ONLINE ISSN 2069-7430
ISSN-L 1841-4737

PRO LIGNO
www.proligno.ro

Vol. 8 N° 3 2012
pp. 19-41

COMPORTAMENTUL GRINZILOR CU ZĂBRELE DIN LEMN CU ÎMBINĂRI SEMI-RIGIDE: STUDIU TEORETIC ŞI EXPERIMENTAL

BEHAVIOUR OF TIMBER LATTICE BEAMS WITH SEMI-RIGID JOINTS: ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL STUDY

Eric FOURNELY
Assoc prof. – Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal
Adresa/Address: BP 10448, F-63000 CLERMONT-FERRAND, France
CNRS, UMR 6602, Institut Pascal,
Adresa/Address: F-63171 AUBIERE, France
E-mail: Eric.FOURNELY@univ-bpclermont.fr

Rostand MOUTOU PITTI*
Researcher. dr.eng. – Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal
Adresa/Address: BP 10448, F-63000 CLERMONT-FERRAND, France
CNRS, UMR 6602, Institut Pascal,
Adresa/Address: F-63171 AUBIERE, France
CENAREST, Institut de Reccherche Technologique (IRT)
Adresa/Address: BP 14070, Libreville, Gabon
Tel.: +33 473 407 532; fax: +33 473 407 510
E-mail: rostand.moutou_pitti@univ-bpclermont.fr

Abdelhamid BOUCHAIR
Prof. – Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal
Adresa/Address: BP 10448, F-63000 CLERMONT-FERRAND, France
CNRS, UMR 6602, Institut Pascal,
Adresa/Address: F-63171 AUBIERE, France
E-mail: Abdelhamid.BOUCHAIR@univ-bpclermont.fr

Rezumat:

Se studiază comportamentul la încovoiere al grinzilor cu zăbrele cu îmbinări semi-rigide, din lemn, standardizate. Se utilizează diverse tehnici de măsurare experimentală, pentru determinarea translațiilor şi rotațiilor îmbinărilor incleiate şi/sau a celor cu cuie. Se prezintă rezultatele experimentale obținute pentru grinzi cu diverse tipuri de îmbinări încleiate sau cu cuie. Se detaliază descrierea cuielor, adezivilor şi a speciilor de lemn. Sunt prezentate rezultatele experimentale sub forma curbelor încărcare-săgeată şi din punct de vedere al apariției crăpăturilor datorită cuielor şi adezivilor. Este analizată semi-rigiditatea îmbinării dintre elementele verticale şi contrafişe. Comparațiile în urma aplicării diferitelor tehnici de măsurare au arătat validitatea rezultatelor experimentale. Aceste rezultate au dovedit influența semi-rigidității axiale şi de rotație a îmbinării asupra comportamentului general al grinzii. Rezultatele experimentale se compară cu rezultatele teoretice din teoria grinzilor Euler-Bernoulli, care include sau nu rigiditatea lineară a îmbinării semi-rigide la tracțiune sau compresiune. Studiul demonstrează comportamentul satisfăcător al grinzilor cu zăbrele şi oferă oportunitatea alegerii uneia din tehnicile de încleiere care îndeplineşte cerința de rezistență mecanică a grinzii. Studiul prezintă de asemenea necesitatea unei modelări

Abstract:

The behaviour of standardized lattice timber beams in bending with semi-rigid joints is studied. Various measurement techniques are used in the experiments to measure the displacements and rotations of the glued and/or nailed joints. The experimental results, obtained on beams with different types of joints combining glue and nails, are presented. The description of the nails, the adhesives and the types of wood is detailed. The experimental results in terms of load-deflection curves, crack features, due to nails and adhesives, are presented. The semi-rigidity of the joint between vertical bracing and diagonal struts is analysed. The comparison of various measurements techniques showed the validity of the experimental results. These results showed the influence of the axial and the rotational semi-rigidity of the joints on the global behaviour of the beams. The experimental results are compared with the analytical results given by the Euler-Bernoulli beam theory, including or not the linear semi-rigid stiffness of the joints in tension or compression. The study shows the satisfactory behavior of the lattice beams and gives information on the opportunity to choose one of the gluing techniques to fulfill the mechanical requirements of the beams. The study also shows the necessity of a more complete modeling taking into account the

* Autor corespondent / Author to whom all correspondence should be addressed

mult mai complete, care să ia în calcul şi efectul rotației în zona îmbinării şi influența non-liniarității asupra comportamentului general al grinzii.

Cuvinte cheie: *structuri din lemn; grindă cu zăbrele DOREAN®; îmbinări semi-rigide.*

INTRODUCERE

Grinzile cu zăbrele standardizate, din lemn, îşi găsesc multe aplicații în domeniul construcțiilor industriale, al caselor mici şi mari (Moutou şi al. 2010). Acestea sunt soluții eficiente din punct de vedere al mediului înconjurător, mediului economic, structural şi mecanic (Komatsu ş.a. 2000; Fouchal ş.a. 2011). În domeniul construcțiilor sau al structurilor tehnice civile, aceste grinzi se realizează din elemente scurte din lemn, asamblate cu cuie, plăcuțe cu dinți metalici sau adezivi (NF EN 408/2004; Broughton şi Hutchinson 2001). În practică, fiabilitatea acestor grinzi cu zăbrele este recunoscută prin controlul producătorului şi prin cunoaşterea comportamentului îmbinărilor, care reprezintă principalele elemente sensibile ale acestor grinzi (Leichti ş.a. 2000). Astfel, apariția fisurilor, rigiditatea şi flexibilitatea conexiunilor rămân principalii parametrii care influențează comportamentul mecanic al grinzilor, privind rezistența structurilor în construcțiile civile (NF EN 1995-1; Fruhwald 2011; Giurgiu şi Cismaru 2011).

Prezentul studiu se concentrează asupra comportamentului îmbinărilor semi-rigide ale unei grinzi cu zăbrele utilizate într-un sistem modular standardizat. În literatura de specialitate, unii autori tratează influența îmbinărilor (Larsen şi Jensen 2000) în comportamentul general al structurilor şi în special al structurilor din lemn. Dintre aceştia, Daniunas (Daniunas şi Urbonas 2008) şi Urbonas (Urbonas şi Daniunas 2006) au studiat comportamentul îmbinărilor semi-rigide grindă-grindă sub influența forțelor axiale şi a momentelor de încovoiere. S-au propus câteva metode de evaluare a performanțelor mecanice ale îmbinării semi-rigide la momente încovoietoare, pentru structuri metalice şi din lemn, cu diferite elemente de asamblare (Kasai ş.a. 1998; Chang ş.a. 2005; Guan ş.a. 2008). Pentru a îmbunătăți rezistența îmbinării semi-rigide realizate cu cuie, Turner şi al. (Turner ş.a. 2009) au propus noi teste asupra adezivilor, în timp ce abordări teoretice (Kaveh şi Moeaz 2008) şi analize cu element finit au fost realizate de către Ellegaard (Ellegaard 2006) şi Haller (Haller 1998) sau Moutou Pitti ş.a. (Moutou Pitti ş.a. 2010). De asemenea, Stehn şi Borjes (Stehn şi Borjes 2004) au studiat influența cuielor asupra rezistenței structurii glulam. Silih şi al. (Silih ş.a. 2005) au examinat influența comportamentului semi-rigid al conectorilor tip plăcuță de metal în structurile grinzilor din lemn. Această lucrare analizează comportamentul semi-rigid al îmbinărilor încleiate şi cu cuie, supuse la forțe de încovoiere şi axiale, ca parte a comportamentului

effect of the rotation in the joint area and the influence of the nonlinearity on the global behaviour of the beam.

Key words: *timber structures; DOREAN® lattice beam; semi-rigid joints.*

INTRODUCTION

The standardized lattice timber beams can find many uses in the field of industrial buildings, small and collectives' houses (Moutou et al. 2010). They lead to effective solutions for the environmental, economic, structural and mechanical levels (Komatsu et al. 2000; Fouchal et al. 2011). In the building field or civil engineering structures, these beams are generally carried out from elements out of low-size timber elements, assembled by nails, plates with metal teeth or adhesives (NF EN 408/2004; Broughton and Hutchinson 2001). In practice, the reliability of these lattice beams is generally justified by the manufacture control and the knowledge of the behaviour of the joints, which are the main sensitive components of these beams (Leichti et al. 2000). Thus, the crack failure, the rigidity and the ductility of the connections remain the main parameters influencing the mechanical behaviour of the beams regarding the collapse of the civil engineering structures (NF EN 1995-1; Fruhwald 2011; Giurgiu and Cismaru 2011).

The present study is focused on the behaviour of semi-rigid joints of a lattice timber beam used in a standardized modular system. In the literature, few authors have discussed the influence of the connections (Larsen and Jensen 2000) in the global behaviour of the structures and especially timber structures. Among them, Daniunas (Daniunas and Urbonas 2008) and Urbonas (Urbonas and Daniunas 2006) have studied the behaviour of the semi-rigid beam-to-beam joints under bending and axial forces. Several methods have been proposed to evaluate the semi-rigid mechanical performances of moment resisting connections for steel and timber structures with various types of fasteners (Kasai et al. 1998; Chang et al. 2005; Guan et al. 2008). So as so to improve the resistance of semi-rigid connection by nails, Turner et al. (Turner et al. 2009) have proposed new tests on adhesives while theoretical approach (Kaveh and Moeaz 2008) and finite element analysis have been performed by Ellegaard (Ellegaard 2006) and Haller (Haller 1998) or Moutou Pitti et al. (Moutou Pitti et al. 2010). Also, Stehn and Borjes (Stehn and Borjes 2004) have studied the influence of the nail ductility on the resistance of a glulam structure. Silih et al. (Silih et al. 2005) have examined the influence of the semi-rigid behaviour of the connections in metal-plate-connected timber trusses. This paper is focused on the semi-rigid behaviour of nailed and glued connections loaded with axial forces or bending as a part of truss beams global behaviour. Thus, a simple beam theory

global al grinzii cu zăbrele. Astfel, se va utiliza o abordare teoretică simplă a grinzii, validată experimental, pentru evaluarea acurateții unei tehnici de proiectare comune. În plus față de această abordare simplă, se adaugă elemente scurte la extremitățile elementelor de fixare, pentru a analiza comportamentul semi-rigid al îmbinărilor.

Comportamentul general se analizează într-o cercetare experimentală, desfăşurată pe un set de grinzi cu diverse sisteme de îmbinare cu cuie (Smith ş.a. 2001), adezivi, sau o combinație a acestora. Rezultatele experimentale ilustrează comportamentul general al grinzilor şi comportamentul local al asamblării. Îmbinarea încleiată se alege astfel, încât să se poată utiliza elemente din lemn de mici dimensiuni, dificil de îmbinat cu cuie (Turner ş.a. 2009). Observațiile experimentale demonstrează eficacitatea diferitelor tipuri de îmbinări din punct de vedere al rezistenței, rigidității, flexibilității şi distribuției tensiunilor în zona încleiată.

În această lucrare sunt detaliate elementele geometrice ale mostrelor de grinzi de tip DOREAN şi condițiile de testare. Apoi, sunt prezentate tipurile de lemn şi cuiele, adezivii, umiditatea lemnului şi elementele de testare a lemnului. De asemenea, sunt prezentate dispozitivele experimentale, modul de încărcare şi echipamentul. Sunt propuse şi discutate rezultatele experimentale sub forma curbelor forță-săgeată, rezistență / flexibilitate, apariția crăpăturilor şi a diferitelor alunecări în îmbinare. Se face compararea rezultatelor dată de utilizarea diferitelor tehnici de măsurare. Aceste rezultate sunt analizate ca valori, dispersii şi precizie. Influența caracterului semi-rigid al îmbinării axiale este dovedit de săgeata părții centrale a grinzii şi de deplasările unghiulare la capetele acesteia. Semi-rigiditatea în cazul rotației este de asemenea analizată, în vederea validării procesului de producție şi a metodelor prin care se justifică starea limită finală şi limitele de utilizare.

PROGRAM EXPERIMENTAL

Programul experimental constă în teste complete pe opt grinzi cu zăbrele cu aceleaşi dimensiuni (Fig. 1.) unde parametrul variabil îl reprezintă tehnica de conexiune (cuie şi diverşi adezivi). Mostrele de grinzi cu zăbrele prezintă patru tipuri de îmbinări, câte două pentru fiecare tip. Date despre natura şi numele diverşilor adezivi utilizați sunt prezentate în Tabelul 1. Testele sunt realizate cu încovoierea în patru-puncte, pentru obținerea curbelor generale forță-săgeată ale grinzii şi alunecarea locală în zonele de îmbinare. Testele complementare au scopul de a caracteriza lemnul ca material de bază (teste de compresiune pe epruvete mici) şi de a determina umiditatea acestuia.

Geometria şi descrierea grinzii DOREAN

Grinda cu zăbrele (DOREAN®) analizată în acest studiu este cheia originală de prefabricat

approach, validated on the basis of experimental results, is considered in order to evaluate the accuracy of a common design technique. In addition to this simple approach, short beam elements are used at the extremities of the bracing elements to take account of the semi-rigid behaviour of the connections.

