



Universitatea  
Transilvania  
din Braşov

**ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ**

**Facultatea Design de Mobilier si Inginerie a Lemnului**

**Ing. Murat HACIBEKTASOGLU**

**Cercetări privind fabricarea și unele proprietăți  
mecanice și tehnologice ale panourilor din lemn masiv  
termotratat de fag**

**Researches on the manufacture and some mechanical  
and technological properties of the panels made of  
solid beech wood**

**REZUMAT / ABSTRACT**

**Conducător științific**

**Prof.dr.ing. Mihaela CÂMPEAN**

**BRAȘOV, 2020**

D-lui (D-nei) .....

**COMPONENȚA**  
**Comisiei de doctorat**

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Brașov  
Nr. 10497 din 03.03.2020

PREȘEDINTE: - Prof. dr. ing. Camelia COȘEREANU

Universitatea Transilvania din Brașov

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC: - Prof. dr. ing. Mihaela CÂMPEAN

Universitatea Transilvania din Brașov

REFERENȚI: - Conf. dr. ing. Levente DENES

Universitatea din Sopron (Ungaria)

- Cercet. șt. gr. I ing. Dănuț CHIRA

Institutul Național de Cercetare- Dezvoltare „Marin Drăcea”,  
stațiunea Brașov

- Prof. dr. ing. Mihai ISPAS

Universitatea Transilvania din Brașov

Data și ora susținerii publice a tezei de doctorat:

Data 03.12.2020 ora 12:00, prin sistem online-videoconferință:

<https://elearning.unitbv.ro/user/index.php?id=9553>

Eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vă rugăm să le transmiteți în timp util, pe adresa: [campean@unitbv.ro](mailto:campean@unitbv.ro)

Totodată vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat. Adresa de acces va fi publicată pe site-ul SDI cu 2 zile înainte de data de susținere programată.

Vă mulțumim.

## MULȚUMIRI

Prezenta cercetare constituie rezultatul experienței profesionale dobândite în urma activității industriale desfășurate de-a lungul a 20 ani în producție, în diferite ramuri ale industriei de prelucrare a lemnului.

În primul rând mulțumesc conducătorului de doctorat, Prof. univ. dr. ing. Mihaela Câmpean, care de-a lungul întregii perioade doctorale a fost mentor științific de un profesionalism desăvârșit și sub a cărei îndrumare de excepție s-a realizat această teză.

Tot acum doresc să mulțumesc conducerii J.F. Furnir SRL, Massif Panel SRL pentru posibilitatea de a efectua cercetările pe platforma industrială din Brașov, pe liniile de fabricație existente și folosind aparatura din dotarea firmei precum și pentru suportul material acordat în vederea realizării lucrării de cercetare. Mulțumesc mult colegilor din producție pentru sprijinul acordat.

Țin să mulțumesc și colectivului Facultății de Ingineria Lemnului din Brașov pentru ajutorul profesional acordat pe toată durata stagiului de studii doctorale.

Brașov, februarie 2020

Drd. Ing. Murat HACIBEKTASOGLU

## CUPRINS

	Pag. rezumat
LISTA DE NOTAȚII ȘI ABREVIERI	-
INTRODUCERE	6
CAPITOLUL 1: Stadiul actual al cercetărilor privind termotratarea lemnului de foioase tari și efectele acestui proces asupra proprietăților lemnului	7
1.1 Termotratarea lemnului – începuturi și evoluție	7
1.2 Efectele termotrătării asupra proprietăților lemnului din specii de foioase tari	12
CAPITOLUL 2: Obiectivele tezei	16
CAPITOLUL 3: Cercetări experimentale privind efectele termotrătării asupra culorii și compoziției chimice a lemnului de fag( <i>Fagus sylvatica</i> L.)	17
3.1 Obiectivele cercetării experimentale	17
3.2 Material, metodă, aparatură	17
3.2.1 Termotratarea. Determinarea pierderii de masă și a ariei relative	17
3.2.2 Determinarea modificărilor de culoare în urma termotrătării	19
3.2.3 Determinarea modificărilor în compoziția chimică a lemnului de fag în urma termotrătării	20
3.3 Rezultate experimentale și discuții	21
3.3.1 Pierderea de masă și aria relativă	21
3.3.2 Efectele termotrătării asupra culorii lemnului de fag	22
3.3.3 Efectele termotrătării asupra compoziției chimice a lemnului de fag	24
3.4 Concluzii	26
CAPITOLUL 4: Tehnologia fabricării panourilor reconstituite din lemn de fag	29
4.1 Prezentarea fluxului tehnologic de fabricație a panourilor reconstituite din lemn masiv de fag netratat	29
4.2 Concluzii	32

CAPITOLUL 5: Cercetări experimentale privind proprietățile mecanice și tehnologice ale panourilor reconstituite din frize termotratate din lemn de fag comparativ cu panourile din frize netratate	32
5.1 Obiectivele cercetării experimentale	32
5.2 Teste privind prelucrabilitatea lemnului termotratat de fag	33
5.2.1 Influența termotratării asupra prelucrabilității prin rindeluire	33
5.2.1.1 Metodă, material, aparatură	33
5.2.1.2 Rezultate experimentale și discuții privind puterea de așchiere la rindeluire	35
5.2.1.3 Rezultate experimentale și discuții privind calitatea suprafeței după rindeluire	36
5.2.1.4 Concluzii	39
5.2.2 Influența termotratării asupra prelucrabilității prin frezare	40
5.2.2.1 Metodă, material, aparatură	40
5.2.2.2 Rezultate experimentale și discuții privind puterea de așchiere la frezare	41
5.2.2.3 Rezultate experimentale și discuții privind calitatea suprafeței frezate	43
5.2.2.4 Concluzii	46
5.3 Determinarea rezistenței la încovoiere și a modulului de elasticitate	46
5.3.1 Realizarea panourilor experimentale. Debitarea epruvetelor	46
5.3.2 Metoda și aparatura de testare	47
5.3.3 Rezultate experimentale	48
5.3.4 Concluzii	50
5.4 Determinarea calității încleierii	50
5.4.1 Metodă, material și aparatură	50
5.4.2 Rezultate experimentale	51

5.4.3 Concluzii	51
5.5 Determinarea variațiilor dimensionale sub influența variațiilor umidității relative	52
5.5.1 Metodă, material și aparatură	52
5.5.2 Rezultate experimentale	52
5.5.3 Concluzii	53
5.6 Determinarea absorbției de ulei ca material de finisare	53
5.6.1 Metodă, material, aparatură	53
5.6.2 Rezultate experimentale	54
5.6.3 Concluzii	54
CAPITOLUL 6: Concluzii generale și considerații economice. Contribuții originale. Diseminarea rezultatelor. Direcții viitoare de cercetare	55
6.1 Concluzii generale și considerații economice	55
6.2 Contribuții originale	59
6.3 Diseminarea rezultatelor	60
6.4 Direcții viitoare de cercetare	60
BIBLIOGRAFIE	60
ANEXA 1. SCURT REZUMAT	66

## INTRODUCERE

Termotratarea lemnului este un procedeu modern de tratare termică, ce a deschis materialului *lemn* poarta spre noi utilizări, și anume în condiții de exterior. Fațadele, pardoselile de mansardă, amenajările pentru pontoane, piscine, grădini, mobilierul de grădină și amenajările de exterior, limitate în trecut la manufacturarea din materiale reci, ne-ecologice, precum plasticul, betonul, cauciucul și metalele, au primit acum șansa reinventării.

Caracteristica definitorie a lemnului termotratat este stabilitatea sa mult îmbunătățită la umiditate (atât la contactul direct cu apa, cât și la umiditatea din aer) față de lemnul netratat. Această îmbunătățire este obținută în urma modificării compoziției chimice a lemnului sub efectul unei temperaturi ridicate (peste 160°C). Și rezistența crescută la biodegradare pledează în favoarea utilizării lemnului termotratat în exterior. Rezistența scăzută a acestuia la radiații UV impune însă aplicarea unui tratament corespunzător pentru menținerea culorii.

Prezenta cercetare abordează o temă de actualitate în domeniul ingineriei lemnului, cu aplicabilitate directă în practica industrială și anume aceea a evaluării proprietăților panourilor reconstituite din frize termotratate din lemn de fag, în vederea adaptării tehnologiei existente pentru fabricarea acestor panouri din frize netratate, precum și în vederea stabilirii avantajelor și limitărilor noului produs pe piața materialelor de construcții și amenajări.

Ideea acestei teze de doctorat a pornit de la dorința de diversificare a gamei de produse a unei întreprinderi de prelucrarea lemnului, prin evaluarea posibilității de adaptare a unei linii existente de panouri reconstituite din lemn masiv (netratat), în vederea producerii de panouri din frize termotratate, pentru utilizări în condiții de exterior (placări de fațade, blaturi de mese și bănci pentru parcuri, grădini etc.).

Specia lemnoasă selectată pentru acest studiu a fost lemnul de fag (*Fagus sylvatica* L.), deoarece întreprinderea producea panouri din frize de fag, avea deja stocul de materie primă garantat și avea experiență în ceea ce privește proprietățile acestui material și comportamentul său la uscare, prelucrare mecanică și finisare.

Prin tematica propusă și abordarea experimentală de concepție proprie, teza are un pronunțat caracter de originalitate. Rezultatele experimentelor realizate constituie date valoroase cu privire la proprietățile lemnului de fag tratat termic, dar și cu privire la proprietățile panourilor reconstituite din frize termotratate de fag, care vin să îmbogățească literatura de specialitate. Cele trei articole publicate în revista *BioResources* (indexată ISI), două dintre ele în anul 2016 (factor de impact=1,334; scor relativ de influență=1,427) și unul în anul 2017 (factor de impact=1,321) dovedesc interesul comunității științifice internaționale pentru tematica abordată și rezultatele acestei cercetări.

## Capitolul 1

# STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND TERMOTRATAREA LEMNULUI DE FOIOASE TARI ȘI EFECTELE ACESTUI PROCES ASUPRA PROPRIETĂȚILOR LEMNULUI

### 1.1 Termotratarea lemnului – începuturi și evoluție

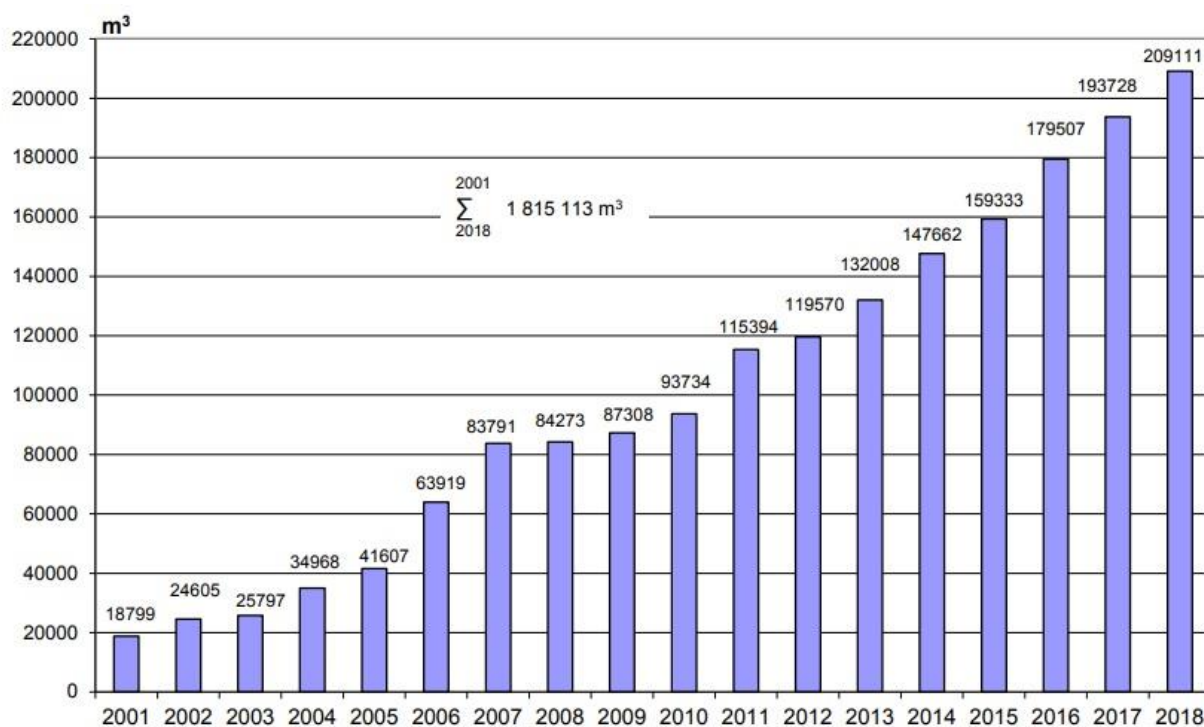
Termotratarea lemnului este procesul în care lemnul uscat este supus unor temperaturi înalte (150 - 260°C) timp de câteva ore într-un mediu inert. În aceste condiții, compoziția chimică a lemnului suferă o serie de modificări, determinând astfel și modificarea unor proprietăți ale lemnului: se închide la culoare, higroscopicitatea sa se reduce, stabilitatea dimensională și se îmbunătățește, îi scad rezistențele mecanice ș.a.

Rapoarte din diferite studii arată că efectul încălzirii la temperaturi înalte (în special peste 175°C) asupra rezistenței și fragilității lemnului variază în funcție de natura chimică și anatomică a lemnului și metodele de tratare (Hilis 1984). Cu alte cuvinte, gradul de modificare a proprietăților din lemn în timpul tratamentului termic este determinat de metoda de modificare termică, specia lemnoasă și proprietățile sale caracteristice, umiditatea inițială a lemnului, mediul de tratare, temperatura și durata de tratare (Altinok *et al.* 2010). Este demonstrat faptul că temperatura are un efect mai mare asupra proprietăților față de durata de tratare (Mitchell 1988). Tratarea lemnului la temperaturi mai scăzute pentru perioade mai lungi de timp nu produce proprietățile dorite. Temperaturile peste 150°C deteriorează treptat proprietățile fizice și chimice ale lemnului (Syrjanen & Oy 2001). Cu cât este mai mare temperatura de tratare, cu atât este mai mare durabilitatea biologică a lemnului. Totuși, peste 150°C proprietățile de rezistență ale lemnului încep să scadă. Lemnul devine mai casant iar rezistențele la încovoiere și tensiune scad cu 10-30%.

Primele cercetări în domeniul termotrătării lemnului datează încă de la începutul sec. XX. Astfel, de exemplu, Tiemann (1920) a arătat că uscarea la temperaturi înalte reduce umiditatea de echilibru a lemnului și în consecință reduce tendința de umflare a acestuia. Stamm & Hansen (1937) au demonstrat că umiditatea de echilibru, coeficienții de contragere și de umflare ai lemnului scad la încălzirea acestuia în diferite medii gazoase, la temperaturi ridicate. Seborg *et al.* (1945) au creat un nou produs ("Staypack"), pe bază de lemn comprimat prin presare la cald, iar Stamm *et al.* (1946) au brevetat un procedeu de stabilizare dimensională a lemnului fără densificarea acestuia ("Stayb-wood").

Brevetul care a declanșat însă lansarea unui produs de scară industrială le aparține finlandezilor Viitaniemi *et al.* (1997). Lansat sub denumirea ThermoWood de către Asociația cu același nume, acest procedeu de termotratare și produsul aferent au înregistrat un succes uriaș, capacitatea produsă anual fiind la finalul anului 2018 de peste 200000m<sup>3</sup> (Fig. 1.1).





ThermoWood® is a registered trademark owned by the International ThermoWood Association

**Fig. 1.1 Creșterea producției anuale de ThermoWood  
(Thermowood production statistics 2018).**

În cazul procedurii ThermoWood, lemnul se amplasează într-o atmosferă umedă la temperaturi peste 150°C pentru 2 până la 10 ore până înregistrează o pierdere de masă de cel puțin 3%. Tratatul se realizează în mediu de vapori supraîncălziți cu un conținut maxim de oxigen de 3-5% fără suprapresiune și la o viteză a aerului de cel puțin 10m/s (Syrjänen & Kangas 2000).

Regimul de tratare prevede trei faze principale:

- faza 1 - de încălzire și uscare - în care temperatura lemnului este ridicată în cca. 6 ore până la valoarea de 100°C și apoi în continuare până la 130°C creîndu-se astfel mediul de vapori supraîncălziți; temperatura se menține la valoarea de 130°C timp de 12 ore, până umiditatea lemnului scade la 3-4%;
- faza 2 - de tratare termică - în care temperatura din cameră este ridicată la valoarea de 185-230°C și menținută timp de 2-3 ore (Militz 200a) sau între 150-240°C timp de 0,5 - 4 ore (Syrjänen & Kangas 2000), în funcție de specia lemnoasă;
- faza 3 - de răcire și condiționare - în care temperatura din cameră este redusă la 80-90°C prin pulverizare de apă rece, concomitent crescând umiditatea relativă a mediului din camera de tratare, ceea ce determină re-umezirea materialului până la 4-7%.

Interesul pentru procedeele de tratare termică înregistrează și în prezent o continuă creștere. Acest interes se datorează scăderii producției de cherestea durabilă și creșterii cerinței pentru materiale de construcție sustenabile, defrișării în special a pădurilor subtropicale și introducerii mari de legislație guvernamentală restrictivă prin reducerea chimicalelor toxice (Boonstra 2008).

În afara ThermoWood, au apărut și alte tratamente comerciale: unul în Olanda (PlatoWood), unul în Germania (OHT), două în Franța (Rétification și Bois Perdure) și unul în Italia (Termovuoto).

## 1.2 Efectele termotrătării asupra proprietăților lemnului din specii de foioase tari

Deoarece cercetările din cadrul prezentei teze de doctorat s-au efectuat pe o specie de foioase tari, respectiv lemnul de fag (*Fagus sylvatica* L.), cercetarea bibliografică prezentată în continuare s-a limitat la referințe privind termotrătarea foioaselor tari, și în special a lemnului de fag (*Fagus sylvatica* L. și *Fagus orientalis* L.).

### PIERDEREA DE MASĂ

Pierderea de masă în urma termotrătării lemnului este una dintre cele mai importante caracteristici și este considerată în mod frecvent un indicator al eficienței termotrătării. Cu cât pierderea de masă este mai mare, cu atât înseamnă că modificările în compoziția chimică a lemnului au fost mai mari și deci și efectele asupra proprietăților lemnului sunt mai vizibile (atât cele pozitive, de creștere a stabilității dimensionale, cât și cele negative, de scădere a rezistențelor mecanice).

În ceea ce privește influența speciei, Olărescu (2015) a arătat că la același regim de tratare (200°C, timp de 4h), pierderea de masa înregistrată în cazul lemnului de fag a fost de 6,8%.

În ceea ce privește influența mediului de termotratare este evident că în mediu inert modificarea chimică a lemnului este mai lentă. Astfel de exemplu, dacă pierderea de masă a lemnului de fag la un tratament în aer atmosferic la 200°C timp de 3h este de 6,9% (Cermak *et al.* 2015), la tratamentul în vid (210 mbar), ea este de numai 2,7% (Ferrari *et al.* 2013). Diferențe există și între două medii inerte (de exemplu, între tratarea în vid și respectiv în azot).

Temperatura și durata de tratare influențează pierderea de masă direct proporțional: cu cât temperatura este mai mare, cu atât crește și pierderea de masa; de asemenea, cu cât durata de tratare este mai mare, cu atât crește și pierderea de masă. În cazul lemnului de fag, Olărescu (2015) a constatat că tratarea în aer la presiune atmosferică la temperatura de 180°C este insuficientă, pierderea de masă fiind chiar și la o expunere de peste 6h, sub valoarea de 3%. În schimb, temperatura de 200°C aduce deja modificări majore, pierderea de masa crescând peste valoarea de 5% după 2,5h de tratare.

Candelier *et al.* (2015) a găsit o corelație interesantă între valoarea pierderii de masă și aria relativă situată sub curba de temperatură peste linia  $t=100^{\circ}\text{C}$  pe diagrama de tratare (reprezentarea grafică a evoluției temperaturii pe parcursul procesului de termotratare). Arii relative mai mari indică pierderi de masă mari și deci o degradare mai severă. Autorii au stabilit și funcțiile de dependență pentru cele patru specii studiate, dintre care o specie de foioase (*Quercus canariensis*) și trei specii de rășinoase (*Pinus halepensis*, *Pinus radiata* și *Pinus pinaster*). Toate speciile analizate au fost termotratate în vid (200 mbar) la temperatura de  $220^{\circ}\text{C}$ . Varierea duratei de tratare a permis obținerea diferitelor valori ale pierderii de masă. S-a constatat că diferențele de susceptibilitate termică sunt mai pronunțate pentru pierderile în masă mai mari de 8%.

O valoare de prag a pierderii de masă în urma termotrătării este valoarea de 5%, care este considerată de Viitaniemi *et al.* (1997) o valoare optimă, deoarece permite o stabilizare dimensională consistentă (de cca. 60%), fără ca rezistențele mecanice ale lemnului să fie afectate semnificativ. Odată cu depășirea acestei valori, coeficientul de stabilizare dimensională (ASE) mai crește dar nu cu mult, în timp ce rezistențele mecanice încep să scadă vertiginos, cu până la 60% (Esteves *et al.* 2008).

## TRANSFORMĂRILE CHIMICE

Termotratarea schimbă compoziția chimică a lemnului prin degradarea compușilor celulari și a substanțelor extractive. Așa cum s-a menționat și anterior, modificările chimice datorate termotrătării depind de durata și temperatura tratamentului, temperatura fiind factorul principal (Bourgeois *et al.* 1989). La temperaturi mici, între  $20-150^{\circ}\text{C}$ , lemnul se usucă, începând cu pierderea apei libere și finalizând cu eliminarea apei legate. La  $180-250^{\circ}\text{C}$ , temperaturi frecvent folosite în termotratare, lemnul suferă transformări chimice importante iar la temperaturi mai mari de  $250^{\circ}\text{C}$  începe carbonizarea prin formarea de  $\text{CO}_2$  și alte produse de piroliză.

Hemicelulozele reprezintă prima componentă structurală care este afectată termic chiar și la temperaturi joase. Degradarea începe cu deacetilzarea iar eliberarea de acid acetic acționează ca un catalizator de depolimerizare care crește descompunerea polizaharidelor (Tjeerdsma *et al.* 1998a; Sivonen *et al.* 2002; Nuopponen *et al.* 2004). În același timp, hemicelulozele suferă reacții de deshidratare prin scăderea grupărilor hidroxil (Weiland & Guyonnet 2003). Conținutul de carbohidrați scade cu severitatea tratamentului și depinde de specia lemnoasă. La temperaturi înalte ( $230^{\circ}\text{C}$ ), conținutul de xiloză și manoză scade, iar arabinoza și galactoza dispar (Jämsä & Viitaniemi 2001). Esteves *et al.* 2008 a determinat conținutul de zaharuri prin hidroliză acidă înainte și după termotratare și a concluzionat că hemicelulozele sunt afectate primele, degradarea manifestându-se prin scăderea xilozei, arabinozei, galactozei și a manozei.

## EFECTE ANATOMICE

Conform Boonstra *et al.* (2006) tratamentele termice afectează structura anatomică a lemnului dar efectele depind de specia lemnoasă și condițiile de prelucrare utilizate. Studiile efectuate de acești cercetători pe lemn de fag, plop, mesteacăn, arin, frasin și simaruba privind aspectele microstructurale ale lemnului tratat termic prin termo-hidroliză la temperaturi sub 200°C au condus la concluzia că specii precum fagul și plopul, sunt predispuse la ruperea vaselor și unele deformări pe fibrele libriforme lângă vase. De asemenea, s-au observat unele crăpături radiale lângă raze, în cazul lemnului de fag și mesteacăn.

## MODIFICAREA CULORII

Modificarea (închiderea) culorii lemnului în urma termotrătării este strâns legată de modificările la nivelul compoziției chimice a acestuia, respectiv de degradarea compușilor de hemiceluloză, lignină și anumite substanțe extractive (Fengel & Wegener 1984; Sundquist 2004; Chen *et al.* 2012). Procesele hidrolitice și de oxidare sunt considerate cele care contribuie în primul rând la formarea substanțelor cromofore din timpul termotrătării (Timar *et al.* 2016).

Contribuții importante cu privire la determinarea modificărilor de culoare în urma termotrătării lemnului de fag au fost aduse de Gonzales-Pena și Hale (2009), Klement și Marko (2009), Todorovic *et al.* (2012b), Wetzig și Niemz (2012) ș.a.

