

Influența performanțelor la foc ale plăcilor din aşchii de lemn (PAL) asupra dezvoltării unui incendiu simulat la scară naturală, într-un spațiu închis

Influence of fire performance of wood chipboards on the development of a natural scale simulated fire, in a confined space

Alexandru-Florin CHIOJDOIU¹, Ion ANGHEL², Valentin ENCIU³, Ionel-Alin MOCIOI⁴, Emil Florin TUDOR⁵

¹Universitatea Politehnica București
București, sector 6, Splaiul Independenței, nr. 313
Inspectoratul pentru Situații de Urgență “Dealul Spirii” București-Ilfov
București, sector 5, Calea 13 Septembrie, nr.135
alex.floryn@yahoo.com

²Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri
București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3
ion_anghel2003@yahoo.com

³Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri
București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3
val_enciu@yahoo.com

⁴Academia de Politie “Alexandru Ioan Cuza” – Facultatea de Pompieri
București, sector 2, Șoseaua Morarilor, nr.3
alin.mocioi@gmail.com

⁵Inspectoratul pentru Situații de Urgență „Drobeta” al Județului Mehedinți
Drobeta Turnu Severin, Str. Portului Nr.2
tudor_emil_florian@yahoo.com

Rezumat. În acest studiu se analizează contribuția arderii Plăcilor din Așchii de Lemn (PAL) la un incendiu care se manifestă într-un spațiu închis, la scară naturală. Lemnul are o importanță deosebită în dezvoltarea incendiilor la construcții, deoarece este folosit pe scară largă în structura de rezistență, pentru placare, pardoseli sau articole de mobilier. Studiul pornește de la descrierea fenomenelor fizice și chimice care au loc pe timpul procesului de ardere a lemnului și se ajunge la prezentarea performanțelor la foc în condiții de utilizare finală. De asemenea, sunt prezentate rezultatele obținute în urma testării la foc a PAL-ului pentru metodele de încercare ISO 9705 și SBI. Studiul se încheie cu simularea, la scară naturală, a contribuției plăcilor de PAL la dezvoltarea incendiilor care se manifestă în spații închise, prin utilizarea programului de simulare a incendiilor B-RISK, utilizat în cazul celor două metode de testare la foc, în baza a două scenarii de incendiu, astfel: 1. Încăperea de testare nu este prevăzută cu material de

finisaj interior, pereții acesteia fiind din beton cu grosimea de 100 mm, respectiv 2 mm. Încăperea de testare este prevăzută cu un lambriu din PAL de 12 mm grosime, folosit ca material de finisaj interior. Rezultă, astfel, o analiză comparativă a temperaturii stratului superior de gaze fierbinți și a plafonului, pentru valorile rezultate în urma utilizării programului B-RISK în cele două situații și metode de încercare. În urma analizei, sunt precizate câteva recomandări care pot îmbunătăți securitatea la incendiu în cazul spațiilor închise ce conțin lemn sub formă de PAL.

Cuvinte cheie: piroliză, performanța la foc, PAL, simularea incendiilor

Abstract. *This study analyses the contribution of wood chipboards combustion to a natural scale fire that manifests in a confined space. Wood is of particular importance in the development of fire in buildings, because it is widely used in building's frame structures, for cladding, floors or furniture objects. This study starts from the description of the physical and chemical phenomena occurring during the wood combustion process and continues with the presentation of the fire performance under final use conditions. The results obtained from the fire test of the wood chipboards for ISO 9705 and SBI test methods are presented, also. The study ends with the natural-scale simulation of the wood chipboards contribution to the development of confined space fires, by using the B-RISK fire simulation program, based on the two fire test methods and the two fire scenarios. There are two fire scenarios: 1st. The test room is not clad with interior lining material, its walls made of concrete with a thickness of 100 mm and 2nd. The test room is clad with 12 mm thickness wood chipboards used as interior lining material. Thus, a comparative analysis of the temperature of the upper layer of hot gases and of the ceiling results from the use of the B-RISK program in the two test situations and methods is obtained. Following the analysis, some recommendations are given that can improve fire safety in the case of confined spaces containing wood in the form of chipboards.*

Key words: pyrolysis, fire performance, chipboard (PAL), fire simulation

1. Introducere

Dintre materialele de construcție naturale, cel mai utilizat este lemnul, datorită proprietăților fizico-chimice (izolator bun), rezistenței la solicitările mecanice, datorită durabilității sale, dar și a ușurinței de prelucrare, în comparație cu alte materiale. Pe de altă parte, căldura sa, textura plăcută și valoarea decorativă a designului fibrelor lemnului au făcut ca acest material să fie foarte căutat pentru lucrările de amenajare interioară a clădirilor, dar și pentru construcția mobilierului din dotarea clădirilor.

Întrucât lemnul este utilizat pe scară largă în domeniul construcțiilor, s-au fost efectuate numeroase studii în ceea ce privește structura fizico-chimică a lemnului [1], fiind incluse și cele trei principale componente ale acestuia: celuloza, hemiceluloza și lignina [2]. Lemnul folosit în industria de construcții se împarte în lemn de esență tare și lemn de esență moale. Lemnul de esență tare are densitate ridicată [3], în schimb, lemnul de esență moale, chiar dacă are o densitate mai mică, este cel mai des folosit în construcții [4]. În general, lemnul netratat, ca material de construcție, este încadrat în clasa D de performanță privind reacția la foc, atunci când densitatea acestuia este de cel puțin 400 kg/m³, așa cum se poate vedea și în tabelul 2, iar produsele cu densitate scăzută sunt încadrate în clasa E.

În cazul aplicării tratamentelor ignifuge, produsele din lemn pot atinge nivelurile de clasă C și B. Performanța privind reacția la foc a lemnului se poate modifica odată cu schimbarea utilizărilor finale, iar acestea trebuie cunoscute atunci când sunt analizate riscurile de incendiu. Adăugarea unui strat de ignifugare poate îmbunătăți proprietățile de protecție la foc ale lemnului, însă poate acționa în detrimentul proprietăților intrinseci, cum ar fi rezistența la foc sau creșterea cantității de fum eliberat. Pentru a îmbunătăți comportamentul lemnului la acțiunea focului sunt utilizate diferite produse de ignifugare. Substanțele ignifuge sunt, de obicei, aplicate pe suprafața lemnului sau sunt impregnate în structura acestuia, folosind o tehnică de vacuum-presiune. Se mai pot utiliza minerale anorganice, cum ar fi sericitul și foliile metalice în combinație cu produsele intumescente. Au fost testate formulele care conțin siliciu, azot și fosfor, iar menținerea siliciului în lemn s-a obținut grație utilizării de micro-straturi de dioxid de siliciu [5]. O nouă generație de substanțe pentru ignifugarea lemnului este reprezentată de nanoagenții de întârziere a incendiilor, cum ar fi acoperirile nanocompozite [6]. Grafitul expandabil, utilizat, de obicei, în cazul polimerilor, poate proteja, în egală măsură, și lemnul, atunci când este folosit pentru acoperirea suprafețelor acestuia. În cazul tratamentelor studiate pentru ignifugarea lemnului, modelele predictive pot fi folosite în combinație cu datele obținute în urma testelor con-calorimetrice, în scopul de a prezice comportamentul unui material în testul SBI (în engleză: Single Burning Item) [7], stabilind, astfel, încadrarea într-o anumită euroclasă de reacție la foc.

Întrucât cererea de utilizare a lemnului și a produselor pe bază de lemn pentru aplicații în domeniul construcțiilor a crescut în ultimii ani și producția de plăci din aşchii de lemn a cunoscut o evoluție remarcabilă datorită diversificării sortimentelor și a unor caracteristici îmbunătățite față de lemnul masiv. Plăcile realizate din aşchii de lemn, aglomerate cu rășini sintetice, se confecționează din deșeuri sau particule de lemn de foioase moi sau rășinoase, mărunțite pe cale mecanică și aglomerate cu ajutorul unor adezivi sintetici, sub influența presiunii și a temperaturii. La panourile propriu-zise alcătuite din particule de lemn sunt folosite elemente de lemn (aşchii), care pot fi fine, normale (lungime maximă 20 mm) și mari (lungime minimă 32 mm). Ca liant se folosesc rășinile sintetice, conținutul fiind de aproximativ 11% din masa totală, pentru straturile exterioare și 5% pentru stratul central. Presarea se realizează perpendicular pe fețe sau paralel cu fețele plăcii (extrudate).

În general, nu trebuie folosit doar un singur instrument de testare la foc a PAL-ului pentru a evalua proprietățile de termodegradare și de inflamabilitate ale acestuia. Combustia calorimetrică la microscală nu va arăta efectul unei acoperiri de suprafață, deoarece este destinat pentru analiza arderii în vrac [8]. Con-calorimetria este incapabilă să reprezinte propagarea flăcării pe suprafața unui specimen de testare. În schimb, standul pentru testarea aprinzibilității produselor pentru construcții în contact direct cu flacăra are această capacitate de a analiza propagarea pe suprafață a flăcării [9]. Deoarece dezvoltarea incendiului este caracterizată de evoluția în timp a fluxului căldurii degajate de incendiu (în engleză Heat Release Rate, HRR) - acesta fiind un parametru esențial în modelarea incendiilor -, în cadrul acestui studiu au fost extrase din bazele de date internaționale curbele HRR pentru PAL. Acestea au fost realizate

conform încercărilor SBI și ISO 9705 inter-laboratoare pentru materialele uzuale în construcții.

