



**Universitatea  
Transilvania  
din Brașov**

# **TEZĂ DE ABILITARE**

**Titlu: Comportamentul mecanic al structurilor complexe  
lignocelulozice de tip Helmholtz**

**Domeniul: Inginerie mecanică**

**Autor: Conf. dr. ing. STANCIU Mariana Domnica  
Universitatea Transilvania din Brașov**

**BRAȘOV, 2022**

**CUPRINS**

<b>(A) Summary</b> .....	4
<b>(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei</b> .....	7
<b>(B-i) Realizări științifice și profesionale</b> .....	7
<i>Arhitectura instrumentelor muzicale cu corzi ca structuri lignocelulozice de tip Helmholtz: problematizare. Aspecte introductive</i>	
1. Problematika abordată de autoare și contribuțiile acesteia la dezvoltarea ei.....	8
2. Lucrările științifice ale autoarei, care fundamentează teza de abilitare.....	11
<b>Lista de notații și abrevieri</b> .....	16
<b>Capitolul 1. Modele geometrice, mecanice si dinamice ale instrumentelor muzicale cu corzi</b> .....	<b>19</b>
1.1 Elemente constructive privind instrumentele muzicale cu corzi: geometrie și structură ....	19
1.2 Modele geometrice, constructive și structurale ale violilor istorice.....	22
1.2.1 Particularități anatomice ale lemnului din construcția violilor.....	25
1.2.2 Modele geometrice ale violilor obținute prin investigare cu raze X .....	31
1.3 Mecanica structurilor lignocelulozice de tip Helmholtz la chitare și violi.....	37
1.3.1 Modelul analitic al structurilor lignocelulozice de tip Helmholtz în cazul vibrațiilor libere .....	37
1.3.2 Modelul analitic al structurilor simetrice lignocelulozice de tip Helmholtz în cazul vibrațiilor forțate .....	40
1.3.3 Modelul numeric al structurilor lignocelulozice de tip Helmholtz la plăcile de vioară	43
1.4 Concluzii privind arhitectura instrumentelor muzicale .....	57
<b>Capitolul 2. Determinarea proprietăților elastice și acustice ale lemnului utilizat în structurile complexe de tip Helmholtz</b> .....	<b>61</b>
2.1 Proprietățile elastice, acustice și dinamice ale lemnului de rezonanță .....	61
2.2 Determinarea proprietăților acustice și elastice ale lemnului de rezonanță românesc .....	67
2.2.1 Considerații teoretice privind propagarea undelor sonore în lemn .....	69
2.2.2 Materialul și metoda de investigare cu ultrasunete .....	73
2.2.3 Rezultatele privind proprietățile acustice și elastice ale lemnului de molid.....	78
2.2.4 Rezultate privind proprietățile acustice și elastice ale lemnului de paltin.....	85

2.2.5 Materialul și metoda de investigare cu ultrasunete prin metoda matricei de transfer intrinsecă .....	91
2.3 Determinarea modului dinamic prin analiza mecanică în regim dinamic (DMA).....	96
2.3.1 Considerații teoretice .....	96
2.3.2 Tipuri de materiale studiate .....	100
2.3.3 Metoda de testare .....	102
2.3.4 Determinarea răspunsului vâsco-elastic al probelor din lemn în condiții izoterme....	104
2.3.5 Determinarea răspunsului vâsco-elastic al probelor din lemn cu creșterea temperaturii .....	113
2.4 Concluzii privind proprietățile elastice și acustice ale lemnului de rezonanță.....	127
<b>Capitolul 3. Comportarea statică și dinamică a structurilor complexe lignocelulozice din construcția instrumentelor muzicale cu corzi.....</b>	<b>131</b>
3.1 Analiza mecanică a subansamblelor și ansamblelor din construcția chitarei, din perspectiva factorilor ce influențează comportarea lor în timp .....	131
3.1.1 Influența proceselor tehnologice asupra stabilității dimensionale a chitarelor .....	134
3.1.2 Influența umidității aerului asupra deformațiilor gâturilor de chitară .....	139
3.1.3 Concluzii privind fenomenele mecano-sorptive ale lemnului din construcția gâturilor de chitară.....	150
3.2 Determinarea deformațiilor specifice ale chitarei prin metoda tensometriei electrice rezistive.....	151
3.2.1 Materialul și metoda de investigare .....	151
3.2.2 Rezultate și discuții .....	153
3.2.3 Concluzii privind starea de tensiuni și deformații ale chitarei sub acțiunea corzilor .	157
3.3 Analiza dinamică a corpurilor de vioară cu parametri geometrici modificați .....	159
3.3.1 Structuri de viori investigate .....	159
3.3.2 Metoda de testare .....	161
3.3.3 Rezultate și discuții .....	163
3.3.4 Concluzii privind analiza modală a plăcilor de vioară în diferite stadii de asamblare	177
3.4 Analiza dinamică a viorilor istorice.....	181
3.4.1 Viori analizate .....	181

3.4.2 Metoda de testare .....	181
3.4.3 Analiza dinamică cu ciocanul de impact: rezultate și discuții .....	182
3.4.4 Analiza dinamică prin excitarea corzilor în stil Pizzicato: rezultate și discuții .....	186
<b>Capitolul 4. Contribuții personale și originale, direcții viitoare de cercetare .....</b>	<b>189</b>
4.1 Contribuții.....	189
4.2 Direcții viitoare de studiu .....	189
<b>Capitolul 5. Evoluția academică anterioară 2021 .....</b>	<b>190</b>
5.1 Educație .....	190
5.2 Activitatea didactică .....	191
5.2.1 Evoluția academică .....	191
5.2.2 Discipline predate .....	191
5.2.3 Calitatea actului didactic .....	192
5.2.4 Îndrumarea științifică a studenților .....	193
5.2.5 Alte activități cu studenții .....	195
5.2.6 Colaborarea în comisiile de îndrumare a doctoranzilor .....	196
5.2.7 Managementul didactic .....	196
5.3 Activitatea științifică.....	196
5.3.1 Proiecte de cercetare .....	196
5.3.2 Domenii de expertiză .....	197
5.4 Recunoașterea și vizibilitate .....	197
<b>Capitolul 6. Planul de dezvoltare a carierei didactice.....</b>	<b>198</b>
6.1 Direcții de dezvoltare a carierei didactice .....	198
6.2 Direcții de dezvoltare științifică .....	199
6.3 Activitatea publicistică .....	200
<b>(B-iii) Bibliografie.....</b>	<b>202</b>



## (A) Summary

The habilitation thesis entitled *The mechanical behavior of complex lignocellulosic structures of the Helmholtz type* presents the scientific and didactic achievements conducted by author after obtaining of the scientific title of *doctor (PhD)*, in the field of the *mechanical engineering* (July, 2009) and as Associate Professor at the Faculty of Mechanical Engineering, Transilvania University of Braşov. In the first part, the habilitation thesis approaches a research theme in the mechanical engineering field, which refers to the modeling, simulation and mechanical and dynamical testing of complex lignocelulloses structures type Helmholtz resonator, study cases - the strings muzical instruments (violins and classical guitar). Discussed here are only the scientific achievements that are the subject of the habilitation thesis and are published in the **11 ISI articles (Q1 and Q2), 14 scientific papers** presented at various national and international events, interim reports of projects coordinated by the author of the thesis, guidance of 3 bachelor's theses and 2 dissertation papers with topics related to the subject of the habilitation thesis. In addition to the topic of her doctoral thesis, the author dealt with research on the effect of accelerated aging of wood and lignocellulosic composite materials resulting in 4 articles ISI and 5 BDI, the study of visco-elastic properties of composites reinforced with glass fibers (published in 2 ISI articles, 5 BDI), research on the sound-absorbing and thermal insulating properties of composites (2 ISI articles, 3 BDI) and last but not least, studies on the mechanical and dynamic properties of metals (1 ISI article, 4 BDI).

The reason for choosing of the theme are based on: continuation and development of research directions initiated during the doctorate; the existence of a pole of processing resonant wood in the form of stringed muzical instruments, in Reghin, also called the city of violins; recognition of the quality of Romanian resonant wood and the mastery of Romanian luthiers through exports over 90% of factory production – S.C. Hora S.A. Reghin and S.C. Gliga Muzical Instruments S.A. .; opening the factory management to fundamental, applied and experimental research on the problems of stringed muzical instruments; the lack of coherent and consistent research in our country, on these mechanical structures with acoustic and artistic role.

In Chapter 1 intituled *Geometric, mechanical and dynamic models of stringed musical instruments*, one presents both the main parts of violin and guitar structures, the main wooden species used for them in comparison with old muzical instruments (studied case of violin) by means of imagistic method (X-ray scanning, computer tomography scanning). After identifying the geometric and constructive peculiarities of old and new violins, resulting in digitized anatomical models of wood structure and geometric models of violins, the mathematical model of Helmholtz-type structures is presented, assuming symmetrical and quasi-symmetrical systems, taking as a study case, the body of the classical guitar. Finally, the numerical models of the plates

from the construction of the violin obtained by the finite element method are presented, and the results of their modal analysis were correlated with those from the state of the art.

The research results presented in Chapter 1 were disseminated in 8 scientific articles (**4 papers in ISI quoted journals and 4 presented at international scientific events**) as well as in the progress reports on the projects coordinated by the author PN-III-P2-2.1-BG 85/2016 and PN-III-P2-2.1-PED-568PED / 2020. Detailed information on the dissemination of results is presented at the end of Chapter 1. The scientific contribution was as “author principal ”or“ corresponding author ”for the vast majority of these publications.

The chapter 2, *Determination of the elastic, dynamic and acoustic properties of wood used in complex Helmholtz structures*, is dedicated to experimental investigations on the elastic, acoustic and dynamic properties of the raw material: spruce wood (*Picea Abies* L. Karst), maple wood (*Acer pseudoplatanus* L.), species used for the body of muzical instruments and acacia wood (*Robinia pseudacacia* L.) used for the fretboard of some categories of classical guitars. The specimens of the two studied resonance species were divided into four anatomical quality groups, in accordance with the quality classes of muzical instruments (class A - maestro, class B - professional, class C - student, class D - school). After defining the main elastic / acoustic / dynamic quantities that are specific to the resonant wood, the results regarding the speed of sound propagation in wood are presented, the elastic properties (modulus of elasticity on the three directions of wood) determined by two methods: the method with ultrasound and that of the intrinsic transfer matrix, all results being correlated with the anatomical structure of the wood (anatomical model). The last subchapter (2.3) is dedicated to the determination of the dynamic modulus by mechanical analysis in dynamic regime, in isothermal conditions and with temperature variation, experimental tests that highlighted the visco-elastic behavior of wood from spruce, maple, acacia species.

The results of the research in Chapter 2 were disseminated in 9 scientific papers (4 ISIs different from those presented in Chapters 1 and 5 ISI Proceedings), to which can be added the author's contribution as a supervisor of a dissertation (from the Faculty of Mechanical Engineering 2021) and the second bachelor's thesis (from the Faculty of Wood Engineering 2015). Also, parts of chapter 2 constituted interim reports of projects PN-III-P2-2.1-BG 85/2016 and PN-III-P2-2.1-PED-568PED / 2020. Detailed information on the dissemination of results is presented at the end of Chapter 2.

The **chapter 3, Statical and dynamic behavior of complex lignocellulosic structures in the construction of stringed muzical instruments** is dedicated to presenting the results of applied research undertaken within the BG59/2016 and PED568/2020 research projects. In the first section, the mechanical analysis of subassemblies and ensembles in guitar construction, from the

perspective of factors that influence their behavior over time are presented, being analysed the mechanical behaviour of guitar neck as a cantilever beam, with variable section from stratified lignocellulosic materials. The relativ air humidity was varied to observe the mechano-sorptive effects of wood in case of free structures and cantilever beams. Then, the stresses and strains states of guitar when the strings are tension, were determined by means of electrical - resistance strain gage. Finally, the dynamical behaviour of new and old violins as complex lignocellulosic structures were investigated, the results being correlated with wood species, thickness of violin plates and symmetry of structure.

The results of the research in Chapter 3 were disseminated in 8 scientific papers (3 ISIs different from those presented in Chapters 2 and 3 and 5 presented at scientific events), to which can be added the author's contribution as a guide to two dissertation papers. at the Faculty of Mechanical Engineering 2021. Also, parts of chapter 3 constituted interim reports of the projects PN-III-P2-2.1-BG 85/2016 and PN-III-P2-2.1-PED-568PED / 2020. Detailed information on the dissemination of results is presented at the end of Chapter 3. The scientific contribution was the "lead author" or "correspondent author" for the vast majority of these publications.

**Chapter 4** is dedicated to the presentation of personal and original contributions and future research directions specific to the topic presented in the habilitation thesis

**Chapter 5** presents the evolution and achievements on a professional level (academic, didactic and scientific), and in **chapter 6** is detailed the professional academic development plan.

## **(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei**

### **(B-I) Realizări științifice și profesionale**

*Arhitectura instrumentelor muzicale cu corzi ca structuri lignocelulozice de tip Helmholtz: problematizare. Aspecte introductive*

#### **1. Problematika abordată de autoare și contribuțiile acesteia la dezvoltarea ei**

Calitatea acustică a instrumentelor muzicale construite în România este apreciată pe plan internațional atât dorită calității materiei prime – lemnul de rezonanță (molid și paltin) cât și calității produselor fabricate la noi în țară, mărturie fiind exportul de 90% din instrumentele muzicale produse. Epicentrul acestei industrii este în inima României, în orașul Reghin. Prima fabrică de instrumente muzicale, S.C. Hora S.A. Reghin, a fost înființată încă din 1951 (inițial sub denumirea de Întreprinderea Forestieră de Industrializare a Lemnului, în care se fabricau de la planoare și bărci, până la instrumente muzicale). Ulterior, în anul 1991 a fost înființată a doua fabrică din Reghin, S.C. Gliga Instrumente Muzicale S.A., profilată pe producția de instrumente cu corzi și arcuș. Pe lângă cele două fabrici, activează numeroși lutieri formați în cadrul acestor două întreprinderi. În cinstea promotorului Roman Boianciuc care a pus bazele primei secții de instrumente cu coarde în cadrul IPL Reghin 1951, a fost înființată Asociația Artiștilor Lutieri din România, în 1990.

Cercetările teoretice și experimentale privind comportamentul mecanic, elastic și acustic al structurilor complexe de tipul instrumentelor muzicale cu corzi se bazează pe interdisciplinaritatea dintre domeniul *ingineriei mecanice* cu ingineria forestieră, ingineria materialelor, cea industrială, domeniul fizicii și nu în ultimul rând domeniul artistic. Această direcție de cercetare își are originile în tematica tezei de doctorat intitulată ”*Cercetări privind optimizarea formei și structurii plăcilor compozite lignocelulozice supuse la solicitări ciclice, cu aplicații la instrumentele muzicale*” realizată sub îndrumarea profesorului univ. dr. ing. Curtu Ioan. Ulterior aceasta a fost dezvoltată și aprofundată de la studiul materiei prime (lemnul din construcția instrumentelor muzicale ca structură, proprietăți elastice, dinamice și acustice), până la structuri complexe, ca produse finite, instrumentele muzicale cu corzi ciupite și cu arcuș.

Fiind un domeniu atât de complex, există numeroase cercetări pe plan național și internațional care au evidențiat modificările comportamentului mecanic, dinamic și acustic ale

lemnului de rezonanță metamorfozat în structurile complexe lignocelulozice de tipul viorilor și chitarelor. De asemenea, ca urmare a dezvoltării tehnice, studiile actuale au reușit să creeze o punte temporală între instrumentele istorice și cele actuale, evidențiind atât tehnicile de prelucrare a lemnului din diferite perioade istorice cât și modificările chimice și morfologice ale lemnului îmbătrânit, cu efecte asupra calității acustice a instrumentelor muzicale cu corzi. Toate aceste cercetări au ca rol fie de explicare a unor fenomene mecanice, dinamice, chimice ce afectează, pozitiv sau negativ, calitatea instrumentelor muzicale, fie constituie puncte de plecare în dezvoltarea unor modele inovatoare adaptate vremurilor actuale: modele numerice, fizice, mecanice, tehnologice ș.a., toate având ca rol îmbunătățirea performanțelor acustice ale instrumentelor muzicale.

Calitatea instrumentelor muzicale este determinată de:

- *caracteristicile constructive* (respectiv corelarea dimensiunilor și formei ansamblului cu caracteristicile acustice dorite);
- *proprietățile materialelor* (respectiv calitatea materialelor lignocelulozice utilizate, proprietățile vâsco-elastice a acestora și a finisajelor);
- *tehnologia de execuție* (precizia de execuție a mașinilor unelte utilizate în prelucrarea diferitelor sortimente și piese);
- *experiența utilizatorilor* (calitatea acustică a sunetelor emise de instrumentul respectiv);
- *reologia materialelor* (comportarea în timp a structurii mecanice prin stabilitatea dimensională și geometrică, deformații mici la solicitări variabile).

<b>Prima problemă abordată</b>	Forma geometrică a structurilor complexe lignocelulozice de tip Helmholtz corelate cu proprietățile anatomice, elastice și acustice ale speciilor lemnoase din construcția acestora, oferă instrumentelor muzicale potențialul calitativ necesar actului artistic. Între cercetători, nu există încă un consens privind modelul optim al acestor instrumente muzicale, fapt datorat în mare parte diversității lemnului de rezonanță din punct de vedere al proprietăților sale acustice. De aceea, corelarea factorilor geometrici, de material și tehnologici poate duce la obținerea unor modele inovative de structuri rezonatoare cum sunt corpurile de vioară și cele de chitară.
<i>Contribuția autoarei tezei</i>	Identificarea modelelor constructive ale viorilor istorice, prin metode de analiză imagistică, a evidențiat diversitatea

	<p>dimensională și geometrică a plăcilor de vioară (față și spate), respective corpurilor de vioară, modalitățile tehnologice de îmbinare a plăcilor cu eclisele și contraecliselor, a caracteristicilor anatomice ale lemnului îmbătrânit, făcând posibilă plasarea temporală și geografică a viorilor analizate. Rezultatele au fost publicate în [48; 173]. Plăcile de vioară au fost modelate prin metode numerice, abordând trei ipoteze ale proprietăților elastice ale lemnului – material izotrop; material izotrop transversal; material ortotrop. Rezultatele au evidențiat efectul anizotropiei lemnului asupra comportării dinamice a plăcilor din lemn de paltin și molid, fiind publicate în [161; 162; 169; 172].</p> <p>Elementele de rigidizare, cum sunt bara bass și popicul la vioară sau sistemele de bare la chitarele clasice, contribuie la creșterea masei și rigidității structurii, influențând starea de echilibru (tensiuni și deformare) și suprafața vibrațională cu efect asupra radiației acustice a instrumentului muzical. Prin includerea acestor caracteristici, un model rigid se transformă într-un sistem neliniar complex. Rezultatele au fost publicate în [169; 170; 172].</p>
<p><b>A doua problemă abordată</b></p>	<p>Din punct de vedere al materialelor utilizate în construcția instrumentelor muzicale cu corzi (atât viori cât și chitare clasice), cele mai importante specii sunt <i>lemnul de molid de rezonanță</i> și <i>lemnul de paltin de rezonanță</i>, cele două categorii fiind xilotipuri ale speciilor de proveniența: <i>Picea abies</i> L. (Karst) (molid) și <i>Acer pseudoplatanus</i> L. (paltin) [48; 62; 63]. Clasificarea lemnului în clase de calitate anatomică și morfologică, realizată de către lutieri are la bază următorii descriptori: lățimea totală a inelului, proporția lemnului târziu în cadrul inelului annual, diferența de lățime între două inele de creștere consecutive, regularitatea lățimilor inelului. Aceasta a incitat interesul privind determinarea proprietăților elastice și acustice ale</p>

	xilotipurilor respective, în vederea corelării structurii lemnului cu calitatea acustică a instrumentelor muzicale.
<b>Contribuția autoarei tezei</b>	Corelații între structura anatomică a lemnului și parametrii elastici, dinamici și acustici ai structurilor lignocelulozice de tip Helmholtz ale căror rezultate au fost publicate în [48; 62; 63; 71; 112; 113; 116; 166; 168; 169; 173] au evidențiat că datorită anizotropiei lemnului de molid, modulul de elasticitate longitudinală pe direcția tangențială înregistrează cea mai mare dispersie. Viteza de propagare a undelor sonore în direcție radială, coeficientul lui Poisson în planul longitudinal radial, viteza de propagare a undelor sonore în direcția longitudinală și modulul de elasticitate longitudinală sunt cele mai importante proprietăți care diferențiază clasele de calitate ale lemnului de molid de rezonanță. Cea mai bună corelație se obține între viteza sunetului în direcție radială și tangențială. În privința paltinului de rezonanță, între cel cu fibra creată și cel cu fibra dreaptă există diferențe sensibile atât din punct de vedere al proprietăților elastice cât și din punct de vedere al proprietăților acustice.
<b>A treia problemă abordată</b>	Având în vedere că cercetările științifice au ca obiectiv transferul cunoașterii către agenții economici, respectiv atingerea unui nivel de maturitate științifică al căror rezultate sunt validate atât în laborator cât mai ales în fabrică, studiile din domeniul ingineriei mecanice aplicate vizează analiza factorilor ce influențează calitatea acustică și integritatea structurală a produselor finite de tip Helmholtz. Astfel, fenomenele explicate teoretic, prin studii analitice și/sau numerice nu pot surprinde influențelor factorilor din producției sau a unor fenomene reologice ce se produc asupra structurilor, cum ar fi aspectele <i>tehnologice</i> – abateri de la planeitate, rectilinitate ș.a.; <i>influența structurii anizotropice a lemnului</i> utilizat în structurile lignocelulozice de tip Helmholtz care duc la deformări ce depășesc condițiile de rigiditate necesare; <i>mecanice</i> – apariția fenomenelor

	reologice (relaxarea lemnului după ce a fost supus la solicitările din timpul prelucrărilor mecanice, detensionarea/ tensionarea din cadrul subansamblelor și a ansamblului instrumentelor muzicale cu corzi; <i>condițiile ambientale</i> de păstrare a instrumentelor muzicale – umiditatea lemnului, umiditatea și temperatura mediului ambiant.
<i>Contribuția autoarei tezei</i>	Investigațiile privind influența variației de umiditate relativă a aerului asupra stabilității dimensionale a lemnului au fost publicate în [158; 160; 165; 171; ], evidențindu-se histerzismul umflării și contragerii structurilor complexe lignocelulozice. S-au investigat structuri de grinzi stratificate, ranforsate cu bare din diferite materiale și diferite secțiuni. Aplicarea unor tratamente chimice de suprafață cum ar fi expunerea lemnului de salcâm folosit pentru gâturile de chitară, la vapori de amoniac cu diferite concentrații, a dus la modificări ale culorii lemnului cu aproximativ 20% față de probele martor; creșterea densității cu aproape 20% (pentru o concentrație de 10% cu expunere de 60 zile), creșterea modulului elastic determinat în regim dinamic, cu aproape 60%, respectiv modificarea comportamentului vâscos odată cu creșterea temperaturii, rezultate publicate în [158]. Fiind un polymer natural, îmbătrânirea lemnului duce la modificări morfologice și elastice ale pereților celulari, cu efecte asupra suprafeței lemnului, a proprietăților vâsco-elastice și acustice ale lemnului [158; 168].

## 2. Lucrările științifice care fundamentează teza de abilitare

Rezultatele cercetărilor întreprinse de autoare după susținerea tezei de doctorat și din care a fost realizată teza de abilitare, constau din **11 articole științifice** publicate în reviste ISI indexate Web of Science, **6 articole științifice** publicate în reviste indexate în baze de date internaționale, BDI, **10 participări la conferințe internaționale**, rapoartele științifice ale celor două proiecte coordonate de autor: Proiect **PN-III-P2-2.1-BG 85/2016** *Soluții integrative de creștere a performanței economice prin optimizarea proprietăților rigido-elastice și stabilității structurale a chitarelor de fabricație românească – SINOPTIC* (2016-2018); **PN-III-P2-2.1-PED-2019-2148**,



contract nr. **568PED/2020** *Modele inovative de viori comparabile acustic și estetic cu viorile de patrimoniu – MINOVIS* (2020 – 2022).

Pe lângă aceste publicații din domeniul tezei de abilitare, autoarea are numeroase contribuții și publicații și în domeniul materialelor compozite, a comportării mecanice a barelor metalice și a altor tipuri de structuri din lemn, totalizând un număr de 23 articole ISI, 41 articole BDI, peste 30 participări la conferințe/congrese.

### **Monografii**

1. **Stanciu M.D.**, Curtu I. (2012) *Dinamica structurii chitarei clasice*, Ed. Universității Transilvania din Brașov, ISBN:9786061900749, pp. 212
2. **Stanciu M.D.**, Curtu I., Terciu O.M., (2014) *Compozite Lignocelulozice – Aplicații in Industria Automobilelor*, Ed. Universitatii Transilvania din Brasov ISBN:9786061905188, pp:238

### **ISI - în domeniul tezei de abilitare**

1. **Stanciu M.D.**, Bucur V., Valcea C. S., Savin A., Sturm R., (2018) *Oak particles size effects on viscous-elastic properties of wood polyester resin composite submitted to ultraviolet radiation*, Wood Sci Technol 52 (2): 365-382 (2018).
2. **Stanciu, M.D.**; Vlase, S.; Marin, M. (2019) *Vibration Analysis of a Guitar considered as a Symmetrical Mechanical System*. Symmetry 2019, 11, 727.
3. **Stanciu M.D.**, Bucur V., Munteanu M.V., Georgescu S.V., Năstac S.M. (2019) *Moisture induced deformation in the neck of a classical guitar*, in Holzforschung, 2019, Vol 73(4):371-379
4. Dinulică, F.; Albu, C.T.; Vasilescu, M.M.; **Stanciu, M.D.** (2019) *Bark features for identifying resonance spruce standing timber*, Forests 2019, 10(9) Article number 799 DOI: 10.3390/f10090799
5. **Stanciu, M.D.**; Cosereanu, C.; Dinulica, F.; Bucur, V. (2020) *Effect of wood species on vibration modes of violins plates*. Eur. J. Wood Prod. 2020, 78, 785-799
6. **Stanciu, M.D.**; Șova, D.; Savin, A.; Iliăș N.; Gorbacheva, G. (2020) *Physical and Mechanical Properties of Ammonia- Treated Black Locust Wood*, Polymers, **2020**, 12, 377; doi:10.3390/polym12020377
7. Gliga V. Gh. **Stanciu MD**, Nastac S.M, Campean M., *Modal Analysis of Violin Bodies with Back Plates Made of Different Wood Species*, BioResources, 2020, vol 15(4), pp. 7687 – 7713.

8. Mihalcica M., **Stanciu MD**, Vlase S,(2020) *Frequency Response Evaluation of Guitar Bodies with Different Bracing Systems*, *Symmetry*, 2020, 12, 795; doi:10.3390/sym12050795 <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/795>
9. **Stanciu, M.D.**; Mihălcică, M.; Dinulică, F.; Nauncef, A.M.; Purdoiu, R.; Lăcătuș, R.; Gliga, G.V. X-ray Imaging and Computed Tomography for the Identification of Geometry and Construction Elements in the Structure of Old Violins. *Materials* 2021, 14, 5926. <https://doi.org/10.3390/ma14205926>
10. Dinulică, F.; **Stanciu, M.D.**; Savin, A. Correlation between Anatomical Grading and Acoustic–Elastic Properties of Resonant SpruceWood Used for Muzical Instruments. *Forests* 2021, 12,1122. <https://doi.org/10.3390/f12081122>
11. Mihalcică M., **Stanciu M.D**, Năstac S.M., Dinulica F., Nauncef A.M., Roșca I.C., Savin A., Signature Modes of Old and New Violins with Symmetric Anatomical Wood Structure, *Appl. Sci.* 2021, 11(23), 11297; <https://doi.org/10.3390/app112311297>

#### ***BDI - în domeniul tezei de abilitare***

1. **Stanciu M.D.**, Curtu I., Groza M., Savin A., (2017) *The Evaluation Of Rheological Properties Of Composites Reinforced With Hemp, Subjected To Photo And Thermal Degradation*, CONAT 2016 International Congress Of Automotive And Transport Engineering, DOI 10.1007/978-3-319-45447-4\_62, Pages: 565-574.
2. **Stanciu M. D.**, Ardeleanu A.F. Teodorescu Draghicescu H, (2018) *Reverse engineering in finite element analysis of the behaviour of lignocellulosic materials subjected to cyclic stresses*, in *Procedia Manufacturing* 22 (2018), pp 65-72, 11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2017, 5-6 October 2017, Tirgu Mures, Romania <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918303056>
3. **Stanciu, M.D.**; Năstac, S; Gliga, V Gh; Câmpean, M; Bucur, V. (2020) *Effect of the wood anisotropy on eigenmodes and eigenvalues using finite element analysis – case of violin plates*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 997, The 9th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering - ACME 2020 4-5 June 2020, Iași, Romania, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/997/1/012105/pdf>
4. **Stanciu, M D**; Dinulică F; Cîrstea I C, (2020) *Physical and mechanical characterization of resonance spruce (Picea Abies L)*, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 916 (2020) 012112 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/916/1/012112.
5. Munteanu M.V., Stanciu M.D., Modrea A., (2020) Behavior of laminated wooden beam with variable section subjected to bending, in *Procedia Manufacturing Elsevier*, 46: 899-905, 10.1016/j.promfg.2020.05.006,

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920314542>

6. Stanciu M.D., Bârsănescu P., Goanță V., Savin A. (2020) Experimental determination of stress and strain states of the guitar's wood structure, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 916 (2020) 012113 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/916/1/012113, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/916/1/012113/pdf>

#### ***Conferințe Internaționale/Naționale - în domeniul tezei de abilitare***

1. Gliga V.Gh., **Stanciu M.D.**, Nastac S.M., Dinulica F., Campean M., Study concerning the natural frequency and damping factor of the top and back plate for different types of violins, ICWSE 7-9.11.2019, Brasov
2. **Stanciu M.D.**, Curtu I., Moisan E., Man D., Savin A., Dobrescu G., Rheological Behaviour of Curly Maple Wood (*Acer Pseudoplatanus*) Used for Back Side of Violin, The 10th International Conference "Wood Science and Engineering in the Third Millennium" - ICWSE 2015, ISSN 1843-2689, p. 65-72
3. **Stanciu M.D.**, Curtu I., Pop C., Man D., Evaluation of Residual Strains on Acoustic Quality of Guitar, The 10th International Conference "Wood Science and Engineering in the Third Millennium" - ICWSE 2015, Brasov, 5-7 noiembrie 2015, ISSN 1843-2689, p. 73-80
4. **Stanciu M.D.**, Rozina Steigmann, Valcea C, (2017) *The evaluation of the surface energy of the lignocelluloses composite exposed to UV radiation*, in Proceeding of The 14th International Conference of Slovenian Society for Non –Destructive Testing: "Application of Contemporary non-destructive testing in Engineering", 4-6.09.2017, Portoroz, Slovenia, pp. 117 - 125
5. **Stanciu M.D.**, Teodorescu Draghicescu H., Ursarescu A., Labont P.C., Bit C., (2017) Numerical And Experimental Approach Of Behaviour Of The Wood Based Composite Subjected To Cyclic Bending, in Proceeding of *International Conference "Wood Science and Engineering in the Third Millennium" - ICWSE 2017*, p.253-260
6. **Stanciu M.D.**, Gliga V. Gh., Georgescu S.V., Savin A., Dobrescu G, Non-Destructive Determination of the Elastic and Acoustic Properties of Resonant Wood Used, in the Manufacture of Violins Modern Technologies in Industrial Engineering ModTech2021, 23 – 26.06.2021.
7. Mihalca, M.; **Stanciu M.D.**; Gliga V. Gh.; Campean M.; Dinulică F.; Nastac S. Experimental Modal Analysis of Violin Bodies with Different Structural Patterns of

Resonance Spruce, in the Manufacture of Violins Modern Technologies in Industrial Engineering ModTech2021, 23 – 26.06.2021.

8. **Stanciu M.D.**, Şova D., Bârsănescu P., Goanță V., Savin A. Experimental determination of stress and strain states of the guitar's wood structure”, International Conference ”FOREST COMPLEX IN THE DIGITAL ECONOMY”, Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, 02 - 05 decembrie 2019, Moscova, Federația Rusă.
9. **Stanciu M.D.**, Savin A., Faktorova F., Nauncef A., Dinulica F., Gliga V. Gh. Marc R., Purdoiu R., Lăcătuș R Mihalcica M. X-ray and computer tomography imaging for identification of geometry and construction elements in the structure of old violins, the 13th International Conference Art21 on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage, Buenos Aires, Argentina 3 – 5 November 2021
10. **Stanciu M.D.**, Mihălcică M., Roșca I.C., Năstac S., Guțăș V., Identification of Frequencies Spectrum of Old And New Violins Using Dynamic Analysis, COMEC 2021, Brașov, ROMANIA, 21-23 October 2021

**Abrevieri și notații****Capitolul I**

$RI$	<i>index de regularitate a inelelor anuale</i>
$TRW$	<i>lățimea inelelor anuale (mm)</i>
$EWW$	<i>lățimea lemnului timpuriu (mm) (engl. early wood width)</i>
$LWW$	<i>lățimea lemnului târziu (mm) (engl. late wood width)</i>
$CWL$	<i>lungimea de undă a fibrei crețe a lemnului de paltin (engl. curly wood length)</i>
$W$	<i>parametru generat de testul statistic de normalitate Shapiro – Wilk</i>
$p$	<i>valoare a probabilității de transgresiune asociată testului respectiv, fiind o măsură a gradului de încredere în rezultatele testului (un rezultat este considerat semnificativ statistic, dacă are o valoare <math>p</math> egala sau mai mica cu valoarea semnificativa. in general, se scrie <math>p \leq 0.05</math>.</i>
$H (K - W)$	<i>parametru generat de testul neparametric Kruskal-Wallis</i>
$R$	<i>coeficientul de corelație a rangurilor Spearman</i>
$CT$	<i>computer tomograf</i>
$[M]$	<i>matricea de inerție</i>
$[K]$	<i>matricea de rigiditate</i>
$M_e$	<i>matricea de inerție a unei jumătăți a structurii</i>
$M_w$	<i>matricea de inerție a întregii structuri</i>
$K_e$	<i>matricea de rigiditate a unei jumătăți a structurii</i>
$K_w$	<i>matricea de rigiditate a întregii structuri</i>
$K_c$	<i>matricea de rigiditate</i>
$x_l, x_r, x_w$	<i>coordonatele</i>
$\{x\}$	<i>vectorul total al coordonatelor independente</i>
$\omega$	<i>pulsația proprie (rad/s)</i>
$A, B, C, L, Z$	<i>matricile polinomiale pătrate cu coeficienți complecși, de mărime <math>n</math>,</i>
$M_e$	<i>matricea de inerție a unei jumătăți din structura simetrică;</i>
$M_w$	<i>matricea de inerție a elementelor de legătură;</i>
$K_e$	<i>matricea de rigiditate a unei jumătăți din structura simetrică;</i>
$K_r$	<i>matricea de rigiditate a elementelor de legătură;</i>
$K_c$	<i>matricea de rigiditate a unei jumătăți din structura simetrică și a elementelor de legătură;</i>
$[\phi]$	<i>matricea modală</i>
$\{\Phi\}_1 \{\Phi\}_2 \dots \{\Phi\}_n$	<i>modurile de vibrație pentru sistem</i>
$q_1, q_2, \dots, q_n$	<i>coordonatele canonice</i>
$\{\theta\}$	<i>soluția sistemului la vibrații forțate</i>
$\{Q_f\}$	<i>excitația sistemului cu frecvența <math>f</math></i>
$f$	<i>frecvența (Hz)</i>
$A_0, A_1$	<i>modul de vibrație a aerului din cavitatea de tip Helmholtz</i>
$CBR$	<i>modul corpului (rhomboidal)</i>
$B_1^-, B_1^+$	<i>modul de rezonanță ale corpului principal</i>
$L$	<i>direcția longitudinală a lemnului (notată și cu <math>x</math> sau 1)</i>
$R$	<i>direcția radială a lemnului (notată și cu <math>y</math> sau 2)</i>
$T$	<i>direcția tangențială a lemnului (notată și cu <math>z</math> sau 3)</i>
$\rho$	<i>densitate (<math>\text{kg/m}^3</math>) sau (<math>\text{g/cm}^3</math>)</i>
$E$	<i>modulul de elasticitate longitudinală (MPa) sau (GPa);</i>
$E_L$	<i>modulul de elasticitate longitudinală în direcție longitudinală</i>
$E_R$	<i>modulului de elasticitate longitudinală în direcție radială</i>
$E_T$	<i>modulului de elasticitate longitudinală în direcție tangențială</i>

$G$	modulul de elasticitate transversal (de forfecare) (MPa) sau (GPa);
$G_{LR}$	modulul de elasticitate transversal în planul longitudinal – radial
$G_{LT}$	modulul de elasticitate transversal în planul longitudinal - tangențial;
$G_{RT}$	modulul de elasticitate transversal în planul radial – tangențial
$\nu$	coeficientul lui Poisson sau coeficientul contracției transversale
$\nu_{LR}, \nu_{RT}, \nu_{TL}$	coeficienți ai contracției transversale la lemn, în ipoteza celor trei plane de simetrie elastică
$\sigma_L, \sigma_R$ și $\sigma_T$	tensiunea normală în direcția L, R sau T
$\tau_{LR}, \tau_{RT}$ și $\tau_{LT}$	tensiunile tangențiale în planele LR, RT, LT
$\varepsilon_L, \varepsilon_R$ și $\varepsilon_T$	deformațiile specifice liniare
$\gamma_{LR}, \gamma_{RT}$ și $\gamma_{LT}$	deformațiile specifice unghiulare
$V$	viteza de propagare a undelor sonore în lemn (m/s)
$h$	grosimea plăcii (mm)
$\lambda$	lungimea de undă (nm)
FEA	analiza cu elemente finite (Finite elements analysis)
EXP	analiza experimentală
Izo	izotrop (ipoteza privind proprietățile de material în analiza FEA)
IzoT	izotrop transversal (ipoteza privind proprietățile de material în analiza FEA)
Orto S	ortotrop simetric (ipoteza privind proprietățile de material în analiza FEA)
#1; #2...	moduri proprii

## Capitolul 2

$E_{din}$ sau $G_{din}$	modulul dinamic sau modulul complex (MPa)
$E'$ sau $G'$	modulul de conservare (exprimând comportarea elastic a materialului); (MPa)
$E''$ sau $G''$	modulul de pierdere (exprimând comportarea vâscoasă a materialului), $i$ – unitatea imaginară (MPa)
$\tan\delta$	tangenta unghiului de defazaj $\delta$ (amortizarea)
$E'/\rho$	modulul de elasticitate specific calculat ca raportul dintre modulul de elasticitate dinamic și densitate, (MPa*m/kg <sup>3</sup> sau m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$f_r$	frecvența de rezonanță (Hz)
$R_a$ [57] sau $z$ [15; 16]	rezistența (impedanța) acustică specifică (N*s/m <sup>3</sup> )
$K$ [49; 64] sau $R$ [141]	radiația acustică (raportul dintre viteza de propagare a sunetului și densitatea materialului) (m <sup>4</sup> /s*kg)
$\Delta$	decrementul logaritmic al amortizării vibrațiilor
$A_1$ și $A_2$	două valori succesive ale amplitudinii
$A_0$	amplitudinea la timpul $t = 0$
$\zeta$	factorul de amortizare al vibrațiilor
$t$	timpul (s);
$T_a$	perioada vibrației (oscilației)
$f_{r1}; f_{r2}$	două frecvențe extrase la 0.707 din amplitudinea frecvenței de rezonanță,
$Q$	factorul de calitate
ACE	Eficiența conversiei acustice
US	ultrasunete
$[\sigma_{ij}]$	tensorul tensiunilor acționând pe direcția $i$ și cu normala pe direcția $j$
$[C_{ijkl}]$	tensorul de elasticitate;
$[\varepsilon_{kl}]$	tensorul deformațiilor.
$\Gamma$	tensorul Kelvin – Christoffel

$\delta_{ik}$	tensorul Kronecker (dacă $i = k$ , atunci $\delta_{ik} = 1$ , iar dacă $i \neq k$ , atunci $\delta_{ik} = 0$ );
$P_m$	componenta vectorului unitar în direcția deplasării (polarizării);
$v_{fază}^2$	viteza de fază
$L^*$	luminozitatea măsurată în procente (%);
$a^*$	gradul de roșu, dacă valoarea indicată este pozitivă (+) sau gradul de verde, dacă valoarea indicată este negativă (-)
$b^*$	gradul de galben dacă valoarea indicată este pozitivă (+) sau gradul de albastru dacă valoarea indicată este negativă (-)
$\Delta E^*$	schimbarea generală a culorii
$l$	lungimea mediului (mm)
$k$	numărul de undă
$D_{12}$	matricea discontinuității
$A_2$	amplitudinea undei transmise (unități arbitrare u.a.)
$B_2$	amplitudinea undei reflectate după transmisie
$P$	matricea de propagare care descrie schimbările de fază în timpul propagării
$z_1; z_2$	impedanța acustică a celor două materiale ( $N*s/m^3$ )
DMA	analiza mecanică în regim dynamic (engl. Dynamic mechanical Analysis)
$\eta$	vâscozitatea absolută sau newtoniană ( $Ns/m^2$ ) sau ( $Pa*s$ )
$T_\gamma$	temperatura la care se produc mișcări ale legăturilor interatomice manifestate prin deformații de întindere (°C)
$T_\beta$	temperatura la care încep să se producă mișcări ale grupărilor laterale din legăturile chimice (°C)
$T_g$	temperatura de tranziție (°C)
$T_i$	temperatura de topire (°C)
$M_{iR}$	moment de încovoiere radial sau semiradial ( $N*mm$ )
$M_{iSR}$	moment de încovoiere semiradial ( $N*mm$ )
DSC	calorimetrie cu scanare diferențială (engl. Differential Scanning Calorimetry)
TMA	analiza termomecanică (engl. Thermomechanical Analysis)
LVDT	transformator diferențial liniar variabil (engl Linear Variable Differential Transformer)
SEM	microscopul cu scanare electronică

### Capitolul 3

$m$	masa (g)
RH	umiditatea relativă a aerului (engl. Relative humidity)(%)
MC	conținutul de umiditate a lemnului (engl. Moisture content) (%)
$h_A; h_B; h_C$	abaterea de la planeitate (mm)
$\Delta m_i$	diferența de masă calculată procentual (%)
$I_z$	Moment de inerție ( $mm^4$ )
TER	tradioare electrice rezistive
$\theta$	unghiului direcției deformației principale maxime (rad) sau (°)
$\mu\epsilon$	microdeformație ( $\epsilon * 10^{-6}$ )
$\varphi$	unghiului direcției deformației principale maxime



*"Singurul progres care poate influența  
profund viitorul, este cel care crește din  
trecut."*

*George Enescu*

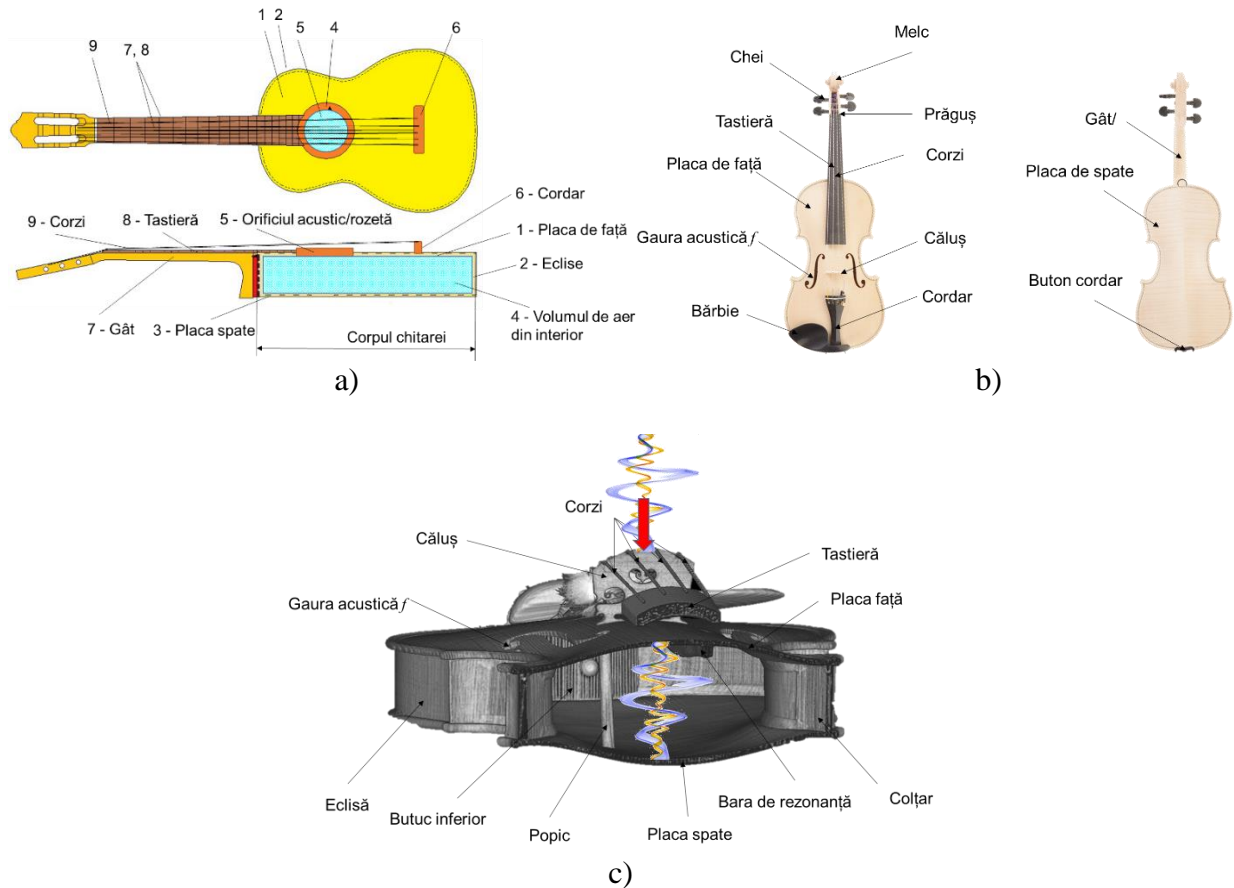
## **Capitolul 1. Modele geometrice, mecanice și dinamice ale instrumentelor muzicale cu corzi**

### **1.1 Elemente constructive privind instrumentele muzicale cu corzi: geometrie și structură**

Instrumentele muzicale cu corzi (ciupite sau cu arcuș) cum sunt chitara și vioara fac parte din familia instrumentelor cordofone, fiind bazate pe principiul excitării corzilor, vibrația/sunetul acestora fiind amplificată de corpul instrumentului. Aceste instrumente sunt prevăzute cu o bară fixată rigid de corp, numit gât care, împreună cu o parte din corp, asigură lungimea liberă a corzilor (Figura 1.1, a și b). Din punct de vedere mecanic și acustic, corpul instrumentelor muzicale cu corzi este considerat un rezonator de tip Helmholtz, fiind o structura de tip vas cu pereți subțiri, prevăzuți cu orificii acustice prin care se asigură mișcările oscilatorii ale aerului din interiorul vasului (Figura 1.1, c). Cutia de rezonanță are rolul de a amplifica sunetele muzicale, fiind alcătuită din placa acustică, spate și eclise (laterale). Aceste elemente sunt realizate din lemn de rezonanță selecționat sau din materiale lignocelulozice compozite cu proprietăți mecanice, elastice și acustice similare lemnului masiv și apte să reziste la solicitările statice și variabile specifice instrumentelor muzicale [157; 186]. Transferul energiei de vibrație a corzilor se face de la coarda aflată în vibrație la cordar (căluș) de care sunt fixate corzile. Acesta propagă vibrația către placa sonoră (fața) care începe să vibreze, antrenând aerul din interiorul corpului. Datorită vibrațiilor longitudinale și transversale ale plăcilor, precum și a vibrației aerului din cavitate, mișcarea oscilatorie este transmisă către eclise și placa de spate care la rândul lor introduc în sistem o mișcare oscilatorie a aerului din interiorul corpului. Astfel presiunea aerului din cutie se modifică periodic, acționând ca un rezonator de tip Helmholtz. Ținând cont de condițiile de contur, undele sonore sunt reflectate



și radiate de pereții cutiei în toate direcțiile, producându-se compunerea undelor sonore sub un spectru bogat de armonice. Corpul chitarei transformă presiunea înaltă a vibrațiilor de la cordar în vibrații de presiune joasă a aerului înconjurător, realizând astfel un fenomen de “egalare a impedanței”.



*Figura 1.1. Transmiterea vibrațiilor corzilor în structurile complexe lignocelulozice de tip Helmholtz: a) Sistemul constructiv al corpului de chitară; b) sistemul constructiv al vioarei; c) modul de transmitere a vibrațiilor corzilor de la cordar către corpul de tip Helmholtz.*

Viteza de propagare a undelor sonore prin mediile solide (coarda – cordar – placa - cutie) este mai mare decât cea prin aer, fapt pentru care structura mecanică a instrumentului influențează calitatea acustică. Sistemul de bare aplicat pe plăcile din componența corpului chitarei creează un volum cu forma geometrică nedefinibilă, ceea ce contribuie la amplificarea neselectivă a sunetelor într-o bandă lată de frecvențe [186]. Modul de producere a sunetelor de către vioară este similar instrumentelor cu coarde (chitara), cu mențiunea că vibrația coardei se produce cu ajutorul arcușului, prin frecarea coardei. Între arcuș și coarda excitată există un unghi care descompune în plan orizontal forța produsă de arcuș într-o componentă longitudinală (paralelă cu coarda) și una transversală pe coardă. Coarda începe să vibreze atât în plan transversal (pe direcția de aplicare a forței de către arcuș) cât și în plan longitudinal – în lungul coardei), vibrațiile transversale fiind

transmise prin intermediul călușului la fața vioarei și mai departe volumului de aer din corpul vioarei care se comportă ca un rezonator de tip Helmholtz, formându-se astfel unde de compresie și dilatare între fața, spatele și eclisele corpului de vioară care dau naștere unui sunet intens [82].

Este unanim recunoscut faptul că regina instrumentelor muzicale cu corzi este vioara, instrument a cărui formă, dimensiuni și materiale a ajuns la cea mai înaltă performanță a sunetelor muzicale, prin intermediul vechilor și consacraților lutieri Andrea Amati (1505–1578), Andrea Guarneri (1626–1698) și Antonio Stradivari (1644–1737). Forma actuală a vioarelor a fost stabilită de Andrea Amati (1505–1578), de-a lungul timpului, lutierii aducând doar mici modificări ale elementelor constructive, aproape insesizabile la o analiză vizuală obișnuită. Multe dintre aceste instrumente muzicale sunt exemple rare de înaltă măiestrie artistică și sunt încă utilizate ca referințe în fabricarea contemporană a vioarelor [98; 128; 145]. Elementele constructive ale unei vioare au atât rol funcțional, cât și estetic. Astfel, corpul vioarei compus din placa superioară, placa din spate, eclise și contra-eclise au rolul acustic de a amplifica sunetele muzicale emise în timpul solicitării corzilor de către arcuș. Din motive de rezistență, corpul vioarei conține, de asemenea, elemente constructive care fixează cele două plăci (prin intermediul ecliselor, contra-ecliselor, butucilor și colțarelor) și elemente care susțin și fixează gâtul vioarei. Plăcile au o formă curbă spațială atât în direcție longitudinală cât și transversală. Grosimea lor variază de la centru (zona dintre găurile f) spre margini. Din punct de vedere al speciilor lemnoase, pentru placa de față a vioarelor (precum și a tuturor instrumentelor cu corzi) se utilizează lemn de rășinoase (molid – *Picea Abies* L. Karst.) selecționat din punct de vedere al caracteristicilor structurale, iar pentru plăcile de spate se utilizează lemnul de paltin creț (*Acer pseudoplatanus* L.). Unele ipoteze evidențiază faptul că vioarele istorice emit sunete mult mai clare, strălucitoare, puternice decât vioarele noi, fapt pentru care de-a lungul timpului s-au analizat factorii determinanți, plecând de la calitatea structurală a lemnului, conținutul de umiditate, îmbătrânirea lemnului, geometria plăcilor (grosime/arcuire), finisajele utilizate, elementele constructive ale vioarelor (popicul, poziția și forma găurilor acustice, bara de rezonanță, călușul), calitatea corzilor [30; 41; 57; 92;]. Încă nu s-a putut decela asupra factorului predominant, cercetările rămânând deschise. Alte studii bazate pe analiza psihoacustică a instrumentelor muzicale, infirmă ipoteza că instrumentele vechi au un sunet mult mai bun [59–61; 131, 132].

Analiza structurală imagistică a instrumentelor muzicale istorice constituie un instrument fundamental pentru stabilirea protocoalelor de restaurare și conservare, precum și pentru studiul tehnicilor de fabricație din alte perioade istorice, precum și pentru înțelegerea calității acustice a acestor instrumente muzicale. Importanța și valoarea instrumentelor cu coarde și arcuș, pe de altă parte, necesită o abordare nedistructivă cu control strict al mediului, timpi de achiziție rapidă și rezoluție spațială ridicată [101; 155; 184]. Numeroși cercetători au realizat, prin diferite procedee

și tehnici moderne neinvazive și nedistructive, evaluarea structurală a instrumentelor muzicale evidențiind bogăția detaliilor, caracterizând structura lor internă, identificând defecte, evaluând grosimea elementelor structurale ale lemnului și densitatea acestuia, precum și investigarea dendrocronologică a viorilor istorice [14; 16; 31 – 32; 50; 54; 72; 106; 175].

## 1.2 Modele geometrice, constructive și structurale ale viorilor istorice

Pentru identificarea modelelor constructive ale viorilor istorice utilizând tehnici moderne de analiză imagistică (scanarea structurii lemnului, analiza cu raze X și analiza la computer tomograf), au fost analizate șapte viori istorice, dintre care vioara vioara Stradivarius – Elder – Voicu 1702 aparținând patrimoniului cultural al României, patru viori ale unor persoane private, acestea având eticheta cu informații privind datarea viorii și apartenența la o școală de lutieri (vioara Jacobus Stainer, 1716; vioara Johann Georg Leeb, 1742; vioara Joseph Klotz, 1747; vioara Babos Bela, 1920), iar două viori fără etichetă, însă pentru una dintre ele se cunoaște istoricul acesteia și faptul că este o copie Jacobus Stainer (codificată ”Copie Stainer”), iar pentru cealaltă vioară (codificată ”Fără marcă”), nu se cunoaște proveniența și apartenența la o anumită școală de lutieri, și două viori actuale, produse la fabrica de instrumente muzicale S.C. Gliga Instrumente Muzicale S.A, Reghin, una cu lemn învechit, uscat 100 de ani, acesta fiind procurat dintr-o grindă a unei case restaurate și una cu lemn uscat 10 ani, în depozitul fabricii (Figura 1.2).



*Figura 1.2. Viorile istorice analizate prin metode nedistructive*

Toate viorile luate în studiu sunt integre din punct de vedere constructiv, fiind utilizate în activitățile muzicale de către proprietari. Din acest motiv, metodele de analiză ale elementelor constructive au fost alese astfel încât să nu fie deteriorate sau afectate viorile. În continuare sunt prezentate câteva date istorice privind lutierii cărora le aparțin viorile.

**Antonio Stradivari (1644 –1737) (Stradiuarius)** a fost discipol al lutierului Nicola Amati, dar după moartea acestuia, și-a definit propriul stil în construcția viorilor, fiind într-o permanentă cercetare a relației dintre curburile plăcilor, orificiile sonore și intensitatea sunetului. Diversitatea viorilor Stradivarius este dată de preocuparea sa constantă de a îmbunătăți instrumentul. Astfel,

modelele sale de vioară devin mai plate, găurile de sunet mai grațioase, melcul mai bine conturat și original, fileul puțin mai lat decât înainte; iar lacul variază de la auriu bogat, foarte moale și transparent, la un roșu deschis, la fel de fin. Acest lac roșu mai gros și mai strălucitor a fost ceea ce a folosit ulterior exclusiv. Perioada celor mai bune viori a început în 1700, care a culminat în anul 1714; grosimile lemnului și liniile modelului sunt toate determinate cu acuratețe științifică; strălucirea culorii lacului și delicatețea, transparența finisajului, nu au fost niciodată atinse până atunci. Lemnul pentru placa de față este ales cu cea mai mare grijă, fără defecte, cu calități sonore, fiind căutat lemnul de pin de cea mai bună calitate din Elveția și Trento; lemnul de salcie folosit pentru butuci, contraeclise și colțare a fost procurat de pe malul râului Pad, lângă Cremona. Arcuirea plăcilor este realizată din curbe blânde și graduale, fileul este executat cu o precizie deosebită; găurile de sunet arată mâna unui maestru rămânând un model pentru toți; iar melcul, cu caracter sever, este sculptat în mod rafinat; întreaga lucrare (inclusiv cea a interiorului) arată cel mai frumos finisaj în cele mai mici detalii. De obicei, la capătul gâtului, pe spatele cutiei sunt inițialele P.S. (P – de la numele fiului său Paolo). (cercetare bibliografică - C. Stainer, A dictionary of Violin Makers, Ed. Novello and Co LTD, U.K., Londra). **Jacobus Stainer (1619 – 1683)** este cel mai cunoscut lutier al școlilor austriece – germane, fiind născut la Absam (Tirol). Se presupune că a fost ucenicul lui Nicolò Amati din Cremona, deși manuscrisele și dovezile istorice nu sunt suficiente de complete pentru a justifica această presupunere. În orice caz, opera sa, dintre care cea mai veche datează din anii 1630, are asemănări puternice cu cea a lui Amati. Stainer s-a stabilit în cele din urmă în casa sa natală, Absam, în 1656, unde a început să producă unele dintre cele mai bune instrumente ale sale, care par să fie inspirate din modelele lui Amati. În această perioadă, Stainer și-a creat propriul stil, producând instrumente excepționale care rivalizau sau chiar depășeau lucrările contemporanilor săi cremonezi din secolul al XVII-lea. Ca și caracteristici constructive, se remarcă: arcuirea plăcilor de față este mai mare decât la plăcile de spate; creșterea este menținută până la jumătatea lungimii; finisajul folosit este galben, cu o nuanță de trandafir pal [77; 135]. Bara de rezonanță este terminată la cele două capete ale acesteia prin teșituri care se întind pe placa de sunet de care este lipită. fiind plasată sub coarda G a instrumentului. **Joseph Thomas Klotz (1743–1819)** este fiul lui Sebastian Klotz, unul dintre cei mai buni ucenici și urmași ai lui Stainer, având atelierul în Mittenwald (Germania). Istoricii consideră că acest artist a construit viorile după sistemul tatălui său - dar cunoștea mai bine calitățile lemnului, iar instrumentele sale sunt, prin urmare, superioare în ton, dar finisajul este inferior, în starea lor inițială. **Johann Georg (II) Leeb (1740 – 1813)** este fiul lui Johann Georg Leeb (I), ambii marcând școala maghiară de lutieri. Johann Georg Leeb a activat în Presburg, actualul oraș Bratislava. Modele de viori Leeb sunt destul de distincte, cu arcade plate cu o anumită influență a lutierului Carlo Bergonzi (1683 – 1747. Johann G. (II) Leeb a fost un producător prolific și a produs viori

din diferite clase de calitate, folosind diferite materiale și lacuri. El a fost succedat de fiul său Johann Georg (III), născut în 1779. **Babos Bela** este un reprezentant al școlii maghiare de viori de la începutul secolului al XX-lea [52; 147; 148]. Pentru analiza imagistică a viorilor istorice, s-a apelat la trei metode de investigare:

a) Evaluarea caracteristicilor anatomice ale lemnului din construcția viorilor cu ajutorul sistemului WinDENDRO Density, din dotarea Facultății de Silvicultură și Exploatarea Forestiere (Figura 1.3, a). Inelele au fost măsurate pe două sau trei direcții, în funcție de dificultățile locale obiective de identificare a conturului inelor mai ales la viorile istorice, pornind de la marginea eclisei către linia de îmbinare a jumătăților feței (Figura 1.3). La inelele feței au fost separate și măsurate lemnul timpuriu și lemnul târziu, în timp ce la inelele dosului s-a măsurat numai lățimea integrală. Pentru verificare, seriile de inele rezultate ale feței au fost interdate reciproc. Interdatarea s-a făcut în cadrul aceluiași soft, adoptându-se un prag de 0.60 pentru Gleichläufigkeit correlation coefficient [130]. Au fost măsurate un număr total de 2641 inele pentru față și 970 de inele pentru dos. Lungimea de undă a fibrei crețe a fost măsurată pe două direcții, una pentru fiecare din jumătățile dosului, paralele cu curba de contur a plăcii. Au fost efectuate un număr total de 855 de măsurători asupra lungimii de undă a fibrei crețe (Figura 1.4). Pentru aprecierea regularității inelelor, a fost adoptată modalitatea de calcul a indexului de regularitate RI recomandată în [24; 45–48] pentru lemnul destinat construcției viorilor calculată cu expresia (1.1):

$$RI = \frac{\max(TRW_i) - \min(TRW_i)}{\max(TRW_i)}, \quad (1.1)$$

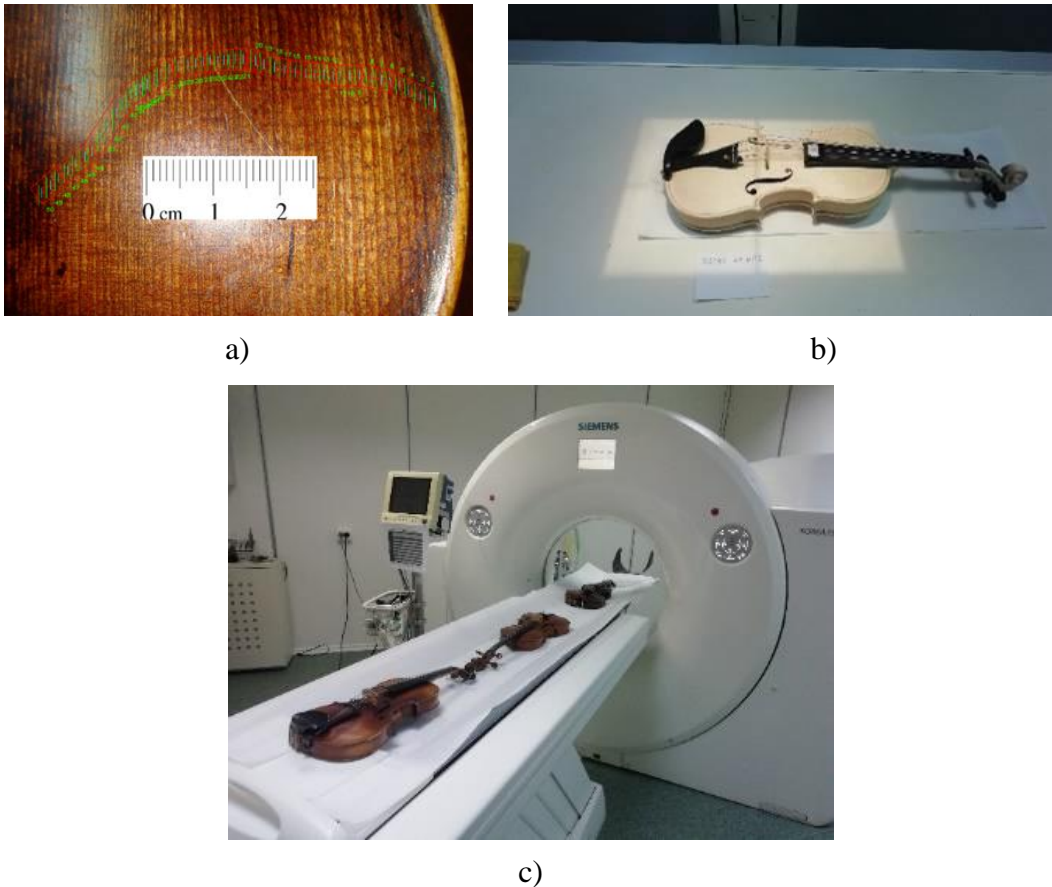
unde  $i$  este un inel oarecare din seria medie a plăcii de față/spate ( $i = \overline{1 \dots n}$ ),  $n$ , fiind lungimea seriei de inele.

b) Determinarea formei și geometriei viorilor, pe baza radiografiei cu raze X în Laboratorul de Radiologie și Imagistică Medicală, Facultatea de Medicină Veterinară din Cluj-Napoca. Expunerile la raze X au fost făcute utilizând un dispozitiv radiografic fix TEMCO Grx-01 (K&S Röntgenwerk Bochum GmbH&Co KG –Germania). Expunerile au fost făcute dorsovertral, câmpul vizual fiind setat să acopere corpul viorii. Parametrii utilizați pentru obținerea imaginilor au fost de 50-56 kV și 13-20 mAs. Imaginile au fost achiziționate cu ajutorul unui detector cu ecran plat DR Reyance Xmaru 1717SGC / SCC (Reyance Inc., Coreea) și software de achiziție Xmaru VetView (Reyance Inc., Coreea) (Figura 1.3, b).

c) Analiza la computer tomograf a elementelor constructive, grosimi și arcuiri ale plăcilor din construcția viorilor istorice (Figura 1.3, c). Examenle CT au fost efectuate tot în Laboratorul de Radiologie și Imagistică Medicală, Facultatea de Medicină Veterinară din Cluj-Napoca, pe un dispozitiv Siemens Somatom Scope (Siemens, Germany) cu dispozitiv helicoidal CT cu 16 Slice. Scanările au fost efectuate folosind un nucleu de reconstrucție osoasă. Achiziția de imagini a fost



făcută la 2 mm/slide și reconstrucția a fost efectuată la 0.75 mm/slide. Pentru fiecare vioară au fost efectuate două scanări axiale, una pentru corpul vioarei și a doua pentru gâtul vioarei. Parametrii de scanare au fost: Lățimea nominală de colimare totală: 9.6 mm, Factorul de pas: raportul 0.8, KVP: 130 kV, Curentul tubului de raze X: 96 mA, Expunere: 120 mA, Timp de expunere pe rotație: 1s, Matrice 512x512. Imaginile atât pentru radiografie cât și pentru scanare CT au fost achiziționate în format DICOM, citirea și postprocesarea fișierelor DICOM s-au efectuat utilizând software-ul 3DNET PACS și vizualizatorul Horos DICOM [173].

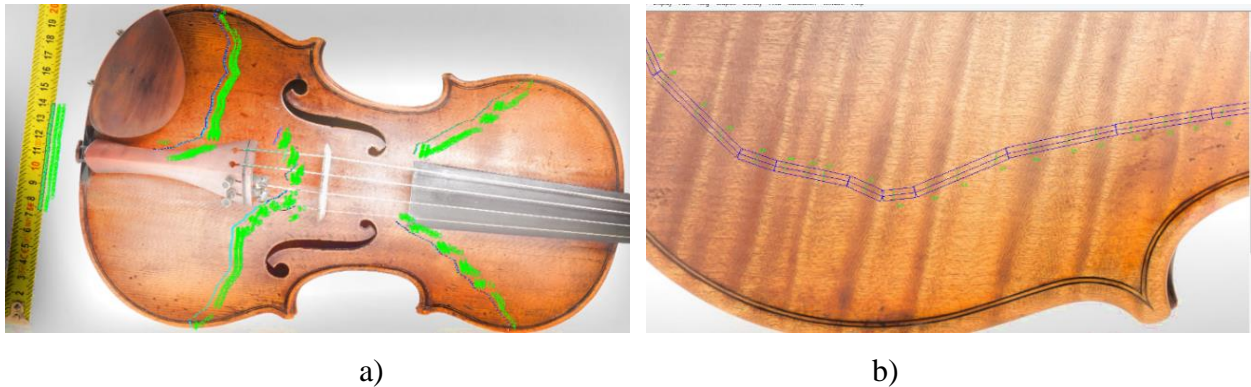


*Figura 1.3. Procedurile de analiză: a) măsurarea inelelor anuale, lemn timpuriu-lemn târziu cu WinDENDRO Density; b) radiografierea vioarei cu raze X; c) analiza la computer tomograf a viorilor istorice [173]*

### 1.2.1 Particularități anatomice ale lemnului din construcția viorilor

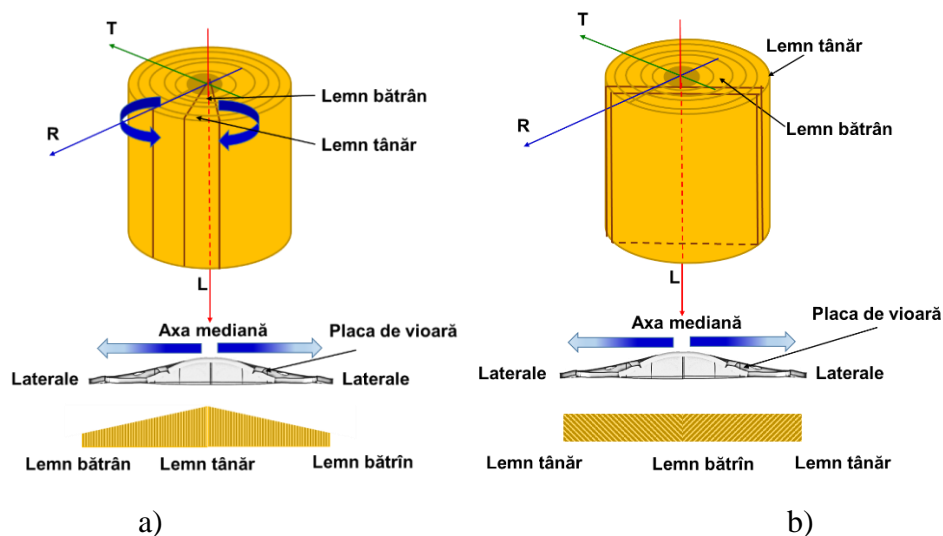
Determinarea caracteristicilor anatomice ale lemnului din construcția viorilor s-a realizat prin studierea plăcilor de față și spate ale viorilor luate în studiu, determinându-se caracteristicile inelelor anuale în ceea ce privește lățimea inelelor anuale notate TRW, lățimea lemnului timpuriu EWW și lățimea lemnului târziu LWW, lungimea de undă a fibrei crețe la lemnul de paltin (lungimea de undă CWL) conform metodelor prezentate în studiile anterioare [45 – 48; 62; 63; 112 – 113; 169; 170; 172]. Pentru plăcile de molid din structura fețelor de vioară, s-a măsurat

lățimea lemnului timpuriu și a lemnului târziu, structura anatomică a lemnului făcând posibilă preluarea acestor date, în timp ce pentru plăcile de paltin din construcția spatelui vioarei, s-a măsurat lățimea inelelor anuale și lungimea de undă a fibrei crețe (Figura 1.4). Prin analiza caracteristicilor anatomice a lemnului din construcția vioarilor istorice, se poate realiza datarea acestuia și chiar identificarea geografică a materialului prin raportarea măsurătorilor la o bază de date internațională conținând serii de inele anuale elaborate în diverse zone ale Europei. Tehnica este cunoscută ca dendrocronologie [130].



*Figura 1.4. Modalitatea de măsurare a inelelor anuale pentru fețele/spatele vioarilor – studiu de caz vioara Stradivarius Elder Voicu 1702: a) măsurarea seriilor de inele anuale la placa de față; b) măsurarea lungimii de undă a fibrei crețe la placa de spate [173]*

La analiza vizuală a vioarilor, s-a identificat modul în care au fost debitate semifabricatele pentru obținerea plăcilor de vioară. Astfel, majoritatea lemnului care este folosit în construcția plăcilor de vioară este tăiat pe sfert. În lucrarea [123] se evidențiază faptul că majoritatea vioarilor Cremonese au lemnul tăiat în sferturi (Figura 1.5, a), în comparație cu stilul fabricanților de vioară brescieni care foloseau tăierea pe plin (Figura 1.5 b).



*Figura 1.5. Modalitatea de formare a plăcii de vioară din două semifabricate din lemn de molid: a) debitare radial și împerecheate pe cant (secțiunea tangențială); b) tăiere pe plin (directă)*

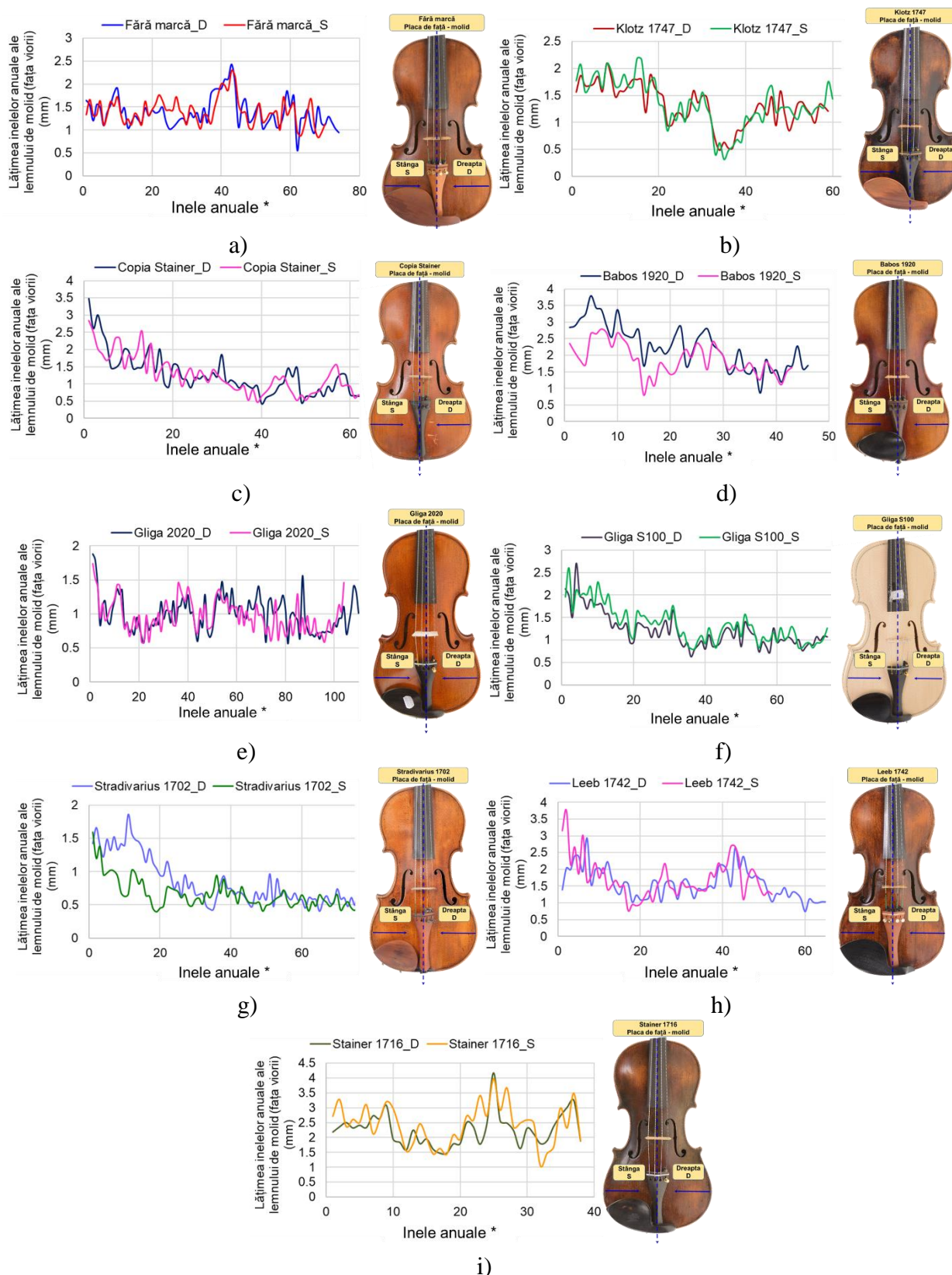
Pentru a obține arcuirea plăcilor prin degroșare, grosimea inițială a semifabricatelor tăiate din bușteni este mai mare spre mijlocul plăcii și mai mică spre laturi. Pentru viorile care au plăcile obținute din două perechi de semifabricate debitate radial și înleiate pe cant, zona de înleiere corespunde cu zona de lemn tânăr (format cel mai recent), iar spre eclise se regăsește lemnul cel mai bătrân. Caracteristicile anatomice macroscopice ale lemnului de molid și paltin din construcția viorilor analizate, prezentate ca valori medii și deviația standard, au fost centralizate în [Tabelul 1.1](#).

*Tabelul 1.1. Caracteristicile anatomice ale lemnului de molid și paltin ale viorilor studiate*

Caracteristici anatomice	Valoarea medie (Abaterea standard) la viorile								
	Stradivarius 1702	Stainer 1716	Leeb 1742	Klotz 1747	Babos 1920	Copia Stainer	“Fără marcă”	Gliga S100	Gliga 2020
	<b>Fața de vioară (lemn de molid)</b>								
Lățimea inelelor anuale (mm)	0.672 (0.363)	2.247 (0.567)	1.530 (0.490)	1.251 (0.403)	1.891 (0.612)	0.985 (0.527)	1.327 (0.336)	1.241 (0.363)	0.940 (0.234)
Lățimea lemnului timpuriu (mm)	0.432 (0.300)	1.676 (0.518)	1.148 (0.467)	0.792 (0.304)	1.449 (0.601)	0.689 (0.450)	0.907 (0.293)	0.894 (0.329)	0.568 (0.190)
Lățimea lemnului târziu (mm)	0.242 (0.087)	0.496 (0.178)	0.382 (0.122)	0.459 (0.162)	0.442 (0.158)	0.300 (0.118)	0.420 (0.130)	0.348 (0.079)	0.372 (0.100)
Proporția de lemn timpuriu (%)	60.787 (10.269)	76.184 (9.152)	73.564 (8.507)	62.635 (8.700)	74.379 (9.942)	66.127 (11.286)	67.689 (8.921)	70.763 (7.004)	59.766 (8.388)
Proporția de lemn târziu (%)	39.213 (10.269)	23.816 (9.152)	26.436 (8.507)	37.365 (8.700)	25.203 (9.942)	33.873 (11.286)	32.311 (8.921)	29.237 (7.004)	40.234 (8.388)
	<b>Spatele de vioară (lemn de paltin)</b>								
Lățimea inelelor anuale (mm)	1.081 (0.461)	1.908 (0.531)	1.246 (0.658)	1.063 (0.902)	1.026 (0.527)	1.277 (0.297)	4.563 (1.105)	2.127 (0.688)	1.623 (0.666)
Lungimea de undă a fibre crețe (mm)	5.754 (1.857)	4.021 (1.577)	6.421 (2.422)	NA	3.946 (1.256)	4.984 (1.589)	4.585 (1.057)	3.686 (1.288)	6.731 (3.371)

S-a constatat că instrumentele îmbătrânite și frecvent cântate prezintă fie zone degradate ale lemnului și/sau ale finisajului, fie un model de uzură datorită degradării lacului după o manipulare extinsă și cântare de către violonist [98; 99; 106 - 108; 184]. Astfel, în cazul viorii Klotz 1747, finisajul aplicat pe placa de spate a viorii nu a permis măsurarea caracteristicilor anatomice. În literatura de specialitate, există numeroase studii privind aspectele legate de tonurile de culoare, tipul finisajelor, grosimea penetrației finisajului în lemn [98; 99; 106 - 108; 184], aspecte care nu fac obiectul cercetărilor întreprinse până acum de autoarea tezei de abilitare. Din perspectivă statistică, caracteristicile măsurate ale structurii lemnului cutiei sonore a viorilor sunt variabile continue. În urma testului Shapiro-Wilk pentru testarea normalității distribuției datelor, s-a constatat că acestea nu sunt compatibile cu legea normală ( $W$  din testul Shapiro-Wilk = 0.886-0.992,  $p < 0.001$ ), adoptându-se în continuare testul neparametric Kruskal-Wallis care arată că viorile analizate se deosebesc între ele la nivel foarte semnificativ în privința tuturor caracteristicilor structurale ( $H = 257-1272$ ,  $p < 0.001$ ). Ca urmare, se poate afirma că fiecare vioară are personalitatea ei structurală. Pe lângă caracteristicile anatomice ale lemnului, s-a investigat și simetria structurală a fețelor de vioară, graficele de variație a lățimii inelelor anuale în jumătatea din stânga și cea din dreapta fiind prezentate pentru fiecare vioară analizată, în [Figura 1.6](#).





**Figura 1.6.** Analiza simetriei structurii anatomice a lemnului de molid din construcția fețelor de vioară prin intermediul variației radiale a inelelor anuale (\* numerotate de la eclisă la axa mediană): a) vioara „Fără marcă”; b) vioara Klotz 1747; c) vioara copie Stainer; d) vioara Babos 1920; e) vioara Gliga 2020; f) vioara Gliga S100; g) vioara Stradivarius Elder Voicu 1702; h) vioara Leeb 1972; i) vioara Stainer 1716

Se constată că placa de față prezintă cea mai mare simetrie structurală în cazul viorii Klotz 1747, vioara „Fără marcă”, vioara Gliga S100, vioara copie Stainer, vioara Gliga 2020. Celelalte viori – Stradivarius 1702, Stainer 1716, Leeb 1742 și Babos 1920 prezintă în seria inelelor variații ale lățimii inelelor, însă tendința de variere de la un an la altul are aceeași curbă.

În **Tabelul 1.2** sunt centralizate valorile indicatorilor de caracterizare a simetriei jumătăților fețelor de vioară, pe baza cărora se poate decela asupra gradului de simetrie anatomică a plăcilor de față, reieșind cantitativ, vioara Gliga S100 – realizată din lemn de molid recuperat dintr-o grindă veche de aproximativ 100 ani (coeficientul de corelație Gleichläufigkeit 75%).

**Tabelul 1.2. Indicatori de caracterizare a simetriei jumătăților feței în raport cu inelele anuale**

Vioara	Numărul de inele conținute de jumătatea		Coeficientul de corelație Gleichläufigkeit între seriile de inele din jumătatea dreaptă respectiv stângă (%)
	dreaptă	stângă	
Fără marcă	74	70	63.2
Klotz 1747	59	68	65.8
Copia Stainer	102	97	60.6
Babos Bela 1920	46	58	57.4
Gluga A00C1	110	106	61.5
Gluga S100	74	78	75.8
Stradivarius Elder-Voicu	94*	167	65.1
Leeb 1742	67	52	61.3
Stainer 1716	38	42	62.7

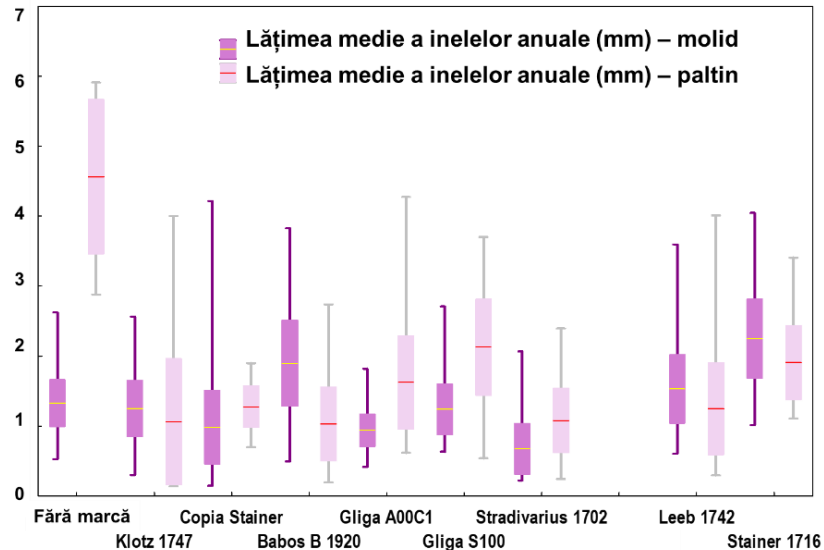
\*inaccesibilă măsurării tuturor inelelor anuale din jumătatea respectivă

Totuși rezultatele prezentate sunt sub rezerva inaccesibilității măsurării tuturor inelelor ca urmare a finisajelor, accesoriilor de pe vioară și a formei constructive a instrumentelor, acestea fiind într-o bună stare de funcționare.

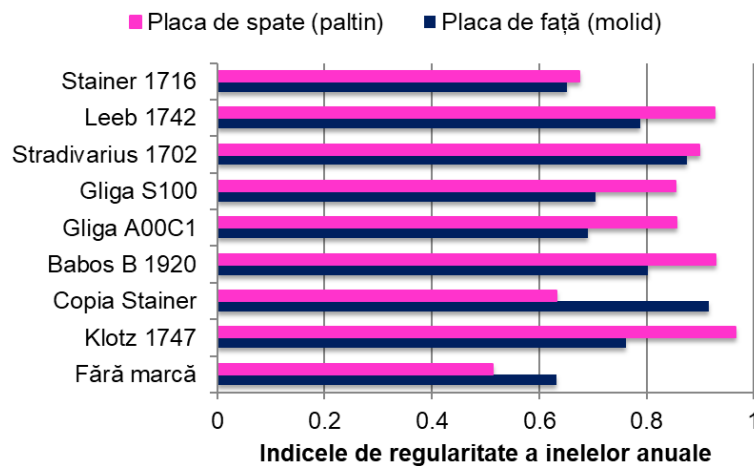
Analizând comparativ lățimile inelelor anuale pentru plăcile de față și spate, s-a observat că lățimea inelelor spatelui variază între 0.14 mm (vioara copie Stainer) și 5.91 mm (vioara Klotz 1747). La viorile Klotz 1747, Babos 1920, Leeb 1942, Stainer 1716, inelele din structura spatelui sunt considerabil mai fine decât cele din structura feței, în timp ce la viorile „Fără marcă”, Gluga 2020, Gluga S100, Stradivarius 1702, inelele feței sunt mult mai fine decât cele ale spatelui. La viorile Babos 1920, Stradivarius 1702, Leeb 1742, Stainer 1716, s-a observat că inelele au lățimi apropiate în cele două plăci ale cutiei sonore (**Figura 1.7**).

În 40 % din cazuri, indicele de regularitate a lățimii inelelor  $RI$  (**Figura 1.8**) se înscrie în limitele precizate de [136] pentru lemnul de rezonanță ( $RI \leq 0.700$ ). La majoritatea viorilor sunt diferențe mari între față și dos cu privire la regularitatea inelelor. Inelele feței sunt de regulă mai regulate decât cele ale dosului (**Figura 1.8**). În medie, lemnul târziu prezintă o treime, iar lemnul timpuriu celelalte 2/3 din lățimea inelului anual. Proporțiile celor două componente ale inelului anual prezintă un nivel moderat de variabilitate (coeficientul de variație: 16 % respectiv 32 %). La 76 % din valorile înregistrate ale proporției lemnului târziu se constată o depășirea a nivelului de referință de 25 % menționat pentru molidul de rezonanță [24]. Sunt viori la care tendința centrală a

lemnului târziu crește spre 40 % din lățimea inelului. Nu este exclus ca rezultatul să fie influențat de tehnicile de finisare ale viorii, care să fi condus la o supraestimare a lățimii lemnului târziu în analiza imagistică. În aceeași măsură însă, trebuie să ținem cont de faptul că valorile mari ale proporției de lemn târziu se înregistrează în inelele înguste (coeficientul de corelație între lățimea inelului și proporția lemnului târziu este  $-0.623$ ,  $p < 0.001$ ), inele care abundă la viorile analizate, 38 % din numărul total de inele măsurate având lățimea mai mică de 1 mm.



*Figura 1.7. Amplitudinea de variație a lățimii inelelor anuale din structura feței și spatelui la viorile analizate*



*Figura 1.8. Variația regularității inelelor anuale pentru lemnul de față și spate din construcția viorilor analizate*

În ceea ce privește structura anatomică a plăcilor de spate, realizate din paltin cu fibra ondulată, s-a observat că la viorile "Fără marcă" și "Klotz, 1747", placa de spate este obținută dintr-un singur semifabricat din lemn de paltin creț, comparativ cu celelalte viori analizate la care spatele este format din două semifabricate încleiate pe axa de simetrie longitudinală. Ceea ce este specific paltinului creț, este distanța dintre vârfurile ondulațiilor fibrei denumită în lucrare, lungimea de undă a fibrei, care gravitează în jurul valorii de 4.4 mm. Cea mai mică valoare (1.35

mm) a fost măsurată la vioara Stainer 1716, iar cea mai mare (13.11 mm), la vioara Gliga A00C1. Diferențele între viori sunt notabile, unele au fibra creță strânsă, altele largă (Figura 1.9). Este o tendință de asociere a lungimii de undă cu anumite valori ale lății inelului anual, adică fibra creță deasă apare mai ales în lemnul de paltin cu inele mai late (coeficientul de corelație a rangurilor Spearman  $R = -0.156$ ,  $p = 0.04$ ) [24].

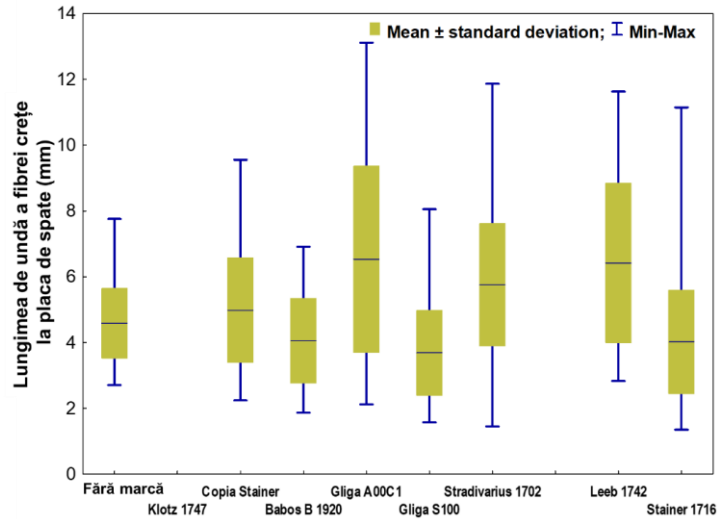
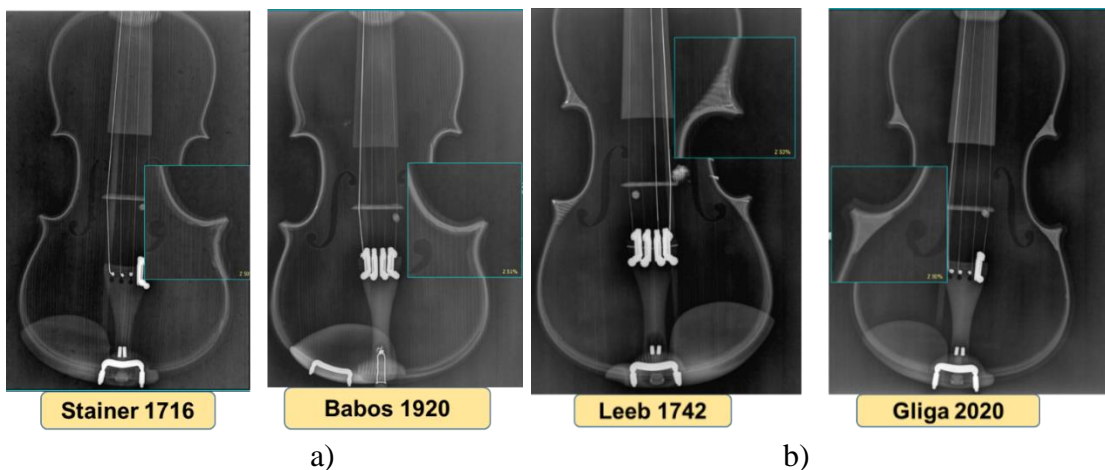


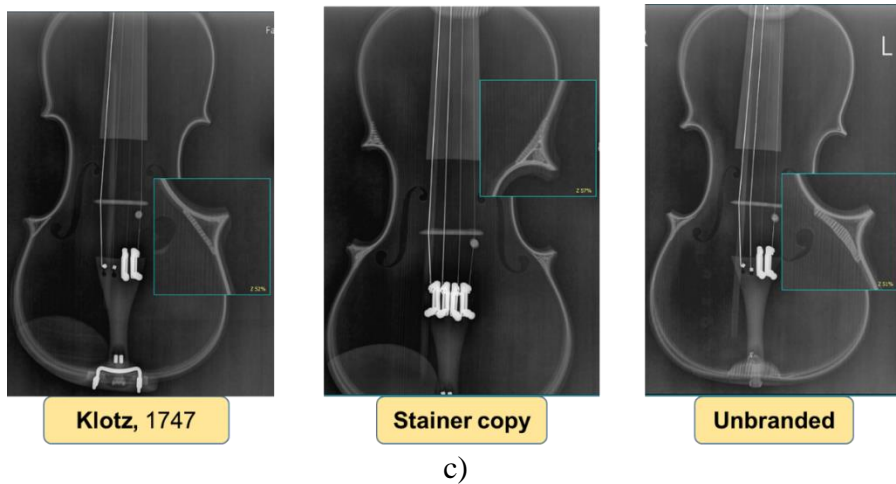
Figura 1.9. Variația lungimii de undă a fibrei crețe din structura plăciide spate la viorile analizate [173]

### 1.2.2 Modele geometrice ale viorilor obținute prin investigare cu raze X

Analizele cu raze X din cadrul Laboratorului de Analiză Imagistică și Radiografie a Facultății de Medicină Veterinară, USAMV Cluj Napoca, au permis identificarea unor elemente constructive specifice școlilor de lutieri de care aparțin viorile. Astfel, unul dintre elementele constructive evidente la analiza cu raze X îl reprezintă colțarele, acestea având rolul de a întări intersecția dintre curburile viorii ca urmare a schimbării razei de curbură, precum și de a mări suprafața de înclieiere dintre placa de față – placa de spate și eclise (Figura 1.10).

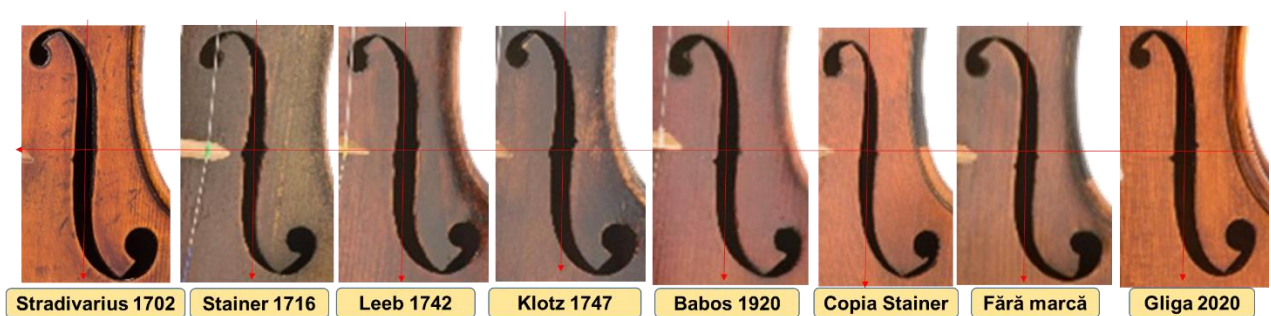






*Figura 1.10. Radiografiile cu raze X ale violinelor analizate: a) violini fără colțare; b) violini cu întărituri din lamele din lemn masiv; c) violini cu colțare din lemn masiv (Unbranded – Fără marcă) [173]*

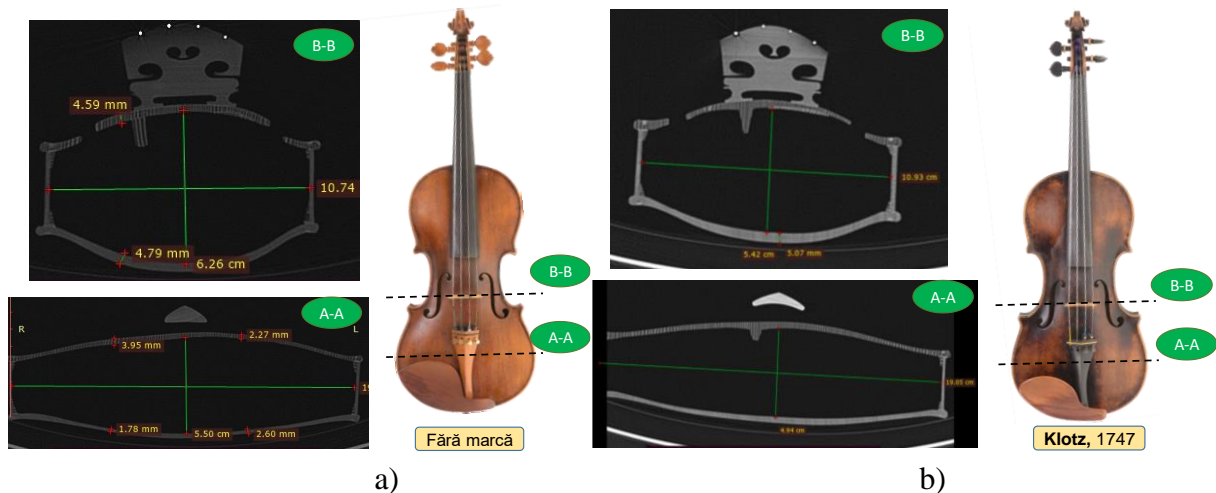
După cum se poate observa în [Figura 1.10](#), violinele investigate se pot grupa în trei clase din punct de vedere al formei constructive a colțarelor: violini fără colțare pe interior (Stainer, 1716; Babos 1920) ([Figura 1.10, a](#)), violini cu colțare din lemn masiv tăiate după forma interioară a colțurilor, obținându-se un contur continuu în interiorul corpului de vioară (Leeb 1742, Gliga 2020) ([Figura 1.10, b](#)) și violini cu lamelă din lemn de rășinos (Klotz, 1747 și copia Stainer fără etichetă și vioara ”Fără marcă”), remarcându-se faptul că lamelele de întărire a colțurilor, la vioara Klotz 1747, se găsesc numai la colțurile dintre curbura centrală și curbura inferioară ([Figura 1.10, c](#)). Modalități de îmbinare a colțurilor sunt prezentate în lucrările [103; 175]. Un alt aspect interesant de remarcat din analiza cu raze X este variația dimensională a corpului de vioară, dimensiunile și poziționarea  $f$ -urilor (găurilor acustice) față de axa longitudinală de simetrie structurală a plăcii de față ([Figura 1.11](#)); variația densității lemnului îmbătrânit la violinele istorice, acestea constituind provocări/direcții de cercetare pentru studiile viitoare.