## UMIDITATEA DE ECHILIBRU

Unul dintre principalele efecte ale tratamentului termic este scăderea higroscopicității lemnului. Conform Jämsä & Viitaniemi (2001), cauza scăderii umidității de echilibru este faptul că mai puțină apă este absorbită de pereții celulelor după termotrătare ca urmare a modificării chimice prin scăderea grupărilor hidroxil. Reacțiile de policondensare din lignină rezultă în aglutinări ulterioare care pot contribui, de asemenea, la scăderea umidității de echilibru (Tjeerdsma & Militz 2005).

Fiind multe variabile care influențează creșterea umidității de echilibru, este dificil a compara rezultatele raportate. De exemplu, Tjeerdsma *et al.* (1998b) a raportat că la un tratament ușor umiditatea de echilibru a lemnului (condiționat la 96%) s-a redus de la 30% la fag (*Fagus sylvatica*) și 28% la pin (*Pinus sylvestris*) până la 18%, iar la tratamente mai severe chiar până la 10%. Kamden *et al.* (2002) a tratat lemn de fag prin metoda franceză (Rétification) la temperaturi între 200°C și 260°C și a obținut reducerea umidității de echilibru de la 10% la 5%, de la 14,5 % la 8% și de la 21,8% la 12%, la umiditățile relative de 66%, 86% și respectiv 100%.

Mitani & Barboutis (2012) au studiat efectele termotrătării la 200°C timp de 2-10 ore asupra higroscopicității lemnului de fag (*Fagus sylvatica* L). După imersia în apă timp de 3 zile, absorbția de apă în lemnul termotratat timp de 10h a fost de 42,73%, în timp ce în lemnul

tratat doar 4h, ea a fost de 44,11%, iar în lemnul netratat 52,26%. Închiderea culorii s-a realizat în cea mai mare parte în primele 4h de termotratare, timp în care luminozitatea ( $L^*$ ) a scăzut de la 68 la 33. Pierderea de masă înregistrată în urma termotrătării a condus la valori foarte mari: 12,8% la tratamentul de 2h până la 37% în cazul lemnului tratat timp de 10h.

### STABILITATEA DIMENSIONALĂ

Scăderea umidității de echilibru lemnului datorată termotrătării duce la o îmbunătățire a stabilității dimensionale. Unul din primele studii care au raportat această îmbunătățire a fost realizat de Burmester (1973), care a afirmat că într-un mediu cu o anumită presiune și temperatură (optime) se poate reduce umflarea lemnului cu cu 60% la fag.

Tjeerdsma *et al.* (1998b) a raportat că termotratarea a permis reducerea umflării (umflarea totală a pieselor uscate până la saturație) de la 7,3% până la 5,7% la *Fagus sylvatica* reprezentând o eficiență de 22%.

Repellin & Guyonnet (2005) au studiat umflarea lemnului de fag tratat termic prin calorimetrie diferențială cu scanare în raport cu compoziția chimică și au concluzionat că reducerea umflării lemnului nu poate fi atribuită numai dispariției punctelor de absorpție prin distrugerea hemicelulozei, dar și altor fenomene precum modificările structurale și chimice ale ligninei.

Kaymakci & Akiyldiz (2011) au studiat umflarea și contragerea lemnului de fag (*Fagus orientalis* Lipsky) tratat termic la temperaturile de 120, 160 și 210°C timp de 2 și 6 ore în mediu inert (de azot). În urma tratării, umflarea în direcție tangențială a variat de la 13,5% (la 120°C/2h) până la 12,8% (la 200°C/6h), în timp ce probele de control (netratate) au avut o umflare în direcție tangențială de 15,1%. Contragerea în direcție tangențială a variat de la 10,76% (la 120°C/2h) până la 8,46% (la 200°C/6h), în timp ce probele de control au avut o contragere în direcție tangențială de 11.85%.

Pentru a cuantifica îmbunătățirea stabilității dimensionale ce apare în cazul aplicării unui anumit procedeu de termotratare, se folosește în mod curent un index al eficienței, abreviat ASE (Anti-Swelling Efficiency). ASE reprezintă diferența dintre umflarea lemnului tratat și cel netratat. ASE se poate calcula în urma umflării totale a lemnului prin imersie în apă, sau în urma umflării parțiale sau totale prin expunerea lemnului unui mediu umed, cu o anumită umiditate relativă (de exemplu, 65%).

Yildiz (2002) a determinat ASE65% în cazul lemnului de fag (*Fagus orientalis*), termotratat în prezența aerului, la temperaturi de 130°C, 150°C, 180°C și 200°C și durate de 2,6 și 10 ore și a constatat creșterea ASE la 50% - 200°C odată cu creșterea temperaturii și a duratei de tratare.

Determinarea efectului de stabilizare dimensională a termotrătării cu diferite regimuri a lemnului de fag (*Fagus sylvatica* L.) a fost studiat și de Olărescu *et al.* (2014). În cazul

termotratării la 180°C timp de 1...4h s-au stabilit valori ale coeficientului volumic de stabilitate dimensională între 8,3% și 15,3%, în timp ce în cazul termotratării la 200°C timp de 1...4h, acesta a avut valori mult mai mari, între 42,2% și 58,7%.

## PROPRIETĂȚILE MECANICE

Gradul de afectare a rezistențelor mecanice depinde în cea mai mare măsură de intensitatea tratamentului termic și al modificărilor produse la nivelul compoziției chimice.

Rusche (1973) a efectuat tratamente termice cu și fără oxigen pe lemn de fag și a concluzionat că modulul de elasticitate scade semnificativ pentru pierderi de masă de 8-10%.

Kamden *et al.* (2002) a tratat lemn de fag prin metoda franceză (Rétification) la temperaturi între 200°C și 260°C și a obținut o scădere cu maxim 20% pentru modulul de elasticitate și 40% pentru rezistența la încovoiere.

## PRELUCRABILITATEA LEMNULUI ȘI CALITATEA SUPRAFEȚEI PRELUCRATE

Din cauza modificărilor chimice pe care lemnul le suferă în timpul termotratării, densitatea acestuia scade, majoritatea rezistențelor mecanice scad de asemenea iar fragilitatea acestuia crește o dată cu deteriorarea proprietăților de rupere din cauza scăderii/pierderii polizaharidelor amorse (Esteves & Pereira 2009). Astfel, lemnul termotratat este mai predispus la deteriorări mecanice în timpul prelucrărilor ulterioare fiind nevoie de condiții tehnologice specifice/adaptate față de lemnul netratat al aceleași specii. Totodată, este de așteptat o reducere a puterii de așchiere datorită scăderii rezistențelor mecanice.

Conform ThermoWood Handbook (2003), particularitățile cele mai importante la rindeluirea lemnului termotratat față de lemnul netratat sunt date de fragilitatea crescută și de tendința crescută de bombare a materialului termotratat. Aceasta se datorează, probabil, faptului că jocul lemnului după termotratare este redus. Prin urmare, la rindeluirea pieselor de lemn termotratat, acestea trebuie așezate cu fața convexă în sus și cilindrul de alimentare trebuie înlocuit cu două roți înguste, situate la marginea exterioară a piesei de lemn (ThermoWood Handbook 2003).

De asemenea, deoarece rezistența materialului termotratat este mai scăzută, rolele de alimentare trebuie să fie ajustate la valori scăzute de presiune pentru a evita crăparea lemnului. O altă recomandare este reducerea vitezei de avans cu cca. 20 m / min comparativ cu prelucrarea lemnului netratat. În acest caz, viteza de rotație a cilindrului port-cuțit trebuie redusă și ea pentru a evita arderea suprafeței.

Literatura de specialitate nu precizează regimuri "optime" de rindeluire a lemnului termotratat. Este cert însă că o serie de parametri și condiții tehnologice privind tipul și presiunea rotelor de alimentare/avans, direcția tăierii în raport cu fibrele, gradul de ascuțire al sculelor tăietoarelor, viteza de avans și viteza de tăiere etc. trebuie armonizate cu atenție pentru a obține rezultate bune.

Kubs *et al.* (2016) au studiat influența vitezei de tăiere, a celei de avans și a unghiului de degajare al tășului sculei asupra puterii de tăiere la frezarea lemnului de fag și au arătat că puterea consumată la frezarea lemnului termotratat este, în medie, cu 5% mai mică decât pentru lemnul netratat. Dintre parametrii de regim considerați, viteza de tăiere s-a constatat a avea influența cea mai importantă.

Mandic *et al.* (2010) au investigat influența temperaturii de termotratare asupra puterii de așchiere la frezarea lemnului de fag. Numai la piesele tratate la temperaturi peste 190°C s-au înregistrat valori semnificativ mai mici ale puterii față de frezarea lemnului netratat. De asemenea, autorii au constatat creșterea puterii de așchiere la folosirea unor viteze de avans mai mari de 8 m/min.

Cu toate acestea, în niciuna din lucrările publicate anterior nu s-a găsit o corelație clară între puterea de așchiere și parametrii de așchiere utilizați în timpul prelucrării lemnului tratat termic. Această lipsă de corelații poate fi rezultatul variației probelor de lemn, neținându-se cont de importanța orientării fibrei la pregătirea probelor sau de performanța și limitele senzorilor.

Calitatea suprafeței în cazul lemnului termotratat de fag a fost studiată anterior de Yildiz (2002) pentru *Fagus orientalis* L. și de Kviatkova *et al.* 2015 pentru *Fagus sylvatica* L.

Cele mai multe dintre aceste studii au comparat rugozitatea suprafeței lemnului termotratat și netratat înainte de rindeluire, imediat după efectuarea tratamentului termic. Cu toate acestea, evaluarea rugozității suprafeței lemnului termotratat după rindeluire este mai interesantă deoarece, în practică, tratamentul termic precede procesele de prelucrare mecanică (prin frezare, găurire, strunjire, șlefuire etc.). Modificările pe care lemnul le suferă în timpul termotrării, precum pierderea de masă, reducerea densității, modificările de compoziție chimică etc., pot avea un impact asupra rugozității suprafeței, sesizat ca rezultat dintre interacțiunile lemn-sculă așchietoare, într-un mod diferit față de cercetările mai sus menționate. Acest aspect este extrem de important pentru operațiile ulterioare de aplicare a adezivului și de finisare (acoperire cu substanțe peliculogene).

Deși puțin numeroase, am evidențiat mai jos câteva referințe bibliografice care includ studii de rugozitate pe lemn termotratat după prelucrarea mecanică:

Budakci *et al.* (2013) a determinat rugozitatea ( $R_a$ ) perpendicular pe fibre, la lemn de fag (*Fagus orientalis* L) termotratat la 140°C și 160°C timp de 3, 5 și 7 h, după frezarea cu o turație de 6000 rpm, viteză de avans de 4m/min și o adâncime de tăiere de 1mm. Valorile rugozității ( $R_a$ ), au fost determinate cu un palpator stylus cu diametru de 5 μm la vârf. Rugozitatea pieselor termotratare a rezultat cu cca. 8% mai mare decât la lemnul netratat.

Kviatkova *et al.* (2015) a investigat rugozitatea ( $R_a$ ) după frezarea lemnului de fag (*Fagus sylvatica* L.) măsurând în lungul direcției de avans cu metoda prin palpate a suprafeței. După variația turației, avansului, unghiului de așchiere, unghiului de degajare și a unghiului de

așchiere al frezei, autorii au concluzionat că tratamentul termic nu a avut o influență semnificativă asupra rugozității medii a suprafețelor frezate. Totuși, un efect important l-au avut viteza de așchiere și de avans. Valorile cele mai mici ale rugozității  $R_a$  au fost înregistrate la un unghi de așezare de  $20^\circ$  iar cele mai mari la o viteză de tăiere de 40 m/s. Este posibil ca tratamentul termic ( $190^\circ\text{C}$  pentru 1 h) să nu fi fost suficient pentru a detecta vreun efect asupra rugozității suprafeței. Acest rezultat evidențiază necesitatea aplicării unui filtru robust pentru analiza rugozității suprafețelor frezate, așa cum a fost aplicat de către Tan *et al.* (2012) și Piratelli-Filho *et al.* (2012), dar numai pe lemn netratat. Cercetările realizate de Gurău *et al.* (2017) cu această tehnică mai complexă pe lemn termotratat reprezintă o premieră și aduc o contribuție semnificativă în domeniul evaluării calității suprafețelor lemnoase.

### **PROPRIETĂȚILE DE UDARE ȘI REZISTENȚA ÎNCLEIERII**

Reducerea higroscopicității și a capacității de udare a lemnului în urma termotrării constituie dezavantaje în procesul de încleiere al lemnului termotratat, care este îngreunat.

Capacitatea de udare a lemnului scade în urma tratării la temperaturi de peste  $130^\circ\text{C}$ , cu un punct maxim la aproximativ  $190^\circ\text{C}$ , care conform Pecina & Paprzycki (1988) se datorează formării compușilor de degradare. Din teste efectuate pe lemn de plop, fag molid și pin maritim la temperaturi între  $40^\circ\text{C}$  și  $260^\circ\text{C}$  timp de 8 h, Hakkou *et al.* (2003) a concluzionat că proprietatea de udare scade dramatic începând cu  $135^\circ\text{C}$ , crescând ușor odată cu creșterea temperaturii. Nu s-a găsit nicio relație între scăderea proprietății de udare și pierderea de masă sau conținutul de substanțe extractive. Aceleași au fost confirmate de Petrissans *et al.* (2003), care a sugerat că unul din potențialele motive pentru scăderea proprietății de udare ar putea fi creșterea cristalinității celulozei.

Pentru tratamente la temperaturi mai mari de  $200^\circ\text{C}$ , suprafața lemnului devine hidrofobă iar absorbția adezivilor și lacurilor este mai lentă decât la lemnul netratat. Energia superficială a lemnului este dramatic afectată de temperatură, așadar finisajele normale nu pot fi utilizate la lemnul tratat termic (Vernois 2000).

### **ÎMBĂTRÂNIREA ȘI FINISAREA LEMNULUI TERMOTRATAT**

Lemnul termotratat este foarte sensibil la acțiunea radiațiilor UV, el începând să își modifice culoarea spre o nuanță alb-cenușie chiar și după o expunere de scurtă durată. De aceea, pentru a păstra culoarea originală și a evita apariția microfisurilor pe suprafață, aplicarea unei pelicule de protecție UV ca finisaj este obligatorie și ea trebuie reînnoită la intervale regulate de timp. Cele mai bune rezultate ale tratamentului de suprafață sunt obținute prin utilizarea vopselelor pe bază de uleiuri vegetale (ulei de in, de rapiță etc).

Pentru a preveni modificările de culoare în timp, substanța de finisare trebuie să conțină pigmenți micronizați. Sunt de preferat finisajele transparente, cu pigment într-o nuanță cât mai apropiată de cea a lemnului termotratat (ThermoWood Handbook 2003).



## Capitolul 2

### OBIECTIVELE TEZEI

**Obiectivul general** al prezentei cercetări l-a constituit investigarea proprietăților mecanice și tehnologice ale panourilor reconstituite din lemn masiv, realizate din frize termotratate din lemn de fag, în vederea adaptării unei linii de fabricare a panourilor din lemn masiv de fag (netratat) într-o linie capabilă să realizeze și panouri din elemente termotratate, adecvate utilizării în mediu umed (saune) și exterior (mobilier și amenajări exterioare pentru parcuri, grădină, piscine etc.).

Pornind de la acest obiectiv general, teza a fost structurată pe **trei obiective specifice**, după cum urmează:

- Realizarea unui studiu experimental privind influența termotratării asupra compoziției chimice a lemnului, ca parte de cercetare fundamentală, menită să ofere baza științifică a comportamentului și proprietăților diferite ale panourilor din lemn termotratat față de cele din lemn netratat;
- Studiu teoretic privind tehnologia actuală a fabricării panourilor reconstituite din lemn de fag, ca bază a procesului de adaptare tehnologică a liniei de fabricație;
- Realizarea unor panouri reconstituite din frize termotratate și testarea principalelor proprietăți mecanice și tehnologice ale acestora (rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate, prelucrabilitatea prin frezare, calitatea suprafeței după frezare, comportamentul la încliere și rezistența la forfecare a înclierii, comportamentul la variații de umiditate, absorbția de ulei ca material de finisare), adică a tuturor proprietăților relevante pentru stabilirea regimurilor de lucru și reglarea parametrilor pe linia tehnologică de producție.

Pentru atingerea obiectivelor propuse a fost necesară o abordare interdisciplinară, prin apelarea la cunoștințe din domenii precum: anatomia lemnului, fizica și mecanica lemnului, uscarea și tratarea termică a lemnului, așchiera lemnului, mașini-unelte și scule de prelucrarea lemnului, calitatea suprafețelor lemnoase prelucrate, materiale tehnologice pentru lemn, tehnologii de încliere și finisare a lemnului, dar și din domenii conexe precum: prelucrarea statistică a datelor experimentale, termotehnică, spectrofotometrie ș.a.

Noutatea pe care o oferă prezenta cercetare se referă în principal la testele privind prelucrabilitatea și înclierea lemnului termotratat, având în vedere că adaptarea liniei tehnologice presupune în primul rând înțelegerea diferențelor de comportament ale materialului lemnos termotratat în timpul acestor operații.

Totodată, în urma cercetărilor efectuate s-a creat o bază de date complexă și utilă cu privire la proprietățile lemnului de fag (*Fagus sylvatica* L.) termotratat prin metoda ThermoWood.

# Capitolul 3

## CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND EFECTELE TERMOTRATĂRII ASUPRA CULORII ȘI COMPOZIȚIEI CHIMICE A LEMNULUI DE FAG (*Fagus sylvatica* L.)

### 3.1 Obiectivele cercetării experimentale

Așa cum s-a arătat în capitolul 1 al prezentei teze, este un fapt recunoscut că termotratarea la temperaturi înalte conduce la modificări în compoziția chimică a lemnului, cu influențe pozitive și negative asupra proprietăților fizico-mecanice ale acestuia. În acest context, înțelegerea comportării materialului lemnos termotratat în corelație cu modificările chimice datorate tratamentului de tratare termică aplicat este importantă. Gradul de modificare (pierderea totală de masă), respectiv modificările chimice asociate termotrătării lemnului depind de condițiile concrete de termotratare, incluzând temperatura, durata, compoziția mediului în care are loc termotratarea, cu precădere concentrația oxigenului și umiditatea.

În cadrul prezentei teze de doctorat s-a abordat acest subiect, fără a fi un obiectiv definitoriu, prin prisma evidențierii influenței condițiilor de tratare termică asupra gradului de modificare globală (exprimat prin pierderea de masă), respectiv al modificărilor de culoare și compoziție chimică (relevabile prin investigare FTIR) pentru lemnul de fag (*Fagus sylvatica* L.) aburit, utilizat ca materie primă în obținerea panourilor din lemn termotratat, conform obiectivului primordial al tezei. În mod concret s-a realizat experimental termotratarea lemnului de fag (inițial aburit) în două medii diferite: în mediu de vapori supraîncălziți (procedeu Thermowood, aplicat într-o instalație industrială) și, respectiv, în mediu de aer la presiune atmosferică (aplicat într-o etuvă electrică de laborator) și s-au determinat comparativ pierderile de masă, modificările de culoare și modificările de compoziție chimică relevate prin spectrometrie în infra-roșu (tehnica FTIR).

Această etapă de cercetare, realizată prin colaborare interdisciplinară, a constituit subiectul unei publicații în revista BioResources (Timar *et al.* 2017). În cele ce urmează se prezintă doar rezumativ această etapă, ca mod de lucru, rezultate și concluzii.

### 3.2 Material, metodă și aparatură

#### 3.2.1 Termotratarea. Determinarea pierderii de masa și a ariei relative

Materialul utilizat în cadrul prezentei cercetări a constat în frize din lemn de fag (*Fagus sylvatica* L.) cu dimensiuni 400 x 50 x 38mm.

Frizele au fost aburite ușor la 40...80°C timp de 12h, apoi uscate artificial până la o umiditate de  $7 \pm 2\%$  conform regimului de uscare prezentat în Tabelul 3.2.

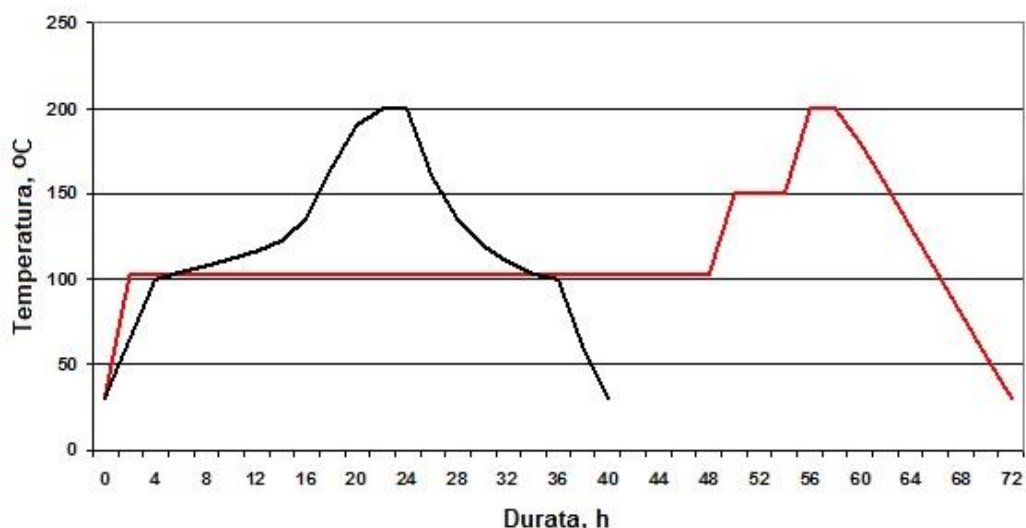
**Regim de uscare aplicat frizelor din lemn de fag după aburire**

Faza	Umiditatea (%)	Temperatura (°C)	Gradientul de uscare
Uscare propriu-zisă	Umiditatea inițială ... 40%	40	2.1
	40% ... 30%	45	2.3
	30% ... 25%	50	2.4
	25% ... 16%	55	2.8
	16% ... 10%	60	3.0
	10% ... 7%	65	3.2
Condiționare	7 ± 2%	60 °C, 10 h	
Răcire	7 ± 2%	30 °C, 2 h	

Probele supuse tratamentului de aburire ușoară au fost codificate M\_S, iar cele martor (din lemn uscat fără a fi fost aburit în prealabil) au fost codificate M.

Jumătate din probele aburite (notate cu HT\_1) au fost termotratate la JF FURNIR Brașov într-o instalație industrială tip TekmaWood (Finlanda) prin procedeul ThermoWood. Diagrama regimului de termotratare este reprezentată cu linie neagră în Fig. 3.1. Presiunea maximă utilizată în acest tratament a fost de 253 Pa.

Cealaltă jumătate de probe (notate cu HT\_2) au fost termotratate în mediu de aer la presiune atmosferică. Într-o etuvă electrică de laborator cu termostat, tip Binder (Germania). Diagrama regimului de termotratare este reprezentată cu linie roșie în Fig. 3.1.



**Fig. 3.1** Diagramele de termotratare utilizate în cercetarea experimentală:  
 linia neagră - tratare în vapori supraîncălziți și vid (HT\_1);  
 linia roșie - tratare în aer la presiune atmosferică. (HT\_2)

Deși mediile de tratare au fost diferite, temperatura (200°C) și durata de tratare (2,5h) au fost aceleași. Cu toate acestea, așa cum se poate observa din regimurile prezentate

comparativ în Tabelul 3.3, au fost diferențe la dinamica de încălzire până la temperatura maximă de 200°C, precum și la durata de răcire și, implicit, la durata totală de tratare.

Tabelul 3.3

**Regimuri de termotratare aplicate frizelor din lemn de fag**

Faza	Parametri (Temperatură / Timp)	
	Procedeul ThermoWood (termotratare în vapori supraîncălziți): HT_1	Termotratare în aer la presiune atmosferică: HT_2
Pre-încălzire / Uscare la stare anhidră	100 °C / 3 h	103 °C / 48 h
Încălzire în profunzime	100 °C...150 °C / 16 h 150 °C...200 °C / 5 h	103 °C...150 °C / 6 h 150 °C...200 °C / 0.5 h
Tratare propriu-zisă	<b>200 °C / 2,5 h</b>	<b>200 °C / 2,5 h</b>
Răcire	200 °C...30 °C / 13,5 h	200 °C...30 °C / 15 h
<b>Durata totală a procesului</b>	<b>40 h</b>	<b>72 h</b>

Importanța timpului total de expunere la temperaturi mai mari de 100°C (încălzirea și tratamentul termic) a fost subliniată de Candelier *et al.* (2015), care a descoperit că cinetica temperaturii în timpul tratamentului termic poate fi utilizată pentru a cuantifica eficiența tratamentului. Aria relativă situată sub curba de temperatură de 100°C din diagrama T= f(t) este un indicator de bază al intensității tratamentului termic. Arii relative mai mari indică pierderi de masă mari și deci o degradare mai severă.

