea transversală este de  $\Phi 12,70$  mm (1/2 inch) la distanță de 152,40 mm (6 inch) la partea superioară și la distanță de 304,80 mm (12 inch) la partea inferioară.

Conectorii utilizați au înălțimea de 100 mm, iar diametrul  $\Phi 19,05$  mm. Grinda este încărcată cu o forță concentrată  $P = 300$  kN la mijlocul deschiderii. Lungimea totală a grinzii este de 2x274,32 cm (2x9 feet).

### 3. MATERIALE UTILIZATE

Caracteristicile materialelor utilizate sunt prezentate în Tabelul 2.

beton	valoarea caracteristică a rezistenței la compresiune a betonului	3.440 [p.s.i]	23,718 [N/mm <sup>2</sup> ]
	$\epsilon_{ultim}$	3,6‰	
oțel	limita de curgere a oțelului – inimă	17,33 [t.s.i]	238,972 [N/mm <sup>2</sup> ]
	limita de curgere a oțelului – talpă	15,55 [t.s.i]	214,427 [N/mm <sup>2</sup> ]
	limita de rupere a oțelului – inimă	30,20 [t.s.i]	416,443 [N/mm <sup>2</sup> ]
	limita de rupere a oțelului – talpă	27,40 [t.s.i]	377,833 [N/mm <sup>2</sup> ]
	rezistența specifică ultimă la întindere a oțelului din conectori	33,80 [t.s.i]	466,086 [N/mm <sup>2</sup> ]
	modulul lui Young – inimă	13.900 [t.s.i]	191.674,25 [MPa]
	modulul lui Young – talpă	13.400 [t.s.i]	184.779,50 [MPa]

Tabelul 2. Caracteristici materiale

#### 4. DETERMINARE NUMĂRULUI DE CONECTORI

Premergător determinării numărului de conectori s-a făcut verificarea secțiunii grinzii la moment încovoietor și forță tăietoare. Rezultatele obținute sunt prezentate schematic în Tabelul 3.

	EC	AS	AISC-LRFD
forță concentrată P [kN]	300,000		
valoarea de calcul a momentului de încovoiere [kNm]	412,440		
valoarea de calcul a momentului capabil plastic cu conectare de forfecare totală [kNm]	460,964	446,466	493,482
valoarea de calcul a forței tăietoare [kN]	150,350		
valoarea de calcul a rezistenței plastice la forfecare [kN]	237,656	351,868	351,868

Tabelul 3. Eforturi solocitante și capabile ale grinzii

Analizând valorile eforturilor din tabelul anterior, se constată că secțiunea grinzii îndeplinește condițiile de rezistență, în toate cele trei cazuri tratate.

Determinarea numărului de conectori se face folosind un calcul rigid plastic. Acest calcul este posibil deoarece secțiunea transversală a grinzii metalice este simetrică față de axa verticală, alcătuirea grinzii metalice nu permite pierderea stabilității tălpii comprimate, secțiunile active ale grinzii în dreptul articulațiilor plastice sunt de clasa 1, iar toate celelalte secțiuni transversale sunt de clasa 1 și 2.

STANDARD	FORȚĂ CAPABILĂ CONECTOR	
EC	$P_{rd1} = 0,8 f_u \cdot \frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{\gamma_v} = 84,575 kN$ $P_{rd2} = 0,29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} \frac{1}{\gamma_v} = 70,102 kN$	(1.)
AS	$f_{vs1} = 0,63 d_{bs}^2 f_{uc} = 106,002 kN$ $f_{vs2} = 0,31 d_{bs}^2 \sqrt{f_{cj} E_c} = 86,599 kN$ $f_{ds} = \Phi k_n \min(f_{vs1}, f_{vs2}) = 77,939 kN$	(2.)
AISC - LRFD	$Q_{n1} = A_{sc} F_u = 132,149 kN$ $Q_{n2} = 0,5 A_{sc} \sqrt{f_c E_c} = 107,027 kN$	(3.)