The global behaviour is analyzed according to an experimental study, carried out on a set of beams with various systems of connections by nails (Smith et al. 2001), adhesives or the combination of both. The experimental results illustrate the total behaviour of the beams and the local behaviour of the assemblies. The glued connection is selected to be able to use timber elements of low dimensions, which shows a difficulty to be connected by nails (Turner et al. 2009). The experimental observations show also the effectiveness of the various types of connections in terms of resistance, rigidity, ductility and distribution of effort in the glued zone.

In this paper, the geometrical characteristics of the specimens of DOREAN's beam and the test conditions are detailed. Then the types of wood and nails, the adhesives, the wood moisture content and wood tests are exposed. Also, the experimental device, the loading history and the instrumentations are presented. The experimental results in terms of load-deflection curves, resistance / ductility, crack facial aspects and the different slipping joints are proposed and discussed. The comparisons of the results given by different measurement techniques used are done. These results are analysed in terms of values, dispersions and precision. The influence of the semi-rigid character of the axial joints is shown on the deflection of the central part of the beam and the rotations at its ends. The rotational semi-rigidity is also discussed in order to validate the manufacturing process as well as the methods of justification with respect to the ultimate limit states and serviceability limit states.

EXPERIMENTAL PROGRAM

The experimental programme concerned full scale tests on eight lattice beams with the same dimensions (Fig. 1.) where the variable parameter is the connection technique (nails and various adhesives). The lattice beam specimens represent four types of joints with two replications for each type. The nature and the names of the different adhesives are given in Table 1. The tests are realized with four-point bending to obtain the global load-deflection curves of the beam and the local slip in the joint zones. Complementary tests are realized to characterise the basic wood material (compression tests on small specimens) and its moisture content.

DOREAN Beam Description and Geometry

The lattice beam (DOREAN®) developed in this study is an original key of the prefabricated

standardizat pentru sistemele de case din lemn. Această grindă prezintă multe avantaje, în mod particular posibilitatea de a include materiale de izolare termică şi instalații, fără creşterea grosimii pardoselei sau pereților. Chiar şi în producția standardizată, grinda oferă largi posibilități arhitecturale pentru proiectanți. Conceptul DOREAN® vizează respectarea mediului înconjurător în toate fazele ciclului de viață al casei, de la construcția acesteia la exploatare şi până la demolare.

standardized wood housing system. This beam shows many advantages, particularly the possibility to include insulation materials and fluids passage without increasing the thickness of the floor or the walls. However, even with standardized production, the beam leaves large architectural possibilities for the designers. The DOREAN®'s concept aims the environment respect at the all stages of cycle of life's houses, from the manufacture to the exploitation and the deconstruction.

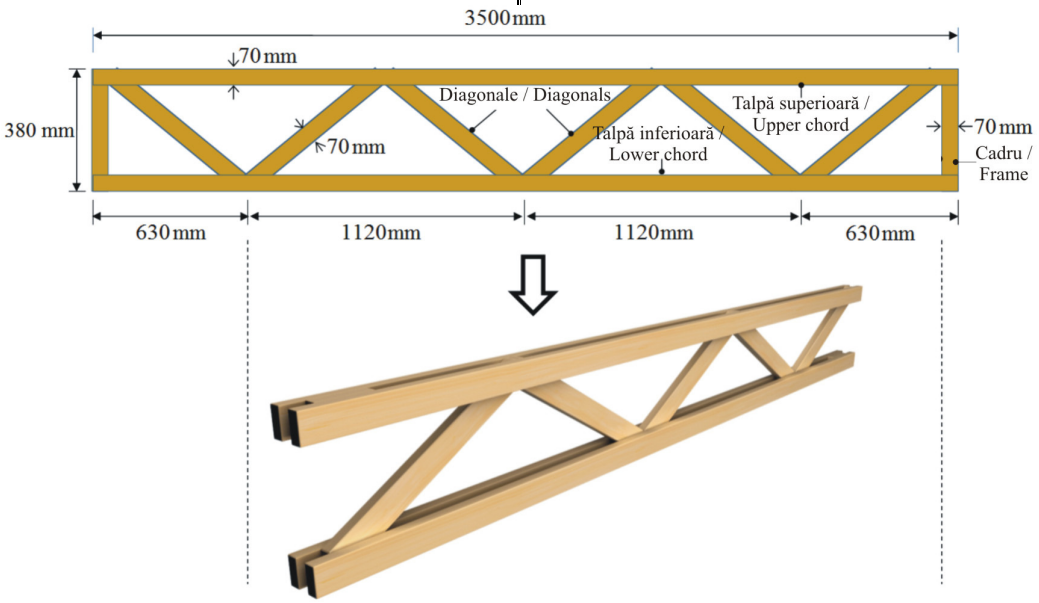


Fig. 1.
Descrierea geometrică a grinzii tip Dorean / Geometrical description of typical Dorean beam.

Grinda cu zăbrele prezentată în Fig. 1. rămâne elementul fundamental al sistemului Dorean de construcție a caselor. Acesta constă în grinzi cu zăbrele cu tălpile inferioară şi superioară compuse fiecare din câte două elemente din lemn şi zăbrele (montanți şi diagonale) compuse dintr-un singur element de lemn. Conexiunea dintre tălpi şi zăbrele se realizează cu adezivi sau cuie (Fournely şi Racher 2003). Testările s-au desfăşurat pe mostre cu configurația de bază şi dimensiunile prezentate în Fig. 1.

The lattice beam, presented in Fig. 1., remains the fundamental element of the Dorean housing construction system. It consists of a lattice beam with upper and lower chords composed each of two wood members with web members (posts and diagonals) composed of one wood member. The connection between the chords and the web members is realized by adhesives or nails (Fournely and Racher 2003). The tests have been carried out on specimens with basic configuration and dimensions shown on Fig. 1.

Materiale şi realizare
1. Materiale de conectare şi asamblare

În programul experimental de cercetare a grinzilor cu zăbrele din lemn, s-au studiat diferite tehnici de îmbinare, incluzând adezivi şi cuie. Pentru îmbinările încleiate, în plus față de natura adezivului, criteriile determinante ale performanței îmbinării sunt rezistența, timpul de încleiere, condiționarea, implementarea şi performanțele la foc. În Tabelul 1 se prezintă opt adezivi diferiți, mai mult sau mai puțin uşor de integrat într-un proces industrial pentru realizarea grinzilor. Doar trei din aceşti adezivi sunt

Material and Realization
1. Connection material and fasteners

In the experimental program of timber lattice beams, different joint techniques have been studied including adhesives and nails. For the glued joint, in addition to the adhesive nature, the determining criteria of the joint performance are the resistance, the time of catch, the conditioning, the implementation and the fire performance. Table 1 presents eight different adhesives more or less easy to be integrated in an industrial process for the realization of the beams. However, only three of

însă luați în considerare în studiu (coloanele gri din Tabelul 1).

Pentru ilustrarea acestor criterii de alegere, de exemplu adezivul LORD nu este selectat datorită caracterului său bi-component, în ciuda capacității sale de întărire rapidă. Sikaflex 221 (SK221) nu este nici el selectat datorită similarității sale cu actualul adeziv Sika (ASK) utilizat în sistemul DOREAN®. De fapt, ASK este considerat ca bază de comparație. Sunt selectați adezivul Sikaflex 852 (SK852), care prezintă caracteristici bune în clasificarea pentru rezistența la foc şi adezivul MS Polymeric (MSP), care prezintă bune proprietăți mecanice şi ecologice.

these adhesives are considered in the study (grey columns in Table 1).

As illustration of these choice criteria, LORD adhesive is not selected due to its double-component character, despite its rapid hardening. Sikaflex 221 (SK221) is not either selected because its similarity with the actual Sika (ASK) adhesive used in the DOREAN® system. In fact, ASK is considered as basis of comparison. Sikaflex 852 (SK852) adhesive presenting good characteristics for fire classification and MS Polymeric (MSP) adhesive showing good mechanical and ecological characteristics are selected.

Tabelul 1 / Table 1

Caracteristicile a diferiți adezivi pentru testarea grinzilor de tip DOREAN / Characteristics of different glues for DOREAN beam joints

Denumire adeziv / Name of adhesive	ASK	LORD 7546A/C	MSP	Adeziv înghețare pură rapidă / Adhesive fast pure freezing
Tip adeziv/ Type of adhesive	Poliuretanic/ Poluyrethane	Cu două componente, poliuretanic/ Double components Poluyrethane	Polimeri MS/ MS Polymers	Poliuretanic/ Poluyrethane
Durata de utilizare/ Time of use	30min	60min	20min	5 – 10min
Durata de întărire/ Time of catch	24h	48h	48 – 72h	8h
Densitate/ Density	1.2	1.49 A, 1.25 C	1.43	1.11
Viscozitate/ Viscosity		1400 A, 4000 C		45
Rezistența la forfecare/ Shear strength	1.5MPa			
Rezistența la tracțiune/ Tensile strength	1.2MPa			
Temperatura de utilizare/ Temperature use	5^0C – 35^0C			Min 5^0C
Temperature service	-40^0C – 90^0C			
Condiționare/ Conditioning	600ml		300ml, 600ml, 23L	300ml
Rezistența la foc/ Fire		inflamabil/ inflammable	inflamabil/ inflammable	
Teste la forfecare/ Tests shear strength	0.7MPa	2MPa	1.7 MPa	1.6MPa
Denumire adeziv / Name of adhesive	**Kraft**	**Sikaflex 221 (SK221)**	**Sikaflex 521 (SK521)**	**Sikaflex 852 (SK852)**
Tip adeziv/ Type of adhesive	Poliuretanic/ Poluyrethane	Poliuretanic/ Poluyrethane	Poliuretanic/ Poluyrethane	Poliuretanic/ Poluyrethane
Durata de utilizare/ Time of use				
Durata de întărire/ Time of catch	24h			
Densitate/ Density		1.3	1.4	1.5
Viscozitate/ Viscosity				
Rezistența la forfecare/ Shear strength				1.5MPa
Rezistența la tracțiune/ Tensile strength		1.8MPa	1.8MPa	2.5MPa
Temperatura de utilizare/ Temperature use	10^0C – 50^0C	5^0C – 40^0C	5^0C – 35^0C	5^0C – 35^0C
Temperature service	Until 110^0C	4h-120^0C, 1h-140^0C	4h-140^0C, 1h-150^0C	8h - 120^0C
Condiționare/ Conditioning	600ml	300ml, 600ml, 23L	300ml, 23L	300ml, 600ml, 23L
Rezistența la foc/ Fire		inflamabil/ inflammable	inflamabil/ inflammable	Ignifug/ fire retardating
Teste la forfecare/ Tests shear strength	0.8MPa	0.8MPa	0.4MPa	0.8MPa

Adezivi de tip ASK, SK852 şi MSP sunt utilizaţî pe o scară mai largă, permițând o flexibilitate mai mare a îmbinării. Un comportament satisfăcător la interfața lemn-adeziv se obține prin controlul calității suprafețelor elementelor din lemn, al umidității lemnului şi al presiunii perpendiculare în timpul polimerizării, exercitată de accesorii metalice, cum ar fi cuiele simple. În plus, clasicele îmbinări cu cuie sunt utilizate ca bază pentru compararea cu îmbinările încleiate. Cuiele au diametrul de 2.7mm şi lungime de 80mm, lungimea fiind supusă la dublă forfecare. Se utilizează 5 cuie în fiecare îmbinare.

Câte patru seturi a câte două grinzi au fost testate; fiecare set corespunde unei anumite tehnici de îmbinare: cuie sau diverşi adezivi.

2. Materialul lemnos

Din motive economice, grinzile se realizează cu două tipuri de lemn “a” şi “b”. “Lemnul a” este utilizat pentru montanți şi diagonale, iar “lemnul b”, pentru tălpi. Numai “lemnul a” are o calitate superioară, respectând cerințele şi gradul de marcare CE. Mai mult, în timpul fabricării grinzilor testate, au fost realizate epruvete de lemn (30x30x90mm^3) pentru a obține rezistența la compresiune axială a lemnului. Dimensiunile şi rezistența la compresiune a celor două tipuri de lemn sunt prezentate în Tabelul 2.

ASK, SK852 and MSP are installed with broad plan allowing flexible behaviour of the connection. Satisfactory behaviour of the adhesive-wood interface is obtained with quality control of timber faces, wood moisture content and perpendicular pressure during polymerisation provided by mechanical fastener such as simple threaded nail. In addition, classical nailed joints are used as a basis of comparison with the glued joints. The nails are from 2.7mm diameter 80mm, length loading in double shear. 5 nails are used in each connection.

Four sets of two beams were tested; each set corresponds to a specific technique of connection: nails or various adhesives.

2. Wood material

For economical aspects, the beams are realized with two types of wood “a” and “b”. “Wood a” is used for vertical bracing and diagonal struts and “wood b” for the chords. Only “wood a” is of high quality respecting the grade and CE marking requirements. Moreover during the manufacture of the tested beams, wood samples (30x30x90mm^3) are realized in order to obtain the axial compression strength of woods. Geometrical and compressive strength of the two wood materials are given in Table 2.