2. Piroliza și arderea lemnului

Când lemnul este încălzit treptat, la temperaturi ridicate încep să apară schimbări în structura sa, iar cele trei componente polimerice din lemn încep să se descompună termic într-un amestec de gaze volatile, gudron și reziduu carbonizat cu conținut de cărbune. Mai întâi se descompune hemiceluloza (la 180-350°C), urmată de celuloză (la 275-350°C) și lignină (la 250-500°C) [10]. Reacțiile moleculare de oxidare deshidratează celuloza și începe repolimerizarea levoglucosanului, care duce la slăbirea structurilor aromatice, acestea devenind structuri de carbon grafitat în jurul valorii temperaturii de 500°C, proces denumit piroliză. Pe timpul pirolizei are loc transportul umidității, formarea unor produse precum dioxidul de carbon, acizi formici și acizi acetici la valori de temperatură sub 200°C, formarea unor produse ce conțin gaze inflamabile, fum și levoglucosan, la valori de temperatură între 300°C și 500°C, respectiv limitări ale transferului termic ce vor afecta descompunerea termică a lemnului neafectat. Transportul umidității (w) presupune că, atunci când începe să se încălzească, înainte de startul pirolizei, apa din compoziția lemnului începe să se evapore. Majoritatea vaporilor de apă vor părăsi volumul ocupat de lemn, însă o parte din cantitatea de vapori va migra departe de zona expusă căldurii, în interiorul lemnului, creându-se astfel trei zone: o zonă uscată, în apropierea părții expuse sursei de căldură ($w=0$), o zonă deshidratată ($w < w_{\text{FSP}}$) și o zonă umedă ($w > w_{\text{FSP}}$), așa cum se poate vedea în figura 1 [11]. Punctul de saturație a fibrei (în engleză: Fiber Saturation Point, FSP) este definit ca fiind conținutul în umiditate la care cavitățile celulare sunt golite de apa aflată în stare lichidă, în schimb pereții celulari sunt totuși saturați cu apa legată chimic.

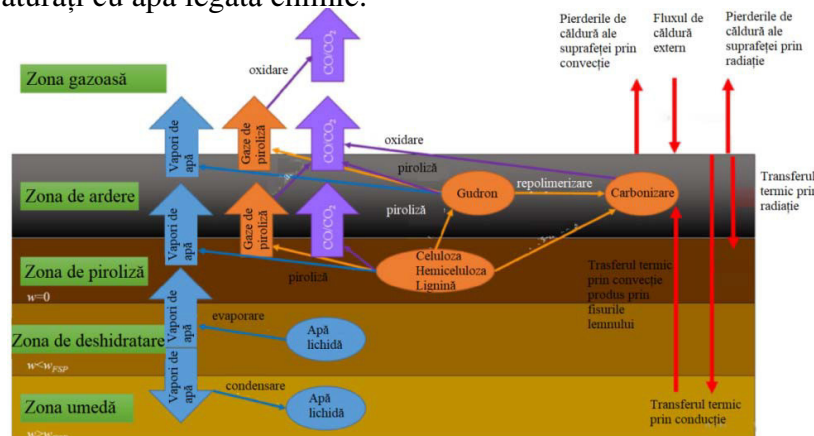


Fig. 1. Procesele fizice și chimice care au loc în interiorul unei material lemnos care arde [11]

Piroliza lemnului a făcut obiectul unor cercetări ample în ultimii ani [12], [13], [14], cercetări care au arătat că, în timp ce la suprafața carbonizată a lemnului se pot înregistra valori de temperatură de 800°C, piroliza principală a lemnului începe la

valori de peste 225°C și se termină la valori de temperatură sub 500°C. Atunci când s-a atins concentrația adecvată a amestecului combustibil-aer, oxidarea gazelor de piroliză conduce la arderea cu flacără [15]. Oxidarea rezidului carbonizat se produce cu incandescență sau prin ardere mocnită. Dacă materialul este lăsat în faza solidă ca reziduu carbonizat, descompunerea de bază a lemnului este încetinită. Reziduu carbonizat acționează ca o creștere a rezistenței termice între lemnul de bază și frontul pirolizei. Acest lucru duce la o scădere a debitului de căldură degajată și acționează ca o barieră a transferului de masă între volatilele eliberate de combustibil și oxigenul din aer. Structura rezidului carbonizat variază în funcție de tipul de lemn, de tratamentul de ignifugare aplicat și de debitul de căldură degajată, iar stabilitatea și integritatea lemnului sunt influențate de densitate, continuitate, rezistența la oxidare, proprietățile termoizolante și permeabilitate. Producția de reziduu carbonizat depinde de debitul de căldură degajată și de lungimea de încălzire. Descompunerea ligninei are o contribuție semnificativă la formarea de reziduu carbonizat [16]. Ratele caracteristice de carbonizare a lemnului de esență moale sunt de ordinul a 0,6 mm/min^o, în cazul utilizării metodelor de testare standard pentru determinarea clasificării rezistenței la foc a elementelor structurale și a ansamblurilor [17], [18]. Ele depind de densitatea, de grosimea stratului de reziduu carbonizat, de conținutul de umiditate, de concentrația de oxigen și de fluxul extern de căldură [19], [20]. Lemnul produce mai puțin fum când arde în comparație cu multe dintre materialele plastice. În condiții bune de ventilare, lemnul poate produce 25-100 m²/kg de fum, în timp ce materialele plastice pot elibera sute sau mii de m²/kg [21]. Formarea fumului depinde de materialul ars și de factorii ce includ alimentarea cu oxigen și tipul de ardere, cu flacără sau cu incandescență. Produsele primare ale arderii lemnului sunt monoxidul de carbon, dioxidul de carbon și apa [22], [23], însă pot fi eliberate, de asemenea, acid cianhidric și halogenurile hidrogenate dacă sunt prezente heteroelemente, cum ar fi azotul sau halogenii, care cresc producția de fum, precum și toxicitatea [24]. Prin utilizarea unor produse ignifuge inhibitoare de fum, cum ar fi boratul de zinc și molibdenul și compușii de staniu, are loc încetinirea vitezei de ardere și reducerea procentului de fum și gaze toxice [25]. Pentru analiza termică și evaluarea inflamabilității lemnului sunt utilizate tehnici precum analiza termogravimetrică [26], con-calorimetria [28] și testul SBI. Rezultatele acestor teste sunt dependente de modificările compoziției gazului, ale temperaturii, de viteza de încălzire și de dimensiunea formei eșantionului. Cel mai important parametru în baza căruia se determină comportarea la foc a unui material este fluxul căldurii degajate de acesta [29], [30], existând o serie de studii experimentale cu privire la HRR și la performanța la incendiu a unui material [32]. Rezultatele descompunerii lemnului sunt rezumate în tabelul nr. 1 [33].

Tabelul 1

| Intervalele de temperatură ale pirolizei și arderii lemnului [33] | |
|---|--|
| Temperatură | Procedee de descompunere |
| > 100 °C | Evaporarea apei nelegate chimic |
| 160-200 °C | Cele trei componente polimerice din lemn încep să se descompună lent. Gazele formate în această etapă sunt necombustibile (elementul principal fiind H ₂ O) |
| 200-225 °C | Piroliza lemnului este încă foarte lentă, iar multe gaze produse sunt încă necombustibile |
| 225-275 °C | Se începe piroliza principală și arderea cu ajutorul unei flăcări pilot. |
| 280-500 °C | Gazele produse sunt acum volatile (CO, metan etc.) și particulele de fum sunt vizibile, iar structura fizică a lemnului se descompune. |
| >500 °C | Producția volatilă este completă, rezidul carbonizat continuă să se oxideze pentru a forma CO, CO ₂ și H ₂ O |

3. Performanța de reacție la foc a produselor pentru construcții

Pentru a asigura cerința „securitate la incendiu” este necesară limitarea inițierii și propagării focului și fumului prin reducerea contribuției la foc a materialelor de construcție, noțiunea de „combustibilitate” fiind înlocuită cu determinarea contribuției la foc/comportării la foc a produselor. Conceptul de reacție la foc este mult mai larg decât combustibilitatea, incluzând nu numai comportarea la ardere, ci și fluxul de căldură degajat, emisia de fum și gaze de ardere, radiația de căldură, propagarea flăcării. Sistemul de clasificare privind reacția la foc are la bază contribuția produsului, în utilizarea finală, la inițierea și propagarea incendiului [34]. Prin acest sistem, proiectanții și utilizatorii primesc informații complete asupra performanțelor de comportare la foc ale produsului clasificat, în condițiile de utilizare finală, precum: aprinzibilitate, propagarea flăcării, emisia de fum, emisia de gaze toxice. În tabelul 2 sunt prezentate exemple de produse de construcție utilizate în realizarea pereților și plafoanelor, pentru fiecare clasă din sistemul de Euroclase.