Tabelul 4. Forță capabilă a unui conector

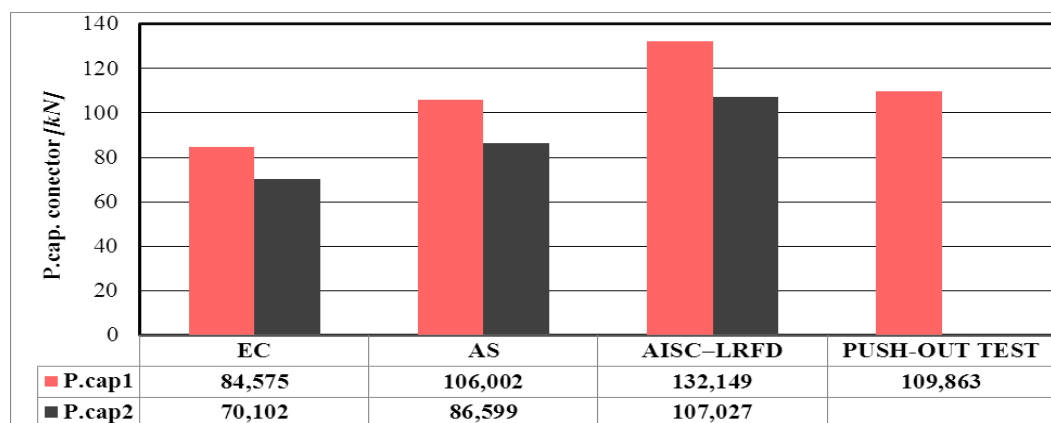


Figura 4. Capacitatea de rezistență a unui conector

Calculul numărului de conectori, necesari pentru asigurarea conlucrării totale, implică evaluarea capacității portante a unui singur conector, valoare ce reprezintă minimumul dintre

capacitatea portantă a betonului din jurul conectorului ( $P_{cap2}$ ) respectiv a tijeii acestuia ( $P_{cap1}$ ). Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 4 și în Figura 4.

Se observă diferențe consistente între numărul de conectori obținuți cu norma europeană și australiană și cei determinați urmând prescripțiile normei americane. Acest lucru se datorează considerării de către normativul A.I.S.C.–L.R.F.D. a unei capacități portante mai mari pentru un conector, fapt ce rezultă datorită lipsei factorilor de siguranță pentru conectori, factori de prezenți în EC și B.S. Figura 4 prezintă și capacitatea portantă a unui conector determinată pe cale experimentală. Se poate concluziona că această valoare este mult apropiată de cea calculată conform A.I.S.C.–L.R.F.D.

Conectorii trebuie să preia, pe fiecare lungime critică a grinzii, efortul de forfecare, ce poate fi calculat ca minimul dintre rezistența la întindere a grinzii metalice respectiv rezistența la compresiune a dalei de beton (Tabelul 5).

STANDARD	EFORT DE FORFECARE
EC	$L_u = \min\left(0,85h_{pl}b_{eff}\frac{f_{ck}}{\gamma_c}; A_s f_{yd}\right) = 1.857,911kN$ (4.)
AS	$F_{cc} = \min(0,85f_c b_{cf}(D_c - h_r); A_s F_y) = 1.857,911kN$ (5.)
AISC – LFRD	$V_h = \min(0,85f_c A_c; A_s F_y) = 1.857,911kN$ (6.)

Tabelul 5. Efortul de forfecare minim

Numărul necesar de conectori, calculați în ipoteza conlucrării totale cât și cei dispuși pe grinda încercată experimental, sunt prezentați comparativ în Figura 5.