*Figura 1.11. Geometria găurilor sonore  $f$  la violinele analizate [173]*

Informații privind grosimea plăcilor de vioară, curbura plăcilor, forma barei de rezonanță, dimensiunile violinelor istorice, aspecte privind integritatea sau gradul de deteriorare al violinelor,

toate acestea au fost obținute prin tomografia computerizată (CT) a viorilor luate în studiu. Tomografia computerizată cuprinde un set de imagini 2D axiale, volumul de date putând fi reformatat și reorganizat în imagini 3D, având avantajul obținerii unui contrast de aproximativ 16 ori mai mare decât la radiografia cu raze X. Viorile de patrimoniu au fost investigate prin această metodă în vederea identificării unor elemente constructive (forme/dimensiuni) inaccesibile prin analiză cu ochiul liber. În **Figura 1.12, a și b** sunt prezentate două secțiuni transversale prin vioara ”Fără marcă” (**Figura 1.12, a**) și vioara ”Klotz, 1747” (**Figura 1.12, b**). În mod similar au fost analizate și celelalte viori, obținându-se dimensiunile viorilor în diferite secțiuni, grosimea plăcilor și raza de curbură. Din punct de vedere constructiv, un detaliu interesant se observă la modul de realizare a barei de rezonanță: viorile Stainer 1716; Leeb 1742; ”Fără marcă” prezintă bara bass aplicată pe placa superioară (**Figura 1.13, a**), comparativ cu viorile Stainer copie, Klotz 1747 și Babos 1920, la care bara de rezonanță este realizată prin degroșarea plăcii de față, fiind un element volumetric pe interiorul plăcii de față (**Figura 1.13, b**).



**Figura 1.12.** Scanarea la computer tomograf: a) vioara ”Fără marcă”; b) vioara ”Klotz, 1747”

[173]

Imaginile obținute la CT a oferit posibilitatea datării lemnului din construcția vioarei prin analiza densității lemnului târziu/timpuriu, a lățimii inelelor anuale și a contrastului de nuanță gri ce reprezintă zonele cu densitate mai mare. De asemenea, s-au putut distinge clar diferențele dintre cele două specii lemnoase utilizate pentru plăcile de față (molid) și spate (paltin), precum și o serie de intervenții/reparații efectuate asupra viorilor, gradul de uzură a lemnului, atacuri biologice ale lemnului (**Figura 1.14**).

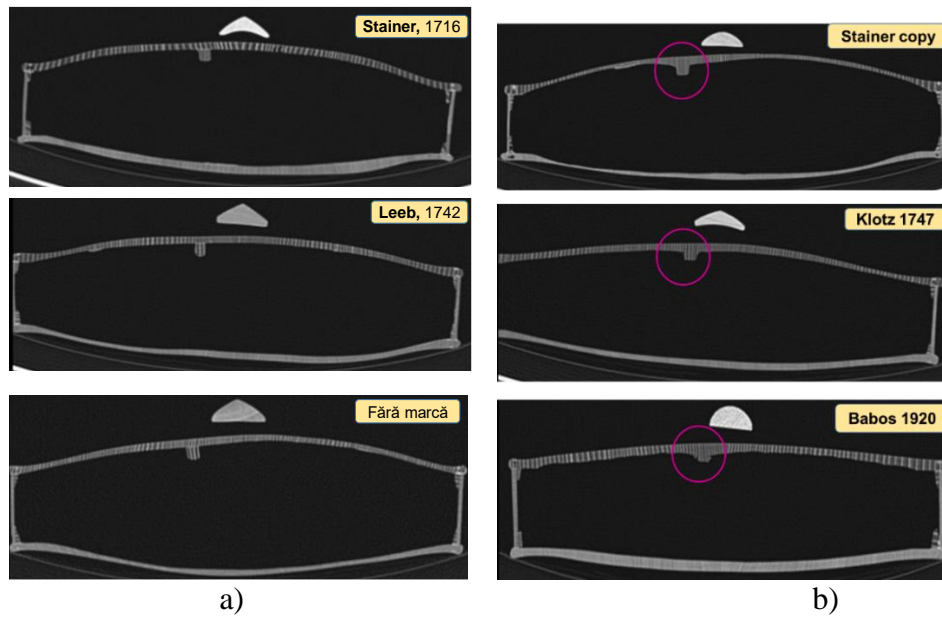


Figura 1.13. Secțiune transversală prin viori scanate la CT: a) viori cu bara de rezonanță aplicată; b) viori cu bara de rezonanță prelucrată din placa de față [173]

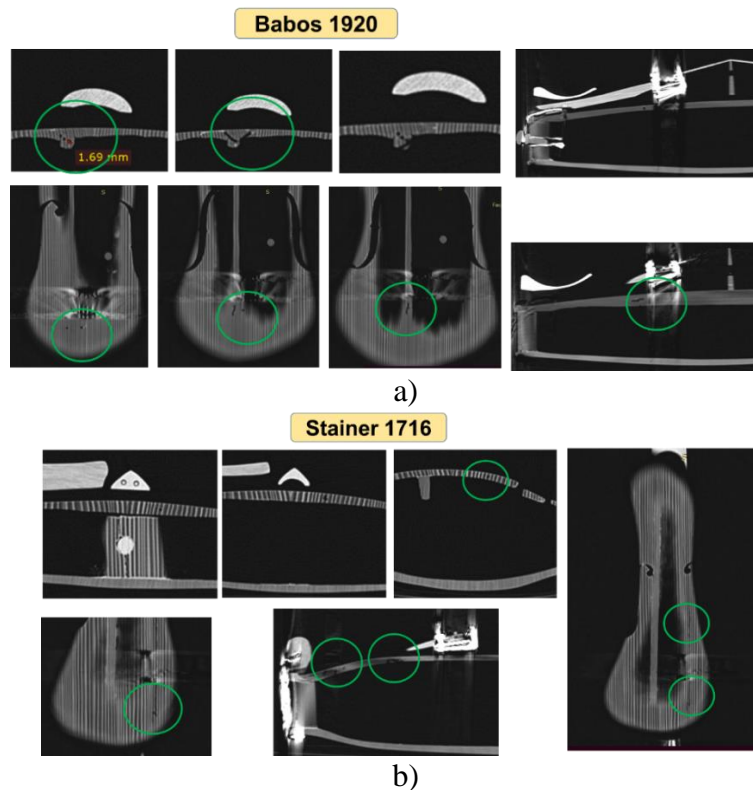


Figura 1.14. Identificarea unor carii în placa de molid: a) vioara "Babos, 1920"; b) vioara "Stainer, 1716" [173]

În zonele evidențiate din Figura 1.14 se pot observa traiectoriile golurilor produse de larvele de coleoptere, contrastul de culoare și forma golurilor fiind specifice atacului biologic. Ținând cont de modul în care au fost asamblate plăcile de vioară, unde se găsește lemnul tânăr în zona articulațiilor, se presupune că găurile observate la CT au fost produse de *Anobium pertinax*

or *Anobium punctatum*, care au depus ouă sub ritidom, iar larvele au săpat galerii neregulate de maxim 3 mm și le-au umplut cu rumegus [86, 173].

Din punct de vedere al aspectelor anatomice și constructive ale violilor, cercetările prezentate mai sus pot fi sistematizate astfel:

- Vioara Stradivarius Elder-Voicu (1702) (denumirea original a violii: Antonius Stradivarius Cremonensis Faciebat Anno 1702) prezintă inelele cele mai fine în structura ambelor plăci, cu o tendință exponențial-descrescătoare (care determină o regularitate a lor mijlocie). Nivelul de simetrie a feței este mediu, iar spatele conține fibră foarte creată și destul de largă.
- Vioara Stainer (1716) conține inele mai late, cu regularitate bună în ambele plăci și simetrie mijlocie. Inelele au o proporție mică de lemn târziu. Placa de spate conține fibră creată deasă, cu variații mari ale lungimii de undă. Din punct de vedere constructiv, atât placa superioară, cât și placa de spate sunt realizate din două semifabricate simetrice, obținute prin tăierea pe sferturi și îmbinate pereche față de axa longitudinală. Bara de bas este aplicată pe interiorul plăcii superioare, colțurile nu sunt rigidizate cu colțare, iar sub cordar se observă urme de atac biologic (carii).
- Copia Stainer are inele deosebit de înguste în structura ambelor plăci, neregulate la placa de față, dar deosebit de regulate la placa de spate. Proporția lemnului târziu variază în limitele cele mai largi din întreg lotul de violi considerat. Jumătățile feței prezintă cea mai slabă simetrie a seriilor de inele. Placa de spate prezintă fibră creată lungimi de undă mari. În acest caz, ambele plăci de vioară sunt obținute prin tăiere pe sferturi a bușteanului și împrecherea semifabricatelor alăturate, pe cant, iar bara de bas face parte din același produs semifabricat ca placa superioară din molid. Colțurile sunt întărite cu lamele de lemn de rășinoase.
- Vioara “Fără marcă” are inele fine în structura feței, dar neobișnuit de late în structura spatelui, regularitatea lor fiind cea mai bună din lotul de violi analizat. Nivelul de simetrie a feței este mediu. Placa de spate are fibră creată mijlocie ca lungime de undă și înălțime. În cazul acestei violi, construcția plăcii de față s-a realizat prin îmbinarea a două jumătăți tăiate radial din buștean, bara bass este aplicată pe interior iar colțurile sunt întărite cu lamele din lemn de esență moale. Vioara a fost restaurată, placa de față prezentând petice din furnir pentru lipirea lemnului.
- Vioara Klotz (1747) are inele fine și regulate în componența feței, dar placa de spate prezintă o neregularitate mare a inelelor anuale, fiind foarte dificilă măsurarea acestora. Inelele au o pondere mare de lemn târziu. Jumătățile feței prezintă o simetrie moderată. Placa de spate nu prezintă fibră creată aparentă. Vioara Klotz 1747 prezintă atât placa de față din lemn de molid cât și cea de spate din lemn de paltin, dintr-o singură bucată de lemn, iar colțurile sunt întărite



cu lamele din lemn de esență moale. Bara bass a fost obținută prin degroșarea plăcii de față, odată cu obținerea arcurilor interioare.

- Vioara Leeb (1742) prezintă inele în general înguste, mai ales la spatele de vioară - unde au și o regularitate slabă. Inelele au o proporție mică de lemn târziu. Jumătățile feței prezintă o simetrie slabă. Placa de spatele prezintă fibră creață largă și mai mult joasă. Din punct de vedere constructive, plăcile sunt obținute din jumătăți debitate radial și îmbinate pe cant, bara de bas este aplicată pe interior iar colțurile sunt rigidizate cu colțare din lemn masiv.
- Vioara Babos Bela (1920) are inele late în structura feței și mai mult înguste în structura spatelui de vioară. Regularitatea lor este satisfăcătoare în structura feței și slabă în structura plăcii de spate. Jumătățile feței prezintă cea mai slabă simetrie a seriilor de inele. Inelele anuale au cea mai mică proporție de lemn târziu. Spatele prezintă fibră creață largă și joasă, dar stabilă ca lungime de undă în lungul cutiei sonore. Vioara Babos 1920 conține în structura sa, ambele plăcile obținute prin imbinarea jumătăților de scânduri tăiate radial. Bara bass face corp comun cu placa de față, profilul interior al plăcii din lemn de molid prezentând urme de daltă. Ca și vioara Stainer 1916, colțurile nu sunt rigidizate cu colțare, iar sub cordar se observă urme de atac biologic (carii).
- Vioara Gliga AOOC1 (2020) are inele foarte înguste în structura feței, cu amplitudine de variație mică a lățimii și, implicit, o foarte bună regularitate, precum și cu o proporție mare de lemn târziu. Inelele plăcii de spate sunt, în schimb, late și mai mult neregulate. Simetria seriilor de inelele ale feței este destul de slabă. Spatele prezintă fibră creață largă, neregulată ca lungime de undă și foarte înaltă.
- Vioara Gliga S100 (2020) are inele mai mult înguste la placa de față, regulate și cu proporție mică de lemn târziu. Placa de față prezintă cea mai bună simetrie a seriilor de inele. Placa de spate are inele mai mult late, destul de neregulate ca lățime și fibră creață îngustă, mijlocie ca înălțime și destul de uniformă ca lungime de undă. Atât vioara Gliga 2020 cât și Gliga S100 au fost realizate prin aceeași tehnică – împrecherea jumătăților de placă pe cant, cu bara bass aplicată și rigidizarea colțurilor cu ajutorul colțarelor din lemn de rășinos.

În concluzie, toate rezultatele prezentate anterior oferă informațiile utile pentru argumentarea comportării mecanice, elastice și acustice a structurilor complexe lignocelulozice cu rol de rezonator. Având în vedere faptul că România este un punct important pe harta mondială a constructorilor de instrumente muzicale, cercetarea prezentată are rolul nu doar de a realiza transferul de cunoaștere pe axa timpului, ci și să consolideze baza de date istorice privind lemnul de rezonanță, caracteristicile tehnice și geometrice ale viorilor istorice, dar ale căror performanțe acustice sunt recunoscute de marii artiști.

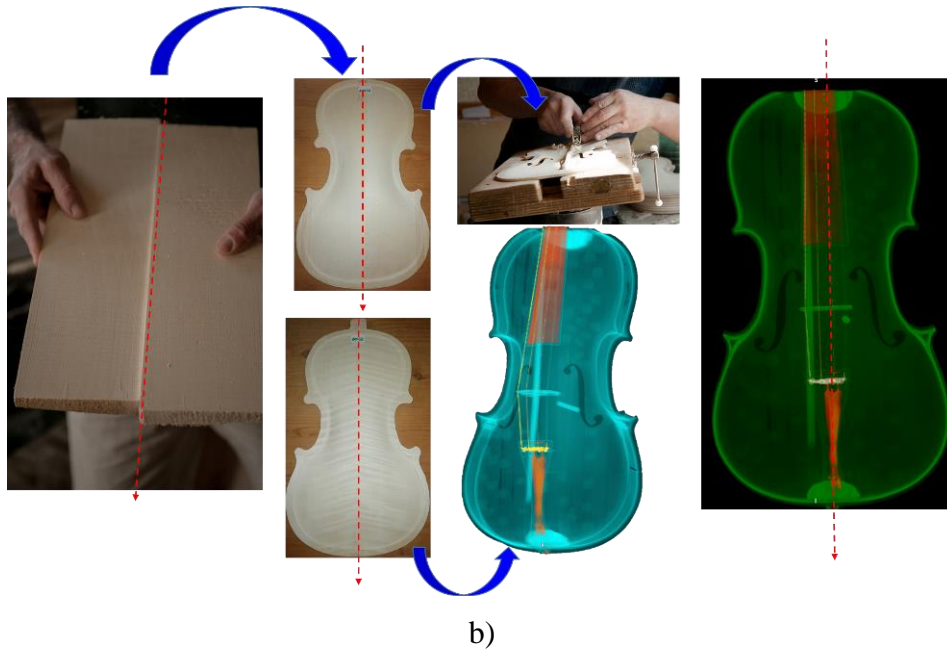
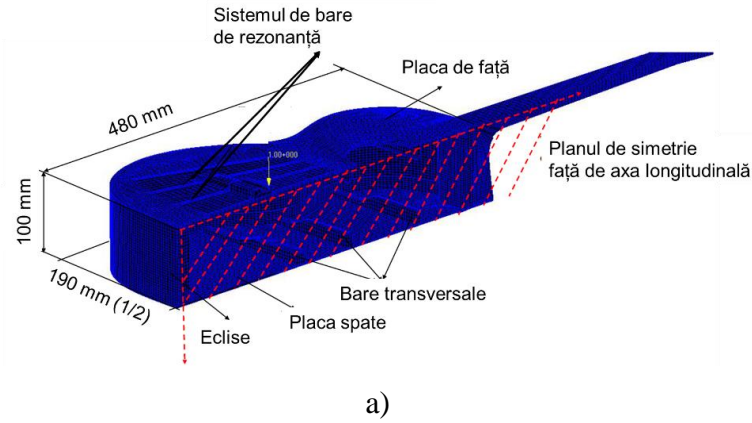
## 1.3 Mecanica structurilor lignocelulozice de tip Helmholtz la chitare și vioi

### 1.3.1 Modelul analitic al structurilor lignocelulozice de tip Helmholtz în cazul vibrațiilor libere

Cercetările din literatura de specialitate evidențiază faptul că un instrument muzical de calitate este cel care oferă un ton strălucitor și puternic cu sunet pătrunzător și deschis, putând acoperi cu armonicile produse, claritate prin reproducerea unor sunete identificabile foarte clar, izolate, fără a se amesteca cu vibrațiile altor sunete, dar și un sunet cald, mătăsoș catifelat care mângâie auzul și care determină o relaxare și plăcere celui care ascultă. O vioară sau o chitară clasică poate avea deopotrivă și sunete calde, mătăsoase și sunete strălucitoare, în funcție de modul în care se interpretează textul muzical. Există însă și instrumente care au sunete moi și calde, dar care au dezavantajul de a nu pătrunde în săli mari de concerte [ 6; 13; 27 – 29; 42; 58 – 59; 60].

Astfel, forma geometrică a corpurilor de vioară sau chitară, materialele din care sunt realizate trebuie să favorizeze producerea și amplificarea clară a tuturor sunetelor muzicale în timpul actului artistic, având și o capacitate de amortizare ridicată, astfel încât sunetele să nu se suprapună producând efecte acustice nedorite [32; 63; 76–79; 121; 131; 137].. Neselectivitatea sunetelor poate fi obținută prin forme geometrice complexe ale cutiei de rezonanță (așa cum este cazul formei chitarei sau al vioarei). Acest fenomen este explicat prin teoria diviziunii pentru volumul neregulat de aer conținut de cutie într-o sumă de numeroase volume simple mici cu o frecvență de rezonanță normală [2; 109; 117–119; 186; 202]. Combinația acestor volume mici și capacitatea lor de a rezona, oferă condițiile de amplificare a tuturor sunetelor emise de coardă și, în mod ideal, oferă condiții de amplificare uniformă. În [Figura 1.15](#) sunt exemplificate două structuri rezonatoare de tip Helmholtz: corpul de chitară clasică fără corzi care prezintă simetrie constructivă și de material ([Figura 1.15, a](#)) și corpul de vioară fără corzi, care prezintă asimetrie constructivă și simetrie a structurii materialului ([Figura 1.15, b](#)).

În acest capitolul sunt prezentate proprietățile unui sistem mecanic simetric în cazul vibrațiilor forțate, așa cum este cazul celor două tipuri de sisteme. Un sistem cvasimetric se comportă foarte aproape de un sistem simetric. Rezultatele teoretice privind sistemele simetrice nu pot fi aplicate sistemelor cvasimetrice, dar investigațiile experimentale au evidențiat că proprietățile sunt foarte apropiate [100 – 102; 110; 119; 141; 190–192]. Chitara are un plan de simetrie, cel care trece prin mijloacele celor două plăci ale cutiei de chitară și un plan de cvasimetrie, cel care separă partea inferioară de partea superioară a chitarei.



*Figura 1.15. Sisteme simetrice și asimetrice în execuția plăcilor cutiei acustice: a) chitara clasică simetrică, fără corzi; b) vioara – simetrie anatomică a lemnului; asimetrie constructivă a plăcii de față*

Pentru modelarea matematică, corpul chitarei este considerat a fi format din două părți identice. În acest caz, dacă se folosește un model de element finit pentru a studia vibrațiile acestui instrument și ecuațiile de mișcare sunt obținute sub forma [15; 49; 53; 85; 102; 119; 137; 166]:

$$\begin{bmatrix} [M_e] & 0 & 0 \\ 0 & [M_e] & 0 \\ 0 & 0 & [M_w] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_l\} \\ \{\ddot{x}_r\} \\ \{\ddot{x}_w\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_e] & 0 & [K_c] \\ 0 & [K_e] & [K_c] \\ [K_c]^T & [K_c]^T & [K_w] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_l\} \\ \{x_r\} \\ \{x_w\} \end{Bmatrix} = 0 \quad (1.2)$$

unde simetria sistemului este evidențiată în structura ecuațiilor. Se fac următoarele notații:

$$[M] = \begin{bmatrix} [M_e] & 0 & 0 \\ 0 & [M_e] & 0 \\ 0 & 0 & [M_w] \end{bmatrix}; [K] = \begin{bmatrix} [K_e] & 0 & [K_c] \\ 0 & [K_e] & [K_c] \\ [K_c]^T & [K_c]^T & [K_w] \end{bmatrix}; \{x\} = \begin{Bmatrix} \{x_l\} \\ \{x_r\} \\ \{x_w\} \end{Bmatrix}; \{\ddot{x}\} = \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_l\} \\ \{\ddot{x}_r\} \\ \{\ddot{x}_w\} \end{Bmatrix} \quad (1.3)$$

Unde  $M_e$  este matricea de inerție a unei jumătăți de structură;  $M_w$  – matricea de inerție a elementelor de legătură;  $K_e$  – matricea de rigiditate a unei jumătăți de structură;  $K_w$  – matricea de

rigiditate a elementelor de legătură;  $K_c$  – matricea de rigiditate dintre cele două jumătăți simetrice, identice și elementele de legătură;

În ecuația (1.3), vectorul  $\{x\}$  conține coordonatele independente ale primului subsistem ( $x_l$  stânga/ engleză left), coordonatele independente ale celui de-al doilea subsistem ( $x_r$  dreapta/ engleză right) și celelalte coordonate independente ale sistemului  $x_w$ . Dacă se consideră sistemul vibrator ca un ansamblu, ecuațiile vibrațiilor libere neamortizate din ecuația (1.2) pot fi scrise într-o formă compactă (1.4):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (1.4)$$

Unde  $\{x\}$  reprezintă vectorul total al coordonatelor independente,  $[M]$  fiind matricea de inerție și  $[K]$  fiind matricea de rigiditate.

După cum s-a menționat, se consideră chitara formată din două părți identice. Pentru jumătate din corpul chitarei, ecuațiile vibrațiilor libere sunt:

$$[M_e]\{\ddot{x}_e\} + [K_e]\{x_e\} = 0 \quad (1.5)$$

În lucrările [15; 49; 53; 85; 102; 119; 137; 166] a fost stabilită următoarea proprietate, care descrie sistemele simetrice:

**Teorema T1.** Valorile proprii ale sistemului (1.5) sunt, de asemenea, valorile proprii ale sistemului (1.2). În cazul prezentat, soluțiile ecuațiilor polinomiale (1.6):

$$\det([K_e] - \omega^2[M_e]) = 0 \quad (\text{sau } |K_e - \omega^2 M_e| = 0) \quad (1.6)$$

sunt, de asemenea, soluții polinomiale (1.7):

$$\det \left( \begin{bmatrix} K_e & 0 & K_c \\ 0 & K_e & K_c \\ K_c^T & K_c^T & K_r \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_e & 0 & 0 \\ 0 & M_e & 0 \\ 0 & 0 & M_w \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (1.7)$$

Deci se poate scrie:

$$\begin{vmatrix} K_e - \omega^2 M_e & 0 & K_c \\ 0 & K_e - \omega^2 M_e & K_c \\ K_c^T & K_c^T & K_r - \omega^2 M_w \end{vmatrix} = 0 \quad (1.8)$$

Rezultă că:

$$[P(\omega^2)] = [K] - \omega^2[M] \quad (1.9)$$

$$[P_e(\omega^2)] = [K_e] - \omega^2[M_e]$$

$$[P_w(\omega^2)] = [K_w] - \omega^2[M_w]$$

Folosind notațiile:

$$\Delta = \det[P(\omega^2)]$$

$$\Delta_e = \det[P_e(\omega^2)]$$

$$\Delta_w = [P_r(\omega^2)]$$

ecuația caracteristică pentru întregul sistem (1.7) poate fi scrisă:

$$\Delta = P(\omega^2) = \det([K] - \omega^2[M]) \quad (1.10)$$

Se consideră  $1\omega_i^2, i = \overline{1, n_1}$  ca fiind frecvențele naturale ale unei jumătăți de chitară și  $\omega_i^2, i = \overline{1, 2n_1 + n}$ , fiind frecvențele naturale ale întregului sistem ( $n_1$  este dimensiunea unei singure părți,  $n$  este dimensiunea totală a sistemului).

Această proprietate este un caz particular al *enunțului 1* descris mai jos, demonstrat în [31].

**Enunțul 1:**

Dacă se iau în considerare matricile polinomiale pătrate cu coeficienți complecși, de mărime  $n$ , notate  $A, B, C, L, Z=On$ , și matricea  $M = \begin{pmatrix} A & Z & B \\ Z & A & B \\ L & L & C \end{pmatrix}$ , atunci  $\det(M)$  este divizibil cu  $\det(A)$ . În cazul sistemului simetric, folosind notațiile (1.9) rezultă:

$$M = \begin{pmatrix} A & Z & B \\ Z & A & B \\ L & L & C \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [P_e(\omega^2)] & 0 & [K_c] \\ 0 & [P_e(\omega^2)] & [K_c] \\ ([K_c]^T & [K_c]^T & [P_r(\omega^2)] \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Teorema T1 implică câteva proprietăți ale modurilor naturale de vibrație. Pentru a obține modurile naturale de vibrație înseamnă a rezolva sistemul liniar omogen:

$$\begin{bmatrix} [P_e(\omega_i^2)] & 0 & [K_c] \\ 0 & [P_e(\omega_i^2)] & [K_c] \\ [K_c]^T & [K_c]^T & [P_w(\omega_i^2)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Phi_l\} \\ \{\Phi_r\} \\ \{\Phi_w\} \end{Bmatrix}_i = 0, \quad i = \overline{1, n} \quad (1.12)$$

Următoarele două teoreme sunt valabile (1.13) și (1.14)[ 31; 91; 92; 104]:

**Teorema T2.** Sistemul (1.12) are, pentru  $\omega_i^2 = 1\omega_i^2$  soluții cum ar fi (moduri proprii antisimetrice):

$$\begin{Bmatrix} \{\Phi_l\} \\ -\{\Phi_l\} \\ 0 \end{Bmatrix}_i, \quad i = \overline{1, n} \quad (1.13)$$

**Teorema T3.** Sistemul (1.12) are, pentru  $\omega_i^2 \neq 1\omega_i^2$  ( $i = \overline{n_1 + 1, 2n_1 + n_2}$ ) soluții precum (moduri proprii simetrice):

$$\begin{Bmatrix} \{\Phi_l\} \\ \{\Phi_l\} \\ \{\Phi_w\} \end{Bmatrix}_i \quad (1.14)$$

### 1.3.2 Modelul analitic al structurilor simetrice lignocelulozice de tip Helmholtz în cazul vibrațiilor forțate

Se presupune că cele două subsisteme identice față de axa longitudinală, sunt excitate în același mod. Vectorul forțelor care acționează asupra sistemului are forma (1.15):

$$\{Q\} = [ \{Q_e\}^T \{Q_e\}^T \{Q_w\}^T ]^T \quad (1.15)$$

unde partiționarea s-a făcut conform celor trei subsisteme. Mișcarea sistemului excitat neamortizat este dată de ecuația (1.8) [15; 49; 53; 85; 102; 119; 137; 166]. Dacă  $[\Phi]$  este matricea modală și  $\{\{\Phi\}_1 \ \{\Phi\}_2 \ \dots \ \{\Phi\}_n\}$  sunt modurile de vibrație pentru sistem:

$$[\Phi] = [\{\Phi\}_1 \ \{\Phi\}_2 \ \dots \ \{\Phi\}_n] \quad (1.16)$$

Și dacă se consideră  $q_1, q_2, \dots, q_n$  coordonatele canonice, atunci:

$$\{\theta\} = [\Phi]\{q\} \quad (1.17)$$

Se definesc:

$$[M^*] = [\Phi]^T [M] [\Phi], \quad i = \overline{1, n} \quad (1.18)$$

cu elementele diagonale diferite de zero  $M_i^* = \{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i$ ; respectiv:

$$[K^*] = [\Phi]^T [K] [\Phi], \quad i = \overline{1, n} \quad (1.19)$$

cu elementele diagonale diferite de zero:  $k_i^* = \{\Phi\}_i^T [K] \{\Phi\}_i$  și

$$\{Q^*\} = [\Phi]^T \{Q\}, \quad i = \overline{1, n} \quad (1.20)$$

Unde  $Q_i^* = \{\Phi\}_i^T \{Q\}$ .

Ecuațiile diferențiale cuplate care descriu răspunsul la vibrații ale sistemului (1.4) vor fi decuplate în  $n$  ecuații diferențiale de ordinul doi cu coeficienți constanți:

$$[M^*]\{\ddot{q}\} + [K^*]\{q\} = \{Q^*\} \quad (1.21)$$

sau:

$$M_i^* \ddot{q}_i + k_i^* q_i = Q_i^* \quad i = \overline{1, n} \quad (1.22)$$

Dacă se împarte cu  $M_i^*$  și dacă se consideră că:  $\omega_i^2 = k_i^*/M_i^*$ , se obține:

$$\ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{Q_i^*}{M_i^*}, \quad i = \overline{1, n} \quad (1.23)$$

Se obține următorul rezultat:

**Teorema T4.** Sistemul (1.22) are, pentru  $\omega_i^2 = 1\omega_i^2$ , soluția omogenă a sistemului (excitația nu influențează mișcarea sistemului).

Argument: Se consideră că în matricea modală, primii  $n_1$  vectori corespund frecvențelor proprii  $\omega_i^2 = 1\omega_i^2$ . Apoi:

$$\{\Phi\}_i^T \{Q\} = [\{\Phi_1\}^T \ \dots \ \{\Phi_1\}^T \ \{0\}^T]^T \{Q\} = 0 \quad (1.24)$$

Modul de vibrație este ortogonal față de excitație, iar sistemul devine:

$$\begin{cases} \ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = 0 & i = \overline{1, n_1} \\ \ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{Q_i^*}{J_i^*} & i = \overline{n_1 + 1, n} \end{cases} \quad (1.25)$$

iar soluția sistemului la vibrații forțate devine:

$$\begin{aligned} \{\theta\} = [\Phi]\{q\} &= [\{\Phi\}_1 \ \{\Phi\}_2 \ \dots \ \{\Phi\}_{n_1} \ \{\Phi\}_{n_1+1} \ \dots \ \{\Phi\}_n] \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ q_{n_1+1} \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix} & (1.26) \\ &= [ \ \{\Phi\}_{n_1+1} \ \dots \ \{\Phi\}_n ] \begin{Bmatrix} q_{n_1+1} \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

De asemenea, mai există următoarea proprietate:

**Teorema T5.** Amplitudinile vibrațiilor soluțiilor particulare forțate au, pentru fiecare vibrație armonică, forma:

$$\{\theta_f\} = \begin{Bmatrix} \theta_{1f} \\ \theta_{1f} \\ \theta_{rf} \end{Bmatrix} \quad (1.27)$$

Se constată că simetria excitației este păstrată în simetria răspunsului.

*Argument:*

Pentru o frecvență  $f$  unde excitația este  $\{Q_f\}$ , amplitudinea vibrațiilor forțate este dată de:

$$([K] - f[M])\{\theta_f\} = \{Q_f\} \quad (1.28)$$

Sau:

$$\begin{bmatrix} [P_e(\omega_i^2)] & 0 & [K_c] \\ 0 & [P_e(\omega_i^2)] & [K_c] \\ [K_c]^T & [K_c]^T & [P_r(\omega_i^2)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\theta_l\} \\ \{\theta_r\} \\ \{\theta_w\} \end{Bmatrix}_i = \begin{Bmatrix} Q_{1f} \\ Q_{1f} \\ Q_{rw} \end{Bmatrix}, \quad i = \overline{n_1 + 1, n} \quad (1.29)$$

Ceea ce se mai poate scrie și ca:

$$[P_e(\omega_i^2)]\{\theta_l\}_i + [K_c]\{\theta_w\}_i = \{M_{1f}\} \quad (1.30)$$

$$[P_e(\omega_i^2)]\{\theta_r\}_i + [K_c]\{\theta_w\}_i = \{M_{1f}\} \quad (1.31)$$

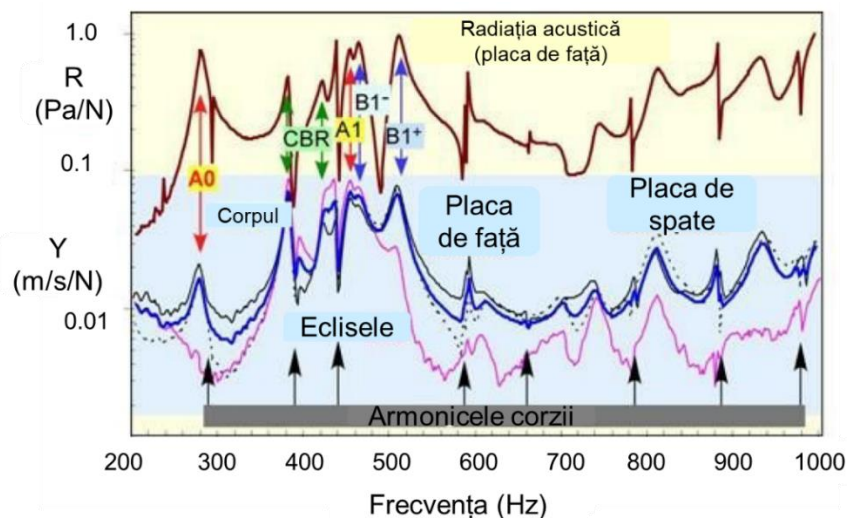
$$[K_c]^T\{\theta_l\}_i + [K_c]^T\{\theta_r\}_i + [P_e(\omega_i^2)]\{\theta_w\}_i = \{M_{1f}\} \quad (1.32)$$

De aici rezultă că ecuațiile (1.30) și (1.31) au aceeași soluție. Proprietatea este, de asemenea, păstrată pentru vibrații amortizate cu amortizare proporțională și, în general, dacă matricea de amortizare poate fi descompusă în formă Caughey.

Modelele matematice al corpurilor de tip Helmholtz supuse la vibrații libere și vibrații forțate au constituit tematica abordată în două articole științifice publicate în revista *Symmetry*, în anul 2019 și 2020 [112; 166].

### 1.3.3 Modelul numeric al structurilor lignocelulozice de tip Helmholtz la plăcile de vioară

Vioara este o structură lignocelulozică complexă care suferă vibrații de mică amplitudine și are o multitudinea de moduri de vibrație. Fiecare mod are o frecvență rezonantă, un factor de amortizare, o formă a modului de vibrație și un model de eficiență a radiației [199–202]. Lucrarea de pionierat asupra modurilor de vibrație a plăcilor de vioară a fost inițiată de [78; 82–83] pentru definirea modurilor de vibrație a plăcilor. Sarcina principală a producătorului de vioară este de a utiliza operațiuni tehnologice pentru a controla unii dintre parametrii modurilor de vibrație. Merită menționat faptul că în gama de frecvențe sonore vioara are numeroase moduri vibraționale. **Figura 1.16** prezintă comparativ răspunsul a două viori celebre, Titian Stradivari (linie groasă) și Plowden Guarneri del Gesu (linie subțire) excitate în zona călușului [11–13].



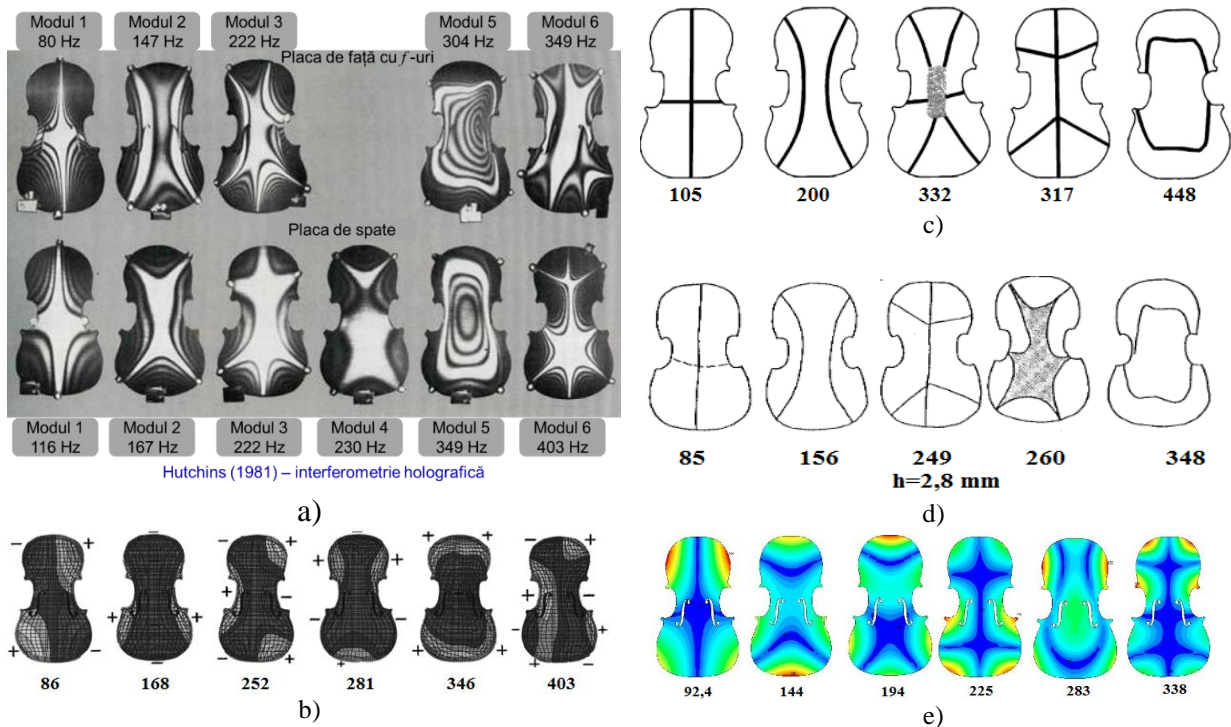
**Figura 1.16.** Modurile specifice de vibrație ale unor viori studiate de [11–13] : vioara Titian Stradivari (linie groasă) și vioara Plowden Guarneri del Gesu (linie subțire) ( $R$  – radiația acustică a plăcii de față;  $Y$  – amplitudinea elementelor structurale ale viorilor investigate)

În lucrarea [13], sunt prezentate modurile de vibrație specifice ale celor două viori istorice: modul de vibrație a aerului din cavitate notate cu  $A_0$ , respectiv  $A_1$ , modul corpului (notate CBR sau modul romboidal), modul de rezonanță ale corpului principal (notate  $B_1^-$  and  $B_1^+$ ). Din punct de vedere al frecvențelor, există două moduri de frecvență joasă asociate cu variația presiunii aerului din cutia de rezonanță a viorii, care implică vibrațiile în fază a fețelor, spatelui și aerului din interiorul cavității, acestea înregistrându-se în jurul valorii de 270 Hz și fiind denumite moduri de rezonanță Helmholtz [11 – 13; 65–70; 113]. Următorul mod de vibrație se produce sub forma unei unde staționare în lungul corpului de vioară, în intervalul 470 - 490 Hz și este răspunsul structurii la vibrațiile în fază ale feței și spatelui. Astfel, plăcile din lemn vibrează, formându-se un mod de vibrație romboidal, la o frecvență de aproximativ 400 Hz. Primele moduri de încovoieră a plăcilor de vioară de tip  $B_1^-$  and  $B_1^+$  se produc în jurul frecvenței de 500 Hz. Fiecare vioară are



doar cinci moduri de vibrație specifice: vibrațiile rezonatorului (aerului), vibrația plăcii de față, vibrația spatelui, vibrația ecliselor. Uneori, cordarul sau tastiera/gâtului se pot cupla la aceste moduri, măbind numărul de moduri și valori. Vibrațiile joase cuprinse în intervalul 196–660 Hz ce reprezintă frecvențele corzilor libere, precum și cea specifică notei La ( $A = 440$  Hz) sunt cruciale pentru sunetul vioarei și reprezintă modurile cele mai joase ale structurii care definesc sunetul, timbrul instrumentului [11 – 13; 65–70; 113]. La frecvențe mai mari de 700 Hz, când violonistul ține sau cântă vioara, amortizarea totală crește atât de mult încât modurile se suprapun.

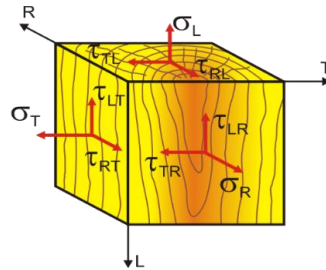
Totuși, fiecare placă (de față și spate) prezintă moduri și frecvențe proprii diferite ca urmare a geometriei și materialului din care sunt confecționate, fapt pentru care, primele evaluări privind calitatea acustică a instrumentului se fac prin investigarea plăcilor ca structuri individuale. Studiind frecvențele proprii ale plăcilor de vioară ca structuri individuale au fost întreprinse de [82–83] care a considerat că, din punct de vedere acustic, placa superioară și placa posterioară a unei vioari trebuie să aibă același ton, iar frecvența modului 2 din placa superioară ar trebui să fie în limita a 1.4% din cea plăcii de spate. Armonizarea celor două plăci poate fi obținută chiar dacă se utilizează diferite specii de lemn, dar efectul de reglare poate fi sesizat numai după asamblarea celor două plăci și crearea corpului vioarei. În [Figura 1.17](#) sunt prezentate modurile de vibrații ale plăcilor individuale (față, spate) analizate de [19; 83; 89; 114; 105; 169; 172], în diferite condiții de contur sau în funcție de diferiți parametri cum ar fi: forma, arcuirea, varierea grosimii, efectul cuplării plăcii de eclise etc., utilizând analiza cu elementele finite.



*Figura 1.17. Moduri de vibrație ale plăcilor de vioară analizate de: a) Hutchins, 1981 [83]; b) Bretos, 1999 [19]; c) Molin 1988 [114]; d) Janson 2002 [89]; e) Ye Lu, 2013 [105]*

Identificarea modurilor individuale de frecvență joasă ale corpului vioarei este importantă pentru delimitarea intervalului de frecvență în care producătorul de vioară, prin fabricație, poate căuta să controleze aceste moduri și implicit să controleze sunetul vioarei. Eficiența radiației acustice a vioarei este afectată de modurile proprii și de frecvențele proprii ale corpului vioarei și implicit de modurile de vibrație ale plăcilor vioarei. Modurile de vibrație ale plăcilor de vioară (forma și numărul liniilor nodale) depind de proprietățile speciei de lemn și de condițiile limită ale plăcilor în timpul vibrației (libere sau fixate pe margine)[105; 119; 138; 165] .

Lemnul este un material ortotrop, astfel, prin fiecare punct, trec cele trei direcții ale lemnului: longitudinală (L – în lungul fibrei sau  $x$  sau 1, în notațiile obișnuite ale unui sistem de referință triortogonal drept); radială R sau  $y$  sau 2 și tangențială T sau  $z$  sau 3, așa cum se poate vedea în [Figura 1.18](#).



*Figura 1.18. Principalele plane și axe de simetrie elastică ale lemnului [169]*

Comportamentul elastic ortotrop al lemnului poate fi descris prin legea tridimensională a elasticității lui Hooke exprimat prin matricea de complianță  $[C_{ij}]$  sub forma relației (1.33). Matricea de complianță este formată din douăsprezece constante dintre care nouă sunt independente; trei module de elasticitate ( $E_L, E_R, E_T$ ), trei module de rigiditate ( $G_{LR}, G_{LT}, G_{RT}$ ) și șase rapoarte Poisson (trei dintre ele sunt independente;  $\nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{TR}$ ); direcțiile L, R și T fiind definite conform secțiunilor și elementelor anatomice ale lemnului.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{TL}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} = [C] \quad (1.33)$$

În general starea de tensiune, respectiv starea de deformație din interiorul unei piese de lemn solicitate sunt reprezentate din tensorul tensiunilor și deformațiilor specifice, respectiv [35; 36; 43; 44; 48; 169]:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_L & \tau_{RL} & \tau_{TL} \\ \tau_{RL} & \sigma_R & \tau_{RT} \\ \tau_{TL} & \tau_{TR} & \sigma_T \end{pmatrix}; \quad (1.34)$$

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_L & \frac{1}{2}\gamma_{LR} & \frac{1}{2}\gamma_{LT} \\ \frac{1}{2}\gamma_{LR} & \varepsilon_R & \frac{1}{2}\gamma_{RT} \\ \frac{1}{2}\gamma_{TL} & \frac{1}{2}\gamma_{TR} & \varepsilon_T \end{pmatrix} \quad (1.35)$$

în care  $\sigma_L, \sigma_R$  și  $\sigma_T$  sunt tensiunile normale după direcțiile L, R și T;  $\tau_{LR}, \tau_{RT}$  și  $\tau_{LT}$  – tensiunile tangențiale în planele LR, LT, și TR în care;  $\varepsilon_L, \varepsilon_R$  și  $\varepsilon_T$  sunt deformațiile specifice iar  $\gamma_{LR}, \gamma_{RT}$  și  $\gamma_{LT}$  – lunecările specifice [35; 36; 43; 44; 48; 169]. Tensorul modulelor de elasticitate longitudinală are expresia:

$$T_E = \begin{pmatrix} E_L & 0 & 0 \\ 0 & E_R & 0 \\ 0 & 0 & E_T \end{pmatrix}; \quad (1.36)$$

Tensorul coeficienților de contracție transversală are expresia:

$$T_{\nu} = \begin{pmatrix} 1 & -\nu_{LR} & -\nu_{LT} \\ -\nu_{RL} & 1 & -\nu_{RT} \\ -\nu_{TL} & -\nu_{TR} & 1 \end{pmatrix}; \quad (1.37)$$

Introducând tensorul modulelor de elasticitate longitudinală  $T_E$  și tensorul coeficienților de contracție transversală  $T_{\nu}$ , în egalitatea [35; 36; 43; 44; 48; 169]:

$$\begin{pmatrix} E_L & 0 & 0 \\ 0 & E_R & 0 \\ 0 & 0 & E_T \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\nu_{LR} & -\nu_{LT} \\ -\nu_{RL} & 1 & -\nu_{RT} \\ -\nu_{TL} & -\nu_{TR} & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \end{pmatrix}; \quad (1.38)$$

rezultă:

$$\begin{cases} \varepsilon_L = \frac{1}{E_L} (\sigma_L - \nu_{LR}\sigma_R - \nu_{LT}\sigma_T); & \gamma_{TR} = \frac{\tau_{TR}}{G_{TR}}; \\ \varepsilon_R = \frac{1}{E_R} (\sigma_R - \nu_{RL}\sigma_L - \nu_{RT}\sigma_T); & \gamma_{RL} = \frac{\tau_{RL}}{G_{RL}}; \\ \varepsilon_T = \frac{1}{E_T} (\sigma_T - \nu_{TL}\sigma_L - \nu_{TR}\sigma_R); & \gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{TL}}, \end{cases} \quad (1.39)$$

în care  $\nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RL} \dots$  sunt coeficienții de contracție transversală (primul indice ilustrează direcția în care se produce contracția iar al doilea direcția de acțiune a tensiunii care produce lungirea) [35; 36; 43; 44; 48; 169]. Din motive energetice între coeficienții contracției transversale  $\nu$  și modulele de elasticitate  $E$  există relațiile:

$$E_L\nu_{RL} = E_R\nu_{LR}; \quad E_L\nu_{LR} = E_T\nu_{TL}; \quad E_R\nu_{TR} = E_T\nu_{RT} \quad (1.40)$$

După cum se observă, în cazul lemnului ca material anizotrop ortotrop, există nouă constante elastice principale ceea ce face ca predictibilitatea comportării mecanice și dinamice a lemnului să implice un calcul laborios, fapt pentru care sau dezvoltat programe de analiză cu elemente finite în care se definesc proprietățile de material conform celor trei direcții principale ale lemnului.

Rezultă în final relații (1.41) care exprimă legătura dintre tensiuni și deformațiile specifice:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_L = \frac{(1 - \nu_{RT}\nu_{TR})E_L\varepsilon_L + (\nu_{LR} + \nu_{LT}\nu_{TR})E_R\varepsilon_R + (\nu_{LT} + \nu_{LR}\nu_{RT})E_T\varepsilon_T}{1 - \nu_{RT}\nu_{TR} - \nu_{LR}(\nu_{RL} + \nu_{RT}\nu_{TL}) - \nu_{LT}(\nu_{TL} + \nu_{RL}\nu_{TR})}; \\ \sigma_R = \frac{(\nu_{LR} + \nu_{LT}\nu_{TR})E_L\varepsilon_L + (1 - \nu_{LT}\nu_{TL})E_R\varepsilon_R + (\nu_{RT} + \nu_{LT}\nu_{RL})E_T\varepsilon_T}{1 - \nu_{RT}\nu_{TR} - \nu_{LR}(\nu_{RL} + \nu_{RT}\nu_{TL}) - \nu_{LT}(\nu_{TL} + \nu_{RL}\nu_{TR})}; \\ \sigma_T = \frac{(\nu_{TL} + \nu_{RL}\nu_{TR})E_L\varepsilon_L + (\nu_{TR} + \nu_{LR}\nu_{TL})E_R\varepsilon_R + (1 - \nu_{RL}\nu_{LR})E_T\varepsilon_T}{1 - \nu_{RT}\nu_{TR} - \nu_{LR}(\nu_{RL} + \nu_{RT}\nu_{TL}) - \nu_{LT}(\nu_{TL} + \nu_{RL}\nu_{TR})}; \\ \tau_{TR} = G_{TR}\gamma_{TR}; \tau_{RL} = G_{RL}\gamma_{RL}; \tau_{LT} = G_{LT}\gamma_{LT}. \end{array} \right. \quad (1.41)$$

Pentru modelarea numerică a plăcilor de vioară și determinarea modurilor proprii ale acestora, s-a utilizat analiza cu elemente finite, cu softul ABAQUS, utilizând trei ipoteze privind proprietățile materialului: *material izotrop* (constantele sunt aceleași în toate direcțiile); *material izotrop transversal* (similar cu ortotropia, cu excepția faptului că în unul dintre planurile ortogonale, modulii elastici sunt aceiași în toate direcțiile); *material ortotrop* (proprietățile elastice sunt simetrice față de trei planuri ortogonale; modulele elastice diferă între fiecare dintre cele trei axe ortogonale corespunzătoare, dar sunt aceleași de-a lungul oricărei axe) [35; 36; 43; 44; 48; 169]. Caracteristicile mecanice utilizate în analiza cu elemente finite (FEA) au fost preluate din literatura de specialitate [44; 137; 176] și sunt prezentate în [Tabelul 1.3](#).

*Tabelul 1.3. Caracteristicile elastice ale lemnului de molid și paltin utilizate pentru analiza FEA [44; 137; 176]*

Parametrii fizici și elastici	Ipoteza I Solid izotrop		Ipoteza II Izotrop transversal		Ipoteza III Ortotropic	
	Molid	Paltin	Molid	Paltin	Molid	Paltin
Densitatea (kg/m <sup>3</sup> )	400	600	400	700	430	590
Modulul de elasticitate longitudinală (MPa)	15 000	10 000				
$E_L(E1)$			13000	10 000	13500	10 000
$E_R(E2)$			700	2 000	890	1 570
$E_T(E3)$			700	2 000	480	870
Modulul de elasticitate transversală (MPa)	840	700				
$G_{RT}$			60	720	32	290
$G_{LT}$			900	1600	500	1100
$G_{LR}$			900	1600	720	1222
Coeficientul lui Poisson	0.37	0.37				
$\nu_{LR}$			0.37	0.47	0.450	0.46
$\nu_{RL}$					0.030	0.093
$\nu_{LT}$			0.42	0.50	0.540	0.50
$\nu_{TL}$					0.019	0.038
$\nu_{RT}$			0.47	0.50	0.560	0.82
$\nu_{TR}$					0.300	0.40

Notă: În ipoteza solidelor izotrope transversale, se consideră  $E_R = E_T$ ;  $G_{LR} = G_{LT}$  și trei rapoarte Poisson.

Scopul modelării a fost determinarea modurilor și frecvențelor proprii ale plăcilor de vioară libere și încastate pe contur. Ca modele geometrice, s-au luat în studiu două variante de plăci: plăci plane cu conturul forme de vioară (Cazul 1) și plăci arcuite (Cazul 2), conform geometriei reale a plăcilor de vioară (Figura 1.19). În prima etapă au fost analizate plăci plane, fără orificiile acustice  $f$ , cu grosimea constantă de 3 mm, apoi plăci arcuite cu grosimea de 3 mm, cu orificii acustice și fără orificii acustice. Analiza elementelor finite a plăcilor de vioară a fost efectuată cu software-ul ABAQUS 2017, modelul fiind discretizat în elemente finite de tip tetraedru patratic cu 10 noduri C3D10: A10-node quadratic tetrahedron.

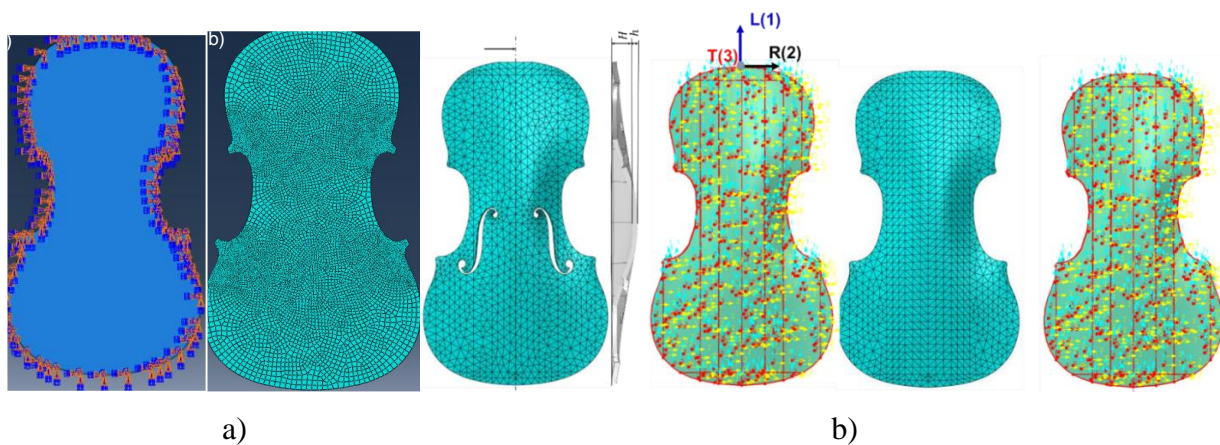


Figura 1.19. Modelarea cu elemente finite a plăcilor de vioară: a) cazul 1 – plăci plane, încastate pe contur; b) plăci arcuite [169]

### **Cazul 1. Valori proprii și moduri de vibrație ale plăcilor plane, încastate pe contur**

#### **Plăci din lemn de molid**

În ceea ce privește analiza modală a plăcii de vioară din molid, s-a observat că anizotropia lemnului nu are niciun efect asupra primelor cinci moduri de vibrații, diferențele privind valorile frecvențelor proprii fiind de maxim 13% pentru modul 5, între frecvența proprie a materialului ortotrop și cel izotrop, iar formele modale sunt identice (Tabelul 1.4). Pentru modul 6, izotrop, izotrop transversal și anizotrop ortotrop, frecvențele sunt respectiv 202.42 Hz, 205.95 Hz și 219.55 Hz.

Modelarea plăcii ca material ortotrop produce diferențierea modurilor 7 și 8 atât ca forme modale cât și ca valori ale frecvenței proprii care sunt cu aproximativ 10% mai mari decât în cazul modelării ca material izotrop. Modurile 9, 10 și 12 prezintă forme modale identice pentru cele trei tipuri de materiale analizate, diferind doar amplitudinea și mărimea suprafeței vibrante.

La moduri superioare, peste 588 Hz, modurile de vibrație sunt diferite pentru fiecare caz de anizotropie luat în studiu (Tabelul 1.5). Cu toate acestea, în cazul plăcii ortotrope, modul 49, la frecvența de 595.6 Hz, partea superioară nu vibrează. La frecvențe mai mari de 1500 Hz,

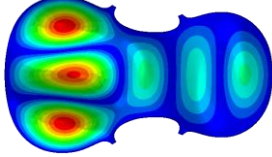
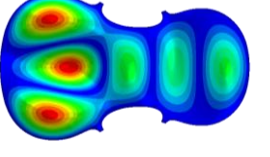
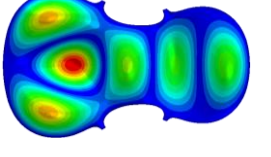
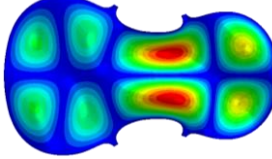
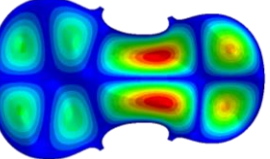
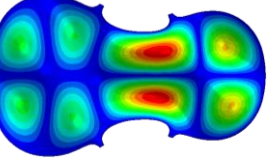
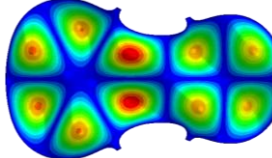
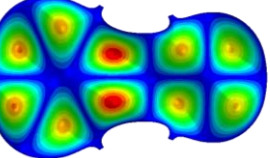
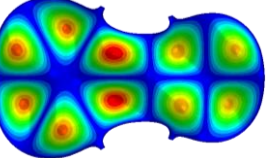
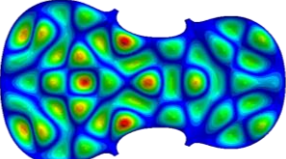
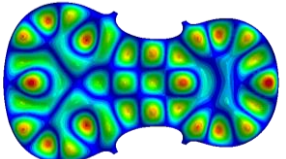
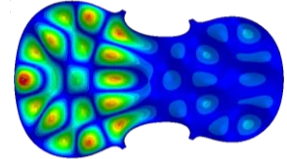
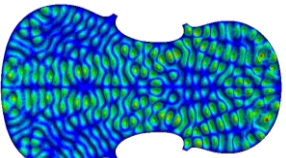
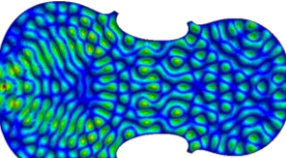
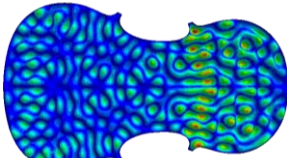


suprafețele vibrante sunt de mică amplitudine și sunt distribuite în mod egal pe suprafața plăcii. Interesant este faptul că s-a obținut aceeași frecvență de 1568 Hz, indiferent de ipoteza privind tipul de material.

*Tabelul 1.4. Modurile de vibrație la frecvențe joase, ale plăcilor din lemn de molid, fixate pe contur [169]*

Mod	Izotropie (Izo)	Isotropie transversală (Izo T)	Ortotropie simetrică (Orto S)
<b>Moduri joase</b>			
<b>1</b>	Mod 1, f=101.75 Hz	Mod 1, f=100.91 Hz	Mod 1, f=108.3 Hz
<b>Mod:</b> Identic			
<b>Frecvența:</b> 6.5%			
<b>2</b>	Mod 2, f=119.97 Hz	Mod 2, f=122.01 Hz	Mod 2, f=130.69 Hz
<b>Mod:</b> Identic			
<b>Frecvența:</b> 8.5%			
<b>3</b>	Mod 3, f=152.99 Hz	Mod 3, f=158.4 Hz	Mod 3, f=170.79 Hz
<b>Mod:</b> Identic			
<b>Frecvența:</b> 10.5%			
<b>4</b>	Mod 4, f=167.05 Hz	Mod 4, f=165.73 Hz	Mod 4, f=177.23 Hz
<b>Mod:</b> Identic			
<b>Frecvența:</b> 5.6%			
<b>5</b>	Mod 5, f=185.72 Hz	Mod 5, f=193.77 Hz	Mod 5, f=209.98 Hz
<b>Mod:</b> Identic			
<b>Frecvența:</b> 11.5%			
<b>6</b>	Mod 6, f=202.42 Hz	Mod 6, f=205.95 Hz	Mod 6, f=219.55 Hz
<b>Mod:</b> Identic			
<b>Frecvența:</b> 7.76%			
<b>7</b>	Mod 7, f=219.56 Hz	Mod 7, f=229.82 Hz	Mod 7, f=247.59 Hz
<b>Mod:</b> Diferă			
Orto S			
<b>Frecvența:</b> 11.33%			
<b>8</b>	Mod 8, f=224.71 Hz	Mod 8, f=230.65 Hz	Mod 8, f=248.18 Hz
<b>Mod:</b> Diferă Orto			
S			
<b>Frecvența:</b> 9.67%			

*Tabelul 1.5. Modurile de vibrație la frecvențe superioare ale plăcilor din lemn de molid, fixate pe contur [169; 172]*

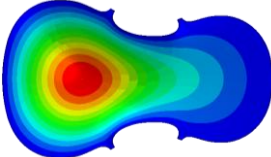
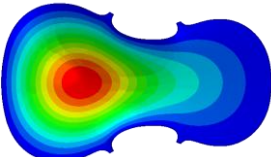
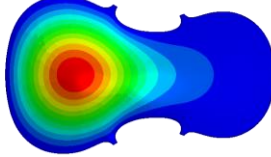
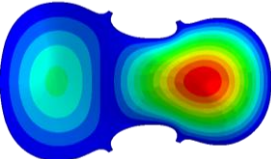
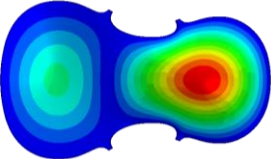
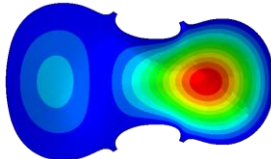
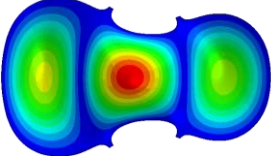
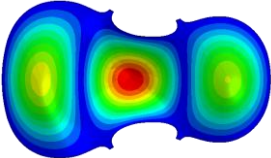
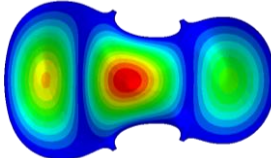
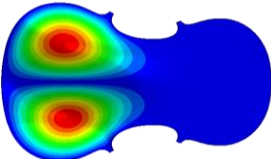
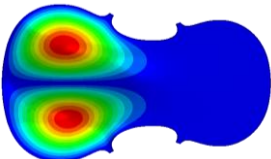
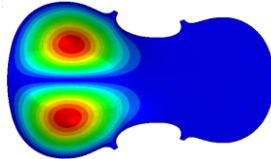
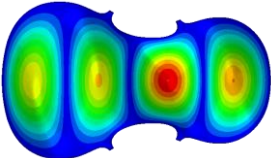
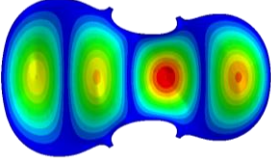
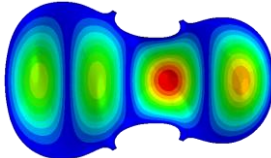
Mod	Izotropie (Izo)	Isotropie transversală (Izo T)	Ortotropie simetrică (Orto S)
<b>9</b> Mod: Identic Frecvența: 9.72%	Mod 9, $f=232.74$ Hz 	Mod 9, $f=239.71$ Hz 	Mod 9, $f=257.02$ Hz 
<b>10</b> Mod: Identic Frecvența: 10.17%	Mod 10, $f=256.79$ Hz 	Mod 10, $f=267.25$ Hz 	Mod 10, $f=285.93$ Hz 
<b>12</b> Mod: Identic Frecvența: 10.96%	Mod 12, $f=276.84$ Hz 	Mod 12, $f=288.70$ Hz 	Mod 12, $f=310.52$ Hz 
<b>49 – 66</b> Mod: diferit Frecvența: 1.1%	Mod 66, $f = 588.15$ Hz 	Mod 56, $f = 591.70$ Hz 	Mod 49, $f = 595.16$ Hz 
<b>358 – 508</b> Mod: Diferit Frecvența: Identică	Mod 508, $f = 1568.4$ Hz 	Mode423, $f = 1568,2$ Hz 	Mod 358, $f = 1568.3$ Hz 

### Plăci din lemn de paltin

În mod similar, au fost analizate plăcile din lemn de paltin. Modelele numerice în cele trei cazuri ale proprietăților de material considerate, relevă faptul că diferențele valorilor proprii sunt mult mai mari decât în cazul plăcilor din lemn de molid, fiind cuprinse între 17% - 24%. Pentru primele cinci moduri, formele modale sunt identice indiferent de proprietățile de material (se observă aceleași moduri atât pentru plăcile de molid cât și pentru cele de paltin, în toate cele trei ipoteze considerate) (Tabelele 1.6; 1.7; 1.8). Începând cu modul 6, formele modale rămân identice doar pentru ipoteza materialului izotrop și izotrop transversal, modelul de mplacă din material ortotrop având o comportare dinamică diferită, până la modurile superioare (peste modul 30, frecvența de aproximativ 334 Hz). În ipoteza materialului ortotrop simetric, se constată că placa vibrează mult mai complex, formându-se noi moduri de vibrații chiar începând cu modul 6 (Tabelul 1.7). Modul 8 este identic ca mod de vibrație cu celelalte ipoteze, modul 11 în ipoteza Orto S este identic cu

modul 10 în ipoteza Izo T, iar modul 15 (Orto S) prezintă aceleași linii nodale ca și modul 12 (ipoteza Izo T). Pentru modurile superioare, formele modale încep să se individualizeze în funcție de ipotezele privind caracteristicile materialelor pe cele trei direcții. În lucrările [169; 172] au fost prezentate rezultatele investigațiilor numerice și experimentale privind formele modale (Chladni) pentru plăcile din lemn de molid (determinate pentru intervalul de frecvență 110 Hz - 2093 Hz), care sunt foarte diferite de cele ale tuturor celorlalte plăci din paltin (cu fibră dreapă, fibră creață), determinate pentru intervalul de frecvență 130.8 Hz și 2093 Hz) așa cum se observă în [Tabelele 1.8 și 1.9](#).

*Tabloul 1.6. Modurile proprii de vibrație ale plăcilor din lemn de paltin, fixate pe contur [169]*

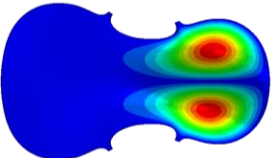
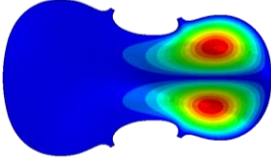
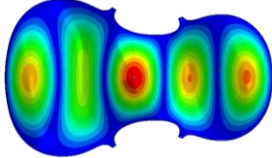
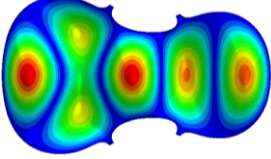
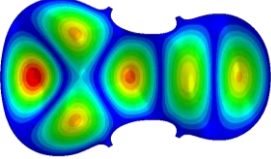
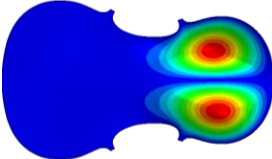
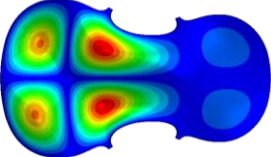
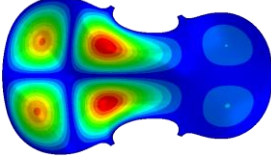
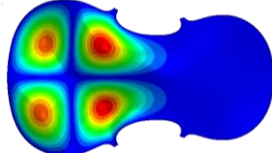
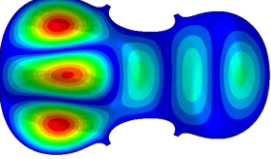
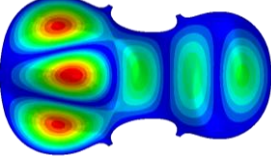
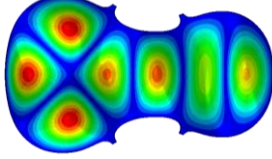
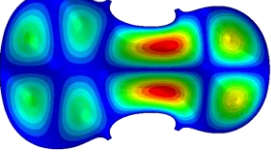
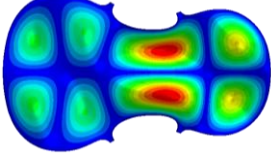
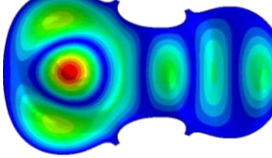
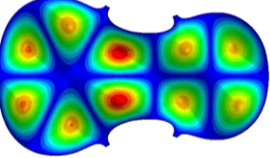
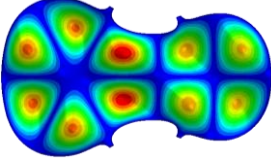
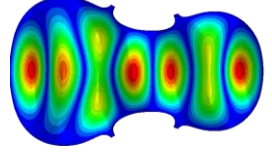
Mod	Izotropie (Izo)	Isotropie transversală (Izo T)	Ortotropie simetrică (Orto S)
<b>1</b> Mod: Identic Frecvența: 20.38%	Mod 1, f=82.62 Hz 	Mod 1, f=84.72 Hz 	Mod 1, f=103.3 Hz 
<b>2</b> Mod: Identic Frecvența: 21.77%	Mod 2, f=97.35 Hz 	Mod 2, f=101.01 Hz 	Mod 2, f=124.84 Hz 
<b>3</b> Mod: Identic Frecvența: 19.48%	Mod 3, f=124.19 Hz 	Mod 3, f=130.31 Hz 	Mod 3, f=154.54 Hz 
<b>4</b> Mod: Identic Frecvența: 21.96%	Mod 4, f=135.66 Hz 	Mod 4, f=138.35 Hz 	Mod 4, f=173.38 Hz 
<b>5</b> Mod: Identic Frecvența: 17.9%	Mod 5, f=151.01 Hz 	Mod 5, f=159.62 Hz 	Mod 5, f=184.25 Hz 

Comparând frecvențele proprii ale plăcilor din molid și cu cele din paltin se poate observa că pentru toate cazurile de anizotropie studiate, valorile proprii sunt mai mari pentru placa de molid decât pentru placa din lemn de paltin. Mai mult, în cazul izotropiei, diferența dintre frecvența modală a plăcii din lemn de molid și a plăcii din lemn de paltin variază în intervalul 13% - 28%. În cazul izotropiei transversale, diferența dintre frecvența modală a plăcii din lemn de molid și cea



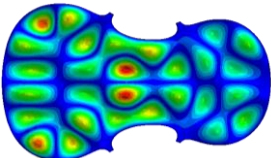
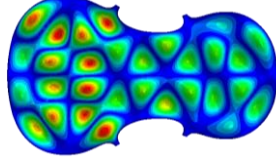
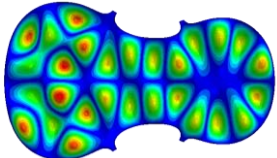
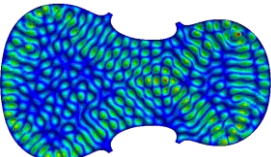
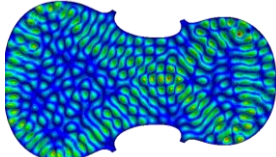
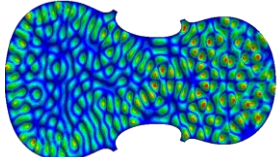
din paltin variază între 17,52% și 18,08% pentru modurile 6, 10 și 12. În cazul simetriei ortotrope, diferențele sunt de maxim 7,88% pentru modul 12 și 1,38% pentru primul mod. Prin urmare, se poate observa că teoretic, pentru plăcile ortotrope, în același mod, frecvențele modale ale plăcilor din molid și paltin sunt foarte apropiate.

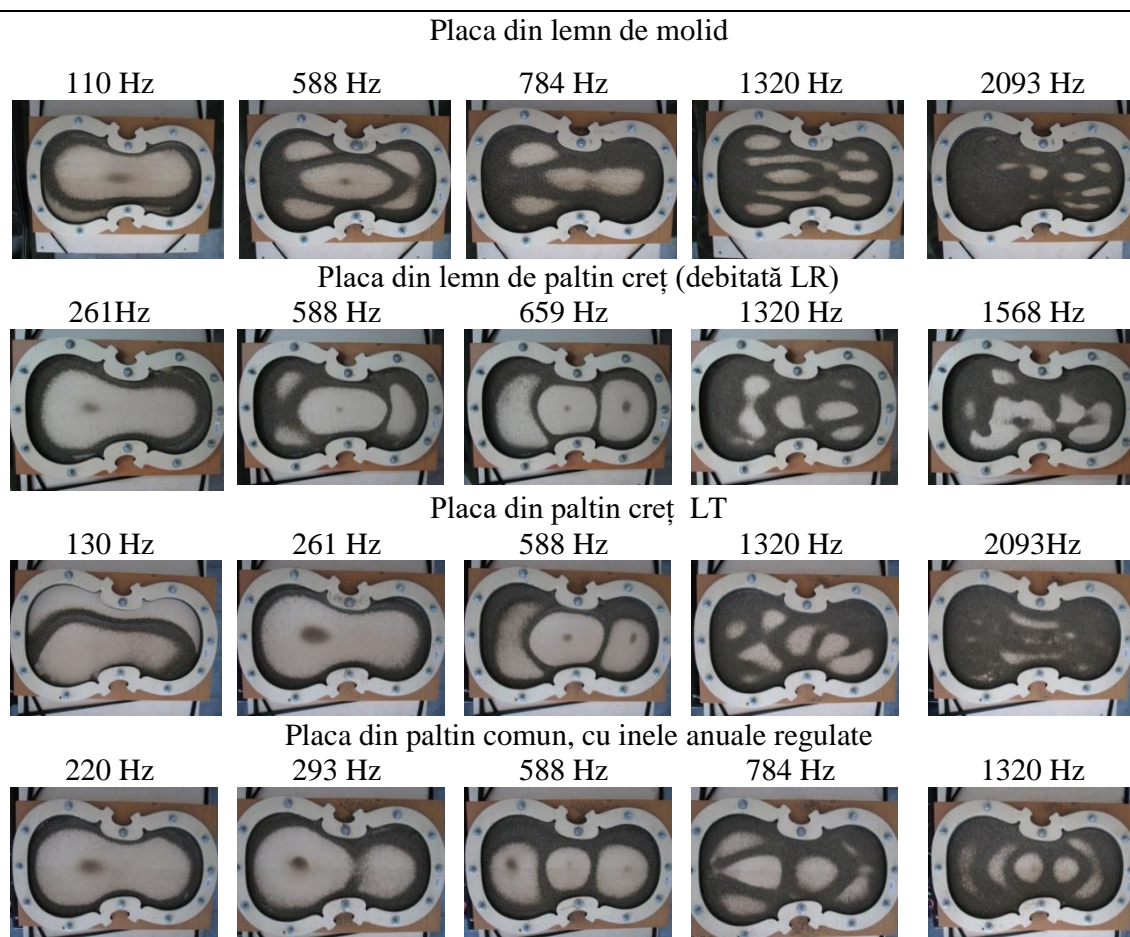
*Tabelul 1.7. Moduri de vibrație ale plăcilor din lemn de paltin, fixate pentru frecvențe 160 -300 Hz) [169; 172]*

Mod	Izotropie (Izo)	Isotropie transversal (Izo T)	Ortotropie simetrică (Orto S)
<b>6</b> Mod: Identic (Izo – Izo T) Frecvența: 24%	Mod 6, f=164.63 Hz 	Mod 6, f=169.86 Hz 	Mod 6, f=216.50 Hz 
<b>7</b> Mod: Identic Frecvența: 17.97%	Mod 7, f=178.74 Hz 	Mod 7, f=189.26 Hz 	Mod 7, f=217.44 Hz 
<b>8</b> Mod: Identic Frecvența: 21.2%	Mod 8, f=182.69 Hz 	Mod 8, f=190.43 Hz 	Mod 8, f=231.71 Hz 
<b>9</b> Mod: Identic Frecvența: 23.79%	Mod 9, f=189.49 Hz 	Mod 9, f=197.58 Hz 	Mod 9, f=248.31 Hz 
<b>10</b> Mod: Identic Frecvența: 19%	Mod 10, f=208.99 Hz 	Mod 10, f=218.92 Hz 	Mod 10, f=257.72 Hz 
<b>12</b> Mod: Identic Frecvența: 21.32%	Mod 12, f=225.42 Hz 	Mod 12, f=237.20 Hz 	Mod 12, f=286.02 Hz 

În lucrările [169; 172] au fost prezentate rezultatele investigațiilor numerice și experimentale privind formele modale (Chladni) pentru plăcile din lemn de molid (determinate pentru intervalul de frecvență 110 Hz - 2093 Hz), care sunt foarte diferite de cele ale tuturor celorlalte plăci din paltin (cu fibră dreapă, fibră creață), determinate pentru intervalul de frecvență 130.8 Hz și 2093 Hz) așa cum se observă în Tabelul 1.9.

*Tabelul 1.8. Moduri de vibrație la frecvențe superioare ale plăcilor din lemn de paltin [169]*

Mod	Izotropie (Izo)	Isotropie transversală (IzoT)	Ortotropie simetrică (Orto S)
<b>49 – 66</b> Mod: diferit Frecvența: 23%	Mod 43, $f = 397.15\text{Hz}$ 	Mod 47, $f = 440.70\text{ Hz}$ 	Mod 44, $f = 516.16\text{ Hz}$ 
<b>358 – 508</b> Mod: identic Frecvența: 18.16%	Mod 510, $f = 1284.4\text{ Hz}$ 	Mod 510, $f = 1380,6\text{ Hz}$ 	Mod 432, $f = 1569.3\text{ Hz}$ 

*Tabelul 1.9. Modurile de vibrații determinate experimental, prin excitarea plăcilor la frecvențe cuprinse între 110 Hz - 2093 Hz [169; 172]*

În cazul plăcii de molid, pentru toate frecvențele, liniile nodale sunt paralele cu axa longitudinală a plăcii. Majoritatea modelelor prezintă o suprafață vibrantă simetrică, cu latura mare paralelă cu axa longitudinală a plăcii, care este orientată de-a lungul direcției longitudinale a lemnului. În comparație cu formele modale ale plăcii de molid, în cazul plăcilor din paltin, liniile nodale ale suprafețelor vibrante sunt orientate în mare parte paralel cu lățimea plăcii, corespunzătoare

direcției radiale sau tangențiale a lemnului. Diferențele dintre răspunsurile dinamice ale plăcilor din lemn de molid și arțar se datorează structurii anatomice diferite a acestora. Revenind la modurile experimentale de vibrație ale plăcilor ilustrate în [Tabelul 1.9](#), se remarcă faptul că structura anatomică uniformă a lemnului de molid determină un răspuns modal într-o gamă largă de frecvențe. Unele moduri de vibrație asimetrice ar putea fi observate atât în cazul frecvenței joase (110 Hz), cât și a frecvenței înalte (2093 Hz). Comparând formele modale ale tuturor plăcilor testate din paltin, cele mai distincte linii nodale pentru primele trei frecvențe sunt obținute în cazul plăcilor din paltin cu fibra creață (CM), aspect ce nu poate fi evidențiat în cazul analizei numerice. Pentru o frecvență de 130.8 Hz, placa din paltin creț are un model foarte asimetric. La frecvența de 2093 Hz, formele modale sunt aproape inexistente, fapt datorat fie modalității de testare (cu difuzor, noncontact), fie datorat amplitudinilor mici induse de această frecvență. Comportamentul lemnului în câmp acustic depinde de specie, densitate, proprietăți elastice, conținut de umiditate, constituenți chimici ai peretelui celular și orientarea microfibrilelor în peretele celular etc [21–26].

### ***Cazul 2. Vibrațiile libere ale plăcilor de vioară arcuite***

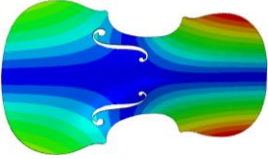
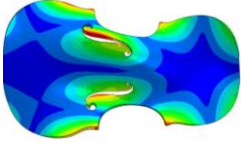
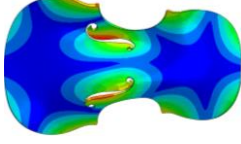
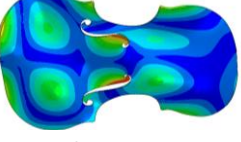
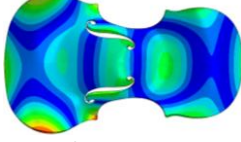
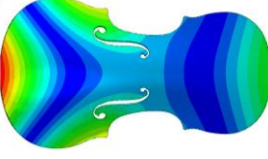
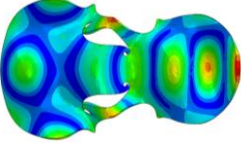
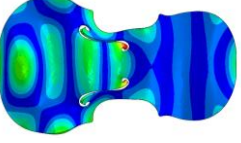
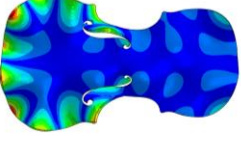
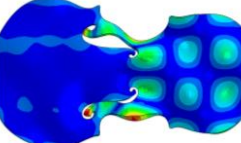
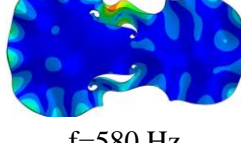
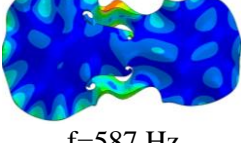
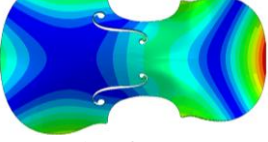
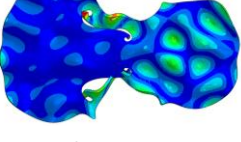
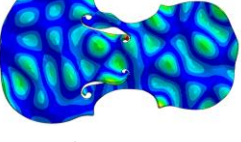
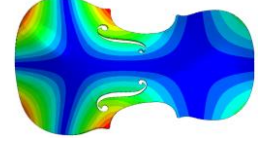
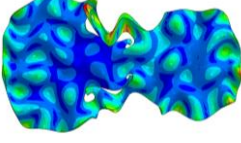
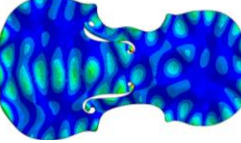
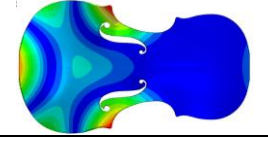
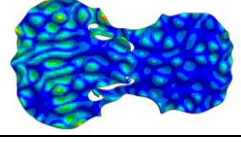
În studiile sale, [68; 70] evidențiază, influența anizotropiei lemnului asupra modurilor de vibrație a plăcilor. Vibrația plăcilor izotrope implică mai întâi deplasări ale undelor de încovoiere, perpendiculare pe suprafață. Frecvența modală depinde de modulul lui Young,  $E$ , densitatea  $\rho$ , grosimea plăcii  $h$  și  $k = 2\pi/\lambda$ , unde  $\lambda$  este lungimea de undă caracteristică mediată spațial a undelor staționare bidimensionale,  $V$  este viteza undei staționare. Frecvența modală este dată de expresia:

$$f_{modal} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} hk^2 = \frac{Vh4\pi^2}{\lambda^2} \quad (1.42)$$

Astfel, și vibrația plăcilor ortotrope prezintă moduri de încovoiere care sunt bidimensionale și frecvența depinde de mai mulți parametri elastici ai mediului anizotrop. În ceea ce privește anizotropia ortotropă, ar trebui luate în considerare următoarele rapoarte: raportul dintre modulele Young  $E_L/E_R$ ;  $E_L/E_T$ ; raportul dintre modulele de forfecare  $G_{LR}/G_{RT}$ ; respectiv  $G_{LT}/G_{RT}$  și rapoartele dintre coeficienții lui Poisson [21]. În [Tabelul 1.10](#) sunt prezentate modurile și valorile proprii pentru placa de față a viorii, în cele trei ipoteze de material. Se observă că forma arcuită a plăcilor combinată cu caracteristicile izotrope transversale și ortotrope simetrice generează un răspuns modal diferit al plăcilor față de modelarea ca material izotrop și implicit diferite față de plăcile plane.



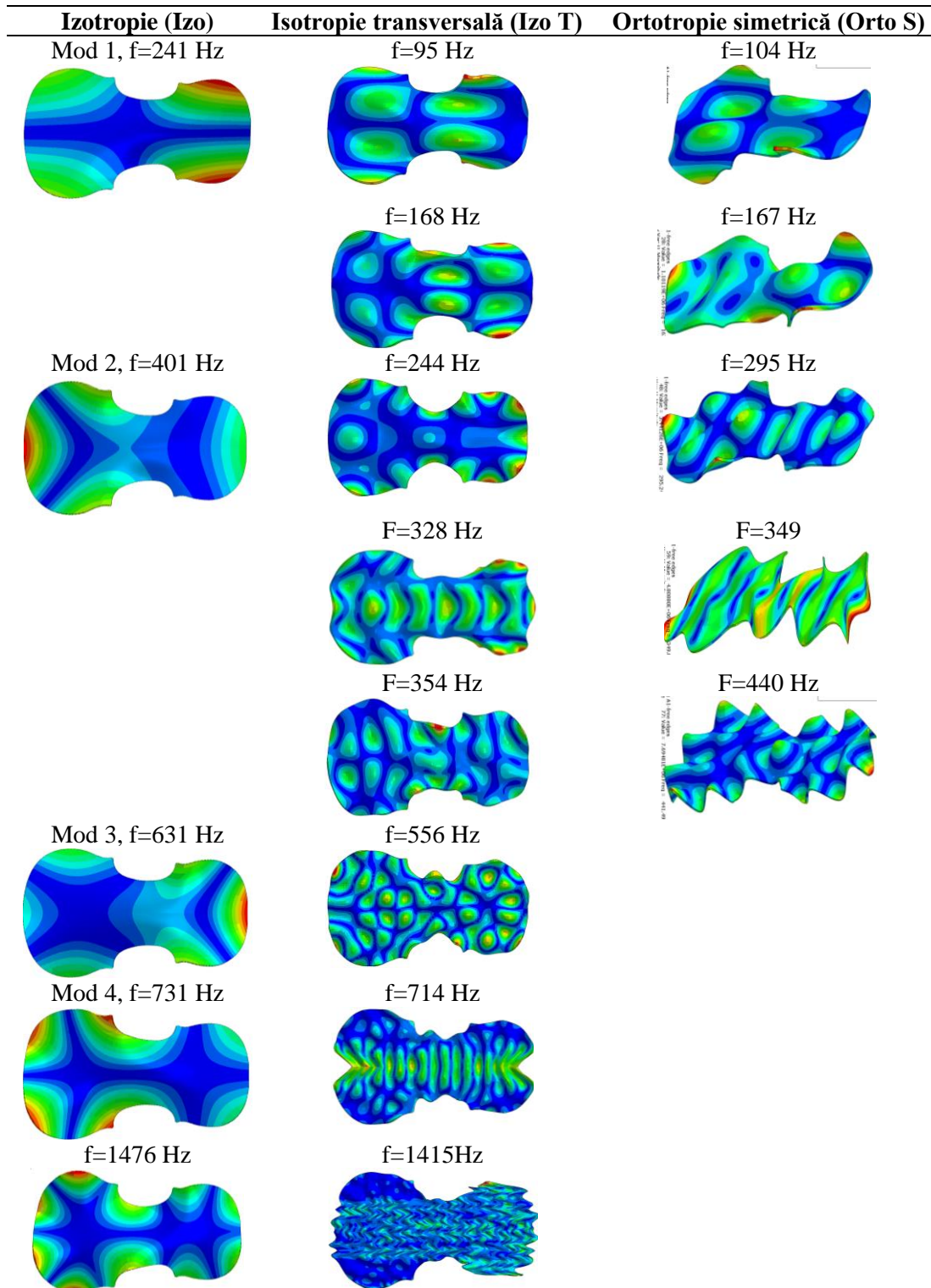
*Tabelul 1.10. Modurile de vibrații ale plăcilor libere de vioară (molid)*

<b>Izotropie (Izo)</b>	<b>Isotropie transversală (Izo T)</b>	<b>Ortotropie simetrică (Orto S)</b>
Mod 1, $f=219$ Hz	$f=73$ Hz	$f=73$ Hz
		
	$f=143$ Hz	$f=140$ Hz
		
Mod 2, $f=371$ Hz	$f=249$ Hz	$f=246$ Hz
		
	$F=348$ Hz	$F=350$
		
	$F=443$ Hz	$F=444$ Hz
		
Mod 3, $f=586$ Hz	$f=580$ Hz	$f=587$ Hz
		
Mod 4, $f=709$ Hz	$f=699$ Hz	$f=707$ Hz
		
$f=1220$ Hz	$f=1272$ Hz	
		

Diferențele sunt considerabile și între valorile proprii ale plăcilor izotrope, respectiv ortotrope. Se poate aprecia faptul că, deși placa este subțire, putându-se neglija proprietățile pe direcția grosimii, totuși pentru obținerea unor modele numerice cât mai apropiate de realitate, este recomandat să se modeleze structura lignocelulozică cu toate caracteristicile elastice. În cazul plăcilor de vioară din

lemn de paltin, în funcție de ipoteza luată în studiu, comportarea este similară cu a plăcilor de molid (Tabelul 1.11).

*Tabelul 1.11. Modurile proprii de vibrație ale plăcii de vioară arcuite, din lemn de paltin*



În Tabelul 1.12 preluat și adaptat după [68], sunt centralizate valorile frecvențelor proprii calculate numeric de [68] și comparate cu cele din literatura de specialitate [19; 83; 89; 114; 105]. O problemă interesantă abordată de [68] și [114] este cea legată de corelație dintre analiza modală a plăcilor de vioară și raportul de anizotropie a lemnului pe cele două direcții principale

din structura plăcilor – longitudinală și radială. Astfel, raportul de frecvențelor modurilor #5/#2 determinate cu FEA se modifică cu mai puțin de 4% pe întregul intervalul de anizotropie, de la o valoare inițială de 2.14 pentru un material izotrop, scăzând inițial la un minim de 2.10 pentru un raport de anizotropie în intervalul 2-3, și apoi crescând înapoi de la valoarea pentru un material izotrop la un material anizotrop, de aproximativ 16 și continuând să crească slab la 2.19 pentru un raport de anizotropie de 25. Valorile obținute în cadrul propriilor cercetări, au evidențiat rezultate similare cu cele din literatura de specialitate, acestea fiind identificate prin analiza rapoartelor, modurilor de vibrații și intervalului de valori. Întrucât modelarea cu elemente finite diferă în funcție de diferiți factori, în [Tabelul 1.12](#) au fost specificate în paranteza, în dreptul valorilor obținute, numărul modului de vibrație din cadrul simulării proprii.

*Tabelul 1.12. Valorile frecvențelor proprii pentru primele cinci moduri ale plăcilor de vioară*

<b>Modul de vibrație (frecvența (Hz))</b>	<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>	<b>#4</b>	<b>#5</b>	<b>Raportul #5/#2</b>
<b>Placa de față - molid</b>						
Modelul izotrop (FEA) [38]	82	158	218	231	333	2.12
Hutchins 1981, EXP [83]	80	147	222	-	304	2.37
Roberts 1986 (FEA) [139]	80	146	241	251	295	2.02
Molin et al 1988, (EXP) [114]	106	196	343	339	471	2.40
Molin et al 1988, (FEA) [114]	105	200	317	332	448	2.24
Bretos 1999, FEA [19]	92	168	-	-	346	2.06
<b>Placa plană</b>						
Stanciu ș.a., 2020 (FEA) Izo [169]	101	152 (#3)	219 (#7)	232 (#9)	300 (#16)	1.97
Stanciu ș.a., 2020 (FEA) Izo T [169]	100	158 (#3)	229 (#7)	239 (#9)	316 (#16)	2.00
Stanciu ș.a., 2020 (FEA) Orto S [1169]	108	170 (#3)	247 (#7)	257 (#9)	343 (#16)	2.01
<b>Placa arcuită cu f-uri</b>						
Stanciu ș.a., 2021 (FEA) Izo [172]		219	371	586	709	3.23
Stanciu ș.a., 2021 (FEA) Izo T [172]	73	143	249	348	443	3.09
Stanciu ș.a., 2021 (FEA) Orto S [172]	73	140	246	350	444	3.17
<b>Placa de spate paltin</b>						
	<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>	<b>#4</b>	<b>#5</b>	<b>Raportul #5/#2</b>
Modelul izotrop (FEA) [38]	93	169	248	252	348	2.07
Hutchins 1981, EXP [83]	116	167	222	230	349	2.08
Roberts 1986 (FEA) [139]	127	186	312	294	362	2.17
Rodgers 1988 (FEA) [137]	113	148	250	229	351	2.37
Molin et al 1988, (EXP) [114]	125	213	373	352	467	2.19
Molin et al 1988, (FEA) [114]	130	209	367	342	493	2.36
Bretos 1999, FEA [19]	107	176	184	231	353	2.00
<b>Placa plană</b>						
Stanciu ș.a., 2020 (FEA) Izo [169]	82	151 (#5)	182 (#8)	225 (#12)	325 (#28)	2.15
Stanciu ș.a., 2020 (FEA) Izo T [169]	84	159 (#5)	190 (#8)	237 (#12)	332 (#26)	2.08
Stanciu ș.a., 2020 (FEA) Orto S [169]	103	184 (#5)	231 (#8)	318 (#15)	395 (#24)	2.14
<b>Placa arcuită cu f-uri</b>						
Stanciu ș.a., 2021 (FEA) Izo [172]	-	241	401	631	731	3.03
Stanciu ș.a., 2021 (FEA) Izo T [172]	95	168	244	328	354	2.10
Stanciu ș.a., 2021 (FEA) Orto S [172]	104	167	295	349	440	2.63

## 1.4 Concluzii privind arhitectura instrumentelor muzicale

Structurile din lemn de rezonanță, cum sunt instrumentele muzicale cu corzi, prezintă un grad ridicat de complexitate constructivă (geometrie, din punct de vedere al materialelor utilizate (calitate structurii, proprietăți elastice, acustice), cât și tehnologic astfel încât să rezulte un instrument cu o acustică foarte bună.

În prima parte a acestui capitol au fost prezentate analizele comparative făcute pe viori istorice și de patrimoniu – considerate modele de instrumente muzicale cu calități acustice deosebite, în vederea identificării acelor elemente definitorii pentru reproducerea sau realizarea unor viori actuale de aceeași calitate acustică. S-au investigat prin tehnici moderne macrostructura materialului lemnos stabilindu-se modelele anatomice ale lemnului de molid de rezonanță, respectiv ale lemnului de paltin; configurația corpurilor de vioară și a elementelor geometrice prin tomografie computerizată și s-au identificat modelele analitice și numerice ale corpurilor de vioară ținând cont de diferite ipoteze ale proprietăților de material.