Tabelul 2 / Table 2

Rezistența la compresiune a lemnului testat / Compression strength of tested wood

	Specimen	Grosimea/Thickness (mm)	Lungimea/Length (mm)	Înălțimea/Height (mm)	fc, 0 (MPa)
Specia/Wood a	1	29.4	30.0	89.1	51.5
	2	29.6	30.5	89.7	49.9
	3	29.5	30.1	89.0	49.4
	4	29.4	29.7	89.0	46.2
	5	29.7	29.8	89.1	47.3
	6	29.1	30.2	89.1	47.7
	7	29.4	29.9	89.0	46.4
	8	29.4	30.0	89.3	50.7
Specia/Wood b	9	29.4	30.5	89.7	43.6
	10	30.0	30.7	89.5	38.2
	11	29.6	30.5	89.5	40.8
	12	29.9	30.4	89.4	41.5
	13	29.9	30.4	89.5	34.6
	14	30.0	30.6	89.7	33.6
	15	30.0	31.1	89.5	31.2
	16	29.9	30.6	89.6	34.1
	17	29.8	30.4	89.4	42.9
	18	29.8	30.6	90.1	40.4
	19	29.8	30.6	89.5	37.5
	20	29.9	30.4	89.2	41.8

Epruvetele au fost testate la compresiune paralelă cu fibrele, pe o maşină universală de încercări ZWICK. Pentru fiecare grindă s-a măsurat umiditatea lemnului cu umidometrul electronic, pentru a obține o valoare medie a umidității lemnului.

The samples have been tested in compression parallel to grain using a universal testing system ZWICK controlled in displacement. For each beam, the estimation of wood moisture contents is determined by electric moisture meters, in order to obtain a median value of wood moisture.

Rezistența medie la compresiune (MOR) este egală cu 48.9MPa pentru “lemnul a” şi 38.4MPa pentru “lemnul b”. Coeficientul de variație a rezistenței este de 3.6% pentru “lemnul a” şi 10.5% pentru “lemnul b”. Valoarea medie a umidității lemnului este de 11.4% pentru “lemnul a” şi 12% pentru “lemnul b” cu o variație standard foarte joasă. Curbele tensiune-deformație (Fig. 2.) arată comportamentul general al materialelor şi indică gradul de dispersie al rezultatelor. Deformația se obține ca raport între deplasarea totală şi lungimea inițială a epruvetei. Astfel, deformația reprezintă o valoare aparentă, dar curbele dau o idée asupra dispersiei rigidității axiale a epruvetelor. Modulul de elasticitate aparent (MOE) al acestor materiale indică o dispersie mai mare comparativ cu rezistența. Coeficientul de variație al acestui modul este egal cu 6.2% pentru “lemnul a” şi 10.9% pentru “lemnul b”.

The average compression strength (MOR) is equal to 48.9MPa for “wood a” and 38.4MPa for “wood b”. The coefficient of variation of the strength is equal to 3.6% for “wood a” and 10.5% for “wood b”. The average moisture content is equal to 11.4% for “wood a” and 12% for “wood b” with very low standard deviation. The stress-strain curves (Fig. 2.) show the global behaviour of the materials and give indications on the dispersion of the results. The strain is obtained as the ratio between the global displacement and the initial length of the specimens. Thus, the strain is apparent value but the curves give an idea about the dispersion of the axial stiffness of the specimens. The apparent Modulus Of Elasticity (MOE) of these materials show a higher dispersion in comparison with the strengths. The coefficient of variation of this modulus is equal to 6.2% for “wood a” and 10.9% for “wood b”.

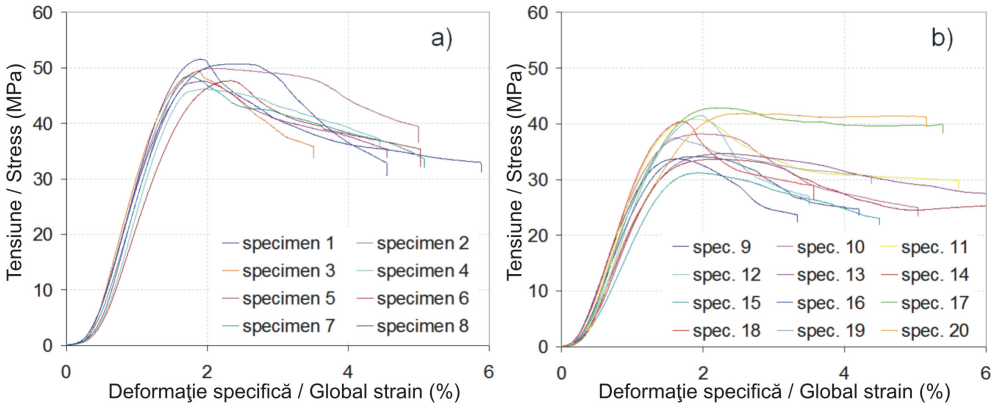


Fig. 2.
Curbele tensiune-deformație specifică la compresiune / Stress-strain curves in compression: a - epruvete “lemn a” din diagonale / “wood a” specimens from diagonal members; b - epruvete “ lemn b” de la tălpi / “wood b” specimens from chord member.

Raportul între valoarea medie a rezistenței la încovoiere între “lemnul a” şi “lemnul b” este de aproximativ 1.25. Acelaşi raport se obține pentru valorile modulului de elasticitate. Dispersia modulului de elasticitate (MOE) şi rezistenței la rupere (MOR) este ceva mai mică pentru diagonalele din “lemn a”. Astfel, pentru calcule, se allege o valoare medie de 12 000MPa pentru MOE în cazul tălpilor (rezistența cu gradul C30). Pentru diagonale se iau în considerare două valori pentru MOE şi anume 12 000 şi 15 000MPa. În faza finală, se menține doar valoarea de 12000MPa pentru toate elementele, datorită influenței sale scăzute.

3. Descrierea cercetării experimentale

Configurarea desfăşurării testului este prezentată în Fig. 3. Nodurile grinzii cu zăbrele sunt numerotate de la *A* la *I*. Săgeata este în mod particular urmărită în nodurile *C* şi *E,* pentru a reprezenta comportamentul general al grinzii. Forța

The ratio between the average values of MOR of “wood a” and “wood b” is about 1.25. The same ratio is obtained for the values of MOE. The dispersion of MOE and MOR is quite smaller for diagonal members “wood a”. Thus, for the calculations, an average value of 12 000MPa is assumed for the MOE of the chord members (strength graded C30). For diagonals, two values of the MOE are considered 12 000 and 15 000MPa. At final stage, only the value of 12000MPa is kept for all the members due to its low influence.

3. Experimental descriptions

The setup of the tests configurations is presented in Fig. 3. The nodes of the lattice beams are named *A* to *I*. The deflection is particularly observed on the nodes *C* and *E* to represent the general behaviour of the beam. The load is applied on the nodes *D* and *F* through hydraulic jack and

se aplică în nodurile *D* şi *F* prin intermediul unui dispozitiv hidraulic şi a unei grinzi din oțel (vezi Fig. 4.). Condițiile cinematice de utilizare sunt realizate cu suporți simpli în nodurile *A* şi *I* (vezi Fig. 4.). Figurile 3 şi 4 indică poziția sistemului suport lateral utilizat pentru prevenirea flambajului lateral. Oricum, aceşti suporți laterali nu sunt în contact cu mostra, iar în timpul testului nu s-au observat fenomene de flambaj lateral. Astfel, momentul de inerție în direcție transversală, dat de talpa dublă (Fig. 1.) este suficient pentru a garanta stabilitatea în plan, aşteptată pentru acest tip de grindă, la încovoiere.

steel trimmer beam (see Fig. 4.). Kinematic boundary conditions are realized with simple supports in the nodes *A* and *I* (see Fig. 4.). Figs. 3. and 4 show the position of the lateral support system used to prevent the lateral buckling. However, these lateral supports are not in contact with the specimen and during the test no lateral buckling phenomena was observed. Thus, the moment of inertia in the transverse direction, given by the double chords (Fig. 1.) is sufficient to guarantee the expected stability out of plan for this type of beam in bending.

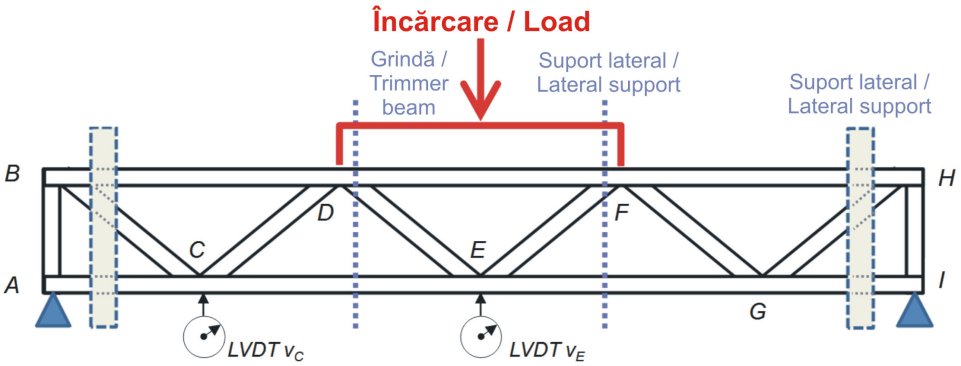


Fig. 3.
Configurarea testării mecanice / Mechanical testing setup.

Testele se desfăşoară cu ajutorul unui dispozitiv hidraulic cu deplasare activă controlată. Deplasările şi încărcările sunt înregistrate în mod continuu, utilizând senzori LVDT de ± 100mm, extensometrii de ± 2mm, celule de încărcare de 2x15kN şi sistem electronic de achiziții de date. Dubla simetrie a configurației este controlată măsurând cele două forțe în nodurile *D* şi *F* şi deplasările pe fiecare parte a grinzii, în nodurile *C* şi *E*. Configurarea experimentală, cu detaliile locale, este prezentată în Fig. 4.

The tests are carried out using hydraulic jack with active controlled displacement. Displacements and loads are continuously recorded using LVDT sensors of ± 100mm, extensometers of ± 2mm, load cells of 2x15kN and electronic data acquisition system. The double symmetry of the configuration is controlled measuring the two loads in the nodes *D* and *F* and the displacements on each side of the beam in the nodes *C* and *E*. The experimental setup with local zooms is shown in Fig. 4.

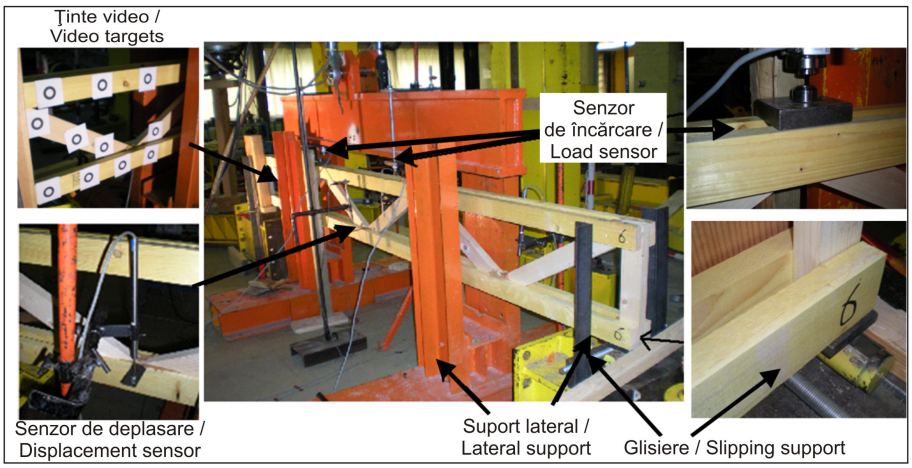


Fig. 4.
Configurarea experimentală / Illustration of experimental setup.

Protocolul experimental selectat se bazează pe experimentul standard legat de testul de săgeată al grinzilor din lemn (NF EN 408/2004). În timpul testului, protocolul de încărcare se aplică în conformitate cu următorii paşi:
- preîncărcarea grinzii până la 4kN, corespunzând cu 30% din forța de rupere estimată, F_{max} (10kN pentru grinda 8);
- încărcare constantă timp de o jumătate de minut, apoi descărcarea până la 1kN (2kN pentru grinda 8);
- re-încărcarea până la distrugerea totală a structurii.

Pentru a analiza comportamentul cinematic al grinzii cu zăbrele, se utilizează un sistem de măsurare fără contact, prin intermediul unei video camere (Fig. 5.). Obiectivele video (numerotate m1, m2,.., m11) sunt încleiate pe părțile laterale ale tălpilor şi pe primele diagonale, pentru a evalua deplasările şi rotațiile în nodurile *B* şi *C.* Aceste obiective prezintă cel puțin două axe de simetrie, iar mărimea lor este astfel definită, pentru a obține o precizie de 1/20 000 din mărimea totală a imaginii analizate. Camere potrivite permit determinarea spațială a deplasărilor pentru fiecare obiectiv. Poziția fiecărui obiectiv se măsoară direct de către sistemul metric video la începutul şi în timpul testului. Astfel, deplasările relative sunt calculate în baza referinței geometrice (X, Y, Z). Aceste valori se utilizează la calculul deplasărilor axiale şi a celor semi-rigide de rotație, ale îmbinărilor montant-diagonală.