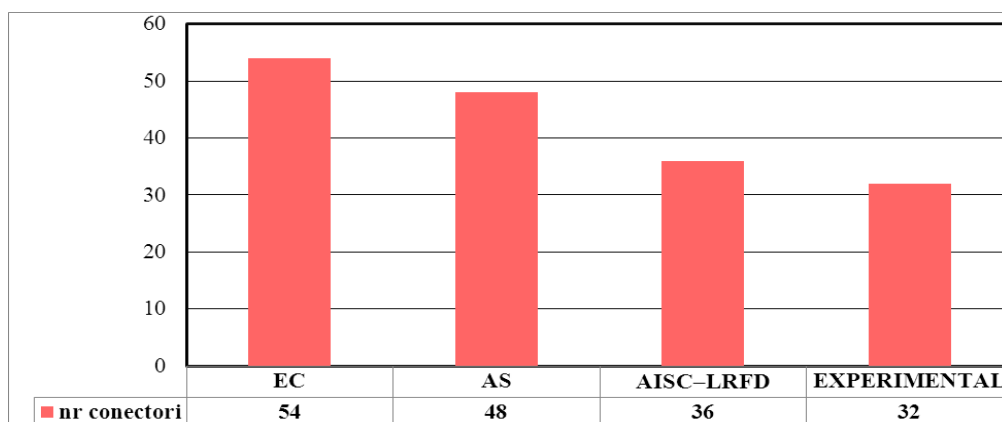


Figura 5. Numărul necesar de conectori

Se constată că atât norma europeană cât și cea australiană sunt conservative din punct de vedere al capacității portante ale unui conector, mărind astfel numărul total al acestora.

## 5. ANALIZĂ AVANSATĂ UTILIZÂND PROGRAMUL GENERAL DE ELEMENTE FINITE – ABAQUS

Modelarea și analiza neliniară a grinzii s-a făcut folosind programului Abaqus v. 6.11 [5]. Modelul final de analiză rezultă prin combinarea elementelor finite 3-D (folosite pentru modelarea matricei de beton) cu elemente finite bidimensionale, de tip *\*shell* (care definesc grinda metalică) și, nu în ultimul rând, cu elemente finite de tip bară utilizate pentru definirea armăturilor flexibile. Pentru aplicarea încărcării concentrate, la mijlocul deschiderii, s-a utilizat o plăcuță rigidă (*\*Rigid Part*) pentru a evita apariția concentrărilor de tensiuni și implicit cedarea prematură a grinzii.

Neliniaritatea betonului a fost inclusă în analiză folosind opțiunea *\*Concrete Damaged Plasticity*. Porțiunea elastică s-a definit prin intermediul modulului de elasticitate și prin coeficientul de contracție laterală (coeficientul lui Poisson), în timp ce comportarea inelastică s-a

introdus prin perechi de valori tensiune–deformație plastică, atât pentru compresiune cât și pentru întindere. Oțelul s-a modelat ca un material elastic–plastic cu reconsolidare folosind opțiunea \*Metal Plasticity.

Conexiunea dintre grinda metalică și dala de beton s-a realizat utilizând opțiunea \*TIE, legătură ce nu permite alunecări relative între suprafețele conectate. Aceste legături s-au dispus local pe zonele de amplasare ale conectorilor (Figura 6). Astfel, au rezultat patru variante de analiză, în funcție de numărul de conectori dispuși, trei variante corespunzătoare normelor menționate anterior, respectiv varianta prezentată în modelul experimental.