În continuare se prezintă principalele concluzii referitoare la rezultatele prezentate în cadrul acestui capitol:

- Primul factor determinant în asigurarea calității acustice a instrumentului muzical este calitatea materialului lemnos, iar ca descriptori ai calității lemnului pot fi menționați lățimea inelelor anuale (în cazul viorilor istorice analizate aceasta variază de la 0.15 mm la 4.22 mm ambele valori regăsindu-se la vioara ”copie Stainer”), proporția de lemn timpuriu și lemn târziu (proporțiile celor două componente ale inelului anual prezintă un nivel moderat de variabilitate (coeficientul de variație: 16% respectiv 32%), regularitatea inelelor anuale. În 40% din cazuri, indicele de regularitate a lățimii inelelor ( $RI \leq 0.700$ ), simetria jumătăților ce compun plăcile de vioară (peste 60% coeficientul de corelație *Gleichläufigkeit* între seriile de inele din jumătatea dreaptă respectiv stângă);
- Secțiunile prin viorile analizate la computer tomograf oferă informații utile atât pentru manufacturieri, cât și pentru ingineri în vederea modelării geometrice a acestor structuri complexe inaccesibile datorită integrității lor constructive și funcționale, dar care constau modele acustice în domeniul muzical.
- Din punct de vedere al abordării modelului matematic, există următoarele ipoteze de calcul:
  - a) simetrie structurală (a materialului), simetrie constructivă (ex: corpul de chitară clasică cu modelul de dispunere a barelor de rezonanță), asimetrie privind sarcinile aplicate;
  - b) simetrie structurală (a materialului), asimetrie constructivă prin elementele componente (ex: vioara are bara bas poziționată asimetric față de axa longitudinală) și asimetrie privind sarcinile aplicate;
  - c) asimetrie structurală, asimetrie constructive, asimetria sarcinilor.
- Modelarea cu elemente finite a evidențiat valori ale frecvențelor proprii pentru primele cinci moduri, apropiate de cele identificate în literatură de specialitate, mai ales pentru

variante de material ortotrop, atât în cazul plăcilor de față cât și pentru spate, diferența fiind de 2.8% pentru plăcile din molid (comparative cu [114]) cu și 2.8% pentru plăcile de paltin (comparativ cu [19]).

Rezultatele cercetărilor prezentate în acest capitol fac parte din Raportul tehnico-științific – aferent etapelor I/2020 și II/2021 al proiectului **PN-III-P2-2.1-PED-2019-2148**, contract **nr. 568PED/2020** *Modele inovative de violi comparabile acustic și estetic cu violile de patrimoniu – MINOVIS* (2020 – 2022), dar au fost și diseminate parțial în cadrul jurnalelor ISI:

1. **Stanciu, M.D.**; Mihălcică, M.; Dinulică, F.; Nauncef, A.M.; Purdoiu, R.; Lăcătuș, R.; Gliga, G.V. X-ray Imaging and Computed Tomography for the Identification of Geometry and Construction Elements in the Structure of Old Violins. *Materials* 2021, 14, 5926. <https://doi.org/10.3390/ma14205926>
2. **Stanciu M.D.**, Cosereanu C., Dinulica F., Bucur V., (2020) Effect of wood species on vibration modes of violins plates. *Eur. J. Wood Prod.* vol 78, pp. 785-799. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01538-5>.
3. Mihălcica M., **Stanciu MD**, Vlase S,(2020) *Frequency Response Evaluation of Guitar Bodies with Different Bracing Systems*, *Symmetry*, 2020, 12, 795; doi:10.3390/sym12050795; <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/795>.
4. **Stanciu, M.D.**; Vlase, S.; Marin, M. (2019a) *Vibration Analysis of a Guitar considered as a Symmetrical Mechanical System*. *Symmetry* 2019, 11, 727.

cât și la simpozioane științifice:

1) Mihălcica M., **Stanciu M.D.**, Gliga, V. G., Campean, M., Dinulică F., Nastac S. M. Experimental Modal Analysis of Violin Bodies with Different Structural Patterns of Resonance Spruce, The International Conference *Modern Technologies in Industrial Engineering ModTech2021*, 23 – 26.06.2021;

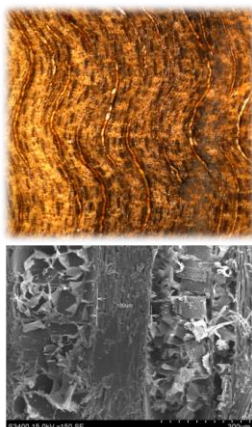
2) Filimon E., Gall R., **Stanciu M. D.**, Nauncef A., Dinulică F., Application of X-Ray Computed Tomography in geometrical analysis on the design of old violins, The International Student Innovation and Scientific Research Exhibition "Cadet INOVA'21", The "Nicolae Bălcescu" Land Forces Academy of Sibiu, Sibiu, 15 - 17 April 2021, Medalia de argint Cadet Inova2021;

3) Gall R., Filimon E., **Stanciu M. D.**, Nauncef A., Năstac S.M., Research regarding the vibration analysis of heritage violins versus new unvarnished violins, The International Student Innovation and Scientific Research Exhibition "Cadet INOVA'21", The "Nicolae Bălcescu" Land Forces Academy of Sibiu, Sibiu, 15 - 17 April 2021, Medalia de aur Cadet Inova2021, Premiul special - FORUMUL INVENTATORILOR ROMANI



4) **Stanciu M.D.**, Savin A., Faktorova F., Nauncef A., Dinulica F., Gliga V. Gh. Marc R., Purdoiu R., Lăcătuș R Mihalcica M. X-ray and computer tomography imaging for identification of geometry and construction elements in the structure of old violins, the 13th International Conference Art21 on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage, Buenos Aires, Argentina 3 – 5 November 2021.

5) **Stanciu M.D.**, Mihălcică, M.; Dinulică, F.; Nauncef, A.M.; Purdoiu, R.; Lăcătuș, R.; Gliga, G.V., R. Marc, Savin A., S. Năstac: Digitizarea modelelor structurale și dinamice ale lemnului din construcția viorilor vechi și actuale, a XVI – a ediție a Conferinței Zilele Academiei de Științe Tehnice din România (ASTR) 2021 „INTER ȘI TRANSDISCIPLINARITATE ÎN ȘTIINȚELE INGINEREȘTI ȘI TEHNOLOGIE”, 21-22 octombrie 2021.



*Mirosul mentolat și de tămâie al lemnului ce-i modelat de  
pricepute mâini,  
Pătrunde în celule, în inimă, în suflet, unind esența sacră cu-  
a omului genuni.  
Și fiecare fibră și așchie-ce se frânge sub greutatea dălții ce  
strașnic o străpunge,  
e-o lacrimă de lemn ce curge fără vorbă,  
se-ndoae și suspină căci ani și ani de probă  
i-au trebuit luminii să intre-n noua robă:  
de mineral, lignină și celuloză-n straturi,  
dând zi de zi structuri, cu mii și mii de laturi.  
Iar noi acum cu mintea-ncercăm să-i știm secretul,  
În cifre să-i rescriem întreg alfabetul,  
Să recreem în vase, mirifica natură  
Precum un alchimist, în a sa căutătură.*

*Autoarea*

## Capitolul 2. Determinarea proprietăților elastice și acustice ale lemnului utilizat în structurile complexe de tip Helmholtz

### 2.1 Proprietățile elastice, acustice și dinamice ale lemnului de rezonanță

În România se fabrică o gamă largă și variată de instrumente muzicale cordofone, din punct de vedere al dimensiunilor, materialelor și formei structurale, lemnul fiind materialul de bază pentru construcția acestora, atât din punct de vedere al calității acustice (lemnul de rezonanță-molidul de rezonanță) cât și din punct de vedere estetic (mahon, abanos, palisandru, paltin creț - apreciate pentru textură, desen și culoare), precum și din punct de vedere al viabilității și rezistenței la uzură (salcâm, abanos, nuc). Prin lemn de rezonanță se înțelege materialul lemnos cu structura foarte fină, respectiv cu proprietăți fizice corespunzătoare pentru construcția instrumentelor muzicale cu corzi. Anizotropia lemnului având o structură ierarhică eterogenă trebuie asociată cu scara de observare. La scara în *cm* se asociază lățimea inelelor anuale, la scara în *mm* pot fi analizate fibrele și alte elemente anatomice, iar la scara în  $\mu m$  se poate discuta despre anizotropia microstructurală legată de organizarea peretelui celular. Această organizare structurală foarte complexă a lemnului permite să ne imaginăm diferite modele legate de anizotropia sa, cum ar fi triclinic, ortotrop sau izotrop transversal [21; 22].

Indiferent de domeniul de aplicabilitate a lemnului, cunoașterea proprietăților elastice este necesară pentru proiectarea structurilor, pentru predictibilitatea comportării acestora în timp, pentru posibilitatea alegerii optime a materialului. Cu atât mai mult, în cadrul instrumentelor muzicale cu corzi, proprietățile elastice, acustice și dinamice corelate cu descriptorii anatomici și fizici ai lemnului oferă argumentul științific al calității acustice a instrumentului muzical și nu în ultimul rând argumentul economic al prețului produsului finit.

Cele mai importante proprietăți elastice, mecanice, acustice și dinamice ale lemnului de rezonanță studiate în literatura de specialitate se pot structura în proprietăți fundamentale (de bază) și proprietăți secundare (calculate pe baza celor primare):

- *Viteza de propagare a undelor sonore în lemn*  $V$  (m/s) se referă la viteza de transmitere a undelor elastice longitudinale și transversale în mediul solid (lemnul). În cazul lemnului, cele mai multe studii au relevat importanța vitezei de propagare a undelor în lungul fibrei: pe direcție perpendiculară pe fibre, valorile vitezei de propagare sunt de 3-5 ori mai mici, iar pe direcție radială valorile sunt mai mari decât pe cea tangențială [7; 9; 10; 18; 21; 22; 24; 31; 48; 61; 64; 154]. Experimentele bazate pe metoda ultrasunetelor [21–25] au evidențiat valorile vitezelor de propagare a ultrasunetelor în diferite specii. Cu cât valorile acestui parametru sunt mai mari, cu atât claritatea sunetelor e mai bună. Acest parametru depinde de regularitatea structurii lemnului, de densitate și umiditate. Transmiterea sunetului în lemn se produce prin propagarea undelor longitudinal și transversal, viteza longitudinală depinzând de modulul de elasticitate longitudinal, respective transversal. Știind că lemnul este un material ortotrop, vitezele de propagare a sunetului în lemn vor avea valori diferite pe cele trei direcții L, R, T. Pentru molidul de rezonanță, [21], menționează următoarele rapoarte între vitezele de propagare a undelor sonore pe direcțiile principale ale lemnului:  $V_{LL}/V_{RR} = 2.8$ ;  $V_{LL}/V_{TT} = 3.5$  și  $V_{RR}/V_{TT} = 0.8$ ; iar pentru paltinul creț, rapoartele:  $V_{LL}/V_{RR} = 1.6$ ;  $V_{LL}/V_{TT} = 2.7$  și  $V_{RR}/V_{TT} = 0.55$ .
- *Modulul de elasticitate longitudinală*  $E$  (MPa) reprezintă o măsură a rigidității unui material, solicitat în domeniul elastic, pe o anumită direcție de solicitare. Lemnul, ca material ortotrop, prezintă trei mărimi ale modulului de elasticitate longitudinală  $E_L$ , radială  $E_R$ , și tangențială  $E_T$ , în concordanță cu direcțiile principale ale lemnului (Figura 1.18). Și în cazul acestei mărimi, important pentru calitatea acustică a lemnului de rezonanță este raportul de anizotropie  $E_L/E_R$  care determină în mare măsură modul de vibrație a plăcilor de rezonanță la instrumentul finit [75]. Această caracteristică elastică se determină fie în regim static, fie în regim dinamic.
- *Modulul de elasticitate transversală (de forfecare)*  $G$  (MPa) – la lemn se exprimă în funcție de planele de simetrie elastică:  $G_{LR}$  modulul de elasticitate transversal în planul longitudinal – radial;  $G_{LT}$  modulul de elasticitate transversal în planul longitudinal – tangențial;  $G_{RT}$  modulul de elasticitate transversal în planul radial – tangențial. [124] introduce raportul dintre modulul de elasticitate longitudinal și cel transversal ca măsură a evaluării calității tonale a cutiei de rezonanță a pianului.

- *coeficientul lui Poisson* sau coeficientul contracției transversale  $\nu$  (adimensional), reprezintă factorul de proporționalitate între contracția transversală și deformația specifică liniară. La lemn (în ipoteza celor trei plane de simetrie elastică), se determină trei coeficienți ai contracției transversale:  $\nu_{LR}$ ,  $\nu_{RT}$ ,  $\nu_{TL}$ . Cunoscând valorile modulelor de elasticitate  $E$  și  $G$  precum și valorile la 45 grade, se pot calcula mărimilor coeficienților contracției transversal cu relațiile [43]:

$$\begin{aligned}\nu_{LR} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{E_L}{E_R} + \frac{E_L}{G_{LR}} + 1 - \frac{4E_L}{E_{LR}^{(45)}} \right], \\ \nu_{RT} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{E_R}{E_T} + \frac{E_R}{G_{RT}} + 1 - \frac{4E_R}{E_{RT}^{(45)}} \right] \\ \Delta \nu_{TL} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{E_T}{E_L} + \frac{E_T}{G_{TL}} + 1 - \frac{4E_T}{E_{TL}^{(45)}} \right].\end{aligned}\quad (2.1)$$

Pentru molidul de rezonanță, valorile coeficienților lui Poisson sunt:  $\nu_{LR} = 0.44 \div 0.45$ ;  $\nu_{TL} = 0.38 \div 0.54$ ; ;  $\nu_{RT} = 0.47 \div 0.56$  [154].

- *Modulul dinamic sau modulul complex  $E_{din}$  sau  $G_{din}$  (MPa)* [154] exprimă raportul dintre tensiune și deformație în regim dinamic. Pentru materiale vâscoelastice, așa cum este lemnul, modulul complex are expresia:

$$\begin{aligned}E_{din} &= E' + iE'', \\ G_{din} &= G' + iG'',\end{aligned}\quad (2.2)$$

Unde  $E'$  este modulul de conservare (exprimând comportarea elastică a materialului);  $E''$  – modulul de pierdere (exprimând comportarea vâscoasă a materialului),  $i$  – unitatea imaginară. Raportul dintre modulul de pierdere și modulul de conservare reprezintă tangenta unghiului de defazaj  $\delta$  care reprezintă frecarea internă din material:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (2.3)$$

Pentru lemnul de rezonanță, valorile determinate de [154] sunt: pentru molidul de rezonanță, clasa A,  $E_{L,din} = 9979 \pm 1186$  MPa,  $E_{R,din} = 731 \pm 223$  MPa, iar pentru paltinul creț clasa A,  $E_{L,din} = 9707 \pm 1345$  MPa,  $E_{R,din} = 1703 \pm 236$  MPa.

- *Modulul de elasticitate specific calculat ca raportul dintre modulul de elasticitate dinamic și densitate,  $E'/\rho$  (MPa\*m/kg<sup>3</sup> sau m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)* este des utilizat în exprimarea caracteristicilor elastice și acustice ale lemnului de rezonanță, fiind calculat în funcție de direcțiile și secțiunile principale ale lemnului [16 - 18; 32; 197].

- *Frecvența de rezonanță*  $f_r$  (Hz) reprezintă frecvența la care amplitudinea vibrațiilor este relativ mare. Forțele periodice relativ mici care au o valoare apropiată de o frecvență de rezonanță a sistemului au capacitatea de a produce oscilații de amplitudine mare în sistem datorită stocării energiei vibraționale [15; 78; 85; 94; 95; 107; 141]. Valori ale primelor frecvențe de rezonanță determinate pe plăcile de vioară din lemn de molid și paltin au fost prezentate în [Tabelul 1.12](#).
- *Rezistența (impedanța) acustică specifică* notată cu  $R_a$  [55] sau  $z$  ( $N \cdot s / m^3$ ) [16; 18] se referă la rezistența pe care lemnul o opune răspândirii sunetului în masa sa sau la capacitatea de transmitere a vibrației de la un mediu la altul așa cum este cazul cutiilor de rezonanță (corpul de vioară sau chitară). În cazul lemnului de rezonanță această caracteristică acustică are valori mici exprimându-se din punct de vedere acustic prin lejeritatea sunetelor. [136] consideră că majorarea impedanței scade tăria sunetului, iar pentru a preveni această pierdere, masa instrumentului trebuie să crească chiar până la dublare, cu efecte nedorite asupra raportului de anizotropie a vitezei sunetului. Relația de calcul pentru impedanța acustică este:

$$z = V * \rho \quad (2.4)$$

Valorile pentru molidul de rezonanță  $z_L = 1.90 \div 2.90 * 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$  [49], respectiv  $z_L = 2.16 \div 2.50 * 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$  [8] iar pentru paltinul creț  $z_L = 2.56 \div 2.50 * 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$  [8].

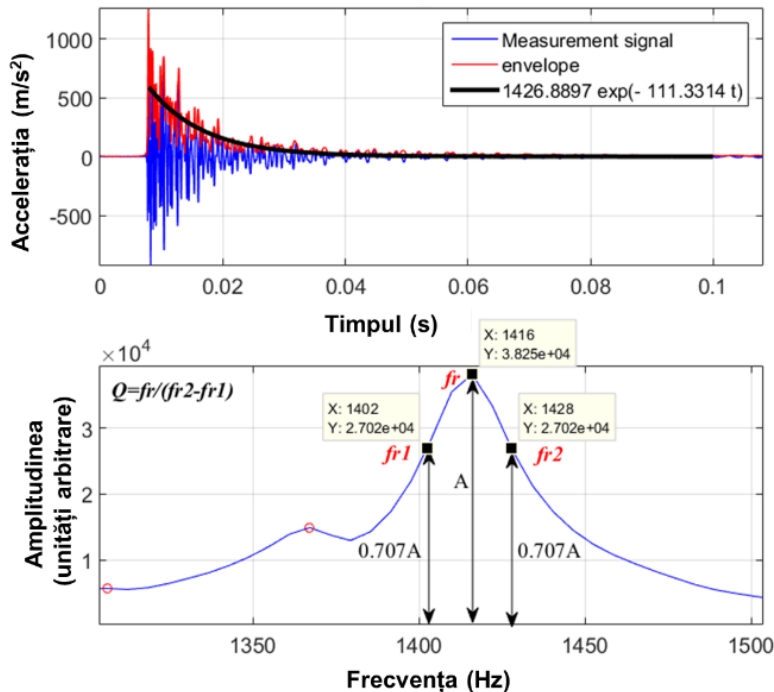
- *Radiația acustică notată cu K* (constanta de radiație acustică [49; 64] sau  $R$  [141]) reprezintă un criteriu foarte important în aprecierea lemnului de rezonanță, fiind determinate ca raportul dintre viteza de propagare a sunetului și densitatea materialului. Valorile ridicate ale constantei de radiație acustică denotă o calitate superioară a lemnului utilizat în construcția instrumentelor muzicale, limita inferioară fiind de  $10 \text{ m}^4 / (\text{N} \cdot \text{s}^2)$ , la umiditatea de 10% [49]. Radiația acustică descrie emisia în spațiu a undelor sonore, care depinde de amplitudinea vibrației și care asigură instrumentului tăria sonoră. Este și o măsură a atenuării vibrației cutiei sonore în urma radierii sunetului: un sunet tare este produs de un lemn cu radiație mare. Valorile raportate în literatură de specialitate indică pentru molidul de rezonanță, clasa A,  $R_L = 13.4 \pm 0.8 \text{ (m}^4/\text{kg} * \text{s)}$ ,  $R_R = 3.6 \pm 0.5 \text{ (m}^4/\text{kg} * \text{s)}$ , iar pentru paltinul creț, clasa A,  $R_L = 6.1 \pm 0.7 \text{ (m}^4/\text{kg} * \text{s)}$ ,  $R_R = 2.7 \pm 0.1 \text{ (m}^4/\text{kg} * \text{s)}$  [141].
- Decrementul logaritmic  $\Delta$  (adimensional) este legat de frecarea internă manifestată prin pierderea energiei mecanice în procesul propagării vibrațiilor. Amortizarea  $\Delta$  este un coeficient exponențial al anvelopei descrescătoare a amplitudinii oscilațiilor, fiind obținut din relația matematică [13; 129]:

$$\Delta = \ln \frac{A_1}{A_2} = \ln \left( \frac{A_0^{-\zeta \omega_n t}}{A_0^{(-\zeta \omega_n t + T_a)}} \right) = \ln(e^{A_0^{\zeta \omega_n T_a}}) = \zeta \omega_n T_a \quad (2.5)$$

Unde  $\Delta$  este decrementul logaritmic al mișcării vibratorii;  $A_1$  și  $A_2$  sunt două valori succesive ale amplitudinii;  $A_0$  este amplitudinea la timpul  $t = 0$ ;  $\zeta$  - factorul de amortizare;  $\omega_n$  pulsația proprie;  $t$  - timpul;  $T_a$  perioada vibrației (oscilației).

Cunoscând frecvența de rezonanță  $f_r$  și amplitudinea acesteia, se determină cele două frecvențe  $f_{r2}, f_{r1}$  extrase la 0.707 din amplitudinea frecvenței de rezonanță  $A$ , așa cum se observă în [Figura 2.1b](#), după care se introduc în relația decrementului logaritmic astfel:

$$\Delta = \frac{\pi(f_{r2} - f_{r1})}{f_r} \quad (2.6)$$



*Figura 2.1. Determinarea mărimilor din relația (2.6) pentru calculul decrementului logaritmic și factorului de calitate*

Factorul de amortizare raportat de [141], în direcție longitudinală, pentru molidul de rezonanță este de  $\Delta = 0.032$ , pentru frecvența de rezonanță de 860 Hz, iar pentru paltinul creț,  $\Delta = 0.043$  la frecvența de rezonanță de 540 Hz. Pentru molidul de rezonanță, [15; 16] menționează valoarea de  $\Delta_L = 0.0071 \pm 0.0012$ , iar [19–21], raportează valorile  $\Delta_L = 0.0119 \div 0.0133$ , respectiv  $\Delta_R = 0.012 \div 0.0155$  pentru molidul de rezonanță, iar pentru paltin creț,  $\Delta_L = 0.74$ , respectiv  $\Delta_R = 1.114$ .

- *Factorul de calitate  $Q$  (adimensional)* este o mărime legată de pierderea energiei de vibrație prin frecarea internă, care conduce la fenomenul de amortizare a sunetului, după

ce excitația sonoră a încetat. În cazul structurilor simple, uniforme, continue, fără defecte, valorile acestui parametru sunt mari, proporționale cu viteza de propagare a sunetelor, așa cum este cazul lemnului de rezonanță. Relațiile de calcul pentru determinarea factorului de calitate sunt:

$$Q = \frac{\pi}{\tan \Delta} \quad (2.7)$$

sau

$$Q = \frac{f_r}{(f_{r2} - f_{r1})} \quad (2.8)$$

Pentru lemnul de rezonanță, valorile factorului de calitate ale lemnului de molid sunt  $Q_L = 95 \div 130$ , iar pentru lemnul de paltin creț,  $Q_L = 80 \div 100$  [21; 28]. [57] raportează pentru lemnul de molid de rezonanță, valorile  $Q_L = 100 \div 180$ ,  $Q_R = 30 \div 33$ ,  $Q_T = 30 \div 31$ . Pentru paltinul creț, [7; 8], menționează un factor de calitate de 35 mai redus decât al paltinului comun (45), ceea ce, din această perspectivă, îl subclasează pe cel creț.

- *Eficiența conversiei acustice ACE*, ca raport dintre radiația acustică și decrementul logarithmic al amortizării vibrațiilor, exprimă corelația dintre cei doi termeni (conform relației (2.9)). Cu cât frecarea internă e mai mică și radiația acustică mai mare, plăcile din lemn de rezonanță vibrează o perioadă mai lungă de timp [57; 116; 117; 126; 140].

$$ACE = \frac{R}{\tan \Delta} \quad (2.9)$$

După cum se observă în prezentarea proprietăților lemnului de rezonanță, cele mai importante proprietăți sunt densitatea, vitezele de propagare a sunetului în lemn, modulii de elasticitate; decrementul logarithmic și frecvența de rezonanță. Celelalte mărimi acustice /dinamice sunt derivate din aceste proprietăți de bază. Studiile privind proprietățile elastice – acustice și dinamice ale lemnului de rezonanță au constituit preocupări ale numeroșilor cercetători din diverse centre de prestigiu din lume, oferind o sursă bogată de date, însă speciile lemnoase pe care aceștia le-au studiat aparțin unor bazine forestiere din țări precum Slovenia, Cehia, Austria, Italia, Franța, Germania, USA etc. Știind că România deține cele mai mari fabrici de instrumente muzicale din sud-estul Europei (S.C. Hora S.A. Reghin) și mai tânăra fabrică S.C. Gliga Instrumente Muzicale S.A, precum și resursa naturală – lemnul de rezonanță, *caracterizarea fizică, elastică, acustică și dinamică a molidului și paltinului de rezonanță românesc a constituit un obiectiv firesc și necesar*

în cercetările autoarei, plecând de la studiile realizate de marii cercetători români: Beldie I.P., Cotta N., Ghlemeziu N., Beldeanu E.C., Bucur V., Toth A. I., Penciu Tr. în anii 1970 – 1982.

Dintre speciile lemnoase din construcția instrumentelor muzicale cu corzi autoarea prezentei teze a studiat comportarea statică și dinamică a lemnului de molid de rezonanță (*Picea Abies* L. Karst), lemnului de pin (*Pinus sylvestris* L.), lemnului de paltin (*Acer pseudoplatanus* L.); lemnului salcâm (*Robinia pseudacacia* L.).

## **2.2 Determinarea proprietăților acustice și elastice ale lemnului de rezonanță românesc**

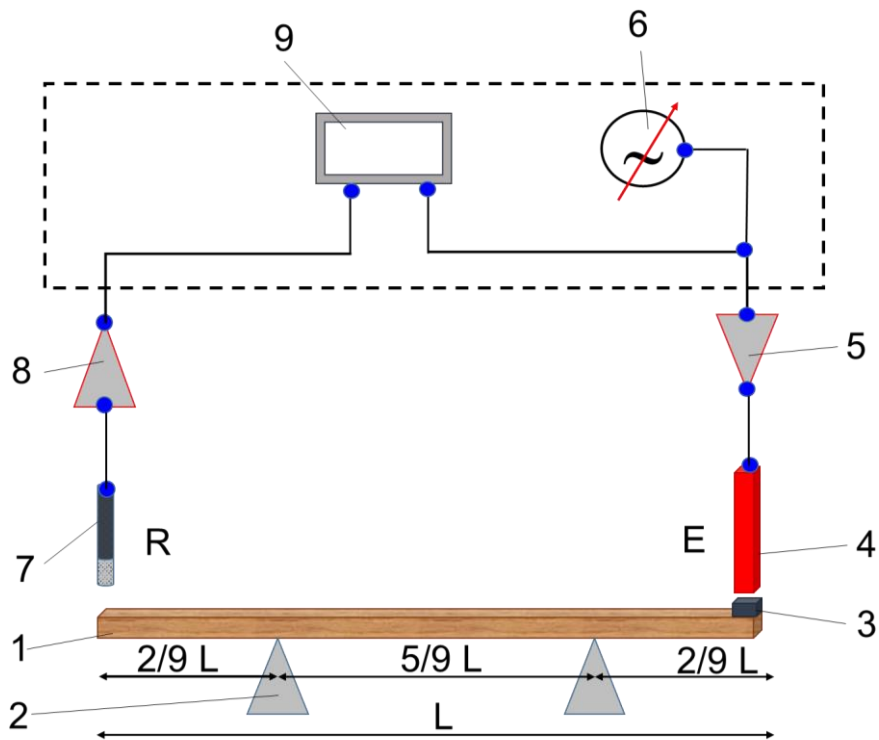
După cum s-a evidențiat în subcapitolul anterior, o mărime fundamentală ce caracterizează lemnul de rezonanță, este viteza de propagare a undelor sonore în lemn. Cunoscând această mărime și densitatea, se pot determina alte proprietăți elastice, acustice, dinamice ale materialului respectiv.

Determinarea vitezelor de propagare a undelor sonore în lemn se poate realiza prin mai multe metode experimentale. Una din cele mai cunoscute metode se bazează pe determinarea frecvenței de rezonanță a lemnului, cunoscând dimensiunile probei. Bara din lemn cu o lungime cunoscută ( $L=1m$ ) este solicitată la vibrații prin intermediul unui traductor electromagnetic emițător, iar undele sonore generate în bara de lemn sunt recepționate de un receptor (traductor electromagnetic) și transformate în oscilații electrice, amplificate de un amplificator. Atunci când proba intră în rezonanță, amplitudinea oscilațiilor este maximă, iar frecvența poate fi citită pe scala osciloscopului [57; 63; 64].

Ulterior, tehnicile de măsurare au evoluat, iar [14–16 ; 18; 114; 141] prezintă un sistem de măsurare bazat pe un magnet electric ca emițător și senzori cu laser pentru determinarea deplasărilor. La prima scanare utilizând o bandă largă de frecvențe, este determinată frecvența de rezonanță, după care la o analiză într-o bandă îngustă de frecvențe, se determină factorul de calitate. [70] utilizează același principiu de determinare a frecvenței de rezonanță, doar că apelează la un microfon cu rol de emițător, iar pentru receptarea semnalului, utilizează un accelerometru.

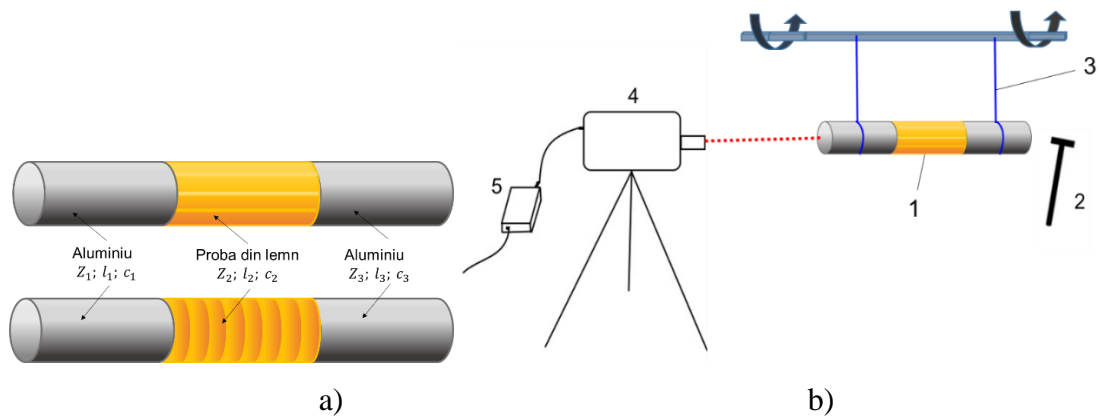
În [Figura 2.2](#) este prezentată schema de principiu a instalației experimentale pentru determinarea frecvenței de rezonanță conform principiului de măsurare propus de [72].





*Figura 2.2. Schema de principiu a instalației experimentale pentru determinarea frecvenței de rezonanță. Legenda: 1 – proba din lemn; 2 - reazeme; 3 – traductor electromagnetic emițător E; 4 – bobină 4Ω; 5 – amplificator 2 – 4 W; 6 – generator de unde sinusoidale; 7 – microfon ca receptor R; 8 – preamplificator pentru microfon sau sonometru; 9 – osciloscop pentru vizualizarea semnalelor*

O altă metodă utilizată pentru calculul vitezelor de propagare a undelor sonore în material și implicit a modulului de elasticitate longitudinal se bazează pe metoda matricei de transfer intrinsecă utilizată pentru a simula propagarea undelor continue sau a impulsului finit în medii elastice omogene, neomogene sau multistratificate. Ca principiu, metoda se reduce la determinarea valorilor proprii ale matricei de transfer intrinsecă pentru un sistem ternar format din două materiale etalon și materialul studiat. Standul experimental prezentat în [Figura 2.3](#) este compus din sistemul ternar de bare, elementul de bară intermediar fiind chiar proba studiată (1) fixată elastic pe un suport (3). Excitația sistemului se face dinamic pe direcție longitudinală prin intermediul unui ciocan de impact (2), iar la capătul opus este amplasat un fascicul luminos produs de un vibrometru cu laser (4). Lumina reflectată de la un obiect în mișcare este supusă unei modificări a frecvenței proporționale cu viteza obiectului (efect Doppler). Măsurarea acestei schimbări de frecvență cu un interferometru permite determinarea precisă a mișcării de vibrație a obiectului și transmiterea către placa de achiziție (5) [39 – 42; 121].



*Figura 2.3. Schema de principiu a instalației experimentale pentru determinarea frecvenței de rezonanță pe baza matricei de transfer intrinsecă: a) sistemul ternar; b) schema instalației: 1) proba (sistemul ternar); 2 – ciocan de impact pentru excitarea structurii; 3 - elemente elastice pentru susținerea probelor; 4 – vibrometru cu laser; 5 – placa de achiziție*

O metodă modernă și versatilă este cea bazată pe măsurarea vitezelor de propagare a ultrasunetelor în lemn, metodă studiată și aplicată de [19 – 23; 50; 67; 68; 70; 76; 143]. Această metodă de evaluare nedistructivă se bazează pe o serie de măsurători de viteze de propagare pentru unde longitudinale și transversale precum și pe măsurători de atenuare. Parametrii fizici de determinat sunt obținuți cu ajutorul unor formule matematice care leaga aceste mărimi, o parte dintre acestea fiind prezentați și în această teză. Metoda de măsurare a vitezei ultrasunetelor în materiale este standardizată în ASTM E 494.

Avantajul metodelor prezentate constă în faptul că sunt metode nedistructive, oferă posibilitatea determinării mai multor mărimi elastice și acustice comparativ cu metodele mecanice. Pe de altă parte, întrucât în timpul funcționării instrumentelor muzicale cu corzi, solicitările produse de tensionarea corzilor sunt în domeniul elastic al materialului (lemnului), testarea lemnului de rezonanță prin metodele mecanice clasice (încercarea la tracțiune) se dovedește a fi ineficientă din perspectiva rezultatelor obținute și a consumului de material lemnos.

Astfel, în continuare sunt prezentate rezultatele experimentale obținute prin metoda ultrasunetelor, realizate în colaborare cu *Laboratorul de Încercări Nedistructive din cadrul INCDFI Iași*, cu sprijinul doamnei dr. Savin Adriana, responsabil de proiect în cadrul parteneriatului proiectului PN-III-P2-2.1-PED-2019-2148, contract nr. 568PED/2020 “Modele inovative de viori comparabile acustic și estetic cu viorile de patrimoniu - MINOVIS”.

### 2.2.1 Considerații teoretice privind propagarea undelor sonore în lemn

Evaluarea nedistructivă cu ultrasunete (notate *US*) constă în aplicarea undelor fizice elastice asupra probei testate și analiza interacțiunii dintre material și fluxul cu ultrasunete [67; 68; 86]. Ultrasunetele sunt unde elastice care se propagă în medii solide, lichide și gazoase care depășesc

frecvența de 20kHz. Principiul fizic al metodei se bazează pe proprietățile elastice ale mediului în care se propagă unda sonoră, în mediile solide propagându-se două tipuri de unde elastice: unde longitudinale la care direcția de oscilație a particulelor coincide cu direcția de propagare a undei și unde transversale la care direcția de oscilație este perpendiculară pe direcția de propagare a undei (Figura 2.4).

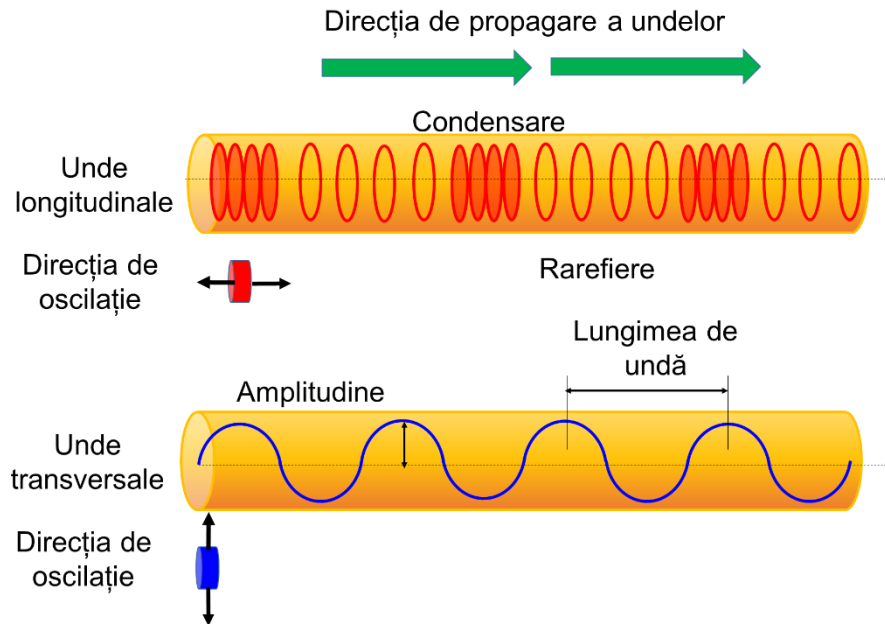


Figura 2.4. Modul de propagare și oscilație a undelor longitudinale și transversale

Mărimile caracteristice undelor sunt:

- *lungimea de undă* ( $\lambda$ ) care reprezintă distanța minimă între două puncte considerate de-a lungul vitezei de propagare, ce oscilează în fază;
- *elongația* care măsoară distanța în raport cu poziția de echilibru a unei particule ce oscilează datorită propagării undei. Elongația prezintă o dublă periodicitate în timp și spațiu. Valoarea maximă a elongației reprezintă *amplitudinea undei*. Elongația unei unde plane care se propagă după direcția  $x$  este dată de relația (2.10):

$$u = A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{V}\right)\right] = A \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad (2.10)$$

unde  $A$  este amplitudinea undei,  $V$  - viteza de propagare,  $x$  - abscisa punctului unde se face măsurătoarea,  $T$  - perioada undei,  $\lambda$  lungimea de undă iar  $\omega$  este pulsația undei, având expresia în funcție de frecvență  $f$ .

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} \quad (2.11)$$

- Perioada este inversa frecvenței și reprezintă intervalul de timp după care unda a avansat în lungul direcției de propagare cu o lungime de unda.

$$\lambda = VT \quad (2.12)$$

- frontul de undă care reprezintă locul geometric al punctelor ce oscilează cu aceeași fază.

Fiecărui tip de undă, îi corespunde o viteză proprie de oscilație. Astfel, pentru undele longitudinale, viteza de propagare are expresia:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (2.13)$$

Unde unde  $E$  este modulul de elasticitate  $[E]_{SI} = N \cdot m^{-2}$ ,  $\rho$  este densitatea materialului  $[\rho]_{SI} = kg \cdot m^{-3}$  iar  $\nu$  este coeficientul contracției transversale sau coeficientul lui Poisson, mărime adimensională.

Pentru undele transversale, viteza de propagare se calculează cu relația (2.14):

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.14)$$

Unde  $G$  este modulul de elasticitate transversală,  $[G]_{SI} = N \cdot m^{-2}$ .

Modulul de forfecare este legat de modulul de elasticitate prin relația ((2.15):

$$G = E \frac{1}{2(1 + \nu)} \quad (2.15)$$

Pentru lemn, considerațiile teoretice ale undei de propagare se bazează pe legea generalizată a lui Hook, care descrie proporționalitatea dintre tensorul de tensiune și tensorul deformării:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} * \varepsilon_{kl} \quad (2.16)$$

unde  $[\sigma_{ij}]$  este tensorul tensiunilor acționând pe direcția  $i$  și cu normala pe direcția  $j$ ;  $[C_{ijkl}]$  tensorul elasticității;  $[\varepsilon_{kl}]$  – tensorul deformațiilor. Dacă se introduce tensorul Kelvin – Christoffel  $\Gamma$ , atunci relația dintre tensorul elasticității și vectorii de propagare a undelor ultrasonore  $n_j, n_l$  va fi de forma:

$$\Gamma_{ik} = C_{ijkl} * n_j * n_l, \quad (2.17)$$

și

$$(\Gamma_{ik} - \delta_{ik} * \rho * V_{fază}^2) P_m = 0, \quad (2.18)$$



$$\begin{aligned}
2\rho V_{QL,QT}^2 &= (\Gamma_{LL} + \Gamma_{TT}) \pm \sqrt{(\Gamma_{LL} - \Gamma_{TT})^2 + 4\Gamma_{LT}^2}, \\
2\rho V_{QL,QT}^2 &= (\Gamma_{RR} + \Gamma_{TT}) \pm \sqrt{(\Gamma_{RR} - \Gamma_{TT})^2 + 4\Gamma_{RT}^2}, \\
\rho V_T^2 &= C_{LT}n_1^2 + C_{RT}n_2^2, \\
\rho V_R^2 &= C_{LR}n_1^2 + C_{RT}n_2^2, \\
\rho V_L^2 &= C_{LT}n_1^2 + C_{LR}n_2^2.
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Astfel, pe baza celor nouă termeni ai matricei de rigiditate  $[C]$  și inversând matricea pentru a obține termenii de complianță, se pot calcula parametrii elastici (modulele lui Young și coeficienții lui Poisson).

## 2.2.2 Materialul și metoda de investigare cu ultrasunete

### Materialul – lemnul de rezonanță (molid și paltin)

În industria instrumentelor muzicale cordofone, există o clasificare a instrumentelor muzicale în funcție de calitatea anatomică a lemnului din construcția lor, acest aspect fiind dezvoltat în prețul final al instrumentului. Clasificarea materiilor prime de calitate pentru fabricarea instrumentelor cu coarde a fost prezentată și analizate în detaliu în lucrări la care autoarea tezei de abilitare a fost/este prim autor sau autor corespondent [48; 50; 149].

Clasele de calitate anatomică ale molidului de rezonanță din munții Gurghiu și principalii descriptori anatomici sunt prezentați în [Tabelul 2.1](#) și [Tabelul 2.2](#), informații ce au fost prezentate în publicațiile [47; 48; 50]. La lemnul de paltin, a fost determinat gradul de ondulare a fibrei prin intermediul lungimii de undă [1]. Lemnul de paltin folosit pentru spatele plăcilor de vioară și chitară a fost clasificat în următoarele categorii ale căror caracteristici anatomice sunt descrise în [Tabelul 2.1](#) și [Tabelul 2.2](#).

Pe lângă datele cunoscute în literatura de specialitate privind descriptorii anatomici ai lemnului de molid de rezonanță, autoarea tezei de abilitare a realizat o analiză mult mai sensibilă a acestor descriptori în funcție de cele patru clase de calitate anatomică a lemnului de molid, respectiv de paltin (*clasa A, B, C, D*). Deasemenea, au fost determinați și parametrii de culoare ai lemnului de molid, respectiv de paltin. Probele analizate au fost debitate sub formă de cuburi cu dimensiunea de 40x40x40 (mm<sup>3</sup>), câte șase din fiecare clasă, așa cum se poate observa în [Figura 2.6](#), respectându-se principalele secțiuni ale lemnului.

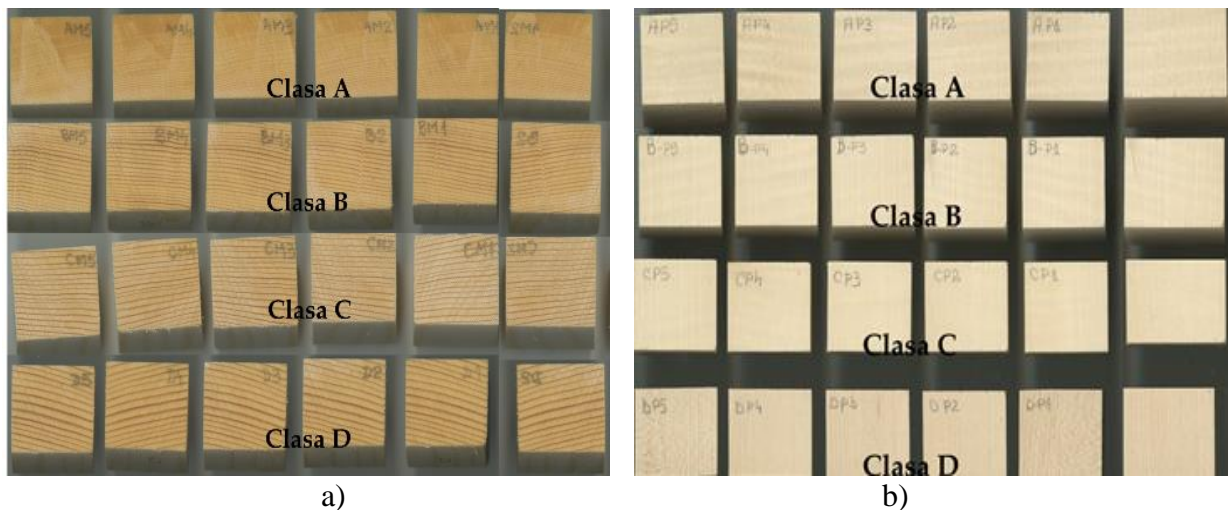
**Tabelul 2.1. Clasificarea calitativă a lemnului de molid după criteriile anatomice [50]**

<b>Clasa de calitate anatomică</b>	<b>Cerințe structurale pentru lemnul de rezonanță</b>
1. Lemn de calitate superioară	Lățimea inelelor anuale = 0.8...2.5 mm (media $\geq$ 1.2 mm) Proporția de lemn târziu (media) $\leq$ 20 % Diferența dintre două inele anuale consecutive (media) $\leq$ 0.5 mm Indexul de regularitate a inelelor anuale $\leq$ 0.7 Lățimea minimă a zonei cu lemn de rezonanță $\geq$ 130 mm
2. Lemn de calitate medie	Lățimea inelelor anuale = 0.8...2.5 mm; Proporția de lemn târziu (media) $\leq$ 35 % Diferența dintre două inele anuale consecutive (media) $\leq$ 0.6 mm Lățimea minimă de utilizare a lemnului de rezonanță $\geq$ 130 mm
3. Lemn de calitate anatomică redusă	Lățimea inelelor anuale $\leq$ 3.0 mm (average $\geq$ 0.5 mm); Proporția de lemn târziu (media) $\leq$ 39 %;
4. lemn din arbori tineri	Diferența dintre două inele anuale consecutive (media) $\leq$ 1.0 mm; Lățimea minimă de utilizare a lemnului de rezonanță $\geq$ 130 mm. Lemnul îndeplinește cerințele impuse lemnului de calitate medie (2), cu excepția lățimii zonei de rezonanță, care este insuficientă pentru un placă de vioară (130 mm), dar depășește 50 mm.
5. Lemn din arbori groși, cu lățimi insuficiente pentru lemnul de rezonanță	50 $\leq$ lățimea zonei cu lemn de rezonanță < 130 mm.
6. Lemn de molid fără calități acustice	Lățimea zonei cu lemn de rezonanță < 50 mm or Lățimea inelelor anuale $\leq$ 0.5 mm.

 **Tabelul 2.2. Clasificarea calitativă a lemnului de paltin după criteriile anatomice [152; 153]**

<b>Clasa de calitate anatomică</b>	<b>Cerințe structurale pentru lemnul de rezonanță</b>
1 lemn de paltin cu fibră foarte creată și deasă;	Lățimea inelelor anuale = 0.98...1.62 mm (media $\approx$ 1.2844 mm) Indexul de regularitate a inelelor anuale RI= 0.89 Lungimea de undă $\leq$ 3.30 mm
2. lemn de paltin cu fibră foarte creată și rară;	Lățimea inelelor anuale = 2.19...2.7 mm (media $\approx$ 2.41 mm) Indexul de regularitate a inelelor anuale RI= 0.19 Lungimea de undă $\leq$ 5.1 mm
3. lemn de paltin cu fibră creată moderat și deasă;	Lățimea inelelor anuale = 1.34...1.52 mm (media $\approx$ 1.441 mm) Indexul de regularitate a inelelor anuale RI= 0.89 Lungimea de undă $\leq$ 9.75 mm
4. lemn de paltin cu fibră creată moderat și rară;	Lățimea inelelor anuale = 21.78...2.23 mm (media $\approx$ 1.98 mm) Indexul de regularitate a inelelor anuale RI= 0.33 Lungimea de undă $\leq$ 8.09 mm
5. lemn de paltin cu fibră ușor creată și deasă;	Lățimea inelelor anuale = 1.25...2.59 mm (media $\approx$ 1.74 mm) Indexul de regularitate a inelelor anuale RI= 0.53 Lungimea de undă $\leq$ 11.08 mm
6. lemn de paltin cu fibră ușor creată și rară;	Lățimea inelelor anuale = 3.22...4.54 mm (media $\approx$ 3.96 mm) Indexul de regularitate a inelelor anuale RI= 0.13 Lungimea de undă $\leq$ 13.45 mm
7. lemn de paltin cu fibră dreaptă și deasă;	Lățimea inelelor anuale = 1.39...1.69 mm (media $\approx$ 1.54 mm) Indexul de regularitate a inelelor anuale RI= 0.45 Lungimea de undă $\infty$
8. lemn de paltin cu fibră dreaptă și rară.	Lățimea inelelor anuale = 2.9...4.84 mm (media $\approx$ 3.95 mm) Indexul de regularitate a inelelor anuale RI= 0.27 Lungimea de undă $\infty$

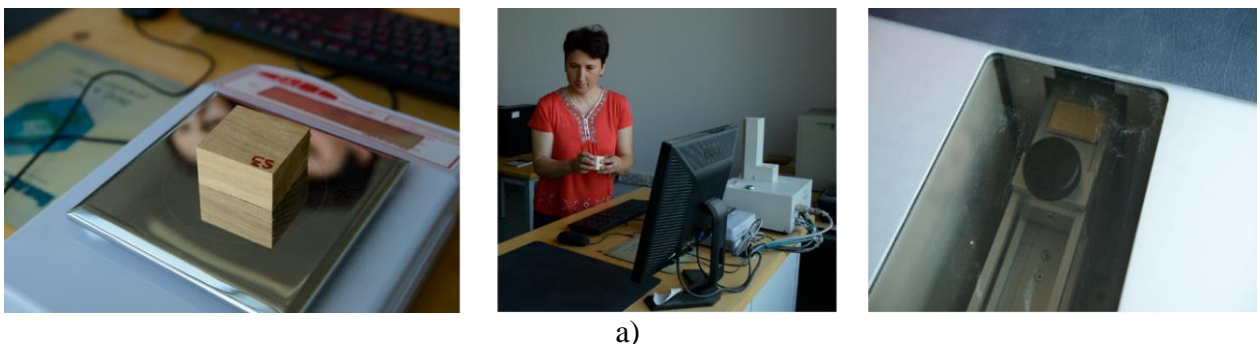




*Figura 2.6. Tipuri de epruvete analizate pentru determinarea caracteristicilor anatomice, fizice, elastice și acustice ale lemnului: probe din lemn de molid; b) probe din lemn de paltin*

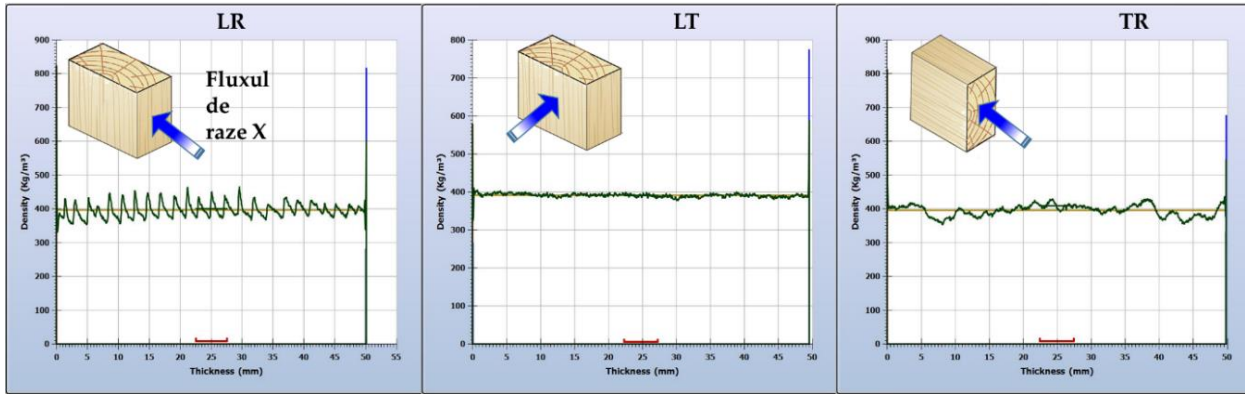
### ***Densitatea lemnului de rezonanță în funcție de clasele de calitate anatomică***

În ceea ce privește densitatea lemnului, aceasta a fost determinată cu ajutorul analizorului de densitate cu raze X, DPX300 din dotarea Laboratorului L5 al Centrul de cercetare - Tehnologii inovative și produse avansate în industria lemnului al ICD - Universitatea Transilvania din Brașov. Probele au fost cântărite și testate automat de dispozitivele echipamentului, după care fiecare specimen a fost introdus în trenul dispozitivului cu raze X, unde echipamentul a măsurat profilul densității folosind fluxul de raze X. Au fost testate probe din lemn de molid de cea mai mare calitate anatomică și morfologică; lemn din lemn de molid comun; lemn de paltin cu fibră foarte crețată și lemn de paltin cu fibră dreaptă, precum și alte specii lemnoase utilizate pentru instrumente muzicale (salcâm, mahon, fag). În [Figura 2.7, a](#) sunt prezentate etape din timpul măsurătorilor, iar în [Figura 2.7, b](#) este prezentată modul de redare a rezultatelor grafice privind profilul densității probelor.



*Figura 2.7. Procedeele de măsurare cu raze X a densității probelor din lemn: a) secvențe din timpul măsurătorilor; b) profilul densității probelor pe lățimea expusă fluxului de radiații*





b)

*Figura 2.7. Procedul de măsurare cu raze X a densității probelor din lemn: a) secvențe din timpul măsurătorilor; b) profilul densității probelor pe lățimea expusă fluxului de radiații (LR – planul longitudinal radial; LT – planul longitudinal tangențial; TR – planul transversal).*

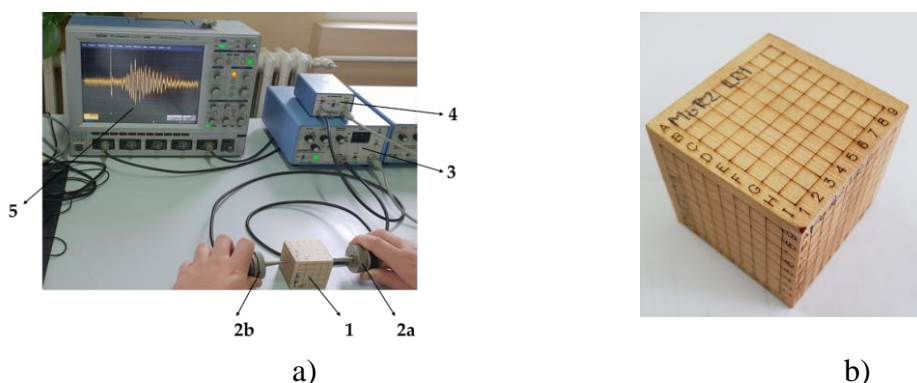
### **Culoarea lemnului de rezonanță**

Scopul măsurării culorii lemnului a fost de a verifica corelațiile dintre culoarea lemnului și proprietățile acustice/elastice pentru fiecare clasă de calitate a lemnului de rezonanță. Măsurătorile de culoare au fost efectuate pe secțiunea longitudinală – radială a probelor, datorită modului de utilizare a semifabricatelor în construcția plăcilor de vioară sau chitară. Culoarea lemnului este afectată de caracteristicile fizice și rugozitatea suprafeței [16 - 20]. Pentru cuantificarea culorii s-a optat pentru spațiul cromatic CIELab, descris de următoarele coordonate:  $L^*$  reprezintă luminozitatea măsurată în procente (%);  $a^*$  reprezintă gradul de roșu, dacă valoarea indicată este pozitivă (+) sau gradul de verde, dacă valoarea indicată este negativă (-); și  $b^*$  reprezintă gradul de galben dacă valoarea indicată este pozitivă (+) sau gradul de albastru dacă valoarea indicată este negativă (-) [76], fiind măsurată cu colorimetrul portabil CR-400 (Konica-Minolta 2007) din dotarea Facultății de Silvicultură și Exploatare Forestiere - Unitbv, în trei puncte pe secțiunea radială a eșantioanelor (Figura 2.8).



*Figura 2.8. Secvențe din timpul măsurării culorii lemnului de rezonanță*

Evaluarea nedistructivă cu ultrasunete (US) a constat în aplicarea undelor elastice pe probele din lemn (1) și analizarea interacțiunii dintre probele de material și câmpul de unde [7; 16; 21; 56; 67; 68; 126] (Figura 2.9, a). Pentru a crește fiabilitatea și a asigura calitatea măsurătorii, asupra senzorilor s-a exercitat o presiune constantă. Cele două tije tampon ale senzorilor utilizați în emisie (2a) și recepție (2b) sunt ambele identice, fiind realizate din aliaj de aluminiu-magneziu 7075-T6 cu densitatea de  $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , modulul Young de  $7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ , coeficientul Poisson de 0.34 și o rază de curbură punctuală de 2 mm. Senzorii de ultrasunete au fost conectați la un echipament de recepție a impulsurilor 5073PR Pulse Receiver–Panametrics (3,4). Vizualizarea semnalului și măsurarea timpului de propagare au fost efectuate cu osciloscopul digital Le Croy Wave Run-ner 64Xi (5) cu o frecvență de eșantionare de 10GS/s. Probele (1) au fost marcate pentru a identifica poziția centrului traductorului de ultrasunete a punctelor de măsurare corespunzătoare a două fețe opuse (Figura 2.9, b) și pentru a trasa harta distribuției vitezelor pe fiecare pereche de fețe inspectate [50; 68]. Măsurarea cu ultrasunete a fost efectuată pe o rețea de  $8 \times 8 \text{ mm}^2$  la punctele de intersecție a rețelei, astfel încât să includă cât mai multe inele de creștere anuale pentru a crește precizia determinărilor. Suma totală a punctelor de măsurare pentru fiecare secțiune s-a ridicat la 10 măsurători. Nu s-au făcut măsurători în zonele din afara grilei (spre margine) pentru a nu introduce erori de măsurare. Testele au fost efectuate pe 6 eșantioane din fiecare clasă de calitate, rezultând un total de 24 de eșantioane și un total de 720 măsurători ultrasund (60 pe fiecare secțiune din fiecare clasă de calitate). Măsurătorile au fost efectuate la o temperatură de  $24^\circ \text{C}$  și o umiditate de 65%.



**Figura 2.9.** Testarea cu ultrasunete: a) principiul de măsurare; Legenda: 1, proba; 2, senzori de emisie – recepție a ultrasunetelor (emission/reception transducers); 3, echipamentul de recepționare a semnalelor Pulse Receiver–Panametrics; 4, conditioner; 5, osciloscop digital; b) distribuția punctelor de măsurare pe probele din lemn

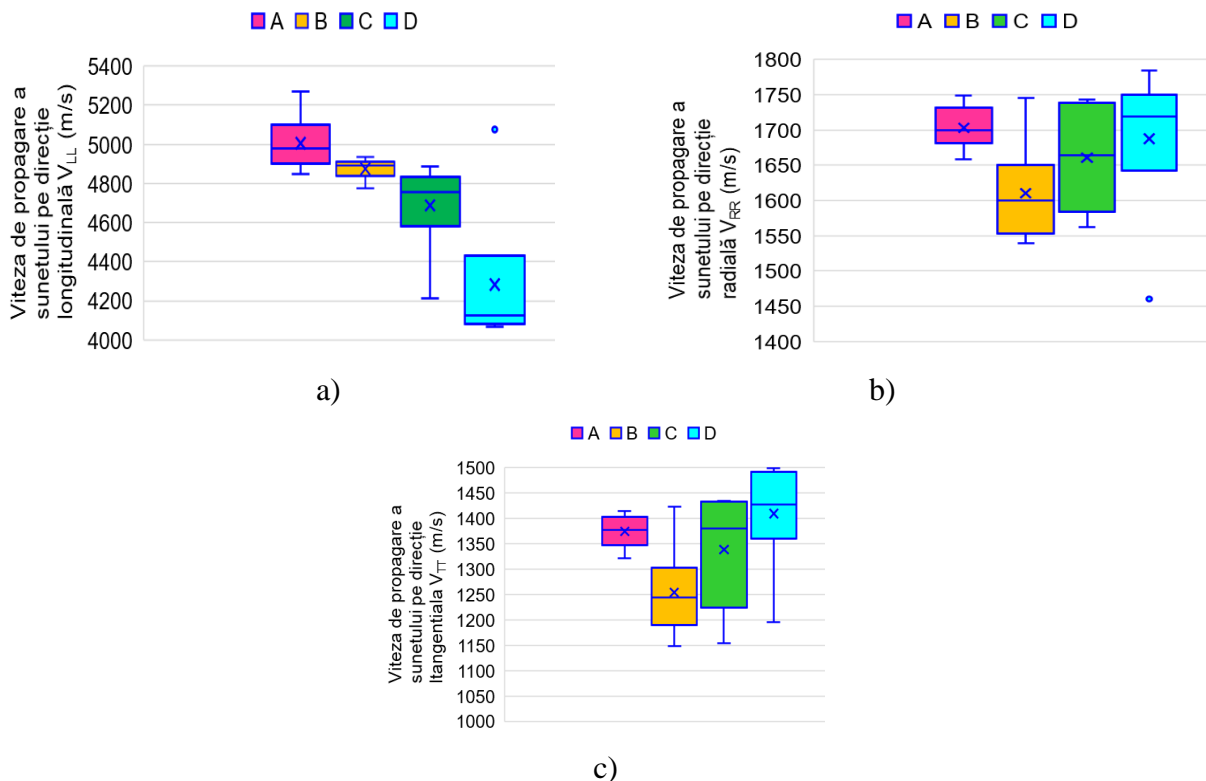
### Prelucrarea statistică a datelor

Toate datele obținute experimental au fost examinate mai întâi pentru variabilitate. Astfel, analiza statistică a datelor a început cu investigarea nivelului de variabilitate a caracteristicilor măsurate verificându-se posibilitatea stratificării datelor brute. În etapa următoare, s-a verificat posibilitatea

stratificării datelor în funcție de variabilele independente implicate în studiu, folosind un test specific. Posibilitatea stratificării dimensiunii parametrilor acustici în funcție de clasa de calitate a eșantionului a fost verificată folosind *Analiza funcției discriminante (DFA)* prin intermediul căreia s-au determinat ponderile variabilelor predictive, oferind posibilitatea de a distinge între grupuri de variabile dependente. Capacitatea individuală a variabilelor acustice de a discrimina clasa de calitate este indicată de dimensiunea parametrului lambda parțial; cu cât este mai aproape de 0, cu atât este mai mare puterea discriminantă. Normalitatea distribuțiilor a fost verificată cu testul Shapiro-Wilk. Relațiile dintre parametrii acustici au fost verificate prin testarea coeficienților de corelație simplă. Asocierea variabilelor implicate în studiu a fost explorată folosind Analiza Componentelor Principale (PCA) și procedura de grupare *k-means*; apoi, rezultatele au fost verificate cu corelații simple și multiple.

### 2.2.3 Rezultatele privind proprietățile acustice și elastice ale lemnului de molid

Rezultatele obținute prin metoda ultrasunetelor au evidențiat diferențele sensibile ale proprietăților acustice și elastice între clasele de calitate anatomică a lemnului. Astfel, în [Figura 2.10](#) sunt prezentate valorile medii ale vitezelor de propagare a undelor sonore în lemn pe cele trei direcții principale ale lemnului.



*Figura 2.10. Variația vitezei de propagare a undelor sonore în lemn în funcție de clasele de calitate anatomică: a) pe direcție longitudinală; b) pe direcție radială; c) pe direcție tangențială*

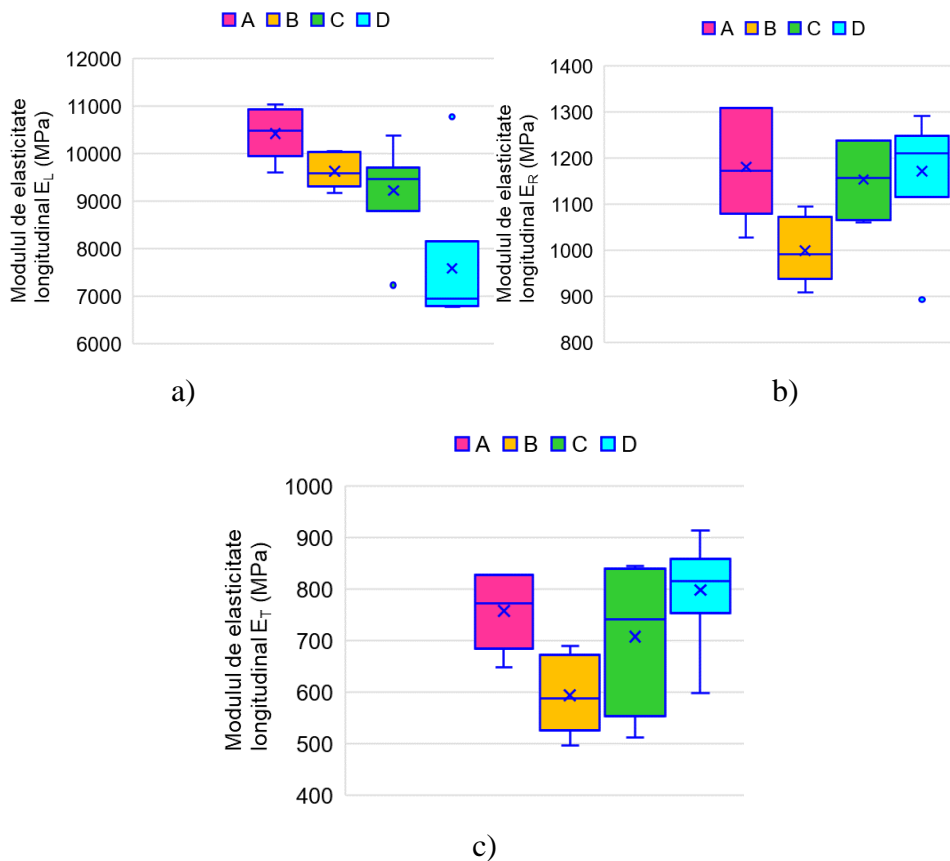
Se observă că probele din *clasa A* înregistrează cele mai mari valori ale vitezei de propagare a undelor sonore pe direcție longitudinală, valori care tind să scadă cu scăderea clasei de calitate structurală (Figura 2.10. a). Rezultatele obținute gravitează în jurul valorii de 5000 m/s pentru clasa A, 4850 m/s pentru clasa B, 4650 m/s, pentru clasa C și 4300 m/s pentru clasa D. Deși există această diferență sensibilă între clasele de calitate, toate acestea rămân în zona specifică lemnului de rezonanță. De la clasa A către clasa D, gradul de împrăștiere a valorilor parametrilor acustici este tot mai mare. Eșantioanele din clasa A sunt mai omogene în privința însușirilor acustice. Rezultatele obținute sunt comparabile cu cele raportate în literatura de specialitate, chiar dacă s-au utilizat metode diferite de determinare [50].

Astfel, [141] a obținut viteze ale lemnului de molid de rezonanță de cea mai bună calitate  $V_{LL} = 5103 \pm 280 \text{ m/s}$ ,  $V_{RR} = 1365 \pm 201 \text{ m/s}$ , iar pentru probele de control din lemn de molid,  $V_{LL} = 5388 \pm 134 \text{ m/s}$ ,  $V_{RR} = 1124 \pm 93 \text{ m/s}$ . [28] a obținut, la o densitate a lemnului de molid de  $\rho = 0.42 \text{ g/cm}^3$ , vitezele  $V_{LL} = 5568 \text{ m/s}$  și  $V_{RR} = 1554 \text{ m/s}$ . [21] identifică următoarele valori ale vitezelor de propagare a sunetului în lemnul de molid de rezonanță, determinate tot prin metoda ultrasunetelor,  $V_{LL} = 5600 \text{ m/s}$ ;  $V_{TT} = 1600 \text{ m/s}$ ;  $V_{RR} = 2000 \text{ m/s}$ , iar pentru viteza de propagare transversală  $V_{LT} = 1425 \text{ m/s}$ ;  $V_{RT} = 298 \text{ m/s}$ ;  $V_{LR} = 1374 \text{ m/s}$ , iar pentru lemnul de molid comun,  $\rho = 0.485 \text{ g/cm}^3$ ,  $V_{LL} = 5353 \text{ m/s}$ ;  $V_{TT} = 1146 \text{ m/s}$ ;  $V_{RR} = 1580 \text{ m/s}$ , respectiv,  $V_{LT} = 1230 \text{ m/s}$ ;  $V_{RT} = 477 \text{ m/s}$ ;  $V = 1322 \text{ m/s}$ . Pentru molid de rezonanță, [21] menționează următoarele rapoarte ale vitezelor care exprimă și gradul de anizotropie a lemnului:  $V_{LL}/V_{RR}=2.8$ ;  $V_{LL}/V_{TT} = 3.5$  și  $V_{RR}/V_{TT} = 0.8$ . Din datele experimentale, se poate observa că anizotropia mai mare este înregistrată pentru clasele A și B.

Cea mai mare valoare a *modulului de elasticitate longitudinală* pe direcție longitudinală se înregistrează pentru clasa A (în jurul valorii de 10500 MPa); clasa D înregistrând cele mai reduse valori (aprox. 7500 MPa) (Figura 2.11). Raportând valorile modulelor de elasticitate pe direcții diferite, se constată că cea mai mare anizotropie se înregistrează pentru clasa A, comparativ cu celelalte clase, aspect care este în concordanță cu studiile din literatura de specialitate. În consecință, plăcile de lemn sunt mai rigide în direcția fibrelor decât în direcția perpendiculară pe ele, unde se pot rupe mai ușor. Prin urmare, în cazul plăcilor de vioară, rigidizarea globală a plăcii din lemn de molid și creșterea rezistenței la rupere se face prin adăugirea unui material de ranforsare numit fileu (din abanos sau materiale polimerice), la aproximativ 6 mm de marginea plăcii, pe tot conturul, după realizarea unui uluc de aproximativ 0.5 mm adâncime și 1 mm lățime, iar pentru plăcile de chitară, rigidizarea plăcilor se face prin adăugirea unui sistem de bare cu număr variabil, în funcție de modelul de chitară. [141] identifică următoarele valori ale modulelor de elasticitate longitudinală  $E_L = 9.707 \pm 1.13 \text{ GPa}$  și  $E_R = 1.703 \pm 0.236 \text{ GPa}$ , în comparație cu probele din lemn de molid de control, care prezintă următoarele valori ale caracteristicilor elastice

investigate  $E_L = 9.974 \pm 0.769 \text{ GPa}$  and  $E_R = 1.654 \pm 0.066 \text{ GPa}$ . Folosind metoda dinamică de vibrații libere, fără contact, [15; 16] raportează o valoare a modulului de elasticitate longitudinal de  $E_L = 12.78 \text{ GPa}$ , iar ulterior, grupul de cercetători condus de method, [28] menționează următoarele valori ale modulului de elasticitate longitudinal și radial pentru lemnul de molid de rezonanță,  $E_L = 12.4 \pm 6.3 \text{ GPa}$  and  $E_R = 0.9 \pm 0.4 \text{ GPa}$ .

În ceea ce privește influența modulului de elasticitate transversal, mărimea cea mai importantă ce intervine în comportarea dinamică/acustică a plăcilor de vioară este modulul transversal din planul longitudinal-radial  $G_{LR}$ .



*Figura 2.11. Variația modulului de elasticitate longitudinal în funcție de clasele de calitate anatomică a lemnului: a) pe direcție longitudinală; b) pe direcție radială; c) pe direcție tangențială*

Din analiza discriminatorie, a rezultat că singurele variabile, dintre parametrii acustici, cu puterea de a departaja clasele de calitate sunt (în ordinea descrescătoare a importanței):  $V_{RR}$ ;  $\nu_{LR}$  și  $V_{LL}$ . În Tabelul 2.3 sunt prezentate în ordine descrescătoare rezultatele analizei discriminante multifactoriale. O contribuție relativ modestă la discriminarea claselor de calitate o are și modulul de elasticitate longitudinal,  $E_L$  (Tabelul 2.3). Ceilalți parametrii acustici nu se stratifică după clasa de calitate a eșantionului, pe cele mai joase poziții situându-se viteza de propagare a sunetului, respectiv modulul de elasticitate longitudinală în direcție tangențială, fapt care explică și confirmă

în practică, importanța utilizării în construcția structurilor rezonatoare de tip Helmholtz, a plăcilor din lemn de molid debitate pe direcție longitudinal – radială [50].

*Tabelul 2.3. Rezultatele analizei discriminante multifactoriale a parametrilor acustici în relație cu clasele de calitate anatomică a lemnului*

Variabile	Wilks' lambda	Partial Lambda	F-remove	p-level	Tolerance	1-Tolerance
$V_{RR}$	0.188659	0.470006	6.014032	0.006062	0.037839	0.962161
$\nu_{LR}$	0.182964	0.484636	5.671496	0.007658	0.010827	0.989173
$V_{LL}$	0.150288	0.590009	3.706080	0.033748	0.027826	0.972174
$E_L$	0.114761	0.772656	1.569264	0.235735	0.603382	0.396618
$G_{LT}$	0.087937	0.991717	0.041760	0.988170	0.554118	0.445882
$G_{RT}$	0.087635	0.988317	0.059104	0.980444	0.567735	0.432265
$E_R$	0.084739	0.955656	0.232010	0.872652	0.080299	0.919702
$\rho$	0.084230	0.949919	0.263609	0.850525	0.779082	0.220918
$G_{LR}$	0.077474	0.873723	0.722635	0.553980	0.116387	0.883613
$\nu_{LT}$	0.076569	0.863520	0.790255	0.517988	0.089105	0.910895
$\nu_{RT}$	0.074478	0.839931	0.952873	0.440202	0.705330	0.294670
$E_T$	0.073837	0.832709	1.004502	0.417973	0.092043	0.907957
$V_{TT}$	0.068204	0.769183	1.500406	0.254928	0.209833	0.790167

Explorarea legăturilor dintre variabilele acustice și elastice implicate în studiu a evidențiat faptul că, exceptând variabilele  $G_{RT}$  și  $\nu_{RT}$ , restul prezintă distribuții nongausiene (Shapiro\_wilk  $W = 0.84-0.91$ ,  $p \leq 0.05$ ), motiv pentru care la testarea semnificației s-a optat pentru statistica neparametrică. Legăturile semnificative statistic ( $p \leq 0.05$ ) sunt de intensitate moderată până la puternică. Astfel, contrar așteptărilor, mărimea densității lemnului nu se corelează practic cu nici unul din parametrii acustici, sau legăturile sunt de intensitate slabă și oricum ne semnificative statistic. În schimb, vitezele de propagare pe direcții transversale se corelează mai bine cu ceilalți parametrii acustici decât viteza în lungul fibrei lemnului. Cele mai strânse legături sunt între modulii de elasticitate transversală  $G_{ij}$  de pe cele trei direcții de anizotropie și între aceștia și vitezele pe direcțiile transversale. Cel mai mare coeficient de corelație s-a înregistrat între coeficienții lui Poisson  $\nu_{LR}$  și  $\nu_{LT}$ : Spearman  $R = +0.962$ ,  $p < 0.0001$ . Întrucât există numeroase referințe privind modulul specific  $E/\rho$ , pe baza rezultatelor obținute, au fost determinate valorile corespunzătoare direcțiilor principale ale lemnului, acestea regăsindu-se în Tabelul 2.4.

[28] au raportat pentru lemnul de molid de rezonanță, valori ale modulului specific, cuprinse între 25 și 33  $\text{GPa} \cdot \text{g}^{-1} \text{cm}^3$  pentru o calitate înaltă a plăcii acustice. Fiind o mărime direct proporțională cu modulul de elasticitate longitudinală, există o tendință de scădere a valorii modulului specific în raport cu scăderea clasei de calitate, respectiv cu creșterea lățimii inelelor anuale. În direcția radială, [166; 167] au obținut valori ale modulului elastic specific pentru lemnul de molid ce variază între 1.46 și 2.78  $\text{GPa} \cdot \text{g}^{-1} \text{cm}^3$ , comparativ cu valorile obținute în studiul curent care variază între 2.43 și 2.98  $\text{GPa} \cdot \text{g}^{-1} \text{cm}^3$  (Tabelul 2.4).

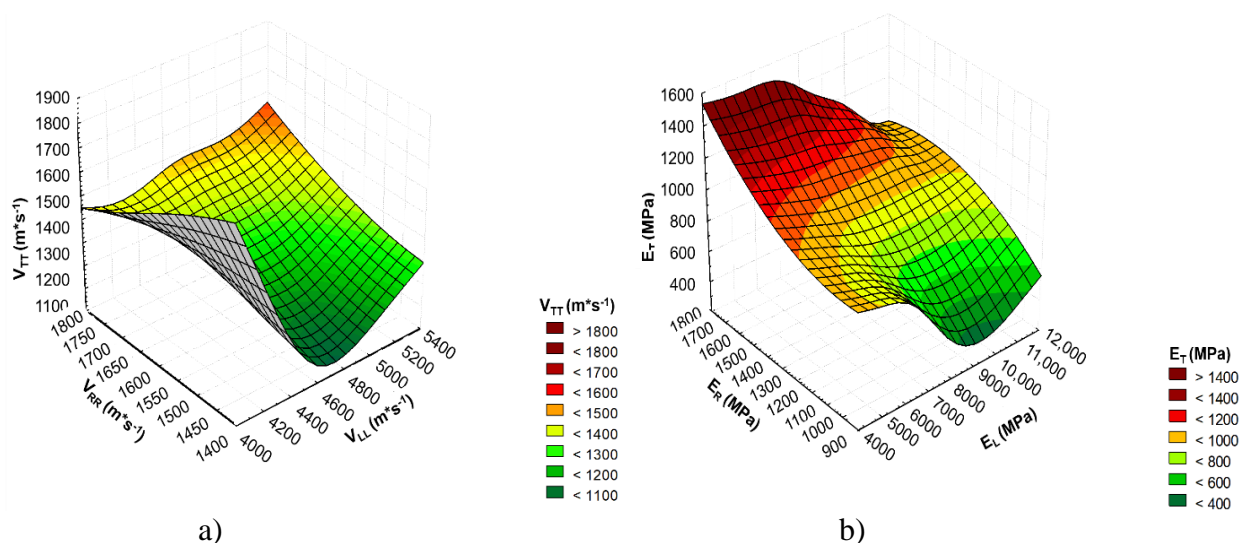


De asemenea, în planul radial longitudinal, valorile modulului specific de forfecare variază de la 1.86 la 2.51  $\text{GPa} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ , care sunt foarte apropiate de cele raportate de [28; 166; 167].

*Tabelul 2.4. Valorile parametrilor acustici și elastici ai lemnului de molid determinați prin metoda ultrasunetelor*

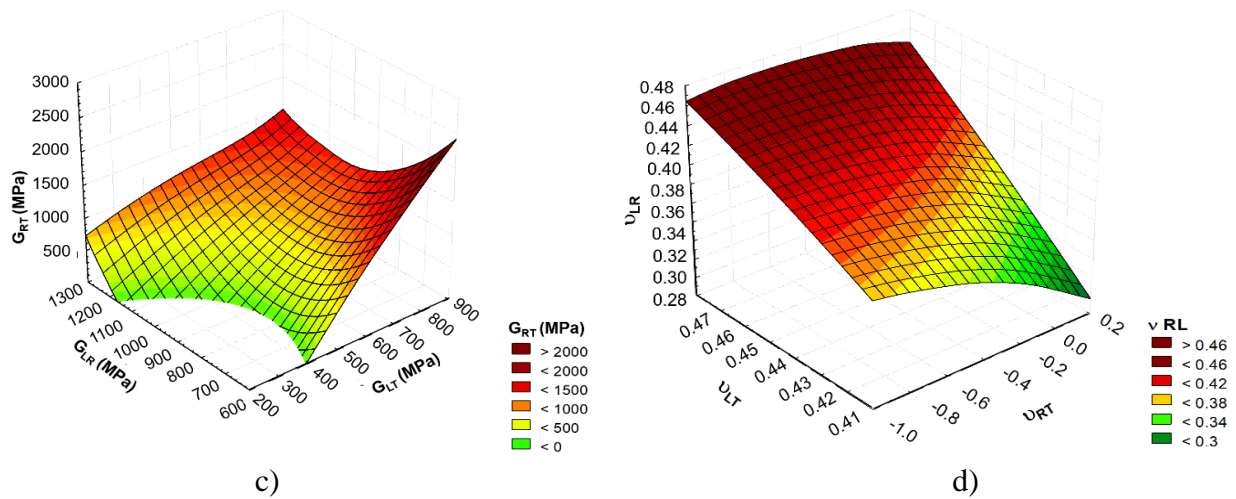
Tipul variabilelor		Valori medii pentru clasa de calitate:			
		A	B	C	D
Densitatea ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\rho$	408.60	408.07	418.38	410.47
Viteza sunetului în lemn (m/s)	$V_{LL}$	5005.74	4856.55	4688.94	4283.40
	$V_{RR}$	1703.27	1594.62	1660.39	1687.40
	$V_{TT}$	1374.57	1227.63	1296.72	1409.18
Rapoartele vitezelor (gradul de anizotropie)	$V_{LL}/V_{RR}$	2.93	3.04	2.82	2.53
	$V_{LL}/V_{TT}$	3.64	3.95	3.61	3.03
	$V_{RR}/V_{TT}$	1.23	1.29	1.28	1.19
Modulul de elasticitate al lui Young (MPa)	$E_L$	10250.58	9421.53	9595.21	7011.00
	$E_R$	1193.65	993.40	1153.88	1221.37
	$E_T$	797.77	564.87	707.97	839.00
Modulul specific longitudinal ( $\text{GPa} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ )	$E_L/\rho$	25.09	23.09	22.93	17.08
	$E_R/\rho$	2.92	2.43	2.76	2.98
	$E_T/\rho$	3.36	3.01	3.10	3.43
Modulul de forfecare (MPa)	$G_{RT}$	781.05	599.95	711.80	670.03
	$G_{LR}$	1007.50	759.28	899.97	1030.85
	$G_{LT}$	937.12	735.15	898.57	845.08
Modulul specific de forfecare ( $\text{GPa} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ )	$G_{RT}/\rho$	1.91	1.47	1.70	1.63
	$G_{LR}/\rho$	2.47	1.86	2.15	2.51
	$G_{LT}/\rho$	2.29	1.80	2.15	2.06
Coeficientul lui Poisson	$\nu_{LT}$	0.46	0.47	0.46	0.44
	$\nu_{LR}$	0.43	0.44	0.43	0.40
	$\nu_{RT}$	-0.38	-0.29	-0.33	-0.59

În Figura 2.12 sunt prezentate legăturile multiple (spline smoothed) între valorile variabilelor determinate pe cele trei direcții L, R și T.



*Figura 2.12. Corelații multiple ale parametrilor acustici și elastici în raport cu direcțiile principale ale lemnului de molid de rezonanță (continuare pe pagina următoare)*

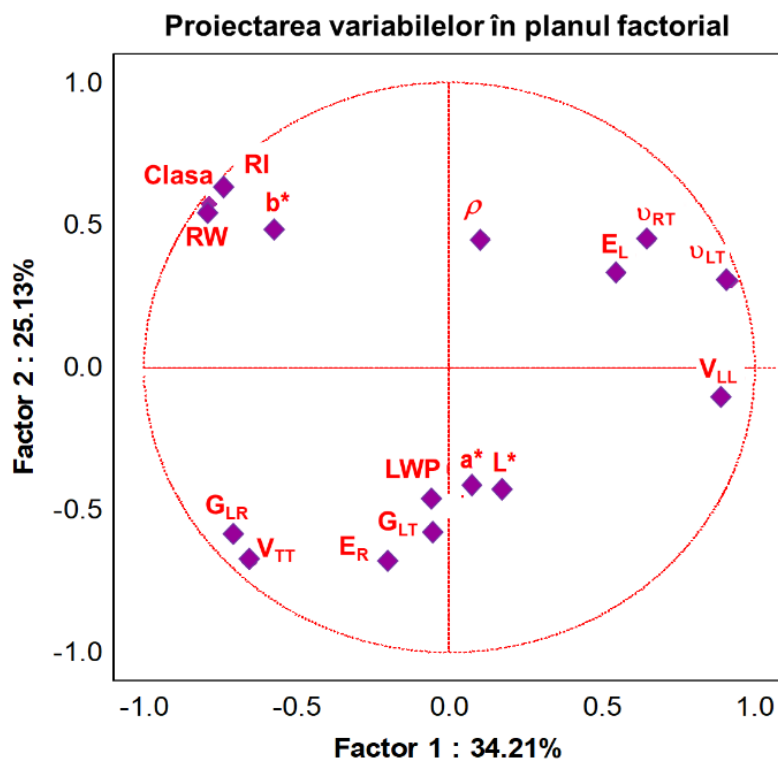




*Figura 2.12. Corelații multiple ale parametrilor acustici și elastici în raport cu direcțiile principale ale lemnului de molid de rezonanță (continuare pe pagina următoare)- continuare*

### **Legătura între caracteristicile acustice și descriptorii fizico-anatomici ai lemnului de molid**

Rezultatele obținute sunt în concordanță cu intervalele de valori determinate de alți cercetători. Mai mult decât atât, valoarea acestor investigații este dată de analiza sensibilității parametrilor pe clase de calitate anatomică a lemnului. Ca urmare, cu analiza factorială, au fost extrase 5 componente principale, primele două explicând împreună 58% din varianța totală. Prima componentă principală este definită de modulul de elasticitate longitudinală în direcție radială  $E_R$  și viteza de propagare a sunetului în direcție tangențială  $V_{TT}$ , iar cea de-a doua componentă de viteza de propagare a sunetului în direcție longitudinală  $V_{LL}$  și de clasa de calitate (Figura 2.13). Modulele de elasticitate transversală  $G_{LR}$ ,  $G_{LT}$ , cel longitudinal în direcție radială  $E_R$  și viteza în direcție tangențială  $V_{TT}$  variază în tandem cu proporția de lemn târziu și cu luminozitatea și gradul de roșu al culorii lemnului, așa cum se observă în jumătatea inferioară a proiecției factoriale (Figura 2.13). Densitatea lemnului este diametral opusă față de toate aceste variabile. Clasa de calitate a materialului, definită după criteriile anatomice ale lemnului, este bine redată de coeficientul lui Poisson  $\nu_{LT}$  cu care variază în același sens, dar și de lățimea medie a inelelor cu care variază în sens contrar. Lățimea inelelor anuale, regularitatea acestora, clasa de calitate și gradul de galben al culorii sunt strâns legate unele de altele. Densitatea lemnului este izolată față de toate celelalte caracteristici fizico-acustice măsurate. Analiza k-means clustering a evidențiat asocierea variabilelor în două grupuri, primul fiind constituit numai din viteza de propagare a sunetului în direcție longitudinală  $V_{LL}$ , respectiv modulul de elasticitate longitudinal  $E_L$ , iar celălalt atrăgând restul variabilelor - mai importante fiind vitezele de propagare a sunetelor pe direcția radială  $V_{RR}$  și tangențială  $V_{TT}$ . Intensitatea legăturilor între variabile a fost studiată cu ajutorul corelației simple, așa cum se poate observa în Tabelul 2.5.



*Figura 2.13. Reprezentarea parametrilor acustici, elastici și fizici în planul bidimensional factorial pe baza analizei factoriale (Legendă: Clasa – clasa de calitate structurală a lemnului (A, B, C, D); RW – lățimea inelului anual; L\* - luminozitatea; a\* - gradul de roșu/verde; b\* - gradul de galben/albastru; RI – indexul de regularitate a inelelor anuale;  $\rho$  – densitatea lemnului; LWP – proporția de lemn târziu)*

*Tabelul 2.5. Matricea coeficienților de corelație simplă Spearman între parametrii acustici și caracteristicile fizico-anatomice ale materialului*

Variabile acustice	Lățimea inelelor anuale TRW	Regularitatea inelelor anuale RI	Coeficienții de corelație simplă				Gradul de rosu al culorii a*	Gradul de galben al culorii b*
			Lățimea lemnului târziu LWW	% lemn târziu LWP	Strălucirea culorii L*			
$\rho$	0.396173	0.399130	0.402261	-0.292672	-0.021309	-0.160070	0.421396	
$V_{LL}$	-0.707545	-0.639130	-0.708415	0.229180	0.258752	-0.020879	-0.350076	
$V_{RR}$	0.056969	-0.012174	0.075234	0.252664	0.021309	-0.252719	0.057839	
$V_{TT}$	0.289193	0.216522	0.257882	0.214394	0.150033	-0.238365	0.116982	
$E_L$	-0.287454	-0.273043	-0.338769	0.124810	0.336160	-0.439756	0.070015	
$E_R$	-0.183953	-0.239130	-0.165688	0.123070	-0.092629	0.216181	-0.244836	
$E_T$	-0.065232	-0.146957	-0.087845	0.161774	-0.006958	0.186168	-0.233964	
$U_{LT}$	-0.346832	-0.257292	-0.349445	-0.251034	-0.019377	0.186847	-0.207490	
$U_{LR}$	-0.375300	-0.296603	-0.378785	-0.173165	0.050752	0.192157	-0.255500	
$U_{RT}$	-0.283667	-0.229249	-0.204596	-0.178898	-0.212503	0.164113	-0.174944	
$G_{LT}$	-0.230050	-0.259130	-0.185693	0.247445	0.058708	-0.152675	-0.110024	
$G_{LR}$	0.244401	0.171304	0.247880	0.292237	0.057404	-0.350587	0.199174	
$G_{RT}$	-0.117417	-0.126957	-0.061753	0.210481	0.011307	-0.084385	-0.093933	

Valorile marcate cu galben sunt semnificative pentru pragul  $p < 0.05$

## 2.2.4 Rezultate privind proprietățile acustice și elastice ale lemnului de paltin

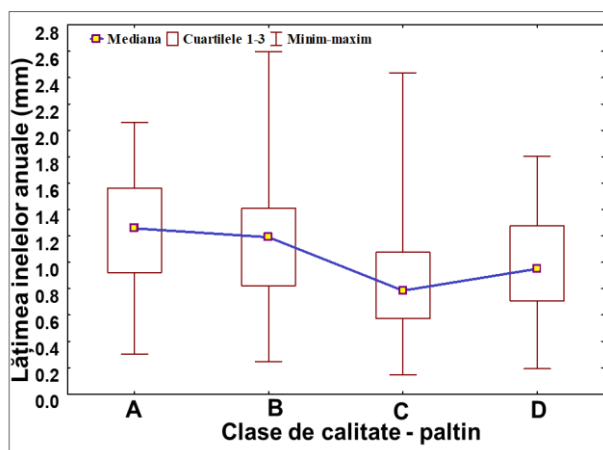
În cazul *lemnului de paltin* (*Acer pseudoplatanus L.*), determinările privind descriptorii anatomici au evidențiat faptul că lățimea inelelor anuale prezintă un nivel ridicat de variabilitate (Tabelul 2.6), care încurajează stratificarea valorilor ei. Lungimea de undă prezintă un nivel moderat de variabilitate, dar gama valorilor este destul de largă (amplitudinea de variație este 9.5 mm). Lățimea inelelor eșantioanelor de paltin nu se distribuie normal (*testul Shapiro*  $W=0.965$ ,  $p<0.0001$ ), în schimb lungimea de undă a fibrei crețe este o variabilă gaussiană (*W*=0.977,  $p=0.30$ ). Diferențele între eșantioane sunt foarte semnificative statistic cu privire la lățimea inelelor anuale, dar nu se confirmă în privința lungimii de undă, așa cum reiese din Tabelul 2.6.

Tabelul 2.6. Statistici descriptive ale caracteristicilor structurale la eșantioanele de paltin examinate

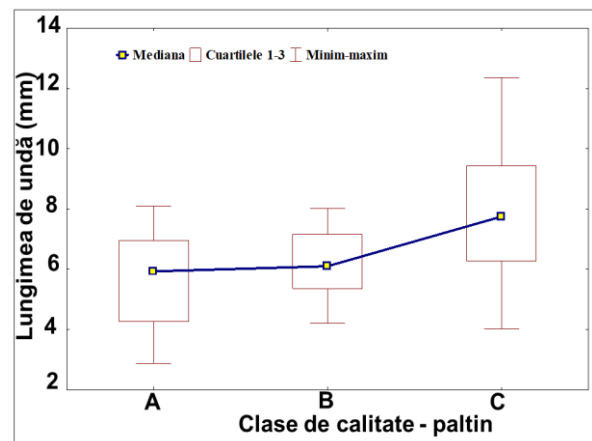
Variabila	Nr. inele anuale	Media aritmetică			Mediana	Minim	Maxim	Coeficient de variație (%)	Normalitatea variabilei (cu testul Shapiro-Wilk)	Semnificația statistică a diferențelor între eșantioane (cu testul <i>t</i> )	Semnificația statistică a diferențelor între clasele de calitate *
		Valoare	Interval de încredere								
Lățimea inelelor anuale	580	1.043	1.005	1.080	0.979	0.146	2.598	44.25	Ipoteza normalității nu poate fi acceptată	$p<0.03$	78.36
Lungimea de undă	61	6.336	5.857	6.815	6.282	2.869	12.37	29.50	Ipoteza normalității nu poate fi respinsă	$p<0.53$	6.23

\*Testul Kruskal-Wallis/Anova

De asemenea, s-a constatat că la lemnul de paltin tendința este de creștere a lățimii inelelor (Figura 2.14, a) și descreștere a lungimii de undă cu îmbunătățirea clasei de calitate (Figura 2.14, b). Clasa C se detașează; la această clasă și amplitudinea valorilor este mai mare.



a)



b)

Figura 2.14. Variația descriptorilor anatomici pentru lemnul de paltin de rezonanță în raport cu clasa de calitate anatomică: a) variația lățimii inelelor anuale; b) variația lungimii de undă a undulațiilor fibrei

Lăţimea inelelor anuale la lemnul de paltin de rezonanţă prezintă o asimetrie accentuată de stânga pentru clasa de mărimi 0.6-0.9 mm (Figura 2.15, a), iar forma distribuţiei lungimii de undă este compatibilă cu legea normală. Modulul distribuţiei este la clasa de mărimi 5.5 – 6.9 mm (Figura 2.15, b).

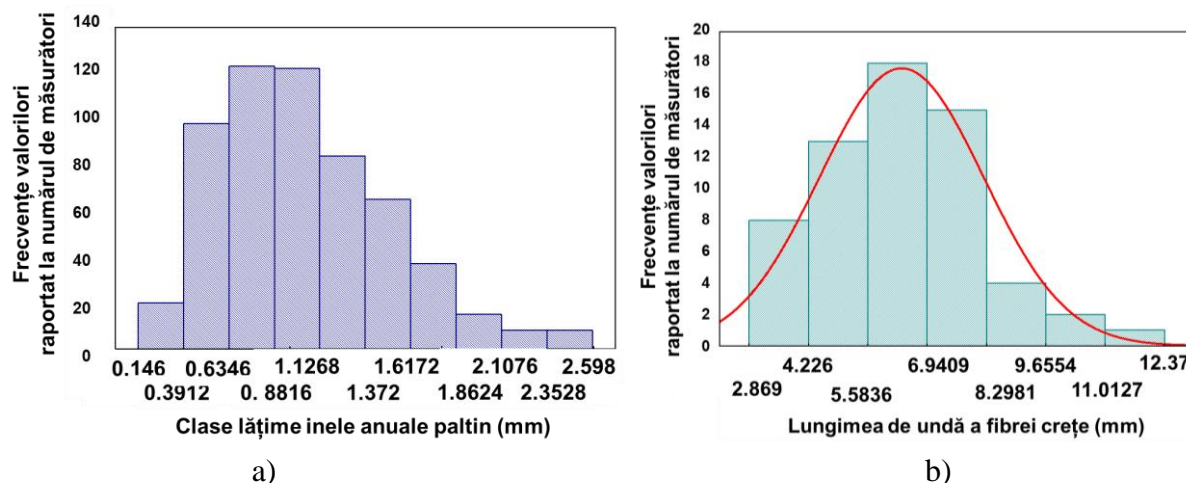


Figura 2.15. Distribuţia descriptorilor anatomici măsuraţi la probele din lemn de paltin: a) distribuţia lăţimii inelelor anuale; b) distribuţia lungimii de undă (cu roşu, distribuţia normală)

Diferenţele de culoare între clasele de calitate nu sunt atât de pregnante încât să fie perceptibile de analizorul optic uman, iar intervalele de variaţie se suprapun. Din aceste motive, culoarea nu este un criteriu practic pentru separarea claselor de calitate. Totuşi, explorarea statistică a datelor a scos la lumină unele deosebiri între clasele de calitate cu privire la culoarea lemnului (Tabelul 2.7).