Tabelul 2

| Exemple de produse exprimate în Euroclase pentru pereți și tavan [27] | |
|---|---|
| Euroclase | Exemple de produse |
| A1 | Produse din piatră naturală, beton și produse din beton, cărămizi, produse ceramice, produse din sticlă, produse din oțel, multe produse metalice. |
| A2 | Produse precum cele din clasa A1, inclusiv mici cantități de compuși organici. |
| B | Plăci din ghips-carton cu diferite (grosimi) suprafețe. <i>Cel mai ridicat nivel posibil de obținut prin ignifugare pentru produse din lemn rezistente la foc.</i> |
| C | Spumă fenolică, plăci din ghips-carton cu diferite suprafețe (mai puțin groase decât cele din clasa B). <i>Produse din lemn rezistente la foc.</i> |
| D | <i>Produse din lemn cu grosimea de minim 5 mm și densitatea mai mică de 400 kg/m³</i> |
| E | <i>Plăci din fibre cu densitate mică,</i> produse de izolare pe bază de plastic |
| F | Produse netestate. |

În general, clasa de bază pentru produsele din lemn, netratat, este D (densitatea este de cel puțin 400 kg/m³). Produsele cu densitate inferioară aparțin clasei E. În ceea ce privește acoperirea podelei, produsele pe bază de lemn se regăsesc, din nou, ca

performanță la nivelul D, care este numit D_{FL} din punct de vedere a clasificării de nivel (FL - podea). Pentru produsele pe bază de lemn, clasificarea suplimentară pentru emisia de fum este de obicei s1 sau s2 și clasificarea suplimentară pentru picături arzânde este d0. Clasificările „s” se referă la emisia de fum: clasele s1 - emisie mică de fum, s2 - emisie limitată de fum, s3 - nu se cer limitări ale emisiei de fum. Clasificările „d” se referă la prezența sau absența picăturilor/particulelor arzânde: clasele d0 - fără picături/particule arzânde, d1 - picături/particule care nu persistă peste o durată data, d2 - nu se cer limitări din punct de vedere al particulelor/picăturilor arzânde. Tratamentele ignifuge pentru lemn pot fi clasificate în trei clase generale: aplicarea ca tratament de suprafață; încorporarea integrală a agentului ignifug în produsele compozite din lemn; impregnarea prin tehnici de vacuum/presiune.

3.1. Metode de testare la foc a produselor pentru construcții

Standardul ISO 9705 [35] reprezintă o metodă de testare (figura 2) care simulează un incendiu ce se manifestă într-o încăpăre bine ventilată, cu dimensiunile de 3,6 m × 2,4 m × 2,4 m (lungime, lățime, înălțime), având o singură ușă deschisă. Focul pornește dintr-un colț al încăperii. Metoda folosește o sursă de aprindere specifică pentru a evalua contribuția materialelor utilizate ca finisaje pentru perete și tavan la dezvoltarea unui incendiu. Aceste materiale nu pot fi testate la scară mică.

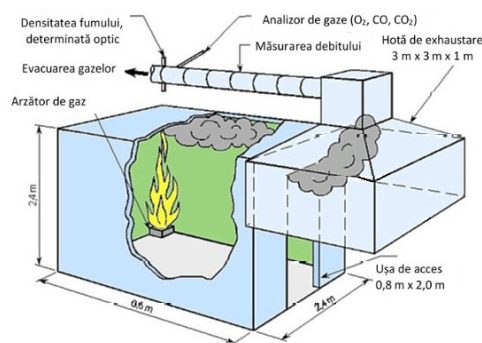


Fig. 2. Cadrul de testare al materialelor de finisaj interior în standardul ISO 9705

Metoda nu este destinată evaluării rezistenței la foc a unui produs, ci pentru a furniza date în ceea ce privește stadiile incendiului, de la aprindere până la flashover. Sursa standard de aprindere este reprezentată de o cutie cu nisip cu un arzător cu dimensiunile de 17 cm x 17 cm, de 100 kW sau de 300 kW, durata expunerii la foc fiind de 10 minute. Produsul care urmează să fie testat se montează pe trei pereți și pe plafon (nu se montează pe peretele cu ușa). Pentru această metodă de testare se iau în considerare următoarele fenomene: picurarea, apariția picăturilor care curg, căderea resturilor și delaminarea, precum și crăparea, topirea într-o anumită măsură, expansiunea, deplasarea sau distorsiunea. În cadrul metodei de testare se măsoară timpul până la aprindere, fumul (opțional), CO, CO₂, O₂, gradul de iradiere, debitul de căldură degajată, degajarea totală de căldură, conținutul de gaze de ardere (HCl, HCN,

NO_x , etc.). Nu se efectuează măsurători pentru pierderea de masă și creșterea temperaturii.

Metoda de testare SBI [7] este folosită pentru determinarea performanței de reacție la foc a produselor pentru construcții, cu excepția învelișului pentru pardoseală. Instalația de testare trebuie să cuprindă o încăpă de încercare, aparatura de încercare (cărucior, cadru, arzătoare, hotă, colector și tubulatură), sistemul de exhaustare al fumului și echipamentul general de măsurare, așa cum este reprezentat în figura 3.

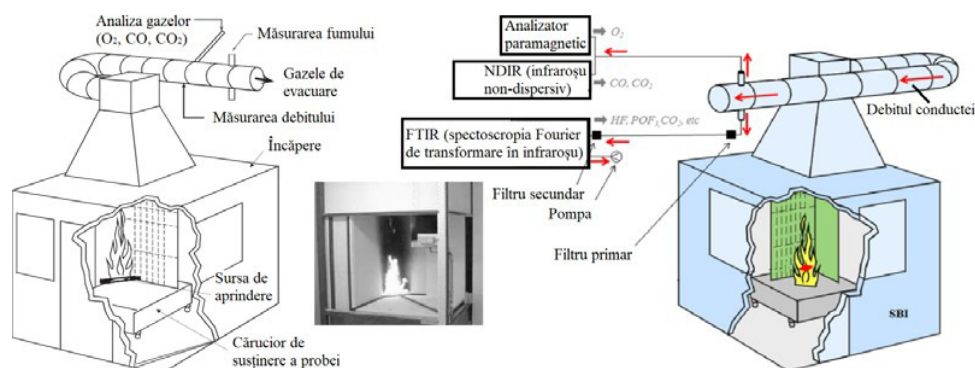


Fig. 3. SBI - Încercarea la foc a unui singur element arzând [36], [37]

Încăpă de testare trebuie să aibă o înălțime la interior de $2,4 \pm 0,05$ m și o suprafață interioară a pardoselii de $3,05 \pm 0,05$ m² în ambele direcții. Pereții trebuie să fie construiți din blocuri de construcție, de exemplu beton celular, plăci de ipsos și plăci de silicat de calciu. Epruvetele sunt expuse timp de 20 minute atacului termic al unui arzător tip cutie cu nisip alimentat cu propan, arzătorul având o putere de 30,7 kW. Epruveta pentru colț este formată din două aripi, denumite aripa scurtă și aripa lungă, grosimea maximă a unei epruvete fiind de 200 mm. Proba de testare trebuie să aibă dimensiuni medii (dimensiunea maximă trebuie să fie cuprinsă între 1 și 3 m conform ISO 29903). Parametrii de clasificare determinați cu ajutorul metodei SBI sunt: FIGRA (viteza de dezvoltare a focului) [W/s], THR_{600s} (căldura totală degajată) [MJ], LFS (propagarea laterală a flăcării), SMOGRA (viteza de emisie a fumului) [m²/s²], TSP_{600s} (emisii totale de fum) [m²]. Testul SBI simulează arderea unui obiect în colțul unei camere. Proba utilizată constă din două părți care formează un unghi de 90 de grade. Configurația testului presupune existența unei podele și a tavanului. Podeaua, proba și arzătorul sunt instalate pe un cărucior care poate fi scos din încăpă pentru o amplasare ușoară a probelor. Gazele de ardere sunt colectate de o hotă și transportate printr-o conductă. Conducta conține o secțiune de măsurare a fumului și a producției de fum cu ajutorul unei sonde de presiune diferențială, termocuple, o sondă de gaze și un sistem de măsurare a fumului [38]. Valorile HRR se calculează prin metoda consumului de oxigen [39].

3.2. Produsele din lemn clasificate fără teste suplimentare, CWFT

În sistemul european, toate produsele trebuie testate în condiții care reprezintă utilizările lor finale, produsele din lemn având deja statutul de CWFT (în engleză: Classified Without Further Testing), acest statut reprezentând clasificarea fără testarea finisajelor pereților. În tabelul 3 este prezentată o listă tip CWFT pentru produsele din panouri din lemn. Celelalte valori similare din tabel se referă și la produsele din lemn, dar și la cele laminate, lipite.

Tabelul 3

Listă CWFT pentru produsele din panouri din lemn [27]

| Produse din panouri din lemn* | Gradul de referință al produselor EN | Densitatea minimă ($\frac{\Delta}{\sqrt{\rho}}$) | Grosimea minimă (mm) | Clasa (fără podele) | Clasa podelelor |
|---|--------------------------------------|--|----------------------|---------------------|-----------------|
| Plăci din fibre de lemn de densitate mică (PAL) | EN 312 | 600 | 9 | D-s2, d0 | ۲-س۱ |
| Plăci din fibre de lemn, dure | EN 622-2 | 900 | 6 | D-s2, d0 | ۲-س۱ |
| Plăci din fibre de lemn, medii | EN 622-3 | 600 | 9 | D-s2, d0 | ۲-س۱ |
| | | 400 | 9 | E | ۳-س۱ |
| Plăci din fibre de lemn, moi | EN 622-4 | 250 | 9 | E | ۳-س۱ |
| Plăci din fibre de lemn, de densitate medie (MDF) | EN 622-5 | 600 | 9 | D-s2, d0 | ۲-س۱ |
| Plăci din particule de lemn și ciment | EN 634-2 | 1000 | 10 | B-s1, d0 | ۰-س۱ |
| OSB | EN 300 | 600 | 9 | D-s2, d0 | ۲-س۱ |
| Placaj din lemn | EN 636 | 400 | 9 | D-s2, d0 | ۲-س۱ |
| Panouri din lemn solide | EN 13353 | 400 | 12 | D-s2, d0 | ۲-س۱ |

* Panouri din lemn montate fără goluri de aer pe produse din clasa A1 sau A2-s1, d0, cu densitate minimă de $10 \frac{\Delta}{\sqrt{\rho}}$ sau cel puțin produse din clasa D-s2, d0, cu densitatea minimă de $400 \frac{\Delta}{\sqrt{\rho}}$.