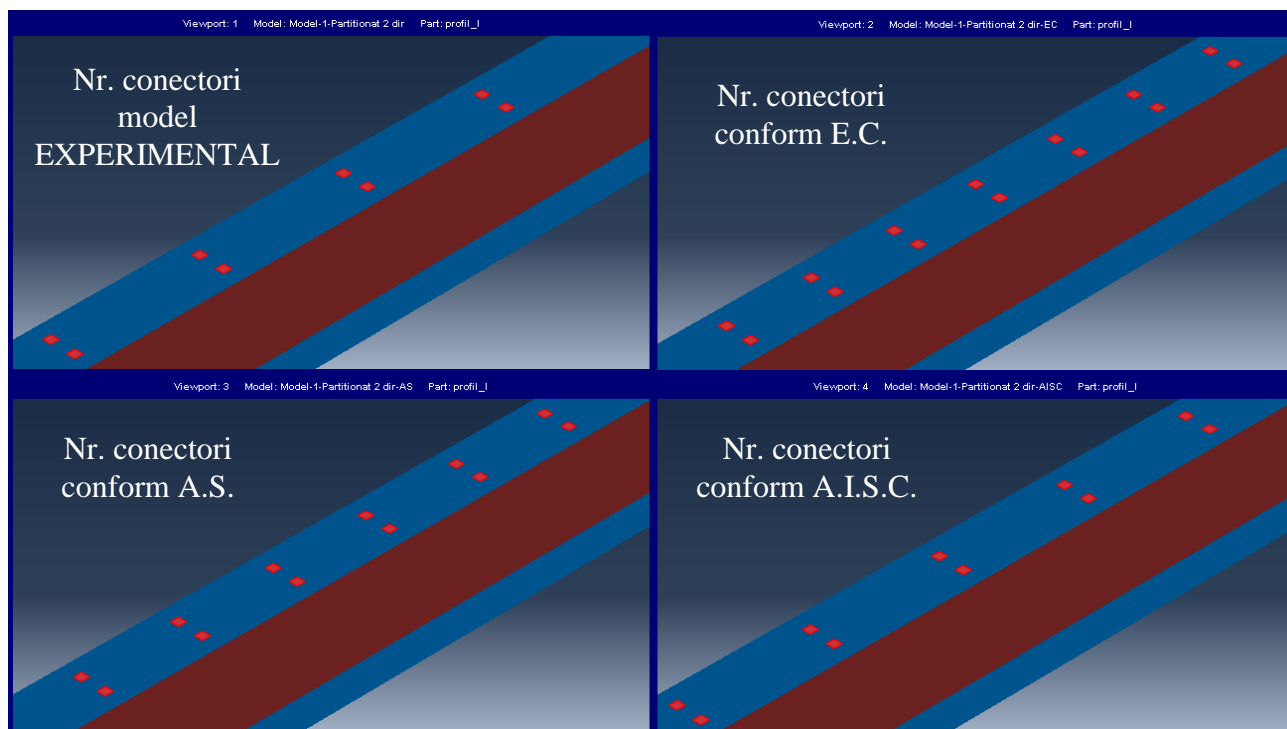


Figura 6. Modul de dispunere al conectorilor

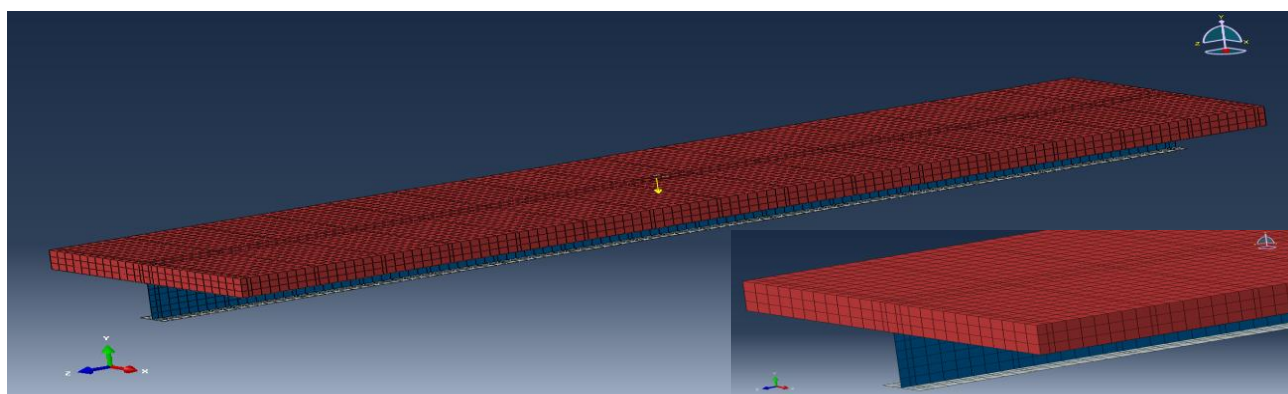


Figura 7. Grinda discretizată

Elementele finite 3D selectate din librăria programului sunt C3D8R, ce au 8 noduri și folosesc integrarea redusă pentru obținerea stării de tensiune și deformație, în timp ce grinda metalică s-a modelat utilizând elemente cu 4 noduri ce includ efectul deformațiilor de alunecare, S4R. Discretizarea grinzii s-a făcut în elemente cu dimensiunea maximă de 40x40 mm. Modelul discretizat este prezentat în Figura 7.

Grinda a fost supusă unei analize statice neliniare folosind metoda modificată \*Riks cu control în lungimea de arc. Analiza include și efectul neliniarității geometrice.

Pentru grinda cu conectorii poziționați conform modelului experimental, distribuția tensiunilor, a deformațiilor plastice și a deplasărilor totale obținute în urma analizei neliniare se poate observa în Figura 8.