Tabelul 2.7. Verificarea statistică a posibilităţii stratificării culorii eşantioanelor în funcţie de clasele de calitate propuse

Variabilă	Specia	Semnificaţia statistică a diferenţelor între clasele de calitate		Stratificarea valorilor după clasa de calitate			
		Testul Kruskal-Wallis		A	B	C	D
		H	p	Intervalul de cuartilă			
Luminozitatea ( $L^*$ %) Nuanţa de roşu/verde ( $a^*$ ) Nuanţa de galben/albastru ( $b^*$ )	Molid	12.73	0.005	83.93÷84.95	83.21÷83.98	84.26÷84.61	83.14÷84.14
		29.74	< 0.001	2.42÷2.62	2.83÷3.09	2.34÷2.48	2.49÷2.97
		14.49	< 0.001	19.24÷20.22	19.52÷19.88	19.34÷20.37	20.50÷21.18
Luminozitatea ( $L^*$ %) Nuanţa de roşu/verde ( $a^*$ ) Nuanţa de galben/albastru ( $b^*$ )	Paltin	43.64	< 0.001	82.98÷83.71	86.25÷86.90	86.14÷86.79	81.29÷82.85
		47.08	< 0.001	3.42÷3.84	2.05÷2.30	1.83÷2.09	3.40÷3.76
		28.66	< 0.001	17.55÷18.43	16.32÷17.17	17.54÷18.29	17.96÷18.37

În Figura 2.16 este prezentată corelaţia dintre luminozitatea (strălucirea culorii), gradul de galben/albastru şi clasele de calitate. De exemplu, la lemnul de molid, lemnul din clasa A de calitate prezintă o cel mai ridicat procent de strălucire a culorii ( $L^* = 84\%$ ), un grad mai mic de

roșu ( $a^* < 2.6$ ) și de galben ( $b^* < 20$ ). La clasa A de calitate, variabilele culorii prezintă amplitudinile cele mai mici de variație. La clasele B și D, lemnul de molid este mai întunecat ( $L^* < 83\%$ ) și are un conținut mai mare de roșu ( $a^* > 3.2$ ). Clasa D are și conținutul cel mai mare de galben în culoare ( $b^* > 20.5$ ). Clasa C de calitate are conținutul cel mai mic de roșu ( $a^* < 2.6$ ).

În cazul lemnului de paltin de rezonanță, valorile parametrilor de culoare sunt încadrate numai în domeniul pozitiv al spațiului culorii - nu au fost identificate nuanțe de verde sau albastru. Pe baza corelațiilor între descriptorii anatomici ai lemnului de molid, se poate afirma faptul că variabilele inelelor anuale nu au vreo influență asupra luminozității lemnului, însă mărimea nuanței de galben este direct proporțională cu lățimea inelelor și constituenților lor (lemn timpuriu și lemn târziu). Corelând culoarea lemnului cu densitatea, a rezultat că lemnul cu densitate mai mare este mai întunecat la culoare și are o nuanță mai slabă de roșu. Diferențele între clasele de calitate ale lemnului de paltin în privința culorii sunt mai pronunțate decât la molid. Stratificarea culorii după clasa de calitate relevă formarea a două grupuri: clasele A și D, respectiv B și C (Figura 2.16, b).

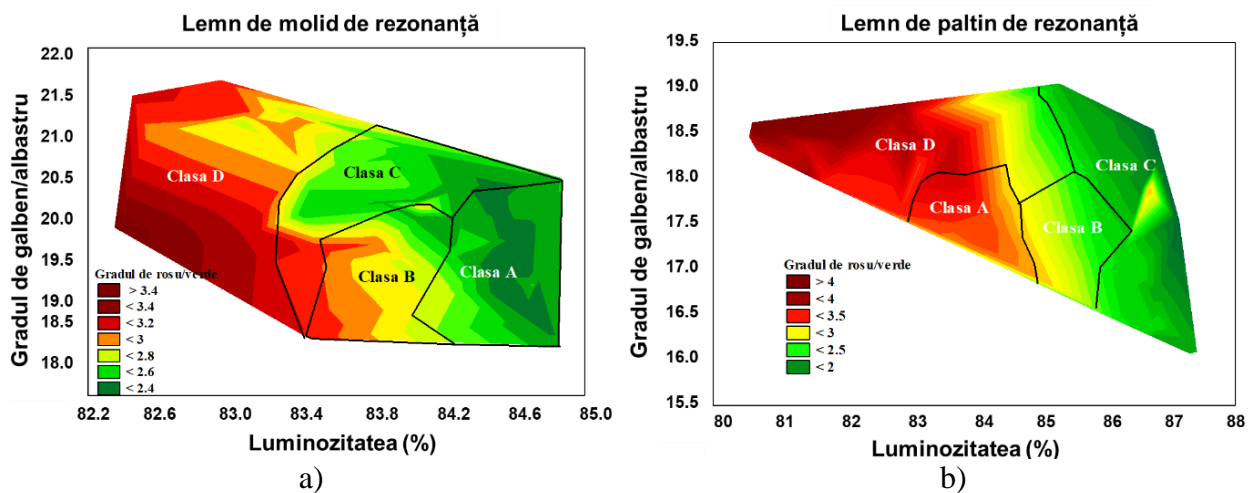


Figura 2.16. Corelația multiplă între gradul de strălucire a culorii, gradul de galben și clasa de calitate anatomică la: a) lemnul de molid; b) lemnul de paltin

Astfel, se observă că eșantioanele din clasele A și D au lemnul mai întunecat ( $L^* < 84\%$ ), cu o concentrație mare de roșu ( $a^* > 3.5$ ) și de galben în compoziția culorii ( $b^* > 17$ ), comparativ cu eșantioanele din clasele B și C de calitate care prezintă o luminozitate mai mare ( $L^* > 84.5\%$ ). În cazul eșantioanelor din clasa D de calitate, culoarea prezintă cea mai mare amplitudine a valorilor parametrilor. Din perspectiva corelațiilor cu ceilalți descriptorii fizici ai lemnului de paltin, rezultă că densitatea este invers proporțională cu lățimea inelelor și cu gradul de roșu, dar direct proporțională cu lungimea de undă și luminozitatea. Legătura între lățimea inelelor și culoarea lemnului de paltin nu depășit pragul semnificației statistice - probabil datorită numărului insuficient de măsurători. Totuși se observă o tendință de creștere a mărimii nuanței de roșu ( $a^*$ )

și de temperare a nuanței de galben ( $b^*$ ) pe măsură ce inelele sunt mai late. În concluzie, se poate aprecia că lemnul de paltin cu fibră creață deasă este mai întunecat și are un grad mai mare de roșu și de galben în compoziția culorii.

În mod similar determinărilor și calculelor privind parametrii fizici, elastici și acustici ai lemnului de molid, s-a procedat și pentru determinarea parametrilor acustici și elastici ai lemnului de paltin, pe cele patru clase de calitate anatomică a lemnului (Tabelul 2.8.).

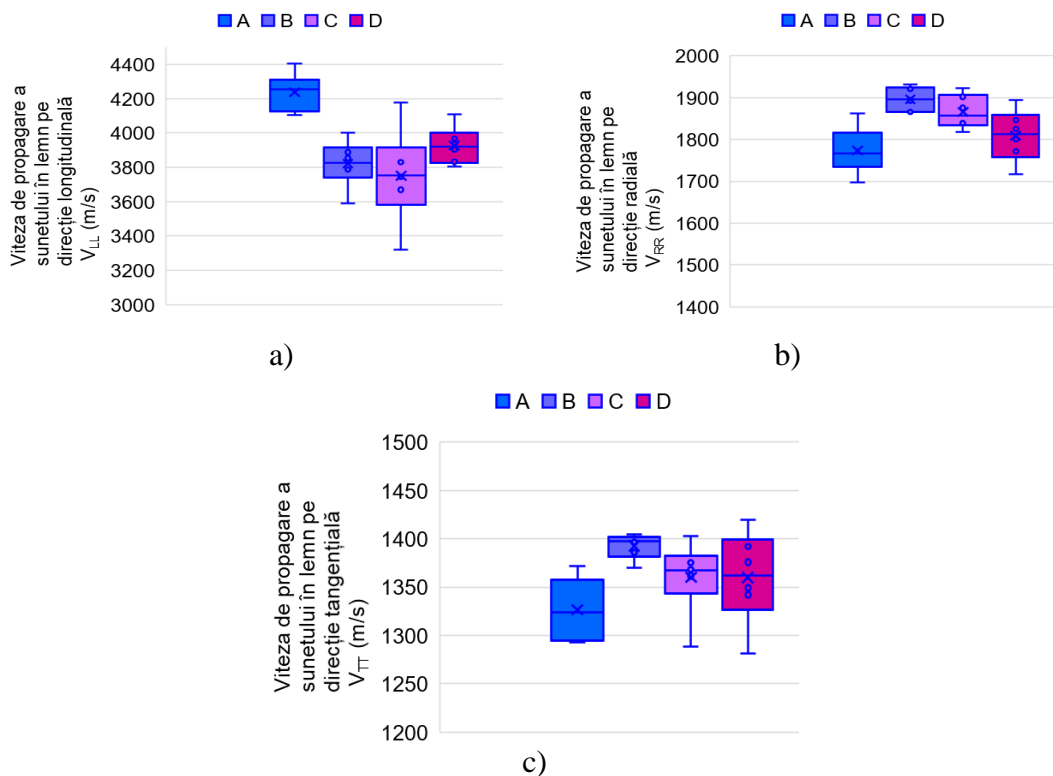
*Tabelul 2.8. Parametrii acustici și elastici ai lemnului de paltin de rezonanță determinați prin metoda ultrasunetelor*

Tipul variabilelor	Simbol	Valori medii ( abaterea standard) la clasa de calitate			
		A	B	C	D
Densitatea ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$	610.28 (3.02)	600.70 (4.38)	591.97 (8.49)	624.41 (16.31)
Viteza sunetului în lemn (m/s)	$V_{LL}$	4238 (108)	3820 (135)	3750 (275)	3925 (109)
	$V_{RR}$	1773 (55)	1896 (27)	1866 (40)	1808 (61)
	$V_{TT}$	1326 (34)	1392 (12)	1360 (38)	1359 (47)
Rapoartele vitezelor	$V_{LL}/V_{RR}$	2.39	2.015	2.009	2.17
	$V_{LL}/V_{TT}$	3.19	2.74	2.75	2.88
	$V_{RR}/V_{TT}$	1.33	1.36	1.37	1.33
Modulul de elasticitate al lui Young (MPa)	$E_L$	10968 (593)	8775 (575)	8359 (1157)	9626 (585)
	$E_R$	1920 (123)	2030 (370)	2044 (135)	2044 (141)
	$E_T$	1074 (59)	1164 (23)	1096 (74)	1157 (103)
Modulul specific de elasticitate ( $\text{GPa} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ )	$E_L/\rho$	17.97	14.60	14.12	15.41
	$E_R/\rho$	3.14	3.38	3.45	3.27
	$E_T/\rho$	1.76	1.93	1.85	1.85
Modul de forfecare (MPa)	$G_{RT}$	1259 (114)	1648 (76)	1560 (123)	1385 (155)
	$G_{LR}$	1371.6 (84)	1629 (54)	1544 (131)	1515 (126)
	$G_{LT}$	1061 (65)	1200 (23)	1129 (77)	1130.4 (92)
Modulul specific de forfecare ( $\text{GPa} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ )	$G_{RT}/\rho$	2.064	2.74	2.63	2.22
	$G_{LR}/\rho$	2.24	2.71	2.60	2.42
	$G_{LT}/\rho$	1.74	1.99	1.90	1.81
Coeficientul lui Poisson	$\nu_{LT}$	0.445 (0.0023)	0.423 (0.006)	0.422 (0.016)	0.431 (0.007)
	$\nu_{LR}$	0.394 (0.0034)	0.334 (0.021)	0.331 (0.033)	0.364 (0.012)
	$\nu_{RT}$	0.14 (0.059)	0.085 (0.044)	0.0716 (0.066)	0.167 (0.133)

Datele obținute sunt în concordanță cu cele identificate în literatura de specialitate. Astfel, [18–22], furnizează următoarele valori pentru lemnul de paltin de rezonanță, obținute tot prin metoda cu ultrasunete:  $\rho = 0.700 \text{ g/cm}^3$ ,  $V_{LL} = 4350 \text{ m/s}$ ;  $V_{TT} = 1914 \text{ m/s}$ ;  $V_{RR} = 2590 \text{ m/}$



s, vitezele transversale:  $V_{LT} = 1468 \text{ m/s}$ ;  $V_{RT} = 812 \text{ m/s}$ ;  $V_{LR} = 1744 \text{ m/s}$ , comparativ cu valorile specifice lemnului de paltin comun,  $\rho = 0.623 \text{ g/cm}^3$ ,  $V_{LL} = 4695 \text{ m/s}$ ;  $V_{TT} = 1878 \text{ m/s}$ ;  $V_{RR} = 2148 \text{ m/s}$ , și vitezele transversale  $V_{LT} = 1148 \text{ m/s}$ ;  $V_{RT} = 630 \text{ m/s}$ ;  $V_{LR} = 1354 \text{ m/s}$ . În cazul lemnului de paltin creț de foarte bună calitate cu densitatea de  $\rho = 0.625 \pm 0.022 \text{ g/cm}^3$ , [142] a obținut vitezele de propagare ale sunetului pe direcție longitudinală  $V_{LL} = 3894 \pm 310 \text{ m/s}$ , respectiv radială  $V_{RR} = 1662 \pm 97 \text{ m/s}$ , modulul de elasticitate longitudinală în direcție longitudinală,  $E_L = 9.707 \pm 1.13 \text{ GPa}$  și în direcție radială,  $E_R = 1.703 \pm 0.236 \text{ GPa}$ , în comparație cu probele de control pentru care s-au obținut următoarele valori:  $\rho = 0.569 \pm 0.015 \text{ g/cm}^3$ ,  $V_{LL} = 4180 \pm 143 \text{ m/s}$ ,  $V_{RR} = 1703 \pm 24 \text{ m/s}$ ,  $E_L = 9.974 \pm 0.769 \text{ GPa}$  and  $E_R = 1.654 \pm 0.066 \text{ GPa}$ . [27; 28] raportează următoarele valori pentru paltinul de rezonanță:  $\rho = 0.6 \text{ g/cm}^3$ ,  $V_{LL} = 3660 \text{ m/s}$  și  $V_{RR} = 1560 \text{ m/s}$ ,  $E_L = 9.8 \pm 4 \text{ GPa}$  și  $E_R = 1.7 \pm 0.4 \text{ GPa}$ . Stratificarea pe clase de calitate este semnificativă mai ales pentru viteza de propagare a sunetului pe direcție longitudinală. Datele experimentale obținute sunt prezentate grafic în [Figura 2.17](#), [Figura 2.18](#), [Figura 2.19](#).



*Figura 2.17. Variația vitezelor de propagare a sunetului în lemnul de paltin, pe direcțiile principale ale lemnului: a) longitudinală; b) radială; c) tangențială*



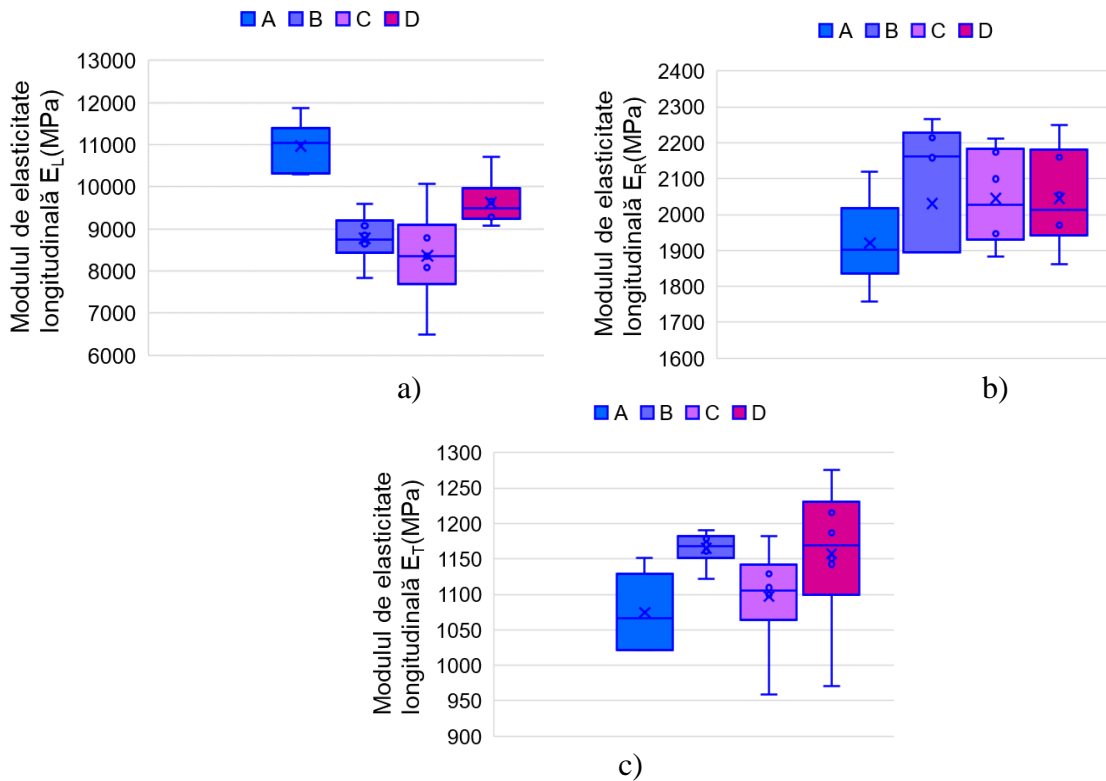


Figura 2.18. Stratificarea modulelor de elasticitate longitudinală în funcție de clasele de calitate anatomică alelemnului de paltin: a) direcția longitudinală; b) direcția radială; c) direcția tangențială

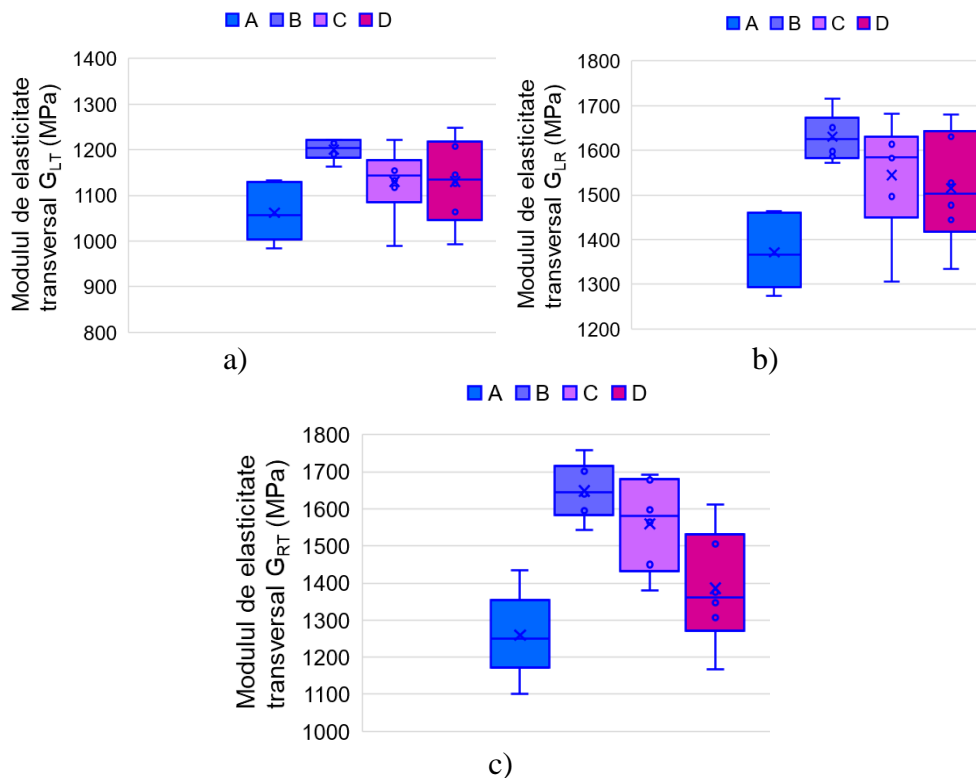


Figura 2.19. Stratificarea modulelor de elasticitate transversală în funcție de clasele de calitate anatomică alelemnului de paltin: a) în secțiunea LT; b) LR; c) RT

Având în vedere că probele investigate fac parte din categoria lemnului de rezonanță, în Tabelul 2.9 sunt prezentate valorile statistice ale parametrilor acustici examinați.

**Tabelul 2.9. Statistici descriptive ale parametrilor acustici examinați**

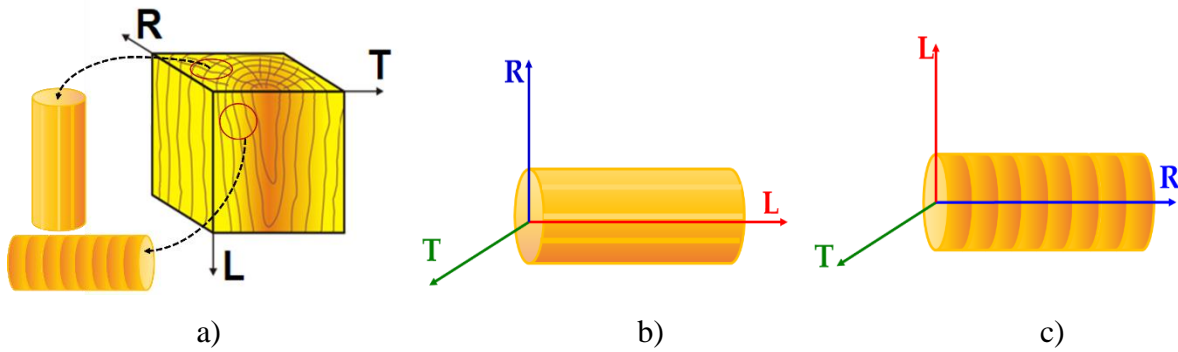
Variabilă	Media aritmetică						Coeficient de variație (%)
	Valoare	Interval de încredere		Mediana	Minim	Maxim	
$\rho$	606.841	601.740	611.941	604.374	577.783	634.44	2.5031
$V_{LL}$	3933.726	3850.163	4017.289	3896.243	3318.678	4404.00	6.3263
$V_{RR}$	1836.079	1813.781	1858.376	1842.891	1696.712	1931.20	3.6166
$V_{TT}$	1359.829	1346.069	1373.589	1368.727	1281.052	1419.27	3.0136
$E_L$ [Mpa]	9432.075	9013.687	9850.463	9299.950	6487.600	11866.50	13.2103
$E_R$ [Mpa]	2010.325	1939.622	2081.028	2019.650	1283.300	2266.10	10.4739
$E_T$ [Mpa]	1123.413	1097.505	1149.320	1135.700	958.700	1275.80	6.8679
$\nu_{LT}$	0.430	0.426	0.435	0.429	0.398	0.45	3.3655
$\nu_{LR}$	0.356	0.345	0.367	0.359	0.278	0.40	9.1301
$\nu_{RT}$	-0.116167	-0.1455	-0.0868	-0.1105	-0.3090	0.0190	-75.2517
$G_{RT}$ [Mpa]	1463.4500	1399.37	1527.53	1477.600	1101.500	1758.200	13.0393
$G_{LR}$ [Mpa]	1515.267	1469.680	1560.854	1549.550	1273.900	1715.90	8.9597
$G_{LT}$ [Mpa]	1130.538	1102.992	1158.083	1138.950	984.200	1248.30	7.2560

Mai mult decât atât, rezultatele prezentate în acest subcapitol constituie o bază de date valoroasă pentru producătorii de viori, pentru cercetătorii din domeniul acustic, mecanic, forestier, putând fi valorificate în optimizarea topologică a instrumentelor muzicale cu corzi.

### 2.2.5 Materialul și metoda matricei de transfer intrinsecă

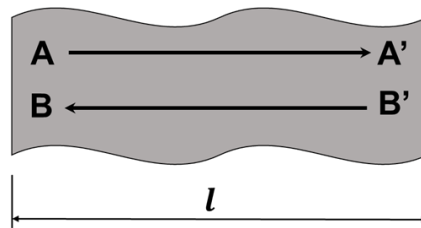
O metodă alternativă pentru calculul vitezelor de propagare a sunetelor în lemn, respectiv a modulului de elasticitate longitudinal a fost cea bazată pe analiza modală a unui sistem elastic și care corelează valorile proprii reale cu frecvențele modului propriu al sistemului, cunoscută în literatura de specialitate ca metoda matricei de transfer intrinsecă, dezvoltată de conf. univ hab. dr. Crețu Nicolae în Laboratorului de Fizică acustică, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor – Universitatea Transilvania din Brașov. Această metodă a fost aplicată și pentru materiale anizotrope ortotrope precum lemnul de rezonanță, în cadrul cercetărilor proiectului PN-III-P2-2.1-PED-2019-2148, contract nr. 568PED/2020 “Modele inovative de viori comparabile acustic și estetic cu viorile de patrimoniu - MINOVIS”, ca urmare a colaborării dintre autoarea tezei și domnul conf. univ hab. dr. Crețu Nicolae Constantin, membru în echipa proiectului.

În acest sens, au fost testate un număr de 14 probe din lemn de molid și paltin de rezonanță cu conținutul de umiditate de 6 – 8%, determinându-se vitezele de propagare a sunetelor în lemn în direcție radială și longitudinală. Astfel, au fost pregătite probe de formă cilindrică, având diametrul de aproximativ 8 mm, iar lungimea de 40 mm, tăiate în direcție longitudinală și în direcție radială, după cum se poate vedea în [Figura 2.20](#). Epruvetele au fost integrate între două bare din aluminiu, cu secțiune circulară, formând un sistem ternar ([Figura 2.3, a](#)).



*Figura 2.20. Modul de prelevare a probelor pentru determinarea vitezelor de propagare a undelor sonore în lemn prin metoda matricei de transfer intrinsecă*

Utilizând standul experimental prezentat în [Figura 2.3.b](#), au fost determinate frecvențele modurilor proprii prin analiza Fourier și, cunoscând proprietățile elastice ale materialelor etalon (barele din aluminiu), datele au fost integrate în matricea de transfer intrinsecă ca metodă numerică semi-analitică pentru a determina viteza de propagare a unei unde acustice în lemn [40-43; 122]. Principiul metode se bazează pe faptul că în sistem se formează unde staționare, astfel încât, în cazul unui mediu elastic de lungime cunoscută,  $l$ , amplitudinile componentelor Fourier la intrare și ieșire sunt conectate prin intermediul matricei de transfer intrinsecă. Astfel, conform [Figura 2.21](#), se va obține relația amplitudinii (2.26).



*Figura 2.21. Un mediu elastic omogen semi-infinit simplu care conține o undă elastică staționară longitudinală*

$$\begin{pmatrix} A' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{ikl} & 0 \\ 0 & e^{-ikl} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}; \quad (2.25)$$

Valorile proprii ale matricei care leagă amplitudinile componentelor Fourier sunt:

$$\lambda_{1,2} = \cos kl \pm i \cdot \sin kl \quad (2.26)$$

deoarece se știe că modurile proprii sunt realizate când are loc egalitatea (2.27)

$$\sin kl = 0 \quad (2.27)$$

Putem spune că la frecvențele modurilor proprii valorile proprii sunt reale. O astfel de presupunere se poate impune și sistemelor elastice complexe, cum este cazul undelor longitudinale staționare. În cazul sistemelor elastice complexe, matricea de transfer intrinsecă se obține ca produs a două tipuri de matrice, matricea de propagare și matricea de discontinuitate. De exemplu, matricea de discontinuitate va avea forma (2.28), dacă se ține cont de două medii cu impedanțe acustice și

condițiile de contur la interfața dintre cele două medii precum și luând în considerare propagarea unei longitudinale cu amplitudinile de undă corespunzătoare pentru componenta propagată și pentru componenta inversă (reflectată):

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = D_{12} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_2} & 1 - \frac{Z_1}{Z_2} \\ 1 - \frac{Z_1}{Z_2} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix}; \quad (2.28)$$

Unde  $D_{12}$  este matricea discontinuității,  $A_2$  este amplitudinea unei transmise și  $B_2$  este amplitudinea unei reflectate după transmisie. Matricea de propagare care descrie schimbările de fază în timpul propagării va fi dată de relația (2.30):

$$P = \begin{pmatrix} e^{ikl} & 0 \\ 0 & e^{-ikl} \end{pmatrix}; \quad (2.29)$$

cu  $l$  lungimea mediului și  $k$  numărul de undă.

Pentru un sistem elastic ternar simplu, cu capetele libere așa cum este cazul sistemului de testare prezentat în [Figura 2.3a](#), matricea de transfer intrinsecă are forma (2.30):

$$\begin{aligned} T(\omega) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} e^{ik_3 l_3} & 0 \\ 0 & e^{-ik_3 l_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_2}{Z_3} & 1 - \frac{Z_2}{Z_3} \\ 1 - \frac{Z_2}{Z_3} & 1 + \frac{Z_2}{Z_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{ik_2 l_2} & 0 \\ 0 & e^{-ik_2 l_2} \end{pmatrix} \\ * \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_2} & 1 - \frac{Z_1}{Z_2} \\ 1 - \frac{Z_1}{Z_2} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{ik_1 l_1} & 0 \\ 0 & e^{-ik_1 l_1} \end{pmatrix}; \end{aligned} \quad (2.30)$$

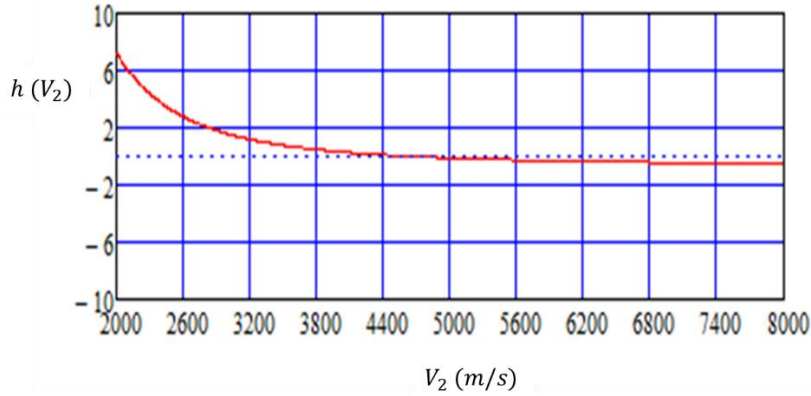
și se obține o formulă analitică pentru valorile proprii de forma:

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} = \left\{ \left( \frac{Z_1 + Z_2}{2\sqrt{Z_1 Z_2}} \right)^2 \cos(k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_1 l_3) - \left( \frac{Z_1 - Z_2}{2\sqrt{Z_1 Z_2}} \right)^2 \cos(k_1 l_1 - k_2 l_2 + k_1 l_3) \right\} \pm \\ i \sqrt{1 - \left\{ \left( \frac{Z_1 + Z_2}{2\sqrt{Z_1 Z_2}} \right)^2 \cos(k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_1 l_3) - \left( \frac{Z_1 - Z_2}{2\sqrt{Z_1 Z_2}} \right)^2 \cos(k_1 l_1 - k_2 l_2 + k_1 l_3) \right\}^2} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Condiția pentru valorile reale ale valorilor proprii este de a găsi acea funcție complexă în care componenta imaginară a expresiei analitice a valorilor proprii să fie egală cu zero,  $\omega$  fiind pulsația proprie a modurilor proprii. În sistemele ternare format din două materiale etalon cu lungimi identice și proba de interes, această funcție este (2.32):

$$h(V_1, V_2 = x, \omega) = \left\{ \begin{pmatrix} \left( \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{2\sqrt{\rho_1 V_1 \rho_2 V_2}} \right)^2 \cos\left(\frac{\omega}{V_1} l_1 + \frac{\omega}{V_2} l_2 + k \frac{\omega}{V_1} l_3\right) \\ \left( \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{2\sqrt{\rho_1 V_1 \rho_2 V_2}} \right)^2 \cos\left(\frac{\omega}{V_1} l_1 - \frac{\omega}{V_2} l_2 + k \frac{\omega}{V_1} l_3\right) \end{pmatrix}^2 - 1 \right. \quad (2.32)$$

Pentru un sistem încastrat aluminiu-lemn-aluminiu, cu viteza de propagare a sunetului în aluminiu (sistemul 1)  $V_1 = 4996 \frac{m}{s}$ ,  $\rho_1 = 2790 \frac{kg}{m^3}$ ,  $l_1 = 0.15 m$ ,  $\rho_2 = 556.16 \frac{kg}{m^3}$ ,  $l_2 = 39,25 mm$ ,  $\rho_3 = \rho_1$ ,  $V_3 = V_1$ ,  $l_3 = 0.3 m$ , având prima frecvență a modului propriu  $f = 3784.14 Hz$ , funcția  $h(V_2)$  are o rădăcină la viteza de propagare a undelor sonore în lemn (sistemul 2)  $V_2 = 4635 m/s$ , comportamentul acestei funcții fiind ilustrat în [Figura 2.22](#).



*Figura 2.22. Graficul de variație a rădăcinii funcției  $h(V_2)$ , din relația (2.33), în care  $V_2 = 4653 m/s$*

### 2.2.6 Rezultatele aplicării metodei matricei de transfer intrinsecă la lemnul de rezonanță

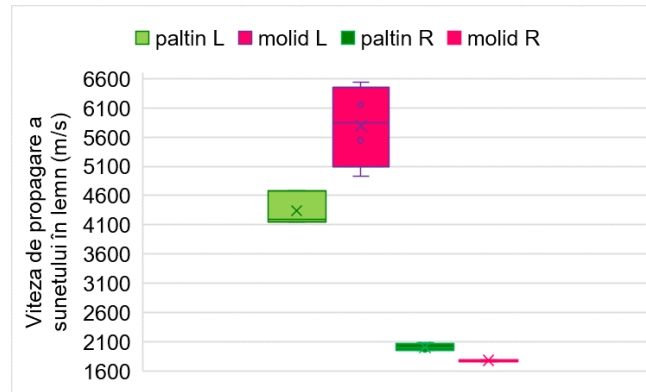
Plecând de la aceste fundamente teoretice, semnalul înregistrat în urma testării probelor a fost procesat aplicând transformata Fourier în softul de analiză Labview de unde s-au obținut frecvențele proprii ale sistemului, apoi, utilizând programul de calcul Mathcad s-au obținut valorile vitezelor de propagare a sunetelor în probele din lemn de molid, respectiv paltin, care sunt prezentate în [Tabelul 2.10](#).

*Tabelul 2.10. Valorile vitezelor de propagare a undelor sonore în lemnul de molid și de paltin, pe direcțiile longitudinală și radială*

Probe din lemn de rezonanță	Valori medii (abaterea standard)			
	Densitatea ( $kg/m^3$ )	Viteza de propagare ( $m/s$ )	Modulul de elasticitate longitudinal (MPa)	Raportul $V_L/V_R$
Molid – direcție longitudinală L	367 (40)	5795 (705)	12551 (3794)	3.257
Molid – direcție radială R	384 (40)	1779 (210)	1161 (160)	
Paltin - direcție longitudinală L	554(23)	4341(296)	10438 (1870)	2.170
Paltin – direcție radială R	567 (19)	2001 (58)	2273 (208)	

După cum se poate vedea și în [Figura 2.23](#), cele mai mari valori ale vitezei de propagare a undelor sonore în lemn sunt înregistrate în direcția longitudinală, lemnul de molid atingând viteze de până la 1.33 ori mai mari decât lemnul de paltin. Pe direcția radială, raportul dintre vitezele de propagare ale celor două specii (molid: paltin) este de aproximativ 0.85, viteza de propagare a undelor sonore în lemnul de molid fiind mai mică decât cea a lemnului de paltin. Acest lucru se datorează

conținutului mai mare de raze medulare din structura lemnului de paltin în comparație cu lemnul de molid.



*Figura 2.23. Stratificarea vitezelor de propagare a undelor sonore in lemnul de rezonanță determinate prin metoda matricei de transfer intrinsecă*

Din punct de vedere al raportului dintre vitezele de propagare a undelor sonore pe cele două direcții longitudinale și radiale, în cadrul aceleiași specii de lemn, pentru probele de molid raportul  $V_{LL}/V_{RR}$  este de 3.257, iar pentru probele de lemn de paltin, raportul este 2.17 (Tabelul 2.10). Aceste valori sunt în acord cu cele obținute de [28; 29] (3.5 pentru molid de rezonanță și 2.34 pentru paltin), precum și cu cele determinate de [141] (3.73 pentru molid de rezonanță și 2.34 pentru paltin) ambele fiind determinată de metoda dinamică. Prin metoda cu ultrasunete, [19–24] menționează următoarele valori ale raportului dintre vitezele de propagare pe direcție longitudinală și radială: 2.8 pentru molid de rezonanță și 1.67 pentru paltin. Prin metoda ultrasunetelor prezentate anterior, rapoartele obținute sunt: 3.64 pentru molid de rezonanță și 2.142 pentru paltin [40; 51].

În final, se poate aprecia că metoda matricei de transfer intrinsecă este o metodă precisă de evaluare a proprietăților elastice a materialelor anizotrope, având avantajul de a păstra viteza de propagare a sunetului în plan longitudinal, reducând efectul dispersiei și al factorului de atenuare. Astfel, aplicarea acestei metode la materiale anizotrope ortotrope, cum ar fi lemnul, s-a dovedit a fi foarte eficientă și cu un consum redus de epruvete. Rezultatele obținute au confirmat calitatea acustică a lemnului de rezonanță din Munții Carpați și au evidențiat, de asemenea, avantajele utilizării acestei metode.

## 2.3 Determinarea modului dinamic prin analiza mecanică în regim dinamic (DMA)

### 2.3.1 Considerații teoretice

Analiza mecanică în regim dinamic (DMA) este o tehnică utilizată pentru studierea comportamentului vâsco-elastic al polimerilor. Lemnul este considerat un polimer natural, fapt pentru care metoda DMA permite măsurători precise în ceea ce privește modificările fizice, structurale și mecanice care au loc în interiorul acestuia. Principiul metodei constă în aplicarea în mod ciclic asupra epruvetei studiate a unei forțe oscilatorii la diferite valori ale temperaturii și/sau ale frecvenței de sollicitare. Pe baza răspunsului epruvetei se poate determina comportamentul vâscos al materialului sub forma modului de pierdere, precum și rigiditatea epruvetei sub formă de modulul de conservare [102]. Aceste proprietăți sunt adesea descrise ca și capacitatea de a pierde energie sub formă de căldură (amortizare) și capacitatea de a înmagazina energie pentru a reveni la forma inițială după deformare (elasticitate). Atunci când asupra unei epruvete este aplicată o forță ce oscilează sinusoidal, eșantionul se va deforma de asemenea sinusoidal (Figura 2.24).

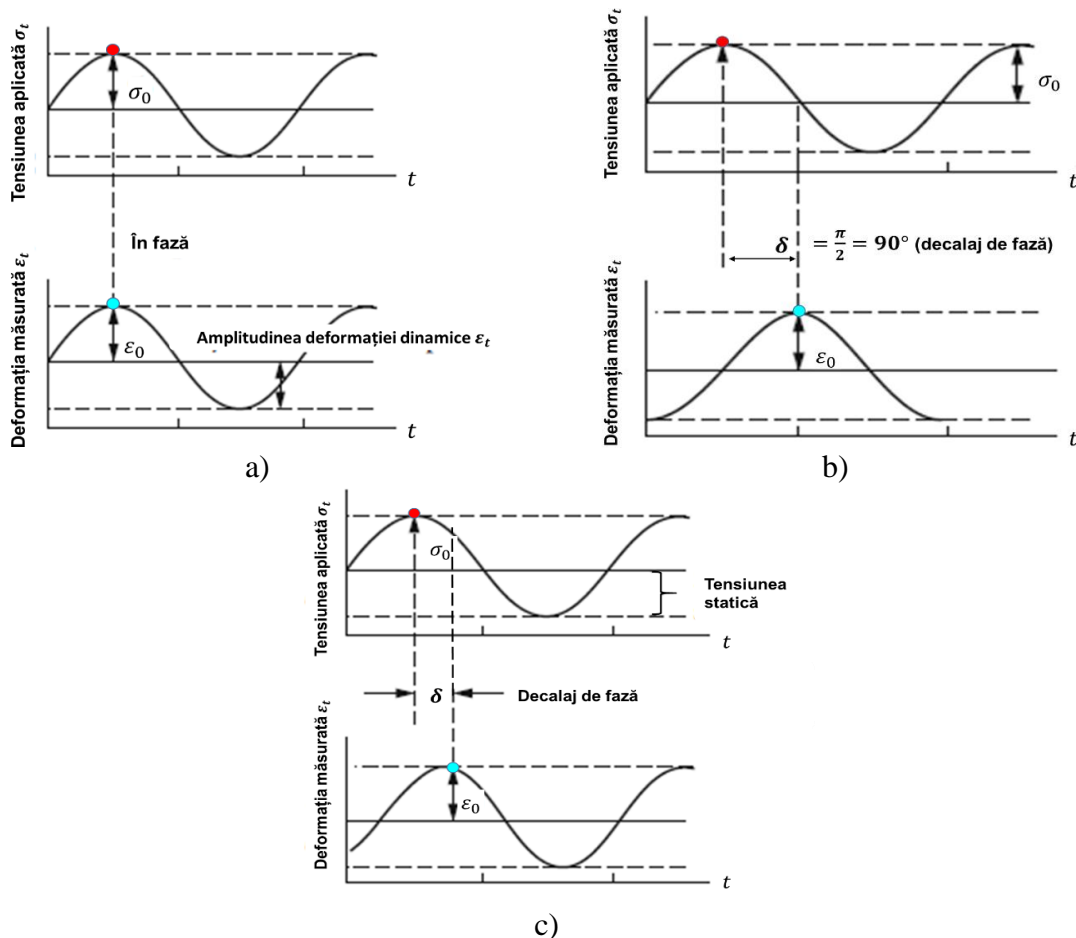


Figura 2.24. Corelația dintre tensiunea aplicată ciclic și răspunsul materialului sub forma deformației: a) material elastic; b) material vâscos; c) material vâscoelastic [102]



Pentru orice punct de pe curbă, tensiunea aplicată este dată de relația (3.1):

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t, \quad (3.1)$$

unde:  $\sigma$  este tensiunea la momentul  $t$ ,  $\sigma_0$  - tensiunea maximă aplicată (amplitudinea),  $\omega$  – pulsația oscilației ( $\omega = 2\pi f$ , în rad/s, unde  $f$  este frecvența).

Deformația rezultată depinde de proprietățile vâsco-elastice ale eșantionului (de cât de mult este acesta vâscos sau elastic). Cele două extreme ale caracteristicilor materialului, elastic și vâscos, duc la obținerea celor două cazuri limită în ceea ce privește unda-deformație:

**a. Comportarea elastică (solid de tip Hooke)** are similară unui arc: în momentul aplicării unui efort se produce instantaneu o deformare, proporțională cu efortul (legea lui Hooke:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , unde  $E$  este modulul de elasticitate). Dacă tensiunea este readusă la zero, deformația dispare. Se poate spune că deformația elastică este instantanee și recuperabilă. În cazul aplicării unei tensiuni sinusoidale, deformația va fi tot sinusoidală:

$$\varepsilon(t) = E \cdot \sigma_0 \sin \omega t. \quad (2.33)$$

Atâta timp cât eșantionul se află în domeniul vâsco-elasticității liniare, în general la deformații mici ( $\varepsilon < 0.01$ ), variația deformației specifice cu tensiunea fiind liniară ( $\sigma_0 = E \cdot \varepsilon_0$ ), relația de mai sus devine:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (2.34)$$

Acest caz este reprezentat în [Figura 2.24, a](#): între curba tensiunii și cea a deformării nu există nici un defazaj, nici o diferență de timp. *Se spune că tensiunea și deformația specifică sunt în fază.*

**b. Comportarea vâscoasă** poate fi reprezentat printr-un amortizor. În acest caz, tensiunea este proporțională cu viteza de deformare (legea lui Newton:  $\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$ , unde  $\eta$  este vâscozitatea absolută sau newtoniană;  $\dot{\varepsilon}$  este viteza de deformare și reprezintă derivata deformației în funcție de timp  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ ).

Lichidul newtonian are "memorie", el amintindu-și de toate tensiunile ce i-au fost aplicate înaintea momentului  $t$  (deformarea  $\varepsilon(t)$  depinde de valorile tensiunii de la 0 la  $t$ ). Dacă tensiunea este anulată brusc (adusă la zero), deformația rămâne constantă la valoarea dinaintea momentului anulării tensiunii (deformația este irecuperabilă).

În cazul aplicării unei tensiuni sinusoidale, deformația va fi dată de relația (2.35):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0 \omega}{\eta} \cos \omega t = \frac{\sigma_0 \omega}{\eta} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \varepsilon_0 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.35)$$

Această curbă este prezentată în [Figura 2.24, b](#), defazajul dintre tensiune și deformația specifică fiind în acest caz  $\pi/2$  (putem spune că deformația este în afara fazei).

c) **Comportarea vâsco-elastică**, intermediar între solid și lichid sconstă într-o diferență de fază  $\delta$  între tensiunea aplicată și deformația specifică. Deformația la momentul  $t$  este dată de relația:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (2.36)$$

Utilizând relațiile trigonometrice cunoscute, se obține relația (2.37):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [\sin \omega t \cos \delta + \sin \delta \cos \omega t]. \quad (2.37)$$

Această relație corespunde **Figura 2.24, c**. Deformația corespunzătoare unui material vâsco-elastic (polimer) poate fi separată în deformații în fază și în afara fazei, cele două componente fiind date de relațiile:

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 \sin \delta \quad (2.38)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_0 \cos \delta \quad (2.39)$$

Vectorul sumă al celor două componente este deformația complexă:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (2.40)$$

Acești termeni sunt cel mai des notați cu  $E$  ( $E^* = E' + iE''$ ). Cele două componente  $E'$  și  $E''$  mai sunt numiți și modulul de conservare ( $E'$ ), respectiv modulul de pierdere ( $E''$ ). Raportul dintre modulul de pierdere și modulul de conservare reprezintă tangenta unghiului de defazaj  $\delta$ :

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (2.41)$$

Acest raport se mai numește și amortizare și este un indicator privind capacitatea materialului de a absorbi energia. El depinde de material, de temperatură și de frecvența de solicitare. Mărimile determinate prin metoda dinamică nu reprezintă același lucru cu modulele de elasticitate determinate prin metoda de solicitare statică [102].

Un factor important în studiul comportării vâsco-elastice a lemnului este *temperatura*. Ca urmare, analiza mecanică în regim dinamic oferă posibilitatea analizării comportării materialelor în funcție de tranzițiile ce au loc în material, ca efect al temperaturii asupra lanțurilor polimerice.

Valoarea modulului de conservare ( $E'$ ) variază cu temperatura, în general, remarcându-se șase zone, fiecărei zone fiindu-i asociate mișcări la un anumit nivel molecular (în concordanță cu dinamica moleculară) (**Figura 2.25**). Astfel, prima etapă (zona 1, din **Figura 2.25**) este caracterizată prin mișcările atomilor, valabile într-un anumit interval de temperatură. Când se atinge temperatura  $T_\gamma$ , se ajunge într-o nouă etapă (zona 2) când se produc mișcări ale legăturilor interatomice manifestate prin deformații de întindere. O dată cu atingerea temperaturii  $T_\beta$ , încep să se producă mișcări ale grupărilor laterale, trecerea de la zona 3 la zona 4 se face la o temperatură numită temperatura de tranziție  $T_g$  (*engl.* glass transition). În etapa 4 (zona 4) se înregistrează mișcări ale unor zone mici din catena principală. Polimerii cristalini nu prezintă  $T_g$ , zonele 4 și 5 lipsesc, ei topindu-se direct. Pentru polimerii amorfi, modificările structurale continuă cu zona 5,

când apar mișcări ale unor zone mai mari din catena principală fiind considerată o zonă de platou elastic; zonele de catenă care se mișcă sunt situate între punctele de reticulare (pentru polimeri termorigizi), respectiv punctele de aglomerare (pentru polimerii termoplastici). În final, în etapa 6, apar mișcări ale catenei macromoleculare în ansamblu, manifestate prin alunecări ale macromoleculor unele față de altele. Apare curgerea. Trecerea de la zona 5 la zona 6 se face la temperatura de topire  $T_t$ . Polimerii termorigizi nu au această zonă, ei nu se topesc. Din acest punct de vedere, lemnul este un polimer amorf, termorigid.

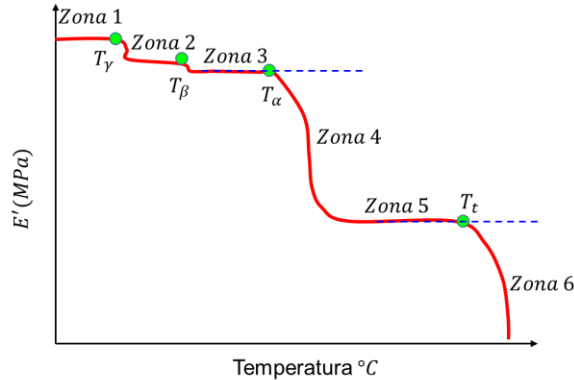


Figura 2.25. Variația modulului de conservare  $E'$  cu temperatura (preluată după [102])

Este important de notat că tranzițiile beta ( $\beta$ ) și gamma ( $\gamma$ ) sunt prea fine pentru a putea fi determinate cu ajutorul DSC (Differential Scanning Calorimetry) sau TMA (Thermomechanical Analysis). Temperatura de tranziție se poate observa pe *curba modulului de conservare  $E'$*  ca o scădere bruscă a acestuia, la o reprezentare  $\log(E') = f(T)$ , sau pe *curba amortizării  $\tan\delta$*  ca un vârf. Pentru determinarea temperaturii de tranziție sticloasă ( $T_g$ ) se utilizează mai multe variante (Figura 2.26): temperatura de debut (onset) a scăderii modulului  $E'$ ; temperatura de debut (onset) apariției vârfului pe *curba  $\tan\delta$* ; temperatura corespunzătoare maximului vârfului *curbei  $\tan\delta$* ; temperatura corespunzătoare maximului vârfului *curbei  $\log(E'')$* .

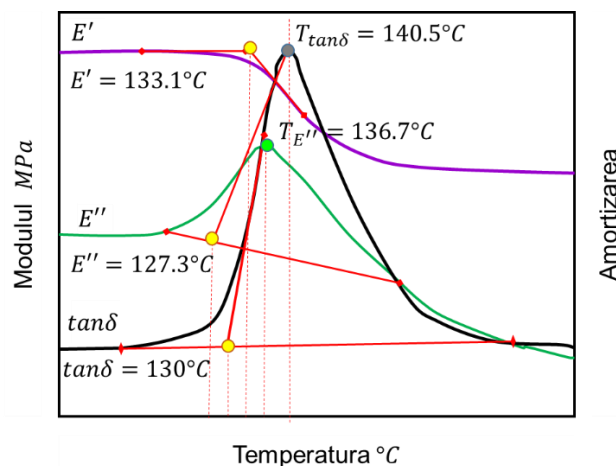


Figura 2.26. Modalitatea de determinare a temperaturii de tranziție  $T_g$  (adaptată după [102])

Pentru a fi siguri că ceea ce se determină este temperatura de tranziție  $T_g$ , este necesar să se efectueze o determinare la mai multe frecvențe ("multi-frequency scan") și să se calculeze energia de activare a tranziției. Energia de activare pentru o tranziție  $\alpha$  ce are loc la temperatura  $T_g$  este de aproximativ 300-400 kJ/mol, în timp ce pentru o tranziție  $\beta$  energia de activare este de 30-50 kJ/mol. La temperatura de topire  $T_i$ , dependența de frecvență scade brusc.

Temperatura de tranziție oferă detalii legate de cât de ușor se pot mișca lanțurile de molecule din interiorul polimerului. Cu cât aceste molecule se mișcă mai ușor, cu atât este nevoie de o temperatură mai mică ( $T_g$  mic) pentru ca polimerul să treacă din domeniul rigid în cel vâscos. Determinarea temperaturii de tranziție duce la determinarea intervalului de temperatură în care polimerul poate fi utilizat. Lemnul este un polimer natural, fapt pentru care investigarea comportării dinamice în condiții de variere a temperaturii sub limita inflamabilității, constituie o provocare și un domeniu mai puțin cercetat.

### 2.3.2 Tipuri de materiale studiate

În cadrul analizei mecanice în regim dinamic s-a investigat comportarea vâscoelastică a speciilor lemnoase care au făcut obiectul de studiu al prezentei lucrări și anume: lemn de molid de rezonanță, lemn de paltin de rezonanță; lemn de salcâm. Probele au fost debitate având forma geometrică prezentată în Figura 2.27, cu lungimea  $L = 50\text{mm} \pm 0.5$ ; lățimea  $b = 10\text{mm} \pm 0.3$ ; grosimea  $h = 4.8\text{mm} \pm 0.5$  și distanța dintre reazeme conform dimensiunii calibrate a dispozitivului mașinii,  $l = 40\text{mm}$ . Epruvetele testate fac parte din categoria lemnului de rezonanță, fiind investigate pentru lemnul de molid, clasele extreme A și D, iar pentru paltin, toate clase de calitate anatomică. Forța este aplicată perpendicular pe axa longitudinală a probelor (notată  $L$  sau  $x$ ) producând un moment de încovoiere radial sau semiradial (notat cu  $M_{iR}$  și  $M_{iSR}$ ) așa cum este reprezentat în Figura 2.27 b, c.

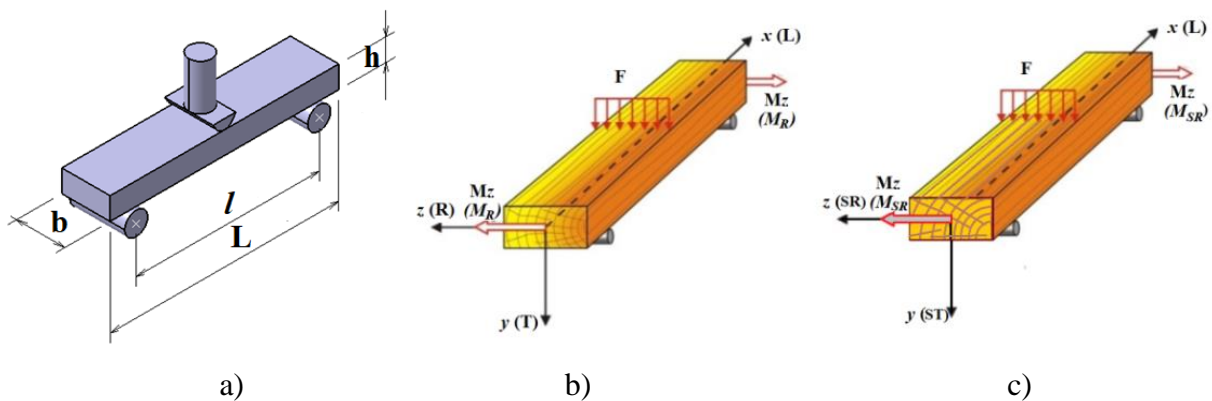
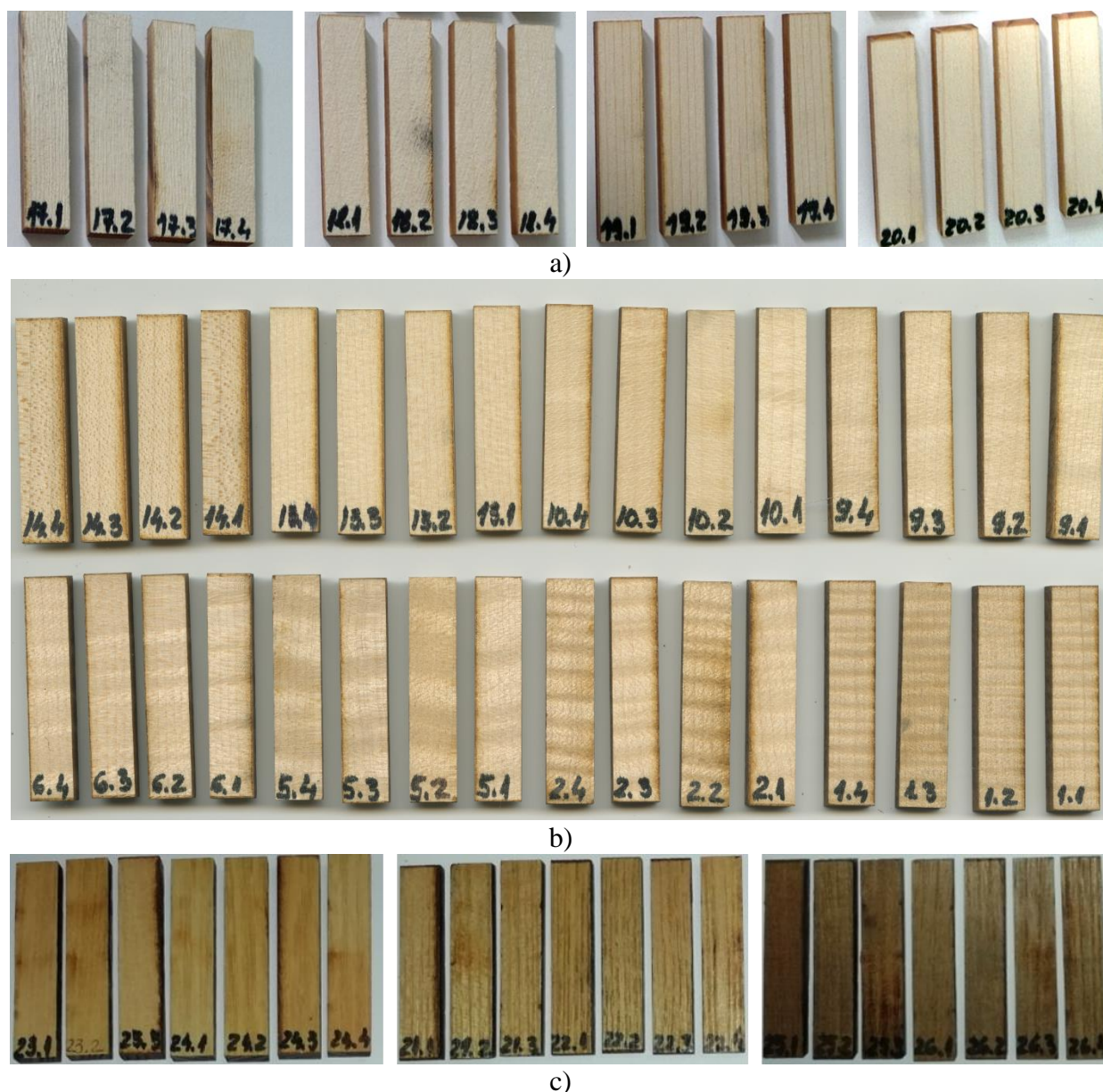


Figura 2.27. Geometria probelor testate în regim dinamic: a) geometria probei pentru DMA; b) orientarea radială a direcției fibrei lemnului; c) orientarea semiradială

Tipurile de probe din lemn studiate sunt prezentate în [Figura 2.28](#), iar în [Tabelul 2.11](#) sunt centralizate caracteristicile fizice ale probelor din lemn testate la DMA.



**Figura 2.28.** Probele studiate prin metoda analizei mecanice în regim dinamic (DMA): a) probele din lemn de molid; b) probele din lemn de paltin debitate radial; c) probele din lemn de salcâm

**Tabelul 2.11.** Caracteristicile fizice ale probelor pentru testarea DMA

Codificarea probelor	Nr. de probe	Valori medii		Caracteristici
		Conținut de umiditate MC %	Densitatea $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	
MOR(A)	17.1 - 17.4	4	7%±1.5	radial, clasa de calitate A, fibră deasă,
MOSR(A)	19.1-19.4	4	7.2%±1.5	semiradial, clasa de calitate A, fibră deasă
MOR(D)	18.1 - 18.4	4	7%±1.2	radial, clasa de calitate D, fibră deasă,
MOSR(D)	20.1 - 20.4	4	7.3%±1%	semiradial, clasa de calitate D, fibră deasă



*Tabelul 2.11. Caracteristicile fizice ale probelor pentru testarea DMA (continuare)*

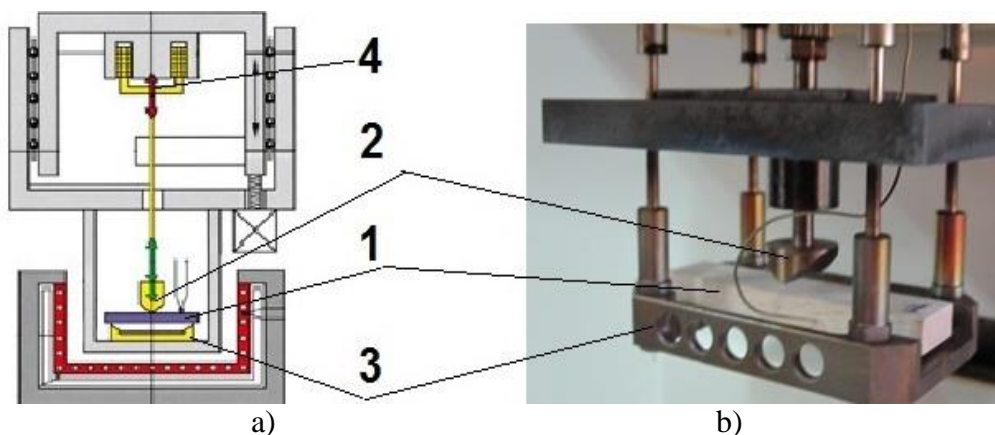
Codificarea probelor	Nr. de probe	Valori medii		Caracteristici		
		Umiditate MC %	Densitatea $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )			
Paltin	Pa <sub>R</sub> (AI)	1.1-1.4	4	7%±1.5%	0.610	radial, clasa de calitate A, fibră foarte deasă,
	Pa <sub>R</sub> (AII)	2.1-2.4	4	7.2%±1.5%	0.600	radial, clasa de calitate A, fibră rară
	Pa <sub>SR</sub> (AI)	3.1-3.4	4	7%±1.2%	0.616	semiradial, clasa de calitate A, fibră foarte deasă
	Pa <sub>SR</sub> (AII)	4.1-4.4	4	7.3%±1%	0.620	semiradial, clasa de calitate A, fibră rară
	Pa <sub>R</sub> (BI)	5.1-5.4	4	7%±1.5%	0.591	radial, clasa de calitate B, fibră foarte deasă,
	Pa <sub>R</sub> (BII)	6.1-6.4	4	7.2%±1.5%	0.581	radial, clasa de calitate B, fibră rară
	Pa <sub>SR</sub> (BI)	7.1-7.4	4	7%±1.2%	0.612	semiradial, clasa de calitate B, fibră foarte deasă
	Pa <sub>SR</sub> (BII)	8.1-8.4	4	7.3%±1	0.615	semiradial, clasa de calitate B, fibră rară
	Pa <sub>R</sub> (CI)	9.1-9.4	4	7%±1.5	0.590	radial, clasa de calitate C, fibră foarte deasă,
	Pa <sub>R</sub> (CII)	10.1-10.4	4	7.2%±1.5	0.600	radial, clasa de calitate C, fibră rară
	Pa <sub>SR</sub> (CI)	11.1-11.4	4	7%±1.2	0.616	semiradial, clasa de calitate C, fibră foarte deasă
	Pa <sub>SR</sub> (CII)	12.1-12.4	4	7.3%±1	0.620	semiradial, clasa de calitate C, fibră rară
	Pa <sub>R</sub> (DI)	13.1-13.4	4	7%±1.5	0.630	radial, clasa de calitate D, fibră foarte deasă,
	Pa <sub>R</sub> (DII)	14.1-14.4	4	7.2%±1.5	0.624	radial, clasa de calitate D, fibră rară
	Pa <sub>SR</sub> (DI)	15.1-15.4	4	7%±1.2	0.628	semiradial, clasa de calitate D, fibră foarte deasă
	Pa <sub>SR</sub> (DII)	16.1-16.4	4	7.3%±1	0.615	semiradial, clasa de calitate D, fibră rară
Salcâm	S <sub>R</sub> T <sub>0</sub>	23.1-23.4	4	7%±1.2	0.640	radial, netratat
	S <sub>SR</sub> T <sub>0</sub>	24.1-24.4	4	7%±1.3	0.716	semiradial, netratat
	S <sub>R</sub> T <sub>1</sub>	21.1-21.4	4	7.5%±1.4	0.735	radial, tratat cu tratamentul T1 (5% concentrația de amoniac)
	S <sub>SR</sub> T <sub>1</sub>	22.1-22.4	4	8%±1.3	0.704	semiradial, tratat cu tratamentul T1 (5% concentrația de amoniac)
	S <sub>R</sub> T <sub>2</sub>	25.1-25.4	4	8.2%±1.5	0.794	radial, tratat cu tratamentul T2 (10% concentrația de amoniac)
	S <sub>SR</sub> T <sub>2</sub>	26.1-26.4	4	8.1%±1.5	0.803	semiradial, tratat cu tratamentul T2 (10% concentrația de amoniac)

### 2.3.3 Metoda de testare

Analiza mecanică în regim dinamic a fost realizată cu ajutorul analizorului mecanic dinamic Netzsch DMA 242 C (Figura 2.29) din Laboratorul de teste nedistructive al Institutului Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Fizică Tehnică din Iași, coordonat de doamna fiz. Dr. Savin Adriana și profesorul Grimberg Raimond (2009 – 2013). Acest analizor permite determinarea proprietăților vâsco-elastice ca o funcție de timp, temperatură și frecvență de solicitare (forță statică sau oscilatorie), la solicitarea de încovoiere în trei puncte. Proba este supusă unei oscilații forțate definite în softul mașinii de testare: o forță sinusoidală (semnal de intrare) aplicată printr-o tijă de împingere, duce la o deformare a probei (semnal de ieșire). Aceasta produce

deasemenea o oscilație sinusoidală, dar defazată, care este apoi înregistrată cu ajutorul unui traductor de deplasare (senzorul electronic LVDT – Linear Variable Differential Transformer). Aceste oscilații sunt reduse la un semnal de nivel de zgomot extrem de redus în controlerul DMA prin analiza Fourier. Un recipient din oțel inoxidabil, facilitează măsurători în diverse medii (teste de imersiune sau temperatură variabilă). Prin utilizarea unui termocuplu, este de asemenea posibilă efectuarea testelor la temperaturi mai ridicate. Schema de funcționare a analizorului mecanic dinamic este prezentată în [Figura 2.29](#). În [Tabelul 2.12](#) sunt prezentate principalele caracteristici tehnice ale analizorului mecanic dinamic *Netzsch DMA242C*. Informațiile privind caracteristicile tehnice și modul de funcționare ale analizorului mecanic *Netzsch DMA 242C*, au fost preluate din broșura de prezentare a aparatului:

([http://www.sartorom.ro/sites/default/files/produse/documente/78682\\_Brochure\\_DMA%20242-E.pdf](http://www.sartorom.ro/sites/default/files/produse/documente/78682_Brochure_DMA%20242-E.pdf)).



**Figura 2.29.** Principiul de testare și componentele principale ale echipamentului *DMA 242C Netzsch*: a) schema de principiu; b) imagine cu proba din lemn amplasată în dispozitivul mașinii de testare. (Legenda: 1 – proba, 2 – dispozitivul de aplicare a forței, 3 – reazemele de poziționare a probei; 4 – sistemul de aplicare ciclică a forței și de măsurare a răspunsului probei).

**Tabelul 2.12.** Caracteristici tehnice ale analizorului mecanic dinamic *Netzsch DMA 242C*

Caracteristici	Intervale de valori
Interval de temperatură	-30 la 600 °C
Viteza de încălzire	0.01 la 20 K/min
Intervalul de frecvență	0.01 la 100 Hz
Interval de forță	24 N (12 N static și 12 N dinamic)
Interval de forță de înaltă rezoluție	8 N (4 N static și 4 N dinamic)
Amplitudinea deformației	0.1 la 240 μm
Deformare statică	până la 20 mm
Intervalul modulului dinamic	10 <sup>-3</sup> la 10 <sup>6</sup> MPa
Intervalul factorului de amortizare	0.005 la 100
Dimensiuni maxime admise	60 x 12 x 6 mm

a) O parte din probe au fost testate în condiții izoterme (temperatura  $T$  a fost menținută constantă la 30°C pe durata încercărilor, datorită mediului controlat din etuva aparatului de testare),



aplicându-se o forță oscilantă pulsatorie cu intensitatea de 6 N, cu diferite frecvențe de solicitare, aplicate succesiv ( $f=1\text{ Hz}$ ;  $3.3\text{ Hz}$ ;  $5\text{ Hz}$ ;  $10\text{ Hz}$ ;  $50\text{ Hz}$ ).

b) Un alt set de probe au fost testate în condiții dinamice de temperatură, aceasta variind între  $30 \div 120\text{ }^\circ\text{C}$  timp de 45 de minute, aplicându-se o forță oscilantă pulsatorie cu intensitatea de 6 N, cu frecvența de 1 Hz. Interval de temperatură utilizat în teste s-a stabilit pe baza studiilor din literatura de specialitate care au evidențiat faptul că fenomenul de curgere (fluaj) a lemnului umed se înregistrează într-un interval de temperatură  $50^\circ\text{C}–100^\circ\text{C}$ , fenomen care este strâns legat de modificările de tranziție chimică a ligninei. Hemicelulozele și celuloza amorfă din lemnul umed au temperaturi de înmuiere mai scăzute decât cele ale ligninelor [144; 146; 148; 155]. Mai mult, această proprietate depinde de speciile de lemnoase.

Ca rezultate, softul mașinii a returnat următoarele mărimi:

- *modulul de conservare* ( $E'$ );
- *modulul de pierdere* ( $E''$ );
- *modulul complex* ( $E^*$ );
- *amortizarea*  $\tan\delta$  calculată ca raportul dintre modulul de pierdere și modulul de conservare.

### 2.3.4 Determinarea răspunsului vâsco-elastic al probelor din lemn în condiții izoterme

#### *Caracteristicile vâsco-elastice ale lemnului de molid de rezonanță*

În urma prelucrării rezultatelor înregistrate în timp prin analiza mecanică în regim dinamic, au rezultat modulul dinamic complex  $E^*$ , modulul de conservare și modulul vâscos, precum și factorul de amortizare. Aceste rezultate sunt prezentate comparativ pentru structurile radiale cu fibră deasă și fibră rară (Figura 2.30, a), respectiv pentru epruvetele debitate semiradial, cu fibră deasă sau rară (Figura 2.30, b).

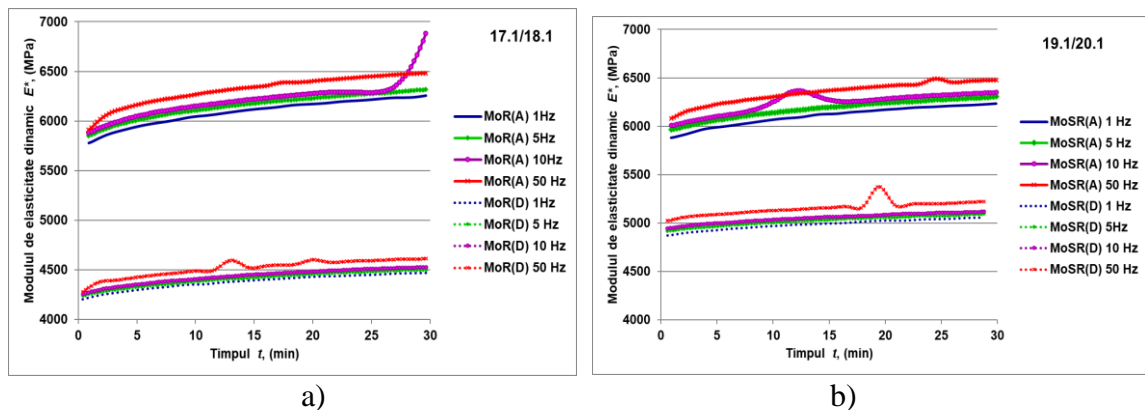


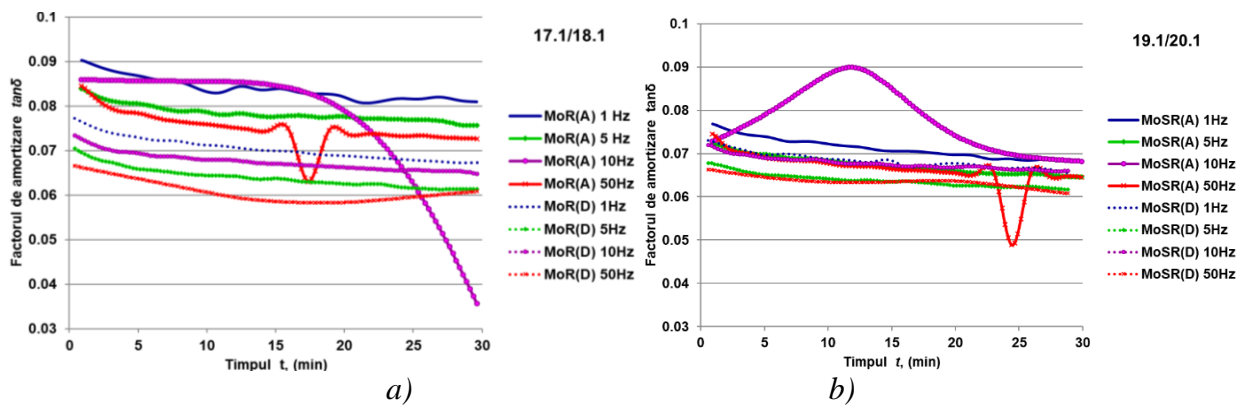
Figura 2.30. Variația modulului dinamic complex în timp: a) probe din lemn de molid debitate radial, clasele A și D; b) probe din lemn de molid debitate semiradial, clasele A și D

Între cele două categorii de clase de calitate structurală A și D, se observă diferențe notabile ale valorii modulului dinamic complex care este cu 37% mai mare în cazul lemnului din clasa A debitat radial, comparativ cu cel de clasă anatomică inferioară (clasa D). Acest fenomen se explică prin densitatea mai mare a lemnului târziu în structura cu fibră deasă. Valoarea mai ridicată a modulului de elasticitate este favorabilă fenomenelor acustice, ducând și la o viteză de propagare a sunetului în lemn mai mare. Din punct de vedere reologic, cu creșterea timpului de expunere la solicitari periodice, modulul dinamic tinde să crească cu o viteză de aproximativ 0.41MPa/s. De asemenea, valoarea modulului de elasticitate crește cu creșterea frecvenței de solicitare, la o creștere a frecvenței de solicitare cu 98% (de la 1 Hz la 50 Hz), modulul crește cu 3.8%. Pentru probele debitate pe direcție semiradială, diferența între clasele A și D este mai redusă, cu aproximativ 20%. De asemenea, la clasa de calitate superioară, A, diferența între tăierea radială și cea semiradială este nesemnificativă, valorile modulului dinamic complex situându-se între 5800 – 6500 MPa pe toată durata solicitării. Mai pronunțată este diferența între modul de tăiere radială/semiradială cu creșterea lățimii inelelor anuale (clasa D), unde pe direcție semiradială, modulul dinamic este cu aproximativ 16% mai mare decât pe direcție radială. Indiferent de tipul secțiunii (radial sau semiradial), modulul dinamic tinde să crească cu creșterea duratei de expunere la solicitări dinamice: la o expunere de 30 minute, modulul a crescut cu 8%, indiferent de frecvența de solicitare. De asemenea se observă că diferența dintre modulul dinamic al epruvetelor debitate radial și a celor debitate semiradial care se înregistrează la începutul testelor, se diminuează considerabil, epruvetele tinzând să aibă același modul dinamic după numai 30 minute de expunere. *Din punct de vedere aplicativ, această comportare corelată cu ceilalți factori (amortizarea, stabilitatea dimensională, deformații remanente) poate fi valorificată prin utilizarea semifabricatelor debitate semiradial pentru obținerea unor performanțe similare cu sortimentele debitate radial.* În cazul amortizării, se observă că valorile acesteia diferă în funcție de secțiunea epruvetei: frecările interne sunt mai mari în cazul epruvetelor radiale decât cele semiradiale, iar fibra deasă, datorită conținutului mai mare de lignină și celuloză prezintă un factor de amortizare mai ridicat decât lemnul cu fibră rară (clasa D), unde frecările interne sunt mai reduse ([Figura 2.31](#)). Ca tendință generală, se constată că amortizarea tanδ se diminuează cu creșterea duratei de solicitare dinamică, respectiv, frecările interne se reduc cu cât epruvetele sunt expuse mai mult la solicitări variabile continue [Tabelul 2.13](#). Acest aspect prezintă aplicații practice atât pentru fabricanții de instrumente muzicale cât și pentru interpreți în sensul că un instrument își potențează valoarea acustică cu cât este mai mult "solicitat" (utilizat). Epruvetele din lemn de molid debitate radial cu fibră deasă (clasa A) răspund prin fenomenul de rezonanță la frecvența de 10 Hz și 50 Hz, când factorul de amortizare scade brusc cu aproximativ 64% pentru frecvența de 10 Hz, și cu aproximativ 16% la frecvența de 50 Hz. În mod similar se comportă și epruvetele debitate

semiradial, cu mențiunea că între structura cu fibră deasă (A) și cea cu fibră rară (D), decalajul frecărilor interne este mai mic de 4 ori decât pentru epruvetele debitate radial.

*Tabelul 2.13. Valorile medii ale variabilelor determinate în regim dinamic (DMA) pentru diferite frecvențe de solicitare*

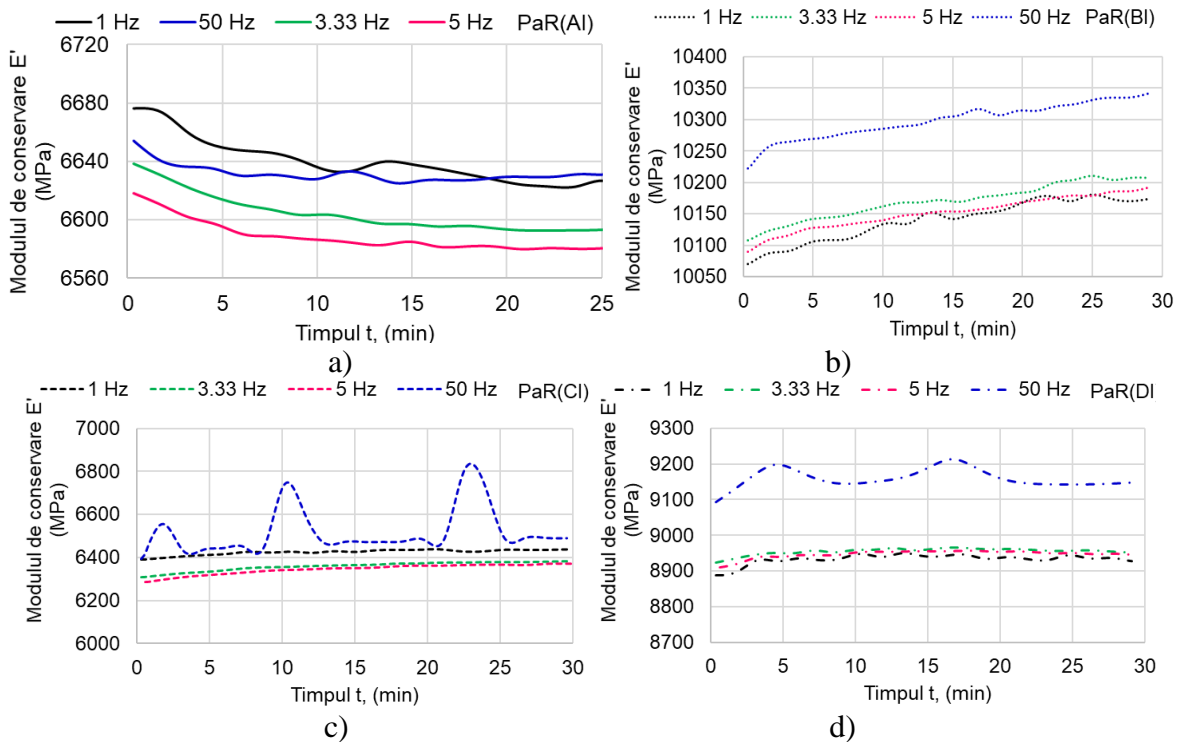
Variabile DMA	Frecvența de solicitare (Hz)	MoR(A)		MoSR(A)		MoR(D)		MoSR(D)	
		t=0	t=30 min	t=0	t=30 min	t=0	t=30 min	t=0	t=30 min
E'	1	5900	6316	5494	5829	4483	4737	4940	5180
	5	5978	6375	5570	5900	4534	4757	4993	5220
	10	6010	6686	5599	5928	4552	4793	5015	5243
	50	6060	6549	5659	6052	4590	4933	5085	5351
E''	1	498	481	402	378	339	316	342	326
	5	471	455	382	368	315	282	326	312
	10	498	472	411	393	311	271	350	336
	50	481	450	406	374	316	236	340	298
tanδ	1	0.085	0.076	0.073	0.065	0.076	0.067	0.069	0.063
	5	0.079	0.071	0.068	0.075	0.069	0.066	0.065	0.060
	10	0.082	0.054	0.071	0.065	0.073	0.066	0.069	0.064
	50	0.079	0.069	0.072	0.062	0.068	0.049	0.064	0.056



*Figura 2.31. Variația factorului de amortizare: a) lemn de molid debitat radial, clasele A și D; b) lemn de molid debitat semiradial, clasele A și D*

### **Caracteristicile vâsco-elastice ale lemnul de paltin de rezonanță**

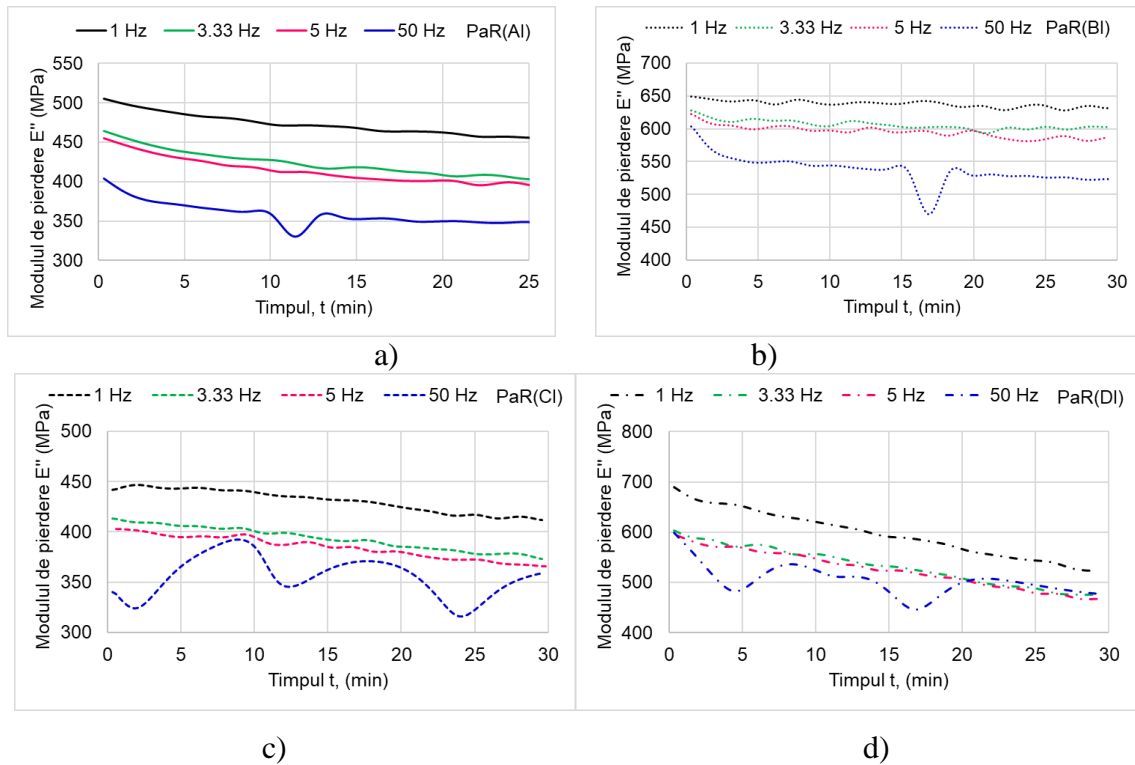
În Figura 2.32, se poate observa comportarea vâsco-elastică a probelor din lemn de paltin, în timp. Pentru probele cu fibră ondulantă, moderat ondulantă și dreaptă, modulul de conservare tinde să crească cu creșterea duratei de solicitare, cu aproximativ 1.5% în 30 minute de solicitare. Contrar acestei tendințe, probele din lemn de paltin cu fibra foarte crețată (clasa A), înregistrează o ușoară tendință de descreștere a capacității de conservare a energiei de deformație (cu aproximativ 1% în cele 30 minute de solicitare ciclică).



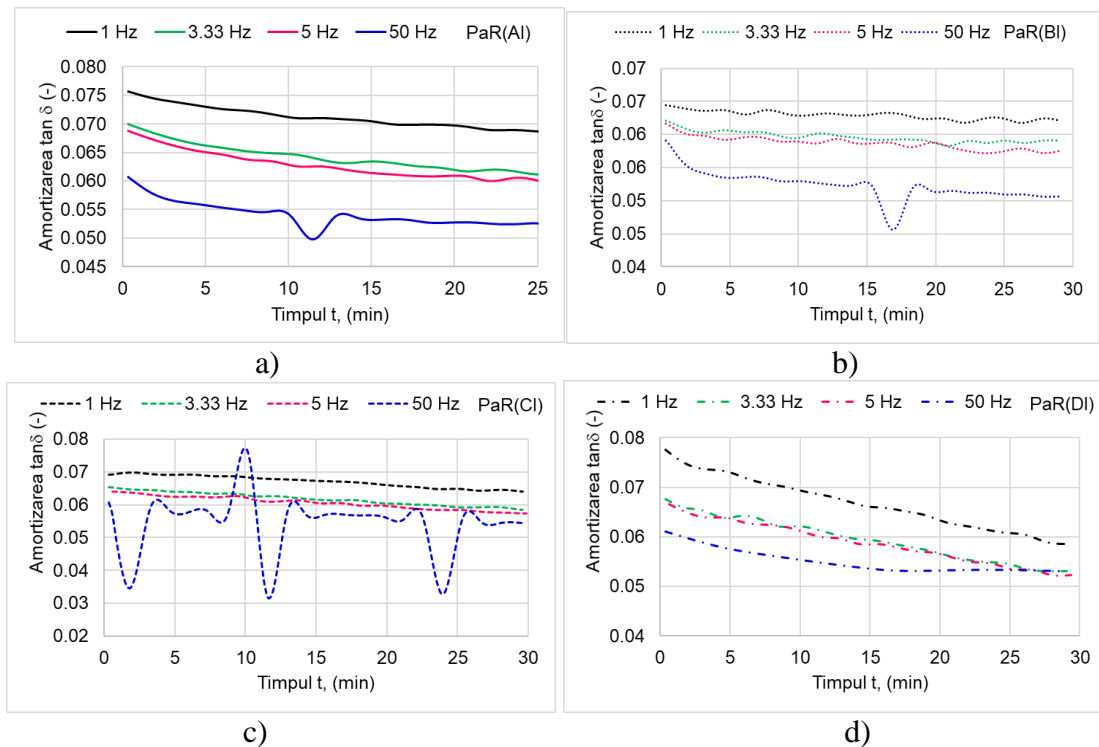
**Figura 2.32.** Variația în timp a modulului de conservare  $E'$ : a) lemn de paltin cu fibră foarte creată și deasă; b) lemn de paltin cu fibră creată și deasă; c) lemn de paltin cu fibră ondulată și deasă; d) lemn de paltin cu fibră dreaptă și deasă

Din punct de vedere al frecvenței de solicitare, se constată că cele patru tipuri de probe din clase diferite răspund diferite la frecvențele de solicitare. Astfel, cele mai mari valori ale modulului de conservare se înregistrează pentru probele PaR(AI) la frecvența de 1Hz iar pentru probele PaR(BI), PaR(CI) și PaR(DI) la frecvența de 50Hz. Probele din clasa B înregistrează cea mai mare valoare a modulului de conservare (între  $10050 \div 10300$  MPa), iar cea mai redusă valoarea, în cazul probelor din clasa C. Valorile modulului de pierdere  $E''$  scad cu creșterea frecvenței de solicitare, deci cu cât crește frecvența de solicitare, scade capacitatea de disipare a energiei de deformație, astfel încât, pentru utilizarea lemnului de paltin în construcția viorilor, acest comportament este favorabil răspunsului dinamic la frecvențele înalte corzi. În timp, modulul de pierdere se diminuează: pentru probele PaR(AI) și PaR(CI),  $E''$  scade cu aproximativ 11% după 30 minute de solicitare; pentru probele PaR(BI),  $E''$  scade cu aproximativ 3%; iar pentru probele PaR(DI), modulul vâscos scade cu aproximativ 28.5%, după 30 minute de solicitare (Figura 2.33). Din punct de vedere muzical, este important ca proprietățile lemnului să rămână relativ constante în timp pentru a nu altera sunetele muzicale. Astfel, probele din clasa B prezintă cel mai bun comportament. Întrucât amortizarea reprezintă raportul dintre răspunsul probei și sarcina aplicată, respectiv raportul dintre modulul de pierdere și modulul de conservare, variația acestei mărimi este direct dependentă de variația modulului de pierdere, ceea ce se poate observa și prin analiza comparativă din Figura 2.34. De remarcat faptul că pentru probele PaR(AI), PaR(BI) și PaR(CI),

la frecvența de 50 Hz, se înregistrează scăderi bruște ale valorilor amortizărilor  $\tan\delta$ , ceea ce denotă modificări ale răspunsului probei în timp, la frecvența de sollicitare respectivă.

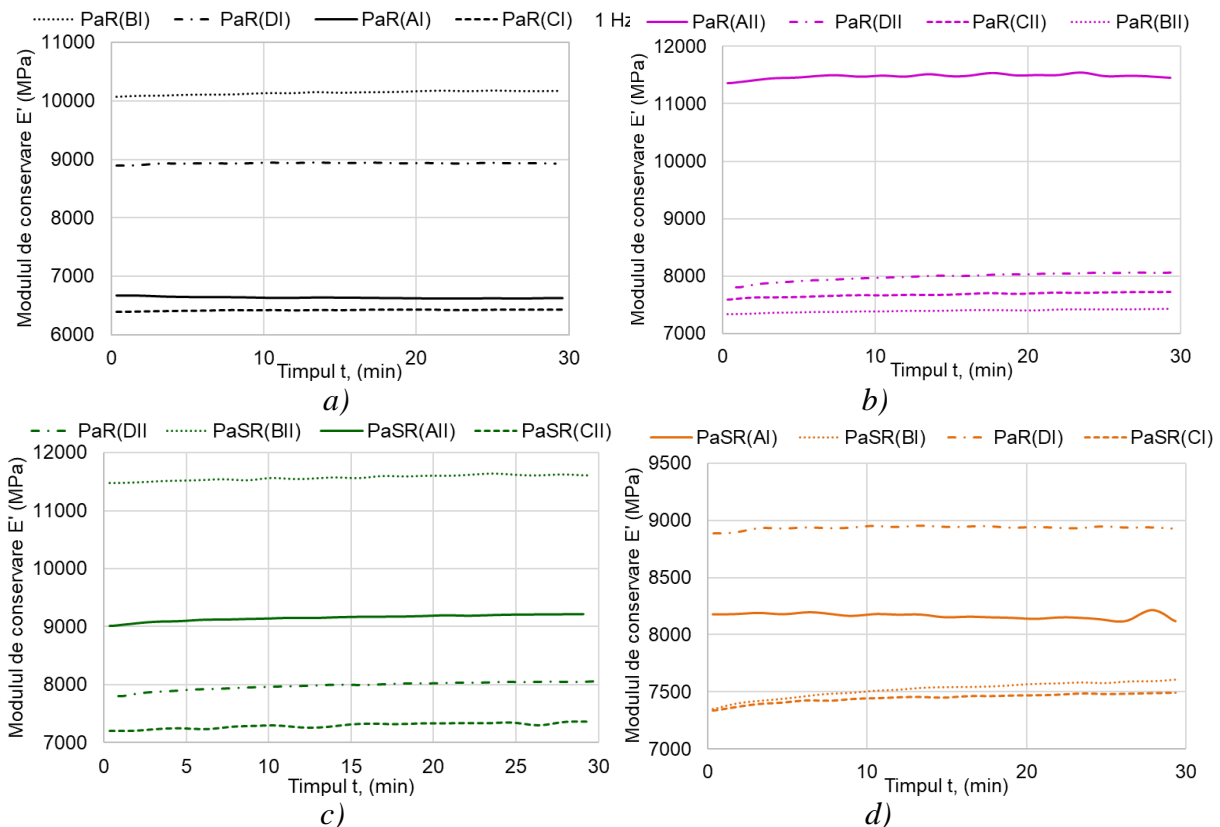


**Figura 2.33.** Variația modului de pierdere  $E''$  în timp: a) lemn de paltin cu fibră foarte creață și deasă; b) lemn de paltin cu fibră creață și deasă; c) lemn de paltin cu fibră ondulată și deasă; d) lemn de paltin fibră dreaptă și deasă



**Figura 2.34.** Variația amortizării  $\tan\delta$  cu creșterea frecvenței de sollicitare la lemnul de paltin cu: a) fibră foarte creață și deasă; b) fibră creață și deasă; c) fibră ondulată și deasă; d) fibră dreaptă și deasă

Din punct de vedere al valorilor modului de conservare ce caracterizează comportarea elastică a materialului, în **Figura 2.35** sunt prezentate comparativ, valorile pentru diferitele categorii de probe. Astfel, cea mai mare valoare a modului de conservare  $E'$  pentru probele debitate radial, cu fibra deasă, se înregistrează pentru cele din clasa B, cu valoarea de aproximativ 10000 MPa, urmată de probele din clasa D (aprox. 9000 MPa) iar probele din clasele A și C prezintă valori apropiate (aprox. 6500 MPa) (**Figura 2.35, a**). În cazul probelor debitate radial, cu fibră rară, cea mai mare valoare o prezintă probele din clasa A (PaR(AII)), aproximativ 11400 MPa; celelalte clase având valori relativ apropiate (între 7400 și 8000 MPa) (**Figura 2.35, b**). În cazul probelor debitate semiradial cu fibră deasă, valoarea maximă a modului de conservare se înregistrează în jurul valorii de 11500 MPa, pentru probele din clasa B, iar valoarea minimă, pentru cele din clasa D (7200 MPa) (**Figura 2.35, c**). Comportamentul probelor este eterogen în funcție de direcția de debitare a probelor, de desimea fibrei și de gradul de ondulare a acesteia. De exemplu, probele din clasa A, debitate semiradial, cu fibra deasă prezintă o capacitate mai mare de conservare a energiei de deformare (cu aproximativ 9.8%) decât cele din aceeași clasă, dar cu fibră rară (**Figura 2.35, d**).

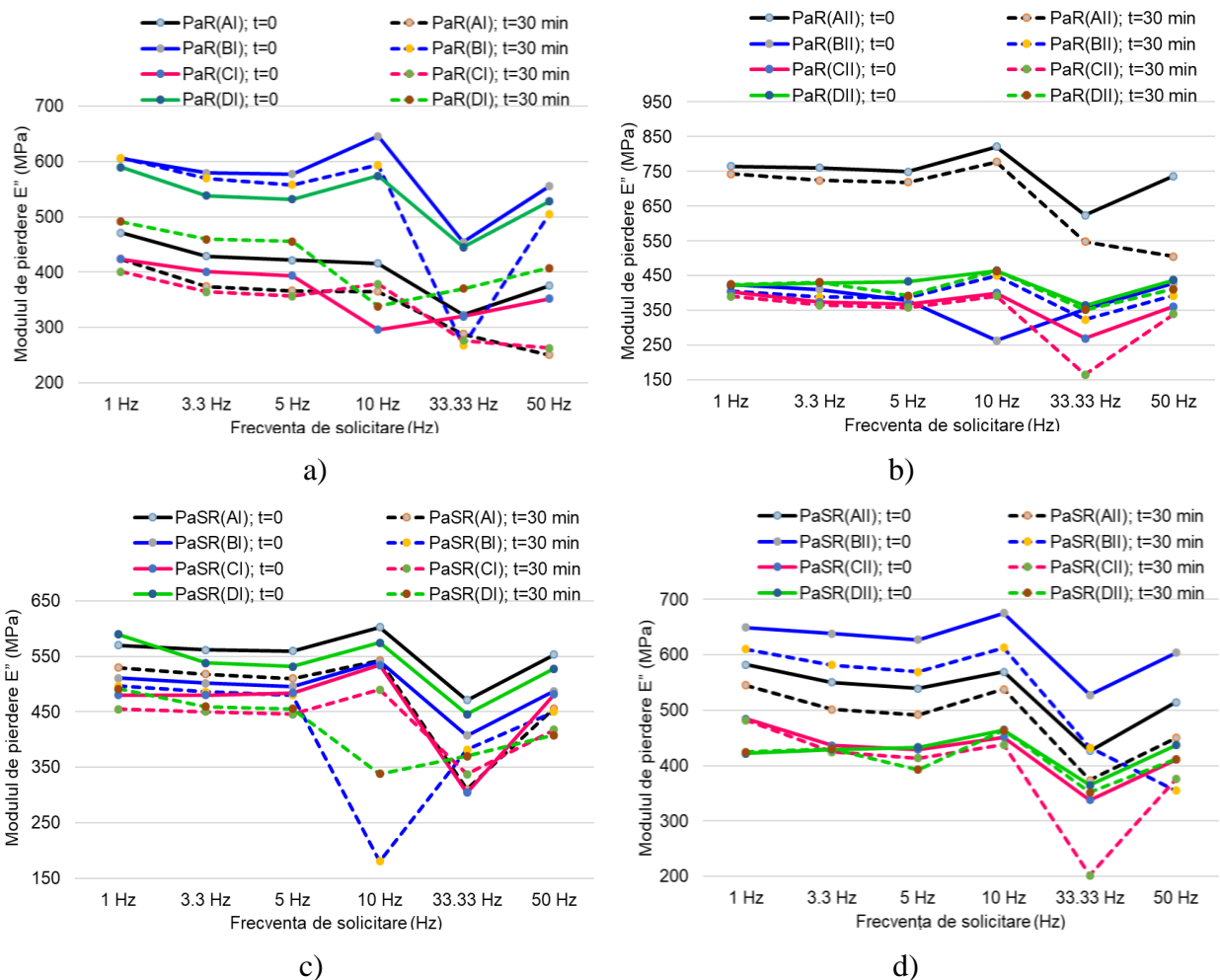


**Figura 2.35.** Comparații privind variația modului de conservare a probelor la frecvența de 1 Hz: a) probe debitate radial, cu fibra deasă; b) probe debitate radial cu fibra rară; c) probe debitate semiradial, cu fibra deasă; d) probe debitate semiradial cu fibra rară.