The selected experimental protocol is based on the standard experiment related to the wood beams deflection tests (NF EN 408/2004). During the tests, the loading protocol is applied according to the following steps:
- preloading of the beam until 4kN, corresponding to 30% of the estimated failure load F_{max} (10kN for beam 8);
- constant load during half minute, then unloading to 1kN (2kN for beam 8);
- re-loading until the total collapse of the structure.

In order to analyse the kinematic behaviour of lattice beam a non-contact measurements system by video camera is used (Fig. 5.). The video targets (called m1, m2,.., m11) are glued on the lateral face of the chords and the first diagonals to evaluate the displacements and rotations on the nodes *B* and *C.* These targets present at least two symmetry axes, and their size is defined to obtain a precision of 1/20 000 of the global length of the analysed picture. Matched cameras allow determining the 3D displacements of each target. Position of each target is directly measured by the video metric system at the beginning and during each test. Thus, the relative displacements are calculated on the basis of geometrical reference (X, Y, Z). These values are used to calculate the axial and the rotational semi-rigid displacement of the diagonal strut joints.

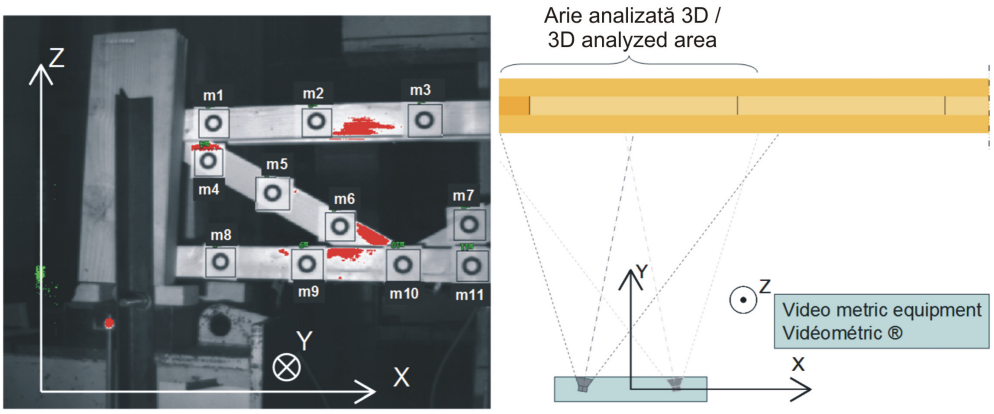


Fig. 5.
Obiectivele video pentru analiza imaginii / Video targets for the image analysis (Peuchot 1993; Lavest et al. 1997).

REZULTATELE EXPERIMENTALE

Pentru investigarea comportamentului grinzii cu zăbrele din punct de vedere al comportamentului semi-rigid al îmbinărilor, rezultatele experimentale se analizează la nivel general şi local. Măsurătorile la nivel general se materializează în curba forță-săgeată a grinzii. Măsurătorile locale se referă la deplasarea relativă între elementele fiecărei îmbinări. Aceste măsurători sunt realizate cu ajutorul unor traductoare clasice (LVDT) şi a unei camere video, asupra unui număr mare de obiective plasate pe mostră.

EXPERIMENTAL RESULTS

To investigate the behaviour of the lattice beam taking into account the semi-rigid behaviour of the joints, the experimental results are analysed considering the global and local levels. The global measurement concerns the load-deflection curve of the beam. The local measurement concerns the relative displacement between the members of each connection. These measurements are performed using the classical transducers (LVDT) and camera exploiting a large number of targets on the specimen.

Curba forței de încărcare şi a deplasării

În baza unui set complet de înregistrări în timpul testelor, curbele forță-deformație (Fig. 6a şi 6b) prezintă comportamentul general al grinzilor. Fig. 6c şi 6d indică un detaliu al acestor curbe forță-deformație, pentru a ilustra comportamentul sub sarcină aproape de limitele de funcționare impuse. Până la 4kN, comportamentul grinzilor este aproape similar; iar diferențe mai mari apar pentru forțe apropiate de cea limită. O rezistență scăzută se observă pentru grinzi cu adeziv MSP. De altfel, această tehnică de îmbinare dezvoltă o rigiditate ridicată. Cea mai mare rezistență se obține cu adezivul SK852. Grinzile îmbinate cu cuie indică o rezistență finală apropiată de cea a celor încleiate, dar fără rezistență reziduală. Însă grinzile cu cuie dezvoltă de la început un comportament neliniar.

Load and Deflection Curves

Based on the complete set of records during the tests, the load – deflection curves (Figs. 6a and 6b) show the global behaviour of the beams. Figs. 6c and 6d show a zoom on these load-deflection curves to illustrate the behaviour with a load close to the serviceability limit states. Until 4kN, the behaviours of the beams are quite similar; but larger difference appears for load near the ultimate load. The lower strength is observed for beams with MSP adhesive. However, this technique of connections performs higher rigidity. The higher resistance is obtained with SK852 adhesive. The nailed beams show ultimate resistances close to those of the glued beams but without residual resistance. Besides, the nailed beams exhibit a non linear behaviour from the beginning.

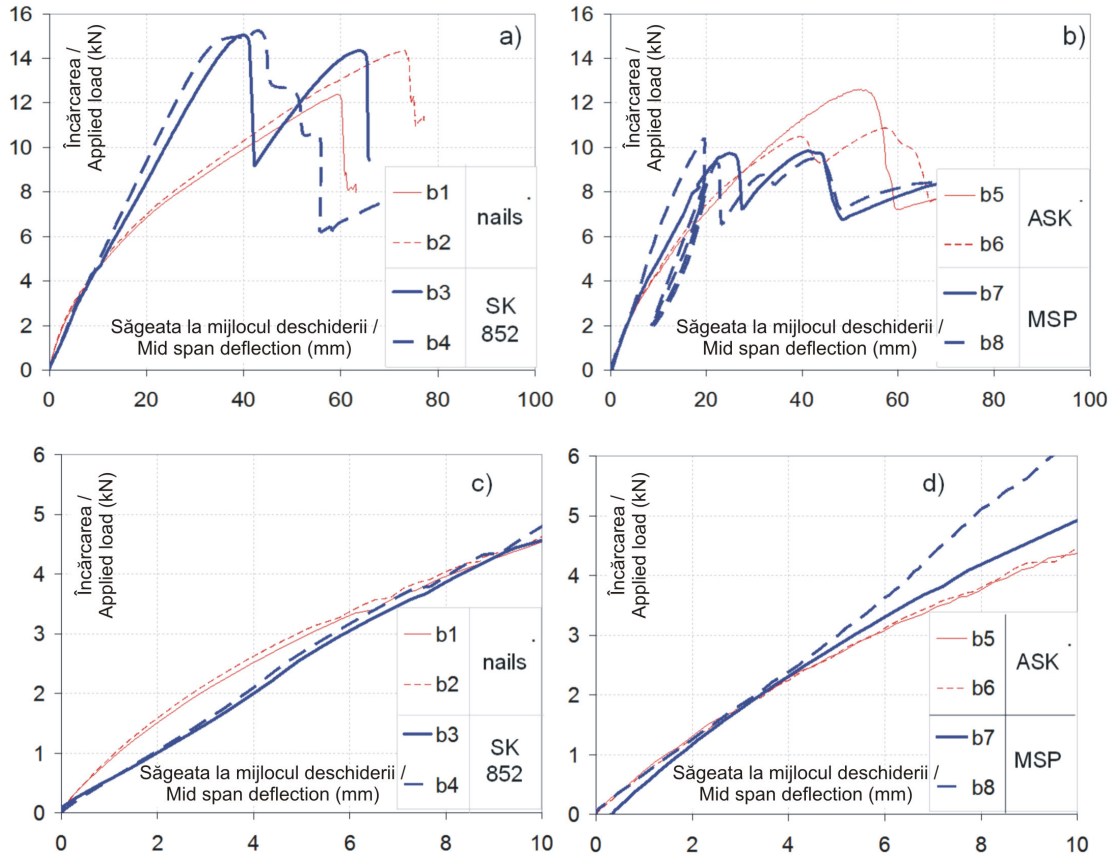


Fig. 6.
Curbele forță-deplasare pentru grinzi / Beam load-deflection curves:
a, b - Curbe generale / Global curves; c, d - Detaliu în faza elastică / Zoom on the elastic phase.

Tabelul 3 prezintă un rezumat al câtorva caracteristici măsurate la forța limită, corespunzand cu forța maximă măsurată în timpul testului. Aceste caracteristici sunt forțele aplicate în nodul *F* (forța din dreapta) şi nodul *D* (forța din stânga), forța totală, deplasarea dispozitivului şi deplasarea nodurilor *E* (din centru) şi *C*.

Table 3 presents a summary of some measured characteristics at the ultimate load corresponding to the maximum load measured during test. These characteristics are the applied loads on the node *F* (right load) and node *D* (left load), the total load, the displacement of the jack and the displacements of nodes *E* (mid span) and *C*.

Tabelul 3 / Table 3

Datele experimentale forță-săgeată pentru forța finală / Experimental load-deflection data for the maximum load

Grinda/Beam	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
Tip îmbinare/ Type of joints	Cuie/Nails	Cuie/Nails	SK852	SK852	ASK	ASK	MSP	MSP
Săgeata / deflection V_E (mm)	53.30	73.14	40.07	36.67	52.21	39.65	24.74	19.54
Săgeata / deflection V_C (mm)	34.03	47.41	21.61	24.13	30.09	23.27	13.03	9.89
Deplasări/Jack displacements (mm)	58.86	73.08	38.35	35	50.29	37.16		
Încărcare stânga/Left load (kN)	6.36	6.94	7.38	7.61	6.45	5.46	4.56	5.25
Încărcare dreapta/Right load (kN)	6.05	7.43	7.66	7.63	6.16	5.02	5.17	5.16
Încărcare totală/Total load (kN)	12.41	14.37	15.04	15.24	12.61	10.48	9.73	10.41

Caracteristici de rupere în zona de îmbinare

Pentru grinzile încleiate (Fig. 7), o primă localizare a ruperii s-a observat în adezivul unuia din nodurile (*B* sau *C*). Oricum În ciuda acestor ruperi locale, grinda a prezentat o rezistență mai mare înainte de a atinge punctul de distrugere. Această ruptură sau cedare în zona de încleiere apare în urma forfecării în stratul de adeziv, fără nici o fisură în tălpi. Rupturile locale se observă la capătul primelor două diagonale *BC* şi *CD* corespunzând diagonalelor solicitate la tensiune maximă şi compresiune.

Fracture Features in Joint Areas

For the glued beams (Fig. 7), a first localized failure occurred in the adhesive of one node (*B* or *C*). However, in spite of this local failure the beam showed a higher resistance before reaching the total collapse. This local failure or yielding in joint glued area appears in shear in the glued surface without any crack in the chords. The localized failures are observed at the ends of the first two diagonals *BC* and *CD* corresponding to the diagonals undergoing maximum tension and compression.

Fig. 7.
Ruperi locale în zonele încleiate / Local failure in the glued joints.

În grinzile îmbinate exclusiv prin cuie (grinzile 1 şi 2), rupturile apar în zona de îmbinare a tălpilor prin ruperi fragile în lemn, datorită tensiunii perpendiculare pe fibre (Fig. 8.). Astfel, pentru îmbinările cu cuie, dezvoltarea fisurilor este mai rapidă decât în zonele de îmbinare cu adeziv. Caracterul fragil al rupturii şi nedistribuirea forțelor interne, după distrugerea locală, limitează utilizarea acestor tipuri de îmbinări. În practică, pentru îmbunătățirea acestor tipuri de îmbinări, se pot utiliza plăcuțe de asamblare..

La sfârşitul testului, se observă în zona îmbinării o alunecare permanentă importantă, de translație şi rotație între elementele componente.

In the beams connected exclusively by nails (beams 1 and 2), the failure arises in the joint zone of the chords by the brittle failure of wood in tension perpendicular to grain (Fig. 8.). Thus, for the nailed connections, the crack development is quicker than the glued adhesive joints. The brittle character of the failure and the non redistribution of the internal forces, after localized damage, limit the use of this kind of joints. In practice, to improve the strength of this type of connections, it is possible to use gusset plates.

At the end of the test, important permanent slip, in translation and rotation between members, is observed in the joint zone. The final collapses of the

Distrugerea grinzilor apare în toate cazurile, cu săgeată mare. Acest parametru este un aspect important pentru rezistența reziduală a acestor grinzi. Se poate exprima ca valoarea finală a deplasării sau prin parametrul static de plastifiere. Pentru această a doua abordare se poate defini un punct de curgere pe curbele din Fig. 6,a şi b.

beams arises in all cases with high deflection. This parameter is an important aspect for residual strength of these beams. It can be represented by the ultimate value of displacement or by the static ductility parameter. For this second approach, a yielding point has to be defined on the curves of Fig. 6a and 6b.