Pornind de la această referință bibliografică, s-au calculat și în cadrul prezentei cercetări ariile relative situate sub curba de temperatură de 100°C din diagramele T= f(t) prezentate în Fig. 3.1, cu intenția verificării corelației între aceste arii și pierderile de masă (PM), determinate prin cântărirea fiecărei probe înainte și după tratamentul termic conform ecuației (3.1):

$$PM = \frac{M_i - M_{TT}}{M_i} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

unde:

M<sub>i</sub> reprezintă masa probei înainte de tratamentul termic (g);

M<sub>TT</sub> - masa aceleiași probe după termotratare (g).

### 3.2.2 Determinarea modificărilor de culoare în urma termotrătării

Culoarea probelor a fost evaluată în sistemul CIE Lab cu un spectrometru Ava-Spec-USB2 (10° lupă standard, sursă iluminare standard D65, Avantes Apeldoorn, Netherlands), echipat cu sferă integrată AVA de diametru 80 mm, interconectată prin fibre optice. Datele au fost procesate cu softul Ava versiunea 7.7.

Deoarece culoarea măsurată a fost uniformă iar spectrele FTIR înregistrate în arii diferite ale secțiunilor transversale au fost similare, măsurătorile de culoare de la suprafața probelor au fost considerate reprezentative pentru probele eșantion.

$$\Delta E = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2} \quad (3.2)$$

unde  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  și  $\Delta b$  reprezintă diferențele de culoare între coordonatele probelor control și ale celor tratate termic.

### 3.2.3 Determinarea modificărilor în compoziția chimică a lemnului de fag în urma termotrării

Pentru a evalua modificările chimice, au fost înregistrate spectrele FTIR (în coordonate unități ATR / număr de undă) atât pe probele tratate termic, cât și pe piesele netratate (probe control). Spectrele IR (FTIR) sunt extrem de utile în caracterizarea compușilor organici, fiind cunoscută desemnarea lor ca "amprente digitale" pentru compușii organici, în sensul că fiecare compus organic are un spectru caracteristic și poate fi identificat după acesta. Totodată, orice modificare a structurii chimice se reflectă în spectrele FTIR.

Alegerea acestei metode a fost motivată de faptul că este o tehnică relativ facilă, rapidă și versatilă, care poate oferi informații valoroase privind apariția unor modificări chimice în urma unor tratamente. Acestea vor fi relevate prin modificarea spectrelor înregistrate: apariția, dispariția sau modificarea intensității unor benzi de absorbție, precum și deplasarea picurilor caracteristice spre numere de undă mai mari sau mai mici.

Deși utile primordial în analiza calitativă (identificare tip de substanțe/ elemente structurale, evidențiere modificări de compoziție ca tipuri de substanțe/elemente structurale), spectrele FTIR pot fi utile și în interpretări semicantitative, deoarece ariile delimitate de benzile de absorbție și linia de bază se corelează direct proporțional cu concentrația substanței/elementului structural în proba de analizat.

O limitare a tehnicii FTIR este limita de detecție, respectiv concentrația minimă a unui compus /element structural în probă pentru evidențiere în spectrele FTIR. Aceasta se consideră a fi 5%. Prin urmare, spectrele FTIR pot pune în evidență schimbări sensibile în structura compușilor chimici principali ai lemnului, dar NU pot evidenția compușii chimici secundari și modificările pe care aceștia le suferă (Tolvay *et al.* 2013). Este important de precizat și faptul că spectrele FTIR pentru lemn sunt extrem de complexe și greu de interpretat deoarece lemnul are o compoziție chimică complexă (compuși chimici principali: celuloză, hemiceluloze, lignină plus compuși chimici secundari, reprezentați de substanțele extractibile) și în structura tuturor acestor compuși organici se regăsesc anumite tipuri de legături /substructuri și grupări funcționale.

Experimental, pentru înregistrarea spectrelor între 4000 și 400  $\text{cm}^{-1}$  s-a utilizat un spectrometru Bruker Alpha (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germania) cu unitate ATR, la o

rezoluție de  $4 \text{ cm}^{-1}$ , fiind realizate 24 scanări. Pentru fiecare tip de probe au fost înregistrate spectre pe trei secțiuni diferite (felii) groase de 5 mm tăiate din frizele de lemn corespunzătoare.

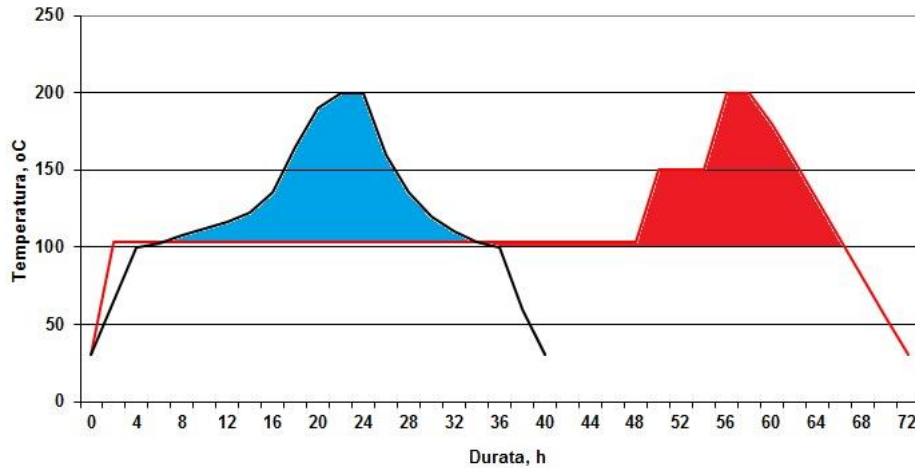
Spectrele medii rezultate ale probelor control și ale celor tratate au fost comparate pentru a vedea diferențele apărute în urma termotrătării. Atribuirea benzilor de absorpție s-a realizat conform literaturii de specialitate (*e.g.* Tolvaj & Faix 1995; Pandey & Vuorinen 2008; Roșu *et al.* 2010). Adicional, au fost integrate arii ale unor benzi de absorpție și au fost calculate câteva rapoarte ale unor vârfuri de absorpție relevante pentru a completa interpretarea rezultatelor. Întregul proces de prelucrare a spectrelor a fost realizat utilizând softul OPUS (Bruker Optik GMBH, Ettlingen, Germania).

### 3.3 Rezultate experimentale și discuții

#### 3.3.1 Pierderea de masă și aria relativă

Pierderea de masă medie a celor 10 probe termotratate prin metoda ThermoWood a fost de  $13,18 \pm 1,36\%$ , în timp ce aceea a probelor tratate în aer a fost de  $4,10 \pm 0,24\%$ , ceea ce arată o pierdere de masă de 3,2 ori mai mare pentru probele tratate în vapori supraîncălziți față de probele tratate în prezența aerului la presiune atmosferică.

Rezultatele obținute în cercetarea curentă cu privire la pierderea de masă mai mică la lemnul tratat în aer la presiune atmosferică pot fi foarte ușor explicate prin această metodă de calcul. Aria relativă sub curba de temperatură în cazul lemnului tratat în abur suprasaturat a fost de  $1415^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ , adică de 2,3 ori mai mare decât pentru lemnul tratat termic la presiune atmosferică, unde aria relativă măsoară  $625^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  (Fig. 3.2).



*Fig. 3.2. Calculul ariei relative conform metodei propuse de Candelier et al. (2015): aria albastră reprezintă termotratarea în vapori supraîncălziți (aria relativă = 1415 °C·h), iar aria roșie reprezintă termotratarea în mediu de aer la presiune atmosferică (aria relativă = 625 °C·h)*

### 3.3.2 Efectele termotrătării asupra culorii lemnului de fag

Modificarea de culoare este un efect important al tratamentelor termice, cu un impact pozitiv asupra consumatorilor și pieței.

Analiza vizuală a modificărilor de culoare a dezvăluit că aburirea ușoară a fagului determină o modificare ușoară vizibilă de culoare, lemnul căpătând de la nuanța de alb-gălbui o nuanță de roșu deschis, în timp ce termotratarea ulterioară a acestor probe a dus la o modificare majoră de culoare, în maron închis. Probele HT\_1 și HT\_2 termotrătate în două medii distincte (vapori supraîncălziți și respectiv aer) s-au colorat similar, dar mici diferențe au putut fi totuși observate între ele.

Rezultatele măsurătorilor de culoare ale probelor investigate sunt prezentate în Tabelul 3.4. Aceste rezultate au fost în bună concordanță cu percepția vizuală și ceva mai relevante față de evaluarea subiectivă vizuală, fiind în aceleași timp medie a mai multor măsurători (min 3 / probă) și replici (3 repetări).

**Rezultatele măsurătorilor de culoare în sistem CIE Lab Color asupra probelor din lemn de fag (*Fagus sylvatica* L.) (valori medii și medii pătratice) și determinarea diferențelor de culoare față de proba martor**

Coordonata de culoare	Epruveta				Modificarea de culoare		
	Control M	Aburită M_S	Termo- tratăată HT_1	Termo- tratăată HT_2	Aburire față de control M_S – M	Termotratate față de control	
						HT_1 - M_S	HT_2 - M_S
$L^*$	72.34 (1.09)	64.76 (0.78)	43.47 (1.71)	44.65 (2.07)	-7.58	-21.29	-22.50
$a^*$	6.92 (0.26)	11.99 (0.41)	7.90 (0.74)	7.78 (0.48)	5.07	-4.09	-4.21
$b^*$	15.13 (0.38)	20.81 (0.80)	12.63 (1.34)	13.39 (2.34)	5.68	-8.18	-7.42
<b>Diferența de culoare <math>\Delta E</math></b>					<b>10.75</b>	<b>23.17</b>	<b>21.84</b>

Datele de la măsurătorile de culoare arată că aburirea a condus la scăderea luminozității ( $\Delta L = -7,58$ ) și o deplasare în spațiul de culoare către roșu ( $\Delta a^* = +5,07$ ) și respectiv către galben ( $\Delta b^* = +5,68$ ). Modificarea totală de culoare ca urmare a aburirii ușoare a fost exprimată prin valoarea  $\Delta E = 10,75$ , ceea ce înseamnă o modificare mare de culoare față de probele martor.

Termotratarea ulterioară a dus în mod vizibil la modificări mai mari de culoare sub influența tratamentului aplicat. La tratamentul termic HT\_1 (procedeul ThermoWood în vapori supraîncălziți) a existat o scădere clară a luminozității ( $\Delta L = -21,29$ ) precum și o scădere a nuanței de roșu ( $\Delta a^* = -4,09$ ) și o scădere importantă a nuanței de galben ( $\Delta b^* = -8,18$ ), diferența totală de culoare  $\Delta E$  fiind de 23,17.

Față de probele martor de fag neaburit, în urma tratamentului HT\_1 nuanța de roșu a crescut, în timp ce aceea de galben a scăzut.

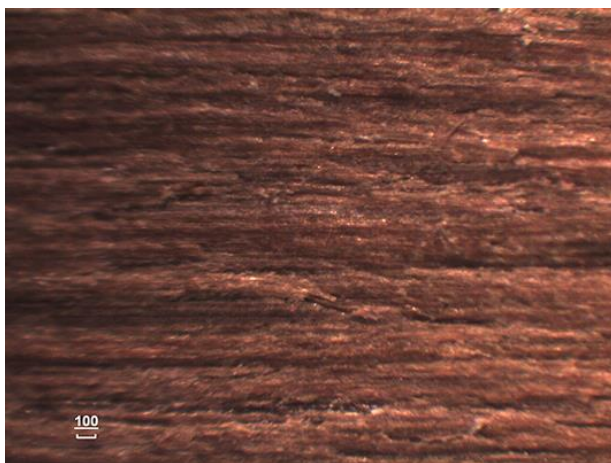
La tratamentul termic HT\_2, scăderea luminozității ( $\Delta L^* = -22,50$ ) și a nuanței de roșu ( $\Delta a^* = -4,21$ ) au avut valori ușor diferite față de cele de la tratamentul termic HT\_1. Per total, termotratarea lemnului de fag aburit realizat prin procedeul HT\_2 a dus la o modificare totală de culoare  $\Delta E$  de 21,84, valoare apropiată de cea obținută în urma primului procedeu (o diferență de doar 1,33 unități).



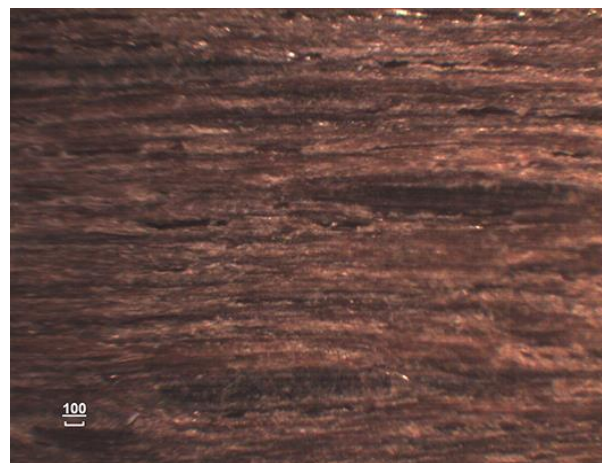
Evoluția culorii în timpul tratamentului termic a fost utilizată pentru a clasifica lemnul tratat, deoarece există corelații importante între valorile  $\Delta E$  și intensitatea tratamentului, pierderea de masă și procedeul termic utilizat. Cu toate acestea, nu se poate vorbi de o corelație matematică care să permit determinarea pierderii de masă în funcție de modificarea de culoare înregistrată sau invers. Aceasta, deoarece mediul de tratare are o influență decisivă asupra modificării de compoziție chimică și implicit a culorii și pierderii de masă. Astfel de exemplu, în timpul termotratării în mediu cu oxigen sunt accelerate anumite modificări chimice cum ar fi degradarea poliozelor (Gerardin 2015). Se poate explica astfel de ce în cercetarea curentă au fost obținute diferențe de culoare asemănătoare în urma celor două tratamente termice în medii diferite, deși diferențele de pierdere de masă au fost evident mari. Tratamentul termic în prezența aerului (HT\_2) cu o pierdere de masă de 4% a rezultat într-o modificare de culoare ( $\Delta E = 21,84$ ), valoare cu puțin doar mai mică decât cea obținută în urma tratamentului termic în vapori supraîncălziți, în absența oxigenului ( $\Delta E = 23,17$ ), soldată însă cu o pierdere de masă mult mai mare, de 18%.

Prezența aerului în timpul celui de-al doilea tratament termic a dus foarte probabil la o accentuare a degradării hemicelulozei și celulozei amorfe (Hill 2006) și la reacții de deshidratare ce duc la formarea de material carbonifer în structura lemnoasă (Nguila *et al.* 2007 citați de Gerardin 2015). Este posibil ca această degradare să fi contribuit la accentuarea închiderii culorii probelor cu pierdere de masă mică.

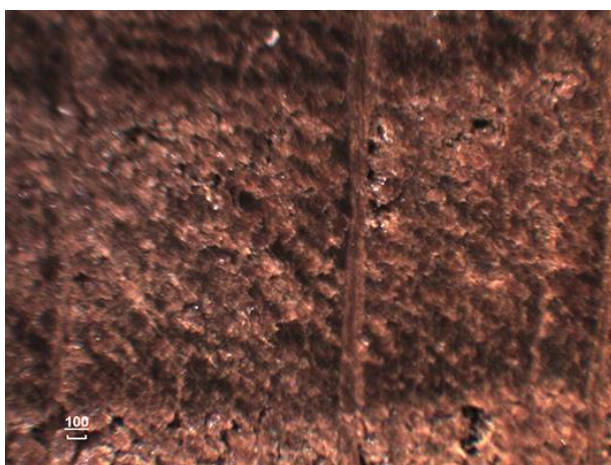
Investigarea microscopică a probelor tratate termic pare să confirme această ipoteză (Fig. 3.3). Astfel incluziuni mai închise la culoare cu un aspect carbonizat și proprietăți reflexive au fost identificate în număr mai mare pe suprafața probelor de fag tratate în prezența aerului (HT\_2) față de cele tratate în vapori supraîncălziți (HT\_1). La contactul cu oxigenul, vaporii acționează ca o pătură protectivă pe suprafețele lemnului (Hill 2006). Mai mult, pe secțiunile transversale ale probelor tratate cu HT\_2 față de cele tratate cu HT\_1 a fost vizibil un contrast mult mai evident între lemnul târziu și lemnul timpuriu (atât la nivel macro- cât și microscopic).



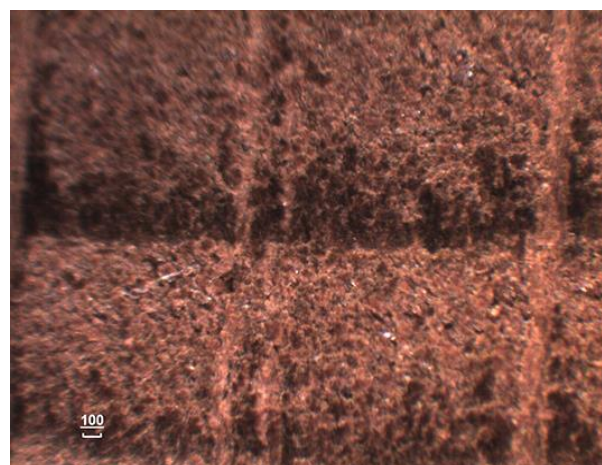
HT1 – suprafață (30X)



HT2 – suprafață (30X)



HT1 – secțiune transversală (30X)



HT2 – secțiune transversală (30X)

*Fig. 3.3. Compararea, cu ajutorul unui stereo-microscop, a aspectului cromatic al pieselor de fag, termotratate în vapori supraîncălziți (HT\_1) și respectiv în mediu de aer, la presiune atmosferică (HT\_2)*

### 3.3.3 Efectele termotrării asupra compoziției chimice a lemnului de fag

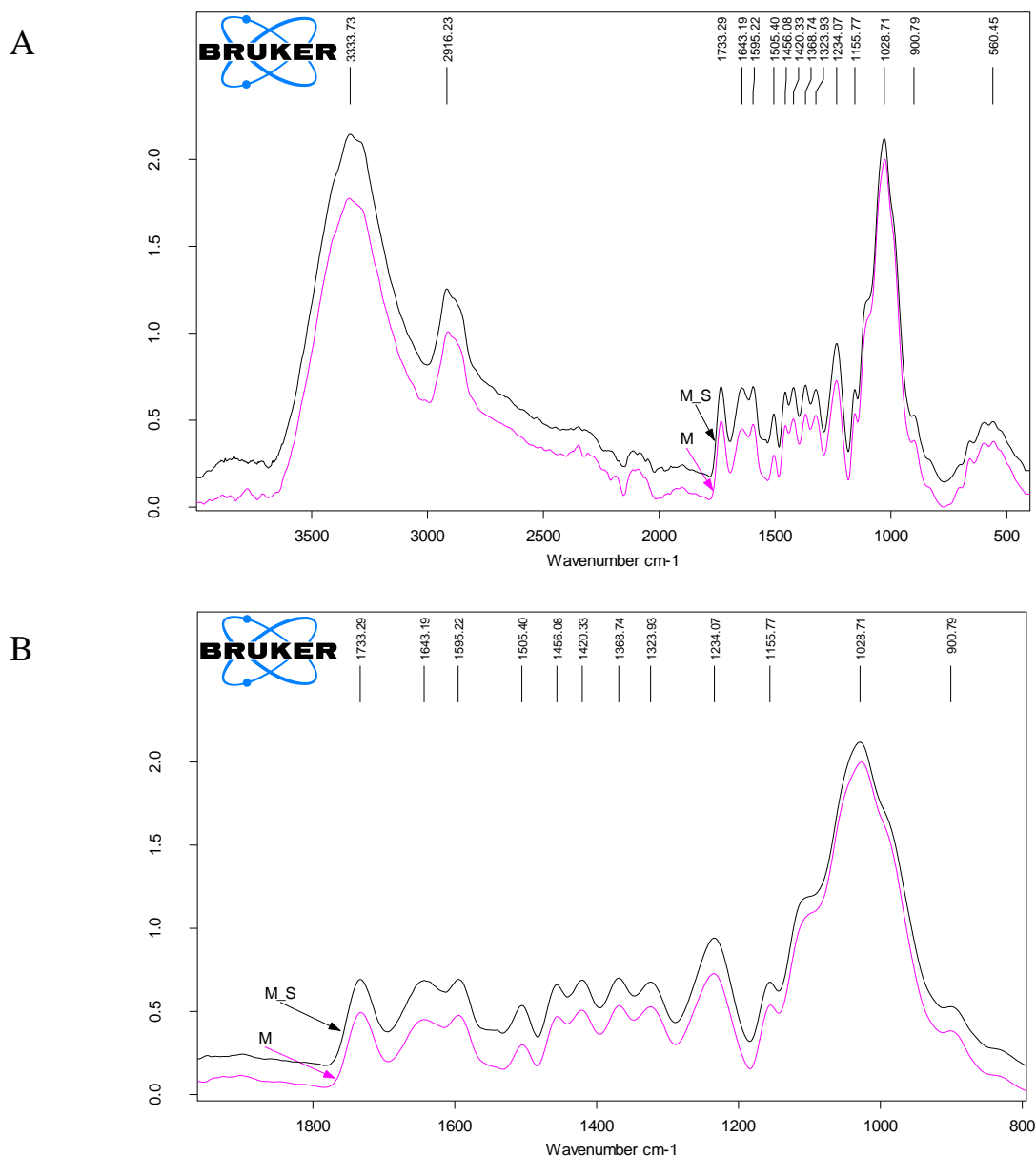
Spectrele probelor investigate sunt prezentate în Fig. 3.4 și 3.5. Doar pentru probele control și cele de fag aburit au fost prezentate spectre pe întregul domeniu de numere de undă 4000 to 400  $\text{cm}^{-1}$  (Fig. 3.4). Pentru celelalte probe sunt prezente spectre în regiunea 1800 to 800  $\text{cm}^{-1}$ , această zonă reprezentând zona de amprentă digitală, în care se observă particularitățile structurale specifice compușilor chimici principali ai lemnului, precum și ușoare modificări asociate tratamentelor aplicate.

Analiza spectrelor rezultă că aburirea lemnului de fag în condițiile blânde din procesul aplicat, conduce doar la modificări minore, greu de evidențiat.

Tratarea termică (200°C/ 2.5 ore) a probelor de fag aburite a condus însă la modificări clar vizibile în spectrele FTIR (Fig. 3.5). În cazul termotrării în mediu de vapori supraîncălziți (HT\_1), cele mai evidente modificări au constat într-o scădere semnificativă a benzii de

absorbție a grupărilor conjugate de carbonil  $1643\text{cm}^{-1}$  și o creștere ușoară a benzilor de absorbție a ligninei la  $1506$  și  $1595\text{ cm}^{-1}$ .