3.3. Factorii care afectează performanța la foc a produselor din lemn

Atât în cazul testelor de incendiu, cât și al incendiilor reale, există doi parametri importanți care afectează performanța la foc a produselor din lemn: densitatea și grosimea. Cu cât densitatea este mai mică, cu atât este nevoie de o perioadă mai scurtă de timp pentru ca suprafața lemnoasă să ajungă la temperatura de aprindere (aproximativ 360°C pentru aprinderea pilotată a lemnului). Densitatea inferioară înseamnă difuzia mai lentă a căldurii în materialul lemnos. După apariția aprinderii, propagarea flăcării va fi mai rapidă pentru densitățile mai mici. Efectul grosimii se referă la arderea produsului din lemn. Grosimea produsului crește zona expusă și poate duce la propagarea focului prin cavități. Amplasarea produsului într-o clădire (pentru realizarea tavanului, peretelui, sau a podelei) este de o importanță deosebită. Plafoanele și părțile superioare ale pereților au o dispunere critică în caz de incendiu, comparativ cu zonele inferioare. Grosimea este deosebit de importantă pentru arderea probelor, mai ales atunci când există un spațiu de aer în spatele produsului. În testul SBI, o creștere considerabilă a ratei de eliberare de căldură se datorează arderii pe ambele părți ale eșantionului după aprindere, ceea ce poate conduce la încadrarea într-

o Euroclasă inferioară clasei D, cea pentru produsele din lemn netratate. Acest lucru este ilustrat în figura 4, care prezintă un al doilea vârf al ratei de eliberare de căldură, la aproximativ 7 minute după aprindere pentru placajul de 9 mm grosime. Pentru produsele mai subțiri, acest vârf va avea loc mai devreme și va afecta în final și valoarea parametrului FIGRA, așa cum se poate vedea în figura 4, unde HRR (în engleză: Heat Release Rate) reprezintă fluxul căldurii degajate de incendiu, iar THR (în engleză: Total Heat Release) reprezintă căldura totală degajată.

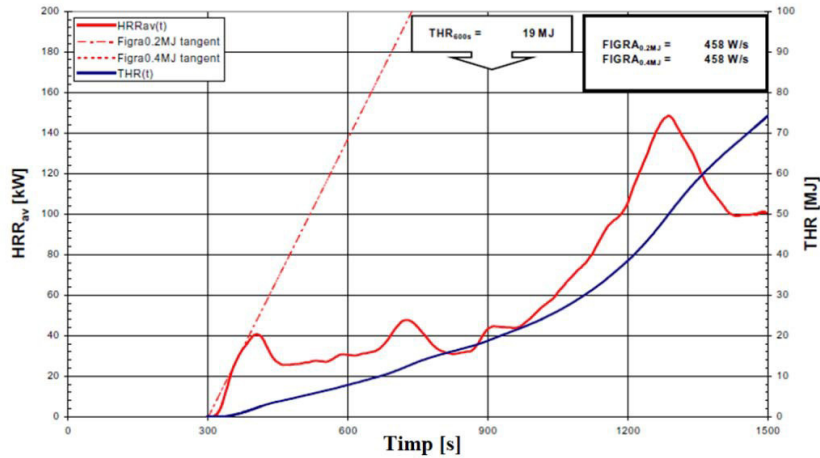


Fig. 4. Curbele HRR și THR pentru o bucată de placaj cu grosimea de 9 mm cu un spațiu de aer (neventilat) [27]

Dependența de densitate a parametrului FIGRA a fost studiată pentru produsele din lemn în timpul clasificărilor fără teste suplimentare CWFT. Valorile FIGRA scad cu creșterea densității lemnului. Limita superioară pentru Euroclasa D este de 750 W/s și astfel, conform figurii 5, produsele din lemn cu o densitate de cel puțin 350 kg/m³ pot atinge nivelul clasei D (cu o grosime suficientă/fără spații de aer).

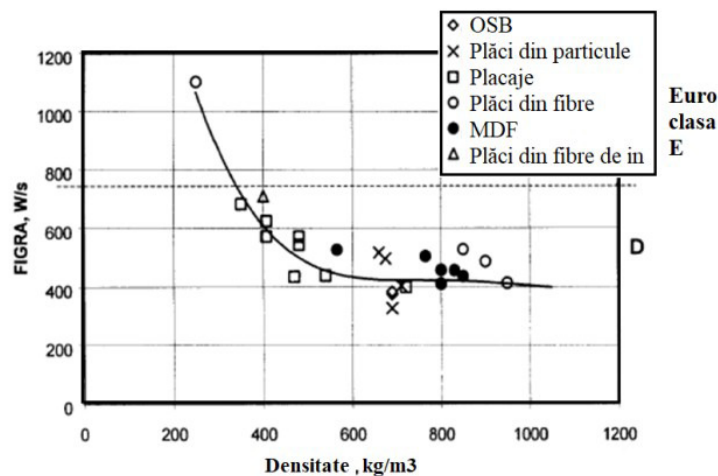


Fig. 5. Reprezentarea valorilor FIGRA ca o funcție pentru densitatea panourilor din lemn [27]

3.4 Rezultatele statistice ale încercărilor SBI pentru lemn

Datele măsurate în testul de colț ISO 9705 și SBI sunt prezentate în tabelul 4.

Tabelul 4

Rezultate privind caracteristicile de reacție la foc ale lemnului [36], [37]

| Cod. | Produs | FIGRA kW/s | SMOGRA m ² /s ² | Timpul până la (s): | | Vârful HRR kW | Vârful SPR m ² /s ² |
|------|--|---------------|--|---------------------|---------------|---------------------|---|
| | | | | Flashover | Vârful SPR | | |
| M05 | Cherestea de rășinoase finisată | 8,5 | 123 | 106 | 106 | >1000 | 13 |
| M12 | Cherestea de rășinoase nefinisată | 5,3 | 27 | 170 | 170 | >1000 | 4.6 |
| M15 | Acoperire termosfumantă pe placă aglomerată din aşchii de lemn | 1 | 36 | 700 | 700 | >1000 | 25 |
| M16 | Placă din fibre de lemn cu densitate medie placată cu melamină | 6 | 51 | 150 | 135 | >1000 | 6.9 |
| M20 | Placă aglomerată din aşchii placată cu melamină | 5,5 | 53 | 165 | 165 | >1000 | 8.7 |
| M22 | Placă aglomerată din aşchii | 5,8 | 81 | 155 | 155 | >1000 | 12.5 |
| M23 | Placaj (mesteacăn) | 5,6 | 51 | 160 | 160 | >1000 | 8.1 |
| M25 | Placă din fibre de lemn cu densitate medie | 4,7 | 48 | 190 | 175 | >1000 | 8.4 |
| M26 | Placă din fibre de lemn cu densitate mică | 16 | 244 | 58 | 0.55 | >1000 | 13.4 |

Termenul SPR (în engleză: Smoke Production Rate) reprezintă rata producției de fum. Euroclasa principală D a fost verificată pentru majoritatea tipurilor de panouri din lemn existente pe piața materialelor de construcții. Densitatea și grosimea panoului sunt decisive pentru valorile FIGRA, în timp ce îmbinările panourilor și alegerea substraturilor standard nu influențează clasa. Numai produsele cu densitate scăzută sunt din clasa E. Clasa de fum s₂ ar trebui să fie utilizată pentru toate panourile pe bază de lemn ca garnituri de suprafață pentru a obține o clasificare robustă. Conform rezultatelor testului, multe produse ating clasa de fum s₁. Clasa d₀ de picături / particule aprinse a fost verificată pentru toate panourile din lemn din clasa D. Marjele de siguranță pentru aceste subclase sunt foarte ridicate, de 20-90%. Este avută în vedere o prelungire a clasificării pentru panourile din lemn pentru a putea include și alte aplicații, de exemplu prize de aer în spatele panoului.

Rezultatele obținute în urma efectuării testului la foc SBI pentru PAL sunt prezentate în Tabelul 5. În acest tabel, codul caracterizează același tip de material testat în laboratoare diferite.