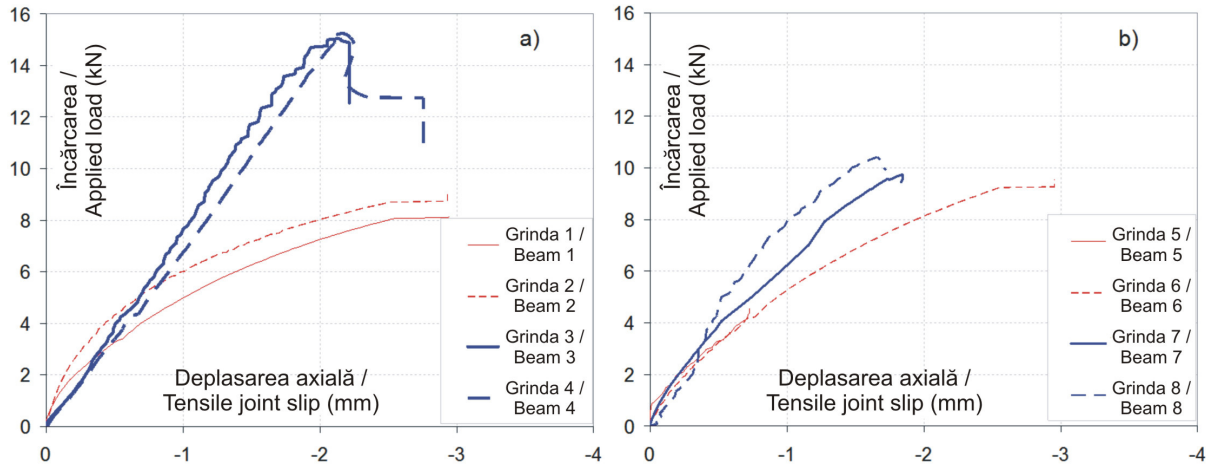
Fig. 8.
Inițierea fisurilor în îmbinarea cu cuie / Illustration of the crack initiated in the nailed joint.

Semi-rigiditatea axială a îmbinării

Fig. 9. prezintă evoluția forței aplicate în raport cu deplasarea axială a îmbinării, între prima diagonală supusă la tensiune şi talpa inferioară (*BC-ACE*). Fig. 9,a şi b prezintă curbele referitoare la comportamentul îmbinării, până la rupere şi Fig. 9,c şi d ilustrează începutul acestor curbe, pentru observarea deformările elastice. Acest lucru demonstrează caracterul semi-rigid al îmbinării între componentele grinzii cu zăbrele. Față de curbele forță-săgeată (Fig. 6.), curbele forță-alunecare (Fig. 9.) confirmă că îmbinările reprezintă o importantă parte a deformării generale a grinzilor. Grinzile îmbinate cu cuie au o rigiditate la încovoiere mai scăzută decât cele încleiate, în timp ce rezistența lor este aproximativ aceeaşi. Rigiditatea mai scăzută apare doar pentru o forță mai mare de 4kN, echivalentul unei forțe distribuite de 150daN/mm².

Axial Semi-Rigid Stiffness of the Joints

Fig. 9. shows the evolution of the applied load versus the axial displacement of the joint between the first diagonal in tension and the lower chord (*BC-ACE*). Figs. 9a and 9b show the whole curves of the joint behaviour until failure and Figs. 9c and 9d illustrate the beginning of these curves to observe the elastic parts. This illustrate the semi-rigid character of the joint between the elements of the lattice beams. In comparison with the load-deflection curves (Figs. 6.), the load-slip curves (Figs. 9.) confirm that the connections represent a large part of the global deflection of the beams. The beams with nailed joints exhibit flexional rigidity lower than that observed for the glued joints while their resistance is approximately the same. This lower rigidity appears only for a loading higher than 4kN, equivalent to a distributed load of 150daN/m².



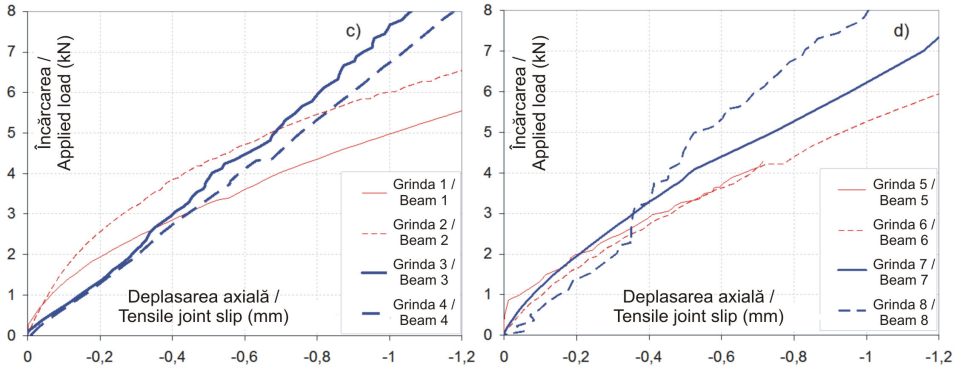


Fig. 9.
Curbele forță – deplasare axială a îmbinărilor tensionate / Applied load-axial displacement curves of the joints in tensio:
a, b - întreaga curbă forță-deplasare / whole load-displacement curve;
c, d - partea inițială a curbei / initial part of the curve.

Raportul v_C/v_E dintre deplasările determinate experimental în nodul *C,* situat la 1/6 din deschidere şi nodul *E* situat la mijloc este prezentat în Fig. 10. Pentru toate grinzile, o forță aplicată de 4kN corespunde stării limită de exploatare, în baza criteriului de determinare a săgeții de *l/400*. În Fig. 10. prezintă influența rigidității diferitelor tipuri de îmbinări asupra săgeții grinzii. Aceasta se compară cu săgeata calculată în ipoteza unor grinzi cu componente asamblate cu cepuri. Dispersia rezultatelor obținute pentru setul de opt grinzi poate fi redusă dacă se realizează comparația pentru fiecare tip de îmbinare.

The ratio v_C/v_E of experimental deflections between node *C* located at 1/6 of the span (v_C) and node *E* located at the mid span (v_E) is presented in Fig. 10. For all the beams an applied load of 4kN corresponds to a Serviceability Limit State with deflection criteria of *l/400*. Fig. 10. shows the influence of the rigidity of the different types of connections on the deflection of the beam. It is compared with the deflection calculated with the hypothesis of pin-ended members. The dispersion of the observed results for the set of eight beams can be reduced if the comparison is done for each type of connection.

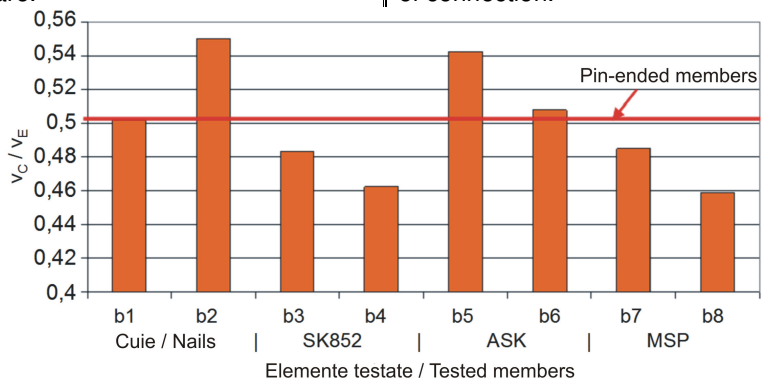


Fig. 10.
Raportul săgeților determinate experimental între nodurile C şi E pentru o încărcare SLS a grinzii / Ratio of the experimental deflections between nodes C and E for a SLS loading.

ANALIZA REZULTATELOR

Abordare analitică

Pentru compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale ale grinzilor cu zăbrele, se realizează calculul pentru o grindă simplă. Se porneşte de la ipoteza unor zăbrele simple, cu elemente componente asamblate cu cepuri (tălpi, elemente verticale şi diagonale). Pentru a descrie semi-rigiditatea axială a îmbinării la capătul elementelor diagonale, se inserează elemente de grindă scurte la extremitatea acestora. Aceste

RESULTS ANALYSIS

Analytical Approaches

In order to compare the experimental and the theoretical results of lattice beam, a simple beam theory calculation is conducted. Simple truss hypothesis is assumed, with pined connections between the members of the lattice beam (chords, vertical and diagonal members). In order to describe the axial semi rigidity of the connection at the end of the diagonal struts, short beam elements are inserted at the extremity of the struts. These

elemente, pentru fiecare forță *N*, se caracterizează prin:
- lungimea, l_c, reprezentînd zona de influență a îmbinării (Fig. 11.);
- modulul de elasticitate al materialului, *E*, care se ia egal cu cel al elementului diagonal;
- aria A_c este parametrul utilizat la definirea valorii modulului de rigiditate al îmbinării K_c (relația 3).

Diversele mărimi sunt date în ecuațiile următoare:
- deformația specifică:

$$\varepsilon = \frac{N}{E \cdot A_c} \quad (1)$$

- variația lungimii:

$$\delta\, l = \varepsilon \cdot l_c = \frac{N \cdot l_c}{E \cdot A_c} \quad (2)$$

- modulul de rigiditate:

$$K_c = \frac{E \cdot A_c}{l_c} \quad (3)$$

Valorile forțelor axiale se calculează în fiecare element, luând în considerare structura statică determinată şi aplicând forțe în nodurile *D* şi *F*. Apoi se aplică principiul virtual prin forțele virtuale, în nodurile *E* şi *C*, aşa cum se poate observa în relația (4).

$$\delta f \cdot v_E = \sum_{i=1,n} \frac{N_i \cdot \overline{N_{i,E}}}{E_i \cdot A_i} \text{ and } \delta f \cdot v_C = \sum_{i=1,n} \frac{N_i \cdot \overline{N_{i,C}}}{E_i \cdot A_i} \quad (4)$$

Unde v_X reprezintă săgeata în nodul *X*. *i* este indicele componentei (talpă, diagonală, montant şi elemente scurte de grindă). N_i este valoarea forței axiale în componenta *i* sub acțiunea forței aplicate în nodurile *D* şi *F*. $\overline{N_{i,P}}$ este valoarea forței axiale în componenta *i* sub acțiunea forței unitare virtuale δf aplicate în nodul *P*. Diagonala grinzii cu zăbrele şi elementul de taplă sunt prezentate în Fig. 11.

elements, for each axial force *N*, are characterized by:
- their length, l_c, representing the zone of influence of the connection (Fig. 11.),
- the Modulus Of Elasticity of the material, *E*, taken equal to that of the diagonal element,
- the area, A_c, is the parameter used to define the value of the semi rigid stiffness of the joint K_c (Eq. 3).

The different expressions are given in the following equations:

$$\varepsilon = \frac{N}{E \cdot A_c} \quad (1)$$

$$\delta\, l = \varepsilon \cdot l_c = \frac{N \cdot l_c}{E \cdot A_c} \quad (2)$$

$$K_c = \frac{E \cdot A_c}{l_c} \quad (3)$$

The values of the axial forces are calculated in each element considering statically determined structure and applied load on the nodes *D* and *F*. The principle of virtual work is then applied with the virtual forces δf on the nodes *E* and *C* as shown in Eq. (4).

$$\delta f \cdot v_E = \sum_{i=1,n} \frac{N_i \cdot \overline{N_{i,E}}}{E_i \cdot A_i} \text{ and } \delta f \cdot v_C = \sum_{i=1,n} \frac{N_i \cdot \overline{N_{i,C}}}{E_i \cdot A_i} \quad (4)$$

Where v_X represents the deflection of the node *X*. *i* is the index of the bars (chord, diagonal, vertical bracing and short beam members). N_i is the value of the axial force in the bar *i* under the applied load on nodes *D* and *F*. $\overline{N_{i,P}}$ is the value of the axial force in the bar *i* undergoing the virtual unit force δf applied on the node *P*. The diagonal strut beam element and the chord beam element are presented in Fig. 11.

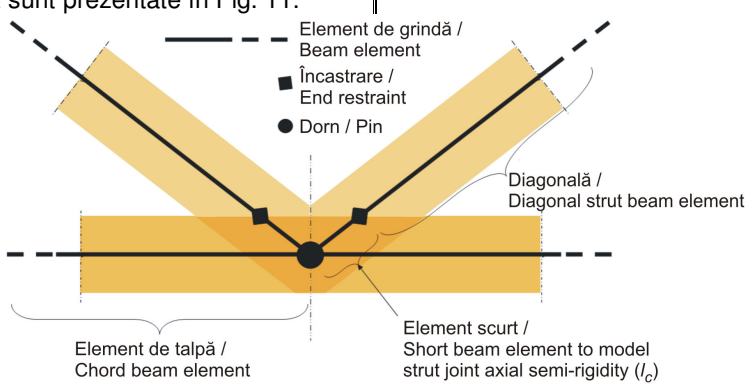


Fig. 11.
Îmbinarea semi-rigidă şi modelul grinzii cu condițiile limită / Semi-rigid joint and beam model with boundary conditions.