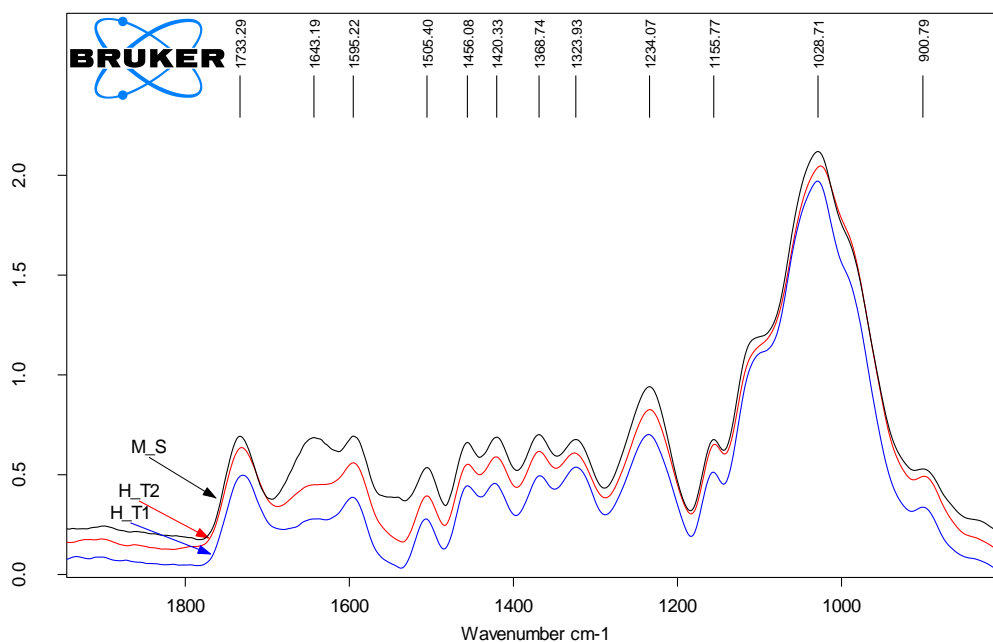
Modificări similare ale spectrelor FTIR au fost înregistrate și în cazul lemnului tratat termic în prezența aerului în etuva de laborator (HT\_2), deși intensitatea acestor modificări a fost diferită, după cum se poate observa din spectrele suprapuse din Fig. 3.5.



**Fig. 3.4. Compararea spectrelor obținute la proba control (M) și la cea de fag ușor aburit (M\_S).**

**A - interval total de înregistrare ( $4000 \dots 400\text{ cm}^{-1}$ );**

**B - regiunea amprentă ( $1800 \dots 800\text{ cm}^{-1}$ )**



**Fig. 3.5. Compararea spectrelor obținute la proba de fag aburit (M\_S), aburit și termotratat în mediu de vapori supraîncălziți (HT\_1), respectiv aburit și termotratat în aer, la presiune atmosferică (HT\_2), în regiunea amprentă 1800 to 800 cm<sup>-1</sup>.**

### 3.4 Concluzii

Cercetările experimentale cu privire la influența termotrătării asupra culorii și compoziției chimice a lemnului de fag au condus la următoarele concluzii:

1. Aburirea ușoară cauzează mici modificări de culoare (trecerea de la nuanța deschisă, alb-gălbuie la o nuanță pală de roșu), însă schimbările în spectrele FTIR au fost minore și foarte dificil de observat direct. Acestea au fost sesizabile numai prin calculul rapoartelor benzilor de absorpție relevante. Astfel, acestea sugerează doar o hidrolizare ușoară a hemicelulozelor (evidențiate în principal prin banda de la 1730 cm<sup>-1</sup> datorită grupărilor acetil conținute, respectiv ușoara scăderea a raportului A1730 /A1370 hemiceluloze/holoceluloză); modificările minore se explică prin temperatura de max. 80 °C aplicată în timpul aburirii.
2. Pierderile de masă înregistrate în urma celor două metode de termotrătare au avut un raport de 3,2 (cu valori de 13,18% la tratamentul termic în vapori supraîncălziți și respectiv 4,10% la cel în aer la presiune atmosferică), deși temperatura și durata tratamentului termic au fost aceleași (200 °C/ 2,5 h). Acest fapt poate fi corelat cu cinetica diferită de încălzire (durata în care temperatura a crescut de la 100 la 200 °C) și ariile relative diferite în unități temperatură×timp, respectiv [C × h], delimitate în diagramele de tratare la temperaturi peste 100 °C, după cum au propus Candelier ș.a (2015). Durata de încălzire a fost de 3,2 ori mai mare în cazul tratamentului termic în vapori supraîncălziți (21 h) față de tratamentul în aer la presiune atmosferică (6,5 h),

în timp ce ariile relative ale celor două metode au fost de 1425 °C×h și respectiv 625 °C×h, ceea ce corespunde unui raport de 2,3/1.

3. Ambele tratamente termice au dus la modificări de culoare sesizabile și comparabile ( $\Delta E = 23,17$  și respectiv 21,84). Prezența aerului în al doilea procedeu este posibil să fi cauzat o închidere accentuată a culorii probelor (prin reacții specifice, incluzând procese de oxidare dar și posibile carbonizări) deși pierderile de masă au avut valori mai mici. Investigarea microscopică a indicat prezența incluziunilor carbonzate pe suprafața probelor tratate termic în prezența oxigenului.
4. Ambele tratamente termice au cauzat modificări vizibile în spectrele FTIR, ceva mai avansate la probele tratate termic care au avut pierdere de masă mai mare (tratament HT\_1 în vapori supraîncălziți). Cele mai evidente modificări au constat în scăderea benzilor de absorbție de carbonil neconjugat la 1643  $\text{cm}^{-1}$  și o creștere ușoară a benzilor de absorbție ale ligninei 1506 și 1595  $\text{cm}^{-1}$ .
5. Modificările chimice au fost mai bine evidențiate de rapoartele benzilor de absorbție relevante. Valoarea acestor rapoarte sugerează o scădere a conținutului de carbohidrați (holoceluloză) și apariția efectelor oxidative (creșterea raportului A1730/A1370), ducând la o creștere relativă a conținutului de lignină raportat la holoceluloză (creștere raport A1506/A1370), o condensare mai avansată a acesteia (creștere raport A1730/A1643) și, respectiv, un raport relativ redus dintre compușii hidrofili/hidrofobi (scădere raport A3340/A1506).

O sinteză comparativă a rezultatelor obținute în cadrul cercetărilor experimentale prezentate în acest capitol al tezei se regăsește în Tabelul 3.8.

*Tabelul 3.8*

***Sinteză comparativă a rezultatelor obținute cu privire la pierderea de masă (PM), aria relativă, (AR), modificarea de culoare ( $\Delta E$ ) și rapoartele benzilor de absorbție relevante (A1506 /A1370 și A3340 /A1506)***

Tratament	AR, °C·h	PM, %	$\Delta E$	A1506 / A1370	A3340 / A1506
HT_1 (JFF)	1415	13,18	23,17	1,96	86,26
HT_2 (lab)	625	4,10	21,84	1,54	96,99

Se observă clar concordanța între indicatorii analizați: termotratarea în regim industrial (HT\_1) a fost mai eficientă, fapt evidențiat de aria relativă mai mare sub curba temperaturii de 100°C, pierderea de masă mai mare, închiderea mai pronunțată a culorii ( $\Delta E$  mai mare), raport mai mare între lignină și holoceluloză (care caracterizează gradul de afectare a hemicelulozelor) și raport mai mic între hidroxil și lignină (indicând caracterul mai hidrofob al suportului lemnos termotratat prin procedeul HT\_1).

## Capitolul 4

# TEHNOLOGIA FABRICĂRII PANOURILOR RECONSTITUITE DIN LEMN MASIV DE FAG

### 4.1 Prezentarea fluxului tehnologic de fabricație a panourilor reconstituite din lemn masiv de fag netratat

Panourile reconstituite din lemn masiv au ca și caracteristică de bază valorificarea lemnului de mici dimensiuni în produse de tip panou. Aceste produse păstrează avantajele lemnului masiv ca materie primă (estetica, rezistențele mecanice, caracterul ecologic), dar totodată extind domeniul de utilizare al acestuia prin lărgirea paletei dimensionale.

Comparativ cu panourile din aşchii sau fibre de lemn (PAL, OSB, PFL, MDF ș.a.), care au dimensiuni similare, panourile din lemn masiv sunt mai ușoare, mai rezistente la încovoiere și, mai ales, păstrează textura lemnului pe canturi și suprafețe, nefiind necesară în acest caz furniruirea, cașerarea sau acoperirea cu alte folii de înnobilare.

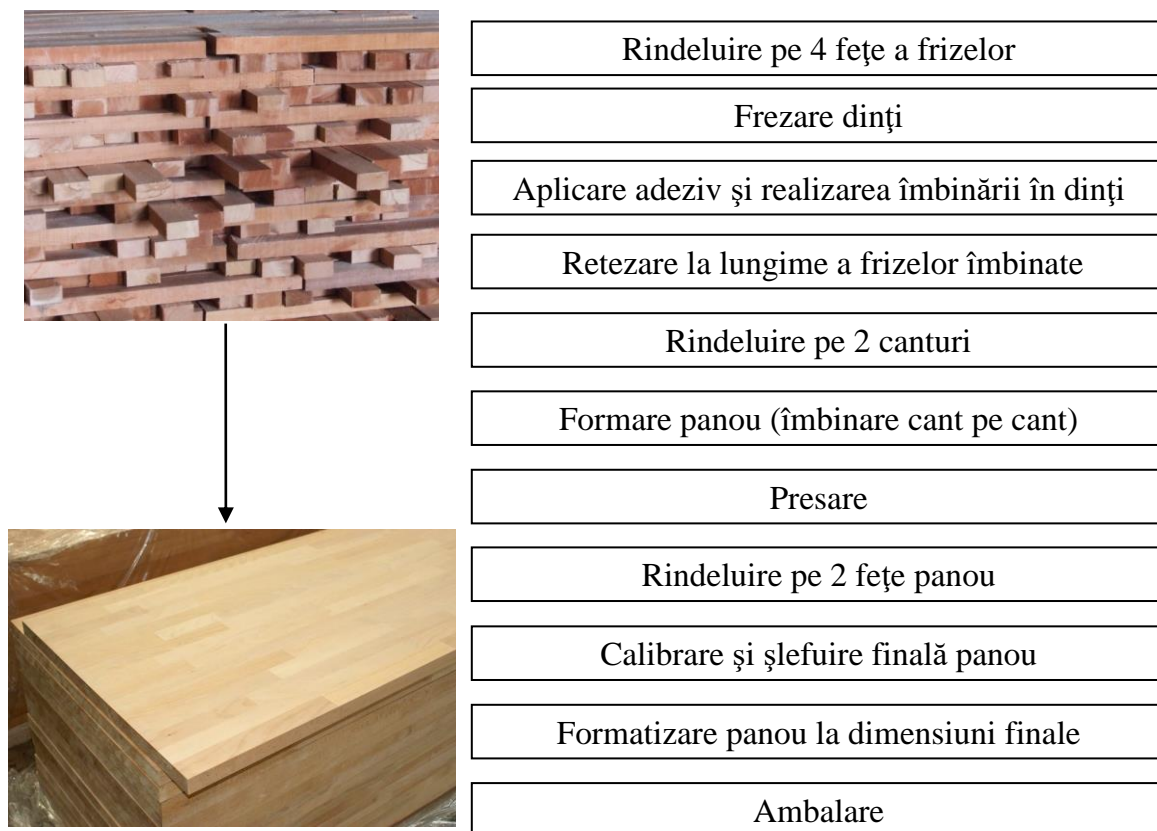
Fabricarea panourilor din lemn masiv presupune în primul rând obținerea frizelor. Acestea se debitează din cheresteaua în stare verde, lipsită de crăpături găuri de insecte, putregai, mucegai etc. În cazul frizelor din lemn de fag, acestea se debitează la dimensiunile brute de 30 x 55 x 320mm, ținând cont de supradimensiunile necesare pentru contragerea din timpul uscării și de adaosurile necesare formatizării, astfel încât în momentul realizării panourilor ele să ajungă la dimensiunile 25 x 50 x 300 mm.

Sunt admise piesele cu noduri sănătoase, izolate, cu diametru de maxim 5mm și inima roșie, în proporție de maxim 50%. Nu sunt admise: piesele cu noduri străpunse, pe cant, putrezite; piesele cu coajă, coajă înfundată, inimă stelată; piesele cu găuri de insecte, mucegai, putregai.

Frizele de fag se aburesc mai întâi ușor. Această aburire are ca scop principal detensionarea materialului înaintea uscării. Lemnul aburit este mai puțin predispus la crăpare și se usucă cu mai puține defecte decât lemnul neaburit. În afara asigurării acestui scop principal, prin aburire se obține și uniformizarea culorii, distrugerea agenților biologici (ciuperci, insecte) existenți în lemn, în orice fază de dezvoltare a acestora, precum și blocarea fenomenului de încindere și răscoacere (Marinescu 1980).

După depozitarea timp de cca. 1 săptămână pentru răcirea definitivă și detensionare, se face controlul calitativ al frizelor. În afara conformității umidității finale, se mai verifică proporția și gravitatea crăpăturilor și deformațiilor, piesele neconforme fiind eliminate. Nu se admit piesele cu crăpături la capete sau pe suprafață și nici piesele care prezintă teșituri, curburi, ondulări sau alte abateri de la forma prismatică.

În continuare, frizele intră pe linia de prelucrare a panourilor reconstituite, a cărei schemă logică este prezentată în Fig. 4.3.



**Fig. 4.3 Schema tehnologică de fabricare a panourilor reconstituite din lemn masiv.**

Utilajele utilizate în cazul liniei de fabricare a panourilor reconstituite din frize de fag de la fabrica MASSIFPANEL Făgăraș, precum și parametrii de lucru corespunzători fiecărei operații sunt prezentați sintetic în Tabelul 4.3.

*Tabelul 4.3*

***Mașini-unelte, scule și regimuri de prelucrare aplicate la SC MASSIFPANEL SRL pe linia de fabricare a panourilor reconstituite din frize de fag***

Operația de prelucrare	Mașina	Scula	Regim de prelucrare ( $n$ -turația sculei; $u$ -viteza de avans)
Rindeluire pe 4 fețe frize	SHENKO tip SKG-2306H/5	Cap de frezat $\phi 125$ , B118, alezaj $\phi 40$ , cu plăcuțe amovibile 30 x 12 x 1,5mm	$n = 4000$ rpm $u = 16-20$ m/min
Frezare dinți (numărul de dinți se stabilește în funcție de grosimea piesei; la 25mm: 2-3 dinți)	HS 120 li, FINGER JOINT (WEINIG)	Freze pereche (mamă/tată) $\phi 250$ , alezaj $\phi 70$ , grosime 4mm, pas 3,8	$n = 4343$ rpm $u = 24$ m/min

Aplicare adeziv pe dinți	HS 120 li, FINGER JOINT (WEINIG)	Valț dedicat	Adeziv pe bază de apă (D3), monocomponent DORUS 076/26S (HENKEL), amestecat cu întăritor R397 devine D4. Consum specific de adeziv: 150 g/m <sup>2</sup>
Retezare la lungime a frizelor îmbinate, pre-presare	HS 120 li, FINGER JOINT (WEINIG)	Pânză circulară de retezat $\Phi$ 400 x $\Phi$ 30, z=120, B=3,2	n = 2850 rpm
Rindeluire pe 2 fețe	SHENKO tip SKG-2306H/5	Cap de frezat $\phi$ 125, B118, alezaj $\phi$ 40, cu plăcuțe amovibile 30 x 12 x 1,5mm	n = 4000 rpm u = 16-20 m/min
Formare panou (îmbinare cant pe cant)		Cu valț cilindric	Adeziv AQUENCE KL 730 (D3)(HENKEL) Consum specific de adeziv: 180-200 g/m <sup>2</sup> Presare la rece (18-20°C) timp de 20'
Rindeluire panou pe 2 fețe	HOLYTEK Hk-760	Arbore port-cuțite z=6, cuțite cu plăcuțe amovibile 15x15x2,5, B=750mm	n = 4730 rpm u = 11 m/min
Calibrare panou	BOARKE BKM-52RRKL	Hârtie abrazivă, 3 cilindri cu granulații/materiale abrazive diferite: I - granulație 80, zirconiu II - granulație 100, zirconiu III – granulație 120 sau 150, oxid de Al	u = 10 m/min
Formatizare panou	WIGO (la lungime) + IMA SBDK MF 20229 (la latime)	Pânză circulară $\phi$ 250, Z80, b=3,2	n= 7000 rpm, u =15,5 m/min



## 4.2 Concluzii

Cunoașterea tehnologiei de fabricație existente constituie o premisă importantă, având în vedere că obiectivul principal al tezei este evaluarea posibilității de adaptare a tehnologiei existente la prelucrarea frizelor termotratate și realizarea unor panouri reconstituite din acestea. Totodată, ea a fost necesară în vederea stabilirii metodologiei cercetărilor experimentale din cadrul tezei de doctorat, astfel încât acestea să se desfășoare într-o cronologie logică și fluentă.

Tehnologia prezentată schematic în Fig. 4.3 arată două segmente distincte de prelucrare:

- (1) – prelucrarea frizelor (care implică operații de frezare și încliere);
- (2) – prelucrarea panourilor (care implică operații de rindeluire, calibrare & șlefuire și, în final, formatizare).

Faptul că materialul nou propus (lemnul termotratat) are o compoziție chimică modificată, așa cum s-a arătat în cadrul cap. 3, este de așteptat ca și proprietățile sale fizice, mecanice și tehnologice să fie diferite, iar comportamentul acestui material în cadrul a două operațiilor-cheie ale fluxului tehnologic (frezarea și înclierea) să fie diferit față de cel al lemnului netratat.

De aceea, cercetările experimentale prezentate în cadrul următorului capitol au vizat analiza comparativă a prelucrabilității și înclierii lemnului termotratat de fag față de cel netratat, pentru a stabili dacă și în ce fel este necesară modificarea unor parametri de regim pentru adaptarea actualei linii tehnologice la producția de serie a panourilor din lemn termotratat.

## Capitolul 5

### CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND PROPRIETĂȚILE MECANICE ȘI TEHNOLOGICE ALE PANOURILOR RECONSTITUITE DIN FRIZE TERMOTRATATE DIN LEMN DE FAG COMPARATIV CU PANOURILE DIN FRIZE NETRATATE

#### 5.1 Obiectivele cercetării experimentale

Cercetările efectuate în cadrul prezentei teze de doctorat cu panouri realizate din frize termotratate de fag (*Fagus sylvatica* L.) au urmărit determinarea acelor proprietăți mecanice și tehnologice ale lemnului termotratat și ale panourilor realizate din lemn termotratat, care sunt esențiale în luarea unei decizii asupra posibilității de utilizare a tehnologiei existente (cea de fabricare a panourilor reconstituite din lemn de fag netratat, doar uscat) pentru realizarea aceluiași produs final, dar din alt material, respectiv folosind frize termotratate.

În acest scop, s-au efectuat:

- teste de prelucrare mecanică prin rindeluire a frizelor termotratate pentru a investiga influența regimului de termotratare (și a pierderii de masă aferente) asupra puterii de așchiere a frizelor termotratate;
- teste de prelucrare mecanică prin frezare a frizelor termotratate, aplicând diferite regimuri de prelucrare (turație / viteză de avans / adâncime de așchiere) a frizelor termotratate, pentru a determina regimul optim în cazul lemnului termotratat, comparativ cu cel netratat, criteriile de optimizare considerate fiind puterea consumată și calitatea (rugozitatea) suprafeței obținute;
- teste privind rezistența și modulul de elasticitate la încovoiere statică a panourilor realizate din lemn termotratat;
- teste de determinare a rezistenței încheierii la panouri realizate din lemn termotratat;
- teste privind modificările dimensionale după supunerea la variații de umiditate relativă a panourilor realizate din lemn termotratat;
- teste privind absorbția de ulei (ca material de finisare) a panourilor realizate din lemn termotratat.

## 5.2 Teste privind prelucrabilitatea lemnului termotratat de fag

Prelucrabilitatea lemnului se referă la comportamentul lemnului în timpul procesării sale mecanice (prin ferăstruire, rindeluire, frezare, găurire, strunjire, șlefuire), precum și la calitatea suprafeței rezultate. Prin urmare, prelucrabilitatea prin oricare dintre operațiile mecanice menționate mai sus poate fi exprimată prin doi parametri principali:

- puterea de așchiere ( $P$ ), care reprezintă cantitatea de energie consumată pentru prelucrarea materialului:

$$P = P_t - P_o \quad (5.1)$$

unde:  $P_t$  este puterea totală utilizată de motorul electric în timpul prelucrării, în kW;

$P_o$  - puterea consumată de motorul electric în timpul funcționării în gol, în kW și

- calitatea suprafeței exprimată prin parametrii de rugozitate recomandați în standardele de specialitate pentru lemn masiv, cum ar fi ISO 4287 (1997) și ISO 13565-2 (1996).

### 5.2.1 Influența termotratării asupra prelucrabilității prin rindeluire

#### 5.2.1.1 Metodă, material, aparatură

În această cercetare s-au utilizat 42 de frize din lemn de fag (*Fagus sylvatica* L.) cu o densitate inițială de  $704,1 \pm 10,23 \text{ kg/m}^3$  și dimensiunile de  $400 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ . Un set de 6 frize s-au păstrat netratate pentru a servi drept probe martor. Celelalte frize au fost termotratate într-o etuvă electrică de laborator tip KBF240, cu termostat, fără circulație a aerului, produsă de firma germană Binder. Termotratarea s-a realizat în mediu de aer, la

presiune atmosferică, la 200°C timp de 1, 2, 3, 4, 5 și respectiv 6 ore, folosind un set de 6 probe pentru fiecare durată de tratare.

Pe baza ecuației (5.2), s-a determinat pierderea de masă (PM) după fiecare oră de tratare, în vederea stabilirii, la final, a unei corelații între pierderea de masă și puterea de așchiere.

$$PM = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.2)$$

în care  $m_i$  reprezintă masa inițială a frizei, înainte de termotratare, în g;

$m_f$  – masa frizei după termotratare, în g.

Atât probele termotratare, cât și cele netratate au fost condiționate timp de 4 săptămâni la temperatura de 20°C și umiditatea relativă a aerului de 55% într-o cameră climatică tip KPK 200 produsă de firma germană FEUTRON. În urma acestei condiționări, umiditatea frizelor termotratare s-a stabilizat la valoarea  $5 \pm 0,3\%$ , iar cea a frizelor netratate la  $8 \pm 0,5\%$ .

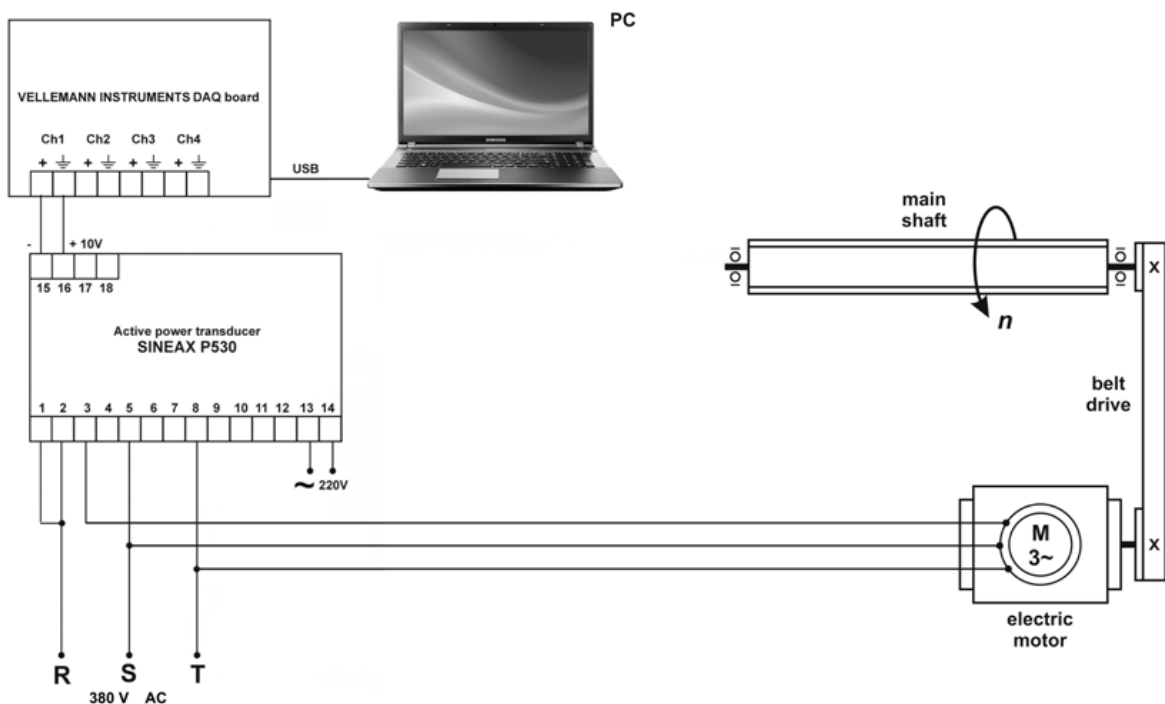
Toate frizele au fost apoi prelucrate prin rindeluire pe o mașină de rindeluit la grosime tip D963 produsă de firma austriacă FELDER, folosind un cap de lucru cilindric "silent power" cu cuțit elicoidal placat cu plăcuțe de wolfram (tungsten carbide)(Fig. 5.1).