În **Figura 2.36** sunt prezentate variațiile valorilor modului de pierdere  $E''$  în funcție de frecvența de solicitare, la începutul (linia continuă) și la sfârșitul perioadei de solicitare ciclică (linia punctată). Între 1 și 5 Hz, variația este liniar descrescătoare pentru aproape toate probele. La



frecvențele de 10 Hz și 33.33 Hz, toate probele înregistrează deviații mari ale valorilor, fie crescător, fie descrescător, fenomen care se poate explica prin apariția unei rezonanțe a probelor cu frecvența de solicitare. Modificări bruște ale valorilor parametrilor vâsco-elastici sunt semnalate în lucrările [141; 171] unde valorile modulului dinamic pentru lemnul de paltin de rezonanță  $E'$  sunt de aproximativ 6800 MPa, iar al modulului de elasticitate static  $E$ , între 9400 – 10500 MPa. [28], raportează valori ale modulului dinamic longitudinal, cuprinse între 6700 – 13800 MPa, iar amortizarea în direcție longitudinală,  $\tan\delta_L$  cu valori de 0.01, iar pe direcție radială,  $\tan\delta_R$ , 0.02. [142] raportează pentru lemnul de paltin de rezonanță, valori ale modulului dinamic în direcție longitudinală pentru clasa A de calitate, de  $9707 \pm 1345$  MPa, iar pentru clasa B, valori de  $7315 \pm 1363$  MPa. Se poate aprecia că valorile determinate de autoarea tezei, se încadrează în valorile raportate în literatura de specialitate, rezultatele acestor cercetări fiind publicate în [146].



**Figura 2.36.** Variația modulului de pierdere  $E''$  în funcție de frecvența de solicitare: a) probele debitate radial, cu fibră deasă; b) probele debitate radial, cu fibră rară; c) probele debitate semiradial, cu fibră deasă; d) probele debitate semiradial, cu fibră rară



### *Caracteristicile vâsco-elastice ale lemnul de salcâm natural și tratat cu vapori de amoniac*

În construcția instrumentelor muzicale cu corzi ciupite, cum sunt chitarele, se utilizează, ca material de substituție a lemnului exotic pe cale de dispariție sau protejat (palisandru, abanos) pentru obținerea tastierei (grifului), lemn cu proprietăți ridicate la uzură și cu rezistențe mari la încovoiere, așa cum este lemnul de salcâm. În cadrul cercetărilor realizate pe durata proiectului PN-III-P2-2.1-BG 85/2016 Soluții integrative de creștere a performanței economice prin optimizarea proprietăților rigido-elastice și stabilității structurale a chitarelor de fabricație românească – SINOPTIC (2016-2018), au fost investigate proprietățile vâscoelastice ale lemnului de salcâm trata și netratat cu vapori de amoniac, tratamentul fiind aplicat pentru colorarea lemnului. Totodată au fost analizate și efectele tratamentului chimic asupra caracteristicilor vâsco-elastice ale lemnului de salcâm. Rezultatele acestor investigații au fost publicate în [155].

Astfel, în cazul lemnului de salcâm, s-a observat că modulul de conservare  $E'$  tinde să crească cu 6% – 7%, cu creșterea duratei de solicitare, iar prin creșterea frecvențelor (de la 1 la 50 Hz), acesta crește cu aproape 2.4% (Figura 2.37, a). Tratamentul probelor din lemn de salcâm tratat cu amoniac, duce la creșterea modulului de conservare: după primul tratament, creșterea este de 4.8% – 5% și după al doilea tratament, creșterea este de 50%, comparativ cu valorile probele martor (Figura 2.37, b și c).

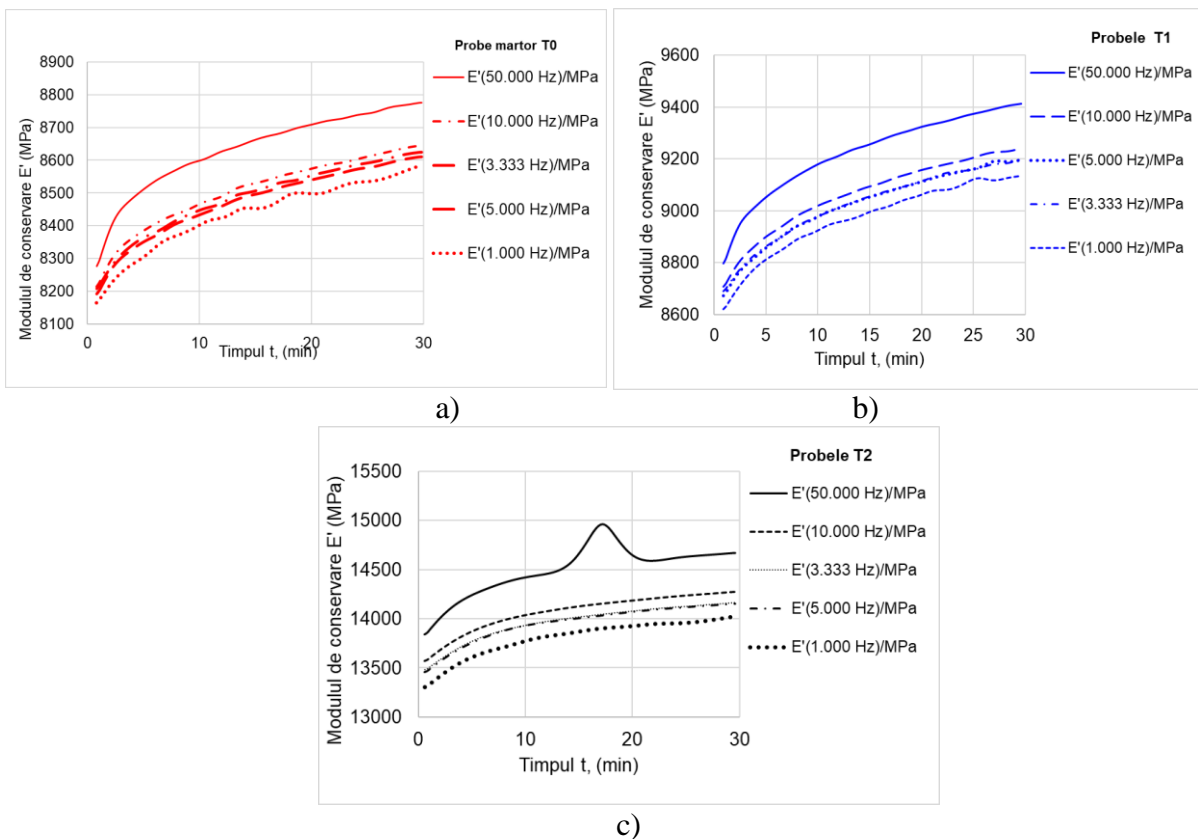
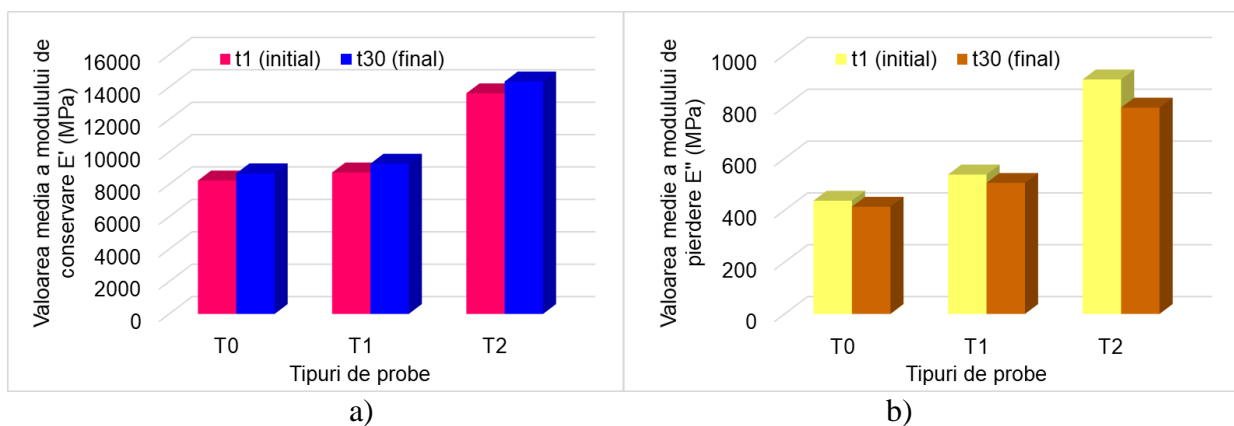


Figura 2.37. Variația modulului de conservare  $E'$  cu creșterea frecvenței de solicitare în cazul lemnului de salcâm: a) în cazul probelor de control  $S_{RT0}$ ; b) probele  $S_{RT1}$ ; c) sample  $S_{RT2}$ .

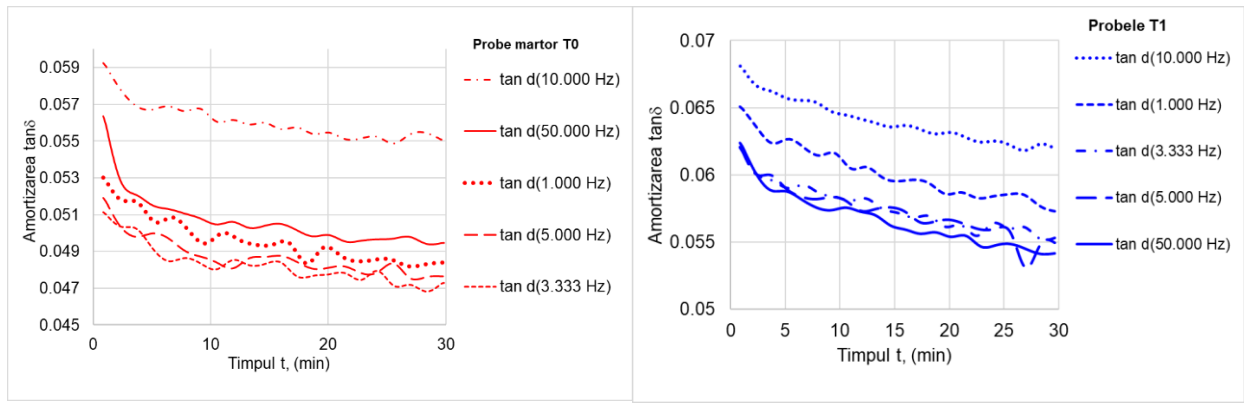
Acest fenomen se explică prin efectul evaporării amoniacului care duce la creșterea rigidității lemnului [131; 176]. Merită menționat faptul că probele din lemn de salcâm tratat cu amoniac au fost condiționate și uscate lajungând la un conținut de umiditate de aproximativ 6% - 8%, astfel, efectul de plastifiere a vaporilor de amoniac fiind eliminat. O îmbunătățire a proprietăților mecanice ale probelor tratate cu amoniac în cazul lemnului de fag a fost raportată de [161], care a observat diferențele dintre tratamentul cu amoniac gazos (lemn uscat) și amoniac cu apă (lemn umed).

Analizând comportarea vâsco-elastică a probelor din lemn de salcâm testate, s-a constatat că valorile modulului de conservare au variat între 8800 MPa pentru probele netratate, 9400 MPa pentru primul tratament al probelor din lemn de salcâm și 14000 MPa pentru al doilea tratament așa cum se poate observa în [Figura 2.38](#). Valori similare sunt raportate de alți autori [89; 107; 112; 176].



*Figura 2.38. Valorile modulului de conservare  $E'$  (a) și a modulului de pierdere  $E''$  (b), și începutul și la sfârșitul expunerii la solicitarea dinamică*

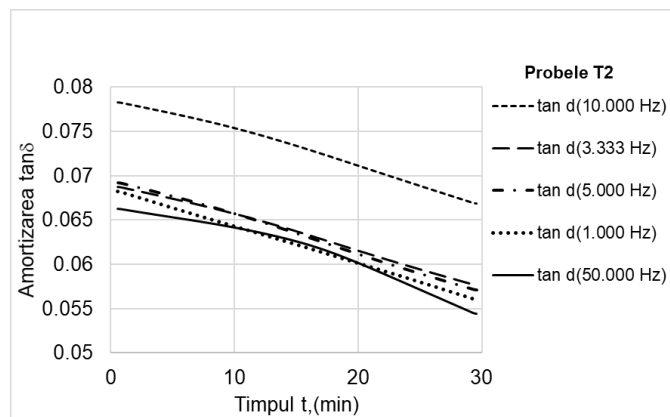
Raportul dintre  $E'$  și  $E''$  reprezintă amortizarea ( $\tan\delta$ ), care este un indicator sensibil al condițiilor mecanice sau termice în timpul producerii energiei mecanice, aceasta fiind dispersată sub formă de căldură datorită frecării interne din material. Amortizarea tinde să scadă prin creșterea timpului de solicitare, la o temperatură constantă de 30°C. Deoarece lemnul este un polimer natural și are o structură stratificată formată din lemn timpuriu și lemn târziu, amortizarea are loc treptat, în etape mai ales în cazul lemnului de salcâm care are o structură a inelelor anuale cu pori distribuiți inelar. Energia de deformație se disipează progresiv, golurile celulare ducând la amortizarea frecării interne a lemnului. Acest fenomen este observat în forma curbelor de variație a amortizării în [Figura 2.39](#). În cazul eșantioanelor tratate cu tratamentul 2 ([Figura 2.39, c](#)) se poate observa că panta curbei prezintă o variație liniară descrescătoare în timp, care poate fi influențată de modificarea chimică a lemnului prin formarea diferitelor grupări chimice.



a)

b)

Figura 2.39. Variația amortizării  $\tan \delta$  cu creșterea frecvenței și duratei de solicitare la probele din lemn de salcâm: a) netratate ; b) cu tratamentul 1; c) tratamentul 2.



c)

Figura 2.39. Variația amortizării  $\tan \delta$  cu creșterea frecvenței și duratei de solicitare la probele din lemn de salcâm: a) netratate ; b) cu tratamentul 1; c) tratamentul 2.

În analiza calității acustice a plăcilor din structura instrumentelor muzicale cu corzi intervin numeroși factori ce influențează răspunsul plăcilor la vibrații. Analiza mecanică în regim dinamic a evidențiat o serie de aspecte de mare finețe privind comportarea lemnului cu diferite structuri de fibră, solicitat pe direcție radială și semiradială, aspecte care sunt relevante în activitatea de fabricanților de instrumente muzicale, fie pentru înțelegerea modificărilor ce se produc în timp în structura microscopică a lemnului și implicit în caracteristicile lui elastice și dinamice, sub acțiunea solicitărilor periodice.

### 2.3.5 Determinarea răspunsului vâsco-elastic al probelor din lemn cu creșterea temperaturii

În literatură s-a evidențiat faptul că la lemn, modulul de stocare a energiei  $E'$  scade odată cu creșterea temperaturii și apare o tranziție de înmuiere în intervalul de temperatură de la 70 la 100 °C, corespunzător relaxării ligninei, iar valoarea maximă a factorului de pierdere crește odată cu frecvența, ceea ce atestă faptul că temperatura de tranziție se deplasează la valori mai mari pe măsură ce frecvența crește [121]. Trăsăturile anatomice și moleculare ale speciei lemnoase au cea

mai mare influență asupra comportamentului vâsco-elastic al lemnului, respectiv, structura moleculară a componentelor esențiale ale lemnului și arhitectura supramoleculară a acestora în peretele celular influențează în mod esențial proprietățile de înmuiere, aspect sesizat și în cercetările prezentate în această lucrare, precum și în publicații ale acestui subiect [121; 149; 156]. Rezultatele obținute de [118] arată că înmuierea lemnului de esență moale are loc de fapt la temperaturi mai ridicate decât cele pentru lemn de esență tare. Un alt aspect este, de asemenea, important pentru interpretare: țesutul din lemn este mai regulat în direcție radială comparativ cu direcția tangențială [121]. În testele de încovoiere (sarcina aplicată pe direcție radială produce un moment de încovoiere pe direcție tangențială), pereții celulelor sunt încărcăți în principal la tracțiune și compresiune pură, în timp ce dacă sarcina este aplicată în direcție tangențială producând un moment de încovoiere pe direcție radială, pereții celulari sunt mai degrabă solicitați la încovoiere, comportament descris de [121]. Tensiunea tangențială datorată încovoierii simple plane induce o alunecare celulară care apare cel mai probabil la nivelul lamelei medii. Acum, este bine cunoscut faptul că distribuția ligninei de-a lungul peretelui celular dublu este eterogenă [118; 187]. Conform lui [86; 87], conținutul de lignină este de aproape două ori mai mare în lamela mijlocie decât în alte straturi de perete. Dacă considerăm că lamela mijlocie bogată în lignină este elementul principal supus tensiunii de forfecare în direcție tangențială, este mai ușor de înțeles găsirea valorii  $\tan\delta$  ridicate în direcția tangențială.

### ***Influența temperaturii asupra caracteristicilor vâscoelastice la lemnul de molid***

În structura instrumentelor muzicale, conținutul de umiditate a lemnului și regimurile de uscare a lemnului în etapa de pregătire a subansamblelor, joacă un rol important în conservarea calității acustice a lemnului. Se știe faptul că regimurile de uscare artificială pot produce la nivel microcelular colapsul pereților celulari până la nivelul lamelelor și straturilor din pereții traheidelor proces care are loc în timpul migrării apei libere și legate din lemn în regim forțat [31]. Nu întâmplător, lemnul pentru instrumente muzicale este uscat în aer liber pentru a atinge umiditatea de echilibru (de aproximativ 15%), după care se practică o condiționare a lemnului cu un regim blând pentru atingerea umidității de 6-8%. Cercetările privind comportarea vâsco-elastică a lemnului o dată cu creșterea temperaturii prezintă numeroase implicații practice întrucât în starea finală a lemnului ca produs finit (ca instrument muzical), în timpul cântatului, corpul instrumentistului radiază căldură, iar părțile corpului care vin în contact cu instrumentul muzical transmit căldura lemnului încorporat în vioară sau chitară. Se știe că temperatura produce modificări în structura lemnului și în rigiditatea acestuia, fapt pentru care a fost investigată comportarea lemnului de molid debitat radial și semiradial, cu fibră deasă și fibră rară, în condiții de variație a temperaturii, fără a ajunge la temperatura de combustie.

Unele materiale prezintă procese reversibile, cu condiția să rămână în domeniul liniar, dar sunt sensibile la viteza de deformare. Acesta este cazul materialelor viscoelastice. Lemnul și polimerii intră în această categorie de materiale, care sunt utilizate în mare măsură în acustica muzicală. Amortizarea viscoelastică depinde, de asemenea, puternic și de temperatură [118; 121; 185]. În Figura 2.40 și Figura 2.41 sunt prezentate comparativ evoluțiile parametrilor dinamici în raport cu temperatura pe categorii de structuri – epruvete cu fibră deasă, radiale și semiradiale (clasa A) (Figura 2.41, a și Figura 2.41, a) și epruvete din lemn de molid cu fibră rară, radiale și semiradiale (clasa D) (Figura 2.40, b și Figura 2.41, b), sollicitate tot cu o forță de  $0.6 \text{ N/mm}$  cu frecvența de  $1 \text{ Hz}$ . Modulul dinamic complex prezintă o tendință de creștere cu creșterea temperaturii, cu viteza de  $15.83 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$  în cazul epruvetelor radiale, comparativ cu  $10 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$  în cazul epruvetelor semiradiale din aceeași clasă de calitate anatomică, clasa A.

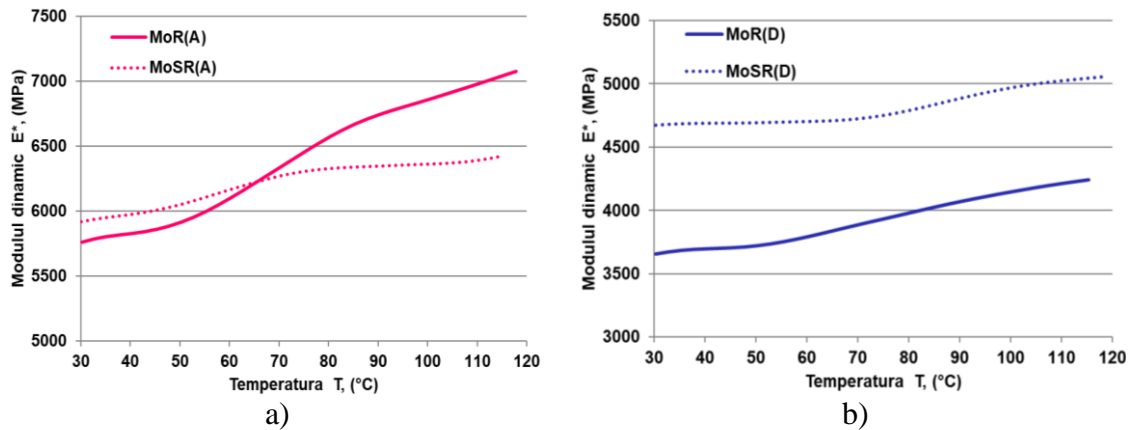


Figura 2.40. Variația mărimilor elastice în raport cu temperatura: a) modulul dinamic complex  $E^*$  pentru epruvetele din molid clasa A; b) modulul dinamic complex  $E^*$  pentru epruvetele din molid clasa D

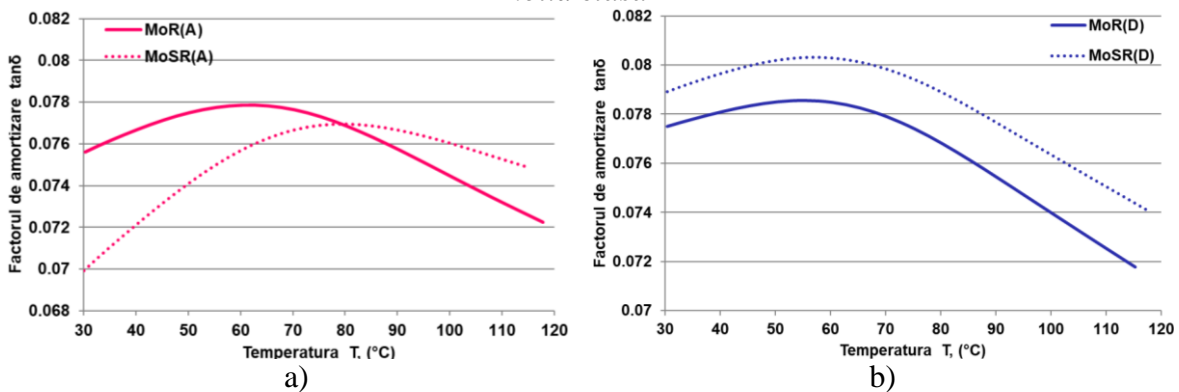


Figura 2.41. Variația mărimilor elastice în raport cu temperatura: a) amortizarea  $\tan \delta$  pentru epruvetele din molid clasa A; b) amortizarea  $\tan \delta$  pentru epruvetele din molid clasa D

În jurul temperaturii de  $65^\circ\text{C}$ , se înregistrează o egalizare a valorilor modulului dinamic complex. Implicit, ca urmare a creșterii modulului dinamic complex, epruvetele cu secțiune radială se rigidizează la temperaturi mai mari de  $65^\circ\text{C}$  ceea ce duce la deformări reduse și la viteze de propagare a sunetului în lemn, mai mari. Din punct de vedere al tranzițiilor ce au loc la nivel celular prin modificarea stării chimice a celulozei și ligninei, se observă prin variația coeficientului  $\tan \delta$ ,

că epruvetele debitate radial înregistrează o temperatură de tranziție în jurul valorii de  $60^{\circ}\text{C}$ , comparativ cu  $80^{\circ}\text{C}$  pentru epruveta debitată semiradial (Figura 2.41). Aceste aspecte sunt valorificate practic prin aplicarea unor regimuri de condiționare la temperaturi sub temperatura de tranziție specifice tipurilor de semifabricate folosite în producție. În cazul probelor din clasa D (epruvete cu fibră rară sau cu inele anuale late), se constată că sortimentele debitate semiradial prezintă un modul dinamic mai mare decât probele debitate radial, iar cu creșterea temperaturii, acesta crește cu o viteză de aproximativ  $5.5\text{MPa}/^{\circ}\text{C}$ , comparativ cu epruvetele radiale, a căror viteză de creștere a modulului dinamic complex este de  $7.2\text{MPa}/^{\circ}\text{C}$  (Figura 2.41, b). Datorită structurii cu fibră rară, conținutul de celuloză, hemiceluloze și lignină este aproximativ la fel atât pentru epruvetele debitate radial cât și debitate semiradial, fapt pentru care, temperatura de tranziție este aceeași pentru ambele categorii de epruvete, respectiv  $60^{\circ}\text{C}$ . Pe de o parte, acest comportament vâsco-elastic al probelor semiradiale cu fibră rară confirmă apartenența într-o clasa inferioară de calitate structurală a lemnului de rezonanță, fapt pentru care este mai puțin utilizat în construcția viorilor, dar este acceptat într-o anumită proporție, în structura plăcilor de chitară.

### ***Influența temperaturii asupra caracteristicilor vâscoelastice la lemnul de paltin***

Se știe că structura neomogenă a lemnului de paltin cu fibre foarte ondulate se caracterizează printr-un conținut mai mare de lignină decât speciile cu fibre normale unde lignina este de 25,3% [166]. Conținutul mai mare de lignină care este un polimer aromatic complex influențează temperatura de tranziție notată  $T_g$ , care variază de la  $75^{\circ}\text{C}$  la  $100^{\circ}\text{C}$  [80; 121]. Comparând comportarea lemnului cu fibră deasă și creață cu cea a probelor din paltin cu fibră rară, se observă că  $T_g$  este mai mare în cazul lemnului cu un conținut mai scăzut de lignin (probele din clasele C și D), aceasta ajungând la valoarea de aproximativ  $85\div 90^{\circ}\text{C}$  (Figura 2.42 c și d) în comparație cu temperatura de tranziție atinsă de probele cu fibră creață și densă (clasele A și B), care ajung la valori de  $55\div 80^{\circ}\text{C}$  (Figura 2.42, a și b). De asemenea, se poate observa că, în cazul probei de paltin cu fibră foarte creață și densă (PaR(AI)), temperatura de tranziție  $T_{\gamma}$  începe de la  $55^{\circ}\text{C}$ , apoi se înregistrează nivelul de tranziție  $T_{\beta}$  la  $70^{\circ}\text{C}$  și în final tranziția  $T_{\alpha}$ , la  $88^{\circ}\text{C}$ . În toate cele patru cazuri, modulul de conservare înregistrează o degradare progresivă. Analizând comportarea probelor din lemn de paltin tăiate radial, dar cu fibră rară prezentate în Figura 2.43, se poate observa că amortizarea crește cu creșterea temperaturii pentru toate clasele, în schimb, modulul de conservare se comporta diferit - pentru probele din clasele A și C, tendința este de scădere o dată cu creșterea temperaturii, iar pentru probele din clasele B și D, tendința este de creștere a modulului de conservare (Figura 2.43, c și d). Și pentru aceste probe, temperatura de tranziție înregistrează valori diferite în funcție de clasa de calitate, de conținutul de lemn târziu și



lemn timpuriu, astfel încât, valorile sunt mai mici pentru clasele A și B ( $T_g=60\div 80\text{ }^\circ\text{C}$ ), iar pentru cele cu fibră ușor ondulată (clasa C) și dreapta (Clasa D),  $T_g\geq 90\div 100\text{ }^\circ\text{C}$ .

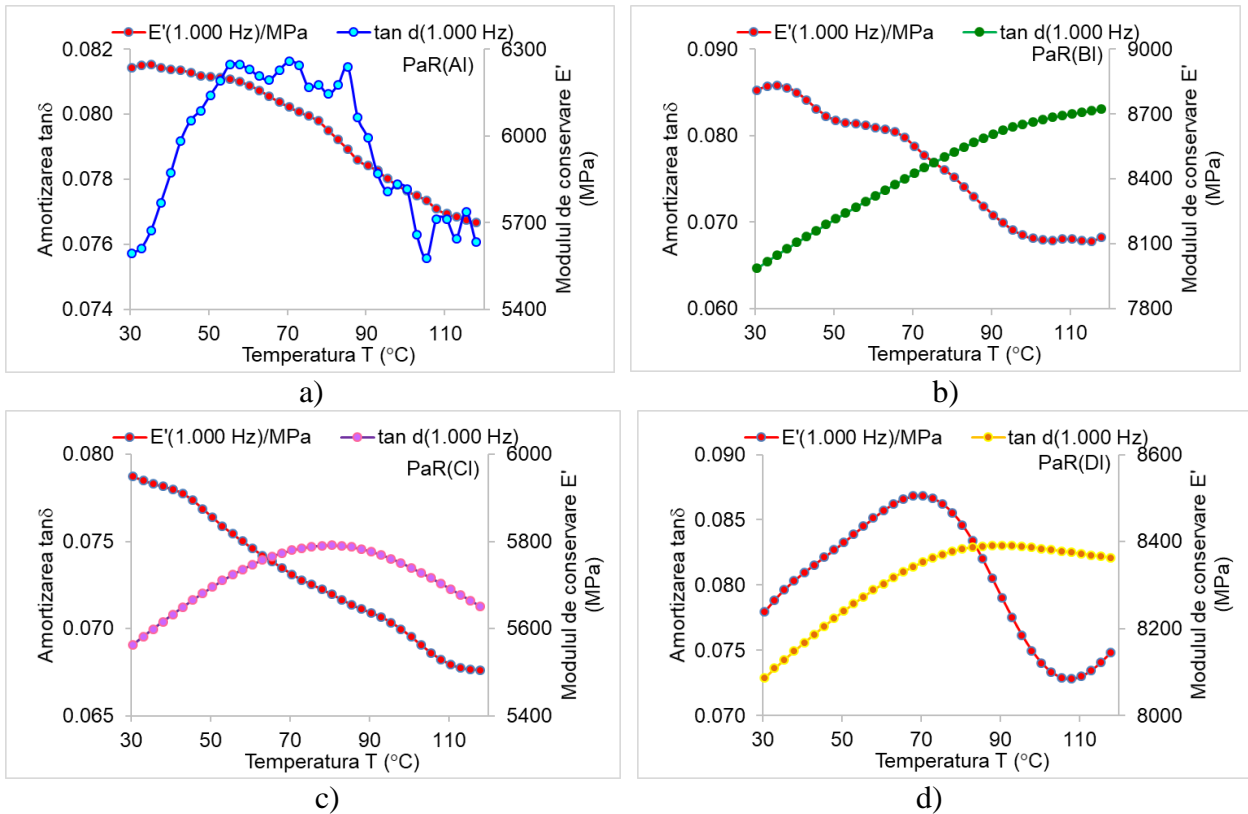


Figura 2.42. Variația amortizării și modulului de conservare cu creșterea temperaturii, pentru probele de paltin tăiate radial, cu fibră deasă: a) clasa A; b) clasa B; c) clasa C; d) clasa D.

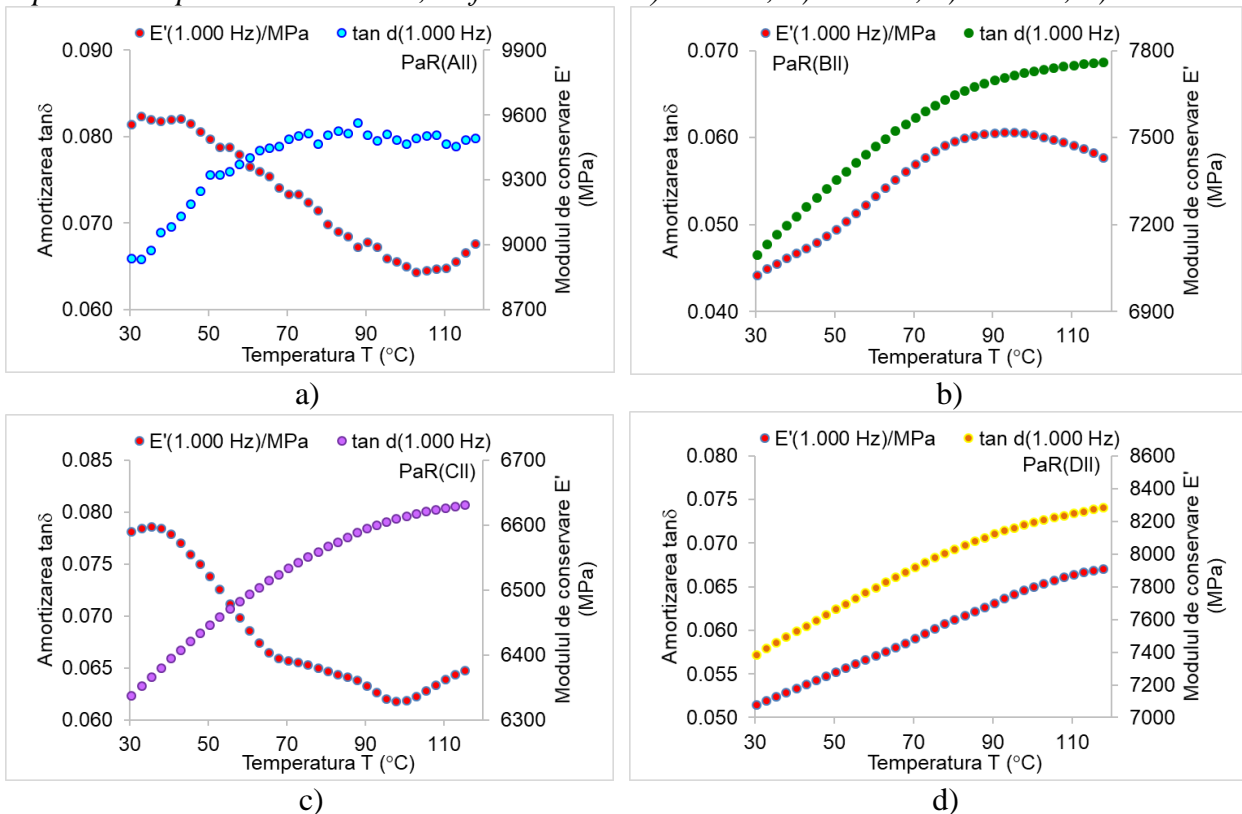


Figura 2.43. Variația amortizării și a modulului de conservare în raport cu creșterea temperaturii, pentru probele de paltin tăiate radial, cu fibră rară: a) clasa A; b) clasa B; c) clasa C; d) clasa D.

În cazul probelor debitate semiradial, cu fibră deasă, atât modulul de conservare a energiei cât și amortizarea prezintă o tendință de creștere cu creșterea temperaturii, indiferent de structura anatomică a materialului (Figura 2.44). Temperatura de tranziție este cea mai evidentă în cazul probei cu fibra dreapta (clasa D) (Figura 2.44, d). În schimb, probele debitate semiradial, cu fibră rară, din clasele A, B și C au o comportare similar - manifestată prin tendința de creștere a amortizării și scăderea modulului de conservare (Figura 2.44 și Figura 2.45).

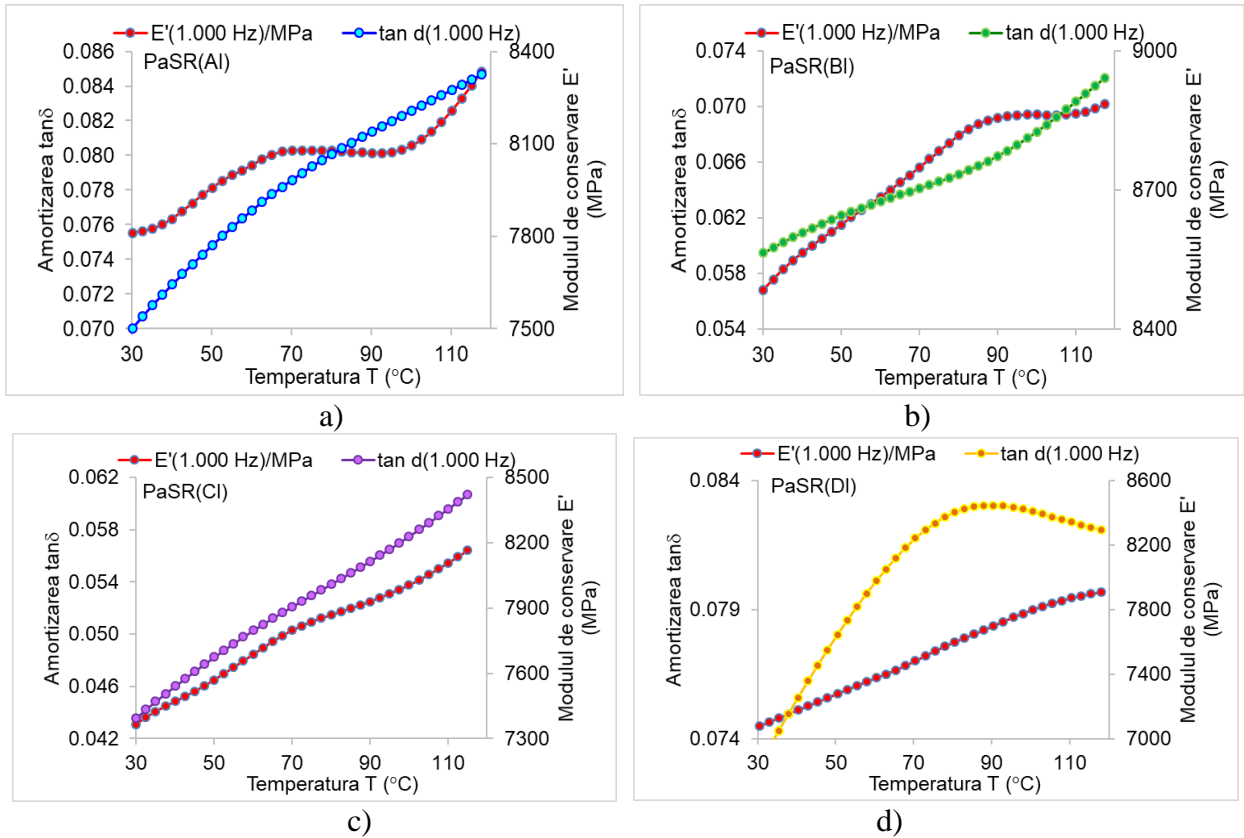


Figura 2.44. Variația amortizării și a modulului de conservare în raport cu creșterea temperaturii, pentru probele de paltin tăiate semiradial, cu fibră deasă: a) clasa A; b) clasa B; c) clasa C; d) clasa D.

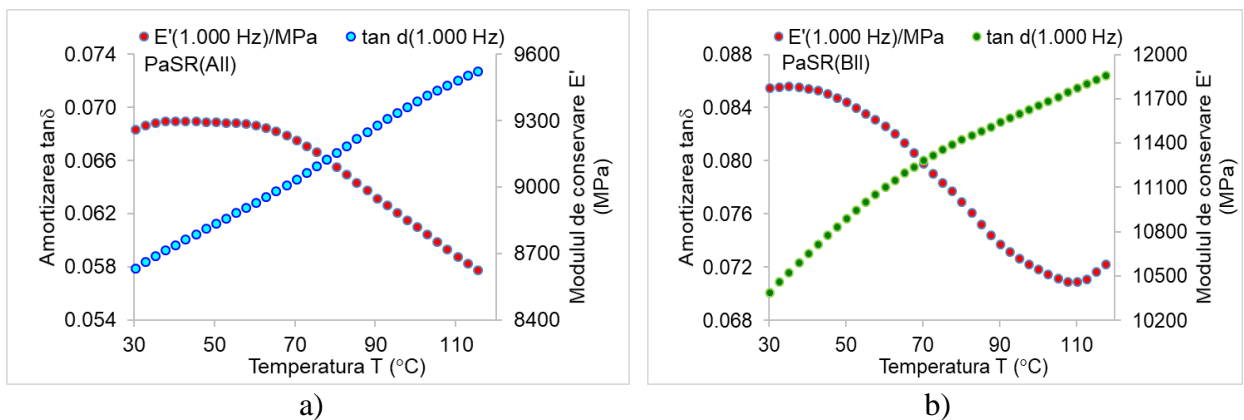


Figura 2.45. Variația amortizării și a modulului de conservare în raport cu creșterea temperaturii, pentru probele de paltin tăiate semiradial, cu fibră rară: a) clasa A; b) clasa B; c) clasa C; d) clasa D.

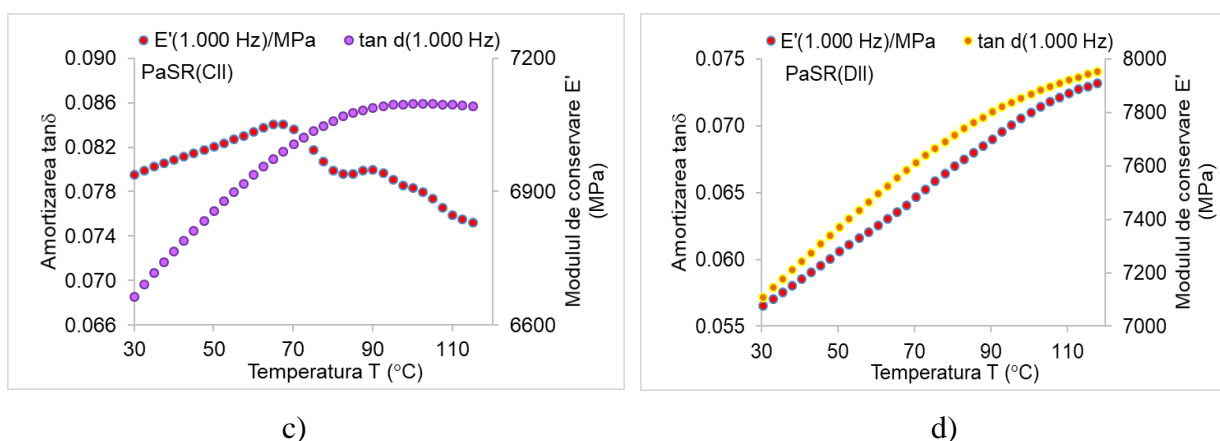


Figura 2.45. Variația amortizării și a modului de conservare în raport cu creșterea temperaturii, pentru probe de paltin tăiate semiradial, cu fibră rară: a) clasa A; b) clasa B; c) clasa C; d) clasa D.

În Tabelul 2.14 sunt centralizate valorile mărimilor vâsco-elastice determinate pe epruvetele din lemn de paltin din clase de calitate anatomică diferite

Tabelul 2.14. Valorile parametrilor vâsco-elastici determinați prin DMA, la începutul solicitării și după creșterea temperaturii

Probe/valori medii	tan d	T=30°C			T=117°C			
		E' (MPa)	E'' (MPa)	E* (MPa)	E' (MPa)	E'' (MPa)	E* (MPa)	
Pa <sub>R</sub> (AI)	0.0662	5865	392	5878	0.0666	5547	371	5560
Pa <sub>R</sub> (BI)	0.0663	8327	549	8345	0.0829	7666	629	7692
Pa <sub>R</sub> (CI)	0.0699	6070	422	6084	0.0781	6183	481	6201
Pa <sub>R</sub> (DI)	0.0650	7658	500	7674	0.0781	8027	626	8051
Pa <sub>R</sub> (AII)	0.0687	9383	644	9405	0.0847	9152	776	9185
Pa <sub>R</sub> (BII)	0.0526	6878	360	6887	0.0737	6960	505	6978
Pa <sub>R</sub> (CII)	0.0712	7203	511	7221	0.0826	6744	551	6766
Pa <sub>R</sub> (DII)	0.0640	6634	421	6647	0.0795	7384	577	7406
Pa <sub>SR</sub> (AI)	0.0627	7638	476	7652	0.0813	7919	642	7945
Pa <sub>SR</sub> (BI)	0.0653	8237	529	8254	0.0794	8408	667	8434
Pa <sub>SR</sub> (CI)	0.0570	8228	473	8242	0.0719	8322	602	8344
Pa <sub>SR</sub> (DI)	0.0645	7146	461	7161	0.0788	7705	601	7729
Pa <sub>SR</sub> (AII)	0.0607	9246	559	9262	0.0743	8584	632	8608
Pa <sub>SR</sub> (BII)	0.0713	11830	830	11859	0.0888	10341	921	10382
Pa <sub>SR</sub> (CII)	0.0771	6885	525	6905	0.0873	7169	614	7195
Pa <sub>SR</sub> (DII)	0.0645	7146	461	7161	0.0788	7705	601	7729

Analizând comparativ variația factorului de amortizare  $\tan\delta$ , în funcție de modul de tăiere a probelor (radial versus semiradial) și a densității fibrei (fibră deasă versus fibra rară) așa cum sunt prezentate în Figura 2.46, se poate deduce faptul că cele două variabile influențează proprietățile vâsco-elastice ale lemnului de paltin, cu creșterea temperaturii de la 30 la 117°C. Astfel, cea mai stabilă categorie de probe, la variația de temperatură este lemnul de paltin clasa A, cu fibra foarte

creață și deasă, debitat radial, unde amortizarea înregistrează o creștere de 0.52%, comparativ cu lemnul de paltin debitat radial, cu fibră rară și creață (clasa B) (PaR(BII)) unde creșterea amortizării este de 40.3%. Cele mai mari creșteri ale amortizării se înregistrează pentru următoarele categorii de probe: 24.95% pentru proba PaR(BI) (Figura 2.46, a); 40.30% pentru proba PaR(BII) (Figura 2.46, b); 29.71% pentru proba PaSR(AI) (Figura 2.46, c); 24.42% pentru proba PaSR(BII) (Figura 2.46, d). Aceste modificări confirmă faptul că probele cu fibră creață și foarte creață au un conținut mai mare de lignină și alți compuși ce își modifică proprietățile la temperaturi de 60÷80°C.

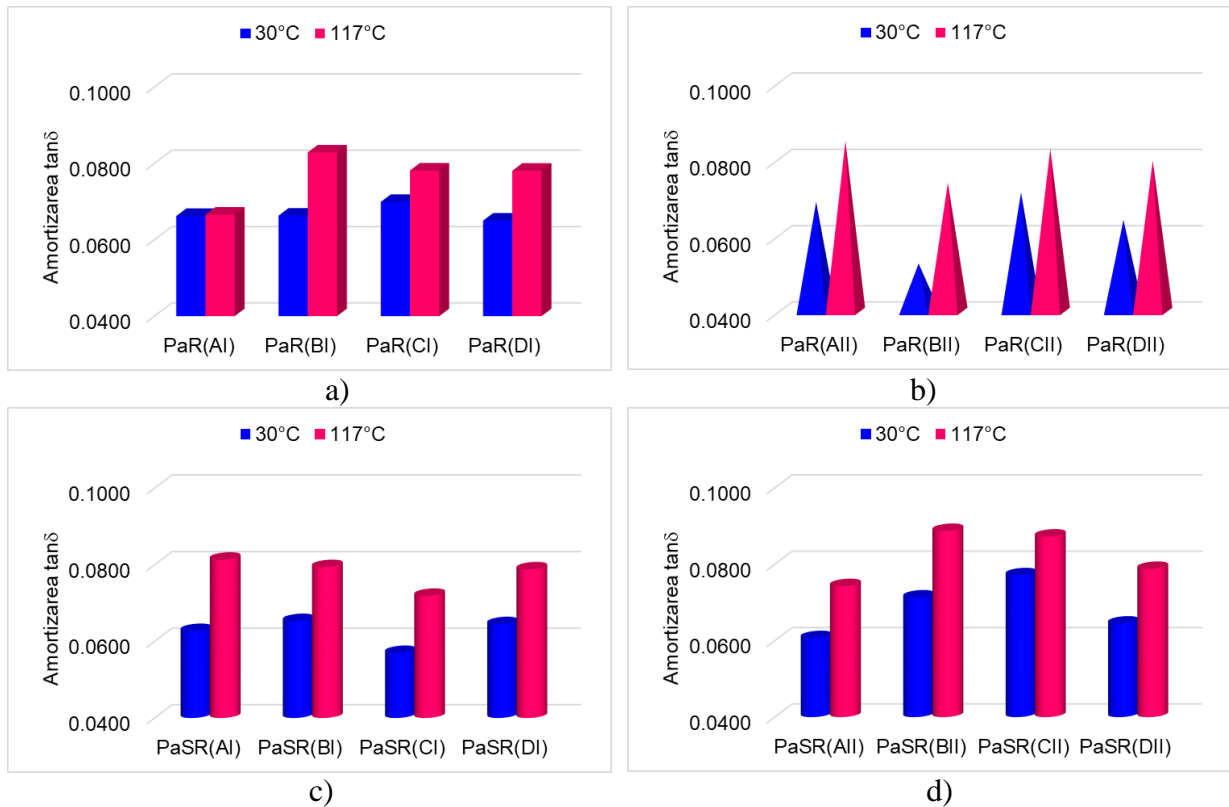
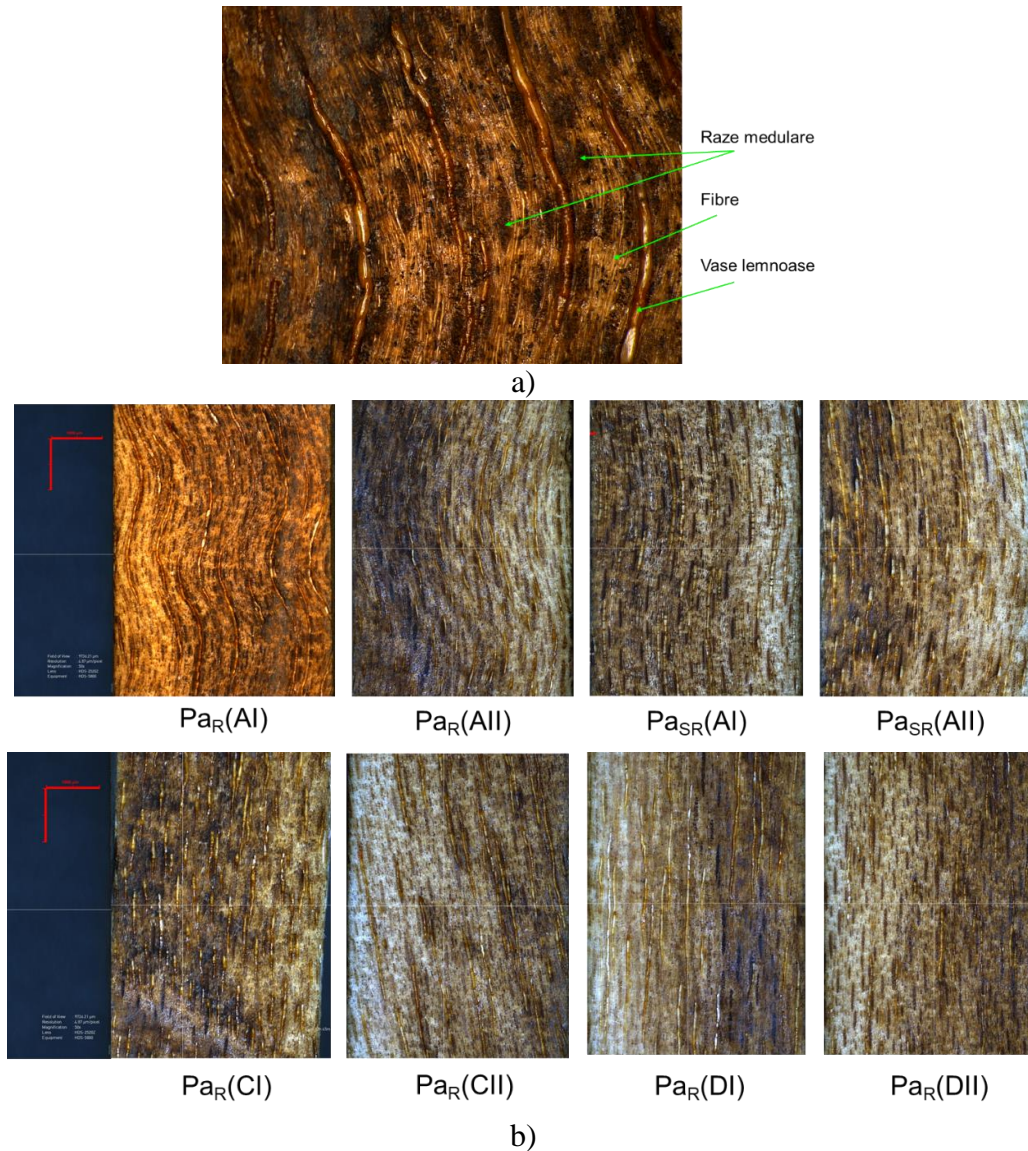


Figura 2.46. Valorile amortizării  $\tan\delta$  înainte și după expunerea la temperatură a probelor de paltin: a) probele debitate radial, cu fibră deasă; b) probele debitate radial cu fibră rară; c) probele debitate semiradial, cu fibră deasă; d) probele debitate semiradial cu fibră rară

În Figura 2.47 se pot observa caracteristicile macroscopice ale lemnului de paltin în funcție de gradul de ondulare a fibrei, vizibile în secțiunea longitudinal – tangențială, la microscopul optic cu o mărire de 50X. Rezultatele au demonstrat că structura lemnului chiar și în cadrul aceleiași specii joacă un rol important în comportamentul său vâscoelastic. Lemnul de paltin cu fibra creață nu numai că oferă un aspect estetic apreciat de lutieri și producătorii de mobilă, dar are un comportament viscoelastic diferit de lemnul de paltin comun. Datorită elasticității ridicate, lemnul de paltin cu fibra creață și densă reacționează rapid la vibrațiile mecanice ale corzilor, intrând în rezonanță cu acestea și mai mult decât atât prezintă un comportament stabil atât în timp, cât și cu creșterea temperaturii.

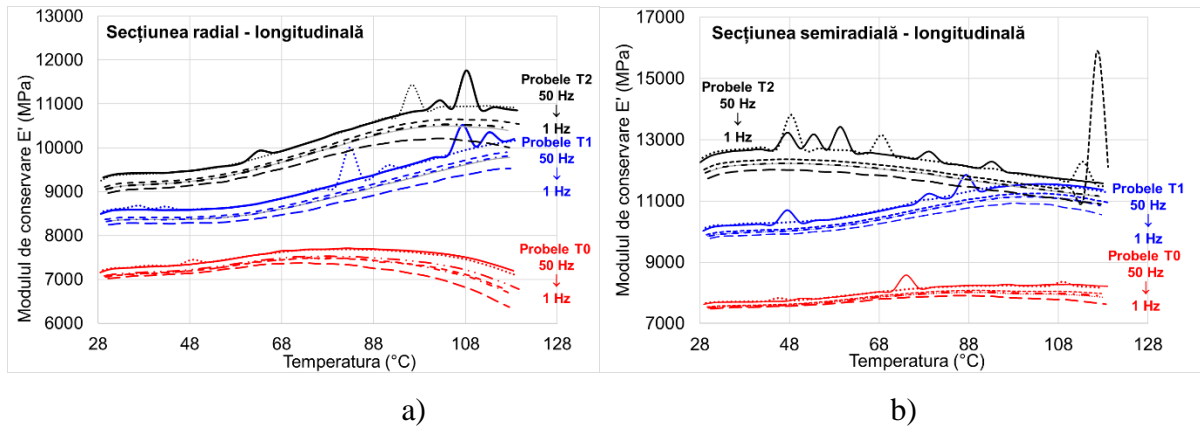




**Figura 2.47.** Gradul de ondulare a fibrei lemnului de paltin la probele examinate la microscop (50x): a) principalele elemente anatomice ale lemnului în secțiunea longitudinal – tangențială b) secțiunea longitudinal – tangențială a diferitelor tipuri de probe cu grade de ondulare a fibrelor diferite

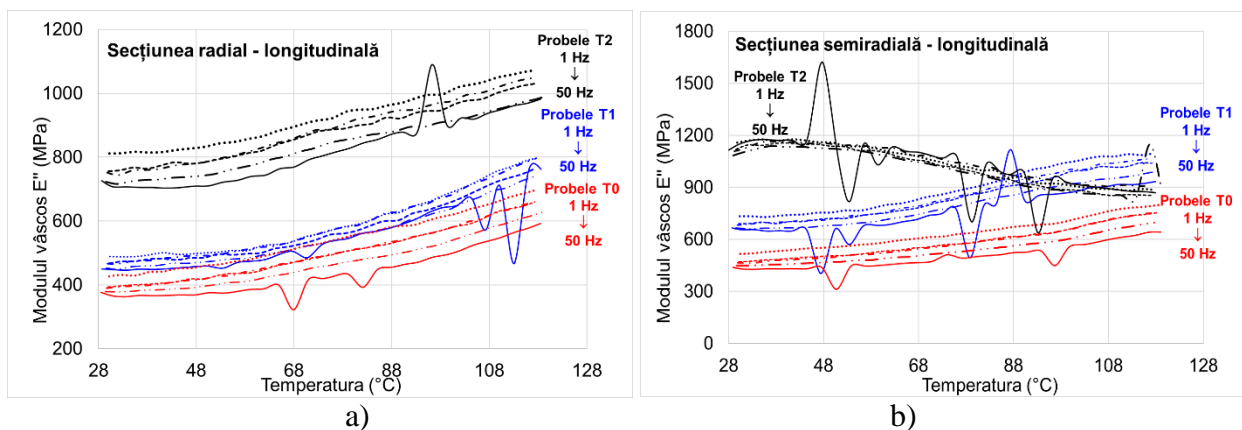
### ***Influența temperaturii asupra caracteristicilor vâscoelastice la lemnul de salcâm natural și tratat cu vapori de amoniac***

În cazul lemnului de salcâm, temperatura afectează rigiditatea și rezistența lemnului, acesta având un comportament termoplastic. În cazul probelor de control (T0), modulul de conservare E' crește ușor până la temperatura de 75÷80°C, apoi se înregistrează o tendință de scădere (Figura 2.48, a - linii roșii); în cazul probelor tratate cu vapori de amoniac (T1 - linii albastre și T2 - linii negre), modulul de conservare a energiei de deformație rămâne constant ca valoare între 30-65°C, după care, se observă o creștere între 65 și 100°C, indiferent de frecvența de solicitare (Figura 2.48, a).



**Figura 2.48.** Variația modului de conservare  $E'$  cu creșterea temperaturii în cazul probelor de salcâm: (a) probe tăiate în direcție radială; (b) probe tăiate în direcție semiradială. Legendă: linie roșie - probe netratate; linia albastră - probe expuse primului tratament cu amoniac; linia neagră - probe expuse la al doilea tratament cu amoniac; linie continuă (50 Hz); linie alternantă cu punct (10 Hz); linie scurtă - punct (5 Hz); linie punctată pătrat (3,3 Hz); linie punctată rotund (1 Hz)

Caracteristicile anatomice ale lemnului de salcâm, modul de debitare al probelor (radială și semiradială) și direcția de aplicare a sarcinii față de direcția fibrelor influențează răspunsul mecanic al probelor: pentru probele netratate și probele tratate cu 5% vapori de amoniac (T1), variația proprietăților visco-elastice cu creșterea temperaturii nu depinde de modul de debitare a probelor, fiind similar atât pentru direcția radială cât și pentru cea semiradială (Figura 2.49), însă probele tratate cu concentrație mai mare de vapori de amoniac pe o perioadă mai lungă de timp, (codificate T2) au arătat tendința de scădere a modului de conservare ( $E'$ ) începând cu temperatura de 50°C.

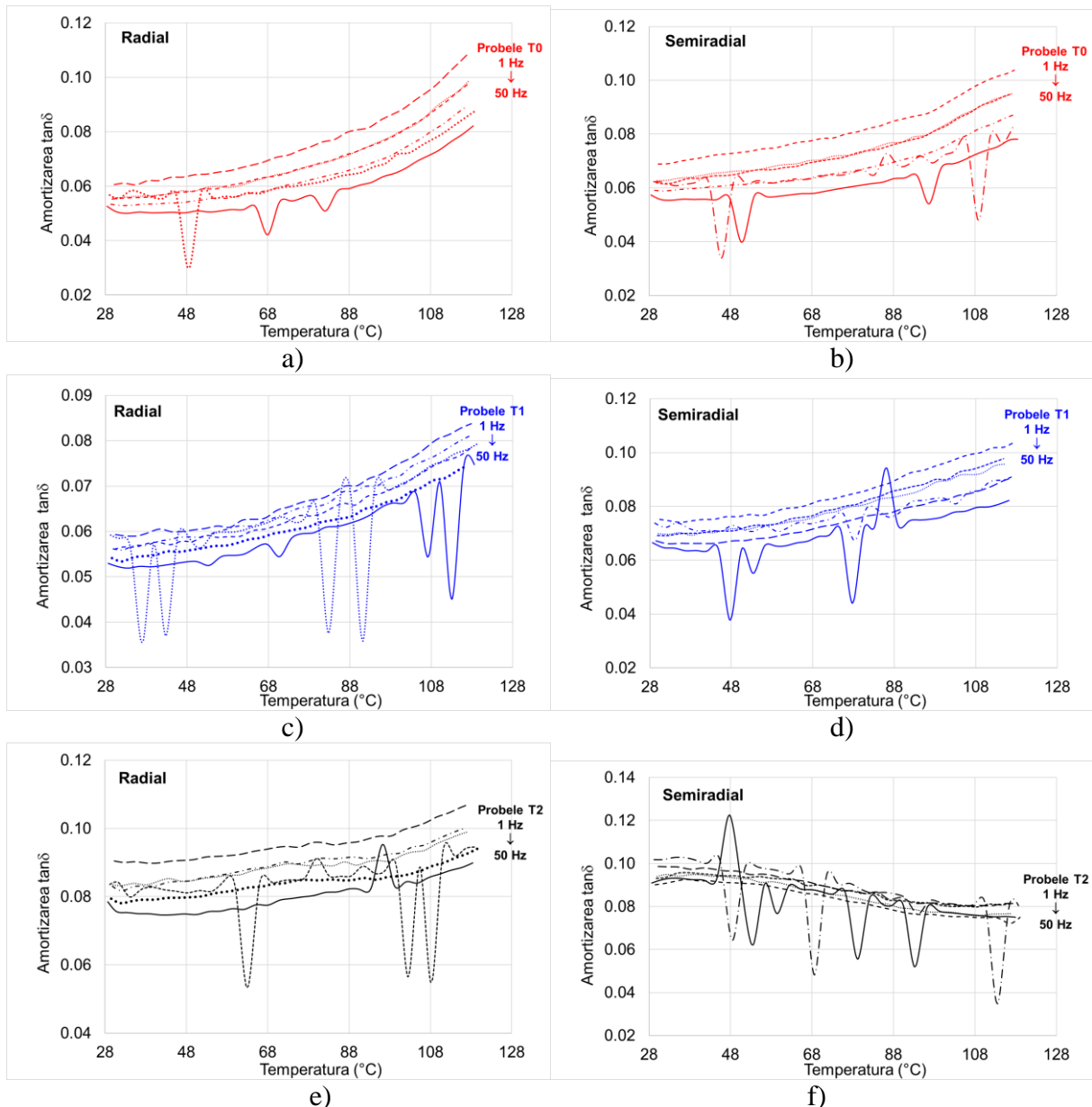


**Figura 2.49.** Variația modului vâcos  $E''$  cu creșterea temperaturii în cazul probelor de salcâm: (a) probe tăiate în direcție radială; (b) probe tăiate în direcție semiradială.

Creșterea bruscă a valorilor modului elastic la frecvența de 50 Hz, la interval de temperatură, este cauzată de rearanjările moleculare care apar din cauza creșterii volumului golurilor celulare la temperaturile de tranziție [101; 157]. Odată cu creșterea temperaturii, modulul de pierdere  $E''$  crește pentru toate tipurile de probe astfel încât, la temperaturi mai mari de 100°C, valorile se

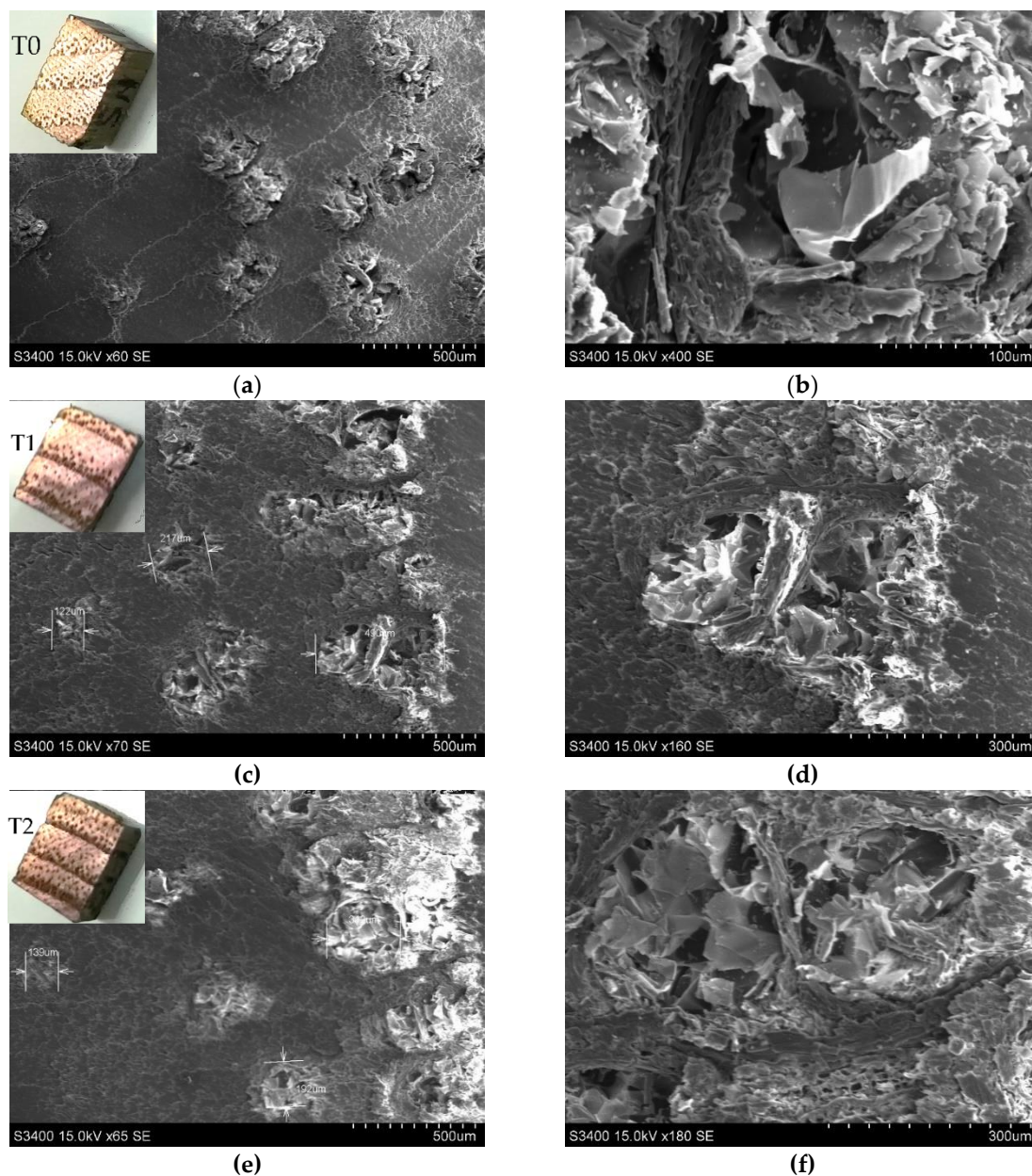


dublează (Figura 2.49). Un comportament interesant în ceea ce privește variația modului vâscos cu creșterea temperaturii, este înregistrat de probele tratate cu amoniac semi-radial folosind al doilea tratament T2.  $E''$  tinde să scadă începând cu 48°C (Figura 2.49, b). Comportamentul vâscoplastic este influențat de temperaturile mai mari de 48°C, ceea ce se observă și în variația amortizării (Figura 2.50). Ca și în cazul lemnului de paltin, polimerul natural din structura lemnului responsabil cu modificările interne este lignina, iar în cazul lemnului de salcâm, se poate aprecia că și substanțele de cementare din componența tilelor ar putea fi responsabile de acest comportament.



**Figura 2.50.** Variația amortizării  $\tan\delta$  cu creșterea temperaturii: (a) probele de control – secțiunea radială; (b) probele de control – secțiunea semiradială; (c) probele tratate T1 – secțiunea radială; (d) – probele tratate T1 – secțiunea semiradială; (e) probele tratate T2 – secțiunea radială; (f) probele tratate T2, secțiunea semiradială. Legenda: linie continuă (50 Hz); linie alternantă cu punct (10 Hz); linie scurtă - punct (5 Hz); linia punctată pătrat (3,3 Hz); linie punctată rotund (1 Hz) [157]

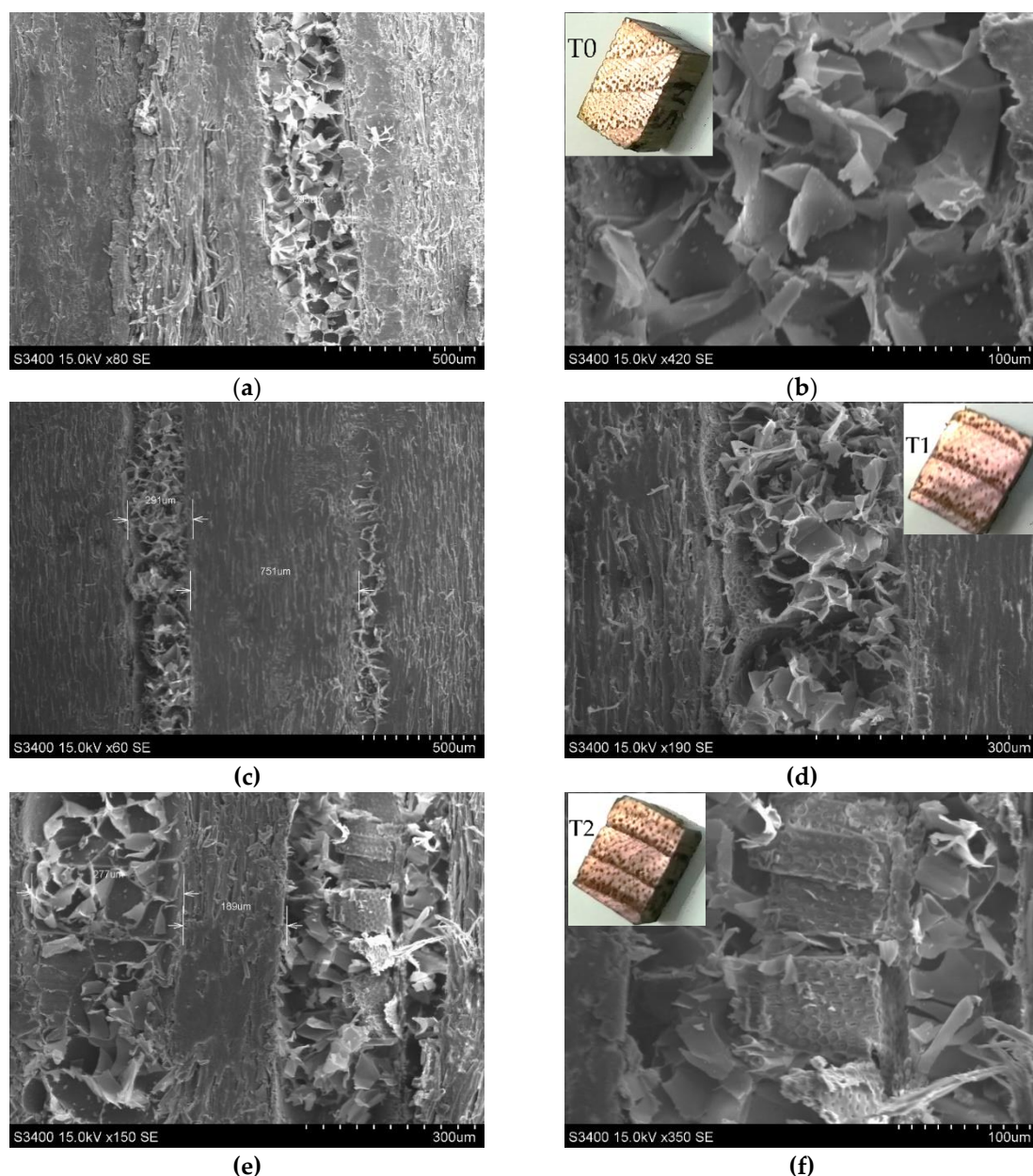
În [Figura 2.51](#) și [Figura 2.52](#), sunt prezentate imagini privind morfologia suprafețelor probelor de salcâm, captate cu microscopul electronic de baleiaj (SEM Hitachi S3400N din dotarea Laboratorului de Energii Regenerabile – ICD Brașov, cu sprijinul dr. chim. Mihaela Coșniță). Pentru vizualizarea corespunzătoare a microstructurii lemnului, probele au fost acoperite cu un strat fin de aur care asigură încărcarea electronică a suprafeței probelor.



**Figura 2.51.** Imagini ale secțiunii transversale a lemnului de salcâm observate cu microscopul cu scanare electronică (SEM): a) probele martor, mărime x60 SE; b) probele martor, mărime x400 SE; c) probele tratate T1 (primul tratament) mărime x70 SE; d) probele tratate T1 (primul tratament) mărime x160 SE; e) probele tratate T2 (al doilea tratament) mărime x65 SE; f) probele tratate T2 (al doilea tratament) mărime x180 SE.

La nivel microscopic, nu pot fi observate diferențe între cele trei tipuri de probe. Secțiunea transversală a eșantioanelor de control arată că vasele de lemn timpuriu mari (150-220  $\mu\text{m}$ ) sunt dispuse câte 2-3 pe lățimea inelului fiind încărcate cu tile. Porii din lemnul târziu au diametre mai

mici (70–140  $\mu\text{m}$ ). Parenchimul longitudinal și cel al razelor conțin adesea depozite cristaline. [115; 120; 171] au prezentat numeroase studii privind microstructura lemnului de salcâm, subliniind caracteristicile microscopice.



**Figura 2.52.** Imagini ale secțiunii longitudinal–radiale a lemnului de salcâm observate la microscopul cu scanare electronică (SEM): a) probele martor, mărire x80 SE; b) probele martor, mărire x420 SE; c) probele tratate T1 (primul tratament) mărire x60 SE; d) probele tratate T1 (primul tratament) mărire x190 SE; e) probele tratate T2 (al doilea tratament) mărire x150 SE; f) probele tratate T2 (al doilea tratament) mărire x350 SE.

Ca investigații suplimentare privind caracteristicile fizice ale acestor probe din lemn de salcâm, s-a determinat gradul de modificare a culorii lemnului ca urmare a aplicării celor două tratamente. Pentru a determina variația culorii lemnului de salcâm afectată de tratamentul chimic cu hidroxid de amoniu, s-a folosit cromometrul CR-400 Konica Minolta. Rezultatele măsurătorilor au fost



exprimate sub forma valorilor culorilor folosind sistemul de culori  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , unde  $L^*$  descrie luminozitatea, iar  $a^*$  - coordonatele cromatice pe axele verde-roșu (gradul de verde/roșu) și  $b^*$  gradul de albastru/galben. Schimbarea generală a culorii  $\Delta E^*$  a fost calculată cu relațiile (2.42):

$$\Delta E_{T_0-T_1}^* = \sqrt{(L_0^* - L_1^*)^2 + (a_0^* - a_1^*)^2 + (b_0^* - b_1^*)^2}, \quad (2.42)$$

$$\Delta E_{T_0-T_1}^* = \sqrt{(L_0^* - L_1^*)^2 + (a_0^* - a_1^*)^2 + (b_0^* - b_1^*)^2}, \quad (2.43)$$

$$\Delta E_{T_0-T_1}^* = \sqrt{(L_0^* - L_1^*)^2 + (a_0^* - a_1^*)^2 + (b_0^* - b_1^*)^2}, \quad (2.44)$$

unde  $\Delta E_{T_0-T_1}^*$  reprezintă modificarea de culoare după primul tratament și culoarea lemnului (proba martor T0);  $\Delta E_{T_1-T_2}^*$  - modificarea de culoare dintre al doilea tratament T2 și culoarea lemnului după al primul tratament T1;  $\Delta E_{T_0-T_2}^*$  - modificarea de culoare după al doilea tratament și culoarea lemnului (proba martor T0);  $L_0^*$ ,  $a_0^*$ ,  $b_0^*$  - luminozitatea, gradul de roșu, gradul de galben al lemnului de salcâm în stare naturală;  $L_1^*$ ,  $a_1^*$ ,  $b_1^*$  - luminozitatea, gradul de roșu, gradul de galben al lemnului de salcâm supus primului tratament (expunere la vapori de amoniac în concentrație de 5%);  $L_2^*$ ,  $a_2^*$ ,  $b_2^*$  - luminozitatea, gradul de roșu, gradul de galben al lemnului de salcâm supus la cel de-a doua tratament (expunere la vapori de amoniac în concentrație 10%).

Figura 2.53 prezintă influența tratamentului cu amoniac asupra culorii lemnului. Modificările majore de culoare au fost înregistrate în cazul luminozității.

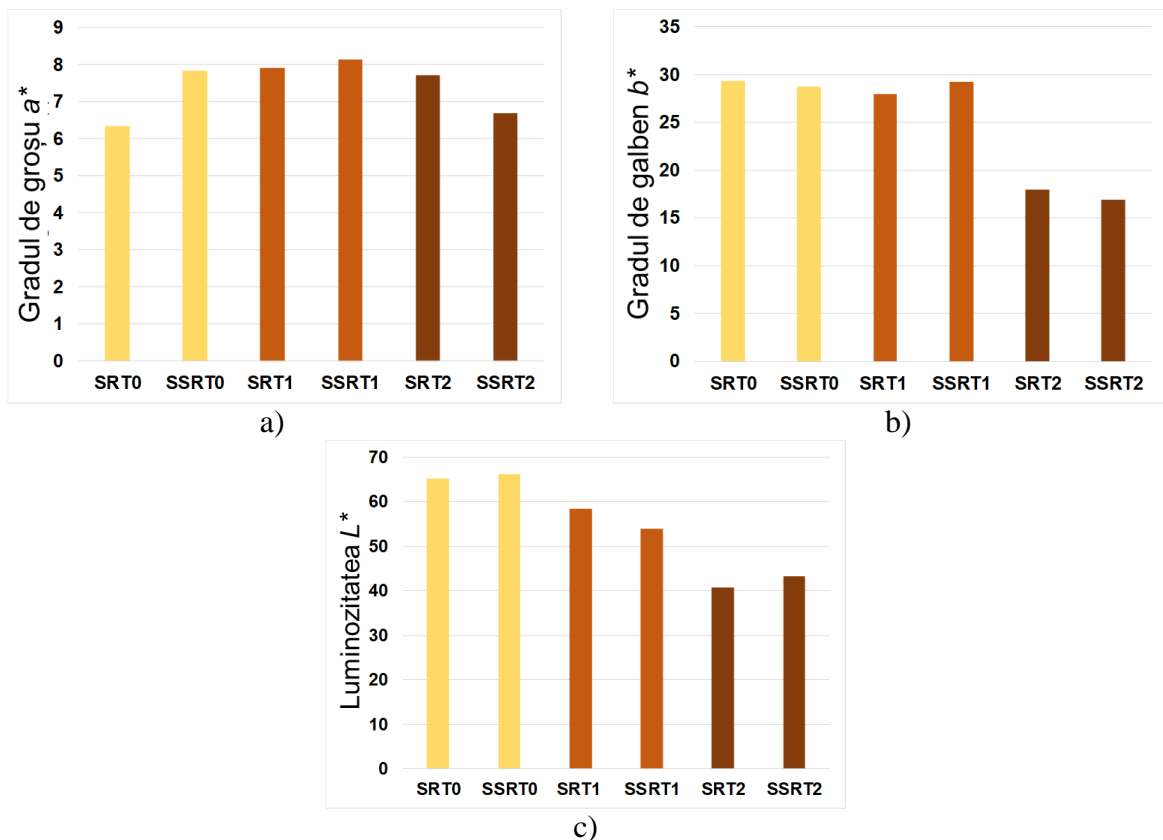


Figura 2.53. Comparații privind culoarea probelor din lemn de salcâm după aplicarea diferitelor tratamente: a) gradul de roșu; b) gradul de galben; c) luminozitatea

Astfel, după primul tratament, luminozitatea a scăzut cu 10% iar după al doilea tratament, diferențele au fost de aproximativ 37% în comparație cu probele martor. Schimbarea generală a culorii  $\Delta E_{T_0-T_2}^*$  după tratamentul T2 este de 27.073 unități, comparativ cu schimbarea generală a culorii  $\Delta E_{T_0-T_1}^*$  după primul tratament T1, a cărei valoare a fost doar 7.108 unități. Valoarea generală a modificării culorii între cele două tratamente aplicate  $\Delta E_{T_2-T_1}^*$  a fost de 20.379 unități, ceea ce înseamnă că perioada de expunere la amoniac (60 de zile) și concentrația de amoniac (10%) au cea mai mare influență asupra schimbării culorii.

## 2.4 Concluzii privind proprietățile elastice și acustice ale lemnului de rezonanță

În capitolul 2 intitulat *"Determinarea proprietăților elastice, mecanice, dinamice și acustice ale lemnului utilizat în structurile complexe de tip Helmholtz"* au fost prezentate rezultatele cercetărilor experimentale realizate pe probe din lemn de rezonanță (paltin, molid) din construcția instrumentelor muzicale cu corzi, dar și a altor specii indigene, cum este salcâmul, utilizat ca material de substituție pentru speciile exotice protejate. În cadrul acestor cercetări, s-au determinat proprietățile acustice și elastice ale lemnului, utilizând metode și tehnici moderne de investigare (metoda ultrasunetelor, metoda matricei de transfer intrinsecă, metoda de analiză mecanică în regim dinamic), metode care au dus la obținerea unor rezultate similare cu cele din literatura de specialitate. Mai mult decât atât, proprietățile elastice, acustice și dinamice au fost corelate cu caracteristicile fizice/anatomice ale probelor din lemn, evidențiindu-se diferențele sensibile între valorile obținute pe sortimentele din lemn cu caracteristici anatomice diferite.

Concluziile capitolului 2 pot fi sintetizate astfel:

- Legăturile între caracteristicile fizice și cele acustice ale lemnului de molid examinat sunt în general de intensitate slabă până la moderată;
- Viteza de propagare a sunetului pe direcție longitudinală  $V_{LL}$  este parametrul acustic cel mai bine descris de însușirile fizice ale lemnului, îndeosebi de structura lemnului; descreșterea vitezei longitudinale  $V_{LL}$  cu lățimea inelelor anuale, delimitează cel mai bine clasele de calitate; Viteza de propagare în direcție radială  $V_{RR}$  este independentă de variabilele structurii și culorii lemnului. Viteza tangențială  $V_{TT}$  crește puțin și nesemnificativ cu lățimea inelelor anuale și componentilor ei (lemn timpuriu și lemn târziu);
- Mărimea modulului de elasticitate longitudinal  $E_L$  scade cu conținutul de roșu al culorii lemnului. S-ar putea crede că această relație se datorează influenței pe care mărimea lemnului târziu o ar avea asupra culorii lemnului; în realitate, gradul de roșu din compoziția culorii este

- practic independentă de lățimea lemnului târziu (Spearman  $R=-0.086$ ,  $p=0.69$ ) și de proporția lemnului târziu ( $R=-0.148$ ,  $p=0.49$ );
- Legătura dintre mărimea densității lemnului și conținutul de galben al culorii ar putea fi intermediată de influența surprinzătoare pe care lățimea lemnului timpuriu o are asupra densității ( $R=+0.421$ ,  $p=0.04$ );
  - La materialul examinat, regularitatea inelelor anuale este direct proporțională cu lățimea inelelor ( $R =+0.994$ ,  $p < 0.001$ ) datorită modului restrictiv de formare a claselor de calitate.
  - Vitezele ultrasunetelor nu depinde numai de direcția de propagare a undelor, ci variaza și între speciile de lemn.
  - Fiecare specie prezintă caracteristici care afectează transmisia energiei ultrasonice în funcție de proprietățile fizice ale pereților celulari sau structura celulelor. Procedura de identificare a vitezelor de propagare aplicată celor două specii de lemn a arătat că acestea depind puternic de o gama largă de caracteristici anatomice, de efectul de ranforsare a razelor și de densitate.
  - Diferențele între clasele de calitate anatomică sunt mult mai pregnante în cazul lemnului de paltin decât la lemnul de molid.
  - Cercetarea prezentată evidențiază faptul că lipsa extremă a acestei materii prime se datorează faptului că prezintă atât o arhitectură anatomică deosebită, construită pe parcursul mai multor decenii de viață a arborelui, cât și proprietăți acustice/elastice superioare lemnului comun.
  - Rapoartele între caracteristicilor acustice și elastice pe cele trei direcții ale lemnului constituie indicatorul cel mai potrivit pentru aprecierea calității acustice a lemnului.
  - Din punct de vedere reologic, lemnul de molid își modifică proprietățile vâsco-elastice cu creșterea timpului de expunere la solicitari periodice. Astfel, modulul dinamic tinde să crească cu o viteză de aproximativ 0.41MPa/s. Cu creșterea frecvenței de solicitare cu 98% (de la 1 Hz la 50 Hz), modulul dinamic crește cu 3.8%.
  - Probele din lemn de paltin din clasa B înregistrează cea mai mare valoare a modulului de conservare (între 10050 ÷ 10300 MPa), iar cea mai redusă valoarea o prezintă cele din clasa C.
  - în cazul lemnului de salcâm, s-a observat că modulul de conservare  $E'$  tinde să crească cu 6% – 7%, cu creșterea duratei de solicitare. Tratarea probelor din lemn de salcâm cu soluție de amoniac, duce la creșterea modulului de conservare: după primul tratament, creșterea este de 4.8% – 5% și după al doilea tratament, creșterea este de 50%, comparativ cu valorile probele martor.
  - temperatura afectează rigiditatea și rezistența lemnului, acesta având un comportament termoplastic. Creșterea temperaturii duce la modificări ale modulului dinamic complex al



lemnului de molid, acesta având o tendință de creștere cu viteza de  $15.83\text{MPa}/^{\circ}\text{C}$  în cazul epruvetelor radiale și  $10\text{MPa}/^{\circ}\text{C}$  în cazul epruvetelor semiradiale din aceeași clasa de calitate anatomică, clasa A. Temperatura de tranziție pentru lemnul de molid este în jurul valorii de  $65 - 70^{\circ}\text{C}$  pentru cel din clasa A, iar pentru cel din clasa D,  $60^{\circ}\text{C}$ . În cazul lemnului de paltin, temperatura de tranziție  $T_g$  este de aproximativ  $85\div 90^{\circ}\text{C}$  pentru probele din clasele C și D, în comparație cu temperatura de tranziție atinsă de probele cu fibră crețată și densă (clasele A și B), care ajunge la valori de  $55\div 80^{\circ}\text{C}$ . În cazul probelor de salcâm netratate modulul de conservare  $E'$  crește ușor până la temperatura de  $75\div 80^{\circ}\text{C}$ , apoi se înregistrează o tendință de scădere, comparativ cu probele tratate cu vapori de amoniac, unde modulul de conservare rămâne constant ca valoare între  $30\text{-}65^{\circ}\text{C}$ , după care, se observă o creștere între  $65$  și  $100^{\circ}\text{C}$ , indiferent de frecvența de solicitare.

Rezultatele cercetărilor prezentate în acest capitol fac parte din Raportul tehnico-științific – aferent etapelor I/2020 și II/2021 al proiectului **PN-III-P2-2.1-PED-2019-2148**, contract **nr. 568PED/2020** *Modele inovative de viori comparabile acustic și estetic cu viorile de patrimoniu – MINOVIS* (2020 – 2022), cât și din rezultatele proiectului **PN-III-P2-2.1-BG 85/2016** *Soluții integrative de creștere a performanței economice prin optimizarea proprietăților rigido-elastice și stabilității structurale a chitarelor de fabricație românească – SINOPTIC* (2016-2018); dar au fost și diseminate sub formă de articole ISI sau la evenimente științifice:

### ISI

1. Dinulică, F.; **Stanciu, M.D.**; Savin, A. Correlation between Anatomical Grading and Acoustic–Elastic Properties of Resonant Spruce Wood Used for Musical Instruments. *Forests* 2021, 12,1122. <https://doi.org/10.3390/f12081122>. (F.I.=2.633, SRI=1.314).
2. **Stanciu M.D.**, Șova D., Savin A., Iliăș N., Gorbacheva Galina, Physical and Mechanical Properties of Ammonia- Treated Black Locust Wood, *Polymers* 2020, 12, 377;doi:10.3390/polym12020377,file:///C:/Users/Stanciu%20Mariana/Downloads/polymers-12-00377.pdf (FI 2020 3.164 SRI: 1.913/FI 2021=4.329; SRI=2.037).
3. Dinulica F., Albu C. T., Vasilescu M.M., **Stanciu M.D.** *Bark Features for Identifying Resonance Spruce Standing Timber*, *Forests*, 10, 799; 2019
4. Crețu C.N., Rosca I.C., **Stanciu M.D.**, Cerbu C., Gliga V.Gh., *Wave velocities in special kind of wood used in violin manufacture*, *Experimental Mechanics – in evaluare*.

### Proceeding ISI

5. Stanciu, M.D., Gliga, V. G., Georgescu, S.V., Savin, A., G. Dobrescu, G. Non-Destructive Determination of the Elastic and Acoustic Properties of Resonant Wood Used in the Manufacture of Violins, *The International Conference Modern Technologies in Industrial*

Engineering ModTech2021, 23 – 26.06.2021, online, <https://modtech.ro/conference/book-of-abstracts.php#gsc.tab=0>

6. **Stanciu M D**, Dinulică F and Cîrstea I C, Physical and mechanical characterization of resonance spruce (Picea Abies L), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 916 (2020) 012112 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/916/1/012112, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/916/1/012112/pdf>.

#### *Conferințe internaționale*

7. **Stanciu M.D.**, Dinulica F., Gliga Gh. V., Campean M. Structural patterns of resonance wood used in violin constructions, in Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Composite Materials Engineering COMAT 2020, The 3rd International Conference on Experimental Mechanics in Engineering, ISSN 2457-8541, Brașov, ROMANIA, 29-31 October 2020, p. 136 – 141
8. **Stanciu M.D.**, Șova D., Savin A., Ilias N. Behavior of black locust wood subjected to cyclic bending, International Symposium "Forest Complex In The Digital Economy", dedicated to the 100th anniversary of the foundation of Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, 2- 5 Decembrie 2019, Moscova, Federația Rusă.

#### **Reviste BDI**

Stanciu M.D., Curtu I., Grimberg R., Savin A.: Research regarding the complex modulus determined with dynamic mechanical analysis (DMA) in case of beech (fagus silvatica l.) And alder (alnus glutinosa gaertn), in Proligno, vol. 9, nr. 4/2013, ISSN 2069-7430, ISSN –L 1841-4737, Indexata CABI, EBSCO, DOAJ, DRJI, p. 587-593

#### ***Direcții viitoare de cercetare***

Printre direcțiile viitoare de cercetare referitoare la tematica abordată în capitolul 2, se pot regăsi următoarele:

- Determinarea proprietăților elastice și acustice ale probelor din lemn de rezonanță supuse diferitelor tratamente de suprafață (specifice industriei instrumentelor muzicale), de tipul acoperirilor cu substanțe de finisare; tratare cu soluție salină; umplerea porilor cu pulberi ceramice, activități ce au fost cuprinse în propunerea de proiect din competiția PCE2021 „Analiza calitativă, dinamică și acustică a sistemelor anizotrope cu interfețe modificate”(ACADIA)
- Extinderea cercetărilor asupra altor specii lemnoase utilizate în construcția instrumentelor muzicale cu corzi, folosite pentru alte structuri (lemn de abanos – tastiera viorii, lemn de palisandru, lemn de cedru, lemn de mahon) sau compozite lignocelulozice, pe baza aceluiași principii de testare, descrise în capitolul 2.



### **Capitolul 3. Comportarea statică și dinamică a structurilor complexe lignocelulozice din construcția instrumentelor muzicale cu corzi**

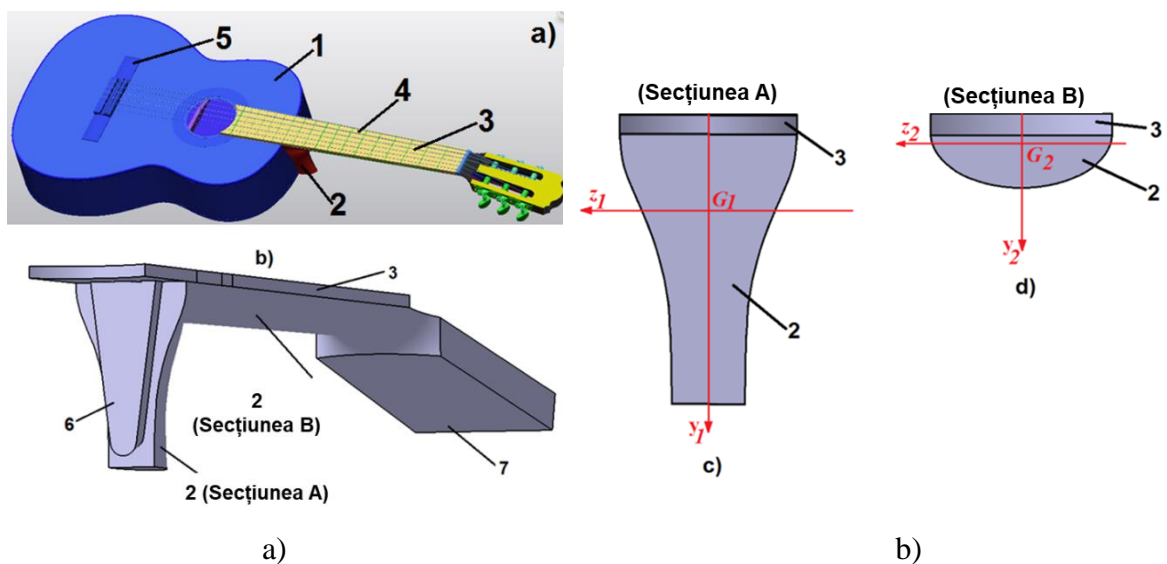
Capitolul 3 intitulat *Comportarea statică și dinamică a structurilor complexe lignocelulozice din construcția instrumentelor muzicale cu corzi*, este organizat pe două componente: analiza statică a subansamblelor și ansamblelor din construcția chitarei, din perspectiva factorilor ce influențează comportarea lor în timp, respectiv analiza dinamică a corpurilor de vioară în corelație cu structura și speciile lemnoase. Astfel, fiecare subcapitol se constituie într-un studiu de caz.