Compararea rezultatelor experimentale cu cele analitice

Conform calculelor, (Fig. 12.) ilustrează influența semi-rigidității îmbinării axiale asupra comportamentului general al grinzii cu zăbrele. Un raport de 10 aplicat rigidității îmbinării poate induce un raport de 7 asupra săgeții. Astfel, influența rigidității îmbinării este cert importantă asupra cuplului încărcare-săgeată al grinzii cu zăbrele, pentru valorile îmbinării analizate. Fig. 12. prezintă de asemenea evoluția raportului dintre săgeata în nodurile *C* şi *E* şi semi-rigiditatea axială a îmbinărilor.

Rezultatele experimentale şi analitice sunt similare din punct de vedere al comportamentului semi-rigid, pentru o valoare de 6kN/mm, în condițiile unei forțe aplicate de 4kN (Fig. 12.). Prin modelul analitic se obține o săgeată v_E = 8.2mm şi raportul v_C/v_E = 0.52. Prin cercetările experimentale s-a obținut o săgeată v_E cu valori în intervalul 6.6 până la 8.8mm, cu o valoare medie de 8.15mm. Valoarea medie experimentală a rigidității îmbinării este de 6.3kN/mm, cu o valoare minimă de 5 şi o valoare maximă de 8kN/mm.

Comparison of Experimental and Analytical Results

According to the calculations, Fig. 12. illustrates the influence of the joint axial semi-rigidity on the global behaviour of the lattice beam. A ratio of 10 on the joint rigidity can induce a ratio of 7 on the deflection. Thus, the influence of joint rigidity is quite important on the global load-deflection of the lattice beam mainly for the values of the analysed connections. Fig. 12. also exhibits the evolution of the ratio between the deflections of nodes *C* and *E* versus the axial semi-rigidity of joints.

Experimental and analytical results are in good agreement when axial semi-rigid behaviour with a value of 6kN/mm is considered under the applied load of 4kN (Fig. 12.). Analytical model gives a deflection v_E = 8.2mm and a ratio v_C/v_E = 0.52. Experimental observations exhibit a v_E deflection varying from 6.6 to 8.8mm, with a average value of 8.15mm. The experimental average value of the joint rigidity is equal to 6.3kN/mm with a minimum value of 5 and a maximum value of 8kN/mm.

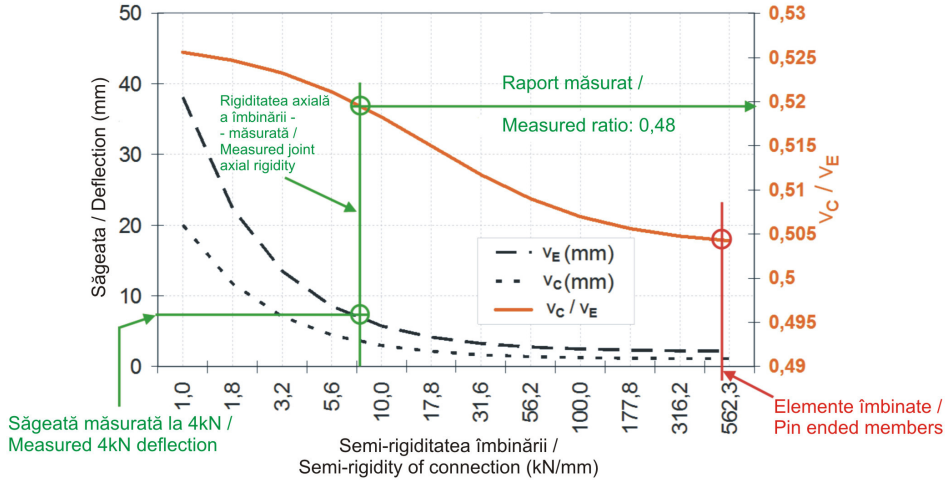


Fig. 12.
Sensibilitatea săgeții grinzii cu zăbrele la semi-rigiditatea axială a îmbinării / Sensitivity of the truss beam deflection to joint axial semi-rigidity.

Cele mai mari diferențe între rezultatele cercetărilor teoretice şi experimentale se referă la variația săgeții de-a lungul grinzii, reprezentată aici de raportul v_C/v_E. Modelul presupune o variație a acestui raport de la 0.505 la 0.525, în timp ce valorile experimentale variază de la 0.46 la 0.55. Cu valorile raportului v_C/v_E din afara intervalului teoretic (0.505 la 0.525) este necesară propunerea de modele mai complexe, care să ia în considerare rigiditatea la deformațiile de rotație a îmbinării. Conform rezultatelor obținute prin aplicarea teoriei simple a grinzii, rotațiile teoretice ale primului şi celui de-al doilea element al tălpii inferioare (*AC* şi *CE*) pot fi obținute din relațiile (5).

$$rot_{AC} = \frac{v_C}{630} \text{ si } rot_{CE} = \frac{v_E - v_C}{1120} \text{ (cu } vx \text{ în mm)} \quad (5)$$

The largest difference between analytical and experimental results concerns the shape of the deflection along the span here represented by the ratio v_C/v_E. The model predicts a variation of this ratio from 0.505 to 0.525, while the experimental values vary from 0.46 to 0.55. With v_C/v_E ratio values outside the theoretical interval (0.505 to 0.525) it is necessary to propose more complete models taking into account the rotational stiffness of the connections. According to the results provided by simple beam theory, theoretical rotations of the first and the second lower chord elements (rot_{AC} and rot_{CE}) can be obtained by Eq. (5).

$$rot_{AC} = \frac{v_C}{630} \text{ and } rot_{CE} = \frac{v_E - v_C}{1120} \text{ (with } v_X \text{ in mm)} \quad (5)$$

Video camera şi compararea cu rezultatele LVDT

Obiectivele video din Fig. 5., au fost utilizate pentru calcularea deplasării sau a semi-rigidității dintre primul element de diagonală al grinzii cu zăbrele şi talpa inferioară sau superioară. Ca exemplu, compararea măsurătorilor LVDT şi a celor video s-a realizat pentru grinzile b_7 şi b_8 încleiate cu adeziv MSP (vezi Fig. 13. şi 14.). Figurile 13,b şi c indică pozițiile obiectivelor video şi a senzorilor LVDT. În Fig. 13a se prezintă evoluția forței aplicate în raport cu semi-rigiditatea îmbinării pentru grinda 8. Cu ajutorul obiectivelor video se calculează deplasările geometrice axiale pe direcțiile *x* şi *z*, pentru punctele m1, m4, m6, m10 şi m7.

Curbele forță-alunecare obținute prin măsurări video şi LVDT, la extremitatea inferioară a diagonalei *BC* supusă la întindere, sunt în acelaşi interval de valori. Rigiditățile axiale ale îmbinărilor între diagonalele supuse la tracțiune şi compresiune şi talpa inferioară, sunt apropiate. Dealtfel, comparația între rigiditățile la extremitățile superioare şi inferioare ale diagonalei *BC* indică un raport egal cu 2 (Fig.13a).

Pentru grinda 7, cu acelaşi tip de îmbinare (adeziv MSP) ca şi grinda 8, analiza indică o similitudine între măsurătorile video şi LVDT (Fig. 14.). Tehnica video dă posibilitatea de măsurare a deplasării îmbinării într-un interval mai larg decât echipamentul LVDT, aşa cum se poate observa în Fig. 14a (LVDT necesită administrarea capacității maxime şi a orientării inițiale).

Video Camera and LVDT Results Comparisons

The video targets shown in Fig. 5., have been used in order to calculate the displacement or the semi-rigidity between first diagonal struts, and upper or lower chord. As example, the comparison of LVDT and video measurements is done for beams b_7 and b_8 with MSP adhesive (see Figs. 13. and 14.). Figs. 13b and 13c show the positions of video targets and the LVDT sensors. Fig. 13a shows the evolution of the applied load versus the semi-rigid stiffness of the joint for the beam 8. With video targets, the axial displacements are calculated with the geometrical displacement, in *x* and *z* directions, of targets m1, m4, m6, m10 and m7.

The load-slip curves obtained from video and LVDT measurement in the lower extremity of the diagonal in tension *BC* are in the same range. The axial rigidities of the connections, between the diagonals in tension and compression and the lower chord, are quite close. However, the comparison between the rigidities in the upper and lower extremities of the diagonal *BC* exhibits a ratio equal to 2 (Fig.13a).

For the beam 7, with the same type of connection (MSP adhesive) as the beam 8, the analysis shows a good agreement between the video and LVDT measurements (Fig. 14.). Video technique gives the possibility to measure joint displacement on a wider range than LVDT as shown on Fig. 14a (LVDT needs a management of maximum capacity and initial orientation).

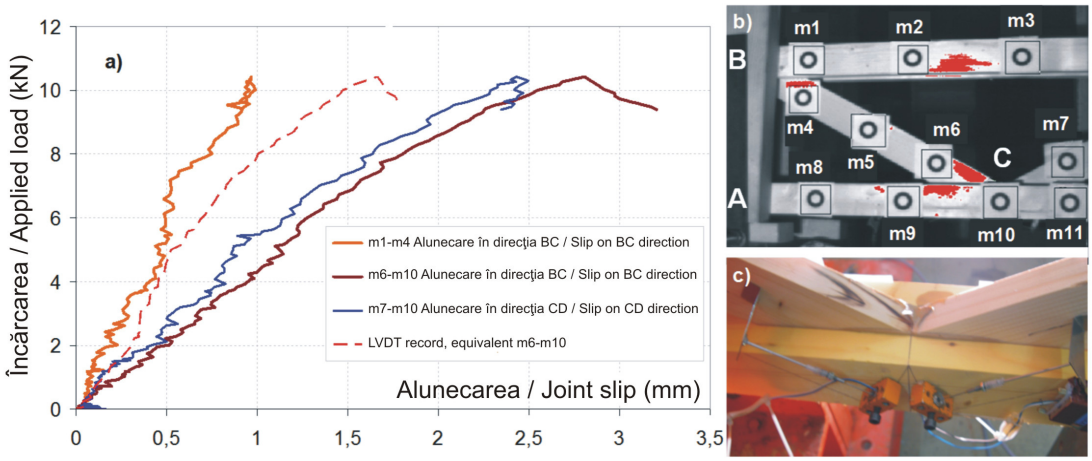


Fig. 13.
Comportamentul semi-rigid la extremitățile diagonalelor BC şi CD (grinda 8) / Semi-rigid behaviour at the extremities of diagonals BC and CD (beam 8):
a - curbele forță-alunecare / Load-slip curves; b - obiectivele video / Video targets; c - echipament LVDT / LVDT equipment.

Valorile rigidității axiale pentru diagonalele supuse la tracțiune sunt comparabile între grinzile 7 şi 8. Aceste valori se încadrează în intervalul 4.1 şi 10kN/mm pentru grinda 8 şi între 4.8 şi 8.3kN/mm pentru grinda 7. În orice caz, se observă o diferență

The values of joint axial rigidity for diagonals in tension are quite comparables between the beams 7 and 8. These values are between 4.1 and 10kN/mm for beam 8 and between 4.8 and 8.3kN/mm for beam 7. Nevertheless, a larger

mai mare între rigiditățile axiale ale îmbinărilor pentru diagonalele supuse la compresiune şi anume 4.3kN/mm pentru grinda 8 şi1.6kN/mm pentru 7.

Măsurătorile video şi LVDT sunt similare pentru aceste exemple şi, de asemenea, pentru întreaga cercetare experimentală. Dealtfel, valorile rigidității axiale între noduri şi la tracțiune şi compresiune, pot fi destul de diferite; un raport mai mare decât 6 se poate observa la acelaşi tip de îmbinare. Aceste diferențe trebuie luate în considerare pentru un model mai precis.

difference is observed between the axial rigidities of joints for diagonal in compression 4.3kN/mm for beam 8 and 1.6kN/mm for beam 7.

Video and LVDT measurements are in good agreement for these examples, and also on the whole experimentation. However, the values of axial rigidity between nodes and between compression and tension can be quite different; a ratio higher than 6 can be observed with the same type of connection. This variability should be taken into account in more precise modelling.

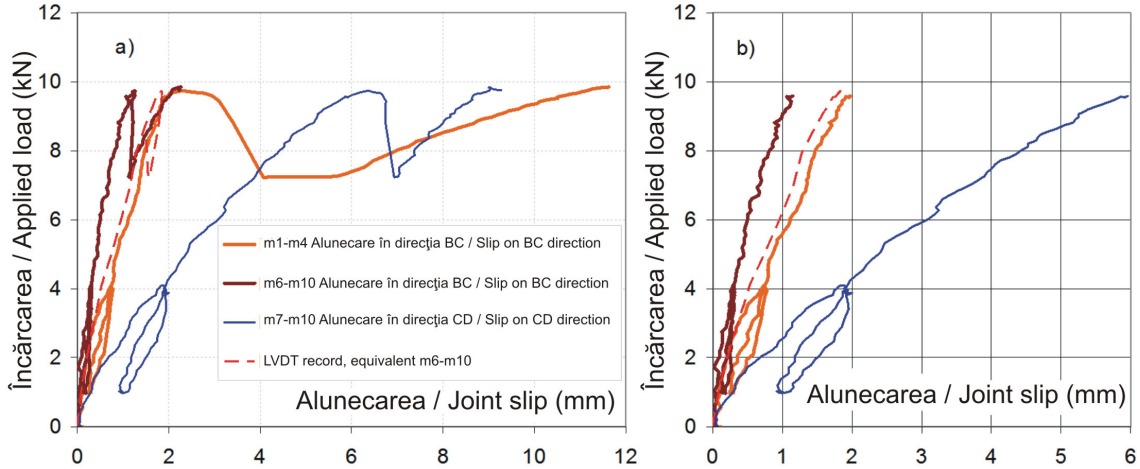


Fig. 14.
Semi-rigiditatea îmbinării pentru diagonala grinzii cu tracțiune şi compresiune maximă (grinda 7) / Joint semi-rigidity for diagonal struts with maximum of tension and compression (beam 7): a – global / Global pattern ship; b - comportamentul inițial / Initial behaviour part.