Tabelul 5

Rezultate ale testelor la foc după încercarea SBI inter-laboratoare pentru materialele uzuale în construcții (PAL) [7], [36], [37], [40]

| Cod | Produs (produsele nu sunt ignifugate, cu excepția celor pentru care se specifică acest aspect) | Grosi mea [mm] | Densita tea [kg/m ³] | Timpul pana la (s): | | | Viteza maximă de degajare a căldurii [kW] | FIGRA Viteza de dezvoltare a focului [W/s] | THR600s Căldura totală degajată [MJ] | SMOGRA Viteza de emisie a fumului [m ² /s ²] | TSP600s Emisia totală de fum [m ²] | ΔT_{max} | Clasa de reacție la foc |
|-----|--|----------------------|--|---------------------|-----------------------|--------------------------------------|---|--|--|---|--|------------------|----------------------------------|
| | | | | Flashover [sec] | Vârful HRR [kW] | Vârful SPR [m ² /s] | | | | | | | |
| M06 | PAL ignifugat | 12 | 780 | - | 723,46 | 18,16 | 423 | 0,35 | 210 | 16 | 7798 | 44,2 | ≥B |
| M20 | Placă aglomerată din aşchii placată cu melamină | 12 | 680 | 165 | 1998,2 | 14,99 | - | 5,5 | - | 53 | - | 110,5 | D |
| M22 | Placă aglomerată din aşchii | 12 | 700 | 155 | 2221 | 22,27 | - | 5,8 | - | 81 | - | 127,3 | D |

Diagramele comparative ale curbelor de evoluție ale HRR și SPR în cazul PAL-ului ignifugat (M06), plăcii aglomerate din aşchii placată cu melamină (M20) și în cazul plăcii aglomerate din aşchii (M22), prin utilizarea metodei ISO 9705, respectiv a metodei EN 13823 SBI sunt prezentate în figurile 6, 7, 8 și 9.

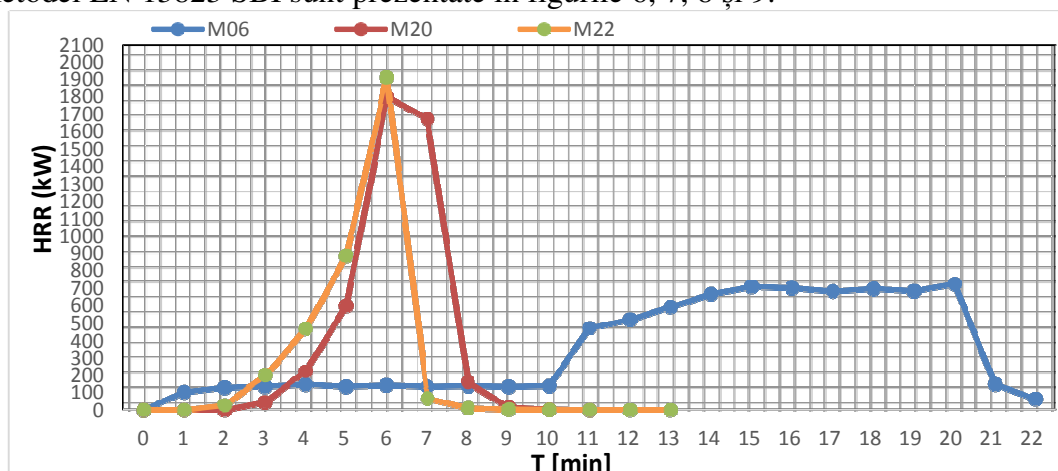


Fig. 6. Curbele de evoluție a HRR pentru M06, M20 și M22 conform metodei ISO 9705 [45]

Conform figurii 6, prin utilizarea metodei ISO 9705, valoarea HRR în cazul M22 atinge maximum de cca 1915 kW în timpul cel mai scurt - 6 minute, în cazul M20 atinge maximum de cca 1800 kW, în 6 minute, și în cazul M06 atinge maximum de cca 720 kW, în 20 de minute.

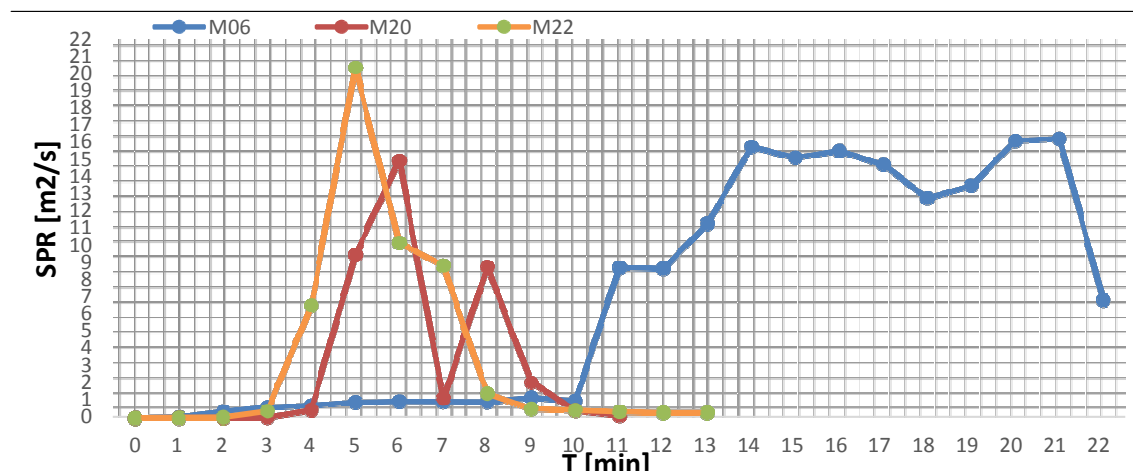


Fig. 7. Curbele de evoluție a SPR pentru M06, M20 și M22 conform metodei ISO 9705 [45]

Conform figurii 7, prin utilizarea metodei ISO 9705, valoarea SPR în cazul M22 atinge valoarea maximă de cca 20 m²/s, iar timpul total de producere a fumului fiind de 13 minute, în cazul M20 atinge valoarea maximă de cca 15 m²/s, iar timpul total de producere a fumului fiind de 11 minute și în cazul M06 atinge valoarea maximă de cca 16 m²/s, iar timpul total de producere a fumului fiind de 22 de minute.

Analizând valorile parametrilor fluxului căldurii degajate și a ratei de producere a fumului, așa cum rezultă din figurile 6 și 7, se constată că se poate recomanda utilizarea PAL-ului ignifugat M06, deoarece în cazul manifestării unui incendiu, utilizarea acestuia ar conduce la mărirea timpului de evacuare a persoanelor surprinse prin degajarea unei cantități mai mici de fum și de căldură în fazele inițiale ale incendiului.

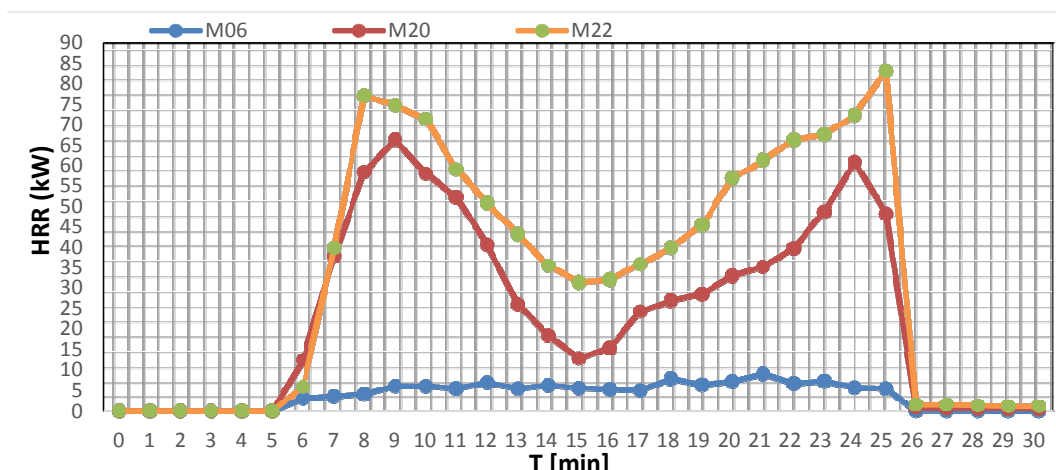


Fig. 8. Curbele de evoluție a HRR pentru M06, M20 și M22 conform metodei EN 13823 SBI [9]

Conform figurii 8, prin utilizarea metodei EN 13823 SBI, valoarea HRR în cazul M22 atinge două valori maxime de cca 77 kW în 8 minute și 83 kW în 25 minute, în cazul M20 atinge 2 valori maxime de cca 66 kW în 9 minute și 61 kW în 24 minute și în cazul M06 atinge o valoare aproximativ constantă de cca 5 kW, din minutul 9 până în minutul 25, recomandându-se, astfel, utilizarea PAL-ului ignifugat M06 întrucât acesta a înregistrat cea mai mică valoare a fluxului căldurii degajate de incendiu.

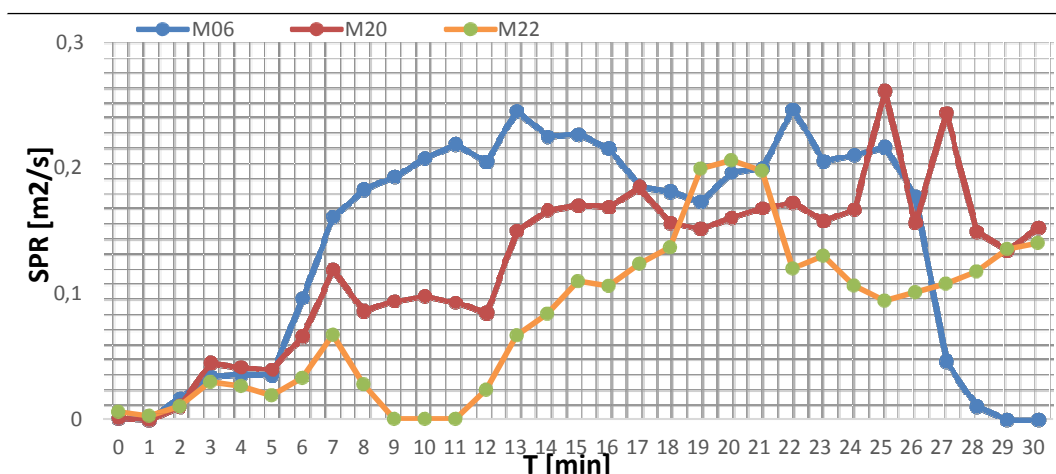


Fig. 9. Curbele de evoluție a SPR pentru M06, M20 și M22 conform metodei EN 13823 SBI [9]

Conform figurii 9, prin utilizarea metodei EN 13823 SBI, valoarea SPR în cazul M20 atinge valoarea maximă de cca 0,26 m²/s, în cazul M06 atinge valoarea maximă de cca 0,24 m²/s, și în cazul M22 atinge valoarea maximă de cca 0,20 m²/s, observându-se că toate cele trei produse degajă fum pe întreaga durată de efectuare a testului de 30 de minute.