#### **3.1 Analiza mecanică a subansamblelor și ansamblelor din construcția chitarei, din perspectiva factorilor ce influențează comportarea lor în timp**

În timpul interpretării muzicale de lungă durată, cele mai frecvente probleme privind calitatea acustică a instrumentelor muzicale cu corzi ciupite (chitara) se datorează instabilității dimensionale a gâtului și a corpului chitarei ca urmare, lungimea de coardă se modifică ducând astfel la emiterea unor frecvențe diferite de cele ale sunetelor muzicale dorite, considerate de artiști sunete false. Această problemă a constituit tematica de studiu aplicativ și industrial în cazul proiectului coordonat de autoarea tezei de abilitare, **PN-III-P2-2.1-BG 85/2016 Soluții integrative de creștere a performanței economice prin optimizarea proprietăților rigido-elastice și stabilității structurale a chitarelor de fabricație românească – SINOPTIC (2016-2018)**, avînd ca partener agentul economic S.C. Hora S.A Reghin, care a pus la dispoziție infrastructura industrială și de cercetare pentru investigarea factorilor ce conduc la instabilitatea structurală a chitarelor. Studiile au avut în vedere subansamblele – gât, respectiv corp, precum și ansamblul – chitara.

Gâtului de chitară este un subansamblu compus din tastatieră și gât, având o secțiune transversală variabilă și o structură stratificată. Acest subansamblu stratificat, în timpul tensionării corzilor (ca urmare a acordării instrumentului și interpretării muzicale), este supus unor tensiuni de lungă durată și unor variații locale de temperatură și umiditate relativă a aerului. Gândind în termeni mecanici, putem spune că această sub-structură este supusă atât efectului mecano-sorptiv al lemnului cât și tensiunilor din corzi, cei doi factori ducând la deformarea structurii.

În **Figura 3.1** sunt prezentate principalele elemente constructive ale chitarei clasice. Din punct de vedere mecanic, gâtul chitarei este o grindă stratificată de egală rezistență, supusă la încovoiere și torsiune, fiind realizată din lemn masiv din specii precum *paltin*, *fag*, *mahon*, *cedru*. Astfel, în stare de repaus, dar încărcată cu forțele/cuplurile date de tensiune din corzile acordate, gâtul chitarei satisface criteriile unei bare de egală rezistență. Complexitatea fenomenului crește o dată cu eforturile dezvoltate în structura gâtului în timpul interpretării, respectiv la solicitări variabile în timp [160; 165].



**Figura 3.1.** Chitara ca sistem mecanic: a) elementele principale ale chitarei (1 – corpul de chitară; 2 – gâtul; 3 – tastiera; 4 - corzi; 5 – cordar); b) geometria gâtului de chitară; c) secțiunea din zona de îmbinare a gâtului cu corpul; d) secțiunea B – a gâtului de chitară

În funcție de gradul de solicitare, materialele acestui subansamblu sunt supuse solicitărilor în domeniul elastic, iar uneori apar și deformări plastice. Deformarea plastică a acestui subansamblu poate avea un efect catastrofal asupra proprietăților acustice ale chitarei. Mai mult, modul în care componentele sunt prelucrate și finisate mecanic contribuie la acumularea de tensiuni interne care sunt vizibile în timp, manifestate prin deformările întregii sub-structuri [57; 152]. Datorită structurii sale anizotrope, cu trei plane de simetrie elastică, direcția deformațiilor maxime ale lemnului nu coincide cu direcția tensiunilor maxime. Corelația dintre sarcini și deplasări, respectiv

Între tensiuni și deformații, se reprezintă grafic sub forma curbelor caracteristice  $\sigma = f(x)$ . Forma acestor curbe, pentru diferite solicitări precum și în diferite plane ale lemnului (LR, LT, TR), sau în diferite direcții scoate în evidență zona de elasticitate (porțiunea dreaptă), de proporționalitate (unde  $\sigma \sim \varepsilon$  și până unde este valabilă legea lui Hooke ( $\sigma = E\varepsilon$ ), zona de curgere și limita de rupere. Forma curbelor caracteristice,  $\sigma = f(\varepsilon)$ , este dependentă și de modul de variație a intensității forțelor în timp, respectiv de faptul dacă acestea sunt statice sau dinamice, constante sau variabile brusc (cu șoc) sau acestea sunt statice între anumite valori maxime și minime [44]. Se remarcă în mod deosebit influența înclinării fibrelor față de direcția forțelor precum și influența mărimii pieselor de lemn asupra mărimii tensiunilor de curgere și rupere, precum și asupra deformațiilor acestor piese. Structura lemnului și comportarea sa în timp sub diferite sarcini la o anumită umiditate și temperatură, îi conferă condiția de material elasto-plastic. Pentru materialele elasto-plactice, diagrama caracteristică nu exprimă toate aspectele deformației. Studiile au arătat că procesul de deformare a lemnului, cât și a unor materiale pe bază de lemn, nu se reduce numai la o modificare instantanee de formă, care apare după aplicarea sarcinilor, ci există un proces continuu de deformare sub sarcină, denumit curgere lentă (Figura 3.2). Astfel, distribuția tensiunilor din gâtul de chitară se modifică în timp ca lege de variație și poziție a axei neutre, ajungând în domeniul plastic. Pentru structuri similare cum sunt elementele din construcții, în anumite condiții de umiditate și temperatură, sub acțiune sarcinilor mari, care se exercită îndelungat, deformațiile cresc, ajungând să se producă ruperea.

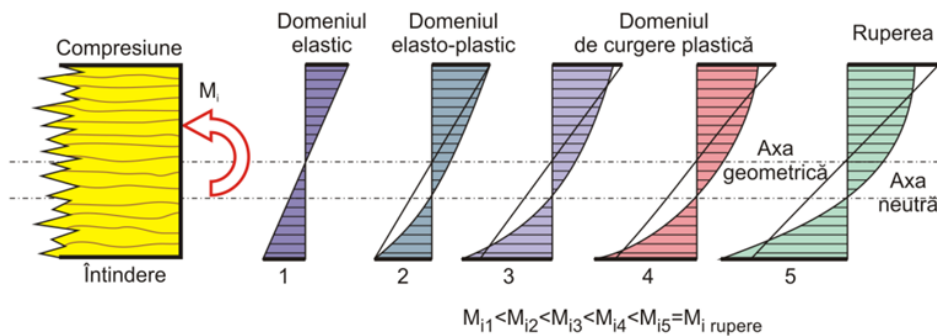


Figura 3.2. Modificarea distribuției tensiunilor normale ca urmare a încovoierii de lungă durată a lemnului [167, 174]

Comportarea vâsco-elastică al lemnului ca material de bază pentru instrumentele muzicale este puternic afectat de variațiile conținutului de umiditate, de tehnologia utilizată de uscare, de tensiunile acumulate în timpul prelucrărilor mecanice de la semifabricate la produsul final, de condițiile climatice în care sunt utilizate instrumentele muzicale [72; 165]. Numeroase studii evidențiază efectele variațiilor de temperatură și umiditate relativă a aerului care duce la variații ale conținutului de umiditate al lemnului asupra fenomenelor mecano-sorptive ale lemnului [25; 74; 80]. Printre aceste referințe cităm unele foarte recente, și anume [34; 122; 189], în care sunt

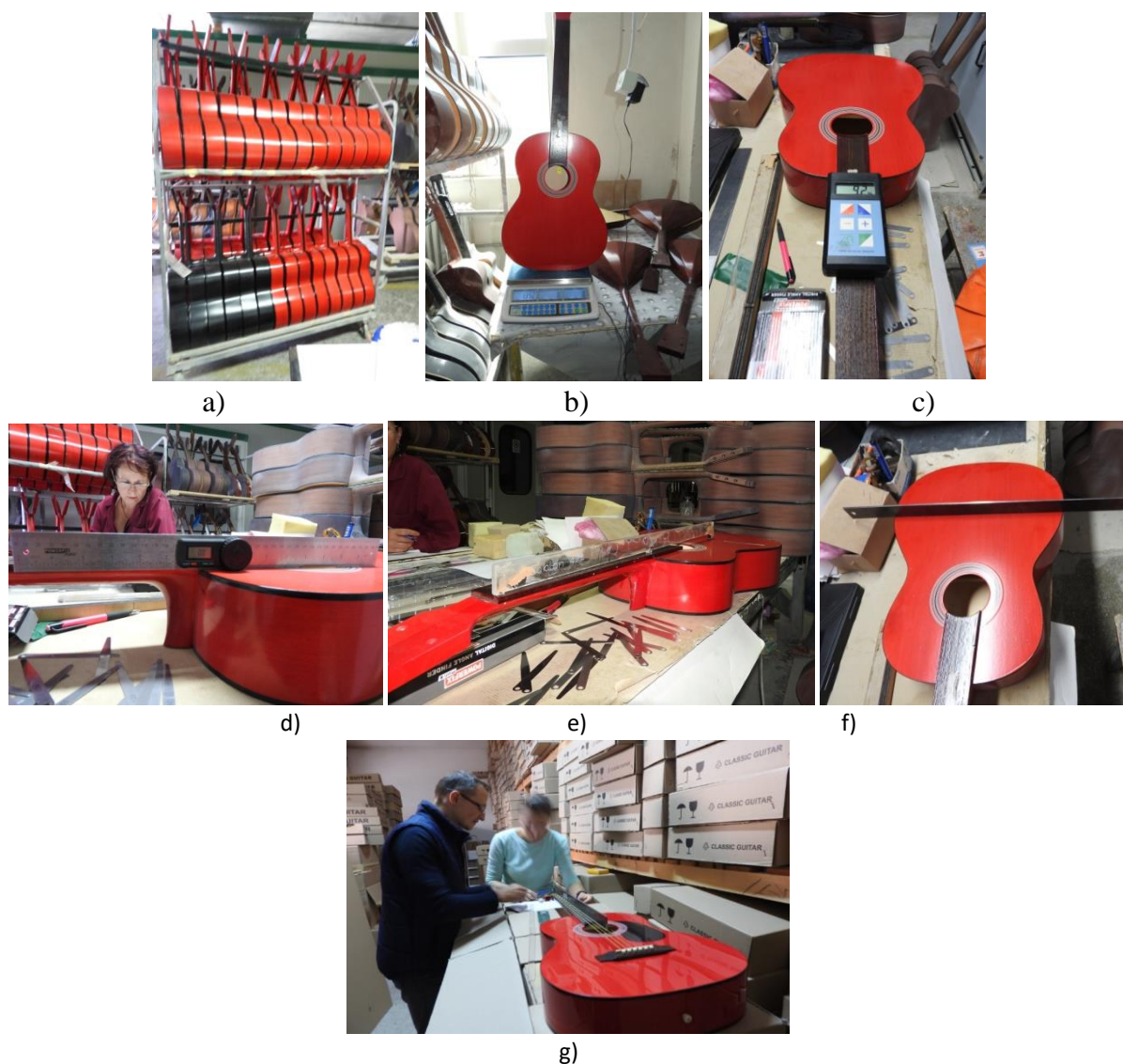


subliniate tensiunile și deformațiile induse de umiditate în timpul proceselor de uscare sau absorbție de umiditate. [80] a introdus parametrul *numit raport de higro-expansiune* ca raport între umflare (în procente) și conținutul de umiditate de echilibru. El a dezvoltat modele matematice care descriu comportarea speciilor de lemn de rășinoase supuse la încovoiere, în funcție de conținutul de umiditate al lemnului și de distribuția umidității relative a aerului din mediu în jurul speciilor. [97] au studiat deformațiile mecanico-sorptive datorită interacțiunii dintre tensiune și variațiile conținutului de umiditate. Aceste studii au fost efectuate pe probe de dimensiuni mici. [3] a efectuat o serie de teste de laborator pentru a determina parametrii necesari modelării structurilor din lemn și pentru a măsura experimental tensiunile induse de umiditate în probe de glulam (lemn lamental încleiat) supus umectării/uscării. [20; 81] au remarcat că, în comparație cu exemplarele mici, probele mari din lemn au un comportament diferit de higroexpansiune. Prin urmare, în general, este nevoie de cercetări suplimentare asupra comportamentului mecano-sorptiv al elementelor structurale din lemn de dimensiuni reale, cum este gâtul de chitară clasică. Studiind literatura de specialitate, s-a constatat că informațiile privind structurile lignocelulozice stratificate precum gâtul de chitară, sunt foarte reduse în comparație cu literatura referitoare la dinamica și acustica corpului chitara.

### 3.1.1 Influența proceselor tehnologice asupra stabilității dimensionale a chitărelor

Cercetările aplicative și industriale întreprinse de autoare și echipa de lucru, au evidențiat următoarele cazuri de deformări ale ansamblului corpului/gâtului de chitară: gâtul deformat (încovoiat pozitiv în zona tastei 12 (Figura 3.3, a), gâtul deformat prin încovoiere negativă (Figura 3.3, b); gâtul drept dar fața încovoiată pozitiv (Figura 3.3, c), încovoiere negativă a plăcii față de axa z (Figura 3.3d), încovoiere pozitivă/ negativă a corpului față de axa z (Figura 3.3, e). Rezultatele au fost colectate prin măsurarea și urmărirea parametrilor pe un lot de 85 chitare tip MT 4/4, aflate în diferite etape tehnologice de realizare a produsului finit și apoi depozitate în magazia fabricii. Măsurătorile s-au realizat pe perioada mai-septembrie 2017. Principiul de măsurare a constat în cântărirea probelor și măsurarea rectilinității gâtului de chitară raportată la un plan longitudinal tangent la gradații.





*Figura 3.3. Etapele procesului de măsurare a deformațiilor structurii chitarelor clasice: a) o parte din lotul de chitare investigate; b) cântărirea probei; c) determinarea conținutului de umiditate a lemnului din structura gâtului; d) măsurarea rectilinității corp-gât; e) măsurarea planeității feței (încovoierea în zona cordarului); f) verificarea înălțimii corespunzătoare a corzilor în zona prăgușului, gradația a 12 a și cordar; g) verificarea dimensiunilor în depozit*

Aceste deformații apar atât pe parcursul proceselor tehnologice, acumulându-se tensiuni remanente care în timp produc deformații plastice ale elementelor din construcția instrumentului muzical, sau ca urmare a tensionării corzilor. Analizând deformațiile în timpul operațiilor tehnologice principale, s-a observat că există câteva operații tehnologice cheie: cele mai multe deformări sunt înregistrate după planare (frezarea tastaturii) - peste 51% din chitarele măsurate. Se poate considera că poziția piesei de lemn pe masa mașinii joacă un rol important. Deoarece gâtul este susținut în zona prăgușului și în zona găurii acustice, din punct de vedere mecanic, gâtul se comportă ca o grindă rezemată la un capăt și fixată în celălalt capăt. Deoarece între suporturi acționează forța de așchiere (frezare), gâtul se încovoie (Figura 3.4). De asemenea, alte cauze privind deformațiile pot fi datorate morfologiei suprafețelor tastelor rezultate din prelucrarea

mecanică anterioară (Figura 3.5). După operația de finisare, 97% din probe au fost plate (deplasarea maximă a fost mai mică de  $\pm 1$  mm). Și în timpul depozitării produselor finite, ca urmare a comportării vâscoelastice a lemnului, o parte din chitarele măsurate au prezentat o ușoară creștere a deformațiilor (Figura 3.6).

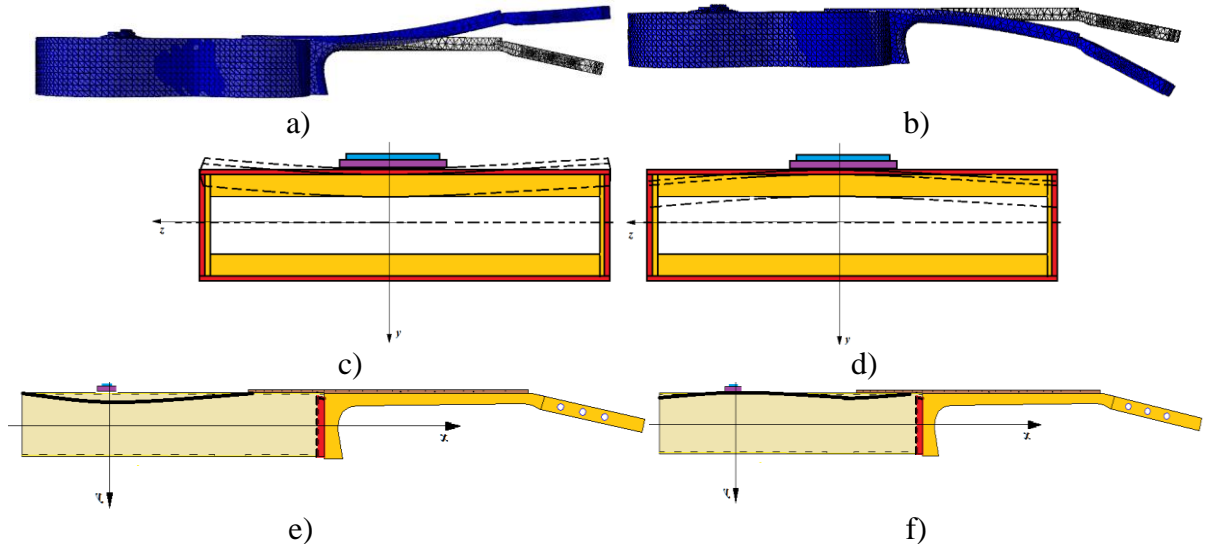


Figura 3.4. Tipuri de deformații ale chitarei: a) încovoierea pozitivă a gâtului; b) încovoierea negativă a gâtului; c) încovoierea pozitivă a corpului față de axa longitudinală; d) încovoierea negativă a corpului față de axa longitudinală; e) ) încovoierea pozitivă a corpului față de axa z; d) încovoierea negativă a corpului față de axa z.

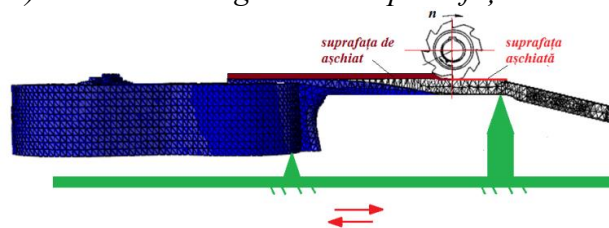


Figura 3.5. Schema procesului de planare a gâtului de chitară

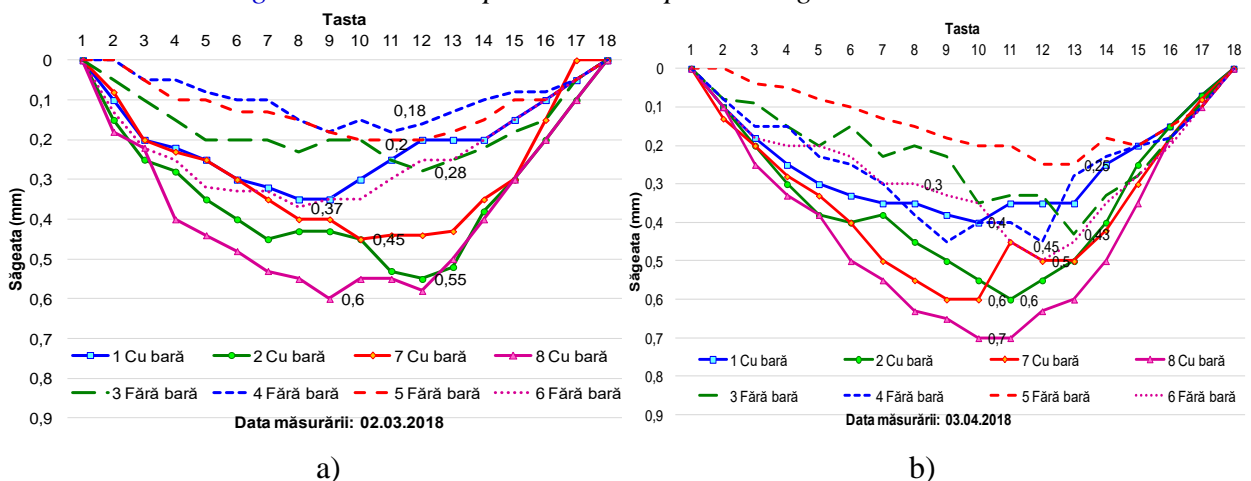


Figura 3.6. Deplasările punctelor de pe tastieră ca urmare a încovoierii gâtului de chitară: a) imediat după fabricație; b) după depozitarea timp de 30 zile

În urma activităților de cercetare întreprinse în fabrică și în laboratoarele de cercetare, s-a realizat, în prima etapă, o analiză cantitativă și calitativă a defectelor de stabilitate structurală analizând

aspectele *tehnologice* – abateri de la planeitate, rectilinitate ș.a.; *influența structurii anizotropice a lemnului* utilizat în structura chitarei care duce la deformații ce depășesc condițiile de rigiditate necesare; *mecanice* – apariția fenomenelor reologice (relaxarea lemnului după ce a fost supus la solicitările din timpul prelucrărilor mecanice, detensionarea/ tensionarea din cadrul subansamblelor și a întregii chitare; *condițiile ambientale* de păstrare a instrumentelor muzicale – umiditatea lemnului, umiditatea și temperatura mediului ambiant. Toate măsurătorile și rezultatele au fost prezentate reprezentanților fabricii în cadrul ședințelor/workshop-urilor organizate, fiind puse la dispoziția forurilor de decizie. În a doua etapă, au fost analizate comportările reologice ale chitarelor atât în condiții de laborator (cu parametrii constanți ai aerului cât și cu varierea parametrilor aerului în camera climatică), în condiții reale de păstrare a chitarelor în fabrică, precum și în condiții naturale de mediu. S-au testat atât chitare fără modificări constructive cât și chitare cu diferite modificări: diferite tije de ranforsare a gâtului (ca formă și material), diferite modalități de rigidizare a zonei de încastrare a gâtului de corpul chitarei; diferite tehnologii de realizare a subansamblului gât (asamblarea de corpul chitarei a gâtului cu tastiera atașată în prealabil – tehnologia inițială; asamblarea corpului de chitară cu gâtul, frezarea canalului pentru bara de rigidizare și aplicarea ulterioară a tastierei; asamblarea corpului de chitară cu gâtul pregătit în prealabil cu toate componentele – gât, bară, tastieră). Întrucât în fabrică se produc peste 45000 de instrumente muzicale cu corzi ciupite (chitarele având ponderea cea mai ridicată), acestea având specificații în funcție de comandă și beneficiar, modelele fizice îmbunătățite au fost implementate prin integrarea lor în fluxul tehnologic concomitent cu îmbunătățirea proceselor tehnologice, care a constat în: reorganizarea liniei de producție, adaptarea fluxului tehnologic, elaborarea fișelor tehnologice, instruirea resursei umane (operatorilor umani), setarea/ajustarea parametrilor funcționali la echipamentele de pe flux, normarea activității de producție, verificarea randamentului activităților prin măsurători cantitative și calitative a produselor finale. Toate chitarele produse cu modificări constructive au fost livrate beneficiarilor externi și interni.

### **Rezultatele au fost publicate în**

1. **Stanciu M.D.**, Teodorescu Draghicescu H., Ursarescu A., Labont P.C., Bit C., *Numerical And Experimental Approach Of Behaviour Of The Wood Based Composite Subjected To Cyclic Bending*, in Proceeding of International Conference “Wood Science and Engineering in the Third Millennium” - ICWSE 2017, p.253-260
2. **Stanciu M. D.**, Lăbonț P.C., Târnoveanu C., Bege H, Munteanu M.V.: *Comparison Between Numerical and Physical Model of Lignocellules Materials Subjected to Cyclic Bending*, in

Proceeding of The 7<sup>th</sup> International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC 2017, p. 15-18.

3. **Stanciu M.D.**, Munteanu M.V, Georgescu S.V., Urucu I.Șt., Duță P.G. *Analysis of Lignocellulose Structures Deformations by Quantitative and Qualitative Methods* in Proceeding of The 7<sup>th</sup> International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC 2017, p. 87-92.

4. **Stanciu M.D.**, Ardeleanu A.F. Teodorescu Draghicescu H, (2018) Reverse engineering in finite element analysis of the behaviour of lignocellulosic materials subjected to cyclic stresses, in Procedia Manufacturing 22 (2018), pp 65-72, 11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2017, 5-6 October 2017, Tirgu Mures, Romania <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918303056>

5. **Stanciu M.D.**, Bucur V., Valcea C. S., Savin A., Sturm R., Oak particles size effects on viscous-elastic properties of wood polyester resin composite submitted to ultraviolet radiation, Wood Sci Technol 52(2): 365-382 (2018) <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-017-0971-0>

6. **Stanciu M.D.**, Bucur V., Munteanu M.V., Georgescu S.V., Năstac S.M. Moisture induced deformation in the neck of a classical guitar, in Holzforschung, 2019, Vol 73(4):371-379 <https://www.degruyter.com/view/j/hfsg.2019.73.issue-4/issue-files/hfsg.2019.73.issue-4.xml>

#### Și prezentate în cadrul evenimentelor științifice

1) "Absolvenți în Fața Companiilor 2017 (AFCO)" – eveniment organizat de Universitatea Transilvania din Brașov în perioada 9-10 mai 2017, cu poster-ul: *Îmbunătățirea stabilității dimensionale a chitarelor clasice prin metoda 8D, autori Duță P.G, Urucu I. Șt.*

2) Noaptea Cercetătorilor Europeni 2017 organizat în 29 septembrie 2017 la Brașov, cu tema: *Instrumentele muzicale cu corzi – între artă, mecanică și acustică.*



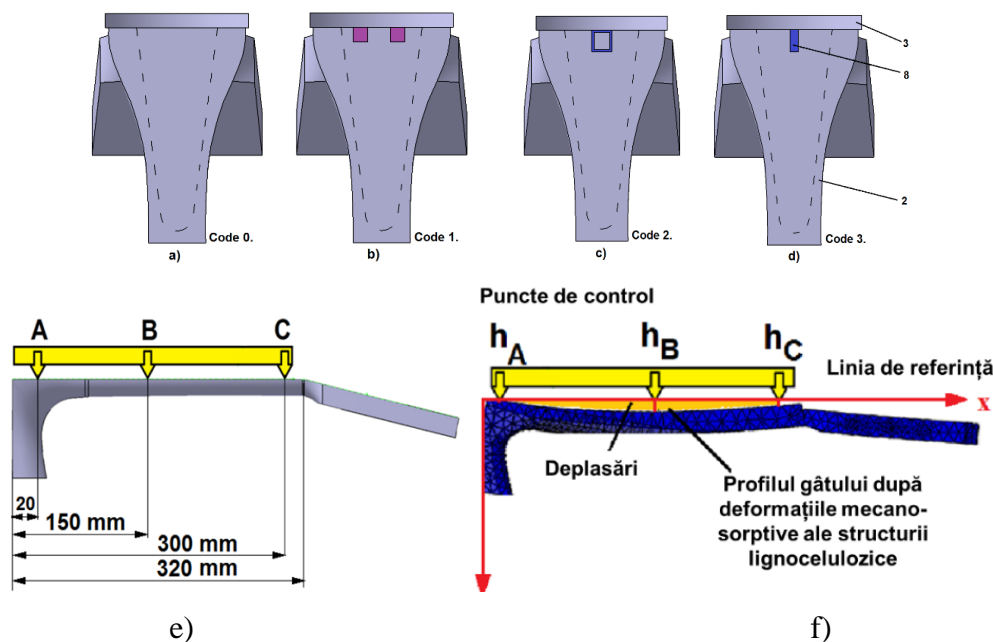
Fotografie cu echipa proiectului PN-III-P2-2.1-BG 85/2016 *Soluții integrative de creștere a performanței economice prin optimizarea proprietăților rigido-elastice și stabilității structurale a chitarelor de fabricație românească – SINOPTIC* (2016-2018), la Workshop-ul nr. 1, 25.11.2016



### 3.1.2 Influența umidității aerului asupra deformațiilor gâturilor de chitară

#### *Materiale și metoda de investigare*

În funcție de modelul de chitară și tipul de produs solicitat de beneficiari, în structura gâtului de chitară se utilizează diferite specii lemnoase atât pentru gâtul propriu-zis cât și pentru tastieră. Astfel, gâtul este realizat din specii indigene precum lemnul de paltin – *Acer Pseudoplatanus* (în procent de 80%), fag *Fagus sylvatica* (10%), sau specii exotice precum mahon și cedru [160–167]. Tastiera este realizată din specii autohtone precum salcâm, fag termotratat sau specii exotice precum palisandru, sonokeling, abanos, iar din punct de vedere mecanic, rigiditatea gâtului este obținută prin utilizarea diferitelor tipuri de ranforsări, așa cum se poate observa în [Figura 3.7](#).



**Figura 3.7.** Tipuri de structuri de gâturi de chitară a) gât de chitară din lemn de paltin cu tastieră din salcâm și gradații inserate, fără ranforsare; b) gât de chitară din lemn de paltin cu tastieră din salcâm și gradații inserate, cu ranforsare din două bare din lemn de salcâm; c) gât de chitară din lemn de paltin cu tastieră din salcâm și gradații inserate, cu ranforsare din țevă pătrată din oțel; d) gât de chitară din lemn de paltin cu tastieră din salcâm și ranforsată cu bară dreptunghiulară din oțel; e) poziționarea punctelor de control dimensional; f) principiul de măsurare a deplasărilor punctelor de control în timpul testelor (legenda: 2 – gât; 3 – tastiera; 8 – element de ranforsare);

Testul în camera climatică a constat în urmărirea în timp a deformațiilor structurilor ca urmare a variației de umiditate relativă a aerului din mediul controlat. Astfel, s-au măsurat pe parcursul testului următorii parametri: masa, conținutul de umiditate al lemnului în 3 puncte și abaterile de la rectilitate și planeitate, conform schemei de verificare din [Figura 3.7 e și f](#). Pentru a analiza influența variațiilor de umiditate asupra stabilității structurale ale gâturilor de chitară cu diferite sisteme de rigidizare și specii diferite, s-au grupat probele în două categorii: probe libere, individuale introduse în camera climatică ([Figura 3.8, a](#)); probe fixate într-un dispozitiv foarte

rigid din oțel (un stand multiplu) simulând astfel asamblarea ideală dintre corp și gâtul de chitară (Figura 3.8, b).

Camera climatică utilizată pentru analiza fenomenelor mecano-sorptive ale lemnului, este o instalație ce constă dintr-o cameră de testare din oțel inoxidabil, cu o capacitate de 0.28 m<sup>3</sup>, prevăzută cu două traductoare pentru măsurarea temperaturii și un traductor capacitiv pentru măsurarea umidității relative (Figura 3.8, c). Instalația permite efectuarea unor tratamente termice complexe, cu durate de ordinul zilelor, prin combinarea a diferite valori ale temperaturii și umidității relative a aerului în intervalele -40...+100°C și respective 10...98%, în condițiile conducerii complet automate a procesului. Soft-ul opțional FKS WinControl permite preluarea automată a datelor și transpunerea lor în forma grafică (diagramă) sau tabelară, precum și prelucrarea statistică a datelor.



a)



b)

*Figura 3.8. Măsurarea deformațiilor mecano-sorptive ale gâturilor de chitară: a) măsurarea rectilinității și planeității gâturilor de chitară supuse la variații de umiditate relativă a aerului; b) camera climatică*

### ***Structuri libere supuse variațiilor de umiditate***

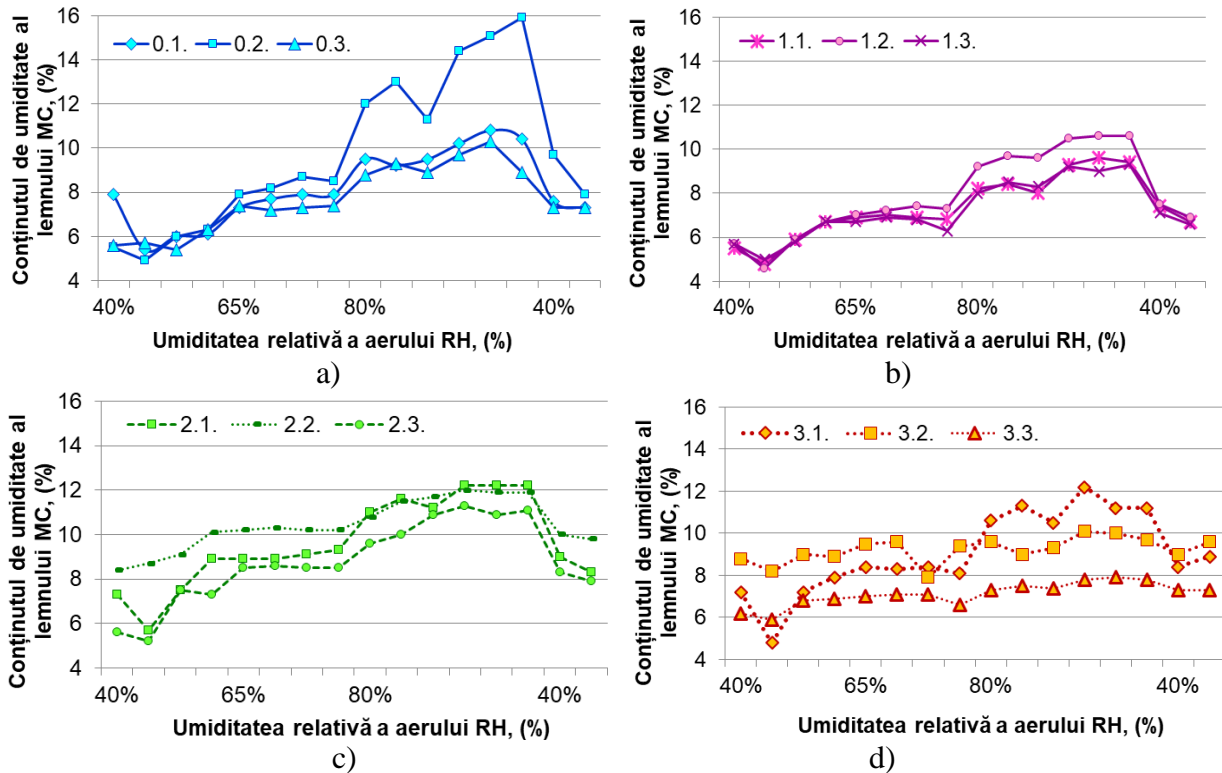
În Tabelul 3.1. sunt prezentate datele privind tipurile de gâturi de chitară testate în camera climatică. Procedura de verificare dimesinonală a probelor a constat din măsurarea inițială a următorilor parametrii: masa, conținutul de umiditate al lemnului în 3 puncte (A pragus, B zona intermediară, C - tasta 12) și planeitatea care, ulterior au fost măsuși cu o periodicitate de 24 - 72 ore, timp de 24 zile (576 ore), fiind supuse la regimul de umiditate relativă a aerului conform diagramei din Figura 3.9. Inițial, probele au fost menținute la umiditatea relativă a aerului (RH) de 40% timp de 144 ore pentru a obține stabilizarea probelor, valoarea de 40% fiind similară cu cea a mediului extern din lunile iunie-iulie la Brașov (România). Rata de creștere a RH a fost de 1%/min. Probele au fost supuse timp de 576 h la următoarele regimuri de umiditate relativă până





## Rezultate și discuții

Variațiile conținutului de umiditate a lemnului în funcție de umiditatea relativă a aerului din camera climatică sunt prezentate în **Figura 3.10**. Proba realizată din salâm și paltin (eșantionul 0.2.) a prezentat cea mai mare creștere a conținutului de umiditate (o creștere de 100%) la o umiditate a aerului de 80%, comparativ cu conținutul de umiditate inițial (8%) (**Figura 3.10, a**).



**Figura 3.10.** Variația umidității lemnului în funcție de umiditatea relativă a aerului în cazul: a) gâtului neranforsat de chitară; b) gâtului armat cu bare de lemn; c) gâtului armat cu țeavă pătrată; d) gâtului armat cu bară dreptunghiulară

Eșantioanele 0.1. (paltin+salcâm)) și 0.3. (cedru + abanos) au o comportare similară în ceea ce privește absorbția de umiditate. Gâtul de chitară neranforsat cu bare din lemn (eșantioanele 1.1., 1.2., 1.3.) prezintă un comportament similar, cu o variație redusă la umiditatea relativă de 80% (**Figura 3.10, b**). În cazul armării cu țeavă de oțel - secțiune pătrată, cea mai mică variație (50%) a MC a fost înregistrată în combinații cu cedru și palisandru (proba 2.2.), Celelalte variante înregistrează o creștere a conținutului de umiditate de 100% (de la 6% la 12% MC) (**Figura 3.10, c**). Proba din paltin și palisandru armat cu o platbandă, cu secțiune dreptunghiulară (codificat 3.3.) prezintă cea mai redusă absorbție de umiditate MC (între 6 și 8%), fiind cel mai stabil eșantion (**Figura 3.10, d**). Variația masei  $\Delta m$  (%) a fost calculată cu relația (3.1):

$$(\%)\Delta m_i = (m_i * 100/m_0) - 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

unde  $m_i$  este valoarea masei măsurate la momentul  $t$  în timpul perioadei de testare;  $m_0$  este masa inițială a probei înainte de condiționare în camera climatică.

Variațiile maselor diferă de la eșantion la eșantion, în funcție de speciile de lemn și de armare (Figura 3.11). Cu toate acestea, tendințele generale ale curbelor sunt aceleași pentru toate exemplarele. Această variație este între +2% și -2%.

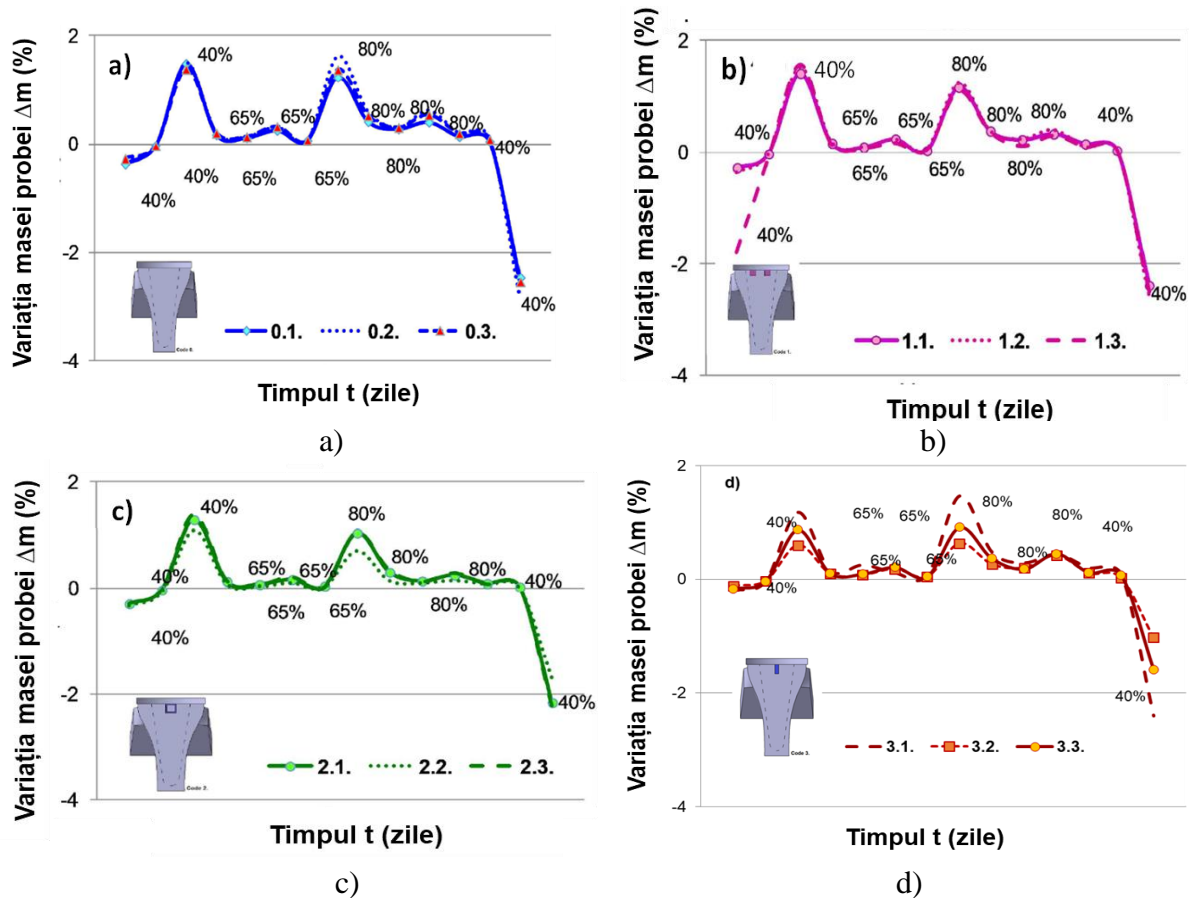
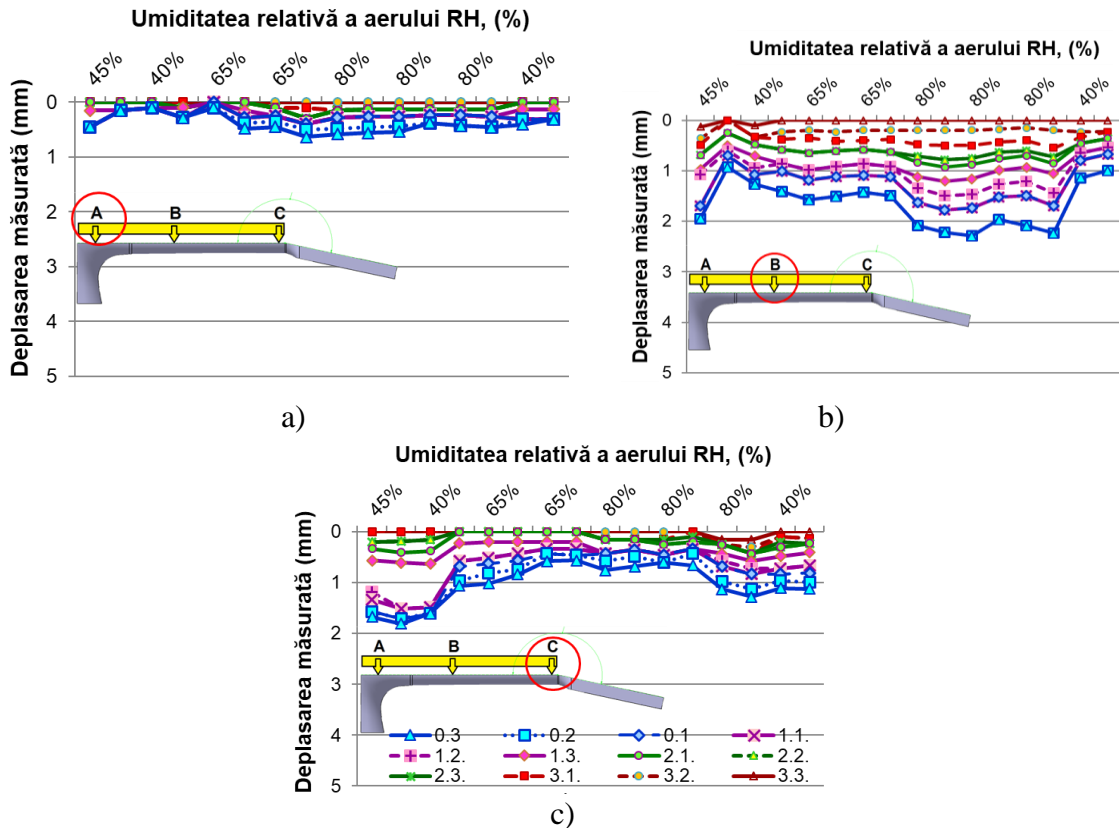


Figura 3.11. Variația masei de la o etapă la alta de testare: a) probele neranforsate; b) probele ranforsate cu bare din lemn; c) probele ranforsate cu țevă pătrată; d) probele ranforsate cu platbandă

În cazul structurilor simple (probele 0.1, 0.2, 0.3), toate cele trei probe prezintă o variație similară (Figura 3.11, a). O mică diferență în absorbția umidității este observată pentru proba 0.1 (paltin și salcâm tratat cu vapori de amoniac) la 80% RH. Probele întărite cu două bare în lemn (1.1, 1.2, 1.3), (Figura 3.11, b) prezintă o variație de masă similară ca și în cazul probelor 0.1, 0.2, 0.3 deoarece aceleași specii de lemn (paltin/salcâm) au fost utilizate pentru construcția probelor codificate 0 și 1. În cazul eșantioanelor armate cu o țevă metalică cu secțiunea transversală pătrată, proba din lemn de cedru și palisandru (codificat 2.2) a avut variații mai mici de masă comparativ cu eșantioanele 2.1 și 2.3 din paltin și palisandru (Figura 3.11, c). Influența speciilor de lemn asupra comportamentului mecanosorptiv este cel mai bine observabilă, în cazul probelor rigidizate cu o bară de oțel cu secțiune transversală dreptunghiulară (Figura 3.11, d). Cele mai scăzute valori de  $\Delta m$  au fost observate pentru eșantioanele din lemn de cedru și palisandru, ambele specii exotice (eșantionul 3.2), iar cele mai mari diferențe de masă, pentru probele din lemn de paltin și salcâm (eșantionul 3.1).

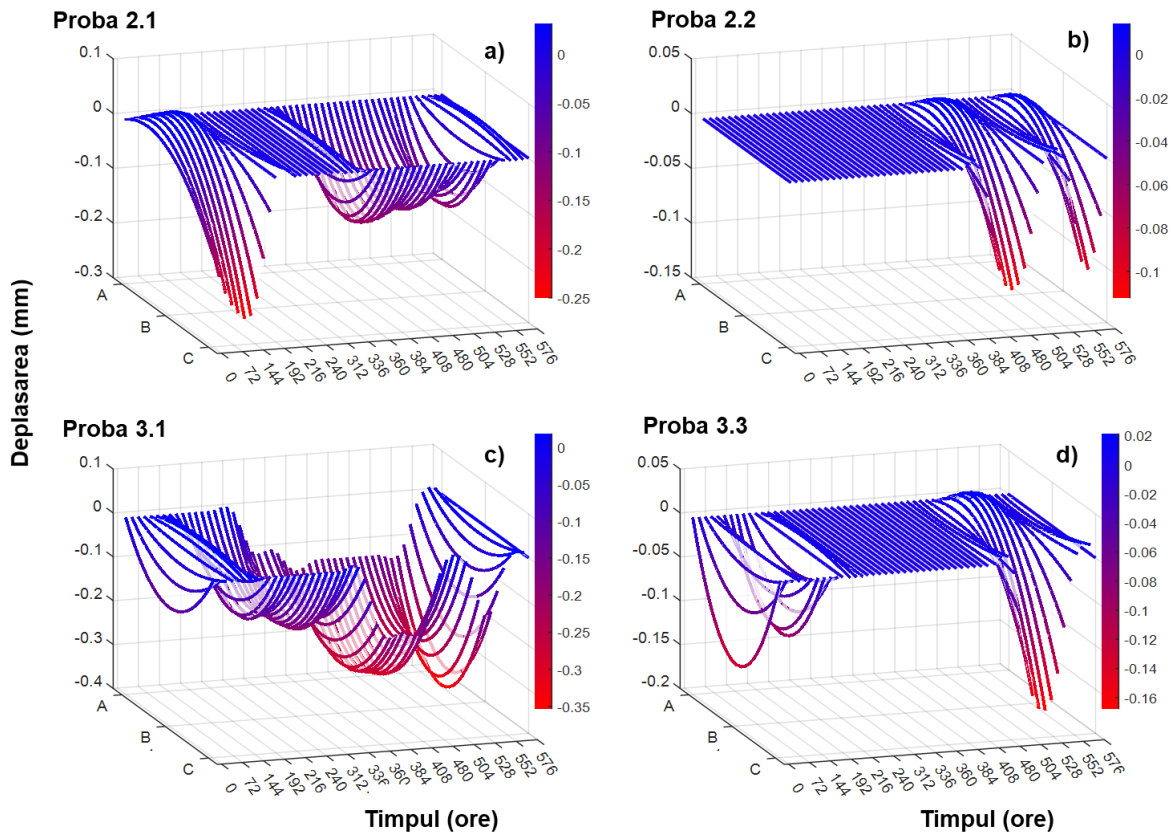
În **Figura 3.12** se prezintă variația deplasării în funcție de creșterea RH în trei puncte critice A, B și C: în punctul A, valorile deplasării maxime au variat între 0.5 și 0.7 mm, la umiditatea relativă a aerului de 65%. Valorile maxime au fost observate pe probele fără elemente de rigidizare.



**Figura 3.12.** Influența umidității aerului asupra deplasării punctelor de control față de starea inițială a probelor: a) punctul A; b) punctul B; c) punctul C

Probele armate cu bare de oțel sau țevi pătrate de oțel nu prezintă diferențe semnificative în privința mărimii deplasărilor (**Figura 3.12, a**). Deplasările din punctul B sunt de aproximativ 2.5 ori mai mari decât în punctul A. Aceste valori sunt cele mai mari pentru probele simple și scad treptat odată cu creșterea rigidității structurii. Deplasările sunt minime sau uneori neglijabile pentru probele rigidizate cu platbanda din oțel, al căror moment de inerție este de aproximativ 1.72 ori mai mare decât al secțiunii țevei pătrate ( $I_{z(platbanda)} = 243 \text{ mm}^4$ , comparativ cu  $I_z = 141.25 \text{ mm}^4$  al unei armăturii de cu țeva cu secțiune pătrată (**Figura 3.12, b**). În punctul C de măsurare, există o relație invers proporțională între creșterea deplasărilor și creșterea umidității relative a aerului, comparativ cu punctul B pentru intervalul HR 40 - 65%. Această tendință este urmată de o stabilizare între 65 și 80% HR, când valorile deplasărilor au variat între 0.5-1.5 mm pentru probele simple neranforsate și pentru probele armate cu bare de lemn (**Figura 3.12, c**). Probele armate cu țevă de oțel cu secțiune pătrată și cele cu bară de oțel cu secțiune dreptunghiulară au deplasări zero sau cvasi-zero în punctul C. Timp de expunere crescător (mai mult de 120 h) a indus o umflarea neuniformă a structurii stratificate lingocelulozice, urmată de o

creștere substanțială a deplasării în punctele critice. În prima clipă, s-ar putea argumenta că gâtul chitarei se comportă ca bară încovoiată cu deplasarea maximă în zona B. Cu toate acestea, problemele acustice ce apar în timpul interpretării muzicale se datorează instabilității dimensionale a gâtului în punctul B ce produce o distanță prea mare între tastieră și coardă, modificând astfel lungimea de undă și tensiunea din corzi. Modificarea lungimii de undă duce la alterarea sunetului muzical, iar tensiunea crescută în corzi duce la tensiuni mai mari în structura de ansamblu a chitarei. Pentru a stabili cea mai bună soluție constructivă pentru pentru minimizarea efectelor proprietăților mecanico-sorbitive ale lemnului asupra stabilității dimensionale a gâtului chitara, s-a analizat în grafice 3D comportarea în timp a deformațiilor probelor cu cele mai reduse deplasări înregistrate pe parcursul testelor (Figura 3.13) (axa x - timpul de expunere, axa y - zonele critice puncte, A, B și C; axa z- deplasare).



**Figura 3.13.** Variația deformațiilor induse de umiditatea aerului pentru: a) gâtul armat cu țevă de oțel cu secțiune pătrată - lemn de paltin (gât) și lemn de palisandru (tastiera); b) gâtul armat cu țevă de oțel cu secțiune pătrată – lemn de cedru (gât) și lemn de palisandru (grif); c) gâtul armat cu oțel cu secțiune dreptunghiulară – lemn de paltin (gât) și salcâm (grif); d) gâtul armat cu oțel cu secțiune dreptunghiulară – lemn de paltin (gât) și lemn de palisandru (grif)

În mod normal, intervalul de umiditate relativă a aerului recomandat de producătorii de instrumente muzicale, este de 40 - 65%. În această situație, cele mai stabile eșantioane sunt: a) eșantionul 2.1 - armat cu țevă de oțel cu secțiune pătrată - lemn de paltin (gât) și lemn de palisandru (tastiera); b) proba 2.2 - armată cu țevă de oțel cu secțiune pătrată – lemn de cedru



(gât) și lemn de palsiandru (grif); c) eșantion 3.1 - armat cu oțel cu secțiune dreptunghiulară – lemn de paltin (gât) și salcâm (grif); d) eșantionul 3.3 - armat cu oțel cu secțiune dreptunghiulară – lemn de paltin (gât) și lemn de palisandru grif).

### Structuri lignocelulozice fixate într-un dispozitiv multiplu și supuse variațiilor de umiditate

Tipurile de probele testate în etapa a II a au fost tot din cele patru categorii din punct de vedere al ranforsării, dar cu alte combinații de specii lemnoase:

- Proba 0.3 (lemn de paltin pentru gât și lemn de sonokeling pentru tastieră);
- Proba 0.4 (gât din paltin și tastiera din fag termotratat);
- Proba 0.7 (lemn de cedru pentru gât și lemn de palistandru pentru tastieră);
- Proba 1.2 (gât din lemn de paltin, tastiera din lemn de salcâm, ranforsare cu două bare din lemn de salcâm);
- Proba 3.5 (gât din cedru și tastiera din abanos, ranforsare, platbandă);
- Proba 3.0 (gâtul din lemn de paltin, tastiera din lemn de salcâm, ranfosare platbandă);
- Proba 3.8 (Proba din lemn de cedru și tastiera din lemn de palisandru, cu platbandă).

În această etapă, probele au fost fixate în două dispozitive care permit prinderea multiplă prin încastrare la un capăt, simulînd prinderea rigidă de corpul chitarei (Figura 3.14). Periodic s-a verificat rectilinitatea probelor și conținutul de umiditate al acestora în trei zone: zona de fixare, considerată secțiunea A, zona mediană – secțiunea B și capătul liber considerat de pe tastieră (tasta 1), punctul C (Figura 3.14, b).



a)



b)

Figura 3.14. Testarea probelor în camera climatică

Inițial, su fost măsurată toți parametrii geometrici și fizici ai probelor, iar după condiționarea probelor timp de 72 ore, la umiditatea relativă a aerului de 40 %, umiditatea în camera climatică a fost adusă la  $\varphi=80\%$ , din 24 în 24 ore s-au măsurat deplasările (abaterile de la rectilinitate), înregistrându-se aceste valori. În Figura 3.15 este prezentat regimul de umiditate relativă a aerului la care au fost expuse probele în camera climatică.



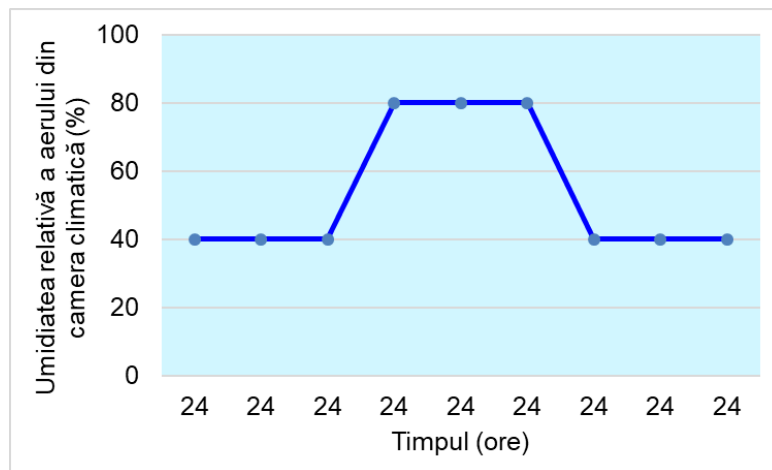


Figura 3.15. Regimul de umiditate din camera climatică, la temperatura constantă de 22 °C

În Figura 3.16 sunt prezentate graficele de variație a deformațiilor în funcție de umiditatea relativă a aerului din camera climatică de unde reiese faptul că există trei cazuri de deformații, respectiv încovoieri ale gâturilor de chitară încastate în dispozitivul multiplu: *încovoiere pozitivă în care săgețile maxime se înregistrează în zona B* (la mijlocul lungimii probei) – Figura 3.16, a, d- parțial, f; *încovoiere negativă în care săgețile maxime se înregistrează în zona C* (la capătul liber al probei) – Figura 3.16, b, c, d –parțial, h; probe stabile din punct de vedere al deformațiilor (umiditatea relativă a aerului nu influențează rectilinitatea și planeitatea probelor) Figura 3.16, g. În cazul probei 0.4 (gât din lemn de paltin și tastiera din lemn de fag termotratat) încovoierea este pozitivă ca urmare a faptului că cele două specii de lemn se comportă diferit la variațiile de umiditate: fagul termotratat nu mai absoarbe aceeași cantitate de vapori de apă (fiind stabil dimensional datorită tratamentului termic la care a fost supus înainte de utilizare), comparativ cu lemnul de paltin care prin absorbția de umiditate se umflă fiind supus la tensiuni de întindere (Figura 3.16, a). Celelalte două probe din categoria de gâturi neranforsate prezintă încovoiere negativă ceea ce presupune o absorbție mai mare de umiditate de către tatierea comparativ cu lemnul din structura gâtului.

Probele 0.3 (lemn de paltin pentru gât și lemn de sonokeling pentru tastieră) și 0.7 (lemn de cedru pentru gât și lemn de palistandru pentru tastieră), prezintă următoarele variații: valorile săgeților diferă în funcție de speciile lemnoase și anume lemnul de paltin cu sonokeling este susceptibil la o umflare de aproximativ 2,5 ori mai mare decât lemnul de cedru cu palisandru (Figura 3.16, b și c).

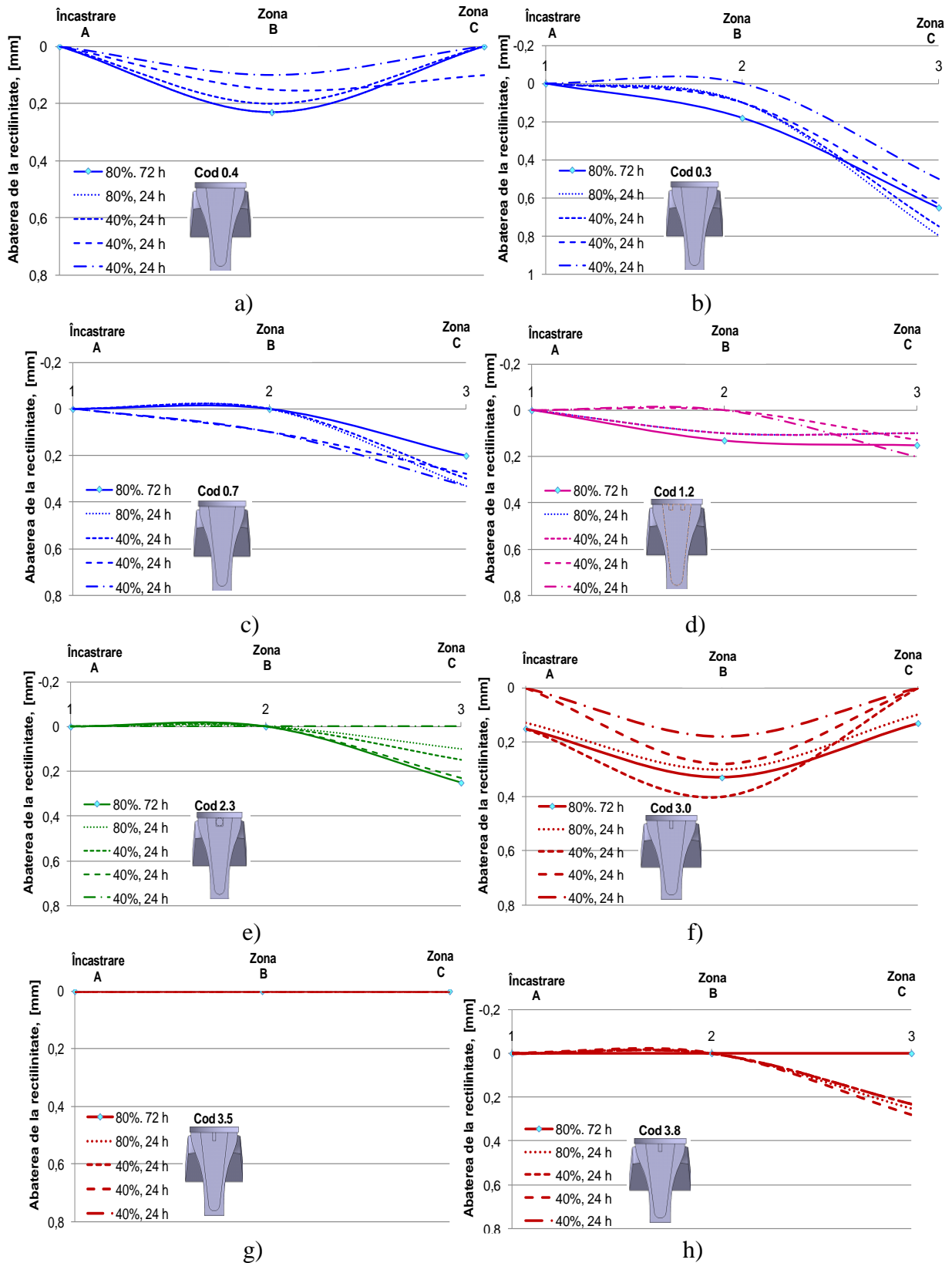


Figura 3.16. Influența umidității relative a aerului asupra deformațiilor măsurate în cele trei zone de pe probă

Expunerea la o umiditate relativă de 40% a probei ranforsate cu bare din salcâm (cod 1.2) duce la deplasări cu aproximativ 100% mai mari decât în timpul expunerii la umiditate mai ridicată

(80%). Astfel, se poate concluziona faptul că în timpul contragerii, evaporarea apei din lemn nu se produce uniform pe toată lungimea gâtului atât datorită variației grosimii (secțiunii) structurii cât și datorită speciilor lemnoase diferite. Lemnul de paltin se usucă mai rapid decât lemnul de salcâm datorită structurii anatomice diferite (lemnul de salcâm conține tile ce obturează evaporarea apei din lemn, ducând la o întârziere în procesul de uscare). Trebuie menționat faptul că analiza s-a realizat pe gâturi nefinisate, deci lemnul a fost expus direct variațiilor de umiditate atmosferică. În cazul probei ranforsate cu țevă pătrată, săgețile la capătul liber au fost de maxim 0.2 mm în etapele intermediare de expunere, iar după ultima etapă nu s-au mai înregistrat abateri de la rectilinitate/planeitate (Figura 3.16, e). Probele rigidizate cu platbandă au înregistrat comportări diferite ca urmare a combinațiilor de specii lemnoase. Astfel, proba 3.5 (gât din cedru și tastiera din abanos) nu au înregistrat nici o abatere de la rectilinitate, rămânând stabile dimensional indiferent de valoarea umidității relative a aerului (Figura 3.16, g). În schimb, proba 3.0, (paltin+salcâm) au dovedit variații dimensionale mari pe parcursul expunerii la umidități diferite, orecum și o încovoiere pozitivă. Proba din cedru cu palisandru (cod 3.8) inițial dreaptă, și-a modificat planeitatea în capătul liber înregistrând deplasări de până la 0.2 mm (Figura 3.16, h). În Figura 3.17.

Figura 3.17 sunt prezentate variațiile conținutului de umiditate măsurat pe tastieră după fiecare expunere în camera climatică. Din graficul prezentat se observă că absorbția de umiditate se reflectă diferit în conținutul de umiditate al lemnului de la o probă la alta. Probele 3.5 și 3.8 sunt aproximativ stabile la umiditatea relativă a aerului de 80%, comparativ cu restul probelor la care expunerea prelungită la 80% umiditatea relativă duce la o creștere a conținutului de umiditate cu aproximativ 7,5% mai mult. Scăderea umidității relative a aerului cu 50% (de la 80% la 40%) nu produce după 24 de ore de expunere o diminuare semnificativă a conținutului de umiditate. Abia după 48 ore se constată o scădere de aproximativ 27 % la probele ce conțin paltin în structura gâtului și cu 15% la speciile ce conțin cedru.

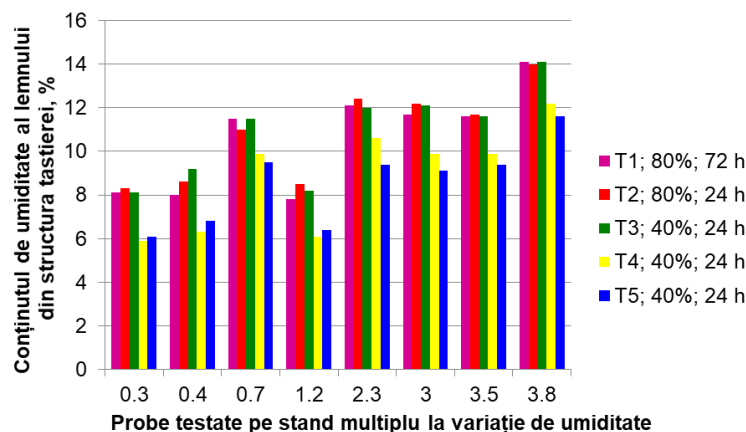


Figura 3.17. Variația umidității lemnului tastierei

### 3.1.3 Concluzii privind fenomenele mecano-sorptive ale lemnului din construcția gâturilor de chitară

În urma testelor realizate în camera climatică se pot evidenția următoarele aspecte cu rol de concluzii:

- Utilizarea unor specii lemnoase cu grad redus de absorbție a umidității relative a aerului sau cu o structură relativ omogenă poate contribui la diminuarea efectului de histerezis manifestat prin comportarea diferită la umflare și contragere, cum ar fi lemnul de cedru sau de mahon (pentru gât) sau palisandru/abanos pentru tastieră;
- În condițiile utilizării lemnului de paltin, acesta ar trebui atent selecționat astfel încât să nu prezinte neomogenități structurale.
- Uscarea lemnului din structura gâtului în etapa de semifabricat joacă un rol important de aceea se recomandă o uscare la umiditatea de 8-10% pentru gât astfel încât acesta să fie în echilibru cu umiditatea aerului.

Stabilitatea dimensională a subansamblurilor gâtului de chitară depinde de efectele mecanico-absorbante și de solicitările și deformările induse în structurile din lemn. Probele cele mai stabile au fost cele armate cu elemente metalice. Din punct de vedere al speciilor lemnoase, cele mai stabile au fost gâturile din lemn de paltin și palisandru (pentru tastieră). Totuși, ca urmare a reducerii consumului de specii exotice protejate, înlocuirea cu specii de lemn din zona temperată, respectiv indigen, este din ce în ce mai acută. Armonizarea acestor cerințe duce la regândirea componentelor instrumentelor muzicale, prin introducerea unor noi materiale lignocelulozice sau a unor soluții de ranforsare noi.

#### Rezultatele prezentate în acest subcapitol au fost publicate

1. Stanciu M.D. , Bucur V., Munteanu M.V., Georgescu S.V., Năstac S.M. *Moisture induced deformation in the neck of a classical guitar*, in *Holzforschung*, 2019, Vol 73(4):371-379 (FI=2.079, SRI=1.448/ 2019; FI= SRI=2.267), <https://www.degruyter.com/view/j/hfsg.2019.73.issue-4/issue-files/hfsg.2019.73.issue-4.xml>
2. Duta P.G., Stanciu M.D., Georgescu S.V., Soluții integrative de optimizare a proprietăților rigido-plastice a chitarelor, *Buletinul AGIR* nr. 1/2019, pp. 144-149, <https://www.buletinulagir.agir.ro/articol.php?id=3067>

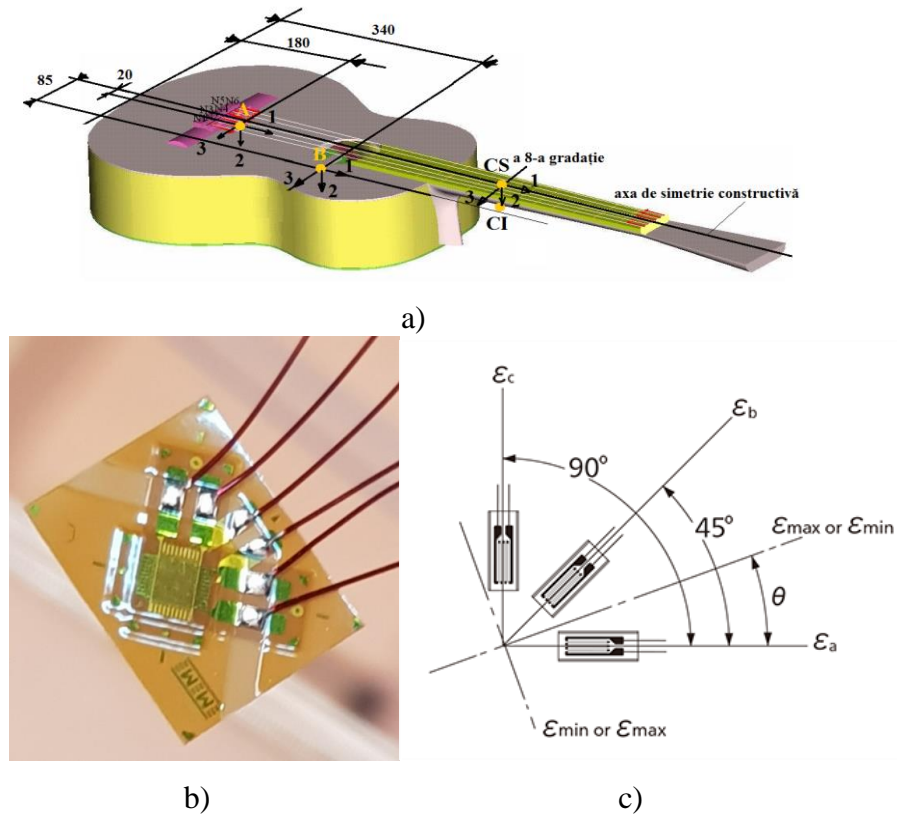
## 3.2 Determinarea deformațiilor specifice ale chitarei prin metoda tensometriei electrice rezistive

### 3.2.1 Materialul și metoda de investigare

Determinarea stărilor de tensiuni și deformații ale structurii chitarei s-a bazat pe metoda tensometriei electrice rezistive. Această metodă constă în măsurarea deformațiilor liniare ale unei structuri mecanice prin intermediul unor traductoare electrice rezistive (TER) care transformă variația deformațiilor mecanice în variația rezistenței electrice a elementului [8; 73; 129; 174; 178 – 180]. În literatura de specialitate există o serie de recomandări privind tipurile de traductoare electrice rezistive pentru lemn, modul de conectare în punte, tehnica lipirii TER și modul de măsurare [8; 73; 129; 178 – 180]. Măsurătorile au fost realizate în colaborare cu colegii din Universitatea Tehnică Gh. Asachi din Iași, Facultatea de Inginerie Mecanică, Departamentul de Rezistența Materialelor, în cadrul proiectului PN-III-P2-2.1-BG-2016-0017 nr. 85/26.10.2016 ”Soluții integrative de creștere a performanței economice prin optimizarea proprietăților rigido-elastice și stabilității structurale a chitarelor de fabricație românească, SINOPTIC”.

S-au luat în studiu două chitare ca produs finit, o chitară clasică și o chitară cu gâtul ranforsat cu tijă metalică reglabilă. Pe fiecare chitară au fost montate 4 traductoare electro rezistive, tip C2A-06-062WW-350, stacked rosette, cu cabluri atașate, fiecare având câte trei mărci tensometrice cu rezistența electrică  $350\Omega$  (Figura 3.18). Pentru aplicarea acestor traductoare s-a prelucrat suprafața chitarei, îndepărtându-se stratul de lac aplicat pe structura cutiei, respectiv a gâtului de chitară cu o hârtie abrazivă cu granulație P100 (401). După îndepărtarea pulberii rezultate, suprafața a fost ștersă cu o țesătură de bumbac înmuiată în alcool etilic (STF 247/2002). Rozetele au fost lipite cu ajutorul adezivului Z-70 (cyanacrilat) de la HBM, polimerizarea acestuia fiind accelerată cu un catalizator 200 catalyst-C de la Vishay. Prin orientarea rozetelor s-a căutat să se măsoare efectele încovoierii/torsiunii chitarei în cele patru zone (în zona cordarului – zona A, în zona rozetei – zona B, pe gât – în zona tastei 8 pe partea superioară (zona CS și inferioară a gâtului – zona CI) cu ajutorul mărcilor orientate la  $90^\circ$  una față de alta (marca 1 – orientată paralel cu axa longitudinală a chitarei, respectiv paralelă cu fibra lemnului, marca 2 – orientată la 45 grade și marca 3 orientată la 90 grade față de marca 1, respectiv perpendicular pe fibre).

Traductoarele și conexiunile cositorite au fost izolate față de acțiunea corozivă a umidității din aer cu poliuretan (M-Coat a air-drying polyurethane coating, Vishay Micro-Measurement), aplicat lichid, care după întărire a format o peliculă continuă, protectoare.



**Figura 3.18.** Principiul de măsurare a deformațiilor utilizând metoda tensometriei electrice rezistive (TER): a) pozițiile traductoarelor TER pe chitară (rozeta A, lângă cordar; rozeta B, lângă gaura sonoră; rozetă CS - pe partea superioară a gâtului, pe tasta a 8 a; rozetă CI - pe partea inferioară a gâtului, sub tasta 8, simetrică cu rozeta CS); b) tipul de traductoare aplicate (rozete rectangulare cu direcțiile: 0°/45°/90°); c) schema notațiile folosite pentru măsurarea deformațiilor

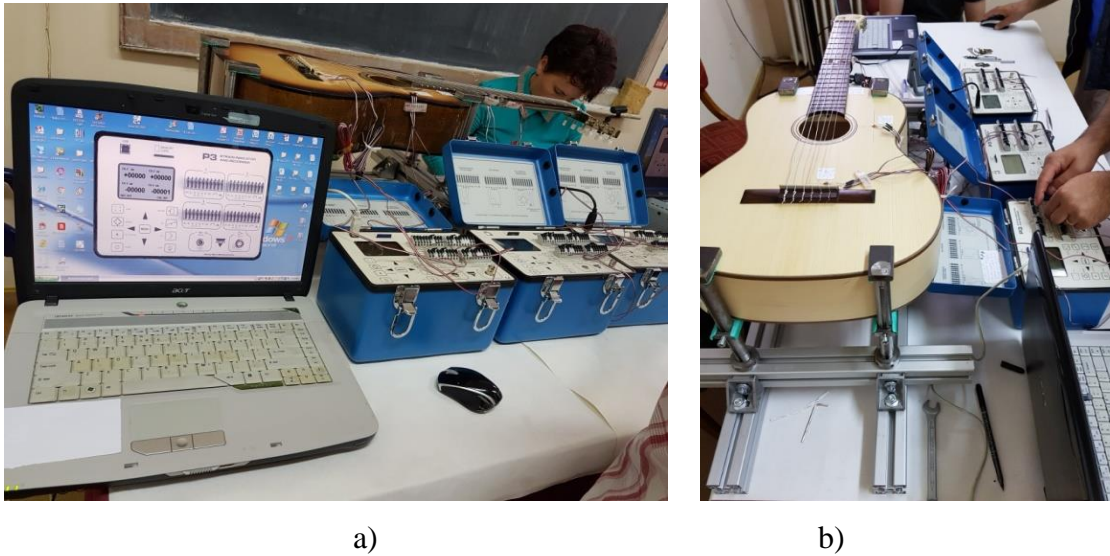
Fiecare marcă tensometrică a fost legată la un canal al unei punți tensometrice Vishay P3 (Figura 3.18). Întrucât au fost aplicate 4 traductoare cu câte trei mărci fiecare, au fost necesare 12 canale de achiziție, acesta fiind motivul pentru care s-au utilizat trei punți tensometrice fiecare având câte patru canale. Tipul de legare a fost în *sfert de punte*, echilibrarea mărcilor făcându-se automat în puntea P3. Solicitarea chitarei s-a realizat prin intermediul corzilor care au fost acordate pe rând la valoarea frecvenței emisă de coarda liberă. S-au testat două tipuri de chitare – una fără bară de ranforsare a gâtului, iar cealaltă cu o bară de ranforsare dublu reglabilă. Testele au presupus următoarele etape:

- Acordarea fiecărei corzi și măsurarea microdeformațiilor captate de fiecare marcă tensometrică  $\mu\epsilon$  ( $\epsilon=10^{-6}\mu\epsilon$ );
- Acordarea tuturor corzilor (chitara acordată) și măsurarea microdeformațiilor captate de fiecare marcă tensometrică  $\mu\epsilon$  ( $\epsilon=10^{-6}\mu\epsilon$ );

Echilibrarea punților Wheatstone formate cu fiecare marcă tensometrică în parte (din cele 12) s-a realizat cu ajutorul punților tensometrice de tip Vishay P3, echilibrarea acestora făcându-se prin intermediul softului specializat în acest sens (Figura 3.19). În Tabelul 3.2 sunt prezentate



informațiile privind valorile utilizate pentru tensionarea corzilor, corespunzătoare frecvenței libere a corzilor MI, La Re, Sol, SI, Mi [167; 174].



*Figura 3.19. Echipamentul utilizat pentru măsurarea prin metoda TER: a) interfața softului pentru achiziția datelor și monitorizarea punților tensometrice aplicate pe chitara ranforsată cu tijă dublu reglabilă; b) chitara clasică fără tijă [167; 174]*

*Tabelul 3.2. Frecvența specifică corzilor libere acordate ale chitarei*

Coarda	Nota	Simbol	Frecvența (Hz)	Forța (N)
1	Mi	E1	82.41	77.843
2	La	A	110	86.740
3	Re	D	146.8	81.847
4	Sol	G	196	73.840
5	Si	B	246.9	68.502
6	Mi	E2	329.6	72.061

### 3.2.2 Rezultate și discuții

În [Tabelul 3.3](#) sunt centralizate microdeformațiile specifice achiziționate de la cele 12 mărci tensometrice, pentru fiecare dintre cele șase corzi tensionate succesiv și în totalitate. Pe baza datelor achiziționate, s-au determinat o serie de mărimi specifice ale căror semnificație și relații de calcul sunt prezentate în cele ce urmează.

*Prelucrarea datelor experimentale a constat în determinarea mărimilor:* deformației specifice maxime,  $\varepsilon_{max}$  deformației specifice minime,  $\varepsilon_{min}$ ; unghiului direcției deformației principale maxime,  $\theta$ ; lunecării specifice maxime,  $\gamma_{max}$ ; tensiunii principale normale maxime,  $\sigma_{max}$ ; tensiunii principale normale minime,  $\sigma_{min}$ ; tensiunii tangențiale maxime,  $\tau_{max}$ , acestea fiind centralizate în [Tabelul 3.4](#), [Tabelul 3.5](#) și [Tabelul 3.6](#).

Tabelul 3.3. Microdeformațiile măsurate în cele patru zone prin metoda TER

Poziția mărcilor	Microdeformații $\mu\epsilon$ ( $10^{-6}$ )	Coarda 1	Coarda 2	Coarda 3	Coarda 4	Coarda 5	Coarda 6	Toate corzile tensionate
paralel cu axa longitudinală a chitarei	A1	-21	-5	-3	-31	-39	-128	-232
	B1	-4	-1	0	-4	-6	-18	-26
	CS1	-6	-2	-1	-6	-6	-17	-36
	CI1	3	1	0	5	4	18	35
la 45° față de axa longitudinală a chitarei	A1	-5	1	-1	-15	-23	-83	-129
	B1	-8	-1	1	-8	-11	-33	-61
	CS1	-4	-1	0	-4	-3	-9	-21
	CI1	1	0	1	3	3	11	23
la 90° față de axa longitudinală a chitarei	A1	-4	-1	-1	-13	-16	-45	-74
	B1	-3	-1	-1	-3	-5	-12	-19
	CS1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1
	CI1	-2	0	0	0	0	-1	3

Relațiile de calcul pentru aceste mărimi sunt:

✚ deformația specifică maximă,  $\epsilon_{max}$ , în  $\mu m/m$

$$\epsilon_{max} = \frac{1}{2} \left[ \epsilon_1 + \epsilon_3 + \sqrt{2[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]} \right] \quad (3.1.)$$

✚ deformația specifică minimă,  $\epsilon_{min}$ , în  $\mu m/m$

$$\epsilon_{min} = \frac{1}{2} \left[ \epsilon_1 + \epsilon_3 - \sqrt{2[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]} \right] \quad (3.2.)$$

✚ unghiul direcției deformației principale maxime,  $\theta$ ,

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \left[ \frac{2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \right] \text{ [rad]} \quad (3.3.)$$

✚ lunecarea specifică maximă,  $\gamma_{max}$ ,

$$\gamma_{max} = \sqrt{2[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]} \quad (3.4.)$$

✚ tensiunea principală normală maximă,  $\sigma_{max}$ ,

$$\sigma_{max} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left[ (1 + \nu)(\epsilon_1 + \epsilon_3) + (1 - \nu)\sqrt{2[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]} \right] \quad (3.5.)$$

✚ tensiunea principală normală minimă,  $\sigma_{min}$ ,

$$\sigma_{min} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left[ (1 + \nu)(\epsilon_1 + \epsilon_3) - (1 - \nu)\sqrt{2[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]} \right] \quad (3.6.)$$

✚ și tensiunea tangențială maximă,  $\tau_{max}$ ,

$$\tau_{max} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left[ \sqrt{2[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]} \right] \quad (3.7.)$$

Pentru determinarea unghiului direcției deformației principale maxime,  $\theta$ , se fac următoarele precizări: valoarea unghiului determinat cu ajutorul relației (3.3) este în radiani și trebuie transformat în grade; în funcție de semnul numărătorului și al numitorului fracției din relația (3.3),

pentru calculul final al unghiului direcției deformației principale maxime se ține cont de una din următoarele relații:

- Dacă Numărătorul  $\geq 0$  și Numitorul  $> 0$  atunci  $\varphi = |\theta|$
- Dacă Numărătorul  $> 0$  și Numitorul  $\leq 0$  atunci  $\varphi = 90 - |\theta|$
- Dacă Numărătorul  $\leq 0$  și Numitorul  $< 0$  atunci  $\varphi = 90 + |\theta|$
- Dacă Numărătorul  $< 0$  și Numitorul  $\geq 0$  atunci  $\varphi = 180 - |\theta|$

*Tabelul 3.4. Valorile deformațiilor maxime și minime ale chitarei produse de tensionarea corzilor, calculate pe baza datelor experimentale*

$\varepsilon_{max} * 10^{-6}$	<i>TER A</i>	<i>TER B</i>	<i>TER CS</i>	<i>TER CI</i>
<b>Coarda tensionată</b>				
1	-1.1642	1.0277	-0.9505	3.0495
2	1.4721	-1.0000	-0.7929	1.2071
3	-0.5858	1.0811	0.0000	1.0000
4	-10.5982	1.0277	-0.9505	5.0495
5	-15.1509	-0.7566	0.0000	4.2361
6	-44.8527	0.8902	0.0147	18.3234
Toate corzile acordate	-70.4349	9.0357	-0.8223	35.4924
$\varepsilon_{min} * 10^{-6}$	<i>TER A</i>	<i>TER B</i>	<i>TER CS</i>	<i>TER CI</i>
<b>Coarda tensionată</b>				
1	-23.8358	-8.0277	-6.0495	-2.0495
2	-7.4721	-1.0000	-2.2071	-0.2071
3	-3.4142	-2.0811	-2.0000	-1.0000
4	-33.4018	-8.0277	-6.0495	-0.0495
5	-39.8491	-10.2434	-6.0000	-0.2361
6	-128.1473	-30.8902	-17.0147	-1.3234
Toate corzile acordate	-235.5651	-54.0357	-36.1777	2.5076

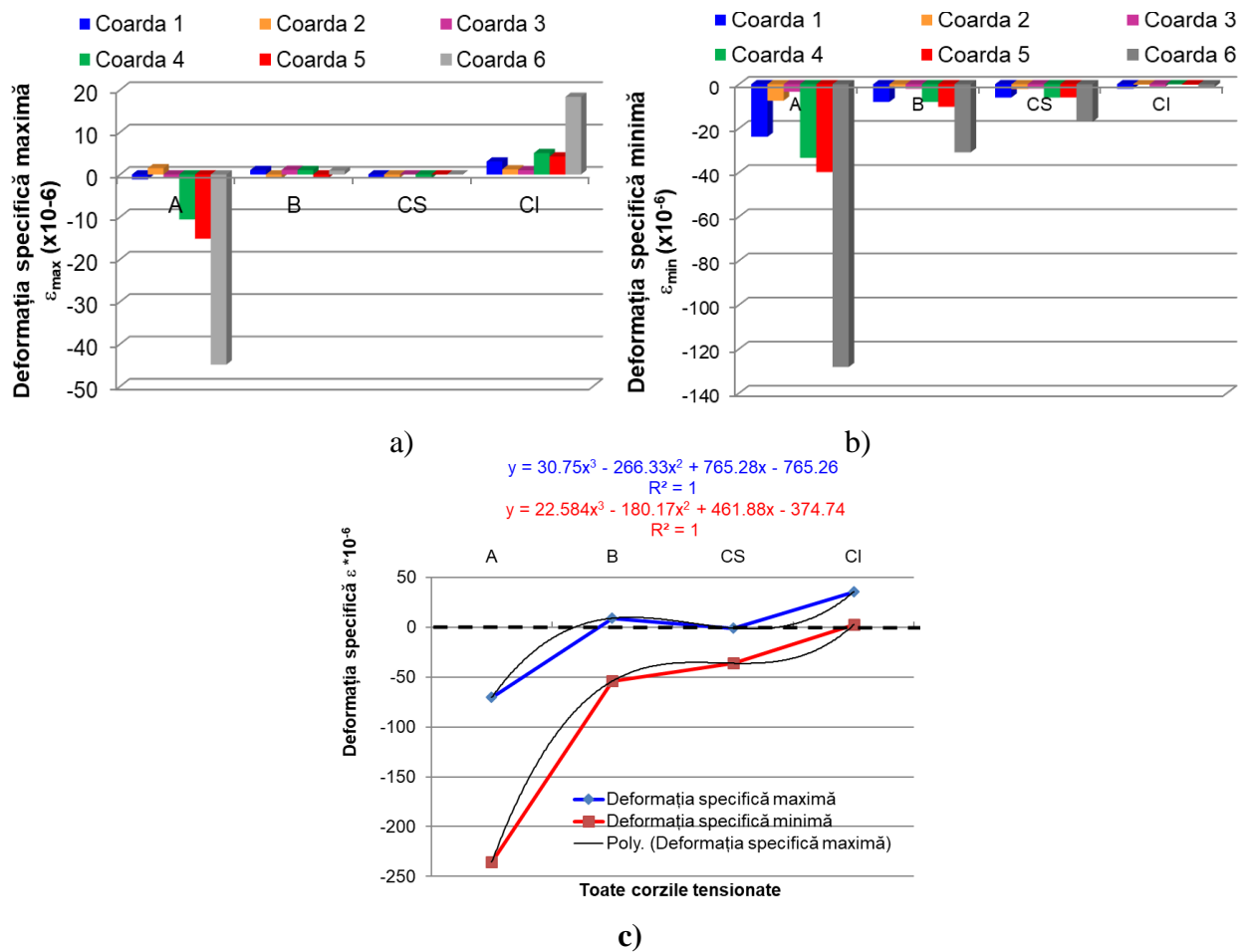
*Tabelul 3.5. Valorile tensiunilor maxime și minime ale chitarei produse de tensionarea corzilor (s-au adoptat valorile  $E_{L placă} = 10968 \text{ MPa}$  și  $E_{L gât} = 11000 \text{ MPa}$ )*

$\sigma_{max}$ (MPa)		<i>TER A</i>	<i>TER B</i>	<i>TER CS</i>	<i>TER CI</i>
Coarda 1	Mi	-0.1002	-0.0166	-0.0334	0.0294
Coarda 2	La	-0.0093	-0.0157	-0.0176	0.0138
Coarda 3	Re	-0.0194	0.0055	-0.0073	0.0085
Coarda 4	Sol	-0.2485	-0.0166	-0.0334	0.0609
Coarda 5	Si	-0.3267	-0.0462	-0.0218	0.0503
Coarda 6	Mi	-1.0040	-0.1010	-0.0615	0.2167
Toate corzile acordate		-1.7007	-0.0865	-0.1411	0.4381
$\sigma_{min}$ (MPa)		<i>TER A</i>	<i>TER B</i>	<i>TER CS</i>	<i>TER CI</i>
Coarda 1	Mi	-0.2915	-0.0930	-0.0766	-0.0137
Coarda 2	La	-0.0847	-0.0157	-0.0296	0.0019
Coarda 3	Re	-0.0433	-0.0212	-0.0242	-0.0085
Coarda 4	Sol	-0.4409	-0.0930	-0.0766	0.0177
Coarda 5	Si	-0.5351	-0.1262	-0.0725	0.0125
Coarda 6	Mi	-1.7067	-0.3691	-0.2056	0.0505
Toate corzile acordate		-3.0939	-0.6186	-0.4403	0.1590

**Tabelul 3.6.** Valorile unghiului direcției de deformare maximă a chitarei ca urmare a tensionării corzilor, calculat pe baza datelor experimentale

Unghiul $\theta$ (°)	Valorile măsurate cu rozetele tensometrice				
	Coarda tensionată	TER A	TER B	TER CS	TER CI
1		-20.711	41.829	5.654	5.654
2		-31.717	0	-22.5	-22.5
3		-22.5	35.782	0	0
4		-18.937	41.829	5.654	5.654
5		-10.685	42.402	0	13.282
6		-2.410	40.268	1.683	7.371
Toate		-8.449	42.402	4.065	7.018

În Figura 3.20 sunt prezentate variațiile deformațiilor specifice maxime și minime corespunzătoare celor patru puncte în care s-au aplicat rozetele tensometrice după tensionarea fiecărei corzi în parte.



**Figura 3.20.** Variația deformațiilor maxime și minime specifice obținute prin tensionarea fiecărei corzi în parte, măsurate în  $\mu\text{m/m}$

Se observă că valorile extreme se obțin în cazul tensionării corzii 6 (cu frecvența cea mai înaltă, dar și ce mai apropiată de punctul de măsurare), iar din punct de vedere al poziției în lungul chitarei, deformațiile maxime se obțin în zona cordarului (deformații la compresiune) și în zona tastei 8 de pe gâtul chitarei, partea inferioară supusă la întindere. Placa de față prezintă deformații cu 120% mai mari decât deformațiile gâtului, fenomen explicat prin rigiditatea diferită a celor două

structuri. Din variația deformațiilor minime și maxime, se poate deduce faptul că încovoierea corpului de chitară se reflectă prin deformațiile la compresiune ale exteriorului feței de chitară, iar încovoierea gâtului prezintă zona întinsă în partea inferioară a gâtului (CI) și zona comprimată (CS) în partea superioară (tastiera). Din punct de vedere al valorilor tensiunilor minime și maxime, acestea sunt sub limita tensiunilor admisibile ale lemnului ( $<10$  MPa), fiind tensiuni de compresiune (valori negative) pentru zonele A, B și CS și tensiuni de întindere (pozitive) pentru zona CI (Figura 3.21, a). Se poate remarca faptul că tensiunile maxime, în zona tastei 8 variază pe înălțimea secțiunii gâtului, de la valoarea  $-0.44$  MPa la  $+0.44$  MPa, așa cum se observă în Figura 3.21, b.

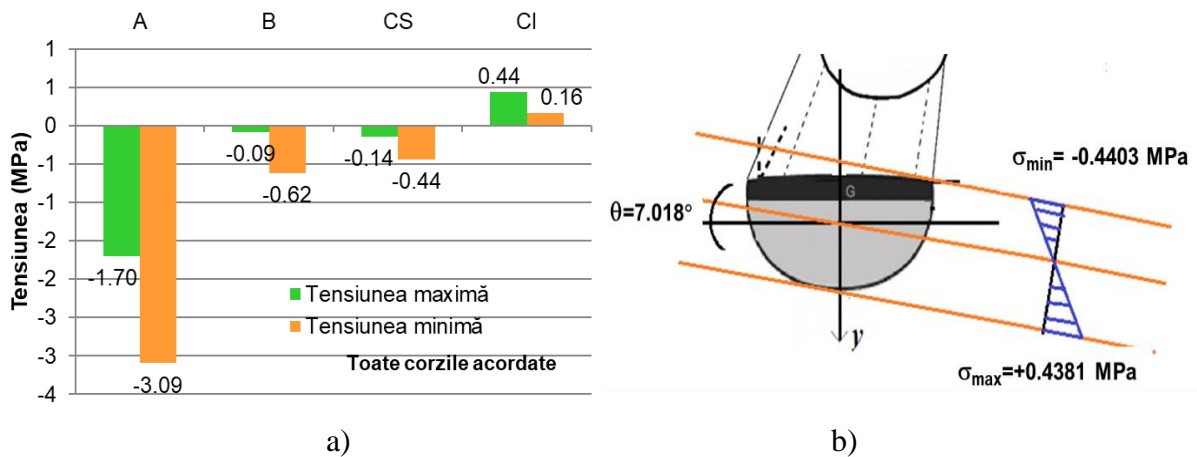


Figura 3.21. a) Variația tensiunilor minime și maxime la solicitarea de încovoiere; b) variația tensiunii pe înălțimea secțiunii gâtului de chitară în zona tastei 8

### 3.2.3 Concluzii privind starea de tensiuni și deformații ale chitarei sub acțiunea corzilor

Ca orice corp solid, lemnul supus acțiunii unor forțe exterioare se deformează, forța exterioară întâmpinând o rezistență, în funcție de structura și elasticitatea materialului lemnos. După dispariția acțiunii forțelor, deformația piesei poate să dispară total dacă solicitarea a rămas în domeniul elastic, parțial dacă este în domeniul elasto - plastic să persiste dacă ea este în domeniul plastic. Cercetările experimentale au scos în evidență că deformațiile elastice și plastice sunt direct dependente de specia lemnoasă, de densitatea, umiditatea și temperatura lemnului, de poziția inelelor anuale și de direcția fibrelor față de direcția forței, precum și de timp. În Figura 3.22 sunt prezentate variațiile în timp ale deformațiilor în etapa de revenire a lemnului, după detensionarea succesivă a corzilor și forma deformată a chitarei. Astfel, se poate observa modul de recuperare a deformațiilor vâsco-elastice ale structurii lignocelulozice, recuperarea fiind aproape integrală în toate punctele de măsurare (Figura 3.22, a). Întrucât detensionarea fiecărei corzi în parte se produce treptat, și în forma curbei se observă această variație, resimțită mai ales în apropierea cordarului. În cazul gâtului de chitară variația curbei nu mai prezintă aceeași alură

ca și fața, ci se observă numeroase oscilații ale deformației recuperate. Un fenomen interesant este antisimetria tensiunilor și a deformațiilor înregistrate de cele două rozete aplicate pe gâtul de chitară (partea superioară CS și partea inferioară CI). În Figura 3.22b este reprezentată forma deformată a structurii de chitară conform valorilor măsurate ale microdeformațiilor.

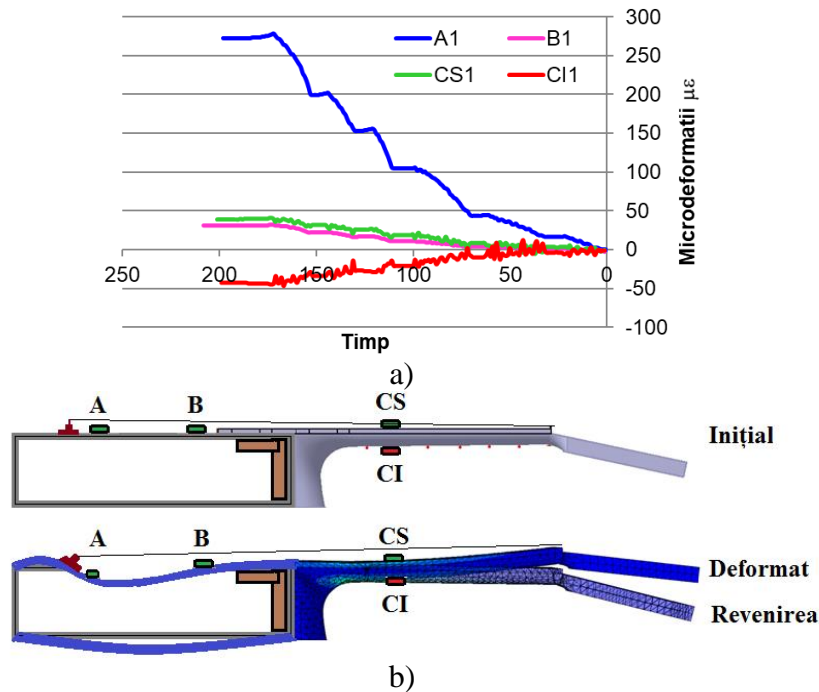


Figura 3.22. Variația deformației vâsco-elastice recuperate: a) graficul de variație în punctele de măsură; b) forma deformată a structurii lignocelulozice de tip Helmholtz

Principalele concluzii referitoare la acest subcapitol sunt următoarele:

- ✚ Valorile extreme ale deformațiilor specifice se înregistrează în zona cordarului, iar cele mai reduse se înregistrează în zona rozetei și pe tastieră.
- ✚ Valorile tensiunilor sunt sub valorile tensiunii admisibile.
- ✚ Tensiunile de pe placa de față a chitarei (punctele A, B) și de pe partea superioară a gâtului sunt tensiuni de compresiune, comparativ cu cele de pe partea inferioară a gâtului (tensiuni de întindere).
- ✚ Datorită tensionării diferite a corzilor, structura de chitară este supusă la încovoiere oblică.