Semi-rigiditatea de rotație

Cu trei obiective ale analizei video pe fiecare componentă studiată, se poate verifica încovoierea locală pe fiecare element în parte şi, mai mult, se poate calcula rotația fiecăruia, iar apoi, rotația relativă între elemente. În Fig. 15 se indică evoluția forței aplicate în raport cu rotația îmbinării tălpii superioare şi inferioare cu prima diagonală a grinzii 8. În Fig. 16 se prezintă un detaliu al fazei elastice a acestor interacțiuni. Pe fiecare grafic, diferențele între curbe indică zona supusă încovoierii pentru fiecare componentă analizată. Curbele arată faptul că această încovoiere este destul de redusă, în special la începutul aplicării forței. În aceste curbe, "rotat 1-2" reprezintă rotația segmentelor aparținând obiectivelor m1-m2.

Rotational Semi-Rigidity

With three targets of video analysis on each studied member, it is possible to check the local bending of each member and moreover to calculate the rotation of each member and then the relative rotation between members. Fig. 15. shows the evolution of the applied load versus the rotation of the upper and lower chords and the first diagonal of the beam 8. Fig. 16. exhibits the zoom on the elastic phase of theses relations. On each graph, the differences between curves indicate the part due to the bending of the considered member. The curves show that this bending is quite small, especially at the beginning of the loading. In these curves, "rotat 1-2" represents the rotation of the segment of targets m1-m2.

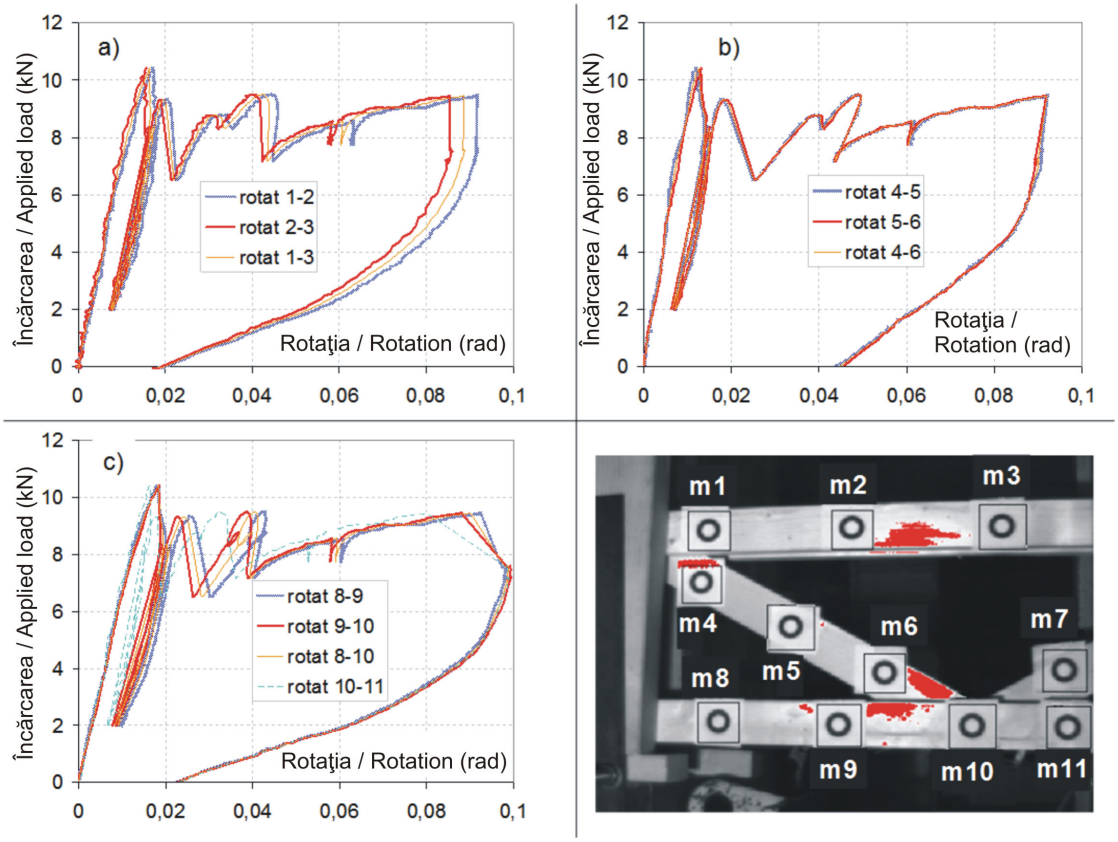


Fig. 15.
Curbele forță-rotație între tălpi şi prima diagonală / Load-rotation of the chords and the first diagonal: a - Rotația originii tălpii superioare / Rotations of the origin of the upper chord; b - Rotația primei diagonale / Rotation of the first diagonal; c - Rotația originii tălpii inferioare / Rotation of the origin of the lower chord.

Aceste rotații determinate experimental pot fi comparate cu valorile teoretice calculate cu relația (5). În Fig. 17. se observă evoluția rotației determinată teoretic, pentru componentele *AC* şi *CE* şi raportul dintre aceste rotații în funcție de rigiditatea axială a îmbinărilor. Rotația măsurată sub acțiunea forței aplicate de 4kN este reprezentată de asemenea în Fig. 17. Valorile experimentale şi teoretice ale rotației elementului *AC* sunt asemănătoare, dar rapoartele rotațiilor între valorile experimentale şi teoretice ale componentelor *AC* şi *CE* sunt diferite. (vezi Fig. 17b): 1.08 şi respectiv 1.92. Acest lucru ilustrează faptul că rigiditatea axială a îmbinării nu este suficientă pentru a modela teoretic comportamentul general al grinzilor cu zăbrele considerate în acest studiu.

These experimental rotations can be compared with theoretical values of rotation calculated as proposed in Eq. (5). Fig. 17. gives the evolution of theoretical rotations of the members *AC* and *CE* and the ratio between these rotations versus the axial rigidity of the joints. The measured rotation under the applied load of 4kN is also represented on Fig. 17. The experimental and theoretical values of the rotation of the *AC* element are in good agreement, but the rotation ratios between *AC* and *CE* members are quite different between experimental and theoretical values (see Fig. 17b): 1.08 and 1.92 respectively. This illustrates the fact that the axial stiffness of connections is not sufficient to model the behaviour of the lattice beams considered in this study.

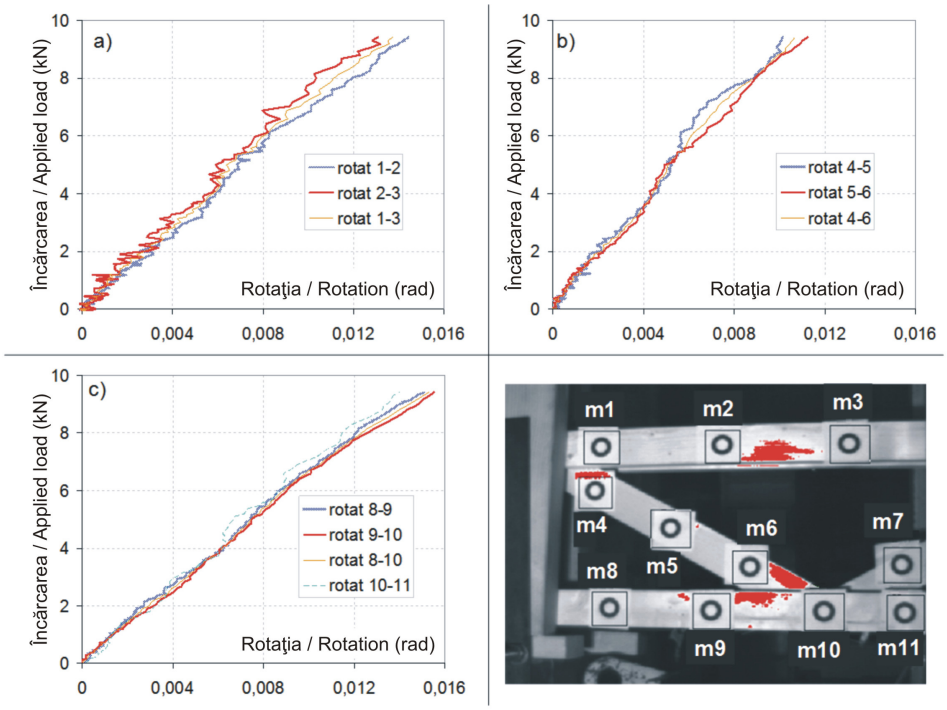


Fig. 16.
Curbele forță-rotație între tălpi şi prima diagonală în prima fază a încărcării / Load-rotation of the chords and the first diagonal at the initial stage of loading:
a - Rotația originii tălpii superioare / Rotation of the origin of the upper chord; b - Rotația primei diagonale / Rotation of the first diagonal; c - Rotația originii tălpii inferioare / Rotation of the origin of the lower chord.

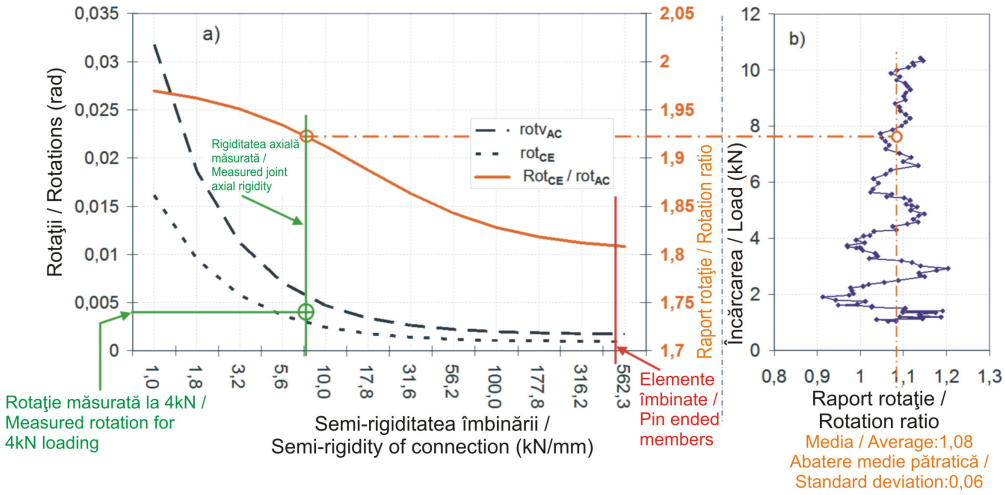


Fig. 17.
Comparația între rotațiile teoretice şi experimentale (nodul C) / Comparison between theoretical and experimental rotations (node C):
a - Sensibilitatea la rotație a grinzii cu zăbrele în ceea ce priveşte semi-rigiditatea îmbinării / Truss beam chord rotation sensitivity on joint semi-rigidity; b - raportul rotației experimentale între componentele AC şi CE / Experimental rotation ratio between AC and CE members.

Comportamentul local al îmbinărilor, influențat în primul rând de rotația relativă dintre componente, are efect asupra transferului de încovoiere în nodurile grinzii. Rotațiile dintre componente,

The local behaviour of the connections, mainly influenced by the relative rotation between members, has an effect on the bending transfer in the beam nodes. The measured rotations between

determinate prin măsurare, sunt mai mici decât cele calculate cu modelul (raportul apropiat de 0.5). Fig. 18 prezintă evoluțiile rotațiilor relative dintre diagonala *BC* şi tălpile superioară şi inferioară. Deşi aceste rotații sunt mici, ele pot genera un moment de încovoiere important. Oricum, este necesară evaluarea rigidității de rotație obținută în teste şi introducerea lor în analiza globală a grinzilor cu zăbrele. De fapt, curbele momentului încovoietor local de rotație al îmbinării sunt influențate de prea mulți parametrii, cum ar fi şi aria efectivă de încleiere.

members are lower than those calculated with the end-pined model (ratio close to 0.5). Fig. 18 shows the evolutions of the relative rotations between the diagonal *BC* and the upper and lower chords. Although these rotations are small, they can transfer significant bending moment. However, it is necessary to evaluate the rotational stiffness from tests to be introduced in the global analysis of the lattice beams. In fact, too much parameters, such as the effective glued area, influence the local moment rotation curves of the joints.