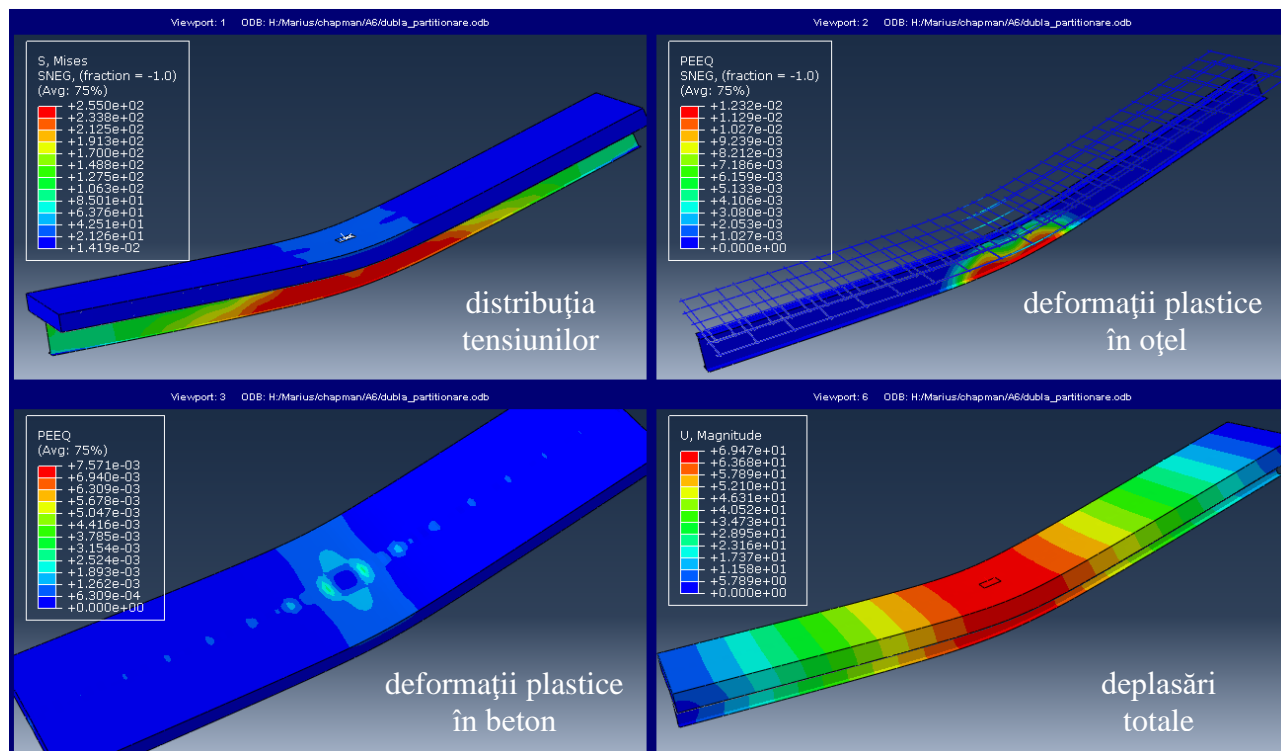


Figura 8. Rezultate selective

Comparația dintre comportarea reală și cea obținută numeric este prezentată în Figura 9.

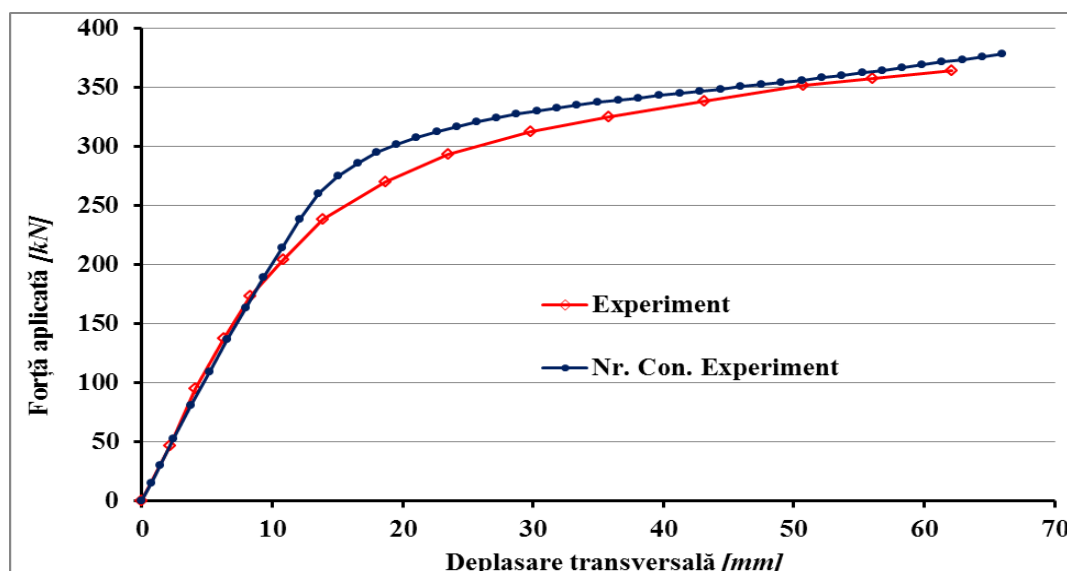


Figura 9. Curbe comparative încărcare – deplasare

Se observă ca modelul numeric surprinde cu acuratețe sporită comportarea grinzii pe porțiunea elastică, și de asemenea estimează suficient de corect încărcarea limită a grinzii. Totuși pe porțiunea post-elastică apar diferențe între cele două curbe, însă acestea se datorează, în principal, modului diferit de considerare a conexiunii oțel–beton. În programul de calcul, legătura dintre cele două materiale s-a considerat perfectă pe zonele de poziționare a conectorilor, în timp ce modelul real permite deplasări relative la interfața grindă–dală ca urmare a folosirii conectorilor ductili.

Figura 10 cuprinde curbele încărcare–deplasare obținute pe grinzile ce cuprind succesiv numărul de conectori calculați conform prescripțiilor fiecărei norme analizate.