### Rezultatele prezentate în acest subcapitol au fost publicate

1. **M D Stanciu**, P Bârsănescu, V Goanță and A Savin Experimental determination of stress and strain states of the guitar's wood structure, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 916 (2020) 012113 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/916/1/012113, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/916/1/012113/pdf>.

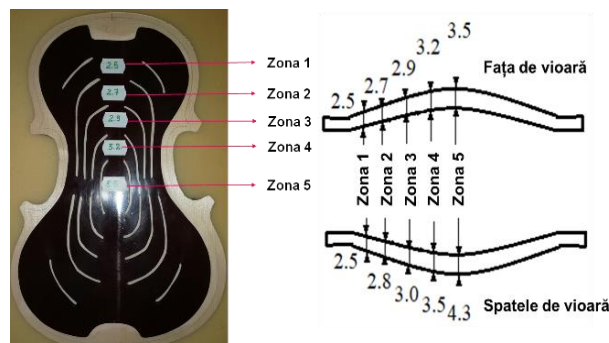


### 3.3 Analiza dinamică a corpurilor de vioară cu parametri geometrici modificați

Cercetările din acest subcapitol fac parte din studiile preconizate în cadrul proiectului Proiect UEFISCDI PN-III-P2-2.1-PED-2019-2148, contract nr. 568PED/2020: Modele inovative de viori comparabile acustic și estetic cu viorile de patrimoniu MINOVIS, al cărui director de proiect este autoarea tezei de abilitare. Obiectivele acestui studiu au fost: caracterizarea comportării dinamice a plăcilor din lemn în etape tehnologice diferite de asamblare a corpului de vioară; influența grosimii plăcilor asupra principalelor mărimi dinamice studiate.

#### 3.3.1 Structuri de viori investigate

Pentru realizarea acestui studiu, s-au analizat plăci din lemn de molid și paltin, aparținând celor patru clase de calitate anatomică a lemnului, așa cum au fost definite și identificate macrostructural în cap. 2.1: A (maestro), B (profesional), C (student), D (școlar), din cele șapte categorii diferite de grosimi: astfel, s-a notat cu **00** grosimea nominală, utilizată pentru construcția actuală a viorilor la fabrica de instrumente muzicale S.C. Gliga Instrumente Muzicale S.A. Modelul de grosime utilizat implică grosimea plăcilor prezentată în [Figura 3.23](#).



*Figura 3.23. Variația grosimii plăcilor din construcția viorii*

Codificarea plăcilor se bazează pe următorul principiu: prima litera reprezintă clasa de calitate structurală (A, B, C, D), următorul cod reprezintă tipul de grosime (0 – grosimea nominală utilizată în producția actuală de viori; P – grosimea majorată; M – grosime nominală micșorată); cifrele reprezintă zecimile cu care s-au modificat grosimea nominală (2; 4; 6 – reprezintă cantitatea 0.2; 0.4; 0.6 mm micșorat sau adăugat la grosimea nominală); litera F sau C – reprezintă tipul de structură (F – placa față molid, iar C – corpul de vioară); cifra 1 sau 2 reprezintă numărul probei de același tip, fiind analizate câte două probe din fiecare categorie. În [Tabelul 3.7](#) sunt prezentate valorile grosimilor pe categorii de structuri, valorile din tabel fiind corelate cu topologia plăcilor de față și spate prezentată în [Figura 3.23](#).

*Tabelul 3.7. Profilul grosimilor plăcilor de vioară studiate*

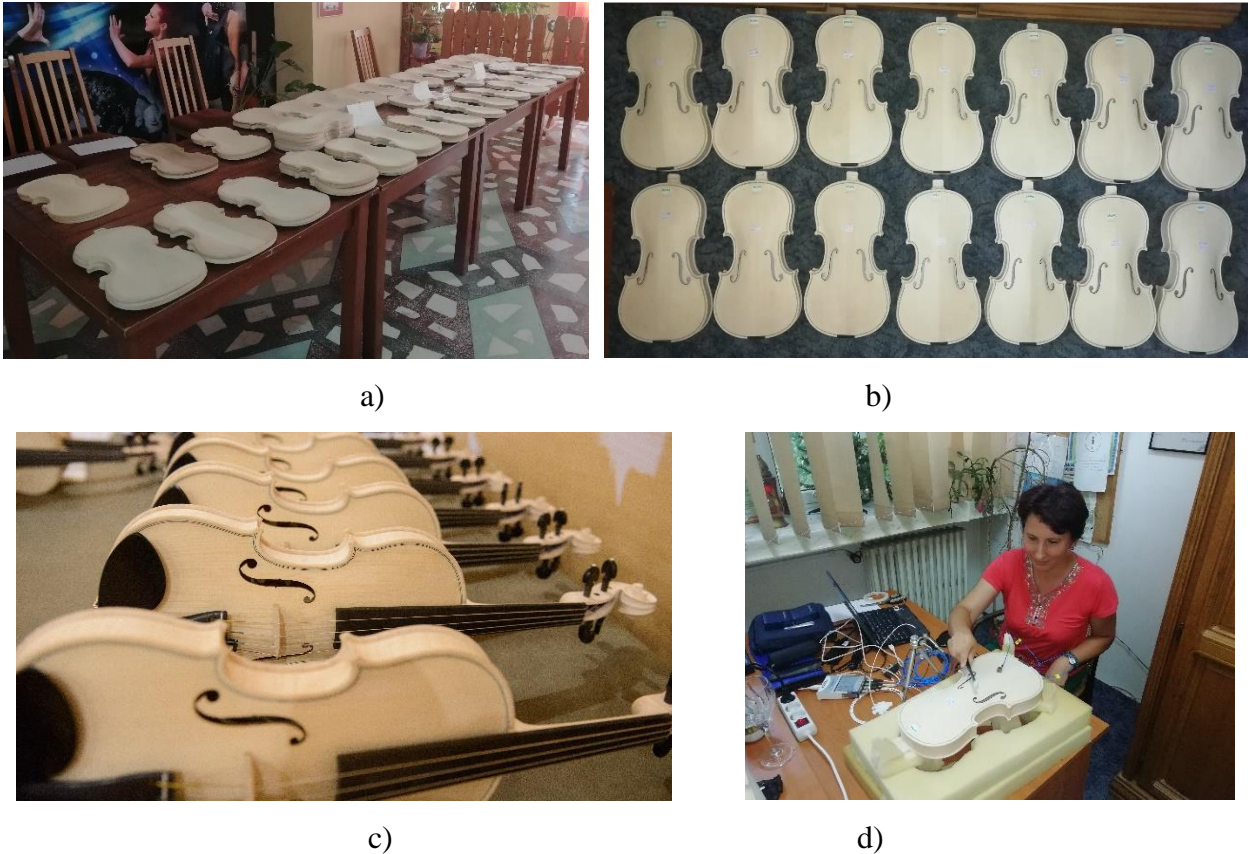
Tipul de modificare	Codul grosimilor	Codul clasei de calitate anatomică a lemnului	Grosimile plăcilor de față din lemn de molid (mm)					Grosimile plăcilor de spate din lemn de paltin (mm)					
			Zone					Zone					
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Micșorare grosime	M6	A	1.9	2.1	2.3	2.6	2.9	1.9	2.2	2.4	2.9	3.7	
	M4		2.1	2.3	2.5	2.8	3.1	2.1	2.4	2.6	3.1	3.9	
	M2		2.3	2.5	2.7	3.0	3.3	2.3	2.6	2.8	3.3	4.1	
Referința	00		2.5	2.7	2.9	3.2	3.5	2.5	2.8	3.0	3.5	4.3	
Majorare grosime	P2		D	2.7	2.9	3.1	3.4	3.7	2.7	3.0	3.2	3.7	4.5
	P4			2.9	3.1	3.3	3.6	3.9	2.9	3.2	3.4	3.9	4.7
	P6	3.1		3.3	3.5	3.8	4.1	3.1	3.4	3.6	4.1	4.9	

Studiul s-a realizat progresiv, pornind de la plăcile de vioară ca structuri individuale, fiind investigat un număr total de 112 plăci de vioară (56 din lemn de molid și 56 din lemn de paltin), a căror caracteristici geometrice au fost descrise mai sus, precum și în [Tabelul 3.8](#).

*Tabelul 3.8. Valorile masei plăcilor individuale din construcția corpului de vioară (M-molid/față; P-paltin/spate)*

Cod placa	Masa m [g]	Cod placa	Masa m [g]	Cod placa	Masa m [g]	Cod placa	Masa m [g]
A00F1	76	B00F1	86	C00F1	93	D00F1	86
A00F2	85	B00F2	85	C00F2	90	D00F2	86
A00S1	114	B00S1	136	C00S1	135	D00S1	112
A00S2	129	B00S2	131	C00S2	128	D00S2	116
AM2F1	93	BM2F1	84	CM2F1	80	DM2F1	75
AM2F2	81	BM2F2	80	CM2F2	78	DM2F2	82
AM2S1	133	BM2S1	118	CM2S1	109	DM2S1	126
AM2S2	118	BM2S2	131	CM2S2	129	DM2S2	113
AM4F1	90	BM4F1	108	CM4F1	80	DM4F1	83
AM4F2	85	BM4F2	79	CM4F2	74	DM4F2	75
AM4S1	114	BM4S1	114	CM4S1	128	DM4S1	130
AM4S2	117	BM4S2	126	CM4S2	117	DM4S2	112
AM6F1	75	BM6F1	72	CM6F1	73	DM6F1	78
AM6F2	80	BM6F2	79	CM6F2	73	DM6F2	72
AM6S1	112	BM6S1	120	CM6S1	93	DM6S1	100
AM6S2	114	BM6S2	127	CM6S2	120	DM6S2	109
AP2F1	98	BP2F1	77	CP2F1	100	DP2F1	93
AP2F2	77	BP2F2	94	CP2F2	86	DP2F2	94
AP2S1	128	BP2S1	135	CP2S1	133	DP2S1	130
AP2S2	134	BP2S2	130	CP2S2	126	DP2S2	128
AP4F1	85	BP4F1	108	CP4F1	96	DP4F1	84
AP4F2	89	BP4F2	92	CP4F2	93	DP4F2	89
AP4S1	136	BP4S1	136	CP4S1	136	DP4S1	121
AP4S2	131	BP4S2	140	CP4S2	130	DP4S2	114
AP6F1	96	BP6F1	99	CP6F1	91	DP6F1	119
AP6F2	103	BP6F2	108	CP6F2	113	DP6F2	95
AP6S1	134	BP6S1	147	CP6S1	130	DP6S1	142
AP6S2	145	BP6S2	145	CP6S2	127	DP6S2	133

Ulterior, aceste plăci au fost integrate în corpurile de vioară, fiind împerechiate fețele cu spatele, rezultând un număr de 56 corpuri din clasele A, B, C și D (Figura 3.24). Astfel, a fost studiat comportamentul dinamic al corpurilor fără gât și cu gât, determinându-se compoziția spectrală a frecvențelor, frecvențele dominante și factorul de calitate.



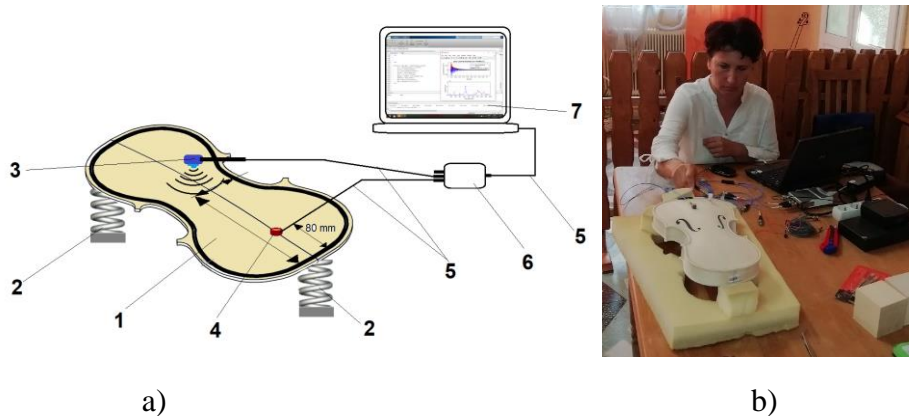
*Figura 3.24. Tipurile de structuri testate dinamic: a) plăci individuale de vioară (față/spate); b) corpuri de vioară fără gât (plăcile asamblate); c) corpuri de vioară cu gât; d) secvență din timpul măsurătorilor corpurilor de vioară fără gât*

### 3.3.2 Metoda de testare

#### Analiza dinamică

Metoda de testare utilizată în cadrul acestor cercetări a constat într-o analiză dinamică de determinare a răspunsului în frecvență a plăcilor pe baza excitării structurilor (plăcilor) cu ciocanul de impact. Pentru aceasta, fiecare placă a fost rezemată pe elemente elastice, simulând astfel o structură liberă (Figura 3.25). Apoi placa de vioară a fost excitată cu ajutorul unui ciocan de impact tip B&K 8204, iar semnalul de ieșire a fost capturat cu ajutorul unui accelerometru tip B&K 4517-002 (în cazul corpurilor de vioară s-au utilizat două accelerometre identice, unul amplasat pe fața de vioară, iar celălalt pe placa-spate). Atât ciocanul, cât și accelerometrele utilizate sunt produse de firma Brüel&Kjær (Nærum, Danemarca). Semnalele generate au fost transmise prin intermediul unui dispozitiv de condiționare a semnalului către o placă de achiziții de date dinamice tip NI

USB-9233 produsă de firma National Instruments (Austin, SUA), conectată la un laptop. Semnalul a fost vizualizat cu ajutorul unei aplicații speciale dezvoltate în NI-LabVIEW®, iar datele grafice au fost procesate cu ajutorul programului MatLab®. Teste experimentale au fost realizate atât în laboratorul de încercări dinamice al Departamentului de Inginerie Mecanică al Universității Transilvania din Brașov cât și în spațiul de cercetare oferit de fabrica S.C. Gliga Instrumente Muzicale S.A., în colaborare cu prof. univ. dr. ing. Silviu Năstac, Universitatea "Dunarea de Jos" din Galați.



*Figura 3.25. Principul de testare a plăcilor de vioară în spațiul de cercetare oferit de S.C. Gliga Instrumente Muzicale S.A. Reghin: a) Schema de principiu a standului experimental; b) secvență din timpul măsurărilor: 1 – proba; 2 – element de rezemare cu arc; 3 – ciocan de impact; 4 – accelerometru (a - un accelerometru; b și c - două accelerometre, unul dispus pe placa-față și unul dispus pe placa-spate); 5 – cabluri; 6 – sistem de achiziție de date; 7 – laptop*

Prelucrarea semnalelor pentru obținerea răspunsului în timp și frecvență, s-a realizat cu ajutorul unui program dezvoltat în MatLab. Pentru extragerea valorilor frecvențelor fundamentale, a factorului de amortizare, toate semnalele au fost prelucrate grafic, în final generându-se 112 grafice cu analizele în timp și în frecvență. În [Figura 3.26](#) sunt prezentate selectiv aceste grafice.

### **Analiza statistică**

După analiza în timp și frecvență a semnalelor, pe baza curbei exponențiale a amortizării și compoziției spectrale a semnalului pentru fiecare placă de vioară în parte, s-au extras valorile frecvențelor proprii (frecvența fundamentală  $f_1$ , apoi celelalte frecvențe considerate semnificative de către cercetătorii din domeniu, pentru plăcile de vioară și corpul de vioară, respectiv a doua frecvență notată  $f_2$  și frecvența dominantă, notată  $f_r$ ). Datele brute au fost examinate mai întâi sub aspectul variabilității. Testul pentru identificarea surselor de variație a mărimii parametrilor acustici a fost adoptat în funcție de normalitatea distribuției, care a fost verificată cu testul Shapiro-Wilk. Modul de asociere a variabilelor implicate în studiu a fost explorat cu ajutorul Analizei în Componente Principale (PCA) și procedurii k-means Clustering, apoi verificat cu corelații parțiale (din care a fost îndepărtată influența grosimii plăcii).



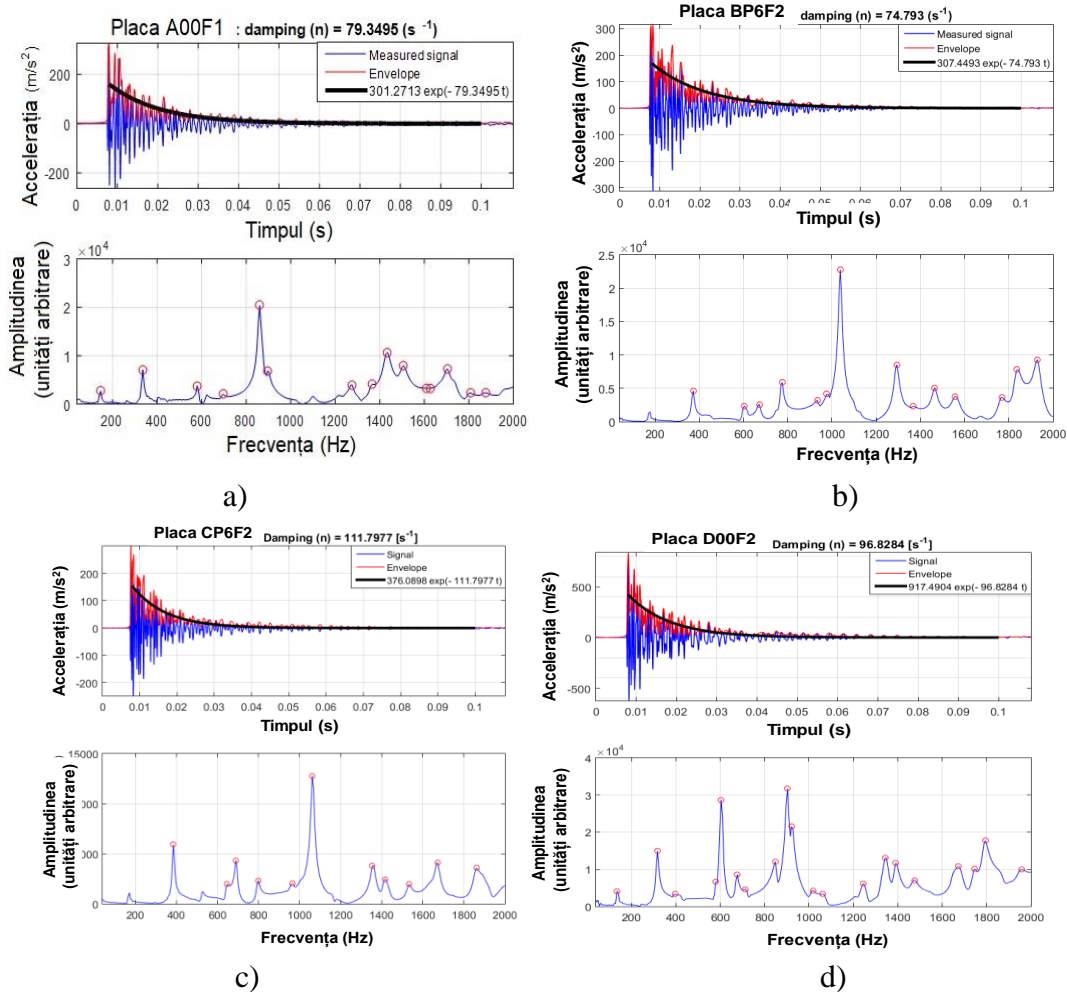


Figura 3.26. Analiza în timp și în frecvență a plăcilor (grafice selective)

### 3.3.3 Rezultate și discuții

#### Plăcile din lemn de molid

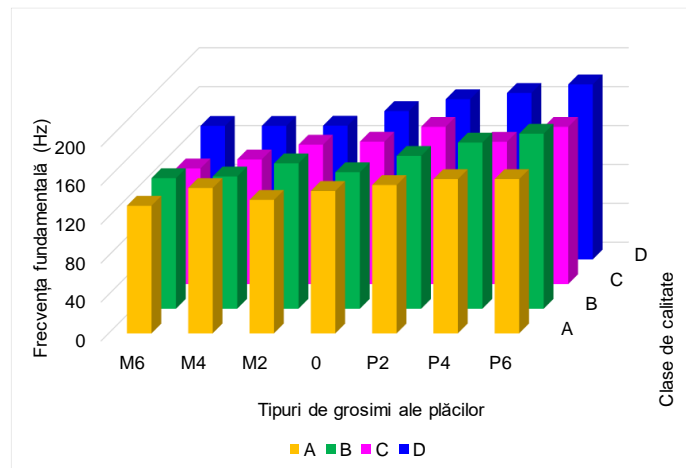
Frecvența fundamentală a plăcilor din lemn de molid, cu grosimea nominală utilizată în producție este în jurul valorii de  $146 \text{ Hz}$  pentru clasa de calitate A și C, iar pentru clasele B și D, această valoare diferă: astfel, plăcile din clasa D înregistrează frecvența fundamentală în jurul valorii de  $150 \text{ Hz}$ , aceste plăci fiind caracterizate din punct de vedere anatomic, prin lățimi mari ale inelelor anuale, respectiv cantitate mai mare de lignină ceea ce ar pute fi responsabilă de creșterea rigidității plăcii care conduce implicit la creșterea frecvenței fundamentale (Tabelul 3.9). Din analiza comparativă a răspunsului dinamic al plăcilor în funcție de grosimea acestora, s-a observat o ușoară tendință de creștere a frecvenței cu creșterea grosimii plăcilor (Figura 3.27). Astfel, pentru plăcile din clasa A de calitate structurală, frecvența fundamentală crește cu 21% o dată cu îngroșarea plăcilor cu 1.2 mm pe toată suprafața plăcii. Pentru celelalte clase de calitate, diferența de grosime

a plăcilor influențează valoarea frecvenței fundamentale cu o pondere de 31 – 36%, cea mai mare înregistrându-se pentru clasa C (36%).

*Tabloul 3.9. Valorile frecvenței fundamentale a plăcilor din lemn de molid ca structuri individuale*

Tipuri de grosimi ale plăcilor de molid	Frecvența fundamentală (Hz)			
	Clasa A	Clasa B	Clasa C	Clasa D
M6	131.3	134.3	118.9	137.4
M4	149.6	136.0	128.2	137.4
M2	137.3	149.6	143.5	137.6
0	146.5	140.4	146.5	152.6
P2	152.6	157.2	161.8	164.8
P4	158.7	170.9	146.4	171.3
P6	158.7	180.1	161.8	180.1

Dacă se raportează valorile frecvențelor proprii la placa cu grosimea de referință, corespunzătoare fiecărei clase de calitate a lemnului, se constată că pentru clasa de calitate A, majorarea grosimii plăcii produce o modificare a frecvenței fundamentale în același proporție ca și micșorarea grosimii (aproximativ 10%).



*Figura 3.27. Variația frecvenței fundamentale în raport cu grosimea plăcilor și clasa de calitate în funcție de clasa de calitate anatomică a lemnului de molid*

În schimb, la celelalte clase anatomice, modificările grosimii plăcilor au efect diferit asupra răspunsului în frecvență așa cum se poate observa în Figura 3.28, a.



*Figura 3.28. Diferența procentuală dintre valorile: a) frecvențelor fundamentale a plăcilor cu grosimea maximă și cea nominală (reprezentare cu galben), respectiv a plăcilor cu grosimea minimă și cea nominală; b) a doua frecvență proprie a plăcilor cu grosimea maximă și cea nominală (reprezentare cu galben), respectiv a plăcilor cu grosimea minimă și cea nominală*

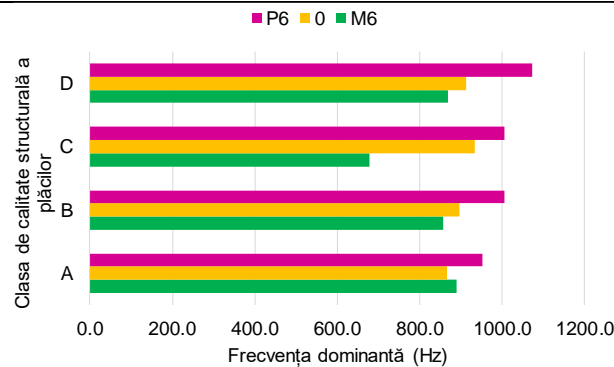


Din punct de vedere experimental, a doua frecvență proprie înregistrează valori între 300 – 400 Hz, în funcție de clasa de calitate a lemnului și de grosimea plăcilor. Cu creșterea grosimii plăcilor, se înregistrează o creștere a valorii frecvenței corespunzătoare modului 2#. De asemenea, clasa de calitate a lemnului influențează valorile frecvențelor proprii, ducând la o ușoară creștere a valorilor pentru cea de-a doua frecvență proprie, cel mai mult evidentă în cazul plăcilor cu grosimea majorată cu 0.6 mm față de grosimea de referință. Din **Figura 3.28, b** reiese gradul de variație a valorii frecvențelor corespunzătoare modului 2#, cu scăderea clasei de calitate și modificarea grosimii plăcilor. Abaterea față de valoarea plăcii de referință (00) este cea mai mare pentru plăcile din clasa D, cu grosimea majorată cu 0.6 mm.

În literatura de specialitate, [82; 83] raportează pentru plăcile de vioară din molid, valoarea de 80 Hz pentru prima frecvență proprie corespunzătoare modului 1# de vibrație, iar a doua frecvență proprie cu valoarea de 147 Hz, valoare care se regăsește la plăcile din clasa A și C, cu grosimea de referință (din producție). În cazul experimentului realizat în acest studiu, valorile frecvențelor proprii au fost selectate pe baza unui filtru privind amplitudinea frecvențelor, fapt pentru care prima valoare corespunde cu modul 2# din literatura de specialitate, acesta fiind un mod de vibrații numit "X mod" [65–70]. În **Tabelul 3.10** sunt prezentate valorile frecvenței dominante ale plăcilor de molid ca structuri individuale, iar în **Figura 3.29** sunt prezentate comparațiile între valorile frecvenței dominante pentru plăcile cu grosimea de referință (notată 0), grosimea majorată cu 0.6 mm (notată P6) și micșorată cu 0.6 mm (notată cu M6).

**Tabelul 3.10** Valorile frecvenței dominante a plăcilor din lemn de molid în funcție de clasa de calitate anatomică a lemnului

Tipuri de grosimi ale plăcilor de molid	Frecvența dominantă (Hz)			
	Clasa A	Clasa B	Clasa C	Clasa D
M6	891.0	857.5	677.5	869.6
M4	952.0	912.5	787.4	787.4
M2	881.0	897.2	906.4	719.6
0	866.0	897.2	933.8	912.5
P2	955.2	869.8	955.2	940.0
P4	939.9	967.4	933.9	879.0
P6	952.2	1007.1	1007.1	1074.5



**Figura 3.29.** Comparații între valorile frecvenței dominante pentru plăcile cu grosimea de referință (notată 0), grosimea majorată cu 0.6 mm (notată P6) și micșorată cu 0.6 mm (notată cu M6)

Variația frecvenței dominante pentru o variație a grosimii plăcilor de 1.2 mm pe toată suprafața plăcii este cea mai redusă pentru placa din clasa A (aproximativ 6%), aceasta având o comportare dinamică relativ omogenă indiferent de variația grosimii plăcii, comparativ cu plăcile din clasa C și D al căror frecvență dominantă balează de minimum de grosime la maximum de grosime al plăcii între 48% (clasa C) și 23% clasa D. Din punct de vedere tehnologic, acest aspect se transpune în următoarele posibilități: pentru clasa A, variația dimensională nu afectează răspunsul dinamic al plăcii; pentru clasele inferioare, variația dimensională influențează răspunsul plăcilor fapt pentru care se pot adopta soluții de creștere a calității instrumentelor muzicale prin modificarea grosimii plăcilor atât pentru placa de față cât și pentru cea de spate.

Corelând rezultatele obținute, a rezultat că parametrii dinamici ai plăcilor de molid prezintă un nivel moderat de variabilitate; excepție face mărimea celei de a doua frecvențe, care este stabilă de la o măsurătoare la alta (coeficientul ei de variație este aproape 10 %). Majoritatea variabilelor acustice sunt conforme legii normale (adică se distribuie gaussian) (Tabelul 3.11). Din acest motiv pentru identificarea factorilor de variație a mărimii lor se adoptă *analiza de varianță*.

*Tabelul 3.11. Statistici descriptive ale parametrilor acustici examinați pentru plăcile de vioară*

Variabilă	Valoare	Media aritmetică				Coeficient de variație (%)	Normalitatea variabilei (cu testul Shapiro-Wilk)	
		Interval de încredere		Mediana	Minim			Maxim
Frecvența fundamentală (Hz)	145	140	151	146	85	189	14.27	Ipoteza normalității nu poate fi respinsă
A doua frecvență (Hz)	333	324	342	335	238	415	9.98	
Frecvența dominantă (Hz)	904	876	933	918	537	1202	11.84	Ipoteza normalității nu poate fi acceptată
Factorul de amortizare	80	76	85	79	43	125	22.01	Ipoteza normalității nu poate fi respinsă

Din analiza dublă de varianță, a rezultat că *mărimea factorului de amortizare* nu variază cu clasa de calitate și grosimea plăcii instrumentului și nici cu combinațiile între ele (Tabelul 3.12). În schimb, clasa de calitate a instrumentului este un factor de variație pentru frecvența fundamentală, a doua frecvență și frecvența maximă.

*Tabelul 3.12. Influența clasei de calitate și grosimii plăcii asupra parametrilor acustici, examinată cu analiza dublă de varianță (valorile cu roșu sunt semnificative statistic pentru valori mai mici de 5 % a probabilității de transgresiune)*

Factori de variație	F (p) din ANOVA pentru parametrul analizat			
	Frecvența fundamentală (Hz)	A doua frecvență (Hz)	Frecvența dominantă (Hz)	Factorul de amortizare
Clasa de calitate	<b>9.61 (&lt; 0.001)</b>	<b>6.30 (0.002)</b>	0.31 (0.82)	1.08 (0.37)
Grosimea placă	<b>6.89 (&lt; 0.001)</b>	<b>8.49 (&lt; 0.001)</b>	<b>2.59 (0.04)</b>	1.35 (0.27)
Interacțiunea clasa de calitate și grosime placă	1.67 (0.11)	<b>2.57 (0.01)</b>	0.69 (0.80)	0.95 (0.54)

Frecvența maximă variază cu clasa de calitate, independent față de grosimea plăcii. În figura de mai jos se prezintă histrograma acestui parametru acustic stratificată după clasa de calitate. *Grosimea plăcii este un factor de variație pentru frecvența fundamentală, a doua frecvență și frecvența dominantă.* De exemplu, frecvența dominantă variază cu grosimea plăcii fără contribuția clasei de calitate (Figura 3.30).

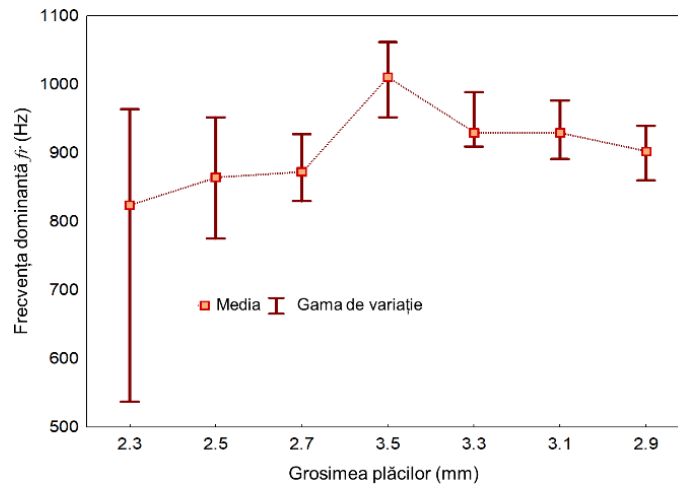
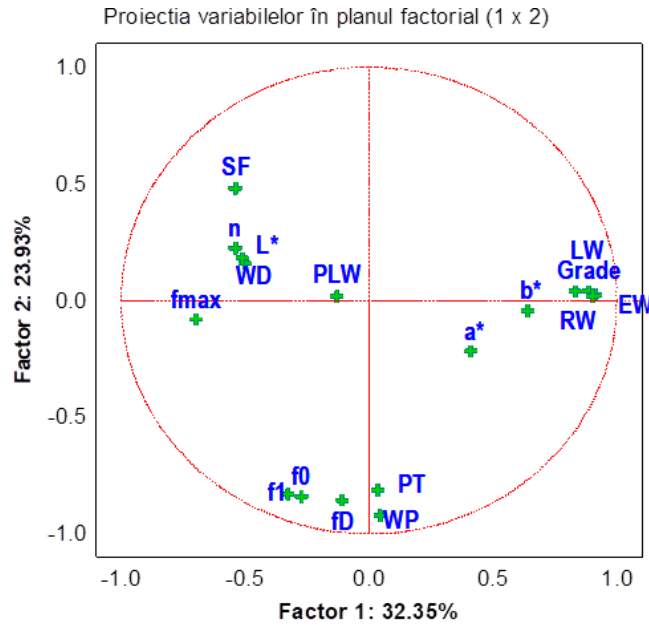


Figura 3.30. Variația frecvenței dominante cu grosimea plăcii

Combinăția între clasele de calitate și de grosime a plăcii sunt relevante numai pentru cea de a doua frecvență. Din analiza corelației a rezultat că frecvența dominantă crește linear cu grosimea plăcii în intervalul studiat al acesteia ( $R^2 = 0.42$ ). Ecuația regresiei arată că la modificarea grosimii plăcii de față cu  $0.2 \text{ mm}$ , frecvența dominantă se schimbă cu  $22 \text{ Hz}$ . Cu Analiza Factorială (AF) au fost extrase cinci componente principale, primele două explicând împreună  $56 \%$  din varianța totală. Prima componentă principală este definită de frecvența dominantă iar cea de a doua componentă de frecvența maximă (Figura 3.31). Frecvența dominantă variază în tandem cu masa și grosimea plăcii, dar independent de structura și proprietățile lemnului de molid. Masa instrumentului are o contribuție de  $85 \%$  la varianța explicată de factorul 1. Frecvența maximă este diametral opusă caracteristicilor absolute ale inelului anual (lățimea inelului și lățimea componentelor lui) și conținutului de galben al culorii lemnului. Lățimea inelelor anuale are cea mai mare contribuție ( $84 \%$ ) la varianța interceptată de această a doua componentă principală. Clasa de calitate a materialului, definită după criterii anatomice, este cel mai bine redată de frecvența maximă. Proporția lemnului târziu este practic incompatibilă cu toate însușirile acustice analizate; desigur, nu trebuie trase concluzii pripite pentru că materialul lemnos examinat acustic nu prezintă întreaga gamă de valori ale proporției lemnului târziu întâlnite la molid (i.e. probele nu conțin lemn de compresiune, la care PLW este considerabil mai mare).



*Figura 3.31. Parametrii fizici și acustici în planul factorial bidimensional. Legendă: Simbolurile variabilelor: a\* - nuanța de roșu/verde a culorii natur a lemnului, b\* - nuanța de galben/albastru a culorii natur a lemnului, EW - lățimea lemnului timpuriu, f<sub>0</sub> - frecvența fundamentală, f<sub>1</sub> - a doua frecvență, f<sub>D</sub> - frecvența dominantă, f<sub>max</sub> - frecvența maximă, Grade - clasa de calitate a viorii, LW - lățimea lemnului târziu, n - factorul de amortizare, PLW - proporția lemnului târziu, PT - grosimea plăcii, RW - lățimea inelului anual, SF - numărul de armonice, WD - densitatea lemnului, WP - masa plăcii.*

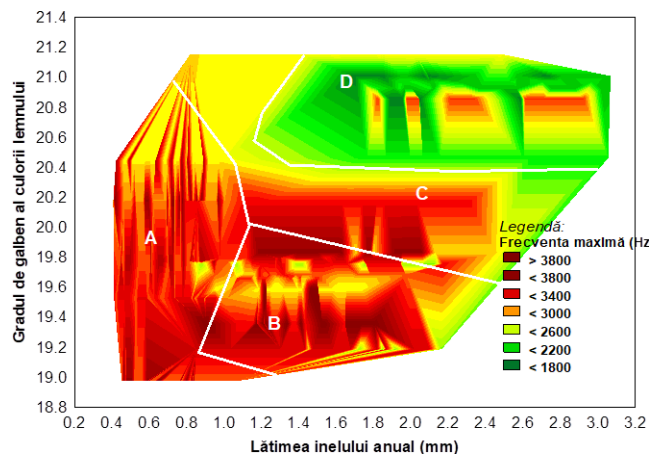
Parametrii acustici analizați în relație cu structura și proprietățile materialului formează două grupuri independente matematic: prima frecvență, a doua frecvență naturală și frecvența dominantă - un grup, respectiv frecvența maximă, numărul de armonice și factorul de amortizare - al doilea grup. Modul de asociere a fost verificat cu *k-means clustering*. A reieșit că frecvența maximă singură formează un cluster independent. Legăturile între parametrii acustici au fost verificate cu corelația parțială (Tabelul 3.13).

*Tabelul 3.13. Matricea coeficienților de corelație simplă parțială între parametrii acustici (cu îndepărtarea influenței grosimii plăcii)*

Parametrii acustici	Coeficienții de corelație simplă (probabilitatea de transgresiune)					
	Frecvența fundamentală (Hz)	A doua frecvență (Hz)	Frecvența dominantă (Hz)	Frecvența maximă (Hz)	Numărul de armonice	Factorul de amortizare
Frecvența fundamentală (Hz)		<b>0.805</b> ( <b>&lt;0.001</b> )	<b>0.454</b> ( <b>&lt;0.001</b> )	<b>0.581</b> ( <b>&lt;0.001</b> )	0.027 (0.56)	0.055 (0.24)
A doua frecvență (Hz)			<b>0.518</b> ( <b>&lt;0.001</b> )	<b>0.553</b> ( <b>0.001</b> )	-0.025 (0.58)	0.033 (0.48)
Frecvența dominantă (Hz)				<b>0.209</b> ( <b>&lt;0.001</b> )	<b>-0.234</b> ( <b>&lt;0.001</b> )	-0.031 (0.50)
Frecvența maximă (Hz)					<b>0.543</b> ( <b>&lt;0.001</b> )	<b>0.494</b> ( <b>&lt;0.001</b> )
Numărul de armonice						<b>0.601</b> ( <b>&lt;0.001</b> )
Factorul de amortizare						-

Dacă se face abstracție de grosimea plăcii, rezultă că frecvențele sunt bine corelate între ele, îndeosebi frecvența fundamentală și a doua frecvență. În schimb, factorul de amortizare este în relație numai cu frecvența maximă și numărul de armonice (Tabelul 3.13). Lățimea inelelor anuale și a componentelor lor (lemn timpuriu, lemn târziu) exprimă, cu o anumită fidelitate, însușirile acustice analizate, îndeosebi frecvența maximă. Polinomul de gradul 2 redă cel mai bine legătura între cele două variabile. Reducerea mărimii frecvenței maxime cu lățimea inelului anual se evidențiază de la valori ale acesteia mai mari de 1.5-2 mm. În schimb, proporția lemnului târziu nu este relevantă pentru variația mărimii parametrilor acustici.

Din punct de vedere al corelației dintre mărimile dinamice și caracteristicile fizice exprimate prin componentele culorii, numai conținutul de galben exprimă, într-o măsură mai mare decât inelele anuale, unele însușiri acustice ale lemnului (Figura 3.32).



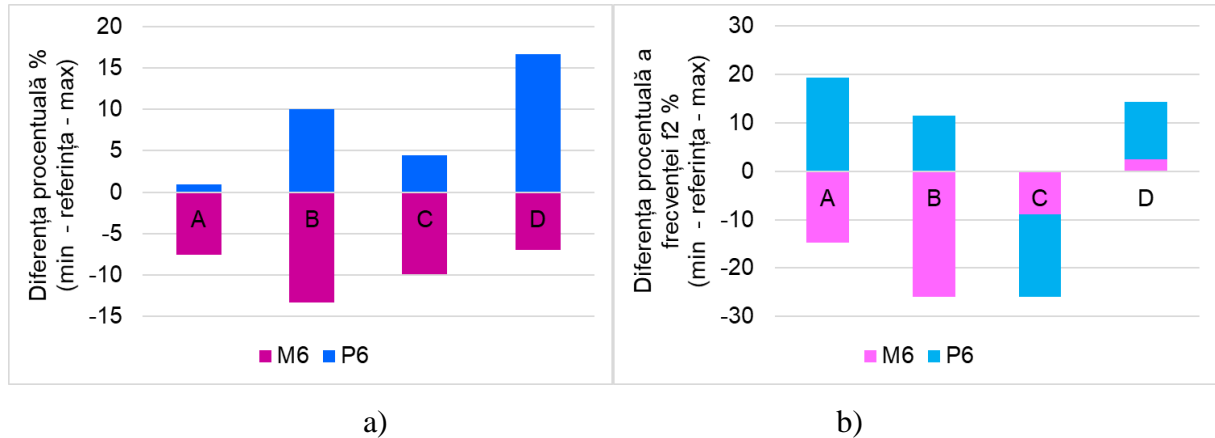
*Figura 3.32. Corespondența între mărimile experimentale ale frecvenței maxime, lățimea inelelor anuale și conținutul de galben al culorii lemnului de molid, stratificată după clasa de calitate a instrumentului*

Mărimea densității lemnului nu are nicio legătură cu parametrii acustici analizați. Corelația multiplă are o putere mai mare decât corelațiile parțiale de a reda legăturile între parametrii acustici, pe de o parte, și însușirile fizice ale lemnului, pe de altă parte. De exemplu, coeficientul de corelație multiplă a frecvenței maxime cu gradul de galben al culorii lemnului și lățimea inelelor anuale este  $0.622$  ( $p < 0.001$ ), valoare care întrece toate corelațiile simple identificate. Toate aceste corelații sunt lineare. Regresia curbilinie (polinomul de gradul 2) exprimă mai bine legătura multiplă între aceste variabile. În cazul frecvenței maxime, coeficientul de corelație multiplă crește la  $0.658$  dacă se alege modelul polinomial (Figura 3.32).

### **Plăcile din lemn de paltin**

În cazul plăcilor din lemn de paltin, s-a constatat că parametrii dinamici prezintă un nivel moderat de variabilitate. Astfel, în Figura 3.33,a sunt reprezentate diferențele procentuale între frecvențele plăcilor cu grosimea cea mai mare (P6) față de placa de referință (00), respectiv frecvențele plăcilor cu grosimea cea mai mică (M6) față de placa de referință (00). Diferențele cele mai mari

se înregistrează pentru plăcile din clasa B și D de calitate anatomică a lemnului de paltin. La a doua frecvență, comportamentul plăcilor în funcție de clasa de calitate se modifică, astfel încât cea mai mare diferență o înregistrează plăcile din clasa B, urmată de clasa A. La plăcile din clasa C diferențele sunt negative, pentru ambele extreme ale grosimii plăcilor, iar pentru cele din clasa D se constată că diferențele sunt pozitive, respectiv, valorile frecvențelor sunt mai mari decât frecvența plăcii de referință (Figura 3.33b).



*Figura 3.33. Diferența procentuală dintre valorile frecvențelor plăcilor din lemn de paltin: a) fundamentale a plăcilor cu grosimea maximă și cea nominală (reprezentare cu galben), respectiv a plăcilor cu grosimea minimă și cea nominală; b) a doua frecvență proprie a plăcilor cu grosimea maximă și cea nominală (reprezentare cu galben), respectiv a plăcilor cu grosimea minimă și cea nominală*

Majoritatea variabilelor dinamice nu se distribuie gaussian. Din acest motiv identificarea factorilor de variație a mărimii lor se va face cu mijloacele statisticii neparametrice (Tabelul 3.14).

*Tabelul 3.14. Statistici descriptive ale parametrilor dinamici examinați*

Variabilă	Valoare	Media aritmetică		Interval de încredere	Mediana	Minim	Maxim	Coeficient de variație (%)	Normalitatea variabilei (cu testul Shapiro-Wilk)
Frecvența fundamentală (Hz)	303	290	316	317	152	378	17.55	Ipoteza normalității nu poate fi acceptată	
A doua frecvență (Hz)	521	493	549	506	317	848	22.27		
Frecvența dominantă (Hz)	1514	1432	1596	1471	101	2332	22.31		

Astfel, s-a constatat că mărimea factorului de amortizare, a frecvenței dominante și a frecvenței maxime nu variază nici cu clasa de calitate, nici cu grosimea plăcii. Clasa de calitate a instrumentului este un factor de variație numai pentru frecvența fundamentală și a doua frecvență (Tabelul 3.15).

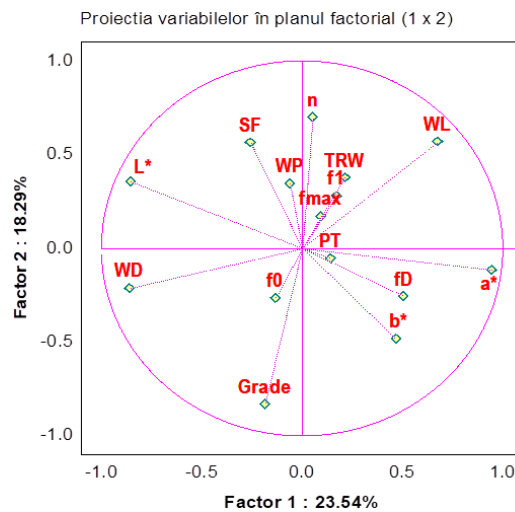


*Tabelul 3.15. Influența clasei de calitate și grosimii plăcii asupra parametrilor dinamici examinați.*

Factori de variație	H(p) din testul Kruskal-Wallis pentru parametrul:					
	Frecvența fundamentală (Hz)	A doua frecvență (Hz)	Frecvența dominantă (Hz)	Frecvența maximă (Hz)	Numărul de armonice	Factorul de amortizare
Clasa de calitate	<b>7.71</b> ( <b>0.05</b> )	<b>14.29</b> ( <b>0.003</b> )	2.22 (0.53)	3.19 (0.36)	0.34 (0.95)	4.59 (0.20)
Grosimea placă	<b>25.37</b> ( <b>&lt; 0.001</b> )	<b>17.57</b> ( <b>0.007</b> )	7.03 (0.32)	7.89 (0.25)	<b>13.28</b> ( <b>0.04</b> )	2.78 (0.84)

Valorile evidențiate sunt semnificative statistic pentru valori mai mici de 5 % a probabilității de transgresiune

Grosimea plăcii este un factor de variație pentru frecvența fundamentală, a doua frecvență și numărul de armonice. Numărul de armonice variază cu grosimea plăcii fără contribuția clasei de calitate. Din matricea comparațiilor multiple între clasele de calitate a rezultat că diferențele în privința celei de a doua variabile se datorează numai *clasei D de calitate anatomică*. De asemenea, diferențele în ce privește mărimea frecvenței fundamentale și a celei de a doua frecvențe se datorează plăcilor care au adăugat 0.6 mm la grosimea nominală. Cu analiza factorială au fost extrase trei componente principale, care împreună explică 44 % din varianța totală. Prima componentă principală este definită de *factorul de amortizare*, iar cea de a doua componentă de *densitatea lemnului* (Figura 3.34).

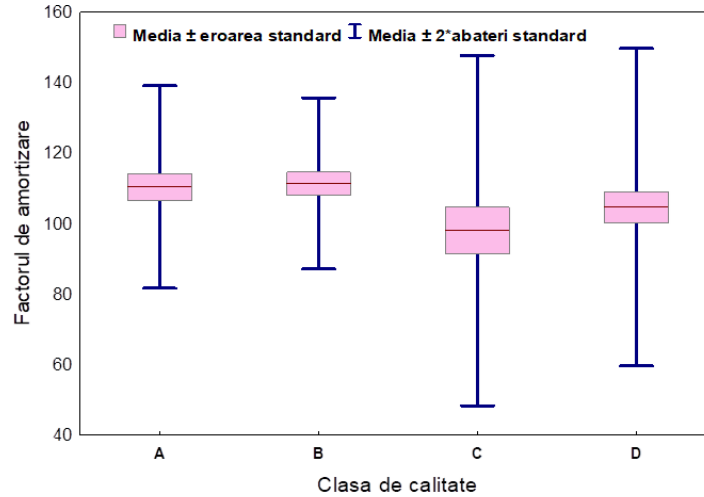


*Figura 3.34. Variația parametrilor fizici și dinamici ai plăcilor din lemn de paltin în plan factorial*

Factorul de amortizare este diametral opus clasei de calitate, asocierea indică proporționalitatea mărimii celor două variabile: la clasele superioare de calitate, amortizarea este mai mare. Relația între clasa de calitate și mărimea factorului de amortizare este cea mai relevantă legătură între variabilele acestui studiu și poate fi urmărită în detaliu în figura de mai jos. Factorul de amortizare variază în tandem cu numărul de armonice. Cea de a doua componentă surprinde contrastul între densitatea lemnului și conținutul de roșu al culorii: lemnul cu densitate mai redusă are o concentrație mai mare de roșu în compoziția culorii. Grosimea plăcii nu are o implicare

deosebită în relațiile dintre variabilele fizico-dinamice studiate. Prima frecvență și frecvența maximă par a fi independente de celelalte variabile din studiu.

Din [Figura 3.35](#) reiese faptul că există o tendință de reducere a factorului de amortizare cu clasa de calitate, mai ales la clasa C, dar și de lărgire a domeniului de variație a factorului de amortizare la clasele C și D de calitate a instrumentului.



*Figura 3.35. Variația factorului de amortizare cu clasa de calitate a instrumentului*

Modul de asociere a variabilelor a fost verificat cu *k-means clustering*, de unde a reieșit că frecvența maximă singură formează un cluster independent. *Tree clustering* a evidențiat că parametrul acustic cel mai apropiat însușirilor fizice ale materialului este numărul de armonice. În raport cu distanțele euclidiene, a reieșit că numărul de armonice este foarte apropiat de gradul de galben al culorii ( $b^*$ ) și de grosimea plăcii. Aceste legături au fost verificate cu corelații simple și parțiale. În prima etapă, au fost verificate corelațiile între parametrii dinamici ([Tabelul 3.16](#)). Frecvențele sunt independente unele de altele. În schimb, frecvența maximă, numărul de armonice și factorul de amortizare sunt într-o anumită măsură asociate, indiferent de grosimea plăcii.

*Tabelul 3.16. Matricea coeficienților de corelație simplă parțială (cu excluderea influenței grosimii plăcilor) între parametrii acustici examinați*

Parametrii acustici	Frecvența fundamentală (Hz)	Coeficienții de corelație simplă (probabilitatea de transgresiune)				Numărul de armonice	Factorul de amortizare
		A doua frecvență (Hz)	Frecvența dominantă (Hz)	Frecvența maximă (Hz)			
Frecvența fundamentală (Hz)		<b>0.605</b> ( <b>&lt;0.001</b> )	-0.038 (0.76)	0.028 (0.82)	-0.029 (0.09)	-0.141 (0.25)	
A doua frecvență (Hz)			0.154 (0.21)	0.038 (0.76)	-0.195 (0.11)	0.133 (0.28)	
Frecvența dominantă (Hz)				0.231 (0.06)	-0.057 (0.65)	0.201 (0.10)	
Frecvența maximă (Hz)					<b>0.377</b> ( <b>0.002</b> )	<b>0.410</b> ( <b>&lt;0.001</b> )	
Numărul de armonice						<b>0.322</b> ( <b>0.008</b> )	
Factorul de amortizare						-	

Frecvența fundamentală este parametrul dinamic cel mai bine descris de lățimea inelelor și lungimea de undă a fibrei crețe. Datele experimentale arată că lungimea de undă formează două grupuri disjuncte:

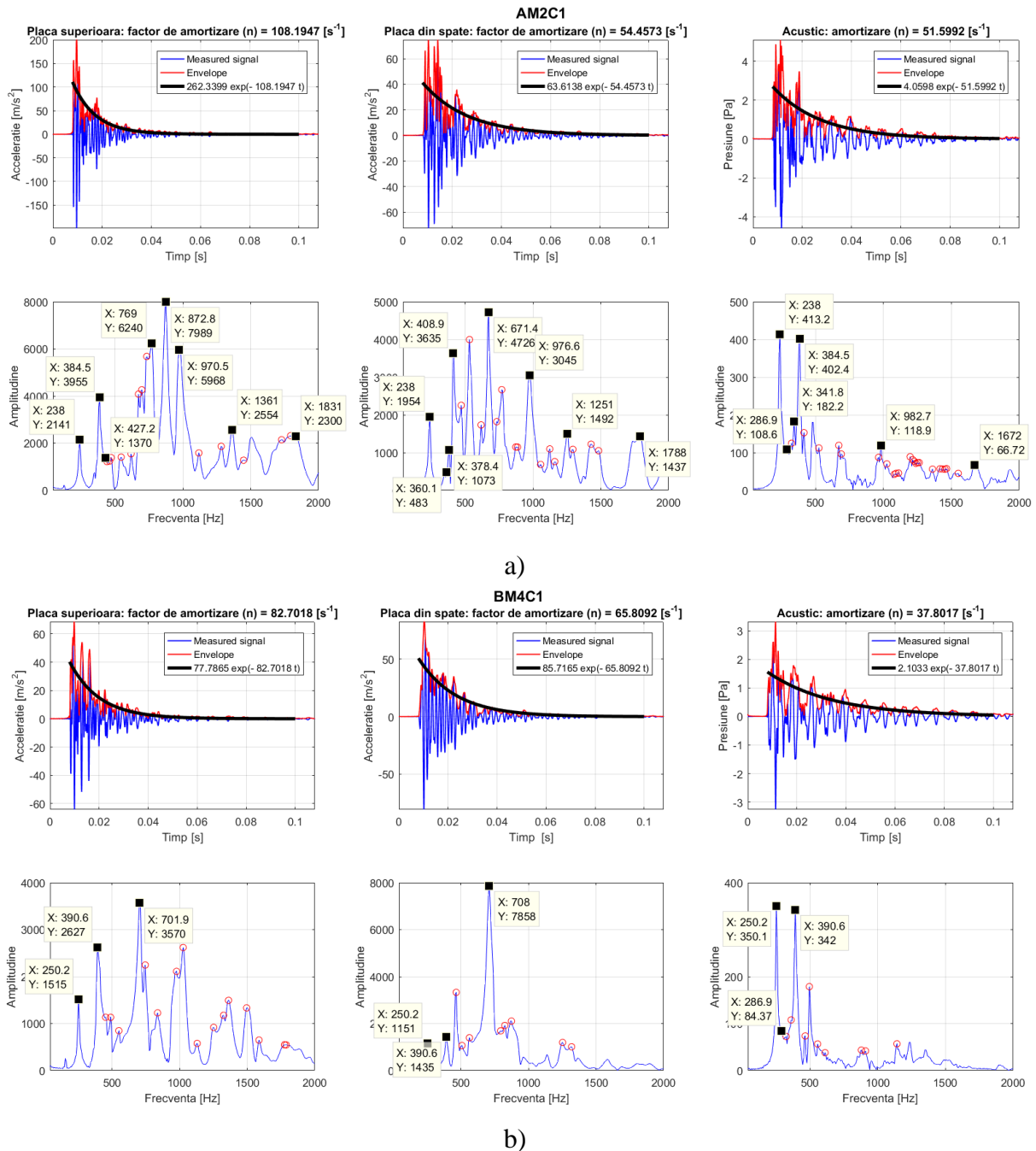
- primul, cu fibră crețată deasă și valori mai mari ale frecvenței fundamentale,
- celălalt cu fibră crețată rară și valori mai mici ale frecvenței fundamentale.

Lățimea inelelor anuale redă, într-o oarecare măsură, numai frecvența fundamentală și factorul de amortizare. Lemnul de paltin cu inele mai fine prezintă valori mai mari ale frecvenței fundamentale și amortizare mai slabă. Culoarea lemnului de paltin transmite cu greutate indicații privind nivelul însușirilor sale dinamice - singurul rezultat credibil statistic evidențiază descreșterea frecvenței dominante cu gradul de alb al culorii. Densitatea lemnului este independentă de nivelul parametrilor dinamici investigați. O anumă tendință este numai în legătură cu frecvența dominantă, ale cărei valori sunt mai mari la lemnul de paltin cu densitate mai mică. Corelația multiplă nu îmbunătățește substanțial tăria legăturilor între variabile.

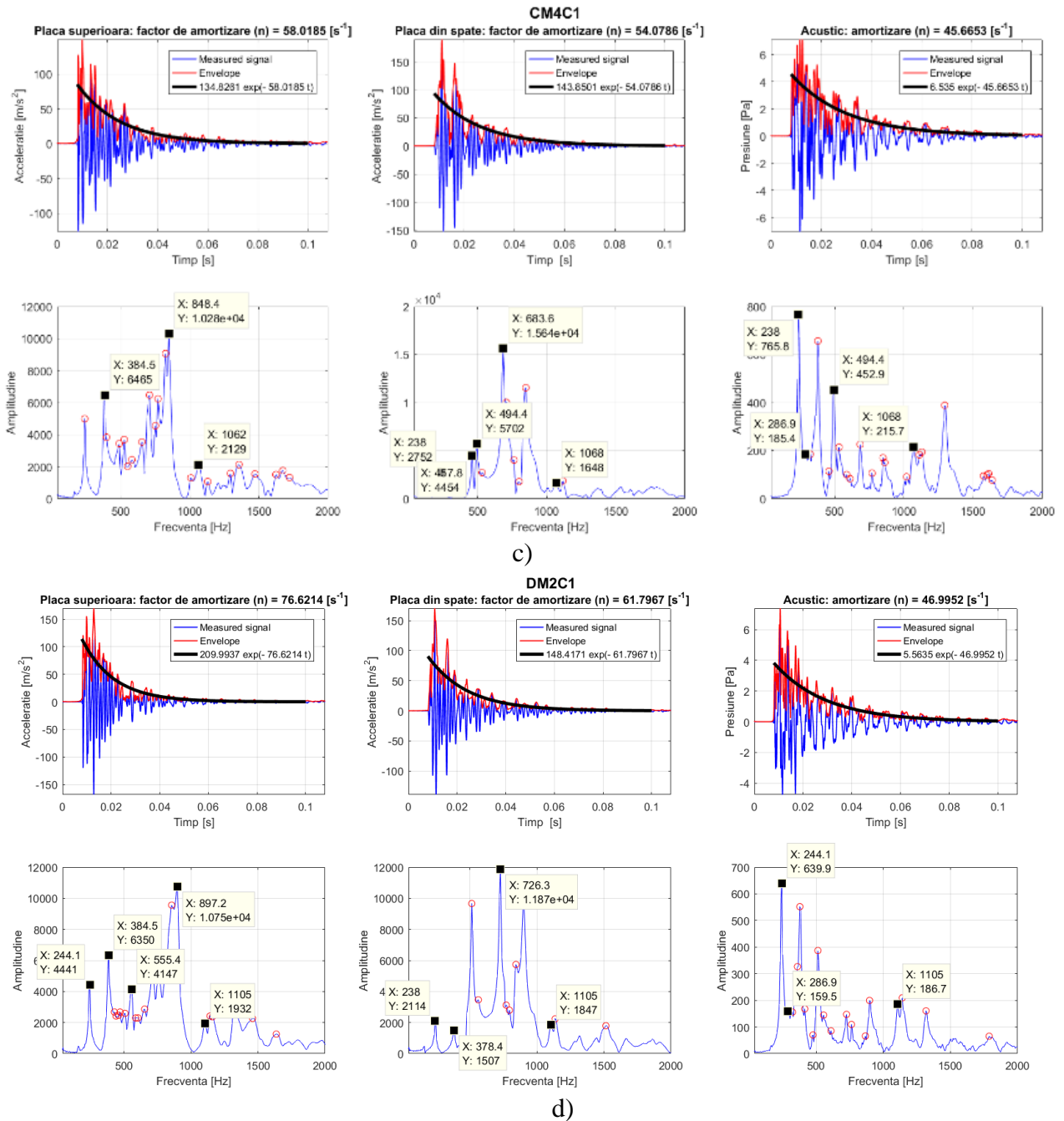
### ***Corpul de vioară fără gât***

După testarea plăcilor de vioară ca structuri individuale, acestea au fost trimise la fabrică pentru a fi integrate în corpul de vioară, alături de placa de spate și toate celelalte elemente constructive. Sau obținut în următoarea etapă tehnologică, corpuri de vioară fără gât care au fost analizate în mod similar pentru a identifica modificările răspunsului dinamic al plăcilor în nouă structură (noi condiții de contur a plăcilor, decuparea găurilor acustice f-uri, atașarea barei bas și a popicului). Aplicând transformata Fourier, s-au obținut pentru fiecare structură analizată (în total 56 corpuri de vioară), răspunsul în timp și în frecvență din care s-au extras modurile specifice viorii (*signature modes – engl.*) conform studiilor evidențiate de [11–13]. În **Figura 3.36** sunt prezentate selectiv tipurile de grafice rezultate în urma prelucrării semnalelor. Fiecare figură conține câte șase grafice: cele aflate în partea superioară reprezintă analiza în timp pentru placa de față, placa de spate la care semnalele au fost preluate cu accelerometre și pentru presiunea aerului din corpul de vioară care a fost măsurată cu ajutorul microfonului plasat în apropierea orificiilor acustice. În partea inferioară a figurii sunt reprezentate spectrele de frecvență obținute prin analiza în frecvență a semnalelor. Modurile de vibrație specifice viorilor sunt denumite de [13] ca modul **A0**, **A1**, **CBR**,  $B_1^-$  și  $B_1^+$ . Există două moduri de frecvență joasă asociate cu variația presiunii aerului în cavitatea cutiei de vioară, **A0** și **A1**. Modurile **A0** și **A1** sunt moduri de cuplare. Modul **A0 se înregistrează în jurul valorii de 270 Hz** și se numește modul de rezonanță Helmholtz, ambele plăci vibrând în antifază. Modul **A1** este o primă undă staționară ce vibrează în lungul corpului de vioară, în intervalul **470 - 490 Hz**. Modul **CBR** – cunoscut ca rotația centrului sau modul de vibrație romboid, este cel mai scăzut mod de frecvență corpus la aproximativ 400 Hz [13]. Primele moduri

de încovoiere a corpului, notate  $B_1^-$  și  $B_1^+$  sunt în jur de 500 Hz ambele radiază energie. Așa cum a menționat Bissinger, „Fiecare vioară are doar cinci moduri specifice: al corpului în întregime, al plăcii de față, al ecliselor; al plăcii de spate. Celelalte elemente structurale ale vioarei (gâtul, cordarul, etc) se pot cupla la aceste moduri, divizându-le. **Intervalul de frecvențe specific cordelor libere de vioară 196–660 Hz** (coarda: Sol, 196 Hz; Re, 293.6 Hz; La, 440a Hz; Mi, 659,3 Hz), este crucial pentru sunetul vioarei și, de aceea aceste intervale de frecvențe sunt studiate cu mare atenție la vioari.



**Figura 3.36.** Analiza în timp și în frecvență a semnalelor înregistrate – placa față, placa spate, presiunea acustică a aerului din corpul de vioară, pentru diferite tipuri de corpuri de vioară



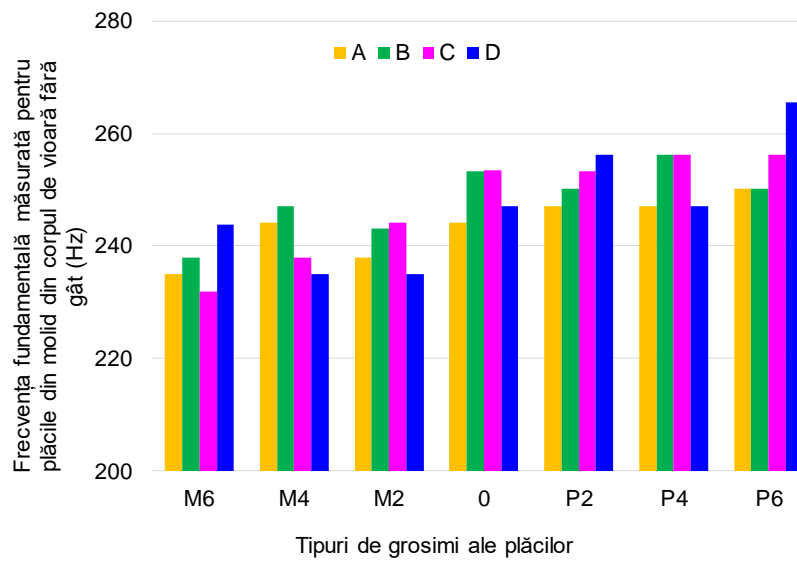
*Figura 3.36. Analiza în timp și în frecvență a semnalelor înregistrate – placa față, placa spate, presiunea acustică a aerului din corpul de vioară, pentru diferite tipuri de corpuri de vioară (continuare)*

În Tabelul 3.17 sunt centralizate valorile frecvenței fundamentale ale corpului de vioară fără gât, în funcție de clasa de calitate structurală și grosimea plăcii, iar în Figura 3.37. Variația frecvenței fundamentale a corpului de vioară (semnale achiziționate de pe fața vioarei) sunt prezentate comparativ. Se poate observa că valorile au tendință crescătoare cu creșterea grosimii plăcilor, precum și cu scăderea clasei de calitate a lemnului. Această valoare caracterizează vibrația aerului din corpul de vioară, constituind frecvența întâlnită la toate cele trei componente investigate: placa de față/placa de spate/aer, această frecvență însoțind modul de rezonanță A0

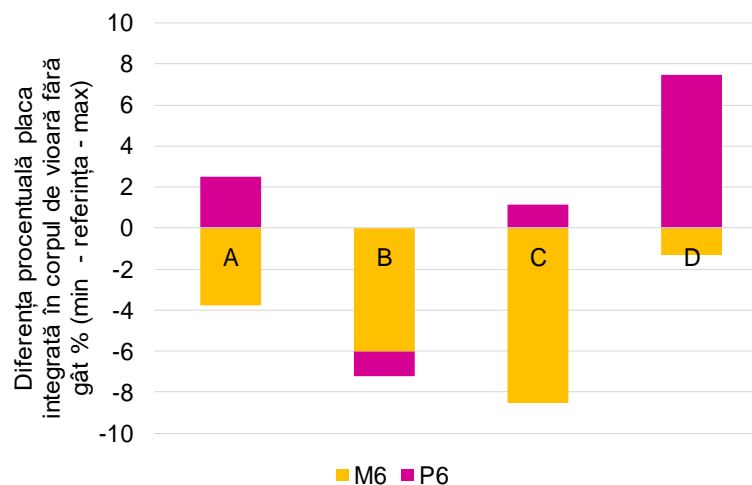
(Figura 3.37). Comparativ cu studiile din literatura [13; 68; 200] , prezintă valoarea de 243 Hz determinată experimental pe corpul de vioară.

**Tabelul 3.17. Valorile frecvenței fundamentale corpul de vioară fără gât (modul A0)**

Tipuri de viori în funcție de grosimile plăcilor	Frecvența fundamentală a corpurilor fără gât (Hz)			
	A	B	C	D
M6	235.0	238.0	231.9	243.9
M4	244.1	247.2	238.0	235.0
M2	238.0	243.1	244.1	235.0
0	244.1	253.3	253.5	247.2
P2	247.2	250.2	253.3	256.3
P4	247.2	256.3	256.3	247.2
P6	250.2	250.2	256.3	265.6



**Figura 3.37. Variația frecvenței fundamentale a corpului de vioară (semnale achiziționate de pe fața viorii)**



**Figura 3.38. Diferența procentuală dintre valorile frecvenței de rezonanță a corpului de vioară, cu grosimea maximă și cea nominală (reprezentare cu roz), respectiv a plăcilor cu grosimea minimă și cea nominală (reprezentată cu galben)**



Din **Figura 3.38** reiese faptul că viorile maestro, chiar și în primele etape ale procesului tehnologic, prezintă cele mai mici variații ale frecvenței de rezonanță în raport cu grosimea plăcilor. În schimb, cele mai mari variații se înregistrează pentru corpurile având în structura lor lemn din clasele C și D. În **Tabelul 3.18** și **Tabelul 3.19** sunt prezentate valorile frecvențelor pentru modul de vibrație CBR (romboid) și pentru frecvența dominantă, având cea mai mare amplitudine din spectrul de frecvențe. [68] menționează că în jurul valorii de 820 Hz, plăcile de față și spate vibrează în aceeași fază, dar cu amplitudini diferite, placa de față contribuind mai mult în schimbarea volumului din interiorul corpului de vioară. Ca mod de vibrație, pentru această frecvență, se obține un mod de încovoiere cu trei unde longitudinale staționare.

**Tabelul 3.18.** Valorile proprii pentru modul CBR ( modul de vibrație romboid) al corpului de vioară fără gât

Tipuri de viori în funcție de grosimile plăcilor	Valorile proprii ale modului CBR (Hz)			
	A	B	C	D
M6	378.4	387.6	372.3	317.4
M4	390.6	387.6	381.5	378.4
M2	384.5	390.6	388.4	386.0
0	384.5	393.7	399.8	387.6
P2	387.6	399.8	412.0	323.5
P4	384.5	408.9	427.9	392.1
P6	384.5	402.5	393.7	418.1

**Tabelul 3.19.** Valorile frecvenței dominante a corpului de vioară fără gât

Tipuri de viori în funcție de grosimile plăcilor	Frecvența dominantă (Hz)			
	A	B	C	D
M6	796.5	845.4	793.5	695.8
M4	811.8	763.0	867.6	378.4
M2	882.0	631.7	390.6	793.5
0	781.3	744.6	1141.6	882.0
P2	872.8	787.4	723.3	711.1
P4	891.1	735.5	750.7	863.7
P6	805.7	753.8	567.6	995.1

### 3.3.4 Concluzii privind analiza modală a plăcilor de vioară în diferite stadii de asamblare

În urma analizei statistice a rezultatelor extrase din analiza dinamică a plăcilor de vioară ca structuri individuale, respectiv ca structuri complexe integrate în corpul de vioară, se pot extrage următoarele concluzii:

- ✚ În cazul plăcilor individuale din lemn de molid, în cadrul clasei de calitate A, atât primele frecvențe proprii cât și frecvențele dominante nu sunt influențate semnificativ statistic de modificarea grosimii plăcii, spre deosebire de plăcile din lemn de paltin cu fibră foarte creată, care reacționează semnificativ la modificarea grosimii plăcii în cazul primei frecvenței de rezonanță. Astfel, molidul reacționează diferit față de paltin la modificarea grosimii plăcii: dacă la molid prima frecvență proprie este practic direct proporțională cu cuantumul

modificării grosimii, la paltin tendința este de tip parabolic, cu vârful parabolei în dreptul grosimii nominale a plăcii (Figura 3.39, a și b).

- ✚ La plăcile din lemn de molid, modificarea cu numai 0.2 mm a grosimii plăcii față de grosimea normală, produce creșterea abruptă a frecvenței corespunzătoare modului 5, în timp ce la paltin efectele asupra frecvenței se înregistrează practic numai la subțierea plăcii (Figura 3.39, c).
- ✚ În ceea ce privește frecvența dominantă (cu amplitudinea maximă), în cazul plăcilor din lemn de molid clasa A, nu se observă o tendință modelabilă matematic a frecvenței dominante cu modificarea grosimii plăcii. În schimb, la paltin frecvența dominantă crește curbiliniu cu depărtarea de grosimea nominal (Figura 3.39, d).

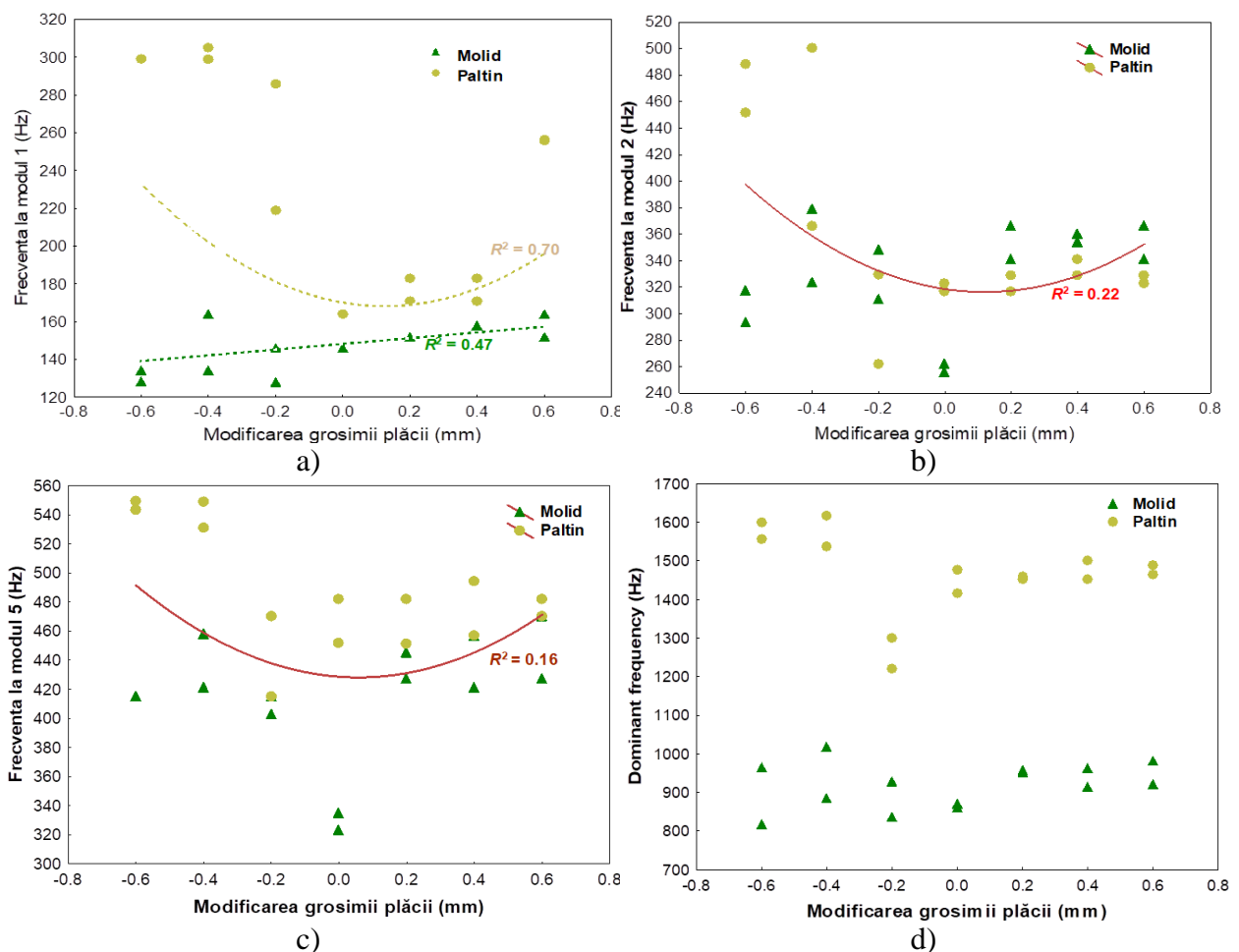


Figura 3.39. Variația mărimii frecvenței de rezonanță cu modificarea grosimii plăcilor din clasa A de calitate anatomică: a) modul 1; b) modul 2; c) modul 5; d) frecvența dominantă

- ✚ Atât în cazul plăcilor din lemn de molid, cât mai ales la cele din lemn de paltin, s-a constatat legătura lineară a rigidității dinamice cu modificarea grosimii plăcii. La plăcile din paltin, modificarea grosimii are o contribuție de 85% la variația mărimii rigidității dinamice.
- ✚ În cazul corpurilor de vioară, se constată că, din punct de vedere statistic, majoritatea variabilelor au distribuții neconforme cu legea normală, fapt care implică aplicarea

mijloacelor statisticii neparametrice pentru identificarea influențelor. Astfel, aplicându-se testul Mann-Whitney, s-a constatat că primul mod de vibrație (A0 – modul de vibrație al cavității (aerului)/engl. cavity mode) reacționează puternic la modificarea grosimii plăcii cu toate componentele corpului vioarei (Figura 3.40). În schimb, modul rhomboidal (CBR) este influențat de atașarea gâtului de vioară și formarea structurii complexe Helmholtz. Celelalte moduri B1+, B1-, nu sunt influențate de elementele constructive adăugite. Însă, în cazul frecvenței dominante a plăcii de spate incorporate în structura vioarei, se constată influența gâtului de vioară, gâtul influențând mărimea acestui parametru.

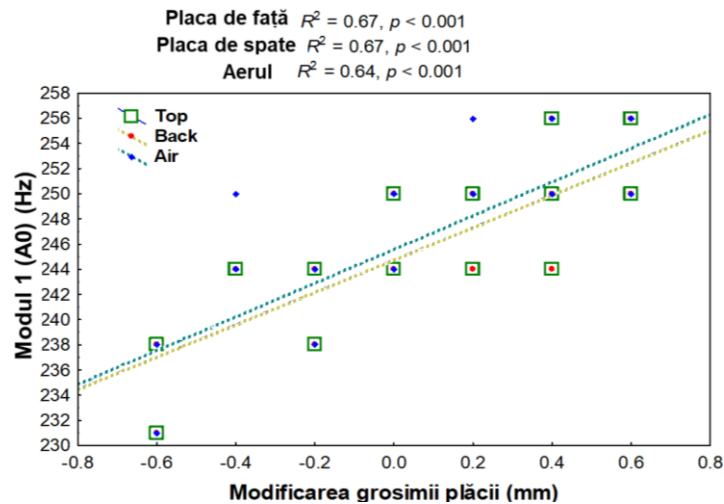


Figura 3.40. Variația valorilor proprii pentru primul mod de vibrație, cu creșterea grosimii plăcilor, în cazul corpurilor de vioară fără gât

- ✚ Frecvența dominantă înregistrată la vibrația plăcii de față (lemn molid) din corpul de vioară nu se modifică cu grosimea plăcilor, nici înainte nici după adăugarea gâtului. Frecvența dominantă de vibrare a aerului se polarizează în jurul valorilor 230-250 Hz respectiv 380-400 Hz, și nu depinde de grosimea plăcilor. În schimb, spatele corpului de vioară reacționează energetic la modificarea grosimii plăcilor prin modificarea frecvenței dominante (Figura 3.41).

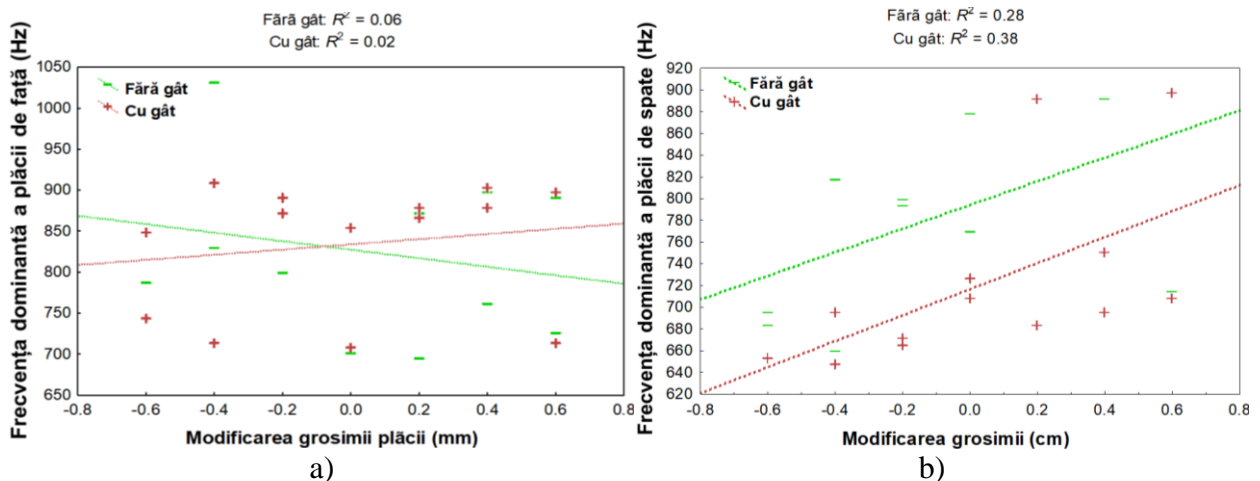


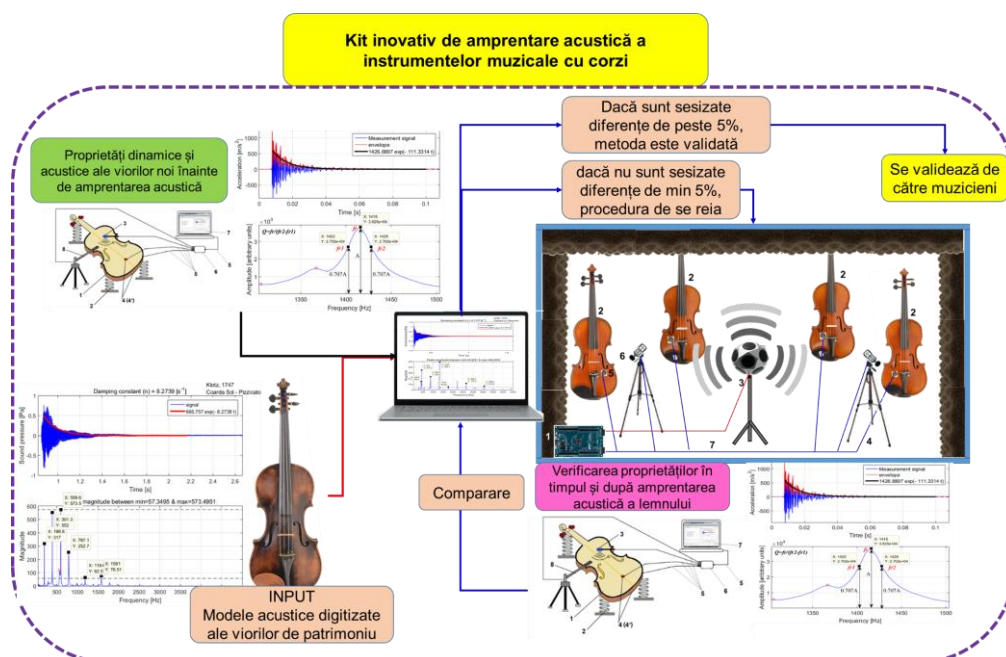
Figura 3.41. Variația frecvenței dominante cu modificarea grosimii plăcilor din corpul de vioară cu gât și fără gât: a) placa de față; b) placa de spate

Ca direcții de cercetare, studiile privind comportarea dinamică a violinelor cu parametrii geometrici și anatomici (structurali) modificate pot fi continuate, aprofundate și focalizate pe:

- ✚ Corelarea rezultatelor analizelor în frecvență cu analiza psihoafectivă a artiștilor care ar evalua aceste violini;
- ✚ Verificarea ipotezei memoriei acustice a lemnului prin imprimarea acustică a lemnului din construcția violinelor noi cu sunetele unei viori de înaltă calitate acustică, considerat model digitalizat;
- ✚ Analiza dinamică și acustică comparativă între violinele noi și violinele istorice.

*Diseminarea rezultatelor cercetării s-a realizat în cadrul lucrărilor:*

- [1] Dobrescu G., Steigman R., Dandu I, Cârstea Cătălin, **Stanciu M.D**, Savin A., Mechanical non-destructive determination of the elastic properties of resonance wood, The 5<sup>th</sup> Edition of Innovation and Creative Education Fair for Youth ICE-USV, Universitatea din Suceava, 28.05.2021 (premiată cu medalia de argint).
- [2] Gliga V. Gh., **Stanciu MD**, Nastac S.M, Campean M., Modal Analysis of Violin Bodies with Back Plates Made of Different Wood Species, BioResources, 2020, vol 15(4), pp. 7687 – 7713. (ISI)
- [3] **Stanciu M.D.**, Dinulica F, Bucur V., Gliga V. Gh., Nastac S.M., Campean M. " Changing the Vibrational Behavior of the Wooden Thin Arched Plates – the Maestro Violins Experimental Study Case”, Thin-Walled Structures – in evaluare.
- [4] Coordonare lucrare de disertație ”*Proprietăți fizice, mecanice și dinamice ale molidului de rezonanță*”, stud. Dandu Ionel, master Simulare și Testare în Ingineria Mecanică, 2021, DIMEC.



### 3.4 Analiza dinamică a violinelor istorice

#### 3.4.1 Violi analizate

Au fost investigate cinci violi istorice aparținând unor lutieri renumiți: vioara Joseph Klotz, Mittenwald (1747); vioara Jacobus Stainer (fără etichetă) copie; vioara Babos Bela, Hermanstadt (Sibiu) (1920); vioara Johann Georg Leeb, Presburg, (1742); vioara "fără marcă"; și trei violi actuale codificate Gliga 1, 2 respectiv 3 produse la fabrica S.C. Gliga Instrumente Muzicale S.A. Reghin (Figura 3.42). Informații privind detaliile constructive ale acestor violi, precum și analiza imagistică au fost prezentate în *Capitolul 1* al prezentei lucrări.



Figura 3.42. Tipuri de violi analizate

#### 3.4.2 Metoda de testare

Metoda de testare utilizată în cadrul prezentei cercetări a constat în analiza dinamică pentru determinarea răspunsului în frecvență a violinelor istorice în comparație cu violinile noi, utilizând două tipuri de excitație a structurii: prima variantă a constat în lovirea corpului violinii cu ciocanul de impact (Figura 3.43, a), iar a doua, excitarea structurii în stil Pizzicato (Figura 3.43, b). Prima metodă de testare este cea prezentată și în subcapitolele anterioare, corzile fiind blocate cu un element elastic pentru a nu influența răspunsul cutiei de rezonanță. În cazul celei de-a doua metode de testare, corzilor acordate au fost excitate prin ciupire ușoară de către instrumentist, semnalul în timp fiind înregistrat. Frecvențele de excitație în stil Pizzicato au fost cele corespunzătoare corzilor libere acordate ale violinelor: SOL (196 Hz), RE (293.7 Hz), LA (440 Hz), MI (659.3 Hz), ciupirea corzilor fiind realizată de conf. univ. dr. Nauncef Alina Maria, cadru didactic la Facultatea de Muzică și violonistă, vioara I la Filarmonica Brașov. Înregistrarea semnalului acustic s-a realizat prin intermediul unui microfon amplasat în apropierea orificiilor acustice  $f$ . Semnalul a fost achiziționat cu o placă de achiziție tip DAQ-NI USB-9233, iar analizele în timp și frecvență au fost realizate cu un program dezvoltat în MatLab. Pentru fiecare vioară, s-au achiziționat trei semnale. Semnalele achiziționate au fost prelucrate, obținându-se valorile frecvențelor proprii ale violinelor



testate, factorul de amortizare și analiza în timp. Spectrul de frecvențe, valoarea frecvenței dominante și factorul de amortizare diferă de la o vioară la alta, aceste rezultate fiind corelate și cu aspectele geometrice ale violilor.

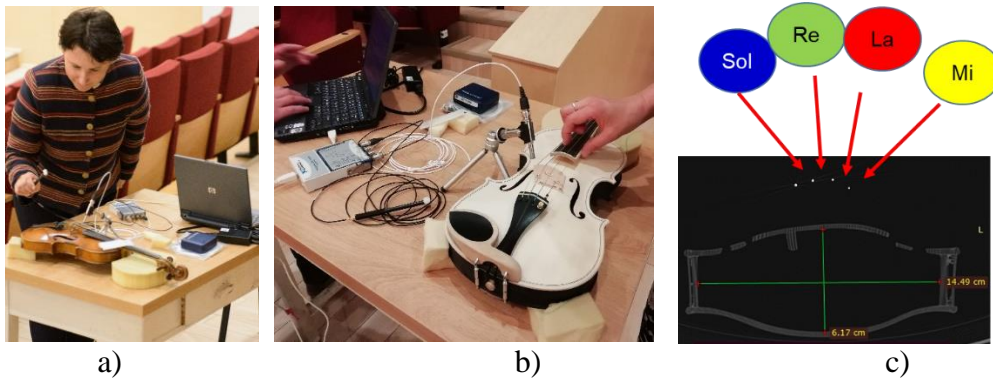


Figura 3.43. Testarea violilor: a) excitarea cu ciocănelul de impact; b) excitarea corzilor violilor în stil Pizzicato; c) poziția celor patru corzi și nota corespunzătoare corzii libere acordate

### 3.4.3 Analiza dinamică cu ciocanul de impact: rezultate și discuții

În urma testului de excitare a violilor cu ciocănelul de impact au rezultat atât graficele de amortizare în timp a semnalului cât și analizele în frecvență a acestora, așa cum sunt prezentate în Figura 3.44.

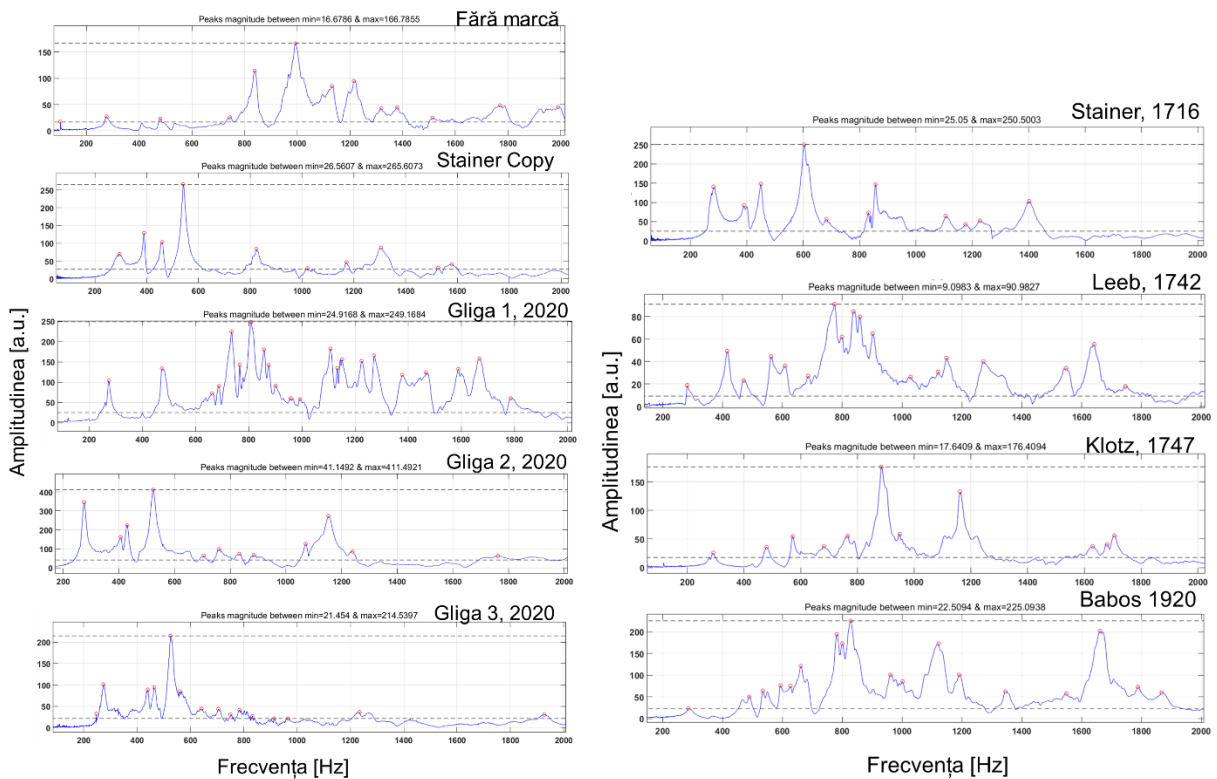


Figura 3.44. Răspunsul în frecvență al violilor istorice și actuale

Pentru fiecare vioară s-au extras valorile proprii specifice violilor (primele cinci valori, considerate în literatura de specialitate *signature mode* sau ”timbrul specific”) și frecvența dominantă, acestea



fiind ulterior analizate comparativ (*Tabelul 3.20*). Factorul de calitate a fost calculat pe baza datelor extrase din analiza în frecvență, aplicând relația de calcul (2.6), iar amortizarea  $\tan\delta$ , pe baza relației (2.7), ambele prezentate în *Capitolul 2*.

*Tabelul 3.20. Frecvențele de rezonanță pentru primele șapte moduri de vibrații ale viorilor studiate [113]*

Violins	Spectrul frecvențelor (Hz) media (STDV)				
	f1 (A0)	f2 (CBR)	f3 (B1-)	f4 (B1+)	f5
Stainer 1716					
Frecvența (Hz)	283.55 (1.77)	389.70 (0.28)	449.50 (0.42)	604.95 (2.33)	857.00 (0.0)
Factorul de calitate $Q$	11.94 (2.03)	14.32 (0.00)	30.08 (2.03)	22.28 (2.25)	77.99 (0.90)
Leeb 1742					
Frecvența (Hz)	282.30 (0.00)	415.80 (0.00)	470.70 (0.00)	561.50 (0.00)	685.85 (1.06)
Factorul de calitate $Q$	17.35 (0.68)	24.99 (0.23)	20.69 (0.00)	21.65 (0.45)	24.83 (0.90)
Klotz 1747					
Frecvența (Hz)	290.65 (1.06)	429.50 (0.00)	481.05 (0.49)	572.30 (0.14)	681.70 (0.57)
Factorul de calitate $Q$	21.96 (2.25)	51.09 (2.48)	23.87 (0.45)	44.40 (1.58)	17.19 (1.80)
Babos 1920					
Frecvența (Hz)	288.00 (2.69)	-	489.40 (0.57)	535.20 (0.57)	661.70 (0.42)
Factorul de calitate $Q$	14.32 (0.45)	-	26.42 (1.35)	42.34 (4.95)	27.69 (4.05)
Copy Stainer					
Frecvența (Hz)	294.20 (0.00)	389.75 (0.07)	458.65 (2.06)	544.30 (3.82)	823.35 (0.49)
Factorul de calitate $Q$	7.64 (0.00)	43.77 (0.68)	32.63 (0.68)	33.42 (0.45)	30.08 (0.23)
Unbranded					
Frecvența (Hz)	275.75 (0.49)	409.70 (0.00)	479.85 (0.07)	536.70 (0.57)	838.20 (0.28)
Factorul de calitate $Q$	15.28 (1.80)	49.66 (4.50)	26.10 (6.30)	22.44 (1.13)	37.40 (6.53)
Gliga 1, 2020					
Frecvența (Hz)	273.10 (0.00)	399.40 (0.57)	473.80 (0.00)	-	688.10 (0.00)
Factorul de calitate $Q$	25.46 (0.00)	37.56 (3.60)	20.37 (0.45)	-	51.88 (0.00)
Gliga 2					
Frecvența (Hz)	275.00 (0.00)	407.00 (0.00)	430.00 (0.00)	523.50 (0.71)	675.00 (33.94)
Factorul de calitate $Q$	21.33 (1.35)	21.65 (0.90)	33.58 (0.68)	26.26 (0.23)	28.01 (0.45)
Gliga 3					
Frecvența (Hz)	274.50 (0.71)	440.50 (0.71)	476.50 (19.09)	530.20 (6.79)	664.50 (31.82)
Factorul de calitate $Q$	17.19 (0.00)	35.65 (3.60)	28.01 (0.90)	24.19 (4.95)	31.51 (0.45)

Comparația valorilor proprii pentru modul cavitare și modul de îndoire a corpului sunt prezentate în *Figura 3.44*. Cea mai mică frecvență naturală este înregistrată în cazul viorilor noi, iar cea mai mare frecvență fundamentală este prezentată la viorile Babos 1920, Klotz 1747 și Copy Stainer (*Figura 3.44*, a). Primul mod este modul A0, cunoscut sub numele de modul de vibrație al aerului din corpul vioarei. În cazul modului 2, în jurul frecvenței de 400 Hz, se formează modul de vibrație romboidal (cunoscut în literatură ca modul CBR). Astfel, cele mai apropiate valori ale frecvenței modului CBR sunt înregistrate pentru vioara Stainer 1716 și copy Stainer (frecvență 389 Hz în ambele cazuri) (*Figura 3.44*, b). Vioara Gliga 1 a înregistrat o frecvență de 399 Hz, care este aproape egală cu frecvența specifică CBR. Pentru celelalte viori, modul CBR are valori mai mari, variind între 410–440 Hz, după cum se poate observa în *Figura 3.44b*. Pentru următorul mod de rezonanță (B1-), valorile proprii sunt în intervalul 430 Hz–490 Hz, cea mai mică valoare de 430 Hz prezentată de vioara Gliga 2, urmată de vioara copie Stainer (460 Hz). Viorile Leeb 1742, Gliga 1, Gliga 3, „Fără marcă”, Klotz 1747 și Ba-bos 1920 au înregistrat valori foarte apropiate ale

modurilor (B1–) (Figura 3.44, c). În cazul modului de îndoire B1+, valorile proprii sunt între 523 Hz și 604 Hz, așa cum se poate observa în Figura 3.44, d. Singura vioară care nu are această armonică este vioara Gliga 1 2020. Viorile Leeb, Klotz și Stainer prezintă valori apropiate ale modului B1+, variind de la 550 la 600 Hz. Conform [11,24,47], viorile cu o frecvență de B1+ mai mică de 510 Hz se caracterizează printr-un sunet moale, întunecat, iar cele cu o frecvență mai mare de 550 Hz au un sunet luminos spre aspru. Astfel, viorile Babos 1920, „Fără marcă”, Copy Stainer, Gliga 2 și Gliga 3 înregistrează o frecvență a modului B1+ în intervalul 510–550 Hz, în timp ce Stainer 1716, Leeb 1742 și Klotz 1747 au o valoare a frecvenței. peste 550 Hz, conform [11,24,47,48]. În cazul modului 5, există o împărțire în două grupe de valori: viorile Babos, toate viorile noi, Klotz 1747 și Leeb 1742 înregistrează o frecvență în intervalul 660–690 Hz, comparativ cu viorile Stainer 1716, Stainer copy și „Fără marcă” care formează al doilea grup de valori în intervalul 820–860 Hz (Figura 3.44).