4. Simularea incendiilor utilizând programul B-RISK

B-RISK este o aplicație software de simulare a incendiilor și de descriere a ipotezelor și a fizicii care stau la baza modelului computerizat de incendiu. Programul software B-RISK este destinat pentru a evalua performanțele și pericolele asociate incendiilor care se manifestă într-o încăpăre sau în mai multe încăpări, care pot fi conectate prin goluri de ventilație sau pot avea pereți comuni. Acest program cuprinde un simulator de risc de incendiu pentru generarea distribuțiilor de probabilități.

B-RISK este un model zonal de incendiu dezvoltat anterior și cunoscut sub numele de BRANZFIRE [41], [42], [43]. Modelul B-RISK poate fi utilizat, atât pentru simulări deterministe unice, pentru predicțiile privind răspândirea fumului în incinte, cât și pentru iterațiile multiple ale unui scenariu de incendiu. Scenariul este util pentru analiza sensibilității sau pentru elaborarea descriptorilor probabilistici ai riscului de incendiu în condiții definite.

În vederea observării cât mai clar a influenței materialelor de finisaj interior asupra dezvoltării incendiilor în spații închise, s-au luat în calcul două cazuri:

- în primul caz, încăpărea nu a fost prevăzută cu niciun material de finisaj interior, pereții încăperii având structura de beton, cu grosimea de 100 mm.

- în al doilea caz, încăpărea a fost prevăzută cu material de finisaj interior. Materialul folosit ca structură de rezistență a pereților, respectiv planșeului, în modelul din programul B-RISK, este betonul armat prefabricat, având grosimea de 100 mm. Pereții și planșeul vor fi îmbrăcați în PAL neignifugat clasa D s2, d0 reacție la foc, având grosimea de 12 mm.

În vederea efectuării simulărilor pe baza celor două scenarii de incendiu, se aleg dimensiunile încăperii de testare, a materialului de finisaj, a golurilor de ventilație, a arzătoarelor, precum și poziționarea acestora.

Pentru crearea și proiectarea modelului fizic de simulare a incendiului s-a folosit spațiul de testare la scară naturală, aflat în incinta Facultății de Pompieri, prezentat schematic în figura 10.

Simularea a fost executată cu scopul de a se analiza influența pe care o are PAL-ul (M06) - utilizat ca finisaj interior - asupra dezvoltării incendiului, comparativ cu un material inert, cum ar fi betonul. Pentru simulare s-au folosit condițiile prezentate în metodele de testare ISO 9705 și SBI, cu deschiderile prezentate în figura 10, folosindu-se următoarele arzătoare cu dimensiuni de 0,3 x 0,3 m, montate în același loc (în colțul din dreapta jos al încăperii):

- arzătorul standardului ISO 9705 a cărui putere este 100 kW pentru primele 10 minute ale testului, urmând ca puterea să crească la 300 kW în următoarele 10 minute, iar în ultimele 10 minute ale testului acesta va avea puterea de 900 kW.

- arzătorul standardului SBI, care are o putere constantă de 30 kW timp de 20 de minute.

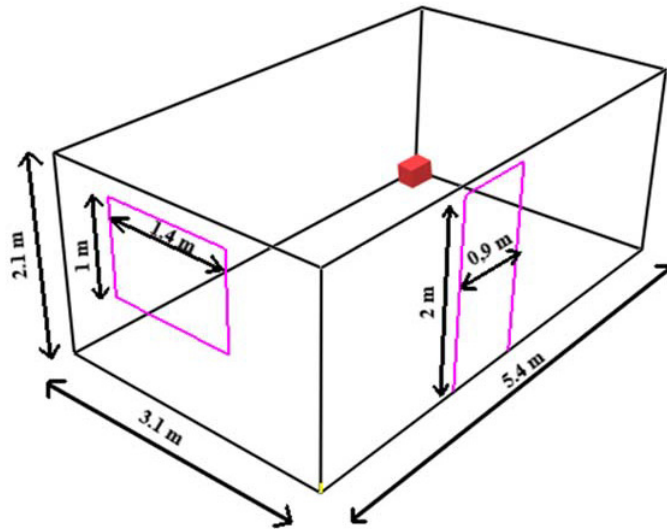


Fig. 10. Dimensiunile încăperii folosită pentru simularea metodelor de testare ISO 9705 și SBI în condiții naturale (camera de testare cu deschideri uzuale: ușă și fereastră)

În graficele 11, 12, 13 și 14 sunt prezentate curbele valorilor de temperatură înregistrate la partea superioară a încăperii, în cazul montării PAL-ului, comparativ cu un material inert (betonul), folosind arzătorul standardului SBI și al standardului ISO 9705.

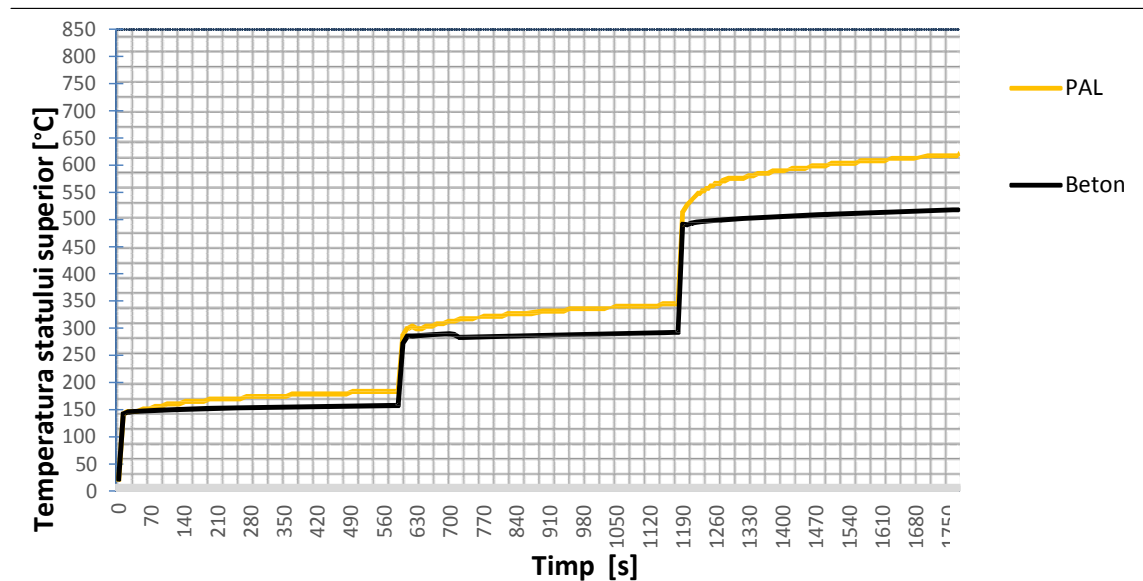


Fig. 11. Temperatura stratului superior de gaze în cazul folosirii metodei ISO 9705

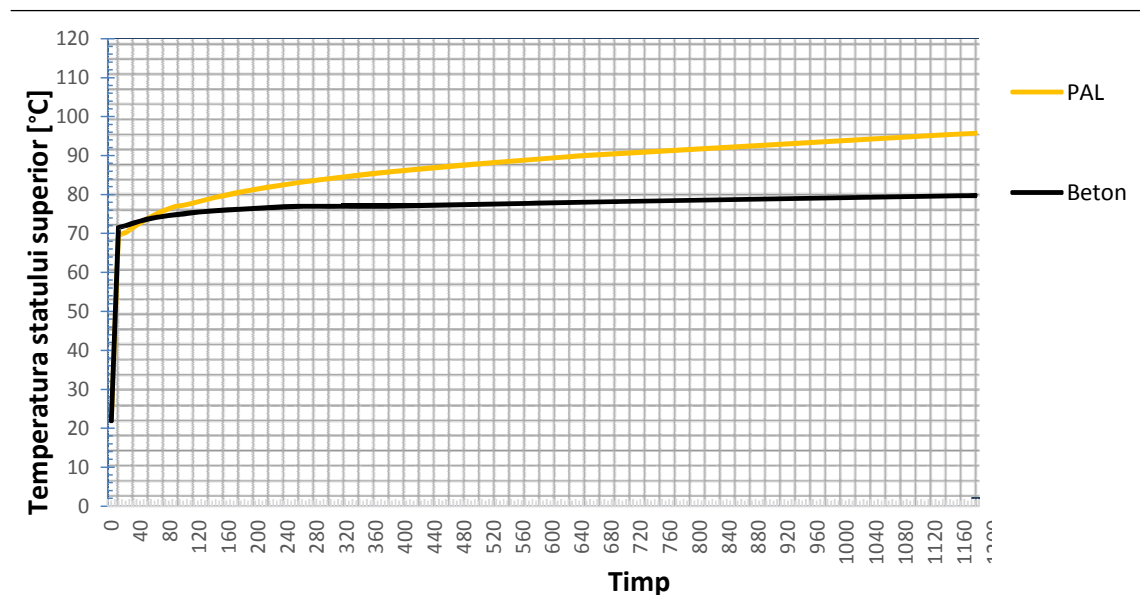


Fig. 12. Temperatura stratului superior de gaze în cazul folosirii metodei SBI

Conform figurilor 11 și 12, atât în cazul folosirii metodei ISO 9705, cât și în cazul metodei SBI, temperatura maximă a stratului superior de gaze este mai mică în cazul betonului, fiind de cca 517°C, respectiv, 79°C, comparativ cu PAL-ul, unde se înregistrează valorile de 634°C, respectiv 95°C.