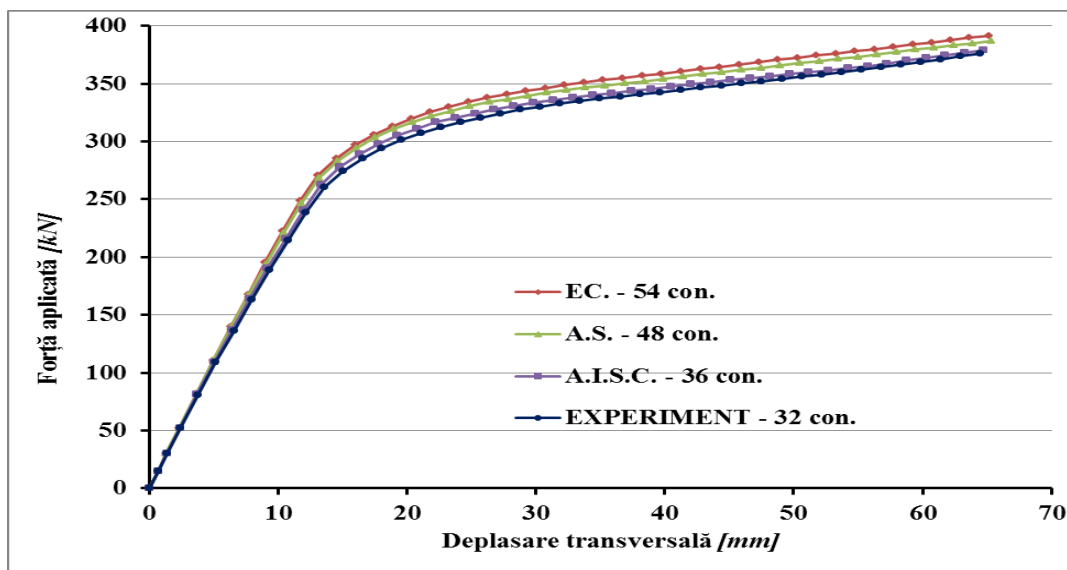


Figura 10. Curbe comparative în raport cu numărul de conectori considerați

Se observă cu ușurință că sporirea numărului de conectori nu conduce la creșteri semnificative în dreptul încărcărilor ultime. De exemplu, crescând numărul conectorilor cu 50%, de la 36 (norma americană) la 54 (norma europeană) rezultă o sporire a încărcării limitate cu doar 3,1%. Astfel, se poate afirma că norma europeană și australiană subestimează capacitatea portantă a unui conector ducând la o creștere nejustificată a numărului acestora.

## 6. CONCLUZII

În prezentul articol s-a făcut un studiu comparativ privind determinarea numărului de conectori necesari asigurării conlucrării totale pentru o grindă cu secțiune mixtă oțel–beton testată experimental. Studiul dorește evidențierea principalelor diferențe ce apar între prescripțiile a trei coduri de proiectare. Numărul de conectori determinat analitic s-a introdus într-un model de calcul creat, folosind programul Abaqus, pentru analiza grinzilor cu secțiune compozită. Modelul numeric determină cu suficientă acuratețe încărcarea limită a grinzii, chiar dacă apar diferențe între comportările determinate experimental respectiv numeric. Diferențele apar datorită considerării unui model aproximativ al conexiunii oțel–beton în modelul numeric. Rezultatele obținute scot în evidență tendința normei EC. și A.S. de a subevalua forța de lunecare preluată de un conector, în timp ce A.I.S.C.–L.R.F.D. are o abatere mică raportată la capacitatea conectorului determinată experimental. S-a arătat ca folosirea unui număr suplimentar de conectori nu se justifică din punct de vedere al încărcării limitate rezultate.

## Referințe

- [1] J. C. Chapman, S. Balakrishnan, Experiments on composite beam. In *“THE STRUCTURAL ENGINEER”*, November 1964, No. 11, Volume 42, pag. 369-383.
- [2] EN 1994 (Eurocode 4): Design of composite steel and concrete structures
- [3] Australian Standard 2327.1-2003: Composite Structures
- [4] American Institute of Steel Construction – Load & Resistance Factor Design
- [5] Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. *ABAQUS/standard user’s manual*, version 6.11, 2011