Rindeluirea a fost efectuată la o turație a arborelui de lucru  $n = 4567\text{rpm}$  și o viteză de avans  $u = 10\text{m/min}$ . Puterea de așchiere în timpul prelucrării a fost măsurată cu ajutorul unei plăci de achiziție de date VELLEMAN (Belgia), conform schemei prezentate în Fig. 5.2.

În ceea ce privește analiza calității suprafeței, pentru fiecare durată de termotratare, au fost selectate aleatoriu trei probe prelucrate. Calitatea suprafeței a fost măsurată cu ajutorul unui instrument MarSurf XT20 produs de MAHR Göttingen GMBH (Germania), dotat cu un cap de scanare MFW 250 cu posibilitatea de măsurare într-un interval de neregularități de  $\pm 500\ \mu\text{m}$  și un palpator cu raza la vârf de 2 microni și unghi la vârf de  $90^\circ$  (Fig. 5.3), care a măsurat epruvetele cu o viteză de  $0,5\ \text{mm/s}$  și aplicând o forță de scanare scăzută de  $0,7\ \text{mN}$ .



*Fig. 5.1. Mașină de rindeluit la grosime D963 cu arbore de lucru cilindric și cuțite dispuse elicoidal, tip „silent power”.*



*Fig. 5.2. Stand de măsurare a puterii de aşchiere la rindeluire.*



*Fig. 5.3. Echipament MarSurf XT20 pentru determinarea rugozității suprafeței prelucrate.*

### 5.2.1.2 Rezultate experimentale și discuții privind puterea de aşchiere la rindeluire

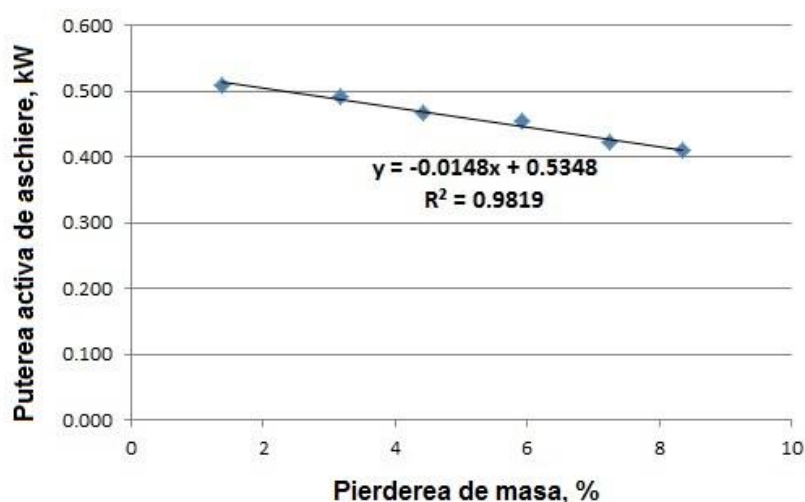
Rezultatele privind puterea de aşchiere pentru lemnul netratat și termotratat, în funcție de durata tratamentului sunt prezentate în Tabelul 5.2. Toate valorile de putere înregistrate în timpul prelucrării lemnului termotratat au fost mai scăzute decât în cazul probelor netratate, ceea ce era de așteptat, având în vedere pierderea de masă (și reducerea forței asociate) în

urma tratamentului termic, în special la tratarea cu durată de peste 3 ore (și o pierdere de masă > 4%). Corelația dintre puterea de tăiere la rindeluire și pierderea de masă a lemnului termotratat de fag este reprezentată de o funcție liniară negativă, cu  $R^2 = 0,98$  (Fig. 5.6).

Tabelul 5.2

**Puterea de așchiere în funcție de durata termotrării**

Durata de termotratare, h	Puterea de așchiere (valoarea medie $\pm$ abaterea medie pătratică), kW
Netratat	0,767 $\pm$ 0,08
1	0,510 $\pm$ 0,07
2	0,493 $\pm$ 0,08
3	0,468 $\pm$ 0,08
4	0,455 $\pm$ 0,08
5	0,423 $\pm$ 0,06
6	0,410 $\pm$ 0,07



**Fig. 5.6 Funcția de dependență între puterea de așchiere la rindeluire și pierderea de masă (PM) pentru lemn termotratat de fag.**

Conform rezultatelor obținute, puterea de așchiere scade cu cât regimul de termotratare este mai dur, respectiv cu creșterea pierderii de masă. În cazul analizat, puterea de așchiere la rindeluirea lemnului de fag termotratat timp de 6 ore la 200°C a fost cu 47% mai scăzută decât pentru lemnul netratat.

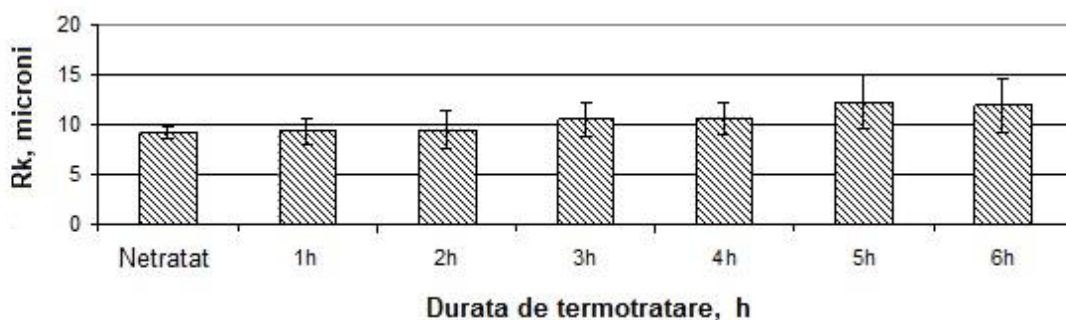
**5.2.1.3 Rezultate experimentale și discuții privind calitatea suprafeței după rindeluire**

Valorile medii și abaterile lor standard pentru parametrul  $R_k$  măsurat în lungul fibrei sunt prezentate în Tabelul 5.3 și Fig. 5.14, a și b. Tabelul 5.3 conține, de asemenea, analiza statistică prin testul Duncan.

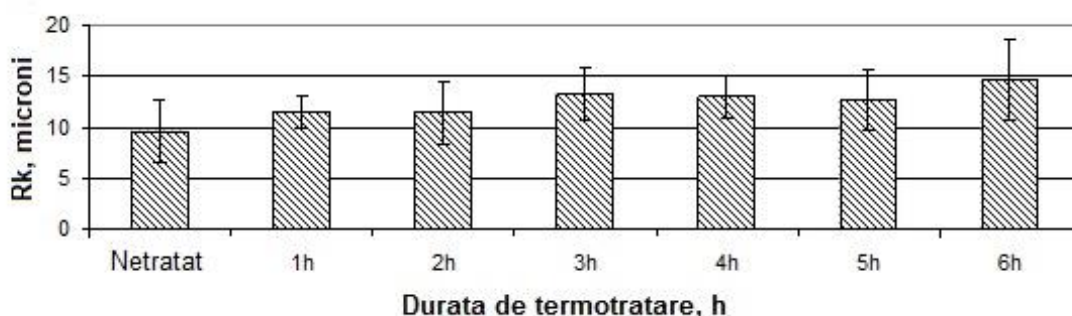
*Parametrul de rugozitate  $R_k$  (în microni), măsurat în lungul fibrelor și perpendicular pe fibre, după rindeluirea pieselor de lemn de fag netratat și respectiv termotratat în aer la presiune atmosferică, la temperatura de 200 °C*

		Netratat	Termotratat la 200 °C timp de:					
			1h	2h	3h	4h	5h	6h
$R_k$ perpendicular pe fibre	media	9,2 A	9,3 A	9,5 A	10,6 AB	10,6 AB	12,3 B	12,3 B
	abaterea medie pătratică	0,63	1,23	1,86	1,73	1,68	2,65	2,63
$R_k$ în lungul fibrelor	media	9,5 A	11,5 AB	11,4 AB	13,2 AB	13 AB	12,6 AB	14,6 B
	abaterea medie pătratică	3,08	1,61	2,98	2,67	2,06	2,84	4,03

*Notă: valorile cu aceeași literă nu diferă semnificativ.*



*a.*



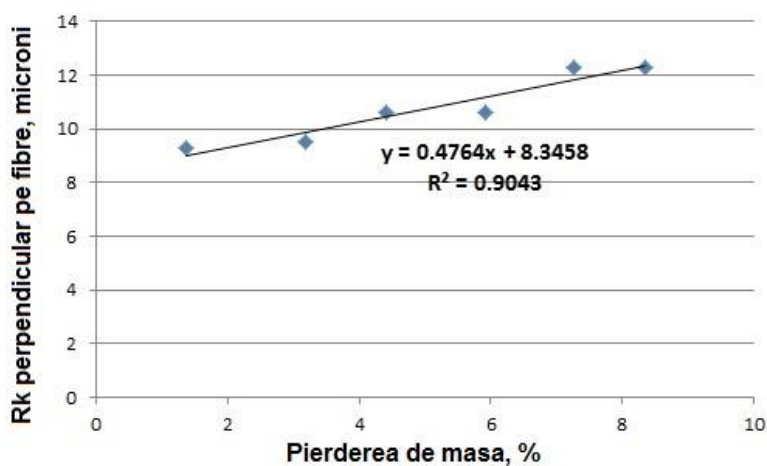
*b.*

*Fig. 5.14. Variația rugozității de prelucrare (exprimată prin parametrul  $R_k$ ) pe suprafețe rindeluite din lemn de fag, în funcție de durata termotraterii. Măsurători efectuate: a - perpendicular pe fibrele lemnului (perpendicular pe direcția de avans) și respectiv: b - în lungul fibrelor lemnului (pe direcția de avans).*

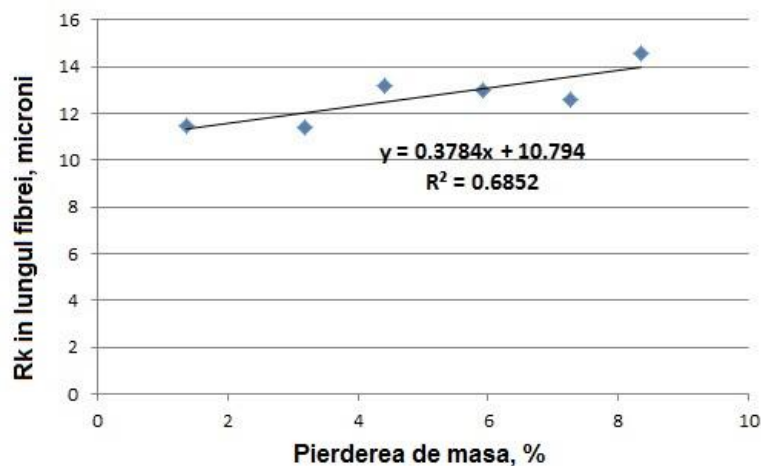
Din Tabelul 5.3 și Fig. 5.14, a se observă că tratarea lemnului de fag timp de 1 h și 2 h a avut un efect neglijabil asupra rugozității de prelucrare măsurată prin  $R_k$  perpendicular pe fibre. La lemnul termotratat timp de 3 h și 4 h,  $R_{k\perp}$  a crescut treptat cu până la 15% și apoi cu până la 33% pentru fagul termotratat timp de 5 ore și 6 ore. Semnificația acestor rezultate a fost testată și confirmată prin testul ANOVA și Duncan la un nivel de semnificație  $p < 0,05$  (Tabelul 5.3).

Referitor la valorile  $R_k$  măsurate în lungul fibrei (Tabel 5.3 și Fig. 5.14, b), se observă că acestea sunt mai mari, atât la lemnul netratat cât și la cel termotratat. Creșterea maximă, obținută la lemnul termotratat timp de 6h este semnificativă, cu 53% față de lemnul netratat.

Funcția de corelație dintre rugozitatea de prelucrare după rindeluire ( $R_{k\perp}$  și respectiv  $R_{k\parallel}$ ) și pierderea de masă, ambele fiind rezultatul diferitelor durate de tratare termică a lemnului, sunt prezentate în Fig. 5.15.



a.



b.

*Fig. 5.15. Variația rugozității de prelucrare (exprimată prin parametrul  $R_k$ ), în funcție de pierderea de masă: a -  $R_k$  măsurat perpendicular pe fibre; b -  $R_k$  măsurat în lungul fibrelor.*

Rk măsurată perpendicular pe direcția de prelucrare a avut o corelație puternică cu pierderea de masă ( $R^2 = 0,9$ ), comparativ cu același parametru măsurat de-a lungul fibrei ( $R^2 = 0,68$ ). Aceasta confirmă faptul că măsurătorile efectuate pe direcția de avans la rindeluire au fost mai sensibile la modificările cauzate de durata tratamentului termic. De asemenea, se poate observa că o creștere a pierderii de masă, care este asociată cu o scădere a densității, a avut un efect direct asupra rugozității de prelucrare, care a crescut. Acest lucru arată că scula tăietoare lasă urme mai adânci pe lemnul mai puțin dens. Această observație este în acord cu observațiile anterioare ale lui Gurău *et al.* (2012) privind faptul că densitatea speciilor joacă un rol mult mai important în rugozitatea suprafeței decât anatomia speciilor și că parametrul Rk are o corelație puternică cu densitatea materialului. Rezultatele cercetării confirmă faptul că alegerea parametrului Rk drept expresie a rugozității de prelucrare după temotratăre a fost una inspirată.

#### 5.2.1.4 Concluzii

Principalele concluzii privind influența diferitelor durate de temotratăre a lemnului, la 200°C, asupra puterii consumate în timpul rindeluirii și rugozității de prelucrare rezultate în comparație cu lemnul de fag (*Fagus sylvatica* L.) netratat, pot fi rezumate după cum urmează:

1. Pierderea de masă crește liniar cu durata tratamentului termic, variind între 1,37% (după 1 h de tratament) și până la 8,34% (după 6 h de temotratăre la 200°C în mediu de aer, la presiune atmosferică).
2. Puterea de așchiere scade odată cu creșterea duratei temotratării, fiind cu 47% mai scăzută la prelucrarea lemnului tratat termic timp de 6 ore la 200°C, decât la prelucrarea lemnului netratat.
3. Dependența între puterea de așchiere și pierderea de masă suferită de lemn în urma temotratării este dată de o funcție de regresie liniară negativă (cu  $R^2 = 0,98$ ) (Fig. 5.6).
4. Temotratărea lemnului de fag timp de 1h și 2h a avut un efect neglijabil asupra rugozității de prelucrare după rindeluire. Dar duratele de temotratăre mai mari au condus la creșterea semnificativă a parametrului de rugozitate Rk măsurat perpendicular pe fibre: cu 15% la duratele de 3h și 4h, respectiv cu 33% la lemnul tratat timp de 5h și 6h.
5. Valorile rugozității de prelucrare Rk măsurate în lungul fibrei au fost mai mari decât cele perpendicular pe fibre și au crescut cu până la 53% (la lemnul temotratat timp de 6h față de cel netratat).
6. Rugozitatea de prelucrare evaluată prin Rk a fost direct proporțională cu pierderea de masă cauzată de durata tratării termice și a avut o corelare puternică ( $R^2=0,9$ ) pentru măsurătorile efectuate perpendicular pe fibre. Corelația a fost mai slabă ( $R^2 = 0,68$ ) pentru măsurătorile efectuate de-a lungul fibrei.



## 5.2.2 Influența termotrării asupra prelucrabilității prin frezare

### 5.2.2.1 Metodă, material, aparatură

Materialul lemnos utilizat în cadrul acestei cercetări a constat din 60 de frize din lemn de fag (*Fagus sylvatica* L.) cu dimensiunile 400 × 50 × 28mm. Jumătate din probe au fost termotrătate prin procedeul ThermoWood într-o cameră industrială TekmaWood produsă de TekmaHeat Corporation (Lahti, Finlanda), conform regimului prezentat în Tabelul 5.4. Celelalte probe au rămas netratate și au fost folosite ca probe control.

Tabelul 5.4

#### *Regim de termotratare aplicat frizelor de fag în camera TekmaWood de la JF FURNIR*

Faza	Regim de termotratare (Temperatură / Durată)
Încălzire inițială	100 °C / 3 h
Încălzire în profunzime	100 °C...200 °C / 21 h
<b>Tratare propriu-zisă</b>	<b>200 °C / 2,5 h</b>
Răcire	200 °C...30 °C / 13,5 h
<b>Durata totală a procesului</b>	<b>40 h</b>

Pierderea de masă medie a probelor după termotratarea în regim industrial a fost de 13,18±1,36%, mai mare decât valorile obținute în etuva de laborator.

Toate probele au fost condiționate timp de 4 săptămâni la 20°C și 55% umiditate relativă înainte de a fi prelucrate. Conținutul de umiditate mediu al probelor după condiționare a fost de 3% ± 0,2% pentru probele tratate termic și de 8% ± 0,5% pentru probele martor.

Probele au fost prelucrate pe o mașină verticală de frezat MNF10 produsă de UMARO SA (România), echipată cu un cap de frezat, cu diametru  $\phi 125\text{mm}$ , B118, cu 6 cuțite cu plăcuțe detașabile din carbură metalică având dimensiunile 30 × 12 × 1,5mm, identic cu cel utilizat pe linia existentă de producere a panourilor din lemn netratat (Fig. 4.4).

Au fost utilizate două turații ale sculei ( $n$ ), cinci viteze de avans ( $u$ ) și trei adâncimi de așchiere ( $h$ ):

$$n_1 = 3300 \text{ rpm}; n_2 = 4818 \text{ rpm};$$

$$u_1 = 4,5 \text{ m/min}; u_2 = 9 \text{ m/min}; u_3 = 13,5 \text{ m/min}; u_4 = 18 \text{ m/min}; u_5 = 22,5 \text{ m/min};$$

$$h_1 = 1 \text{ mm}; h_2 = 2 \text{ mm}; h_3 = 3 \text{ mm}.$$

Pentru fiecare regim de frezare au fost utilizate seturi a câte 10 probe termotrătate și respectiv 10 probe martor netratate.

Frezarea s-a realizat pe cantul probelor. Puterea de așchiere s-a calculat conform ecuației (5.1). Pe baza valorilor determinate, s-a calculat apoi pentru fiecare set de probe valoarea medie și abaterea medie pătratică.

Atât puterea totală ( $P_t$ ), cât și puterea de mers în gol ( $P_0$ ) au fost măsurate cu un traductor trifazat de putere, conectat direct în circuitul electric al motorului mașinii.

În afară de puterea de așchiere, în cazul testelor de prelucrare prin frezare s-a măsurat și rugozitatea suprafeței după frezare. Măsurătorile de rugozitate s-au realizat imediat după frezare utilizând același instrument MarSurf XT20 produs de MAHR GmbH (Germania), ca în cazul pieselor rindeluite (vezi Fig. 5.3).

Pentru fiecare frezare, au fost scanate aleatoriu 6 profile cu lungimea de 10mm, pe fiecare cant de probă frezată (transversal direcției de avans), pentru a măsura parametrii rugozității ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $P_t$ ). Lungimea de 10mm adoptată a fost limitată de mărimea cantului probelor, fiind totuși suficientă pentru a acoperi variabilitatea creșterii lemnului (acoperind atât zone de lemn timpuriu, cât și de lemn târziu). Pentru a analiza undulațiile suprafeței cauzate de procesele cinematice, au fost măsurate suplimentar, de data aceasta în lungul fibrei (în direcția de avans), alte două profile alese aleator, cu lungime de 50 mm.

### 5.2.2.2 Rezultate experimentale și discuții privind puterea de așchiere la frezare

Tabelul 5.5 prezintă valorile puterii de așchiere, în funcție de parametrii regimului de frezare. Așa cum era de așteptat (deoarece termotratarea reduce rezistențele mecanice ale lemnului (așa cum s-a arătat în cadrul §1.2), valorile înregistrate în timpul prelucrării lemnului termotratat au fost mai mici decât cele obținute la prelucrarea probelor control, netratate.

Tabelul 5.5

**Puterea de așchiere (valori medii  $\bar{x}$  și abateri medii pătratice  $\sigma$ ), în kW, la frezarea lemnului termotratat și netratat de fag, în funcție de parametrii regimului de prelucrare**

LEMN NETRATAT (piese control)										
	$u_1=4,5\text{m/min}$		$u_2=9,0\text{m/min}$		$u_3=13,5\text{m/min}$		$u_4=18,0\text{m/min}$		$u_5=22,5\text{m/min}$	
$n_1=3300\text{rpm}$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
$h_1=1\text{ mm}$	0,06	0,01	0,09	0,01	0,17	0,02	0,27	0,03	0,32	0,03
$h_2=2\text{ mm}$	0,10	0,01	0,23	0,01	0,32	0,01	0,40	0,05	0,47	0,03
$h_3=3\text{ mm}$	0,18	0,07	0,24	0,02	0,43	0,03	0,49	0,02	0,59	0,10
LEMN NETRATAT (piese control)										
	$u_1=4,5\text{m/min}$		$u_2=9,0\text{m/min}$		$u_3=13,5\text{m/min}$		$u_4=18,0\text{m/min}$		$u_5=22,5\text{m/min}$	
$n_2=4818\text{rpm}$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
$h_1=1\text{ mm}$	0,09	0,01	0,13	0,02	0,20	0,01	0,29	0,04	0,35	0,01
$h_2=2\text{ mm}$	0,13	0,01	0,22	0,02	0,36	0,03	0,45	0,13	0,50	0,13
$h_3=3\text{ mm}$	0,22	0,03	0,25	0,05	0,41	0,08	0,49	0,10	0,59	0,11

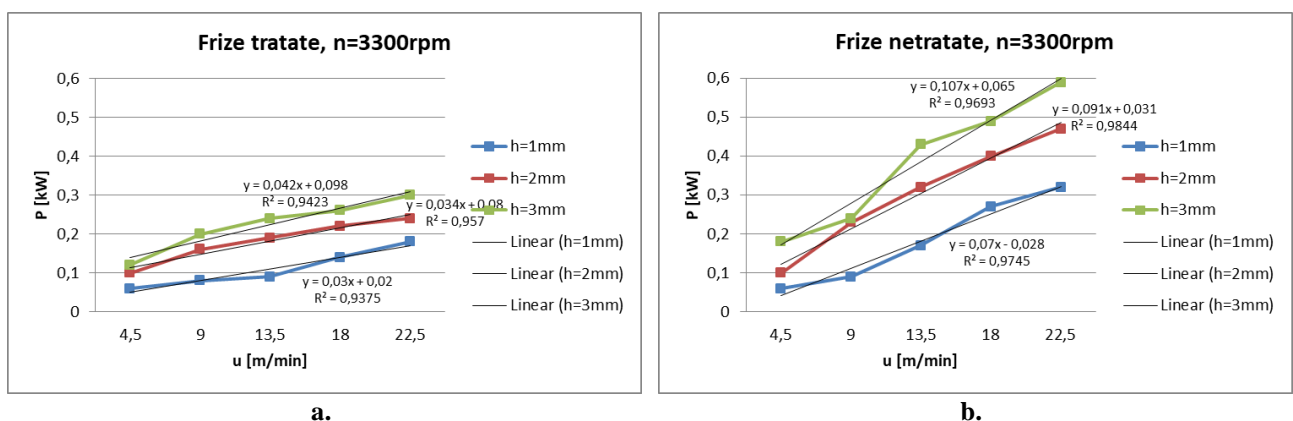
LEMN TERMOTRATAT										
	$u_1=4,5\text{m/min}$		$u_2=9,0\text{m/min}$		$u_3=13,5\text{m/min}$		$u_4=18,0\text{m/min}$		$u_5=22,5\text{m/min}$	
$n_1=3300\text{rpm}$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
$h_1=1\text{ mm}$	0,06	0,01	0,08	0,01	0,09	0,03	0,14	0,01	0,18	0,01
$h_2=2\text{ mm}$	0,10	0,01	0,16	0,02	0,19	0,01	0,22	0,02	0,24	0,05
$h_3=3\text{ mm}$	0,12	0,01	0,20	0,01	0,24	0,01	0,26	0,01	0,30	0,02
$n_2=4818\text{rpm}$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
$h_1=1\text{ mm}$	0,05	0,01	0,09	0,01	0,11	0,02	0,15	0,01	0,18	0,02
$h_2=2\text{ mm}$	0,11	0,01	0,19	0,04	0,22	0,03	0,30	0,01	0,31	0,02
$h_3=3\text{ mm}$	0,12	0,01	0,24	0,01	0,29	0,01	0,38	0,03	0,44	0,02

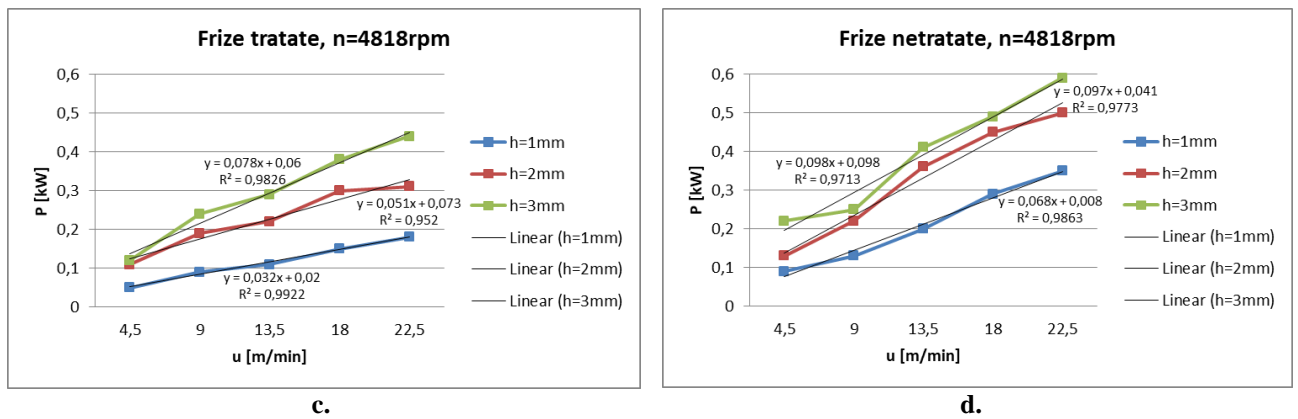
Cele mai importante scăderi ale puterii de aşchiere (cu până la 50 %) la frezarea lemnului termotratat în comparație cu cel netratat au fost înregistrate la turații mici ( $n_1 = 3300\text{ rpm}$ ), viteze de avans mari ( $u_4 = 18\text{ m/min}$  și  $u_5 = 22,5\text{ m/min}$ ) și adâncimi de tăiere mici ( $h_1 = 1\text{ mm}$  și  $h_2 = 2\text{ mm}$ ).