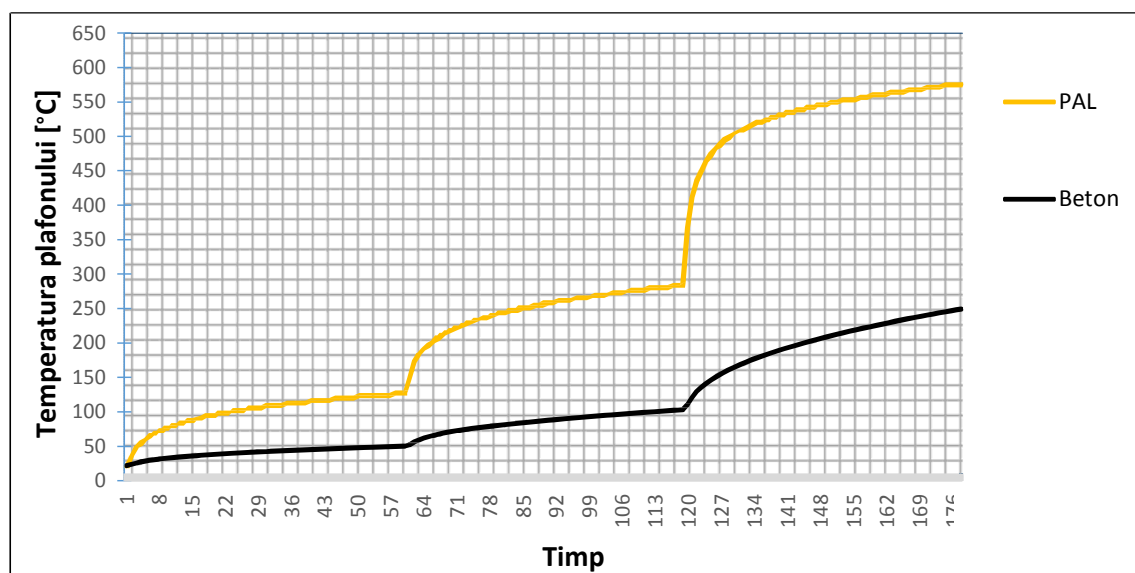


Fig. 13. Temperatura plafonului în urma folosirii metodei ISO 9705

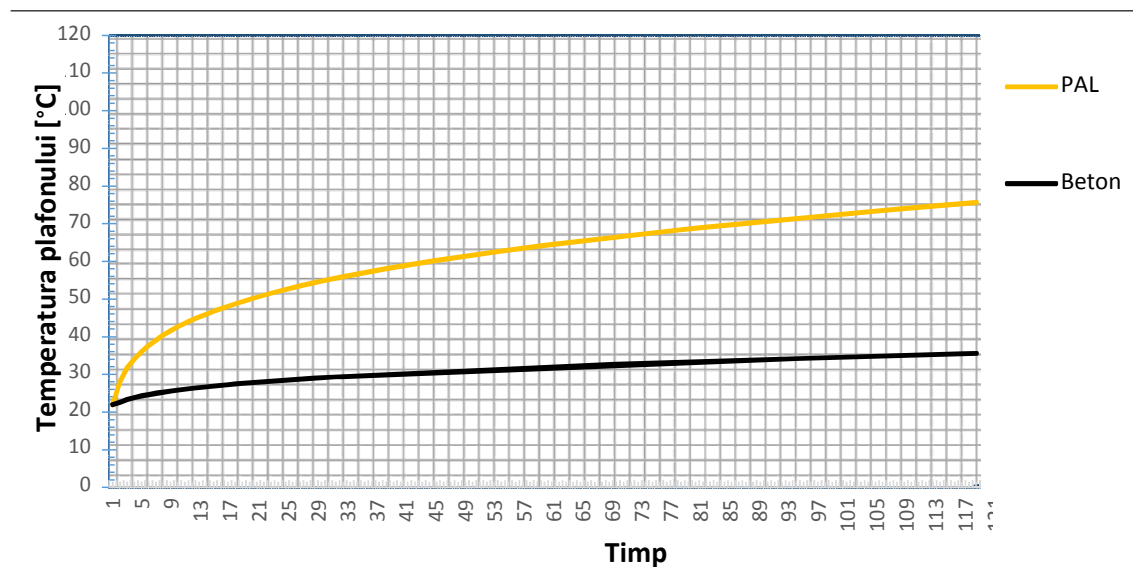


Fig. 14. Temperatura plafonului în urma folosirii metodei SBI

Temperatura plafonului este importantă, întrucât plafonul constituie o parte comună a compartimentului incendiat cu celelalte compartimente neincendiate și, astfel, din cauza temperaturii ridicate ale elementelor de construcție comune, pot apărea noi focare la etajele superioare. Această temperatură influențează și comportarea planșului din beton armat, deoarece rezistența betonului scade începând cu temperatura de 300°C, ajungând ca la 600°C rezistența să fie cu 20-30% mai mică decât la valorile normale de temperatură. Betonul supus la temperaturi ridicate influențează acțiunea de stingere a echipelor de intervenție, atât din punct de vedere a eficienței stingerii, ca urmare a radierii prelungite a căldurii acumulate, cât și ca urmare a reducerii capacității portante a planșului, prin deteriorarea stratului de beton în contact cu apa rece utilizată la stingere. Trebuie menționat că aceste aspecte nu reprezintă scopul prezentului studiu, ele urmând a fi analizate, în detaliu, în alte cercetări ce vor fi investigate ulterior.

În cazul folosirii arzătorului SBI, nu se ajunge la temperaturi suficient de mari pentru a constitui noi focare în încăperile vecine, dar se pot forma noi focare în interiorul aceleiași încăperi, deoarece pot exista materiale cu temperaturi de inflamabilitate mici, cum ar fi perdelele și jaluzelele, care se află la partea superioară a încăperii.

Conform figurilor 13 și 14, atât în cazul folosirii metodei ISO 9705, cât și în cazul metodei SBI, temperatura maximă a stratului superior de gaze este mai mică în cazul betonului, fiind de cca 205°C, respectiv 35°C, comparativ cu PAL-ul, unde se înregistrează valori ale temperaturii de 460°C, respectiv 205°C.

5. Concluzii

Parametrii principali, care influențează caracteristicile de reacție la foc ale panourilor și placărilor de izolare din lemn, sunt: grosimea, substratul și densitatea.

În acest studiu a fost realizată simularea la scară naturală a contribuției plăcilor de PAL la dezvoltarea incendiilor care se manifestă în spații închise, prin utilizarea programului B-RISK de simulare a incendiilor. Astfel, ținând-se cont de cele două scenarii de incendiu utilizate în studiu, se pot desprinde o serie de concluzii.

Un prim aspect constatat îl reprezintă faptul că valoarea temperaturii maxime a stratului superior de gaze este mai mare în cazul utilizării metodei ISO 9705, decât în cazul metodei SBI, întrucât puterea arzătorului folosit în prima metodă de testare (100 kW, 300 kW, respectiv 900 kW) este mai mare decât cea folosită în a doua metodă (30 kW).

Reprezentarea grafică a temperaturii stratului superior de gaze fierbinți, în cazul metodei de testare ISO 9705, este influențată de HRR-ul arzătorului. Reprezentarea grafică are forma valorilor date de modificarea puterii arzătorului, observându-se (după primele 10 minute, 20 de minute, respectiv după 30 de minute de la începerea testului) o creștere semnificativă a temperaturii stratului de gaze fierbinți, odată cu mărirea puterii arzătorului. Acest lucru se datorează faptului că puterea arzătorului este destul de mare, arzătorul acționând pe toată durata testului și neexistând alte obiecte care să influențeze debitul de căldură degajată.

Se observă, de asemenea, că, atunci când încăperea nu are aplicat material pentru finisaj interior, temperatura atinsă în stratul superior de gaze este mai scăzută, fiind de cca 517°C (ISO 9705), respectiv de cca 79°C (SBI) în ultima secundă a testului (1800). În cazul în care există material pentru finisare aplicat pe pereții interiori, și anume PAL, se atinge temperatura de 634°C (ISO 9705), respectiv de 95 °C (SBI), în secunda 1220, moment în care se și întrerupe testul, întrucât materialul combustibil este consumat în întregime.