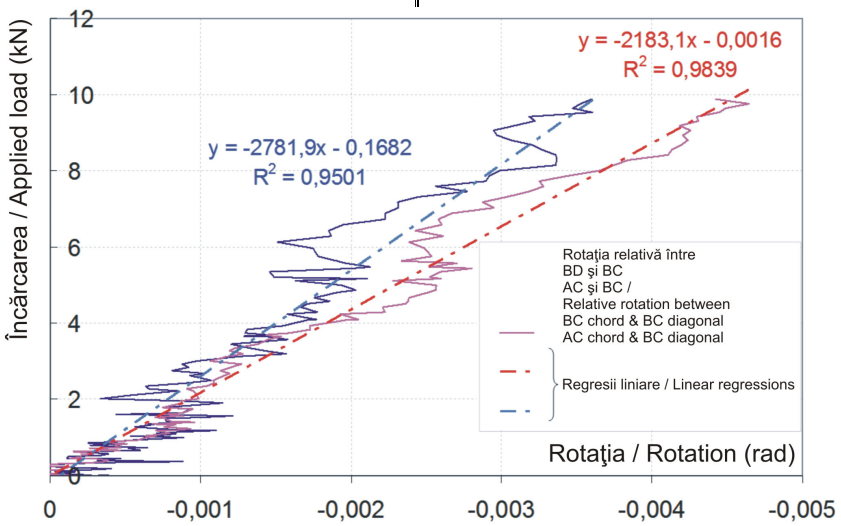


Fig. 18.
Evoluția rotației relative între prima diagonală şi extremitățile tălpilor / Evolution of relative rotation between first diagonal and extremities of chords.

CONCLUZII

În lucrare sunt prezentate teste asupra grinzilor cu zăbrele (DOREAN®) fabricate cu o multitudine de tehnici de îmbinare. Aceste teste dau posibilitatea de cuantificare a influenței naturii adezivului şi a metodei de realizare, asupra comportamentului grinzilor. Au fost analizați parametrii care influențează alegerea tipului de îmbinare, cum ar fi procesul de fabricație, costul, efectele asupra mediului, tipul de adeziv sau cuie şi capacitatea de încărcare. În comparație cu îmbinările încleiate, cele cu cuie dovedesc o rezistență acceptabilă şi un comportament neliniar, limitat de fragilitatea la rupere a lemnului la tracțiune perpendicular pe fibre. Dintre testele îmbinărilor încleiate, cele cu MSP reprezintă o soluție interesantă pentru rigiditate.

Tehnicile de măsurare demonstrează eficiența camerei video în comparație cu metoda clasică LVDT. Mai mult, această tehnică permite un câmp mai larg de măsurare, până la rupere, pentru săgeată, alunecarea îmbinării şi rotația îmbinării sau a elementului. Studiul de față arată că semi-rigiditatea îmbinării influențează comportamentul general al grinzii.

CONCLUSIONS

Tests on lattice timber beams (DOREAN®) manufactured with various techniques of connections are presented. These tests give the possibility to quantify the influence of the nature of the adhesive and the method for realization on the mechanical behaviour of the beams. The parameters influencing the choice of connection types, such as manufacture process, cost, environmental effects, types of adhesives or nails and load carrying capacity, have been discussed. In comparison with glued connections, the nailed ones show acceptable strength and a non linear behaviour limited by the brittle failure of timber in tension perpendicular to grain. Among the tested glued connections, the MSP represents an interesting solution for stiffness.

The measurement techniques show the efficiency of the video camera in comparison with classical LVDT. Besides, they allow widest field of measurements, until the failure, for deflection, joint slips and joint or member rotations. The study showed that semi-rigidity of the connections influences the total behaviour of the beam.

Cu aceste tehnici se măsoară rigiditățile axiale, chiar dacă se observă o dispersie a valorilor în diferite noduri. De altfel, în cadrul SLS, o valoare medie a rigidităților acestor îmbinări poate fi reprezentativă.

Semi-rigiditatea axială măsurată poate fi uşor inclusă într-o analiză tehnică analitică cu element finit, utilizând elemente ale grinzii. Se subliniază o bună similitudine între abordarea teoretică a grinzii şi rezultatele experimentale. Studiul demonstrează necesitatea de a lua în considerare rigiditatea axială, pentru a obține o acuratețe bună a comparației între cercetarea teoretică şi experimentală. Valorile măsurate ale rigidității axiale se pot utiliza în analiza diferitelor configurații de grinzi, variind deschiderea sau condițiile limită. Rotațiile elementelor sunt evaluate pentru extremitățile tălpilor superioară şi inferioară şi de asemenea pentru primul element diagonal. Datele video oferă rotațiile la capătul componentelor grinzilor, iar rezultatele experimentale obținute sunt compatibile cu rezultatele teoretice. Rezultatele arată de asemenea relația dintre evoluția încărcării grinzii şi corelația rotației relative dintre tălpile şi diagonalele grinzii.

Pentru a include comportamentul semi-rigid de rotație reprezentat de curbele moment-rotație sunt necesare mai multe rezultate experimentale asupra îmbinărilor, datorită compexității acestui comportament. Modelarea locală bazată pe metoda elementului finit se poate utiliza pentru această analiză, incluzând caracterul spațial şi contactul în zona de îmbinare.

Rezultatele simulărilor, prezentate în această lucrare, ilustrează efectul semi-rigidității, chiar şi în faza liniară a comportamentului grinzii. Deşi această fază reprezintă o parte importantă a comportamentului grinzii, este esențial să se ia în considerare neliniaritățile în modelare, precum şi efectul rotațiilor, datorat în special evoluției contactului dintre componentele îmbinate. Aceste rezultate numerice, preliminare, deschid drumul dezvoltării modelelor neliniare. Testările efectuate tind să completeze datele necesare pentru realizarea unor asemenea modelări sofisticate neliniare.

With these techniques the axial rigidities are measured, even if a dispersion is observed on the values in different nodes. However, in the field of the Serviceability Limit States (SLS) a median value of these rigidities of connections can be representative.

The measured axial semi-rigidity can be easily included in an analytical engineering approach or finite element software using beam elements. A good similitude between beam theory approach and the experimental results is underlined. The study showed the necessity to take into account the axial rigidity to obtain good accuracy between theory and experimentation. The measured values of axial stiffness can be used in the analysis of different beams configurations varying the span or the boundary conditions. Element rotations are evaluated for upper and lower chords extremities and also for the first diagonal element. The video data provides end bar rotations of the beams, the obtained experimental results are in good agreement with the theoretical results. Records also exhibit a relation between the evolution of loading and the evolution of the relative rotation towards chords and diagonal.

In order to include the rotational semi-rigid behavior represented by the moment-rotation curves more experimental results on connections are necessary because of the complexity of this behavior. Local modeling based on finite element method can be used to perform this analysis including 3D character and contact in the connections zone.

The results of the simulations presented in this paper illustrate the effects of semi-rigidity even in linear phase of the behavior. Although this phase represents a significant part for the behaviour of the beams, it is important to take into account non-linearities in modeling as well as effects of rotation, mainly due to the evolution of the contacts between the connected members. These preliminary numerical results open the way to develop non linear models. Tests are in progress to complete the data necessary to perform such sophisticated non linear modeling.

BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

Broughton JG, Hutchinson AR (2001) Sisteme cu adezivi pentru structuri de îmbinare a lemnului / Adhesive systems for structural connections in timber. Int J Adhesion & Adhesives 21:177-186.

Chang WS, Hsu MF, Chen WC (2005) Procedeu nou pentru evaluarea rigidității de rotație a imbinărilor tradiționale în lemn din Taiwan / A novel procedure for evaluating the rotational stiffness of traditional timber joints in Taiwan. 9th International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture. 83:169-178, Malta, Jun 22-24, 2005. ISSN: 1746-4498.

Daniunas A, Urbonas K (2008) Analiza structurilor de oțel cu îmbinări semi-rigide grindă-grindă şi grindă-coloană sub acțiunea forțelor axiale / Analysis of the steel frames with the semi-rigid beam-to-beam and beam-to-column knee joints under bending and axial forces. Engineering Structures 30:3114–3118.

Ellegaard P (2006) Finite-Element Modeling of Timber Joints with Punched Metal Plate Fasteners. Journal of Structural Engineering 132(3):409-417.

Fouchal F, Dubois F, Sauvat N (2011) Mechanical behaviour of the wood masonry. PRO LIGNO 7(3):3-9

Fournely E, Racher P (2003) Système constructif DOREAN® - Mesures de déformations sur sites et essais à la rupture des assemblages d'angles, Etude n°2003.06, C/U/S/T/ hall d'essais Génie Civil, Clermont-Ferrand.

Frühwald Hanson E (2011) Analiza rupturilor în structuri de lemn / Analysis os structural failures in timber structures: Typical causes for failure and failure modes. Engineering Structures 33:2978-2982.

Giurgiu M, Cismaru I (2011) Comparative study on the mechanical behavior of glued laminated beams made of spruce, pine and Douglas Fir wood. PRO LIGNO 7(3):18-28.

Guan ZW, Rodd PD (2008) Dibluri tubulare din oțel – o nouă aplicație în îmbinările semi-rigide din lemn / Hollow steel dowels — a new application in semi-rigid timber connections. Engineering Structures 23:110-119.

Haller P (1998) Progresul în dezvoltarea şi modelarea îmbinărilor în lemn / Progress in timber joint development and modelling. 5th World Conference on Timber Engineering. Montreux, Aug 17-20, 1:337-344, ISBN: 2-88074-380-X.

Kasai K, Ian Hodgson I, Bieiman D (1998) Metoda de reparare prin rigidizare cu şurub a îmbinărilor supuse la momente de rupere / Rigid-bolted repair method for damaged moment connections. Engineering Structures 20:521-532.

Kaveh A, Moeaz M (2008) Analiza cadrelor cu îmbinări semi-rigide; O abordare grafico-teoretică / Analysis of frames with semi-rigid joints: A graph-theoretical approach. Engineering Structures 28:829–836.

Komatsu K, Hwang KH, Hosokawa K (2000) Performanța structurală a structurilor portante semi-rigide tip glulam, construite printr-o tehnică de îmbinare cu pană I. Forfecare laterală a structurilor portante supuse unor forțe statice ciclice / Structural performance of glulam semi-rigid portal frames constructed by a hardwood wedge joint technique I. Lateral shear performance of portal frames subjected to static cyclic loading. Japan Wood Res Soc, 46(6):573-580, ISSN: 0021-4795.

Larsen HJ, Jensen JL (2000) Influența semi-rigidității îmbinării asupra comportamentului structurilor din lemn / Influence of semi-rigidity of joints on the behaviour of timber structures. Prog Structural Engineering Materials 2:267-277.

Lavest JM, Delherm C, Peuchot B, Daucher N (1997) Reconstrucție implicită prin detaliere. Viziune computerizată şi înțelegerea imaginii / Implicit Reconstruction by Zooming. Computer Vision and Image Understanding 66:301-315.

Leichti RJ, Hyde RA, French ML, Camillos SG (2000) Continuitatea rigidității conexiunii în structurile din lemn / The continuum of connection rigidity in timber structures. Wood and Fiber Science 32(1):1-19. ISSN: 0735-6161.

Moutou Pitti R, Fournely E, Bouchair H (2010) Comportement d'une poutre treillis en bois avec assemblages semi-rigides. 28ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, AUGC, La Bourboule, 02-04, Juin, 2010.

Moutou Pitti R, Dubois F, Pop O (2010) Experimental investigation of mixed-mode crack growth process in wood material. PRO LIGNO 6(1):11-16.

Peuchot B (1993) Cameră virtuală, detectare 0.01 pixel. Imagistică şi grafică computerizată medicală / Camera virtual equivalent model 0.01 pixel detectors. Computerized Medical Imaging and Graphics 17:289-294.

Silih S, Premrov M, Kravanja S (2005) Proiectare optimă a grinzilor cu zăbrele plane, considerând flexibilitatea dublă. Structuri tehnice / Optimum design of plane timber trusses considering dual flexibility. Engineering Structures 27:145–154.

Smith I, Craft ST, Quenneville P (2001) Capacități de proiectare a îmbinărilor cu cuie laterale / Design capacities of joints with laterally loaded nails. Canadian Journal of Civil Engineering 28:282–290.

Stehn L, Borjes K (2004) Influența rezistenței cuielor asupra capacității de încărcare a grinzilor cu zăbrele cu structură glulam / The influence of nail ductility on the load capacity of a glulam truss structure. Engineering Structures 26:809–816.

Turner MA, Plaut RH, Dillard DA, Loferski JR, Caudill R (2009) Testarea adezivilor la rezistența acoperişurilor la vânt / Tests of Adhesives to Augment Nails in Wind Uplift Resistance of Roofs. Journal of

Structural Engineering 135(1):88-93.

Urbonas K, Daniunas A (2006) Comportamentul îmbinărilor semi-rigide ale grinzilor cu zăbrele sub acțiunea forțelor axiale şi de încovoiere / Behaviour of semi-rigid beam-to-beam joints under bending and axial forces. J Construct Steel Res 62:1244–9.

AFNOR, NF EN 408. Structures en bois, Bois de structure et bois lamellé collé, détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques. Mars 2004, p. 32.

EN 1995-1-1: 2004, Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN/TC 250/SC5, 2004.

Traducere / Translated by :
Assist.Prof.dr.eng. Camelia COŞEREANU