Valorile din Tabelul 5.5 și Fig. 5.18 arată în mod clar că odată cu creșterea turației, a vitezei de avans și a adâncimii de tăiere, puterea de aşchiere crește de asemenea.

Mărirea turației de la 3300 rpm la 4818 rpm nu a condus la o creștere sesizabilă a puterii de aşchiere la lemnul netratat, în schimb la lemnul termotratat aceasta a crescut cu până la 30 % la aceeași viteză de avans și adâncime de tăiere. Creșterile cele mai mari s-au înregistrat la viteze mari de avans ( $u_4, u_5$ ) și la adâncimea cea mai mare de aşchiere ( $h_3$ ).

Fig. 5.18 arată de asemenea că puterea de aşchiere crește cu creșterea vitezei de avans la o turație și adâncime de tăiere constante. Funcția de dependență este liniară, atât pentru lemnul netratat ( $R^2 = 0,96$  și  $0,99$ ) cât și pentru cel termotratat ( $R^2 = 0,92$  și  $0,99$ ).





**Fig. 5.18. Variația puterii de așchiere la frezarea lemnului termotratat (a și c) față de cel netratat (b și d) în funcție de turația sculei, viteza de avans și adâncimea de așchiere.**

În concluzie, din punct de vedere strict al consumului de energie electrică, prelucrarea lemnului termotratat este mai economică, implicând o putere de așchiere cu până la 50% mai mică la frezare decât cea aferentă lemnului netratat din aceeași specie.

### 5.2.2.3 Rezultate experimentale și discuții privind calitatea suprafeței frezate

Analiza rugozității suprafețelor prelucrate prin frezare a fost limitată la adâncimea de tăiere  $h_1 = 1$  mm în combinație cu vitezele de avans  $u_1 \dots u_4$  (4,5; 9; 13,5 și 18 m/min) și ambele turații ( $n_1$  și  $n_2$ ). S-a observat că pentru adâncimile de tăiere mai mari ( $h_2, h_3$ ) combinate cu viteze de avans mari ( $u_3 \dots u_5$ ), atât suprafețele lemnului termotratat (TT) cât și ale celui netratat (NT) au prezentat fibre smulse, măsurătorile de rugozitate fiind în aceste situații nerelevante. Aceeași problemă a fost constatată și în cazul adâncimii de tăiere  $h_1 = 1$  mm combinată cu cea mai mare viteză de avans ( $u_5 = 22,5$  m/min).

Parametrul rugozității  $R_a$  a fost luat ca referință în analiza comparativă deoarece este cel mai utilizat în literatura de specialitate. Pentru acest parametru, conform testelor ANOVA și Duncan (Tabelul 5.7), diferențele dintre valorile prezentate pentru cele două stări de tratare a lemnului au fost semnificative (5% nivel de semnificație), pentru viteze de avans de 4,5m/min și 18 m/min, dar ne semnificative pentru viteze de avans de 9 m/min și 13,5 m/min pentru ambele turații ( $n_1$  și  $n_2$ ). Rugozitatea suprafeței ( $R_a$ ) a crescut odată cu viteza de avans, iar diferența față de proba control a fost semnificativă (la  $u=4,5$  m/min) pentru ambele turații ale sculei atât la lemnul tratat cât și la cel netratat.

Pentru parametrul  $R_k$  diferențele au fost ne semnificative între lemnul termotratat și lemnul netratat prelucrat la turația mai mică ( $n_1$ ). Totuși, la turația mai mare ( $n_2$ ), diferențele între lemnul tratat și cel netratat au fost semnificative la viteze de avans mari (13,5 m/min și 18m/min).

**Influența termotrătării și a vitezei de avans asupra parametrilor de rugozitate  $R_a$  și  $R_k$ ,  
evaluati pe suprafețe frezate din lemn de fag netratat (NT) și termotratat (TT)**

Turație (rot/min)	Avans (m/min)	Tratament	$R_a$	$R_k$	Turație (rot/min)	Avans (m/min)	Tratament	$R_a$	$R_k$
3300	4,5	NT	5,39 A	11,85 A	4818	4,5	NT	6,78 A	11,98 A
		TT	4,01 C	9,36 A			TT	5,53 BD	9,86 AC
	9	NT	6,82 C	13,50 AB		9	NT	7,05 BD	14,69 AC
		TT	6,41 C	10,54 B			TT	6,53 D	12,47 C
	13,5	NT	6,85 C	14,06 AB		13,5	NT	7,62 BD	14,98 D
		TT	6,99 BC	15,09 B			TT	6,39 D	11,89 AC
	18	NT	6,68 C	11,99 A		18	NT	8,39 B	15,54 C
		TT	5,82 B	10,05 A			TT	8,14 C	18,53 B

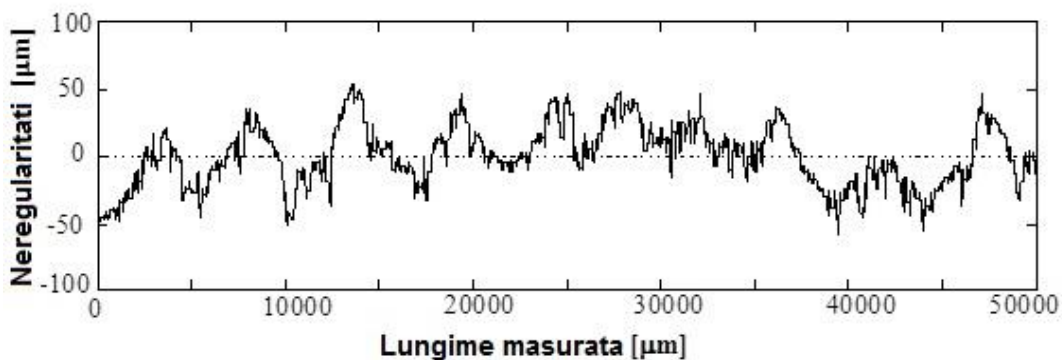
**Notă.** Grupurile cu aceeași literă indică o diferență ne semnificativă ( $p < 0.05$ ) între valorile comparate, conform testului Duncan.

Ondulațiile cinematice au fost măsurate prin parametrul  $P_t$  (înălțimea totală a profilului primar). Lemnul termotratat a avut un  $P_t$  mai mic față de cel netratat, ceea ce înseamnă că frezarea a generat o adâncime mai mică a undulațiilor profilului la lemnul termotratat. În general,  $P_t$  a crescut cu creșterea vitezei de avans și a fost mai mic când s-a utilizat o viteză de tăiere mai mică. Acest rezultat este comparabil cu cele găsite de Gaff ș.a. (2015). Fig. 5.21 arată un exemplu al adâncimii undulației celei mai mici observată în profilele primare ale lemnului termotratat (Fig. 5.21, a), care poate fi comparată cu undulațiile mai mari ale lemnului de fag netratat (Fig. 5.21, b), pentru aceeași turație a sculei, viteză de avans și adâncime de tăiere.

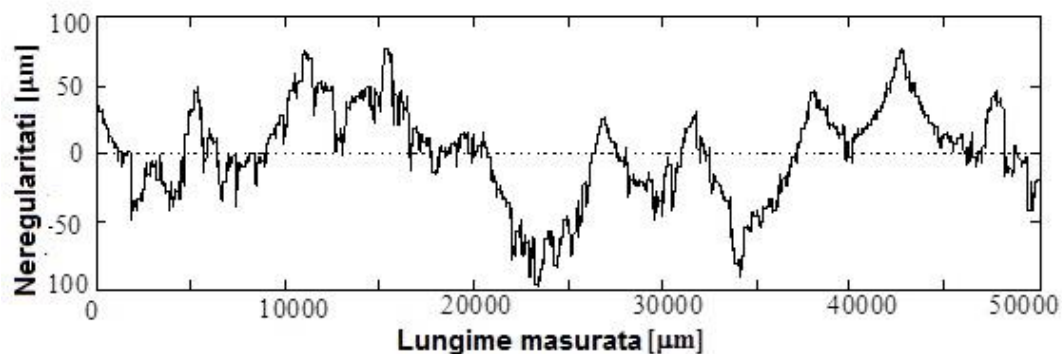
Principalele concluzii privind influența termotrătării și a parametrilor regimului de prelucrare asupra rugozității suprafeței rezultate după frezarea lemnului de fag pot fi rezumate după cum urmează:

1. Rugozitatea suprafeței (măsurată prin parametrii  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_k$ , și  $R_k + R_{pk} + R_{vk}$ ) la lemnul de fag termotratat prelucrat prin frezare a fost ușor mai mare decât cea a lemnului netratat. Diferența este semnificativă ( $p < 0.05$ ) pentru rugozitatea de prelucrare  $R_a$  la ambele turații considerate, pentru vitezele de avans de 4,5 m/min și 18 m/min.

- Rugozitatea suprafeței lemnului de fag, atât a celui termotratat, cât și a celui netratat a crescut cu creșterea vitezei de avans, dar valorile rugozității nu au fost semnificativ diferite pentru vitezele de avans de 9 m/min și 13,5 m/min.
- O creștere a turației sculei de la  $n_1 = 3300$  rpm la  $n_2 = 4818$  rpm a scăzut rugozitatea suprafeței atât la lemnul de fag termotratat cât și la cel netratat. Diferența este semnificativă pentru parametrii  $R_a$  și  $R_k$  la lemnul netratat pentru o viteză de avans de 4,5 m/min și 18 m/min. La lemnul termotratat, diferențele valorilor  $R_a$  au fost semnificative la toate vitezele de avans, cu excepția celei de 18 m/min.
- Influența undulațiilor cinematice, după cum au arătat măsurătorile parametrului  $P_t$  a crescut cu viteza de avans atât la lemnul termotratat cât și la cel netratat. Valoarea totală a înălțimii vârf-vale la profilele primare, măsurate în lungul direcției de tăiere, pentru fiecare viteză de avans a fost mai mică în cazul lemnului termotratat la ambele turații. Aceste diferențe au fost de asemenea vizibile la profilele primare plotate în MathCad.



a.



b.

*Fig. 5.21 Profil primar suprafață din lemn de fag termotratat (a) și netratat (b), după frezarea la turația sculei  $n=3300$  rpm, viteza de avans  $u=18$ m/min și adâncimea de așchiere  $h=1$ mm.*

#### 5.2.2.4 Concluzii

Analizând rezultatele obținute cu privire la prelucrabilitatea lemnului termotratat de fag, atât din punct de vedere al puterii consumate, cât și din punct de vedere al rugozității suprafeței (care influențează consumul de adeziv și calitatea încleierii) se poate afirma că, dintre combinațiile analizate, regimul de prelucrare considerat cel mai potrivit pentru frezarea lemnului termotratat de fag este cel cu turația mai mică ( $n = 3300\text{rpm}$ ), cu viteză de avans medie ( $v = 9$  sau  $13,5\text{m/min}$ ) și cu o adâncime mică de așchiere ( $h = 1$  sau  $2\text{mm}$ ).

La turații mai mari crește consumul de energie electrică, iar rugozitatea suprafeței prelucrate scade, ceea ce în combinație cu caracterul hidrofob al lemnului termotratat, conduce la respingerea adezivului și o calitate slabă a încleierii, deoarece acesta nu poate pătrunde în lemn.

### 5.3 Determinarea rezistenței la încovoiere și a modulului de elasticitate

#### 5.3.1 Realizarea panourilor experimentale. Debitarea epruvetelor

Materialul utilizat în cadrul prezentei cercetări a constat în panouri reconstituite din lemn masiv, realizate din frize netratate și respectiv termotratate din lemn de fag. Pentru realizarea panourilor reconstituite, s-a achiziționat  $1\text{m}^3$  frize din lemn de fag ușor aburite de la firma Massifpanel Făgăraș, având dimensiunile  $400 \times 50 \times 25\text{mm}$ .

Jumătate din frize au fost termotratate la JF FURNIR într-o cameră de termotratare TekmaWood, după procedeul ThermoWood, la o temperatură de  $200^\circ\text{C}$  timp de 2,5h. Toate frizele, atât cele termotratate, cât și cele netratate au fost apoi condiționate în camera climatică FEUTRON KPK200 din dotarea laboratorului Facultății de Ingineria Lemnului timp de 4 săptămâni la  $20^\circ\text{C}/55\%$ , timp în care frizele termotratate și-au stabilizat umiditatea la  $3\pm 0,2\%$ , iar cele netratate la  $8\pm 0,5\%$ .

Panourile, atât cele din frize termotratate cât și cele din frize netratate, au fost confecționate în regim industrial pe linia tehnologică existentă la firma Massifpanel Făgăraș, având lungimea de  $1625\text{mm}$ , lățimea  $810\text{mm}$  și grosimea  $17\text{mm}$ . Singura problemă în realizarea panourilor din frize termotratate pe aceeași linie ca cea utilizată în cazul panourilor din frize netratate s-a înregistrat la presarea panourilor după aplicarea adezivului pe canturile frizelor. Ca și în tehnologia existentă, aplicarea adezivului pe bază de poliacetat de vinil (DORUS MD 076/26 de la firma HENKEL, amestecat cu 5% întăritor R397) s-a făcut la rece ( $20^\circ\text{C}$ ), la un consum specific de  $200\text{g/m}^2$ , cu o presiune specifică de  $0,4\text{N/mm}^2$ . Comparativ cu încleierea în cazul panourilor din frize netratate, s-a observat capacitatea de udare mult mai mică a suportului lemnos termotratat: acesta împinge adezivul spre exterior. Pentru a reuși încleierea pe cant a frizelor termotratate a fost necesară aplicarea progresivă a presiunii și un timp de presare de două ori mai îndelungat (40 minute), față de timpul de priză necesar

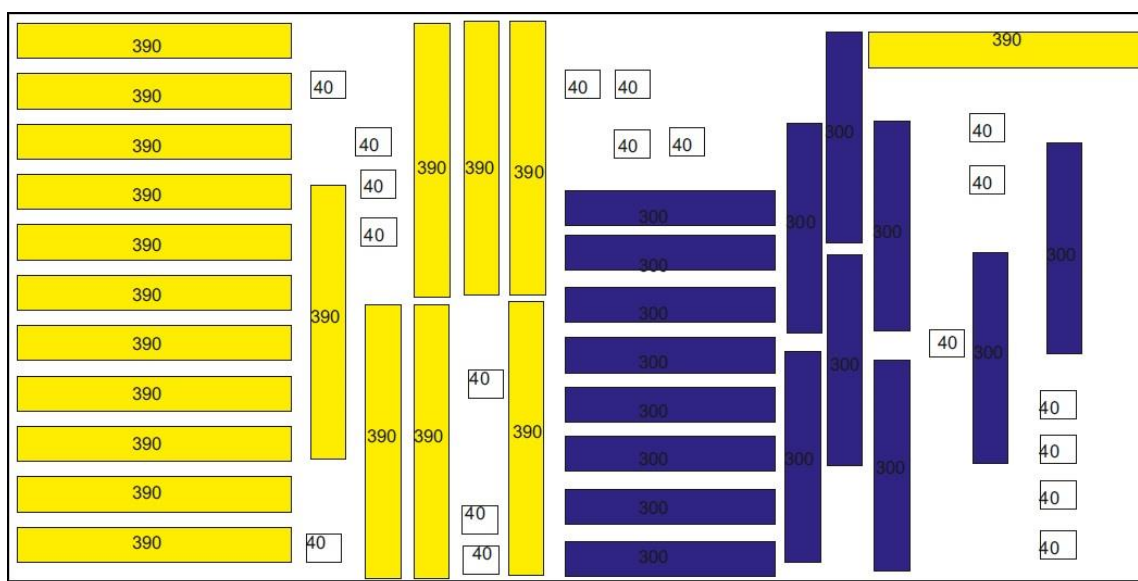
în cazul frizelor netratate . Chiar și așa, câteva din încleierile cant pe cant nu s-au realizat la calitatea dorită.

După presare și răcire, panourile au fost înfoliate și depozitate timp de 8 săptămâni într-o magazie cu parametri controlați înainte de a fi supuse testării.

În conformitate cu standardul SR EN 13353 + A1:2011, înainte de debitarea epruvetelor s-au determinat conformitatea dimensională și umiditatea panourilor. Dimensiunile panourilor au fost măsurate conform SR EN 324-1:1996, cu ajutorul echipamentului CADesQ Measurement Table, pentru a verifica dacă toleranțele dimensionale ale panourilor se încadrează în limitele impuse prin acest standard.

Umiditatea panourilor s-a măsurat cu ajutorul unui umidometru capacitiv (măsurare nedistructivă) produs de firma olandeză BROOKHUIS. Așa cum era de așteptat, umiditatea panoului din frize termotratate a rezultat mai mică (4,1%) față de cea a panoului din frize netratate (6,2%), având în vedere că și umiditatea frizelor termotratate a fost cu 5% mai mică decât cea a frizelor netratate, chiar și după condiționare.

Schema de debitare a epruvetelor din panouri este prezentată în Fig. 5.27.



*Fig. 5.27 Schema de debitare a epruvetelor din panourile experimentale: galben – epruvete pentru testul la încovoiere statică; alb – epruvete pentru testul de rezistență la forfecare a încleierii (calitatea încleierii); albastru – epruvete pentru testul de rezistență la variații de umiditate.*

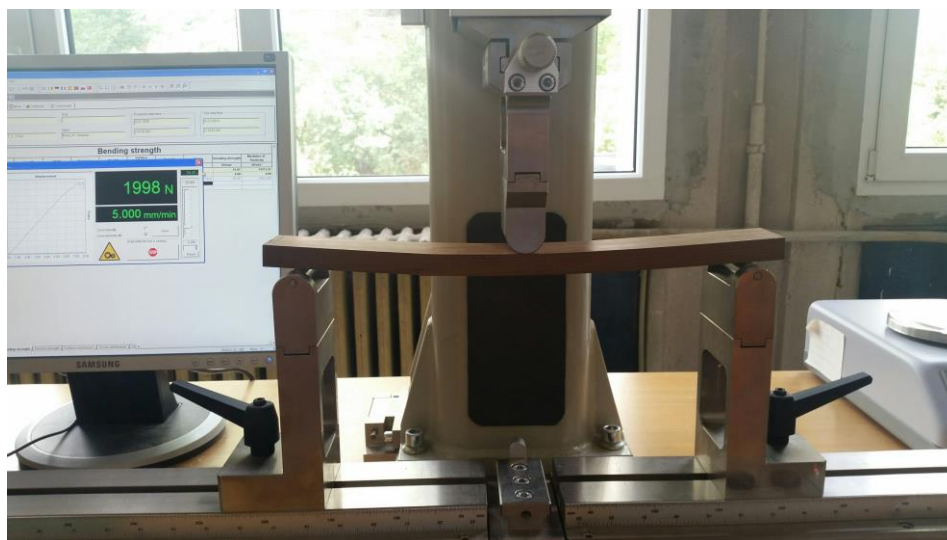
### 5.3.2 Metoda și aparatura de testare

Rezistența la încovoiere a panourilor pe bază de lemn s-a determinat pe baza standardului SR EN 310:1996. După fiecare direcție a panoului (longitudinală / transversală), s-au debitat câte 12 epruvete de formă dreptunghiulară (epruvetele de culoare galbenă în Fig. 5.27), cu o



lățime de  $50 \pm 1$  mm, lungime de 390 mm și grosimea egală cu grosimea panoului. Toate epruvetele longitudinale au avut stratul de lipire pe cant, situat la mijlocul lățimii epruvetei.

Pentru realizarea încercării s-a utilizat un echipament IMAL model IBX 600 (Fig. 5.28).



*Fig. 5.28 Echipamentul IMAL model IBX 600 utilizat pentru determinarea modului de elasticitate și a rezistenței la încovoiere a panourilor.*

### 5.3.3 Rezultate experimentale

În Tabelele 5.10-5.13 sunt prezentate rezultatele furnizate de soft-ul echipamentului IMAL în ceea ce privește densitatea, rezistența la încovoiere (MOR) și modulul de elasticitate la încovoiere (MOE).

Densitatea panourilor din lemn de fag netratat se situează în intervalul  $680 \dots 685 \text{ kg/m}^3$ , în timp ce densitatea panourilor din lemn de fag termotratat este cu cca. 2-3% mai mică, situându-se în intervalul  $664 \dots 676 \text{ kg/m}^3$ . Reducerea obținută este în bună concordanță cu rezultatele obținute de Todorovic *et al.* (2012) și de Boruvka *et al.* (2018).

Referitor la valorile rezistenței la încovoiere (MOR) și a modului de elasticitate la încovoiere (MOE), în cazul epruvetelor debitate longitudinal, acestea sunt apropiate de cele ale lemnului masiv, având în vedere modul similar de debitare. În cazul panourilor din frize termotratate, rezistența la încovoiere este mai mică decât la cele din frize netratate. Rezultatul privind reducerea rezistenței la încovoiere este în bună corelație cu cel obținut de Kamdem *et al.* (2002).

Așa cum era de așteptat, la epruvetele debitate transversal, MOR și MOE au înregistrat valori mult mai mici (de cca. 100 de ori mai mici), atât la panourile din frize netratate, cât mai ales la cele din frize termotratate. Aceste rezultate se explică prin modul de debitare al epruvetelor, care implică un raport mic între lungimea și lățimea elementelor din lemn masiv corelat cu un număr mare de încheieri (cant la cant), pe lungimea epruvetei. Astfel, solicitarea la încovoiere a epruvetei implică în mod special zonele încheiate și mult mai puțin zone din lemn masiv.