Având în vedere performanțele la foc ale PAL-ului, în conformitate cu reglementările tehnice în vigoare [44] și în urma studiului efectuat se poate concluziona că acest material poate fi folosit ca material de finisaj cu următoarele recomandări:

- în situația în care se montează pe pereți rezistenți la foc, se vor lua măsuri de tratare cu substanțe ignifuge sau se vor prevedea instalații automate de stingere a incendiilor; de asemenea, prin montarea PAL-ului nu se vor crea goluri cu adâncimea mai mare de 20 de cm față de pereți;
- în situația în care se va monta pe pereți, va fi protejat de aparatura electrică, de corpurile de iluminat sau de alte surse de încălzire pentru a preveni aprinderea lui;
- nu se recomandă montarea acestuia în încăperi cu degajări de praf combustibil, decât dacă se permite curățirea ușoară a suprafețelor PAL-ului;
- nu se recomandă utilizarea PAL-ului pe căile de evacuare;

- nu se recomandă montarea PAL-ului ca finisaj interior în clădirile înalte și foarte înalte, în sălile aglomerate, clădiri de învățământ, deoarece se crește densitatea de sarcină termică și se permite propagarea rapidă a incendiilor;
- nu se recomandă utilizarea PAL-ului în bucătăriile din clădirile de locuit individuale, sau în alte spații unde se utilizează focul deschis;

Aplicabilitatea rezultatelor studiului în activitatea de normare și reglementare poate consta în propunerea de utilizare a produselor din lemn tratate cu substanțe de suprimare a fumului drept finisaj în încăperile cu anumite destinații, precum sălile cu aglomerări de persoane, spațiile de birouri, sau construcțiile în care utilizatorii nu se pot evacua singuri, sau o fac într-un interval dificil de estimat, cazul spitalelor căminelor de bătrâni etc.

Acknowledgements

This work was supported by a grant of the Romanian Ministry of Research and Innovation, CCCDI – UEFISCDI, project number PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0350 / 02.03.2018 (Graphene4Life), within PNCDI III.

Referințe

- [1] R. M. Rowell, The chemistry of Solid Wood. In: Advances in Chemistry Series. American Chemical Society, Washington, 1984.
- [2] R. Bergman, Z. Cai, C. G. Carll, C. A. Clausen, M. A. Dietsberger, R. H. Falk, C. R. Frihart, S. V. Glass, C. G. Hunt, R. E. Ibach, D. E. Kretschmann, D. R. Rammer, R. J. Ross, Wood handbook-wood as an engineering material. Forest Products Laboratory, Madison, WI, 2010.
- [3] A. C. Wiedenhoeft, R. B. Miller, Structure and Function of Wood. In R. M. Rowell (ed) Handbook of wood chemistry and wood composites. CRC Press, Florida, p.9-32, 2005.
- [4] K. A. McDonald, D. E. Kretschmann, Commercial Lumber. In: Wood Handbook – Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory, Madison, 1999.
- [5] F. Laoutid, L. Bonnaud, M. Alexandre, J. M. Lopez-Cuesta, P. H. Dubois, New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites. Materials Science and Engineering R 63: 100-125, 2009.
- [6] J. Alongi, R. A. Carletto, A. DI Blasio, F. Cuttica, F. Carosio, F. Bosco, G. Malucelli, Intrinsic intumescent-like flame retardant properties of DNA – treated cotton fabrics. Carbohydr Polym 96:296 – 304, 2013a.
- [7] SR EN 13823+A1:2014, Încercări de reacție la foc ale produselor pentru construcții. Produse pentru construcții, cu excepția îmbrăcămintei de pardoseală, expuse acțiunii termice a unui singur obiect arzând.
- [8] Standard Test Method for Determining Flammability Characteristics of Plastics and Other Solid Materials Using Microscale Combustion Calorimetry, ASTM D 7309-07.
- [9] SR EN ISO 11925-2 Aprinzibilitatea produselor pentru construcții la contactul direct cu flacăra. [10] H.S. Kim, S. Kim, H.J. Kim, H.S. Yang, Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content, ThermochimActa 451, 2006, p.181–188.
- [11] Bartlett, R. M. Hadden, L. A. Bisby, A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction, School of Engineering, The University of Edinburgh, The King’s Buildings, Mayfield Road, Edinburgh EH9 3DW, UK, 2018.
- [12] K.E. Bland, Behaviour of wood exposed to fire: a review and expert judgement procedure for predicting assembly failure. Dissertation, Worcester Polytechnic Institute, 1991.

- [13] *P. Reszka*, In-Depth Temperature Profiles in Pyrolyzing Wood, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, The University of Edinburgh, 2008.
- [14] *L. Yang, X. Chen, X. Zhou, W. Fan*, The pyrolysis and ignition of charring materials under an external heat flux. *Combustion and Flame*, v.133, 2003, p.407–413.
- [15] *V. Babrauskas*, Ignition of wood: a review of the state of the art. *Interflam*, 2002, p.71–88.
- [16] *F.L. Browne*, Theories of the combustion of wood and its control – a survey of the literature, FPL report number 2136. Forest Products Laboratory, Madison, WI, 1958.
- [17] ASTM E119: Standard test methods for fire tests of building construction and materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [18] ISO 834: Fire resistance tests - elements of building construction. International Organization for Standardization, Switzerland, 2012.
- [19] *K.L. Friquin*, Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. *Fire and Materials*, v.35, 2010, p.303–327.
- [20] *E. Mikkola*, Charring of wood, VTT Research Report 689, VTT Technical Research Centre of Finland. Espoo, Finland, 1990.
- [21] *T. Hakkarainen, E. Mikkola, B. Ostman, L. Tsantaridis, H. Brumer, P. Piispanen*, Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications. VTT, Finland, SP Tratek, Sweden, KTH Biotechnology, Sweden, 2005, p.1–47.
- [22] *Z. Karpovic, R. Sukys, R. Gudelis*, Toxicity research of smouldering and flaming pine timber treated with fire retardant solutions. *J.Civ.Eng.Manag*, v.18, 2012, p.600–608. 10.3846/13923730.2012.709195.
- [23] *E. Wilkins, F. Murray*, Toxicity of emissions from combustion and pyrolysis of wood. *Wood Science and Technology*, v.14, 1980, p.281–288. 10.1007/BF00383455.
- [24] *S. Janssen*, Brominated flame retardants: Rising levels of concern. *Healthcare without harm*, Arlington VA, 2005.
- [25] *J. Green*, Mechanisms flame retardancy and smoke suppression – a review. *Journal of Fire Sciences*, v.14, 1996, p.426–442.
- [26] SR EN ISO 11358:2003, Materiale plastice. Termogravimetria polimerilor (TG). Principii generale.
- [27] *E. Mikkola*, Review of reaction to fire performance of wood based products. In *Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering*, 2004, p.325-330.
- [28] SR ISO 5660-1:2015, Încercări de reacție la foc. Căldură degajată, cantitate de fum produsă și viteza de pierdere de masă. Partea 1: Debitul de căldură degajată (metoda con-calorimetrului) și viteza de producere a fumului (măsurare dinamică).
- [29] *V. Babrauskas, S. J. Grayson, H. C. Tran*, Heat release in fires: experimental data on wood materials. *Journal of Fire Protection Engineering*, v.12, 1992, 163-189.
- [30] *R. E. Lyon, R. N. Walters*, A microscale combustion calorimeter, US Department of Transport, Washington, Report Number: DOT/FAA/AR-01/117, 2002.
- [32] *H. C. Tran*, Heat release in fires: experimental data on wood materials. In: *V. Babrauskas, S. K. Grayson (eds) Heat Release in fires*. Elsevier Applied Science, New York, 1992.
- [33] *L. A. Lowden, T. R. Hull*, Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire science reviews*, v.2(1), 2013, p.4.
- [34] SR EN 13501-1 Clasificarea produselor pentru construcții în funcție de comportarea la foc. Partea 1: Clasificare în funcție de rezultatele încercărilor de reacție la foc.
- [35] ISO 9705-1:2016, Reaction to fire tests — Room corner test for wall and ceiling lining products — Part 1: Test method for a small room configuration.
- [36] *J. Axelsson, T. Hertzberg, B. Sundström*, Database for Design Fires – Brandforsk projekt 327-021, SP rapport 2005:02, SP Brandteknik, Borås, 2005.
- [37] *B. Sundström, P. Van Hees, P. Thureson*, Results and analysis from fire tests of building products in ISO 9705, the Room/Corner Test. The SBI Research programme, 1998.
- [38] *R. van Mierlo*, The Single Burning Item (SBI) test method – a decade of development and plans for the near future, *Heron*, vol. 50, nr. 4, 2005.

- [39] *F. Larsson, P. Andersson, B. E. Mellander*, Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests, 2016.
- [40] *D. A. Smith, K. Shaw*, "Evolution of the Single Burning Item Test," Flame Retardant '98, London, UK, Interscience Communications, London, UK, February 1990.
- [41] *C. Wade*, A room fire model incorporating fire growth on combustible lining materials. (Master of Science Thesis, Worcester Polytechnic Institute. Worcester, MA), 1996.
- [42] *C. Wade, J. Barnett*, A room-corner model including fire growth on linings and enclosure smoke-filling. *Journal of Fire Protection Engineering*, 8, **vol.4**, 1997, 27-36.
- [43] *C. Wade*, Branzfire technical reference guide. Branz Study Report SR92. Judgeford, New Zealand: Branz Ltd, 2000.
- [44] Normativ de siguranță la foc a construcțiilor, P118-99.