Tabelul 5.11

*Rezultate experimentale privind MOR și MOE pentru epruvetele debitate longitudinal din panourile realizate din frize netratate de fag*

Rezistența la încovoiere									
No.	Lungime	Latime	Grosime	Masa	Densitate	Masa pe unitatea de	Forta	M. O. R.	M. O. E.
	mm	mm	mm	g	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	390.00	50.13	17.07	220.61	661.04	11.28	1913.00	66.79	12807.43
2	390.00	50.10	17.06	236.32	708.96	12.09	2232.00	78.07	14338.66
3	390.00	50.08	17.20	227.16	676.20	11.63	2325.00	80.03	12223.24
4	390.00	50.04	17.28	226.00	670.17	11.58	1631.00	55.67	9818.56
5	390.00	50.08	17.26	221.63	657.44	11.35	3264.00	111.58	11981.73
6	390.00	50.04	17.26	232.47	690.15	11.91	1628.00	55.70	11418.48
7	390.00	49.91	17.33	242.58	719.12	12.46	2591.00	88.16	14071.37
8	390.00	50.21	17.21	244.87	726.61	12.50	2550.00	87.45	13974.79
9	390.00	50.22	17.21	232.98	691.19	11.90	3434.00	117.74	12628.55
10	390.00	50.13	17.16	226.15	674.09	11.57	3784.00	130.73	14197.38
11	390.00	50.13	17.16	236.13	703.84	12.08	2195.00	75.84	13111.24
12	390.00	50.24	17.15	217.69	647.83	11.11	1489.00	51.39	12678.93
<b>Average</b>	<b>390.00</b>	<b>50.11</b>	<b>17.20</b>	<b>230.38</b>	<b>685.55</b>	<b>11.79</b>	<b>2419.67</b>	<b>83.26</b>	<b>12770.86</b>
Std. Dev.		0.09	0.08	8.63	25.26	0.45	745.64	25.56	1322.78

Tabelul 5.12

*Rezultate experimentale privind MOR și MOE pentru epruvetele debitate longitudinal din panourile realizate din frize termotratate de fag*

Rezistența la încovoiere									
No.	Lungime	Latime	Grosime	Masa	Densitatea	Masa pe unitatea de	Forta	M. O. R.	M. O. E.
	mm	mm	mm	g	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	390.00	49.99	16.73	230.75	707.45	11.84	1423.00	51.87	14313.97
2	390.00	50.11	16.67	219.75	674.53	11.24	2199.00	80.54	14180.46
3	390.00	50.12	16.86	224.14	680.12	11.47	1670.00	59.78	13744.60
4	390.00	50.17	16.94	226.51	683.38	11.58	1969.00	69.75	13456.71
5	390.00	50.12	16.94	202.84	612.58	10.38	2616.00	92.76	13147.50
6	390.00	50.27	16.92	229.51	691.88	11.71	2952.00	104.61	15011.00
7	390.00	50.14	16.90	211.38	639.63	10.81	1508.00	53.70	13479.40
8	390.00	50.11	16.89	224.75	680.90	11.50	868.00	30.97	12697.49
9	390.00	50.47	16.89	209.12	629.03	10.62	937.00	33.19	11637.16
10	390.00	50.25	16.88	218.93	661.81	11.17	1006.00	35.83	13253.82
11	390.00	50.10	16.84	216.02	656.52	11.06	1880.00	67.48	10431.49
12	390.00	50.20	17.08	220.80	660.30	11.28	799.00	27.83	10645.81
<b>Media</b>	<b>390.00</b>	<b>50.17</b>	<b>16.88</b>	<b>219.54</b>	<b>664.84</b>	<b>11.22</b>	<b>1652.25</b>	<b>59.03</b>	<b>12999.95</b>
Std. Dev.		0.12	0.10	8.48	27.34	0.44	701.64	25.07	1424.83

Tabelul 5.13

*Rezultate experimentale privind MOR și MOE pentru epruvetele debitate transversal din panourile realizate din frize netratate de fag*

Rezistența la încovoiere									
No.	Lungime	Latime	Grosime	Masa	Densitatea	Masa pe unitatea de	Forta	M. O. R.	M. O. E.
	mm	mm	mm	g	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	390.00	50.06	17.23	228.40	678.98	11.70	215.00	7.38	959.33
2	390.00	50.16	17.18	223.94	666.33	11.45	172.00	5.93	849.91
3	390.00	50.20	17.18	230.78	686.13	11.79	185.00	6.37	887.83
4	390.00	50.06	17.07	228.62	686.00	11.71	179.00	6.26	986.56
5	390.00	50.00	17.17	229.14	684.38	11.75	131.00	4.53	970.59
6	390.00	50.08	17.17	228.52	681.44	11.70	119.00	4.11	697.71
7	390.00	50.06	17.20	228.40	680.16	11.70	157.00	5.41	1002.94
<b>Average</b>	<b>390.00</b>	<b>50.09</b>	<b>17.17</b>	<b>228.26</b>	<b>680.49</b>	<b>11.68</b>	<b>165.43</b>	<b>5.71</b>	<b>907.84</b>
Std. Dev.		0.07	0.05	2.08	6.85	0.11	32.86	1.13	107.81

**Rezultate experimentale privind MOR și MOE pentru epruvetele debitate transversal din panourile realizate din frize termotratate de fag**

Rezistența la încovoiere									
No.	Lungime	Latime	Grosime	Masa	Densitatea	Masa pe unitatea de	Forța	M. O. R.	M. O. E.
	mm	mm	mm	g	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	390.00	50.56	16.99	229.83	686.03	11.66	105.00	3.67	951.04
2	390.00	50.32	16.99	228.03	683.90	11.62	92.00	3.23	796.32
3	390.00	50.32	17.15	227.16	674.94	11.58	64.00	2.21	735.52
4	390.00	50.18	17.08	222.49	665.62	11.37	96.00	3.34	668.08
5	390.00	50.17	17.14	226.09	674.16	11.56	71.00	2.46	777.91
6	390.00	50.28	17.14	225.71	671.55	11.51	56.00	1.93	776.21
<b>Average</b>	<b>390.00</b>	<b>50.30</b>	<b>17.08</b>	<b>226.55</b>	<b>676.03</b>	<b>11.55</b>	<b>80.67</b>	<b>2.81</b>	<b>784.18</b>
Std. Dev.		0.14	0.08	2.48	7.68	0.10	19.67	0.70	93.74

### 5.3.4 Concluzii

Rezistența la încovoiere statică s-a dovedit a fi cu 29% mai mică în sens longitudinal și cu 51% mai mică în sens transversal la panourile din lemn de fag termotratat față de cele din lemn netratat. Valorile înregistrate în sens longitudinal sunt similare cu cele ale lemnului masiv și sunt de cca. 20 de ori mai mari decât cele înregistrate în direcție transversală.

Deși fragilizarea lemnului prin termotratare este demonstrată de scăderea modulului de elasticitate (în special pe direcție transversală), ruperea epruvetelor s-a produs în zona încleiată. Aceasta arată că nu diminuarea rezistențelor mecanice în urma modificării compoziției chimice a lemnului datorate termotratarei reprezintă principala problemă a acestor panouri, ci gradul de aderență diminuat al adezivului la suportul lemnos termotratat.

### 5.4 Determinarea calității încleierii



#### 5.4.1 Metodă, material și aparatură

Testele privind calitatea încleierii, exprimată prin rezistența la forfecare a încleierii, s-au efectuat conform SR EN 13354:2009, pe un număr de 10 epruvete, debitate din panourile din frize termotratate și netratate (marcate cu culoare albă în Fig. 5.27), cu planul de forfecare (planul de încleiere) orientat paralel cu direcția fibrelor lemnului.

Epruvetele au fost încercate pe mașina universală pentru încercări de laborator – Zwick-Roell (Germania), dotată cu dispozitivul special pentru încercarea la forfecare (Fig. 5.32).

**Fig. 5.32. Detaliu al dispozitivului special pentru încercarea la forfecare**

## 5.4.2 Rezultate experimentale

Rezultatele obținute cu privire la calitatea încleierii, exprimată prin rezistența la forfecare a îmbinării încleiate și procentajul de rupere aparentă a coeziunii, la panouri realizate din lemn de fag termotratat față de cele din lemn netratat sunt prezentate în Tabelul 5.15.

Tabelul 5.15

### *Rezistența la forfecare și valoarea procentului de rupere a coeziunii aparente în lemn*

Nr. epruv	Fag netratat, U=7,5%		Fag termotratat, U=4%	
	Rezistența încleierii [N/mm <sup>2</sup> ]	% Rupere a coeziunii în lemn	Rezistența încleierii [N/mm <sup>2</sup> ]	% Rupere a coeziunii în lemn
1	9,70	60	8,22	90
2	8,27	70	6,97	100
3	11,26	90	5,79	50
4	15,99	70	8,75	90
5	12,20	100	7,91	90
6	9,31	100	11,69	90
7	10,11	20	5,47	90
8	10,93	70	8,52	100
9	8,50	90	9,82	100
10	10,07	40	12,82	20
<b>Media</b>		<b>71,00</b>		<b>82,00</b>
<b>± abaterea standard</b>	<b>10,63</b> <b>±2,24</b>		<b>8,60</b> <b>±2,35</b>	

## 5.4.3 Concluzii

Analizând rezultatele obținute s-a observat că:

- valoarea medie a rezistenței încleierii la forfecare a fost de 8,6N/mm<sup>2</sup>, încadrându-se astfel în limitele indicate de Holzatlas (Wagenführ 2008) pentru lemn de fag, respectiv: 6,5-8-19N/mm<sup>2</sup>;
- comparativ cu valoarea medie a probelor martor din fag netratat, rezistența încleierii este cu 19,1% mai mică, iar procentajul de rupere a coeziunii în lemn este cu 15% mai mare la lemnul termotratat, ceea ce indică un lemn mai casant, cu o capacitate de udare redusă.

## 5.5 Determinarea variațiilor dimensionale sub influența variațiilor umidității relative

### 5.5.1 Metodă, material și aparatură

Testele privind variațiile dimensionale ale panourilor realizate din frize termotratate de fag, comparativ cu cele realizate din frize netratate, în cazul expunerii acestora în mediu cu umiditate relativă variabilă, s-au efectuat conform SR EN 318:2003, pe un număr de 16 epruvete prismatice cu dimensiunile  $(300 \pm 2) \times (50 \pm 2) \times t$  (grosimea plăcii), debitate câte opt epruvete după fiecare direcție (longitudinală / transversală) a panoului și marcate cu culoare albastră în Fig. 5.27.

După debitare, epruvetele au fost marcate (conform SR EN 318:2003) pentru a garanta aceleași poziții de măsurare la fiecare încercare. Marcajele de reperare s-au amplasat pe linia mediană a epruvetei, la 50 mm de extremități, în punctul median.

S-au determinat în stare inițială masa epruvetelor, cu ajutorul unei balanțe electronice de laborator tip AXIS AD 1000, cu precizie de 0,01g și a unui șubler electronic cu precizie de 0,01mm.

Epruvetele, atât cele debitate longitudinal, cât și cele debitate transversal au fost expuse unui mediu cu umiditate relativă crescătoare în trei etape (30% → 65% → 85%).

După încheierea tratamentului de condiționare, s-a determinat pentru fiecare epruvetă variația relativă de umiditate ( $dU$ ) și variația relativă de grosime ( $dt$ ), pe baza relațiilor:

$$dU_{65,85} = \frac{m_{85} - m_{65}}{m_{65}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.5) \quad \text{și} \quad dt_{65,85} = \frac{t_{85} - t_{65}}{t_{65}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.6).$$

### 5.5.2 Rezultate experimentale

În Tabelul 5.17 sunt prezentate rezultatele obținute.

Tabelul 5.17

*Variațiile relative de umiditate și de grosime înregistrate de epruvetele supuse condiționării în mediu cu umiditate relativă crescătoare (de la 30% la 85%)*

Nr. epruv.	Starea inițială		După a doua etapă de condiționare		După a treia etapă de condiționare		$dU_{30,85}$ , %	$dt_{30,85}$ , %
	$m$ , g	$t$ , mm	$m_{65}$ , g	$t_{65}$ , mm	$m_{85}$ , g	$t_{85}$ , mm		
<b>Epruvete debitate din panoul din frize netratate</b>								
1L-NT	8,57	20,45	9,43	20,76	9,76	20,94	3,50	0,87
2L-NT	8,56	19,85	9,46	20,43	9,75	20,73	3,07	1,47
3L-NT	8,18	20,60	9,03	20,86	9,31	21,14	3,10	1,34
4L-NT	8,04	20,20	8,88	20,75	9,15	20,94	3,04	0,92
<b>Media</b>	-	-	-	-	-	-	<b>3,18±0,22</b>	<b>1,15±0,30</b>

1T-NT	8,57	20,11	9,47	20,64	9,78	20,93	3,27	1,41
2T-NT	8,24	20,50	9,12	20,86	9,40	20,97	3,07	0,53
3T-NT	8,76	19,87	9,66	20,19	9,98	20,66	3,31	2,33
4T-NT	8,51	19,91	9,42	20,12	9,72	20,39	3,18	1,34
<b>Media</b>	-	-	-	-	-	-	<b>3,21± 0,11</b>	<b>1,40± 0,74</b>
<b>Epruvete debitate din panoul din frize termotratate</b>								
1L-TT	9,07	20,35	9,55	19,92	9,65	20,02	1,05	0,54
2L-TT	9,41	20,27	9,86	19,92	10,01	20,01	1,52	0,73
3L-TT	9,45	20,55	9,89	20,07	10,06	20,18	1,72	0,39
4L-TT	8,44	20,00	8,79	19,97	8,94	20,11	1,71	0,64
<b>Media</b>	-	-	-	-	-	-	<b>1,50± 0,31</b>	<b>0,55± 0,11</b>
1T-TT	8,51	19,85	8,86	19,92	9,00	20,04	1,58	0,60
2T-TT	8,38	19,80	8,71	19,92	8,86	20,02	1,72	0,50
3T-TT	8,46	19,98	8,78	20,07	8,93	20,20	1,71	0,65
4T-TT	8,45	19,88	8,78	19,97	8,93	20,09	1,71	0,60
<b>Media</b>	-	-	-	-	-	-	<b>1,68± 0,07</b>	<b>0,59± 0,06</b>

### 5.5.3 Concluzii

Analizând rezultatele prezentate în Tabelul 5.17 se pot formula următoarele concluzii:

- variațiile relative de umiditate și grosime sunt mai mari la epruvetele debitate transversal decât la cele longitudinale, atât la panourile realizate din frize netratate cât și la cele din frize termotratate;
- referitor la influența termotratării, se observă clar că, variația relativă de umiditate medie este de 2 ori mai mică la panourile realizate din frize termotratate, iar variația relativă de grosime este, în medie de 3 ori mai mică la panourile realizate din frize termotratate ;

În corelație cu rezultatele obținute cu privire la rezistența la încovoiere și la rezistența încleierii, se poate afirma că panourile din frize termotratate de fag sunt utilizabile în condiții de exterior, tratamentul lemnului asigurând o stabilitate dimensională mult îmbunătățită față de lemnul netratat.

## 5.6. Determinarea absorbției de ulei ca material de finisare

### 5.6.1. Metodă, material, aparatură

Pentru a da finalitate testelor efectuate asupra panourilor realizate din frize termotratate de fag, s-a efectuat și un test privind finisarea acestora. Intrucât singurul material de finisare care se aplică pe panourile din frize termotratate este uleiul de in (impregnat cu absorbanți

UV, pentru protejarea culorii), s-a optat pentru un test de imersie și determinare a absorbției de ulei în lemn.

S-au utilizat epruvete de secțiune pătrată cu latura de 50mm și grosimea egală cu cea a panoului. Din fiecare panou experimental (din frize termotratate și respectiv netratate) s-au prelevat 10 epruvete lipsite de defecte și fără îmbinări.

Epruvetele au fost cântărite cu o precizie de 0,01g și apoi au fost imersate timp de 24h într-o baie de ulei de in la temperatura ambientală de cca. 20°C sub apăsarea unei greutate pentru a fi complet acoperite de ulei. După 24h de imersie, epruvetele au fost scoase și lăsate la scurs deasupra băii de ulei, pentru scurgerea excesului de ulei, după care au fost din nou cântărite.

Pentru fiecare epruvetă s-a calculat apoi absorbția de ulei, pe baza relației:

$$A = (M_f - M_i)/M_f * 100 \quad [\%] \quad (5.7)$$

în care:  $M_i$  – masa inițială a epruvetei, în g;  $M_f$  – masa finală a epruvetei, în g.

### 5.6.2 Rezultate experimentale

Rezultatele obținute cu privire la absorbția de ulei sunt prezentate în Tabelul 5.18.

*Tabelul 5.18*

***Influența termotrării lemnului de fag folosit pentru panouri reconstituite din lemn masiv asupra absorbției de ulei de in***

Nr. epruv.	Masa inițială, g	Masa finală, g	Absorbția de ulei, %
Epruvete debitate din panoul din frize netratate			
FN1	22,89	24,62	7
FN2	24,7	26,78	8
FN3	24,1	26,66	10
FN4	25,01	27,27	8
FN5	25,06	27,06	7
FN6	23,17	25,07	8
FN7	22,3	24,41	9
FN8	22,75	24,43	7
FN9	22,24	24,12	8
FN10	23,27	25	7
<b>MEDIA</b>			<b>7,8±0,99%</b>

### 5.6.3 Concluzii

Spre deosebire de faza înclieirii, unde capacitatea redusă de udare a lemnului termotratat a îngreunat realizarea panourilor, în cazul finisării ea are efecte pozitive, prin economia de

material de finisare pe care o permite. Deși valorile nu diferă cu mult, se poate observa totuși că absorbția de ulei (și implicit costul finisării) este cu cca 14% mai mică în cazul panoului din frize termotratate față de cel din frize netratate.

## Capitolul 6

# CONCLUZII GENERALE ȘI CONSIDERAȚII ECONOMICE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

### 6.1. Concluzii generale și considerații economice

Prin rezultatele obținute, obiectivul general al tezei, acela de a investiga oportunitatea și posibilitățile de adaptare a tehnologiei existente de fabricare a panourilor reconstituite din lemn masiv pentru producerea de panouri din frize termotratate de fag, a fost îndeplinit.

S-au evaluat efectele procedurii de termotratare asupra modificării culorii și compoziției chimice a lemnului de fag. Din frize de fag, termotratate la 200 °C și durate diferite de tratare (de la 1h până la 6h) s-au realizat apoi panouri pe o linie industrială de producție. Acestea au fost testate sub aspectul rezistențelor mecanice, al prelucrabilității și al comportamentului la medii cu umiditate ridicată, în vederea evaluării influenței regimului de termotratare asupra acestor proprietăți mecanice și tehnologice, precum și a evaluării oportunității de a utiliza aceste panouri în condiții de exterior, pentru mobilier de grădină și amenajări exterioare.

Concluziile formulate în urma rezultatelor obținute pot fi sintetizate după cum urmează:

1. Atât termotratarea în mediu de vapori supraîncălziți, efectuată în regim industrial la JF FURNIR, cât și termotratarea în mediu de aer la presiune atmosferică, efectuată într-o etuvă de laborator la aceeași temperatură și cu aceeași durată (200°C/ 2,5 h) au cauzat modificări vizibile în spectrele FTIR ale lemnului de fag și în culoarea probelor, modificările fiind mai mari la probele termotratate industrial, care au suferit și pierdere de masă mai mare (în jur de 13%, față de piesele tratate în laborator, unde pierderea de masă a fost de numai 4%).
2. Termotratarea lemnului de fag timp de 1h și 2h este insuficientă, fapt semnalat de închiderea culorii doar în stratul de suprafață, nu și la interior, precum și de valorile neglijabile ale pierderii de masa (sub 3%). Dar în urma termotratarei cu durate peste 3h la 200°C, pierderea de masă crește peste 5%, iar efectele asupra prelucrabilității lemnului devin vizibile.
3. La rindeluire, puterea de așchiere este cu 47% mai mică în cazul lemnului termotratat timp de 6h la 200°C, față de prelucrarea lemnului netratat.



4. Totodată, duratele de termotratare mai mari au condus la creșterea semnificativă a parametrului de rugozitate  $R_k$  măsurat perpendicular pe fibre: cu 15% la duratele de 3h și 4h, respectiv cu 33% la lemnul tratat timp de 5h și 6h. Valorile rugozității de prelucrare  $R_k$  măsurate în lungul fibrei în urma operației de rindeluire au fost mai mari decât cele perpendicular pe fibre și au crescut cu până la 53% (la lemnul termotratat timp de 6h față de cel netratat).
5. Testele de frezare efectuate cu diferite regimuri de prelucrare, prin combinarea a diferite valori ale turației, vitezei de avans și adâncimii de așchiere, la lemn termotratat față de cel netratat au relevat că puterea de așchiere scade cu cât turația este mai mică, viteza de avans este mai mare, iar adâncimea de așchiere este mai mică. Astfel, la frezarea lemnului la turație mică ( $n = 3300$  rpm), viteze de avans mari ( $v = 18$  m/min și  $22,5$  m/min) și adâncimi de tăiere mici ( $h = 1$  mm și  $2$  mm), puterea de așchiere a fost cu 50% mai redusă la frezarea lemnului termotratat în comparație cu cel netratat.
6. Rugozitatea suprafeței frezate a lemnului de fag termotratat scade cu creșterea turației și crește cu creșterea vitezei de avans și a adâncimii de așchiere. Aceasta limitează viteza de avans (considerată optim a fi cât mai mare din punct de vedere al criteriului anterior), valorile recomandate pentru a satisface ambele criterii fiind  $v = 9$  m/min sau  $13,5$  m/min. La aceste valori, lemnul termotratat se comportă la prelucrare asemănător celui netratat, în timp ce la viteze de avans mai mari apar smulgeri de fibre.
7. Rezistența la încovoiere statică a panourilor din frize termotratare de fag este cu 29% mai mică în sens longitudinal și cu 51% mai mică în sens transversal la panourile din lemn de fag termotratat față de cele din lemn netratat. Valorile înregistrate în sens longitudinal sunt similare cu cele ale lemnului masiv și sunt de cca. 20 de ori mai mari decât cele înregistrate în direcție transversală.
8. Analizând modul de rupere al epruvetelor s-a constatat că atât la panourile din frize netratate cât și la cele din frize termotratare, la epruvetele debitate longitudinal ruperea s-a produs în lemn, în timp ce la cele transversale, ruperea este în zona încleiată (predominant în adeziv). Aceasta arată că nu numai diminuarea rezistențelor mecanice în urma modificării compoziției chimice a lemnului datorate termotrării reprezintă o problemă a acestor panouri, ci și gradul de aderență diminuat al adezivului la suportul lemnos termotratat.
9. Rezistența la forfecare a încleierii este cu 19% mai mică la panourile din frize termotratare față de cele din frize netratate, iar procentajul de rupere a coeziunii în lemn este cu 15% mai mare la lemnul termotratat (explicabil prin faptul că lemnul devine mai casant în urma termotrării).

10. Variațiile relative de umiditate și de grosime ale epruvetelor din panouri expuse în mediu cu variații de umiditate sunt cu cca. 50% mai mici la panourile realizate din frize termotratate. Drept urmare, se poate considera că panourile realizate din frize termotratate de fag sunt adecvate utilizării în condiții de exterior, tratamentul lemnului asigurând o stabilitate dimensională mult îmbunătățită față de lemnul netratat.

În urma experienței dobândite prin cercetările efectuate și a rezultatelor obținute pot fi formulate următoarele recomandări pentru practica industrială:

1. Realizarea panourilor din frize termotratate din lemn de fag este posibilă pe o linie tehnologică de realizare a unor astfel de panouri din lemn netratat, cu același scule și utilaje. La operațiile de rindeluire/frezare se recomandă aplicarea unui regim de prelucrare mai lent decât la panourile din frize netratate: turație mai mică (3000 rpm în loc de 4000 rpm) și viteză de avans mai mică (sub 14m/min față de 16-20m/min). La înclieirea pe cant, se recomandă dublarea duratei de presare (de la 20 minute la cca. 40 minute) pentru a se asigura înclieirea corespunzătoare.
2. Referitor la operația de înclieiere, întrucât rezultatele obținute cu adezivul pe bază de polivinilacetat utilizat în cadrul prezentei cercetări nu au fost satisfăcătoare, sunt necesare studii aprofundate privind dezvoltarea unor adezivi speciali pentru lemn hidrofob. Este de luat în considerare, exploratoriu, varianta creșterii adeziunii suportului lemnos prin diferite tratamente.

Respectând aceste recomandări, s-a efectuat un calcul economic de evaluare a costului de producere a panourilor din frize netratate din lemn de fag, comparativ cu cel al panourilor din frize termotratate (Tabelul 6.1). Conform rezultatelor obținute, costul de producere a unui metru cub de panouri din frize termotratate se ridică la valoarea de 1015 euro/m<sup>3</sup> și este cu 47% mai mare decât în cazul panourilor din frize netratate. Creșterea de cost se datorează în principal costului mare al termotratării și faptului că în cazul acestor panouri, este necesară achiziționarea unor utilaje suplimentare (de exemplu, presă și instalație tip evantai, în valoare de cca. 20000 euro), pentru compensarea timpului dublu de presare necesar.

*Tabelul 6.1*

***Evaluarea costului de producere a unui m<sup>3</sup> de panouri din lemn masiv de fag***

Element cost	Cost în varianta panourilor din frize netratate, euro/m <sup>3</sup>	Cost în varianta panourilor din frize termotratate, euro/m <sup>3</sup>
Materia primă lemnoasă (frize de fag în stare verde)	179	179
Uscare	30	-
Uscare și termotratare	-	150
Creștere cost datorată	28	52

pierderilor de volum prin contragere	(reducere volum de la 100% la 88%)	(reducere volum de la 100% la 86%)
Creștere cost datorată rebuturilor la uscare/termotratare	12 (reducere volum de la 88% la 84%)	30 (reducere volum de la 86% la 80%)
Rindeluire frize	41	47
Creștere cost datorată pierderilor la rindeluire	106 (reducere volum de la 84% la 59%)	159 (reducere volum de la 80% la 58%)
Frezare dinți	16	16
Îmbinare la lungime frize	11	11
Retezare	8	8
Creștere cost datorată pierderilor la frezare dinți+retezare	18 (reducere volum de la 59% la 56%)	17 (reducere volum de la 58% la 56%)
Rindeluire 2 fețe	10	12
Creștere cost datorată pierderilor la rindeluire	26 (reducere volum de la 56% la 52%)	41 (reducere volum de la 56% la 52%)
Îmbinare cant pe cant	23	28
Formare panou și presare	32	32
Rindeluire pe 2 fețe panou	19	19
Creștere cost datorată pierderilor la rindeluirea panoului	41 (reducere volum de la 52% la 48%)	65 (reducere volum de la 52% la 48%)
Calibrare panou	11	11
Creștere cost datorată pierderilor la calibrare	34 (reducere volum de la 48% la 44%)	53 (reducere volum de la 48% la 44%)
Formatizare panou	9	9
Creștere cost datorată pierderilor la formatizare	23 (reducere volum de la 44% la 42%)	37 (reducere volum de la 44% la 42%)
Creștere cost datorată altor pierderi tehnologice (cca.1%)	13	39
<b>TOTAL</b>	<b>690</b>	<b>1015</b>

Și productivitatea anuală are de suferit în cazul producerii de panouri din frize termotratate: cu o valoare de 3168m<sup>3</sup>/an, ea scade cu 25% față de productivitatea în cazul panourilor din frize netratate (în valoare de 4244m<sup>3</sup>/an), în principal din necesitatea reducerii vitezelor de avans la operațiile de rindeluire pe frize și pe panou.

Costul mare de producție califică aceste panouri drept o materie primă de lux, dar având în vedere valoarea adăugată (respectiv posibilitatea folosirii lor în condiții de exterior), atractivitatea lor crește și pot fi considerate capabile a-și crea o nișă pe piața produselor din lemn.

## 6.2. Contribuții originale

Contribuțiile originale ale autorului se regăsesc în toate fazele de elaborare a lucrării. Dintre cele mai importante pot fi amintite următoarele:

- Sintetizarea datelor bibliografice privind termotratarea lemnului de fag și efectele acestui proces asupra compoziției chimice și a proprietăților lemnului;
- Elaborarea metodologiei de cercetare experimentală ;
- Stabilirea influenței procedurii de tratare termică și a parametrilor specifici (temperatura și durata) asupra compoziției chimice a lemnului de fag ; evaluarea cu ajutorul spectroscopiei FTIR a modificărilor care apar în compoziția chimică a lemnului de fag (*Fagus sylvatica* L.) în urma aburirii, a termotrătării în mediu de vapori supraîncălziți și respectiv a termotrătării în mediu de aer la presiune atmosferică; corelarea rezultatelor prin metoda calculării ariei relative propusă de Candelier *et al.* (2015) ;
- Experimentarea la nivel industrial a producerii de panouri reconstituite din frize termotratate de fag;
- Evaluarea influenței regimului de termotratare asupra prelucrabilității prin rindeluire a lemnului de fag termotratat comparativ cu cel netratat;
- Evaluarea influenței regimului de prelucrare prin frezare asupra puterii de așchiere și a rugozității suprafeței la lemnul de fag termotratat comparativ cu cel netratat;
- Determinarea comportamentului la expunerea în mediu cu variații de umiditate a panourilor realizate din frize termotratate comparativ cu cele din frize netratate;
- Crearea unei baze de date privind proprietățile mecanice și tehnologice ale lemnului de fag termotratat;
- Analiza rezultatelor obținute prin cercetare și emiterea unor recomandări utile pentru practica industrială.

### 6.3. Diseminarea rezultatelor

Rezultatele experimentelor efectuate în prezenta teză de doctorat au fost diseminate printr-un număr de 5 articole (evidențiate în Bibliografie), dintre care 3 în reviste de specialitate indexate ISI și 2 prezentate în cadrul unor conferințe internaționale. Trei articole au fost publicate în calitate de prim autor.

### 6.4. Direcții viitoare de cercetare

Privitor la direcții viitoare de cercetare, se dorește aprofundarea cercetărilor privind soluții inovative de înclieiere a lemnului termotratat de fag.

O altă direcție care merită investigată este cea a realizării de panouri din frize termotratate combinate din mai multe specii, cu rol decorativ, caz în care un aspect foarte important l-ar constitui găsirea soluțiilor care să garanteze stabilitatea dimensională și planeitatea panourilor.

### BIBLIOGRAFIE (selecție)

- Allegretti, O., Brunetti, M., Cuccui, I., Ferrari, S., Nocetti, M., and Terziev, N. (2012). "Thermovacuum modification of spruce (*Picea abies* Karst.) and fir (*Abies alba* Mill.) wood," *BioResources* 7(3), 3656-3669.
- Altinok, M., Ozalp, M., and Korkut, S. (2010). "The effect of heat treatment on some mechanical properties of laminated beech (*Fagus orientalis*) wood," *Wood Research* 55(3), 131-142.
- Bhuiyan, T., and Hirai, N. (2000). "Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions", *J. Wood Sci.* 46, 431-436.
- Boonstra, M.J. (2008). "A two-stage thermal modification of wood," PhD Thesis in Applied Biological Sciences: Soil and Forest Management. Henry Poincaré University-Nancy, France.
- Budakçi, M., İlçe, A.C., Gürleyen, T., and Utar, M. (2013). "Determination of the surface roughness of heat-treated wood materials planed by the cutters of a horizontal milling machine," *BioResources* 8(3), 3189-3199. DOI: 10.15376/biores.8.3.3189-3199.
- Burmester, A. (1973). "Investigation on the dimensional stabilization of wood, *Bundesanstalt für Materialprüfung*", Berlin-Dahlem, 50-56.
- Candelier, K., Hannouz, S., Elaieb, M.T., Collet, R., Dumarçay, S., Pétrissans, A., Gérardin, P., and Pétrissans, M. (2015). "Utilization of temperature kinetic as a method to predict treatment intensity and corresponding treated wood quality: Durability and mechanical properties of thermally modified wood," *Maderas: Ciencia y Tecnologia* 17, 253-262. DOI: 10.4067/S0718-221x2015005000024.
- Candelier, K., Thevenon, M. F., Petrisans, A., Dumarcay, S., Gerardin, P., and Petrisans, M. (2016). "Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review," *Annals of Forest Science*. DOI: 10.1007/s13595-016-0541-x.

- Cermak, P., Rautkari, L., Horacek, P., Saake, B., Rademacher, P., and Sablik, P. (2015). "Analysis of Dimensional Stability of Thermally Modified Wood Affected by Re-Wetting Cycles", *BioResources* 10(2), 3242-3253. DOI: 10.15376/biores.10.2.3242-3253.
- Chaouch, M., Petrissans, M., Petrissans, A., and Gerardin, P. (2010). "Prediction of decay resistance of different softwood and hardwood species after heat treatment based on analysis of wood elemental composition," in: *Proceedings of the Fifth European Conference on Wood Modification*, Riga, Latvia, 135-142.
- Chen, Y., Gao, J., Fan, Y., Tshabalala, M.A., and Stark, N.M. (2012). "Heat-induced chemical and color changes of extractive-free black locust (*Robinia pseudoaccacia*) wood," *BioResources* 7(2), 2236-2248. DOI: 10.15376/biores.7.2.2236-2248.
- Chen, Y., Tshabalala, M.A., Gao, J., Stark, N.M., and Fan, Y. (2014). "Color and surface chemistry changes of extracted wood flour after heating at 120 °C," *Wood Science and Technology* 48, 137-150. DOI: 10.1007/s00226-013-0582-3.
- De Moura Palermo, G.P., de Figueiredo Latorraca, J.V., de Moura, L.F., Nolasco, A.M., de Carvalho, A.M., and Garcia, R.A. (2014). "Surface roughness of heat treated *Eucalyptus grandis* wood," *Maderas. Ciencia y Tecnología* 16(1), 3-12. DOI: 10.4067/S0718-221X2014005000001.
- Dirol, D., and Guyonnet, R. (1993). "Durability by rectification process", In: *International Research Group Wood Pre*, Section 4 – Processes, N° IRG/WP 93-40015.
- Emandi, A., Vasiliu, C.I., Budrugaec, P., Stamatin, I. (2011). "Quantitative investigation of wood composition by integrated FT-IR and thermogravimetric methods," *Cellulose Chemistry and Technology* 45, 579-584.
- Esteves, B.M., Graca, J., Pereira, H.M. (2008). "Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood," *Holzforschung* 62:344-351, DOI: 10.1515/HF.2008.057.
- Esteves, B.M., and Pereira, H.M. (2009). "Wood modification by heat treatment: A review," *BioResources* 4(1), 370-404. DOI: 10.15376/biores.4.1.370-404.
- Fengel, D., and Wegener, G. (1989). *Wood Chemistry Ultrastructure Reactions*, Walter de Gruyter.
- Ferrari, S., Cuccui, I., and Allegretti, O. (2013). "Thermo-vacuum modification of some European softwood and hardwood species treated at different conditions," *BioResources* 8(1), 1930-2126. DOI: 10.15376/biores.8.1.1100-1109.
- Fujiwara, Y., Fujii, Y., Sawada, Y., and Okumura, S. (2004). "Assessment of wood surface roughness: A comparison between tactile roughness and three-dimensional parameters derived using a robust Gaussian regression filter," *Journal of Wood Science* 50(1), 35-40. DOI: 10.1007/s10086-003-0529-7
- Gaff, M., Kvietkova, M., Gasparik, M., Kaplan, L., and Barcik, S. (2015). "Effect of selected parameters on the surface waviness in plane milling of thermally modified birch wood," *BioResources* 10(4), 7618-7626. DOI: 10.15376/biores.10.4.6512-6521.

- Gerardin, P. (2015), "New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood: A review," *Annals of Forest Science*. DOI 10.1007/s13595-015-0531-4.
- Giebeler, E. (1983). "Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung", *Holz Roh-Werkst.* 41, 87-94.
- González-Peña, M., and Hale, M. (2009) "Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine, Part 2: Property predictions from colour changes," *Holzforschung* 63, 394-401. DOI: 10.1515/HF.2009.077.
- Gurău, L. (2004). *The roughness of sanded wood surfaces*, Doctoral Thesis, Forest Products Research Centre, Buckinghamshire Chilterns University College, Brunel University, UK.
- Gurău, L., Csiha, C., Mansfield-Williams, H. (2015). "Processing roughness of sanded beech surfaces," *European Journal of Wood and Wood Products* 73(3), 395-398. DOI: 10.1007/s00107-015-0899-8.
- Gurău, L., Irle, M., Câmpean, M., Ispas, M., Buchner, J. (2017). "Surface Quality of Planed Beech Wood (*Fagus sylvatica* L.) Thermally Treated for Different Durations of Time", *BioResources* 12(2), 4283-4301. DOI: 10.15376/biores.12.2.4283-4301.
- Hacibektasoglu, M**, Câmpean, M, Ispas, M, Gurău, L (2017). "Influence of Heat Treatment Duration on the Machinability of Beech Wood (*Fagus sylvatica* L.) by Planing," *BioResources* 12(2): 2780-2791. Online at: [http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_12\\_2\\_2780\\_Hacibektasoglu\\_Heat\\_Treatment\\_Duration\\_Machinability/5144](http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_12_2_2780_Hacibektasoglu_Heat_Treatment_Duration_Machinability/5144)
- Hacibektasoglu, M**, Porojan, M., Georgescu, S., Câmpean, M (2017). "MOR and MOE of Solid Wood Panels Made From Heat-Treated Beech Wood". In: Proceedings of International Conference „Wood Science and Engineering in the Third Millennium” - ICWSE 2017, pp. 8244-828
- Hacibektasoglu, M**, Câmpean, M, Ispas, M, Gurău, L (2015). "Upon the Machinability of Heat-Treated Wood". In: Proceedings of International Conference „Wood Science and Engineering in the Third Millennium” - ICWSE 2015, pp. 834-837
- Hakkou, M., Pétrissans, M., El Bakali, I., Gérardin, P., and Zoulalian, A. (2003). "Evolution of wood hydrophobic properties during heat treatment", In: *Abstracts of the First European Conference on Wood Modification*, Ghent, Belgium.
- Hill C. (2006). *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Hillis W (1984) "High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1. General consideration," *Wood Science and Technology* 18:281-293. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00353364>
- Ispas, M. (2013). "Experimental investigations on swelling pressure of natural and heat-treated ash wood," *Bulletin of Transilvania University of Brasov, Series II, Vol 6(55), No. 1*, pp. 55-62.

- Ispas, M, Gurău, L , Câmpean, M., **Hacibektasoglu, M**, Răcășan, S. (2016). "Milling of Heat-Treated Beech Wood (*Fagus sylvatica* L.) and Analysis of Surface Quality," *BioResources* 11(4): 9095-9111.
- Jämsä, S., and Viitaniemi, P. (2001). "Heat treatment of wood – Better durability without chemicals", In: *Proceedings of special seminar held in Antibes, France*.
- Kamden, D.P., Pizzi, A., Jermannaud, A. (2002). "Durability of heat-treated wood," *Holz als Roh-und Werkstoff* 60:1-6.
- Kaymakci, I., and Akyildiz, M.H. (2011). "Dimensional stability of heat treated Scots pine and oriental beech," *Pro Ligno* 7(4), 32-38.
- Klement, I., and Marko, P. (2009), "Color changes of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) during high temperature drying process," *Wood Research* 54(3), 45-54.
- Kol, H.S., and Ozbay, G. (2016). Adhesive bond performance of heat-treated wood at various conditions. *J Environ. Biol.*, 37(4):557-564.
- Kubs, J., Gaff, M., and Barcik, S. (2016). "Factors affecting the consumption of energy during the milling of thermally modified and unmodified beech wood," *BioResources* 11(1), 736-747. DOI: 10.15376/biores.11.1.736-747.
- Kvietkova, M., Gasparik, M., and Gaff, M. (2015). "Effect of thermal treatment on surface quality of beech wood after plane milling," *BioResources* 10(3), 4226-4238. DOI: 10.15376/biores.10.3.4226-4238.
- Li, M.Y., Cheng, S.C., Li, D., Wang, S.N., Huang, A.M., and Sun, S.Q. (2015). "Structural characterization of steam-heat treated *Tectona grandis* wood analyzed by FT-IR and 2D-IR correlation spectroscopy," *Chinese Chemical Letters* 26, 221-225. DOI: 10.1016/j.ccllet.2014.11.024.
- Mandic, M., Todorovic, N., Popadic, R., and Danon, G. (2010). "Impact of thermal modification and technological parameters of processing on cutting powers in milling wood processing," in: *Proceedings of 1<sup>st</sup> Serbian Forestry Congress "Future with Forests,"* Belgrade, Serbia, 11-13 November, pp. 1438-1453.
- Marinescu, I. (1980). *Uscarea și tratarea termică a lemnului. Volumul II*, Editura Tehnică, București.
- Militz, H. (2002a). "Heat treatment technologies in Europe: Scientific background and technological state-of-art," in: *Conference on Enhancing the Durability of Lumber and Engineered Wood Products*, Orlando, FL, USA.
- Mitani, A., and Barboutis, I. (2012). "Assessment of color changes and hygroscopic properties of beech (*Fagus sylvatica*) wood after thermal modification," in: *23<sup>d</sup> International Scientific Conference Wood is Good – With Knowledge and Technology to a Competitive Forestry and Wood Technology Sector*, pp. 111-118.
- Mitchell, P.H. (1988). „Irreversible property changes of small loblolly pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen," *Wood and Fiber Science* 20(3): 320–55.



- Nuopponen, M., Vuorinen, T., Jamsä, S., and Viitaniemi, P. (2004). "Thermal modification in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman spectroscopies", *J. Wood Chem. Technol.* 24, 13-26.
- Olărescu, C.M., and Câmpean, M. (2014). "Color change – mass loss correlations for heat treated wood," in: *CBU International Conference of Innovation, Technology Transfer and Education*, Prague, Czech Republic, pp. 345-352.
- Olărescu, C.M. (2015). Îmbunătățirea unor proprietăți ale panourilor reconstituite din lemn masiv prin realizarea acestora din frize termotratate în vederea utilizării acestora în condiții de exterior. Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Brașov.
- Pandey, K.K., Vuorinen, T. (2008). "Comparative study of photodegradation of wood by a UV laser and a xenon light source," *Polymer Degradation and Stability* 93, 2138-2146. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.08.013.
- Pecina, H., and Paprzycki, O. (1988). "Wechselbeziehungen zwischen der Temperaturbehandlung des Holzes und seiner Benetzbarkeit", *Holz Holzverwert* 40(1), 5-8.
- Petrissans, M., Philippe, G., El Bakali, I., and Serraj, M. (2003). "Wettability of heat-treated Wood", *Holzforschung* 57, 301-307.
- Repellin, V., Guyonnet, R. (2005). "Evaluation of heat-treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation to chemical composition", *Holzforschung* 59, 28-34.
- Roșu, D., Teaca, C.A., Bodirlau, R., Rosu, L. (2010). "FTIR and colour change of the modified wood as a result of artificial light irradiation," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 99(3), 144-149.
- SR EN 13353+A1:2011 Panouri de lemn masiv (SWP). Cerințe.
- SR EN 13354:2009 Panouri de lemn masiv (SWP). Calitatea încleierii. Metodă de încercare.
- SR EN 310:1996 Plăci pe bază de lemn. Determinare a modulului de elasticitate la încovoiere și a rezistenței la încovoiere.
- SR EN 314-1:2005 Placaj. Calitatea încleierii. Partea 1: Metode de încercare
- SR EN 318:2003 Plăci pe bază de lemn. Determinarea variațiilor dimensionale sub influența variațiilor umidității relative.
- SR EN 324-1:1996 Plăci pe bază de lemn. Determinare a dimensiunilor plăcilor. Partea 1: Determinare a grosimii, a lățimii și a lungimii.
- SR EN 326-1:1996 Plăci pe bază de lemn. Eșantionare, debitare și verificare. Partea 1: Eșantionare și debitare a epruvetelor și exprimare a rezultatelor încercării.
- Stamm, A., Burr, H., and Kline, A. (1946). „Stayb-wood – A heat stabilized wood,” *Journal of Industrial Engineering and Chemistry* 38(6): 630-634.
- Sundqvist, B. (2004). *Colour Changes and Acid Formation in Wood during Heating*, Ph. D. Dissertation, Lulea University of Technology, Skelleftea, Sweden.
- Syrjanen, T., and Oy, K. (2001). „Production and classification of heat treated wood in Finland, Review on heat treatments of wood.” In: Proceedings of the special seminar held in Antibes, France.

- Tan, P.L., Sharif, S., and Sudin, I. (2012). "Roughness models for sanded wood surfaces," *Wood Science and Technology* 46(1-3), 129-142. DOI: 10.1007/s00226-010-0382-y.
- ThermoWood Handbook (2003). Finnish Thermowood Association, Helsinki, Finland.
- ThermoWood production statistics (2017). Online at: <https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/uutiset/Productionstatistics2016.pdf>
- Tiemann, H. (1920). *Effect of different methods of drying on the strength and hygroscopicity of wood. The kiln drying of lumber*, 3rd Ed., Chap. 11, J.P. Lippincott Co.
- Timar, M.C. (2003). Ameliorarea lemnului. Editura Universității Transilvania din Brașov.
- Timar, M.C., Varodi, A., **Hacibektasoglu, M.**, and Campean, M. (2016). "Color and FTIR analysis of chemical changes in beech wood (*Fagus sylvatica* L.) after light steaming and heat treatment in two different environments," *BioResources* 11(4):8325-8343. DOI: 10.15376/biores.11.4.8325-8343.
- Tjeerdsma, B., and Militz, H. (2005). "Chemical changes in hydroheat wood: FTIR analysis of combined hydroheat and dry heat-treated wood", *Holz Roh-Werkst.* 63, 102-111.
- Todorovic, N., Popovic, Z., Miic, G., and Popadic, R. (2012). "Estimation of heat treated beechwood properties by color change," *BioResources* 7(1), 799-815. DOI: 10.15376/biores.7.1.0799-0815.
- Tolvaj, L., Faix, O. (1995). "Artificial ageing of wood monitored by DRIFT spectroscopy and CIE  $L^*a^*b^*$  colour measurements," *Holzforschung* 49(5), 395-404. DOI: 10.1515/hfsg.1995.49.5.397
- Tolvaj, L., Molnar, Z., Nemeth, R. (2013). "Photodegradation of wood at elevated temperature: Infrared spectroscopic study," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 121, 32-36. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2013.02.007
- Viitaniemi, P., Jämsä, S., and Viitanen, H. (1997). "Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products". United States Patent No. 5678324 (US005678324).
- Wagenführ, R. (2008). *Holzatlas*, Carl-Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich, Germany.
- Weiland, J., and Guyonnet, R. (2003). "Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy", *Holz Roh-Werkst.* 61, 216-220.
- Wetzig, M., and Niemz, P. (2012). "Farbänderung von thermisch behandeltem Holz bei unterschiedlicher Bewitterung," *Holz-Zentralblatt* 4, Januar 2012, pp. 17-18.
- Windeisen, E., Strobel, C., and Wegener, G. (2007). "Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood," *Wood Science and Technology* 41(6), 523-536. DOI: 10.1007/s00226-007-0146-5
- Yildiz, S. (2002a). "Effects of heat treatment on water repellence and anti-swelling efficiency of beech wood", In: *International Research Group Wood Pre*, Section 4- Processes, N<sup>o</sup> IRG/WP 02-40223.

## **Scurt rezumat**

Teza de doctorat intitulată "Cercetări privind fabricarea și unele proprietăți mecanice și tehnologice ale panourilor din lemn masiv termotratat de fag" abordează o temă de actualitate și originală în domeniul ingineriei lemnului, cu aplicabilitate directă în practica industrială.

Ideea acestei teze de doctorat a pornit de la dorința de diversificare a gamei de produse a unei întreprinderi de prelucrarea lemnului, prin evaluarea posibilității de adaptare a unei linii existente de panouri reconstituite din frize din lemn de fag aburite și uscate, în vederea producerii de panouri din lemn termotratat, pentru utilizarea în condiții de exterior (placări de fațade, blaturi de mese și bănci pentru parcuri, grădini etc.).

Rezultatele experimentelor realizate constituie date valoroase cu privire la proprietățile lemnului de fag tratat termic, dar și cu privire la proprietățile panourilor reconstituite din lemn de fag termotratat, care vin să îmbogățească literatura de specialitate.

Concluziile formulate în urma rezultatelor obținute sunt se referă la măsurile necesare pentru adaptarea liniei tehnologice existente (regimurile optime de prelucrare, utilajele suplimentare necesare) și costurile implicate, răspunzând astfel principalului obiectiv al tezei.

## **Short abstract**

The PhD-Thesis entitled "Researches on the manufacturing and some mechanical and technological properties of solid wood panels made from heat-treated beech wood" addresses a topical and original subject in the field of wood engineering, with direct applicability in industrial practice.

The idea of this doctoral thesis started from the desire to diversify the range of products of a wood processing company, by evaluating the possibility of adapting an existing technological line which manufactures solid wood panels from steamed and dried (untreated) wood, in order to produce panels from heat-treated wood, for outdoor uses (facade claddings, table tops and benches for parks, gardens etc.)

The results of the experiments performed are valuable data on the properties of the heat-treated beech wood, but also on the properties of the panels manufactured from heat-treated beech wood, which come to enrich the reference literature.

The conclusions drawn from the results obtained, refer to the measures necessary to be taken in order to adapt the existing technological line (optimum processing regimes, supplementary equipment required) and the costs involved, thus responding to the main objective of the thesis.