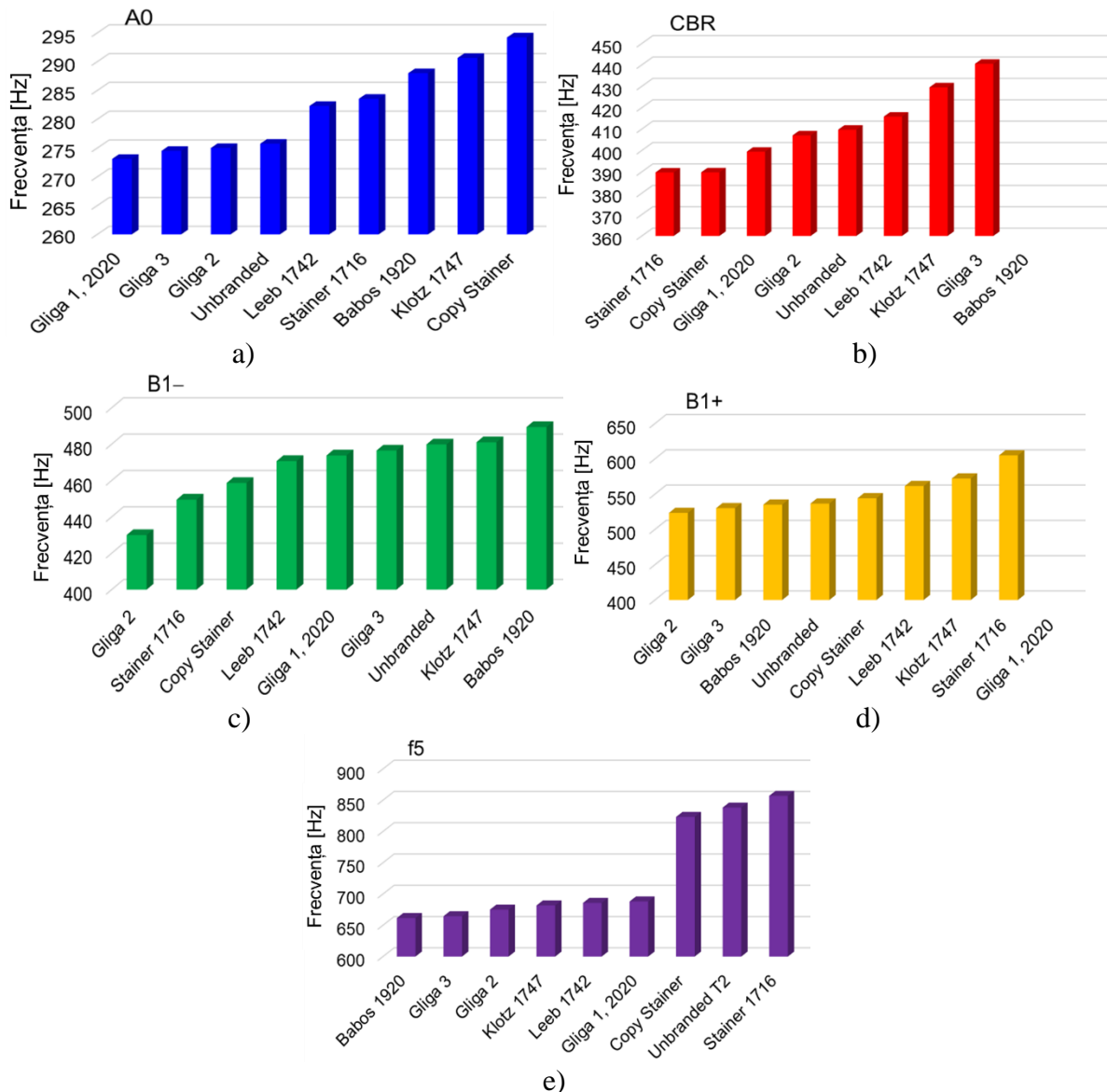
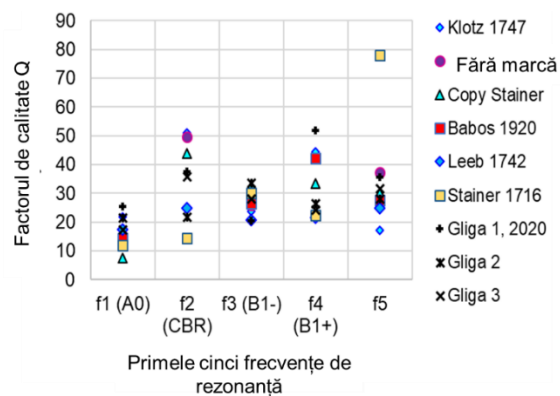


Figura 3.44. Comparații între valorile frecvențelor proprii ale viorilor testate: a) modul 1; b) modul 2; c) modul 3; d) modul 4; e) modul 5

Factorul de calitate  $Q$  definește capacitatea instrumentului muzical de a amortiza vibrațiile sau cât de repede se va estompa rezonanța după ce excitația sistemului a încetat. Pentru fiecare frecvență de rezonanță a fost determinată valoarea factorului  $Q$  așa cum se poate observa în *Tabelul 3.20*. În *Figura 3.45*, se poate observa comparația între factorii de calitate ai viorilor studiate.

Valoarea lui  $Q$  pentru modul de rezonanță  $A_0$  este cea mai mică, pentru toate viorile testate, variind de la 7 la 25, fiind în bună concordanță cu [65 - 70], care raportează, ca valoare medie pentru viorile testate, 14,5. În acest studiu, cea mai mică valoare este înregistrată pentru vioara copie Stainer și vioara Stainer 1716. În studiile timpurii ale [180], Saunders a identificat o valoare de 20 pentru  $Q$  pentru rezonanța principală a aerului,  $A_0$ , în cazul viorilor vechi italiene. În comparație cu această valoare raportată de [180], în studiul de față, viorile Klotz 1747 și Gliga 2 au un factor  $Q$  de 21. Pentru modurile  $B_1^-$  și  $B_1^+$ , [37] raportează valori ale factorului  $Q$  de 32 ( $B_1^-$ ) și 40 ( $B_1^+$ ), respectiv. În acest studiu, pentru modul  $B_1^-$ , viorile Stainer 1716, copia Stainer și Gliga 2 înregistrează un factor de calitate de 30, 32 și, respectiv, 33, iar celelalte viori au un factor  $Q$  mai mic, cuprins între 20–28. Pentru modul  $B_1^+$ , viorile Klotz 1747 și Babos 1920 prezintă valori ale factorului de calitate apropiate de valoarea raportată de [67], în timp ce celelalte viori se încadrează în valori mai mici. În ceea ce privește creșterea factorului de calitate, relația este invers proporțională cu creșterea vechimii vioarei (*Figura 3.45*).



*Figura 3.45. Variația factorului de calitate  $Q$  al viorilor istorice pentru primele cinci frecvențe de rezonanță*

Din punct de vedere al corelației răspunsului în frecvență cu structura anatomică a lemnului, s-a observat că simetria construcției feței intervine cel mai mult asupra valorilor frecvențelor proprii specifice modurilor CBR,  $B_1^+$ ,  $f_5$  și  $f_6$  care cresc cu îmbunătățirea simetriei feței. Lungimea de undă a fibrei crețe specifice lemnului de paltin din componența spatelui viorilor, are o contribuție modestă în ceea ce privește spectrul frecvențelor, cu o influență ușor sensibilă asupra primelor două moduri de vibrație ( $A_0$  și CBR). Astfel, s-a constatat că valoarea frecvenței  $f_1$  scade, iar cea a frecvenței  $f_2$  crește cu lungimea de undă a fibrei crețe. Contribuția simetriei jumătăților feței și

a lungimii de undă a fibrei crețe la variația de mărime a acusticelor sondate a fost examinată cu ajutorul coeficientului de determinare, calculat în ipoteza unei relații lineare între variabile.

Rezultatele prezentate în acest subcapitol au fost publicate în Applied Sciences, în lucrarea: *Signature Modes of Old and New Violins with Symmetric Anatomical Wood Structures* (authors: Mircea Mihalca, **Mariana Domnica Stanciu**, Silviu Marian Nastac, Florin Dinulica, Alina Maria Nauncef, Ioan Călin Roșca and Adriana Savin, făcând parte din cercetările din cadrul proiectului PED568/2020 “Modele inovative de violi comparabile acustic și estetic cu violile de patrimoniu - MINOVIS”;

### 3.4.4 Analiza dinamică prin excitarea corzilor în stil Pizzicato: rezultate și discuții

În ceea ce privește testul de excitare a corzilor în stil Pizzicato, rezultatele au dezvăluit alte aspecte interesante privind răspunsul în frecvență al violilor. În Figura 3.46 sunt prezentate graficele privind răspunsul în timp și în frecvență al violilor testate în stil Pizzicato, corespunzătoare corzii sol. În mod similar s-au generat răspunsurile dinamice pentru fiecare coardă excitată, frecvența fundamentală și armonicile fiind extrase în Tabelul 3.21. Deși apar mici variații ale frecvenței și armonicilor, totuși, se observă că acestea se grupează în jurul aceluiași valori.

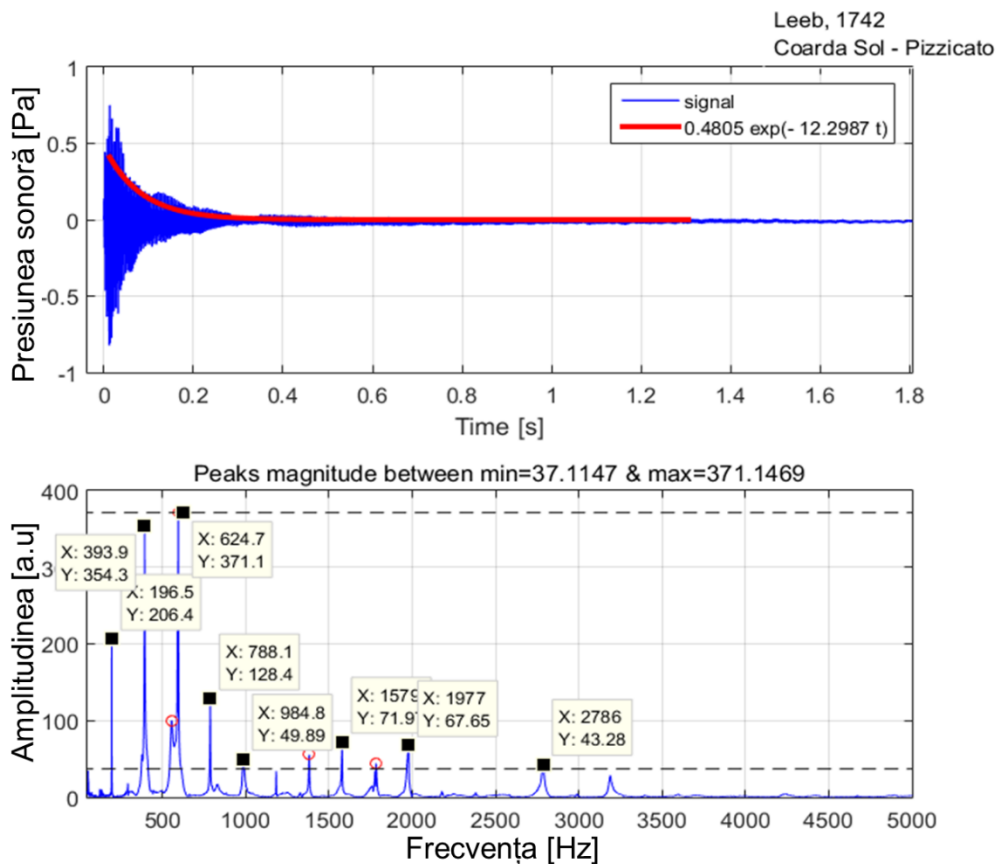


Figura 3.46. Răspunsul în timp și frecvență al violii Leeb 1742 excitată în stil Pizzicato, corespunzătoare notei sol

*Tabelul 3.21. Valorile frecvențelor fundamentale ale corzilor acordate și ciupite în stil Pizzicato și armonicile viorilor la excitarea respectivei corzi*

Coarda/ valoare de referință	Stainer 1716	Leeb 1742	Klotz 1747	Copia Stainer	Babos 1920	Fără marcă	Gliga 2020
<b>Sol (196 Hz)</b>	<b>195.8</b>	<b>196.5</b>	<b>196.6</b>	<b>188.4</b>	<b>188.4</b>	<b>194.9</b>	<b>180.1</b>
Armonica 1	386.9	393.9	391.3	395.2	392.9	389.9	392.1
Armonica 2	581.7	624.7	599.6	591.9	593.2	590.9	588.6
Armonica 3	783.1	788.1	787.1	788.5	-	787.9	785.4
Armonica 4	1184	984	1184	988.6	-	-	1374
Armonica 5		1579	1581	2191	-	-	-
<b>Re (293.7 Hz)</b>	<b>294.8</b>	<b>305.9</b>	<b>293.7</b>	<b>297.5</b>	<b>298.2</b>	<b>292.6</b>	<b>264.0</b>
Armonica 1 (octava 1#)	590	595.7	596	594.1	880.8	591.1	590.1
Armonica 2 (terta 1#)	887	888.4	881.4	888.4	-	880.2	-
Armonica 3 (octava 2#)		1184	1180	1183	1179	1174	-
Armonica 4 (Cvinta 1#)		1480	-	-	-	1468	-
Armonica 5		-	-	-	1782	-	-
<b>La (440 Hz)</b>	<b>443</b>	<b>416.6</b>	<b>440.0</b>	<b>440.0</b>	<b>439.6</b>	<b>442.0</b>	<b>440.2</b>
Armonica 1	880	883.5	888.3	881.6	881	888	881
Armonica 2	1324	1346	1326	1329	1346	1325	1320
Armonica 3	1765	1775	-	1791	1766	1771	1765
Armonica 4		2220	2227	2219	-	2217	-
Armonica 5		2665	-	3110	-		-
<b>Mi (659.3 Hz)</b>	<b>663.6</b>	<b>666.6</b>	<b>658.2</b>	<b>666.4</b>	<b>658.2</b>	<b>691.8</b>	<b>683.4</b>
Armonica 1	1327	1332	1323	1329	1329	1340	1329
Armonica 2	1976	1997	-	1990	1994	1999	1999
Armonica 3	2658	2666	2647	2654	-	2662	-
Armonica 4	3324	3333	3312	3312	-	3332	-
Armonica 5	3396	-	-	3988	4002	4006	-

În final, se poate aprecia faptul că studierea viorilor istorice a condus atât la obținerea unui set de date considerat model dynamic, cât și la sesizarea unor particularități specifice fiecărei viori, acest instrument muzical fiind prin excelență un instrument personalizat de către lutier și de către artist.

### Rezultatele prezentate în acest subcapitol au fost publicate

#### ISI

1. Stanciu M.D. , Bucur V., Munteanu M.V., Georgescu S.V., Năstac S.M. *Moisture induced deformation in the neck of a classical guitar*, in *Holzforschung*, 2019, Vol 73(4):371-379

(FI=2.079, SRI=1.448/ 2019; FI= SRI=2.267),  
<https://www.degruyter.com/view/j/hfsg.2019.73.issue-4/issue-files/hfsg.2019.73.issue-4.xml>

2. **Stanciu M.D.**, Dinulica F, Bucur V., Gliga V. Gh., Nastac S.M., Campean M. " Changing the Vibrational Behavior of the Wooden Thin Arched Plates – the Maestro Violins Experimental Study Case”, under review *Thin-Walled Structures*.
3. Mihalciă Mircea, **Stanciu M.D.**, Dinulica F., Nauncef A., Nastac S.M., Rosca I.C., Savin A. *Signature Modes of Old and New Violins with Symmetric An-atomical Wood Structures*, Applied Sciences, under review.

BDI si B+

4. Duta P.G., Stanciu M.D., Georgescu S.V., Soluții integrative de optimizare a proprietăților rigido-plastice a chitarelor, *Buletinul AGIR* nr. 1/2019, pp. 144-149, <https://www.buletinulagir.agir.ro/articol.php?id=3067>
5. M D Stanciu, P Bârsănescu, V Goanță and A Savin Experimental determination of stress and strain states of the guitar’s wood structure, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 916 (2020) 012113 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/916/1/012113, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/916/1/012113/pdf>
6. Dobrescu G., Steigman R., Dandu I, Cârstea Cătălin, **Stanciu M.D.**, Savin A., Mechanical non-destructive determination of the elastic properties of resonance wood, *The 5<sup>th</sup> Edition of Innovation and Creative Education Fair for Youth ICE-USV, Universitatea din Suceava*, 28.05.2021 (premiată cu medalia de argint).
7. Mariana Domnica STANCIU, Mircea MIHĂLCICĂ, Florin DINULICĂ, Alina Maria NAUNCEF, Robert PURDOIU, Radu LĂCĂTUȘ, Ghiorghe Vasile GLIGA, Rodica MARC, Adriana SAVIN, Silviu NĂSTAC, Digitizarea modelelor structurale și dinamice ale lemnului din construcția viorilor vechi și actuale, **A XVI – a ediție a Conferinței Zilele Academiei de Științe Tehnice din România (ASTR) 2021, 21-22 octombrie 2021 (online)** <https://astr.ro/wp-content/uploads/2021/10/Program-Z-ASTR-2021-VAR.2.-3docx.pdf>
8. Mariana Domnica STANCIU, Mihai TRANDAFIRHorațiu DRĂGHICESCU TEODORESCU, Mihaela COȘNIȚĂ, Voichita BUCUR, Silviu NĂSTAC Analiza statică și dinamică a barelor cotite cu diferiți parametri geometrici și structurali, utilizate ca instrumente muzicale de percuție, **A XVI – a ediție a Conferinței Zilele Academiei de Științe Tehnice din România (ASTR) 2021, 21-22 octombrie 2021 (online)** <https://astr.ro/wp-content/uploads/2021/10/Program-Z-ASTR-2021-VAR.2.-3docx.pdf>



## Capitolul 4. Contribuții personale și originale, direcții viitoare de cercetare

Teza de abilitare cu titlul *Comportamentul mecanic al structurilor complexe lignocelulozice de tip Helmholtz*, constituie o sinteză a cercetărilor științifice ale autoarei având ca obiect de studiu instrumentele muzicale cu corzi (ciupite și cu arcuș) analizate ca structuri mecanice, dinamice și acustice. În final, abordarea dinamică și acustică a viorilor istorice și de patrimoniu, în comparație cu cele actuale, au oferit posibilitatea identificării unor soluții de creștere a calității acustice a instrumentelor muzicale cu corzi.

### 4.1 Contribuții

Cele mai importante contribuții personale și originale ce pot fi evidențiate în urma cercetărilor științifice prezentate în teza de abilitare, sunt:

- Abordarea în mod coerent, consecvent și aplicativ a unui domeniu de nișă în ingineria mecanică – mecanica instrumentelor muzicale cu corzi;
- Realizarea unei baze de date necesare și utilă despre proprietățile elastice și acustice ale lemnului de rezonanță din Carpați (molid/paltin)
- Caracterizarea constructivă pe baza analizei imagistice la computer tomograf a viorilor istorice și noi, investigații realizate pentru prima dată în România;
- Asigurarea transferului tehnologic către producătorii de instrumente muzicale;
- Valorificarea expertizei și infrastructurii de cercetare într-o manieră interdisciplinară.

### 4.2 Direcții viitoare de studiu

Direcțiile viitoare de cercetare vizate de autoarea tezei de abilitare se referă la:

- analiza comportării vâsco-elastice a probelor din lemn cu diferite acoperiri de suprafață (Analiza mecanică în regim dinamic a probelor lăcuite; Analiza dinamică a probelor lăcuite expuse la radiații UV de lungă durată; Analiza microscopică a interfeței lac – lemn).
- cercetarea de frontieră și interdisciplinară ale lemnului de rezonanță a căror caracteristici structurale au fost influențate de schimbările climatice din ultimii 50 ani comparativ cu sortimente de lemn învechit (îmbătrânit natural);
- Modelarea, simularea și testarea dinamică a plăcilor de vioară obținute prin imprimare 3D;
- Modelarea și simularea comportării dinamice a structurilor complexe lignocelulozice de patrimoniu/istorice pe baza modelelor 3D obținute prin tomografierea computerizată.
- Dendrodatarea viorilor pe baza analizei descriptorilor anatomici ai lemnului din construcția viorilor istorice și localizarea sursei de proveniență a arboretului din care a fost recoltat lemnul, prin raportarea măsurătorilor la o bază de date internațională.

## **(B-II) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei**

### **Capitolul 5. Evoluția academică anterioară 2021**

#### **5.1 Educație**

Pot afirma că ethosul meu profesional se bazează pe triada **dascăl – cercetător – inginer** întrucât m-am specializat într-un domeniu real (inginer) având în spate experiența și formarea mea ca dascăl (5 ani de liceu pedagogic- specializarea învățător și 5 ani de activitate în învățământul preuniversitar cu examenele de definitivat și gradul didactic II promovate), ulterior fiind atrasă de provocările permanente ale activității de cercetare fundamentală și aplicativă, pe care le-am experimentat în devenirea mea profesională în cadrul unor echipe de cercetare deosebite atât din Universitatea Transilvania din Brașov, cât și în cadrul echipelor din institute de cercetare de prestigiu precum INCDFI Iași (Institutul de Cercetare –Dezvoltare pentru Fizică Tehnică Iași), ICECON București, având astfel onoarea de a cunoaște cadre didactice și cercetători extraordinari, personalități remarcabile ale mediului academic/științific național și internațional, de la care am avut de învățat atât pe plan profesional cât și pe plan personal. Nu în ultimul rând însă, am învățat să-mi ”acordez” ideile, cercetările din laborator cu activitatea practică, cu cerințele mediului socio-economic prin colaborările cu industria (S.C. Hora. S.A. Reghin, Compozite S.A. Brașov, etc.).

În perioada 1991-1996 am urmat cursurile Liceului Pedagogic ”D.P. Perpessicius” Brăila, iar în perioada 1996 – 2001 am predat ca învățătoare la clasele I- IV, Școala Mihai Eminescu din Brăila (1996-1997) și Școala Waldorf Brăila (1997 – 2001). În această perioadă, am obținut **definitivatul** în învățământ preuniversitar cu **media 10** și ulterior **gradul didactic II**. În 2001 m-am înscris la *Facultatea de Ingineria Lemnului* din cadrul Universității Transilvania din Brașov, pe care am absolvit-o în anul 2006, ca șefă de promoție (**cu media generală de promovare a anilor de studii: 9.81 și media examenului de diplomă: 10**). În **Tabelul 5.1** sunt centralizate informațiile privind studiile efectuate.

Activitatea universitară am început-o încă din anul 2006 ca cercetător doctorand la Facultatea de Inginerie Mecanică (Catedra de Rezistența Materialelor și Vibrații) a Universității Transilvania din Brașov, sub îndrumarea științifică a prof. univ. dr. ing. Curtu Ioan. În anul 2008 am absolvit masteratul Dinamica structurilor mecanice din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică a Universității Transilvania din Brașov.

Astfel, am încercat și cred că am și reușit să îmi clădesc cariera universitară de până acum, urmând repere și valori pe care le consider esențiale: corectitudine, seriozitate, bun simț, conștiința lucrului bine făcut, fiind întotdeauna motivată de profesorii mei care mi-au dat încredere și m-au ajutat să pășesc pe drumul frumos, dar dificil în egală măsură, al carierei universitare.

*Tabelul 5.1. Studii efectuate de autoareal tezei de abilitare*

<b>Perioada</b>	<b>Instituția</b>	<b>Diplomă/grad</b>
1991 – 1996	Studii liceale (5 ani) Liceului Pedagogic ”D.P. Perpessicius” Brăila	Învățătoare
1997	Pregătire postliceală - Liceului Pedagogic ”D.P. Perpessicius” Brăila	Definitivat în învățământ
2001	Pregătire postliceală - Universitatea Ovidius din Constanța/ gradul II	Gradul II
2001 - 2006	Studii de licență, Facultatea de Ingineria Lemnului, Universitatea Transilvania din Brașov	Diplomă de inginer
2006 - 2008	Studii de master (Dinamica Structurilor Mecanice), Facultatea de Inginerie Mecanică, Universitatea Transilvania din Brașov	Diplomă de master
2006 - 2009	Studii doctorale, Facultatea de Inginerie Mecanică, Universitatea Transilvania din Brașov	Diplomă de doctor în domeniul inginerie mecanică
2010 - 2013	Studii postdoctorale, Facultatea de Inginerie Mecanică, Universitatea Transilvania din Brașov	

## 5.2 Activitatea didactică

### 5.2.1 Evoluția academică

Autoarea tezei de abilitare a fost cooptată în corpul profesoral al Catedrei de Rezistența Materialelor și Vibrații (ulterior Departamentul de Inginerie Mecanică), din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică, încă din anul 2006, o dată cu înscrierea la doctorat și apoi postdoctorat, parcurgând până în 2019 treptele carierei universitare până la conferențiar ( [Tabelul 5.2](#)).

*Tabelul 5.2. Evoluția carierei universitare a autoarei*

<b>Perioada</b>	<b>Locul de muncă</b>	<b>Funcția</b>
2006 - 2009	Facultatea de Inginerie Mecanică, Universitatea Transilvania din Brașov	Cercetător doctorand/asistent universitar
2010 - 2013	Facultatea de Inginerie Mecanică, Universitatea Transilvania din Brașov	Cercetător postdoc/asistent universitar
2012 - 2019	Facultatea de Inginerie Mecanică, Universitatea Transilvania din Brașov	Șef lucrări
2019 - prezent	Facultatea de Inginerie Mecanică, Universitatea Transilvania din Brașov	Conferențiar universitar

### 5.2.2 Discipline predate

În cadrul Universității Transilvania din Brașov, Facultatea de Inginerie Mecanică, Departamentul de Inginerie Mecanică, autoarea tezei de abilitare a desfășurat activitățile didactice de curs, seminar și laborator aferente disciplinelor prezentate în [Tabelul 5.3](#), fiind *titulară a 8*

*cursuri* din Planurile de învățământ ale diferitelor programe de studii de licență și master din cadrul facultăților cu profil tehnic.

*Tabelul 5.3. Discipline predate de autoarea tezei*

<b>Perioada</b>	<b>Activități didactice coordonate/discipline/program de studii</b>
2012 - 2017	Laborator <i>Rezistența Materialelor</i> / licență anul II IF - Facultatea de Ingineria Lemnului, Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor
2012 - 2013	Seminar <i>Plăci și învelișuri</i> /licență anul IV IF - Facultatea de Inginerie Mecanică
2012 – în prezent	Curs/laborator <i>Reologie</i> /licență anul IV IF +IFR - Facultatea de Inginerie Mecanică
2012 - 2017	Curs/laborator <i>Elemente de reologie aplicate în inginerie mecanică</i> / master STIM anul I -Facultatea de Inginerie Mecanică
2012 - în prezent	Curs/laborator <i>Reologia materialelor de construcții</i> / master anul I Facultatea de Construcții
2017 – în prezent	Curs/laborator <i>Rezistența Materialelor</i> / licență anul II IF și FR - Facultatea de Ingineria Lemnului
2015 – în prezent	Curs/laborator <i>Calculul structurilor din lemn</i> / licență anul III IF și FR - Facultatea de Ingineria Lemnului
2018 – 2020	Laborator <i>Rezistența Materialelor</i> / licență anul II IF – Facultatea de Design de produs și mediu – inginerie medicală
2017 - 2019	Curs/seminar <i>Managementul proiectelor industriale</i> / licență anul IV IF+IFR - Facultatea de Inginerie Mecanică
2018 – în prezent	Curs <i>Etică și Integritate Academică</i> / master anul I, IF și IFR (2021)– STIM, Facultatea de Inginerie Mecanică
2021 - în prezent	Curs/laborator <i>Mecanică Experimentală</i> / master anul I,, IF și IFR – STIM, Facultatea de Inginerie Mecanică

### 5.2.3 Calitatea actului didactic

Calitatea actului didactic s-a concretizat prin implicarea activă în modernizarea și adaptarea activităților didactice de la disciplinele predate, în conformitate cu cerințele actuale și modelele naționale și internaționale. În procesul de predare autoarea utilizează alături de metodele clasice de predare și tehnicile moderne pentru a facilita studenților înțelegerea noțiunilor predate.

În ceea ce privește publicațiile didactice, este prim autor al cursurilor „*Reologie generală*” apărut în anul 2013, „*Reologia lemnului*” (2015), *Reologia materialelor de construcții* (2015) la Ed. Universității Transilvania din Brașov, precum și al suporturilor de curs în format electronic disponibile pe platforma universității, „*Rezistența materialelor în industria lemnului pentru ID-FR*” (2015) și „*Elemente de reologie aplicată în inginerie - suport de curs pentru ID-IFR*”(2016). De asemenea, este coautor al lucrărilor de laborator aferente disciplinei *Rezistența materialelor* concretizate într-un îndrumar de lucrări practice, Bit. C. Cerbu C., Baba M. N., Curtu I., Itu C., Roșca I. C., Stanciu M.D., Száva I., Száva I. R., Velea M. N., (2018) *Rezistența Materialelor. Îndrumar de laborator*, ISBN 978-606-19-1084-7.

De asemenea, a proiectat și realizat următoarele standuri de laborator, contribuind astfel la dezvoltarea bazei materiale a departamentului:

- *Stand multitest pentru testarea barelor la flambaj - Laboratorul de rezistența Materialelor;*
- *Stand de testare statică și dinamică a palelor de turbine eoliene - Laboratorul de Reologie și rezistența materialelor;*
- *Cabina simulator de mediu pentru testarea reologică a structurilor - Laboratorul de reologie;*
- *Dispozitiv de fixare a structurilor complexe pentru testarea prin metoda tensometriei rezistive - Laboratorul de reologie și rezistența materialelor.*

Tot în cadrul activității didactice a organizat consultații la disciplinele pe care le predă în vederea consolidării și asigurării transferului de cunoștințe la nivel optim către studenții interesați să participe la astfel de activități informale. Atunci când programa școlară la specializările la care a avut ore, a permis, s-a implicat atât în pregătirea studenților pentru concursul de rezistența materialelor, cât și în organizarea concursului – faza națională ”C.C. Teodorescu” din 2015 desfășurată la Brașov.

#### 5.2.4 Îndrumarea științifică a studenților

Autoarea prezentei teze de abilitare s-a implicat în activitățile de îndrumare a studenților la proiecte de licență și disertație încă din perioada de postdoctorat, făcându-și ucenicia în cotutelă cu profesorul Ioan Curtu, iar ulterior, începând cu anul universitar 2013 – 2014, a avut o continuă activitate de îndrumare a studenților, până în prezent. Tematica generoasă a cursurilor, experiența acumulată și modelele profesionale din jurul său, se reflectă în tematicile lucrărilor îndrumate, acestea fiind centralizate în [Tabelul 5.4](#).

*Tabelul 5.4. Centralizarea lucrărilor de licență și disertație coordonate de autoarea tezei*

Nr. crt.	Anul universitar	Titlul	Student/program de studiu/ Facultatea	Îndrumător(i)
1	2012 - 2013	Aplicații ale teoriei kirchhoff-love în analiza stărilor de tensiuni și deformații ale plăcilor din structura panoramicului ARDDOR	Apostol Dragos/ Licența/IM	Stanciu M.D; Curtu Ioan
2	2013 - 2014	Proiectarea unui stand experimental de determinare a stărilor de tensiuni și deformații la chitara clasică	Mihalache Daniel/ Licență/IM	Stanciu M.D.
3	2013 - 2014	Modelarea cu MEF a plăcilor dreptunghiulare și izotrope în diferite stări de încărcare	Ganga Dorin/ Licență/IM	Stanciu M.D.
4	2013 - 2014	Factori de influență a stărilor de tensiuni și deformații a gâtului de chitară	Mocanu Teodor/ Licență/IM	Stanciu M.D.
5	2014 - 2015	Influența speciei lemnoase utilizate în structura spatelui de vioară asupra calității acustice a acesteia	Moișan Eugen/ Licență/IL-FR	Stanciu M.D; Curtu Ioan
6	2014 - 2015	Proiectarea și realizarea palelor turbinelor eoliene din materiale lignocelulozice pentru utilizatori casnici	Pișcoi Petru/ Licență/IL-FR	Stanciu M.D; Curtu Ioan

7	2014 - 2015	Optimizarea constructivă a chitarei clasice în vederea reducerii deformațiilor remanente	Pop Călin/ Licență/IL-FR	Stanciu M.D; Curtu Ioan
8	2014 - 2015	Studiu comparativ al calității acustice a chitărelor clasice cu fețele realizate din diferite materiale	Someșan Adrian Dumitru/ Licență/IL-FR	Stanciu M.D; Curtu Ioan
9	2014 - 2015	Evaluarea comportării relogice a compozitelor lignocelulozice	Groza Mihai Ilie/ Master/IM/Zi/STIM	Stanciu M.D; Curtu Ioan
10	2014 - 2015	Optimizarea structurală a compozitului utilizat la palele de turbine eoliene cu ax orizontal, utilizând analiza cu element finit	Teșulă Ionuț/ Master/IM/Zi/STIM	Stanciu M.D; Curtu Ioan
11	2014 - 2015	Proiectarea și realizarea standului de testare a palelor de turbine eoliene de mici dimensiuni la solicitări statice și dinamice	Țițeu Rareș/ Master/IM/Zi/STIM	Stanciu M.D; Curtu Ioan
12	2015 - 2016	Proiectarea și realizarea standului experimental pentru studiul fenomenului de flambaj a barelor drepte cu secțiune circulară	Urucu Iulian Ștefan/ Licență/IM/Zi	Stanciu M.D
13	2015 - 2016	Realizarea și validarea funcționării standului de testare a stabilității (flambajului) barelor drepte cu secțiune rectangulară	Scurtu Ștefan/ Licență/IM/Zi	Stanciu M.D
14	2015 - 2016	Determinarea caracteristicilor elastice a compozitelor ranforsate cu fibre de sticlă de tip MAT	Harapu Alexandru/ Master/STIM/IM/zi	Stanciu M.D;
15	2015 - 2016	Studiul comportării relogice a țevilor honuite supuse la presiune interioară	Szasz Matyas/ Master/STIM/IM/zi	Stanciu M.D;
16	2016 - 2017	Proiectarea și execuția elementelor constructive din structura turbinei eoliene de mici dimensiuni	Tolbașu Marian/ Master/STIM/IM/zi	Stanciu M.D;
17	2017 - 2018	Elaborarea și testarea elementelor funcționale ale unui simulator de mediu (umiditate și temperatură) necesar pentru testarea reologică a structurilor mecanice	Bidu Vlad/ Licență/IM/Zi	Stanciu M.D. Costiuc L.
18	2017 - 2018	Analiza comportării la transfer termic a materialelor și structurilor sandwich	Belea Elena/ Licență/IM/Zi	Stanciu M.D. Șova D.
19	2017 - 2018	Proiectarea și calculul de rezistență a structurii unei case ecologice din lemn	Pop Andrei/ Licență/IL/FR	Baba M.N Stanciu M.D
20	2017 - 2018	Analiza fenomenelor elasto-plastice la piesele de mici dimensiuni în timpul proceselor de matrițare la rece	Bucur Rareș/ Master/IM/STIM/zi	Stanciu M.D Teodorescu D.H.
21	2017 - 2018	Proiectarea și analiza cu element finit a stărilor de tensiune și deformații a unei structuri de semiremorcă	Urucu Iulian Ștefan /Master/IM/STIM/zi	Stanciu M.D. Baba M. N.
22	2017 - 2018	Soluții integrative de optimizare a proprietăților rigido-plastice a chitărelor	Duță Petrică Georgică Master/IM/STIM/zi	Stanciu M.D.
23	2018 - 2019	Proiectarea și realizarea standului pentru testarea și verificarea dimensională a chitărelor	Tolbașu Costin/ Master/IM/STIM/zi	Stanciu M.D.
24	2019 - 2020	Analiza comportării mecanice la încovoiere în trei puncte a barelor din lemn	Voinescu Mădălina/ Licență/IM/FR	Stanciu M.D.
25	2019 - 2020	Comportarea visco-elastică a materialelor anizotrope - ortotrope la solicitarea de tracțiune – compresiune (Studiu de caz - lemnul de pin (Pinus Sylvestris))	FENE Paul Alexandru/Licență/ IM-En	Stanciu M.D.
26	2019 - 2020	Proiectarea și realizarea unui garaj retractabil din lemn	Șelaru Răzvan/ Licență/IL/Zi	Stanciu M.D.
27	2020 - 2021	Măsurarea nivelului de zgomot al unei incinte izolate acustic cu diferite materiale	Puchianu Andrei Iulian/Master/IM/ STIM/zi	Stanciu M.D.
28	2020 - 2021	Analiza statică și dinamică a unei bare cotite cu diferiți parametri geometrici și structurali – studiu de caz triunghi	Trandafir Mihai/ Master/IM/STIM/zi	Stanciu M.D.
29	2020 - 2021	Proprietăți fizice, mecanice și dinamice ale molidului de rezonanță	Dandu Ionel/ Master/IM/STIM/zi	Stanciu M.D.

Sub îndrumarea autoarei tezei, o parte din studenții de la proiectele de diplomă și disertație și-au prezentat rezultatele cercetărilor proprii la sesiunile științifice studentești, o parte dintre acestea fiind premiate: 2014 (premiul I SSCS 2014); 2015 (lucrare premiata locul III/2015); 2017 (premiul



I, mențiune – SSCS, 3 lucrări participante la AFCO premiul I - AFCO); 2018 (premiu speciale lucrari CADET INOVA Sibiu); 2021 (premiul I – SSCS, Premiul I – AFCO, secția IM; premiul Medalia de Aur, Medalia de Argint - CADET INOVA Sibiu 2021, Medalia de Argint - The 5th Edition of Innovation and Creative Education Fair for Youth ICE-USV, Universitatea din Suceava, 28.05.2021) (Figura 5.1).



Figura 5.1. Premii obținute de studenții îndrumați de autoarea tezei la sesiuni științifice studențești naționale

### 5.2.5 Alte activități cu studenții

În anul universitar 2014-2015, autoarea tezei a îndrumat echipa de studenți din cadrul proiectului ”Să FIM ingineri ai viitorului” finanțat din fondurile proprii ale universității în cadrul programului ”Facultatea Mea”, atingând următoarele obiective propuse: Promovarea performanței profesionale a studenților prin organizarea la nivel național a Concursului profesional studentesc de Rezistența Materialelor ” C. C. Teodorescu” 2015 – ”Să FIM performanți”; Creșterea vizibilității Facultății de Inginerie Mecanică (FIM) printr-un program intensiv de promovare a imaginii facultății și Universității Transilvania din Brașov la nivel județean, regional și național în licee și colegii de către studenți și cadre didactice în vederea inserției de absolvenți de studii liceale, de reconversie profesională și/sau de continuare a studiilor universitare a persoanelor active, materializat prin caravana educației, workshop-uri, dialoguri, proiecte comune – ”Ambasadorii FIM ai educației”; Diseminarea activităților derulate prin proiect, în mediul virtual pe pagina facultății/universității cat si prin rețele de socializare – ”E-FIM Students” și organizarea workshop-ului de analiză a rezultatelor și impactului proiectului Workshop Club FIM. Pe parcursul anilor, a organizat diverse activități pentru studenți, cum sunt vizitele de studii la fabrici (Michellin 2016; Stabilus 2017; Continental 2017; S.C. Hora S.A. 2018); întâlnirile anuale cu studenții și absolvenții de IM ”Seara Colindelor” (2016; 2018; 2019; 2020); participarea studenților și reprezentare a DIMEC la Noaptea cercetătorilor 2017; 2019; 2021; implicarea studenților în activități ale proiectelor științifice.

## 5.2.6 Colaborarea în comisiile de îndrumare a doctoranzilor

În prezent, autoarea tezei de doctorat este implicată în trei comisii de îndrumare a doctoranzilor: 1 în domeniul ingineriei mecanice; 2 în domeniul ingineriei forestiere.

## 5.2.7 Managementul didactic

Autoarea tezei are responsabilități în managementul didactic al departamentului în care activează, fiind implicată în diferite activități (Tabelul 5.5).

*Tabelul 5.5. Responsabilități privind managementul calității procesului didactic*

Perioadă	Activități
2014 - 2018	Secretarul comisiei la examenul de disertație
2019 - 2021	Membru în comisia de disertație
2014 - 2018	Tutore de an IM (promoția 2018)
2018 - 2022	Tutore de an IM (promoția 2022)
2020 - 2021	Tutore de an STIM anul I
2021 - 2022	Tutore de an STIM anul I
2019 – în prezent	Responsabil cu calitatea pe departament

## 5.3 Activitatea științifică

### 5.3.1 Proiecte de cercetare

În perioada postdoctorală, autoarea tezei a fost implicată în 6 proiecte de cercetare, în trei dintre ele în calitate de director (Tabelul 5.6).

*Tabelul 5.6. Implicarea autoarei tezei în cercetare științifică după obținerea titlului de doctor*

<i>Director de proiect după susținerea tezei de doctorat</i>	
1	<b>PN-III-P2-2.1-PED-2019-2148, contract nr. 568PED/2020, Modele inovative de viori comparabile acustic și estetic cu viorile de patrimoniu – MINOVIS,</b> Perioada: 2020-2022; Finanțator: UEFISCDI (durata: 24 luni), suma <b>600 000 lei</b>
2	<b>Proiect PN-III-P2-2.1-BG 85/2016 Soluții integrative de creștere a performanței economice prin optimizarea proprietăților rigido-elastice și stabilității structurale a chitarelor de fabricație românească - SINOPTIC;</b> Perioada: 2016-2018; finanțator: Uefiscdi (durata 24 luni), suma <b>400 000 lei</b>
3	<b>Proiect PN-III – PT-PCCA 2013-4-0656/ Nr. contract: 59/2014 (etapa 2017) Monitorizarea integrității structurale și autorepararea palelor de turbine eoliene și a altor structuri din compozite inteligente (STHEMOWTB)</b> (INCDFT Iasi – coordonator, Universitatea Transilvania din Brasov – Partener) director proiect șef lucr. dr. ing. Stanciu M.D. pentru anul 2017) Perioada: 2014 – 2017, Finanțator: UEFISCDI, suma/2017: <b>23 000 lei</b>
4	Burse postdoctorale pentru dezvoltare durabila <b>POSTDOC-DD, ID59323-</b> Transilvania University of Brasov, titlul <i>Cercetări privind optimizarea structurilor funcționale din materiale avansate utilizate în preluarea și absorbția zgomotului urban datorat fluxurilor rutiere</i> (buget bursa <b>152 600 lei</b> ),
<i>Membru în echipa proiectelor după susținerea tezei de doctorat</i>	
4	<b>PND-II-D72–200/2008 Proiect BIOCMPTEX 72-200/2008</b> Compozite biodegradabile cu insertii textile pentru produse ambientale ecologice, (Universitatea Tehnica "Gheorghe Asachi" din Iasi – coordonator, Universitatea Transilvania din Brasov – Partener) director proiect conf univ. dr. Camelia Coșereanu, perioada: 2008- 2011 finanțator: CNCSIS, durata 36 luni, suma alocată ca membru <b>4418 lei (conform FRACS 2008-2011)</b>

- 
- |   |   |
|---|---|
| 5 | <b>PC-71-016/2007 Proiect MODIS</b> Monitorizarea, diagnoza și repararea structurilor complexe din materiale avansate, (INCDFI Iasi – coordonator, Universitatea Transilvania din Brasov – Partener) director proiect prof. univ. dr. Ioan Curtu, Perioada 2007-2010, Finanțator CNCSIS (durata 36 luni), suma alocată ca membru <b>11400 lei (conform FRACS 2008-2010)</b> |
| 6 | <b>ID_191/225 din 1.10.2007</b> Modelarea și simularea comportării la factori mecanici și de mediu agresivi a materialelor compozite întărite cu textile, director proiect prof. univ. dr. Vasile Ciofoaia, perioada: 2007-2009, Finanțator: CNCSIS, suma alocată ca membru <b>30 900 lei (conform FRACS 2008-2010)</b>   |
- 

### 5.3.2 Domenii de expertiză

Activitățile desfășurate de autoarea tezei de abilitare se circumscriu următoarelor domenii de expertiză științifică:

- Evaluarea proprietăților elastice, acustice și dinamice a materialelor lignocelulozice (lemn, compozite pe bază de lemn, compozite cu fibră de sticlă/carbon)
- Analiza reologică a materialelor;
- Evaluarea comportării dinamice a structurilor complexe de tip Helmholtz;
- Identificarea soluțiilor integrative de îmbunătățire a calității structurilor din lemn pe baza expertizei comportării mecanice/dinamice a acestora
- Testarea structurilor complexe prin diferite metode experimentale.

### 5.4 Recunoașterea și vizibilitate

Autoarea tezei de doctorat este membră titulară al Academiei de Științele Naturii din Rusia, membră al Asociației Inginerilor din România (AGIR), membră al Societății Române de Reologie (SRR), membră al Societății Române de Mecanică Tehnică și Aplicată (SRMTA), membră al Societății de Acustică din Europa (EAA) și SIAR.

De asemenea este membră în comitetul științific al conferințelor: INTER-ENG, Interdisciplinarity in Engineering International Conference, Tg. Mureș, Univ. Petru Maior, International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering - ACME, organized by Mechanical Engineering Faculty, in the "Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi, Romania, precum și peer - reviewer la revistele: European Journal of Wood and Wood Products, Polymers, Proligno, Journal of Polymers and the Environment, Applied Acoustics, Materials – Polymers, etc.

## Capitolul 6. Planul de dezvoltare a carierei didactice

Tradiția colectivului din care fac parte în acest moment, precum și calitatea științifică a membrilor acestui colectiv și a celorlalte colective cu care am interacționat de-a lungul timpului (INCDFI Iași, ICECON București, Universitatea Gh. Asachi din Iași, Universitatea ”Dunărea de Jos” din Galați, S.C. Hora S.A. Reghin, Compozite S.A, S.C. Gliga Instrumente Muzicale S.A., USAMV Cluj Napoca) m-au format și mi-au oferit un echilibru și o provocare permanentă de atingere a liniei de excelență la nivel național și internațional în ceea ce privește cercetarea științifică.

Consider că dotarea cu tehnologie la standarde de înaltă calitate și performanță în domeniul ingineriei mecanice de care beneficiază laboratoarele aflate în Facultatea de Inginerie Mecanică și în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al universității Transilvania din Brașov constituie o bază modernă, solidă pentru realizarea de cercetări în domeniul ingineriei mecanice, și nu numai. Astfel de cercetări și studii se află printre solicitările mediului industrial, fiind și elementele definiții ale elaborării și publicării rezultatelor în lucrări științifice ale unor publicații, reviste și edituri de marcă, naționale sau internaționale sau ale solicitării unor fonduri extrabugetare prin propuneri de proiecte de cercetare naționale și internaționale.

### 6.1 Direcții de dezvoltare a carierei didactice

În ceea ce privește activitatea instituțională voi continua să mă implic în viața academică și administrativă a departamentului, facultății și universității din care fac parte, ori de câte ori este nevoie, să-mi aduc **contribuția la elaborarea și implementarea politicilor și a strategiilor de dezvoltare a acestora, precum și la promovarea imaginii instituției de învățământ superior** din care fac parte.

Astfel, doresc să particip în următorii ani ca *visiting professor* în universități și centre de cercetare specifice domeniilor mele de interes (lemn, materiale compozite lignocelulozice, materiale de construcții, mecanică aplicată, reologie, etc) sau să aplic pentru o bursă *Erasmus+*, astfel încât să-mi dezvolt competențele științifice și să cresc vizibilitatea internațională a mea și a instituției pe care o reprezint.

Mai mult decât atât, doresc să pot continua **activitatea de implicare a tinerilor** (studenți absolvenți, masteranzi, doctoranzi) în **activitățile de cercetare** atât prin îndrumarea lor în cadrul proiectelor de disertație conducându-i către cercetare și diseminarea rezultatelor în diverse publicații, cât și implicându-i în activitățile de cercetare ale proiectelor științifice ca membri în echipa de cercetare, stimulându-le creativitatea, interesul, inovația.

Un alt aspect important al dezvoltării carierei didactice este legat de actualizarea și modernizarea suporturilor de curs și a lucrărilor de laborator/aplicații în concordanță tehnologia actuală și modul de interacționare cu studenții pe platforma e-learning. Astfel, autoarea tezei de abilitare are în proiect revizuirea/actualizarea sau realizarea următoarelor suporturi de cursuri ca unic autor sau în co-autorat cu colegii din domeniu (Tabelul 6.1. Proiecte editoriale pe termen scurt și mediu privind elaborarea de noi suporturi de curs sau revizuirea celor existente Tabelul 6.1).

*Tabelul 6.1. Proiecte editoriale pe termen scurt și mediu privind elaborarea de noi suporturi de curs sau revizuirea celor existente*

<b>Titlu provizoriu</b>	<b>Grad de realizare la 30.12.2021</b>
Calculul structurilor din lemn – suport de curs și laborator	70%
Aspecte teoretice și practice privind mecanica experimentală	25%
Elemente de reologie aplicată	70%
Adaptarea cursurilor în format FR	40%

## 6.2 Direcții de dezvoltare științifică

**Extinderea orizontului cercetărilor** mele în domeniul comportării statice, dinamice, acustice și reologice a lemnului și a materialelor lignocelulozice compozite sub diferite forme structurale, cu aplicații diverse – de la construcții din lemn, la instrumente muzicale, elemente cu rol de izolare termică și acustică, elemente de rezistență, toate acestea continuând ”școala brașoveană” inițiată de mari profesori precum Filipovici Jipa, Cotta Nicolae - Leonida, Florin Spîrchez, Ioan Curtu. Astfel, un alt obiectiv ar fi crearea la Brașov, a unui **pol de cercetare în domeniul instrumentelor muzicale cu corzi**, având sprijinul logistic al managementului fabricii de instrumente muzicale cu corzi, și colaborând cu nume de prestigiu din domeniul menționat, precum Voichita Bucur (RMIT University, Melbourn, Australia), Marco Fioravanti (University of Florence) și Joseph Gril (University of Montpellier). Această parte a dezvoltării carierei mele se bazează atât pe colaborările avute până în prezent în cadrul diferitelor proiecte, precum și pe rezultatele publicate de-a lungul timpului în reviste de specialitate sau susținute la diferite conferințe/simpozioane, toate aceste fiind premisele unor cercetări de prestigiu în direcții de nișă în cercetarea transdisciplinară. De asemenea, **atragera de fonduri prin participarea la proiecte de cercetare** atât în calitate de director de proiect cât și din cea de membru în colectivele diverselor proiecte / granturi de cercetare ale Facultății de Inginerie Mecanică din cadrul Universității Transilvania din Brașov constituie un obiectiv foarte important în dezvoltarea carierei mele universitare (Tabelul 6.2). Existența surselor de finanțare suplimentare și a unor tematici concrete, necesar a fi soluționate sunt condiții esențiale atât în participarea la conferințe de profil cât și în publicarea unor lucrări științifice de calitate.

*Tabelul 6.2. Propuneri de proiecte în competițiile naționale lansate în anul 2021*

<b>Titlu propunere de proiect</b>	<b>Competiția</b>
"Qualitative, dynamic and acoustic analysis of anisotropic systems with modified interfaces" (ACADIA)	UEFISCDI - PCA 2021 (07.06 - 07.07.2021)
"Innovative Kit for Acoustic Fingerprinting of Strings Muzical Instruments based on Digitized Models of Heritage Muzical Instruments - KIATON"	UEFISCDI - PED 2021 (23.08 - 15.09.2021)

**Colaborarea cu alte colective de cercetare** din universitate dar și din alte centre de cercetare din România (Iași, București, Pitești, Galați, Sibiu, Tg Mureș, Cluj Napoca, Timișoara, Craiova, Ploiești) și din străinătate pentru abordarea unor teme interdisciplinare, depunerea de proiecte comune și realizarea de lucrări științifice valoroase, constituie de asemenea obiective importante în dezvoltarea viitoare a carierei mele academice. Pe termen scurt și mediu, prioritatea mea ar fi realizarea de noi **lucrări științifice și publicarea acestora în reviste ISI cu factor de impact și scor relativ de influență cât mai ridicate (FI>2; SRI>1.5).**

### 6.3 Activitatea publicistică

Autoarea tezei de abilitare își propune să valorifice rezultatele cercetărilor pe care le desfășoară/le va desfășura prin: i) diseminarea în articole redactate în limbi de circulație internațională (*Tabelul 6.3*), ii) popularizarea în rândul specialiștilor din domeniu, a mediului socio-economic și cultural și iii) publicarea câtorva monografii (*Tabelul 6.4*). Realizarea unei monografii de autor unic este, astăzi, o întreprindere aproape imposibilă, având în vedere volumul imens de literatură și conexiunile pe care aceasta le dezvoltă, care impun o doză tot mai mare de interdisciplinaritate.

*Tabelul 6.3. Articole științifice în lucru ale autoarei tezei de abilitare și statusul lor*

<b>Titlu provizoriu articol</b>	<b>Status</b>
Changing the vibrational behavior of the wooden thin arched plates – the maestro violins experimental study case	În evaluare 20.10.2021 Thin Walled Structured
Wave velocities in special kind of wood used in violin manufacture, wood science and technology	În evaluare 20.10.2021 Experimental Mechanics
Experimental study on creep behavior of maple with various types of wave grains	În lucru 30.12.2021 Polymers
Experimental and numerical study on dynamic properties of kinked alloy beam used as idiophone muzical instruments	În lucru 30.12.2021 Journal of Magnesium and Alloy

*Tabelul 6.4. Proiectele editoriale ale autoarei tezei de abilitare, pe termen scurt și mediu, în ordinea în care se intenționează materializarea lor*

<b>Titlu provizoriu</b>	<b>Status</b>
Structuri lignocelulozice de tip Helmholtz	50%
Ingineria viorii	40%
Vâsco-elasticitatea lemnului și a materialelor compozite lignocelulozice	55%



În secțiunea *(B-II) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei*, s-a prezentat atât evoluția științifică și profesională a autoarei cât și realizările didactice și științifice care au condus la conturarea și consolidarea prestigiului profesional, a autonomiei și vizibilității la nivel național și internațional.

Realizările științifice și planurile de dezvoltarea ale carierei profesionale sunt susținute de maturitatea profilului științific și didactic al autoarei tezei de abilitare, în direcția temei de cercetare abordată în prezenta teză, temă ce se înscrie în domeniul Inginerie Mecanică.

Competențele și abilitățile de coordonare a studenților în activitățile științifice, a echipelor de cercetare ale proiectelor în calitate de director de proiect, capacitatea de asigurare a transferului de cunoaștere prin demersurile didactice cât și a transferului tehnologic prin interacțiunea cu mediul socio-economic dovedesc faptul că autoarea tezei de abilitare are capacitatea de coordonare a unor echipe de cercetare formate din viitori doctoranzi.

Cadrul general de desfășurare a activităților didactice și științifice, dotările tehnice din departament și centrul de cercetare, colectivul de cadre didactice cu performanțe remarcabile din Departamentul de Inginerie Mecanică, Facultatea de Inginerie Mecanică din Universitatea Transilvania din Brașov, va constitui mediul propice de dezvoltare a carierei în plan didactic și științific al autoarei teze de abilitare, fiind o onoare pentru aceasta să contribuie în mod activ la menținerea standardelor de calitate ridicată așa cum a fost îndrumată de mentorii săi.

**(B-iii) Bibliografie**

A

- [1] Alkadri A.; Carlier C., Wahyudi I., Gril J., Langbour P., (2018) Relationships between anatomical and vibrational properties of wavy Sycamore maple. IAWA Journal. Brill publishers, 39(1) (2018) 63–86. DOI:10.1163/22941932-20170185. hal-01667816.
- [2] Alm, J.F.; Walker, J.S. (2002) Time-Frequency Analysis of Musical Instruments. SIAM Rev. 2002, 44, 457–476, doi:10.1137/s00361445003822.
- [3] Angst, V., Malo, K.A. (2013) Moisture induced stresses in glulam cross sections during wetting exposure. Wood Sci. Technol. 47:227–241.
- [4] ASTM D5023 - 07 Standard Test Method for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: In Flexure (Three-Point Bending).
- [5] Aydinlik S., Kiris A., Sumelka W. (2021) Three-dimensional analysis of nonlocal plate vibration in the framework of space-fractional mechanics — Theory and validation, Thin-Walled Structures, 163 (2021) 107645. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107645>

B

- [6] Bader, R. (2005) Computational Mechanics of the Classical Guitar; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2005.
- [7] Barlow C.Y. (1997) Materials selection for musical instruments. In: Proceedings of the Institute of Acoustics, 19, 69 – 78.
- [8] Bârsănescu P D, Mocanu F, Bejan L, Bâtcă C (2007) The Electrical resistivity tensometry of composite materials (in Romanian), Ed. Tehnopress, Iasi, p. 127
- [9] Beldean EC, Pescăruș P (1996). Research on the acoustic quality classes of resonance spruce wood of Romania. În: Sandoz JL (ed.): Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Laussane, august 26-28, 1996, pp. 43-52
- [10] Beldeanu, E.C. (2001). Produse forestiere și studiul lemnului I, Ediția a II a, Editura Universității Transilvania din Brașov
- [11] Bissinger, G. (1995) Some mechanical and acoustical consequences of the violin soundpost. J. Acoust. Soc. Am. 1995, 97, 3154, doi:10.1121/1.411876.
- [12] Bissinger G., (2007) 3-D Laser Vibrometry on Legendary Old Italian Violins. Sound and Vibration; 2007, 10-14.
- [13] Bissinger, G. (2008) Structural acoustics of good and bad violins. J. Acoust. Soc. Am. 2008, 124, 1764, doi:10.1121/1.2956478.
- [14] Blümicha, B., Baias, M., Rehorna, C., Gabriellia, V., Jaschtschuka, D., et al. (2020) Comparison of historical violins by non-destructive MRI depth profiling, Microchemical Journal 2020, 158, 105219.
- [15] Bratu, P. (2000) Vibration of elastic systems. Ed. Tehnica. Bucuresti. 2000 (in Romanian).
- [16] Bremaud, I.; Gril, J.; Thibaut, B. (2011) Anisotropy of wood vibrational properties: Dependence on grain angle and review of literature data. Wood Sci. Technol. 2011, 45, 735–754.
- [17] Brémaud, I. (2012) What Do We Know on “Resonance Wood” Properties? Selective Review and Ongoing Research; Société Française d’Acoustique: Nantes, France, 2012; pp. 2760–2764.
- [18] Brémaud, I. (2012) Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. J. Acoust. Soc. Am. 2012, 131, 807–818.

- [19] Bretos J., Santamaria C., Alonso M.J. (1999) Vibrational patterns and frequency responses of the free plates and box of a violin obtained by finite-element analysis. *J. Acoust. Soc. Am.* 105;
- [20] Brokans, A., Ozola, L. (2014) Behaviour of creep of timber beams under natural environmental conditions. *WIT Trans. Built Env.* 137:479–489.
- [21] Bucur V, Ghelmeziu N (1977). Influența solicitărilor statice și dinamice de lungă durată asupra proprietăților acustice ale lemnului de rezonanță. *Industria Lemnului* 28(4), 171-180.
- [22] Bucur, V.; Archer, R.R. (1984) Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Sci. Technol.* 1984, 18, 255–265.
- [23] Bucur (2003). Techniques for high resolution imaging of wood structure: A review. *Meas Sci Technol* R91-98
- [24] Bucur, V. (2006) *Acoustics of Wood*, 2nd ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2006, 173–196.
- [25] Bucur V. (2016a) *Handbook of Materials for String Musical Instruments*. Springer International Publishing Switzerland; ISBN 978-3-319-32080-9 (eBook), DOI 10.1007/978-3-319-32080-9.
- [26] Bucur V. (2016b) About the acoustic and other non-destructive methods for the characterization of old historical string musical instruments – an overview, *Proceedings of The 22nd International Congress on Acoustics, Buenos Aires 5-9 September 2016*.
- [27] Buen. A. (2004) Two models for predicting the violin timbre from the material properties of the top and back plates. *Brekke & Strand akustikk as*; January 2004, available online at <http://www.oosterhofonline.net/pdf/Plate%20tuning%20to%20predict%20the%20timbre.pdf>
- [28] Buen, A. (2005) Comparing the sound of golden age and modern violins: long-time-average spectra, *VSA Papers*, vol.1(1); 2005.
- [29] Buen, A. (2010) What is Old Italian Violin Timbre? In *Proceedings of the Vienna Talk 2010 on Music Acoustics—“Bridging the Gaps”*, September 19–21, 2010, Viena, Austria, doi:10.13140/RG.2.2.10858.13767.
- [30] Buksnowitz, C.; Teischinger, A.; Müller, U.; Pahler, A.; Evans, R. (2007) Resonance wood [*Picea abies* (L.) Karst.]: Evaluation and prediction of violin makers' quality-grading. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007, 121, 2384–2395

## C

- [31] Carlier, C; Bremaud I; Gril, J. (2014) Violin making “tonewood”: comparing makers' empirical expertise with wood structural/visual and acoustical properties. *ISMA 2014*; Le Mans France;
- [32] Carlier, C.; Alkadri, A.; Gril, J.; Brémaud, I. (2018) Revisiting the notion of “resonance wood” choice: A decompartmentalised approach from violin makers' opinion and perception to characterization of material properties' variability. In *Wooden Musical Instruments. Different Forms of Knowledge: Book of End of WoodMusick COST Action FP1302*; Perez, M., Marconi, E., Paris, France, Eds; Hal Documentation: 2018.
- [33] Cattani, C.; Dunbar, R.L.M.; Shapira, Z. (2012) Value Creation and Knowledge Loss: The Case of Cremonese Stringed Instruments. *Organ. Sci.* 2012, 24, 813–830, <https://doi.org/10.1287/orsc.1120.0768>.
- [34] Câmpean, M.; Marinescu, I. (2012) Thermal treatments of wood. Lumber drying (in Romanian). *Transilvania University Publishing House, Brasov, Romania*. 2012.

- [35] Ciofoaia V and Curtu I 2001 Elasticity theory of isotropic and anisotropic bodies (in Romanian), Reprografia Universității Transilvania din Brașov
- [36] Cotta, N. (1983). Proiectarea și tehnologia fabricării produselor industriale din lemn. Editura Didactică și Pedagogică, București, România
- [37] Crețu N, Budău G (2017) Measurements of wave velocity in wood samples using the intrinsic transfer matrix. Bulletin of the Transilvania University of Brașov Series II, 10:37–42.
- [38] Crețu N, Pop IM, Rosca IC (2012) Eigenvalues and eigenvectors of the transfer matrix. AIP Conference Proceedings 1433:535-538. <https://doi.org/10.1063/1.3703244>
- [39] Crețu N, Nita G (2013a) A simplified modal analysis based on the properties of the transfer matrix. Mechanics of Materials 60:121-128. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.02.001>
- [40] Crețu N (2013b) Wave transmission approach based on modal analysis for embedded mechanical systems. Journal of Sound and Vibration 332:4940-4947. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.04.035>
- [41] Čufar, K., Beuting, M., Demšar, B., Merela, M. (2017) Dating of violins – The interpretation of dendrochronological reports, Journal of Cultural Heritage, 2017, 27, S44-S54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2016.07.010>.
- [42] Curtin, J., Rossing, T.D (2010) Violin. In: Thomas D. Rossing, Editor, The Science of String Instruments, Springer Science+Business Media, New York; 2010, p. 209-244, e-ISBN 978-1-4419-7110-4, DOI 10.1007/978-1-4419-7110-4.
- [43] Curtu, I.; Ghelmeziu, N. (1984) Mechanics of Wood and Wood Based Materials, 1st ed.; Editura Tehnica: Bucharest, Romania, 1984; pp. 165–204.
- [44] Curtu, I., Roșca, I., C. (1993): Reologia lemnului. Reprografia Universității Transilvania din Brașov

## D

- [45] Dinulică, F., Albu, C. T., Borz, S. A., Vasilescu, M. M., Petritan, I. C. (2015) Specific structural indexes for resonance Norway spruce wood used for violin manufacturing, BioResources, 10(4), 7525–7543. DOI: 10.15376/biores.10.4.7525-7543.
- [46] Dinulică, F., Albu, C.T., Vasilescu, M.M., **Stanciu, M.D.** (2019) Bark features for identifying resonance spruce standing timber, Forests, 10(9), Article number 799. DOI: 10.3390/f10090799.
- [47] Dinulică F (2020). Lemnul de rezonanță din Carpați. O introducere în acustica lemnului pentru sunet. Ed. Universității Transilvania, Brașov, 136 p. / ISBN 978-606-19-1278-0.
- [48] Dinulică, F.; **Stanciu, M.D.**; Savin, A. (2021) Correlation between Anatomical Grading and Acoustic–Elastic Properties of Resonant SpruceWood Used for Musical Instruments. Forests, 12,1122. <https://doi.org/10.3390/f12081122>.
- [49] Douglas, T. (2008) Eigenvalues and Eigenvectors. In Structural Dynamics and Vibrations in Practice: An Engineering Handbook, 1st ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2008; pp. 159–180.
- [50] Dumond, P.; Baddour, N. (2012) Effects of a Scalloped and Rectangular Brace on the Mode shapes of a Brace-Plate System. Int. J. Mech. Eng. Mechat. 2012, 1, doi:10.11159/ijmem.2012.001
- [51] Dünwald, H. (1999) Deduction of objective quality parameters on old and new violins. Catgut Acoust. Soc. J. 1999, 2, 1–5.

## E

- [52] Erdélyi, S., (1997) Hungarian Treasures of Violinists. DRESKULT Budapest, 1997, Hungary (in English and Hungary).
- [53] Evensen, D.A. (1976) Vibration Analysis of Multi-symmetric structures. AIAA J. 1976, 14, 446–453.

## F

- [54] Fedyukov V, Saldaeva E, Chernova M (2017) Different ways of elastic modulus comparative study to predict resonant properties of standing spruce wood. Wood Research 62(4):607–614
- [55] Filipovici J (1965). Studiul lemnului. vol. 2. EDP, București, pp. 207-222.
- [56] Fiocco, G.; Gonzalez, S.; Invernizzi, C.; Rovetta, T.; Albano, M.; Dondi, P.; Licchelli, M.; Antonacci, F.; Malagodi, M. (2021) Compositional and Morphological Comparison among Three Coeval Violins Made by Giuseppe Guarneri “del Gesù” in 1734. Coatings 2021, 11, 884, <https://doi.org/10.3390/coatings11080884>.
- [57] Firth, I.M. (1988) Temperature of the top plate of a guitar in playing position. J. Catgut Acoust. Soc. Series 2:1–30.
- [58] Fritz, C.; Curtin, J.; Poitevineau, J.; Morrel-Samuels, P.; Tao, F.-C. (2012) Player preferences among new and old violins. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2012, 109, 760–763, doi:10.1073/pnas.1114999109.
- [59] Fritz, C.; Curtin, J.; Poitevineau, J.; Tao, F.-C. (2017) Listener evaluations of new and Old Italian violins. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2017, 114, 5395–5400, doi:10.1073/pnas.1619443114.

## G

- [60] Ghelmeziu, N., (1961). Îmbunătățirea calității instrumentelor muzicale. În Rev. Industria Lemnului, nr. 9
- [61] Ghelmeziu N., Beldie I.P. (1970) Upon the characteristics of resonance spruce wood (in Romanian language). In: Bulletin of the Polytechnical Institute in Brasov, Vol. XII. Series B – Forestry Economy, (1970) 315–326.
- [62] Gliga V.Gh., **Stanciu M.D.**, Nastac S.M., Dinulica F., Campean M., (2019) Study concerning the natural frequency and damping factor of the top and back plate for different types of violins, ICWSE 7-9.11.2019, Brasov, ProLigno 15(4) 67-74 <http://proligno.ro/ro/articles/2019/201904.htm>
- [63] Gliga, V.G.; **Stanciu, M.D.**; Nastac, S.M.; Campean, M. (2020) Modal analysis of violin bodies with back plates made of different wood species. BioResources 2020, 15, 7687–7713, doi:10.15376/biores.15.4.7687-7713.
- [64] Gonçalves R, Trinca AJ, Cerri DGP (2011) Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. Wood and Fiber Science 43(1):64–75. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1247/1247>
- [65] Gough. C.E. (2007a) The violin. Chladni patterns, plates, shells and sounds. Eur. Phys. J. Special Topics 14:77-101, DOI: 10.1140/epjst/e2007-00149-0.
- [66] Gough, C.E. (2007b) Musical Acoustics. In Springer Handbook of Acoustics; Rossing, T., Ed.; Springer: Singapore, 2007; pp. 533–667.
- [67] Gough, C.E. (2013). Vibrational modes of the violin family. Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, Stockholm (Suedia).
- [68] Gough, C.E. (2015) A violin shell model: Vibrational modes and acoustics. J. Acoust. Soc. Am. 2015, 137, 1210–1225, doi:10.1121/1.4913458.
- [69] Gough, C.E. (2016) Violin Acoustics. Acoust. Today 2016, 12, 22–30.
- [70] Gough, C.E. (2021) Acoustic characterization of string instruments by internal cavity measurements. J. Acoust. Soc. Am. 2021, 150, 1922, doi: 10.1121/10.0006205.

- [71] Grimberg R, Savin A, Steigmann R, **Stanciu M.D.**, Grum J (2010) Determination of Elastic Properties of CFRP Using Lamb Waves Resonant Spectroscopy, 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, Hamburg, Germany, 22-24 Nov 2010
- [72] Gore, T. (2011) Wood for guitars. Proceedings of Meetings on Acoustics, Published by the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 12:1–22 (035001).
- [73] Goanță V, Hadar A., Leitoiu B. (2010) Experimental Procedure Designed to Determine the Elastic Characteristics of Fiber-Reinforced Polymeric Composite Materials, *Materiale Plastice*, 47 (4) 450-456
- [74] Güntekin, E., Aydin, T.Y., Niemz, P. (2016) Some orthotropic elastic properties of *Fagus orientalis* as influenced by moisture content. *Wood Res.* 61:95–104

## H

- [75] Haines, D., (2000). The essential mechanical properties of wood prepared for musical instruments. *Catgut Acoustic Society Journal* , Vol 4(2):20-32.
- [76] Halachan P, Babiak M, Spisiak D, Chubinsky AN Tambi AA, Chauzov KV (2017) Physico-acoustic characteristics of spruce and larche wood. *Wood Res.* 62(2):235-242.
- [77] Hargrave, R. (1987) A Violin by Jacobus Stainer 1679 [https://www.rogerhargrave.de/PDF/Artikel/Strad/Artikel\\_1987\\_09\\_Jacobus\\_Stainer\\_1697\\_PDF.pdf](https://www.rogerhargrave.de/PDF/Artikel/Strad/Artikel_1987_09_Jacobus_Stainer_1697_PDF.pdf) (accessed on 15 June 2021).
- [78] Hearmon RFS (1966) Vibration testing of wood. *Forest Prod J* 16:29–40
- [79] Helmholtz von H (1912). On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music. 4ed., Longmans Green & Co, London New York Bombay Calcutta, 575 p. Disponibil la: [http://books.google.com/books?id=x\\_A5AAAAIAAJ&oe=UTF-8](http://books.google.com/books?id=x_A5AAAAIAAJ&oe=UTF-8) - accesat în 17.03.2021.
- [80] Hernández, R.E. (2007) Swelling properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density, and interlocked grain. *Wood Fiber Sci.* 39:146–158.
- [81] Holzer, S.M., Loferski, J.R., Dillard, D.A. (1989) A review of creep in wood: concepts relevant to develop long-term behaviour predictions for wood structures. *Wood Fiber Sci.* 21:376–392
- [82] Hutchins C.M. (1962) The physics of violins. *Scientific American*, 207(5) (1962) 78–93.
- [83] Hutchins C.M. (1981) The acoustics of violin plates. *Scientific American*, 245(4) (1981) 170–186.
- [84] Hunt RWG (1998). *Measuring colour*, 3rd ed.; Fountain Press, Kingston-upon-Thames, U.K., 153 p.
- [85] Hurtado, E.G.; Pedraza-Ortega, J.C.; Ramos-Arreguin, J.-M.; Sotomayor-Olmedo, A.; Perez-Meneses, J. (2012) Vibration analysis in the design and construction of an acoustic guitar. *Int.J. Phys. Sci.* 2012, 7, 1986–1997
- [86] Hýsek, Š.; Löwe, R.; Turčáni, M. (2021) What Happens to Wood after a Tree Is Attacked by a Bark Beetle? *Forests* 2021, 12, 1163, <https://doi.org/10.3390/f12091163>.
- [87] Irvine GM (1985) The significance of the glass transition of lignin in theromechanical pulping. In *Wood Science and Technology* 19:139-149.

## J

- [88] Jansson, E.; Niewczyk B. (1989) Experiments with violin plates and different boundary conditions. *J Acoust. Soc. Am.* 86(3) (1989) 895–901.
- [89] Jansson, E. (2002a) Chapter 5. Vibration properties of the wood and tuning of violin plates. In: *Acoustics for violin and guitar makers*; 2002. Available online at <http://www.speech.kth.se/music/acviguit4/part5.pdf>.



- [90] Jeffrey S. L. (2002) Fingerprints Under the Varnish: Comparing Thickness Graduations of the "Messiah" Violin to Golden Age Strads. CASJ 4(6):14-16.

## K

- [91] Kasal, B.; Adams, A.; Drdácý, M. (2010) New applications in radiographic evaluation of structural components. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 2010, 14, 395–410, <https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693233>.
- [92] Klein, P., Pollens, S. (1998) The technique of dendrochronology as applied to violins made by Giuseppe Guarneri del Gesù, in: P. Biddulph (Ed.), Giuseppe Guarneri del Gesù, Biddulph, London, 1998.
- [93] Kollmann FFP, Côté WA Jr. (1968) Principles of Wood Science and Technology, Vol I, Solid Wood, Springer.
- [94] Kubojima Y, Tonosaki M, Yoshihara H (2006) Young's modulus obtained by flexural vibration test of a wooden beam with inhomogeneity of density. J Wood Sci, 52:20–24. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0732-9>
- [95] Kudela, J.; Kunstar, M. (2011) Physical-acoustical characteristics of maple wood with wavy structure, Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology 75, 2011, pp. 12-18
- [96] Kamperidou, V.; Barboutis, I.; Vassiliou, V. (2016) Prospects for the utilization of black locust wood (*Robinia pseudoacacia* L.) coming from plantations in Furniture Manufacturing. 27th International Conference on Wood Modification and Tehnology, 2016; pp. 123 – 128
- [97] Kowalski, S.J., Kowal, M. (1998) Physical relations for wood at variable humidity. Transport Porous Med. 31:331–346

## L

- [98] Lämmlein, S.L., Mannes, D., Van Damme, B. et al. (2019) The influence of multi-layered varnishes on moisture protection and vibrational properties of violin wood. Sci Rep 2019, 9, 18611. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54991-5>.
- [99] Le Conte, S., Le Moyne, S., Ollivier, F. (2012) Modal analysis comparison of two violins made by A. Stradivari. Acoustics 2012, Apr 2012, Nantes, France. hal-00811010.
- [100] Le, K.C. (2012) Vibrations of Shells and Rods; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012.
- [101] Le, K.C.; Nguyen, L.T.K. (2014) Energy Methods in Dynamics, 2nd ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014.
- [102] Lee, M.K.; Fouladi, M.H.; Namasivayam, S.N. (2016) Mathematical modelling and acoustical analysis of classical guitars and their soundboards. Adv. Acoust. Vib. 2016, 6084230, doi:10.1155/2016/6084230.
- [103] Lehmann, E.H.; Mannes, D. (2012) Wood investigations by means of radiation transmission techniques. Journal of Cultural Heritage, 2012, 13(3), S35 – S43
- [104] Lopatin, A.V.; Morozov, E.V. (2010) Symmetrical vibration modes of composite sandwich plates. J. Sandw. Struct. Mater. 2010, 13, 189–211
- [105] Lu Y. (2013) Comparison of Finite Element Method and Modal Analysis of Violin Top Plate. A thesis submitted to McGill University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Arts in Music Technology, Music Technology Area, Department of Music Research Schulich School of Music, McGill University, Montreal, Canada; June 2013

## M

- [106] Mannes, D.; Lehmann, E.; Niemz, P. (2009) Tomographic investigations of wood from macroscopic to microscopic scale. Wood Res. 2009, 54, 33–44.

- [107] Mania, P.; Fabisiak, E.; Skrodzka, E. (2015) Differences in the modal and structural parameters of resonance and non-resonance wood of spruce (*Picea abies*). *Acta Phys. Pol. A* 2015, 127, 110–113
- [108] Marcon, B.; Goli, G.; Fioravanti, M. (2020) Modelling wooden cultural heritage. The need to consider each artefact as unique as illustrated by the Cannone violin. *Herit. Sci.* 2020, 8, 24, <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00368-1>.
- [109] Menard, K.P. (1999) *Dynamic Mechanical Analysis – a practical introduction*. CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida.
- [110] Marin, M.; Öchsner, A. (2017) The effect of a dipolar structure on the Holder stability in Green-Naghdi thermoelasticity. *Contin. Mech. Thermodyn.* 2017, 29, 1365–1374.
- [111] Marshall, K.D. (1985) Modal analysis of a violin. *J. Acoust. Soc. Am.* 1985, 77, 695–709
- [112] Mihălcică M., **Stanciu M.D.**, Vlase S, (2020) Frequency Response Evaluation of Guitar Bodies with Different Bracing Systems, *Symmetry*, 2020, 12, 795; <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/5/795>.
- [113] Mihălcică M., **Stanciu M.D.**, Năstac S.M., Dinulica F., Nauncef A.M., Roșca I.C., Savin A., Signature Modes of Old and New Violins with Symmetric Anatomical Wood Structure, *Appl. Sci.* 2021, 11(23), 11297; <https://doi.org/10.3390/app112311297>
- [114] Molin N-E. (2007) Optical methods for acoustics and vibration measurements. In: Rossing TD (ed) *Springer Handbook of Acoustics*. Springer, New York; 2007, p. 1101–1125.
- [115] Molnar, S., Peszlen, I., Richter, H.G., Tolvaj, L., Varga, F. Influence of steaming on selected wood properties of black locust. In proceedings „Environment and Wood Science”, *Acta Facultatis Ligniensis, University Sopron*, 1998, pp. 38 – 45.
- [116] Munteanu M.V., **Stanciu M.D.**, Modrea A., (2020) Behavior of laminated wooden beam with variable section subjected to bending, in *Procedia Manufacturing Elsevier*, 46: 899-905, 10.1016/j.promfg.2020.05.006, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920314542>

## N

- [117] Nadarajah, M.C. (2018) *The Mechanics of the Soundpost in the Violin*. Ph. D. Thesis, University of Cambridge: Cambridge, UK, 2018.
- [118] Năstăsescu V., Stefan A., Lupoiu C., (2002) *Analiza neliniară a structurilor mecanice prin metoda elementelor finite*, Military Technical Academy Publishing House, Bucharest.
- [119] Negrean, I. (2017) *New Formulations in Analytical Dynamics of Systems*. *Acta Tech. Napocensis Ser.: Appl. Math. Mech. Eng.* 2017, 60, 49–56.
- [120] Nemeth, R.; Molnar, S. Utilisation of walnut (*Juglans*), robinia (*Robinia pseudoacacia*) and ash (*Fraxinus*) on the basis of Hungarian experiences, *COST Action E42 Growing Valuable Broadleaved Tree Species Thessaloniki–Greece –17–21 May 2005*.
- [121] Nia, H.T.; Jain, A.D.; Liu, Y.; Alam, M.R.; Barnas, R.; Makris, N.C. (2015) The evolution of air resonance power efficiency in the violin and its ancestors. *Proc. Math. Phys. Eng. Sci.* 2015, 471, 20140905.
- [122] Niemz, P., Ozyhar, T., Hering, S., Sonderegger, W. (2015) Moisture dependent physical-mechanical properties from beech wood in the main directions. *Proligno* 11:37–42.

- [123] Nyman, C.D, (1975) "1. History of the Development of the Violin 2. Construction of the Violin 3. Repairs of the Violin String Instruments". Master`s Thesis, Utah State University, Logan, UT, USA, 1975; p. 750. <https://digitalcommons.usu.edu/gradreports/750> Available online: <https://digitalcommons.usu.edu/gradreports/750> (accessed on 15 June 2021).

## O

- [124] Obataya E, Ono T, Norimoto M (2000) Vibrational properties of wood along the grain. *J of Materials Science* 35:2993–3001. <https://doi.org/10.1023/A:1004782827844>
- [125] Öchsner, A.; Öchsner, M. (2016) *Classical Plate Elements. Computational Statics and Dynamics: An Introduction Based on the Finite Element Method*, 1st ed.; Springer, Singapore, 2016; pp. 279–310.
- [126] Ono T., Isomura D. (2004) Acoustic characteristics of carbon fiber reinforced synthetic wood for musical instrument soundboard, *Acoustical Science and Technology*, 25(6) (2004) 475–477.
- [127] Olsson, A.M.; Salmen L. (1997) The effect of lignin composition on the viscoelastic properties of wood. *Nordic Pulp and Paper Research Journal* Vol. 12 no. 311997.

## P

- [128] Peron, T., Rodrigues, F., Costa, L. (2018) Pattern Recognition Approach to Violin Shapes of MIMO, database. ArXiv, abs/1808.02848.
- [129] Petrican, M; Curtu I.; Sperchez, Fl.; Mițșor, Al.; Paraschiv N. *Aplicații ale tensometriei în industria lemnului*, Ed. Tehnică, București, p460.
- [130] Pilcher, J.R. Sample preparation, cross-dating and measurement. (1990) In Cook ER, Kairiukstis LA (eds): *Methods of dendrochronology*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 1990, 40–51.
- [131] Pilate G, Chabbert B, Cathala B, Yoshiga A, Leplé JC, Laurans F, Lapierre C, Ruel K (2004) Lignification and tension wood. *Comptes Rendus Biologies* 327:889-901.
- [132] Placet, Vincent, Passard, Joëlle and Perré, Patrick. (2007) Viscoelastic properties of green wood across the grain measured by harmonic tests in the range 0–95°C: Hardwood vs. softwood and normal wood vs. reaction wood, vol. 61, no. 5, 2007, pp. 548-557. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.093>
- [133] Pop MI, Cretu N (2016) Intrinsic transfer matrix method and split quaternion formalism for multilayer media. *Wave Motion* 65:105-111.
- [134] Pyrkosz, M.; Van Karsen, C. (2013) Comparative Modal Tests of a Violin. *Exp. Tech.* 2013, 37, 47–62, doi:10.1111/j.1747-1567.2012.00831.x.

## R

- [135] Rigon, L, Vallazza, E., Arfelli, F., Longo, R., et al (2017) Synchrotron-radiation microtomography for the non-destructive structural evaluation of bowed stringed instruments. *E-Preservation Science*. 2010, 7.
- [136] Rocaboy, F.; Bucur, V. (1990) About the physical properties of wood of twentieth century violins. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990, 1(6), 21–28.
- [137] Rodgers (1988) The effect of the elements of wood stiffness on violin plate vibration. *J Catgut Acoust. Soc.* 2nd series I, 1: 2-8.
- [138] Rojas, J.A.M., Alpuente, J., Postigo D., Rojas, I.M., Vignote S. (2011) Wood species identification using stress-wave analysis in the audible range. *Applied Acoustics* 72; 2011, p. 934–942.
- [139] Roberts G (1986) Finite element analysis of the violin. Ph D thesis Cardiff University UK.

- [140] Rossing, T., Fletcher, N., (2004) *Principle of Vibration and Sound* – second edition. Springer Science, New York, 2004.
- [141] Roșca, C., (2002) *Vibratii mecanice*, Ed. Infomarket Brasov, ISBN 973-8204-24-0.
- [142] Rousek, R.; Rademacher, P.; Brabec, M.; Dejmal, A.; Horníček, S.; Baar, J.; Šprdlík, V. (2015) Beech wood modification with ammonia gas improved properties. *Pro Ligno*. 2015, 11, 230–238.
- [143] Ranta-Maunus A. (1993), Rheological behaviour of wood in directions perpendicular to the grain. *Materials and Structures*. 26:362-369

## S

- [144] Saitis, C.; Fritz, C.; Scavone, G.P. (2019) Sounds like Melted Chocolats: How Musicians Conceptualize Violin Sound Richness. In *Proceedings of the ISMA 2019, International Symposium on Music Acoustics*, Detmold, Germany, 13–17 September 2019; pp. 50–57.
- [145] Sandu, I.C.A., Negru, I.C., Sandu, A.V., Vasilache, V. (2020) Authentication of an Old Violin by Multianalytical Methods. *Appl. Sci.*, 10, 306.
- [146] Saunders, F.A. (1946) The Mechanical Action of Instruments of the Violin Family. *J. Acoust. Soc. Am.* 1946, 17, 169–186, doi:10.1121/1.1916313.
- [147] Schleske, M. (2002) Contemporary violin making. Analysis of design, materials, varnish and normal modes. *Catgut Acoust. Soc. J.* 2002, 4, 50–65.
- [148] Schwarze FWMR, Morris H. (2020) Banishing the myths and dogmas surrounding the biotech Stradivarius. *Plants, People, Planet.* 2020; 2:237–243. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10097>.
- [149] Schelleng JC (1982). Wood for violins. *Catgut Acoustical Society Newsletter* 37, 8-19.
- [150] Senjanović, I.; Tomić, M.; Vladimir, N.; Hadžić, N. (2016) An Analytical Solution to Free Rectangular Plate Natural Vibrations by Beam Modes – Ordinary and Missing Plate Modes, *Trans. FAMENA* 2016, 40, 1–18.
- [151] Skrodzka, E.B.; Linde, B.B.; Krupa, A. (2013) Modal Parameters of Two Violins with Different Varnish Layers and Subjective Evaluation of Their Sound Quality. *Arch. Acoust.* 2013, 38, 75–81, doi:10.2478/aoa-2013-0009.
- [152] Shepherd, M.R.; Hambric, S.A.; Wess, D.B. (2014) The effects of wood variability on the free vibration of an acoustic guitar top plate. *J. Acous. Soc. Am.* 2014, 136, EL357, doi: 10.1121/1.4898740
- [153] Sproßmann, R.; Zauer, M.; Wagenführ, A. (2017) Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars. *Results Phys.* 2017, <http://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.05.006>
- [154] Spycher, M.; Schwarze, F.W.M.R.; Steiger, R. (2008) Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Sci. Technol.* 2008, 42, 325–342, <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0170-5>
- [155] Sodini, N., Dreossi, D., Chen, R., Fioravanti, M., et al. (2012) Non-invasive microstructural analysis of bowed stringed instruments with synchrotron radiation X-ray microtomography, *Journal of Cultural Heritage*, 13(3), S44-S49.
- [156] Sonderegger, W.; Martiensen, A.; Nitsche, C.; Ozyhar, T.; Kaliske, M.; Niemz, P. (2013) Investigations on the physical and mechanical behavior of sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.) *Eur. J. Wood Prod.* 2013, 71, 91–99.

- [157] **Stanciu M.D.**, Curtu I. (2012) Dinamica structurii chitarei clasice. Editura Universității Transilvania din Brașov;
- [158] **Stanciu M.D.**; Curtu I.; Moisan E.; Man D.; Savin A.; Dobrescu G. (2015) Rheological Behaviour of Curly Maple Wood (*Acer Pseudoplatanus*) Used for Back Side of Violin, in *ProLigno* vol 11, nr. 4/2015, 73-80, <http://www.proligno.ro/ro/articles/2015/201504.htm>.
- [159] **Stanciu M.D.**, Curtu I., Groza M., Savin A., (2017) The Evaluation of Rheological Properties Of Composites Reinforced With Hemp, Subjected To Photo And Thermal Degradation, CONAT 2016 International Congress Of Automotive And Transport Engineering, DOI 10.1007/978-3-319-45447-4\_62, Pages: 565-574
- [160] **Stanciu M.D.**, Bucur V., Valcea C. S., Savin A., Sturm R., Oak particles size effects on viscous-elastic properties of wood polyester resin composite submitted to ultraviolet radiation, *Wood Sci Technol* 52(2): 365-382 (2018) <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-017-0971-0>
- [161] **Stanciu M.D.**, Teodorescu Draghicescu H., Ursarescu A., Labont P.C., Bit C. (2017) Numerical And Experimental Approach Of Behaviour Of The Wood Based Composite Subjected To Cyclic Bending, in *Proceeding of International Conference “Wood Science and Engineering in the Third Millennium” - ICWSE 2017*, p.253-260
- [162] **Stanciu M.D.**, Lăbont P.C., Târnoveanu C., Bege H, Munteanu M.V. (2017) Comparison Between Numerical and Physical Model of Lignocelluloses Materials Subjected to Cyclic Bending, in *Proceeding of The 7th International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC 2017*, p. 15-18
- [163] **Stanciu M.D.**, Munteanu M.V, Georgescu S.V., Urucu I.Șt., Duță P.G. (2017) Analysis of Lignocellulose Structures Deformations by Quantitative and Qualitative Methods in *Proceeding of The 7th International Conference on Computational Mechanics and Virtual Engineering COMEC 2017*, p. 87-92.
- [164] **Stanciu M.D.**, Ardeleanu A.F. Teodorescu Draghicescu H, (2018) Reverse engineering in finite element analysis of the behaviour of lignocellulosic materials subjected to cyclic stresses, in *Procedia Manufacturing* 22 (2018), pp 65-72, 11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2017, 5-6 October 2017, Tirgu Mures, Romania <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918303056>
- [165] **Stanciu M.D.**, Bucur V., Munteanu M.V., Georgescu S.V., Năstac S.M. Moisture induced deformation in the neck of a classical guitar, in *Holzforschung*, 2019, Vol 73(4):371-379 <https://www.degruyter.com/view/j/hfsg.2019.73.issue-4/issue-files/hfsg.2019.73.issue-4.xml>
- [166] **Stanciu M.D.**, Vlase S., Marin M., (2019) Vibration Analysis of a Guitar considered as a Symmetrical Mechanical System, *Symmetry* 2019, 11(6), 727; <https://doi.org/10.3390/sym11060727>;
- [167] **Stanciu M.D.**, Șova D., Bârsănescu P., Goanță V., Savin A. (2019) Experimental determination of stress and strain states of the guitar’s wood structure”, *International Conference “FOREST COMPLEX IN THE DIGITAL ECONOMY”*, Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, 02 - 05 decembrie 2019, Moscova, Federația Rusă.
- [168] **Stanciu M.D.**, Teodorescu D.H., Vlase S., Degradation of Mechanical Properties of Pine Wood Under Symmetric Axial Cyclic Loading Parallel to Grain *Polymers* 2020, 12(10), 2176; <https://doi.org/10.3390/polym12102176>. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/10/2176>



- [169] **Stanciu M.D.**, Cosereanu C., Dinulica F., Bucur V., (2020) Effect of wood species on vibration modes of violins plates. Eur. J. Wood Prod. vol 78, pp. 785-799. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01538-5>.
- [170] **Stanciu, MD**; Dinulică F and Cîrstea IC, (2020) Physical and mechanical characterization of resonance spruce (Picea Abies L), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 916, 012112 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/916/1/012112, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/916/1/012112/pdf>.
- [171] **Stanciu, M.D.**; Şova, D.; Savin, A.; Iliaş, N.; Gorbacheva, G. (2020) Physical and Mechanical Properties of Ammonia-Treated Black Locust Wood. Polymers 2020, 12, 377, doi:10.3390/polym12020377.
- [172] **Stanciu M.D**, Năstac S.M., Gliga V.Gh., Câmpean M., Bucur V., Effect of the wood anisotropy on eigenmodes and eigenvalues using finite element analysis – case of violin plates, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 997, The 9th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering - ACME 2020 4-5 June 2020, Iaşi, Romania, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/997/1/012105/pdf>.
- [173] **Stanciu, M.D.**; Mihălcică, M.; Dinulică, F.; Nauncef, A.M.; Purdoiu, R.; Lăcătuş, R.; Gliga, G.V. X-ray Imaging and Computed Tomography for the Identification of Geometry and Construction Elements in the Structure of Old Violins. Materials 2021, 14, 5926. <https://doi.org/10.3390/ma14205926>.
- [174] **Stanciu MD**, Bârsănescu P, Goanţă V, Savin A, Experimental determination of stress and strain states of the guitar's wood structure, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 916 (2020) 012113 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/916/1/012113, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/916/1/012113/pdf>.
- [175] Stoel, B.C.; Borman, T.M. A (2008) Comparison of Wood Density between Classical Cremonese and Modern Violins. PLoS ONE. 2008. 3(7): e2554. doi:10.1371/journal.pone.0002554.
- [176] Szalai J (1994) Anisotropic elastic and strength theories of wood and wood composites, Part I Anisotropy of the mechanical properties. Hildebrand Niomida KTF (in Hungarian)
- [177] Ştefanescu D.M. (2011) Strain gauges and Wheatstone bridges — Basic instrumentation and new applications for electrical measurement of non-electrical quantities.
- [178] Ştefanescu D.M. (2016) Handbook of Force Transducers – Principles and Components,” Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K.
- [179] Szava I, Ciofoaia V., Luca Motoc D., Curtu I, (2000) Metode experimentale în dinamica structurilor mecanice, Ed. Universităţii Transilvania din Braşov, 2000 (partea I și Partea a II a)
- [180] Saunders, F.A. The Mechanical Action of Instruments of the Violin Family. J. Acoust. Soc. Am. 1946, 17, 169–186, doi:10.1121/1.1916313
- T
- [181] Tai, H.-C.; Shen, Y.-P.; Lin, J.-H.; Chung, D.-T. (2018) Acoustic evolution of old Italian violins from Amati to Stradivari. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2018, 115, 5926–5931, doi:10.1073/pnas.1800666115
- [182] Timar M. C., Catalog caracteristici mico-structurale materiale pentru restaurare si ecodesign (Decembrie 2009) – director proiect CNCISIS IDEI 856/2008, Creerea si implementarea unei metodologii de cercetare stiintifica performanta privitoare la



restaurarea – conservarea lemnului si eco-design in viziunea dezvoltarii durabile. Univ. Transilvania din Brasov, Facultatea de Ingineria Lemnului

- [183] Timar MC (2003) Wood chemistry. Transilvanian University of Brasov Printhouse
- [184] Topham, J., McCormick, D., (1998) A dendrochronological investigation of British stringed instruments of the violin family, *J. Archaeol. Sci.*, 25, 1149–1157.
- [185] Tronchin, L.; Tarabusi, V. (2004) Acoustical analysis in Ancient Violins. In *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*, 31 March–3 April 2004; Nara, Japan, pp. 1–4, ISMA2004, Unpublished.

U

- [186] Urmă, D. (1983) *Acoustic and Music*; (print book); Scientific Printhouse, Bucharest, 1983. (In Romanian).

V

- [187] Viala R., Placet V., Cogan S. (2018) Identification of the anisotropic elastic and damping properties of complex shape composite parts using an inverse method based on finite element model updating and 3D velocity fields measurements (FEMU-3DFV): application to bio-based composite violin soundboards. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, 106 (1) (2018) 91– 103. fffhal-02130067.
- [188] Viala, R.; Placet, V.; Cogan, S. Simultaneous non-destructive identification of multiple elastic and damping properties of spruce tonewood to improve grading. *J. Cult. Herit.* 2020, 42, 108–116, doi:10.1016/j.culher.2019.09.004.
- [189] Villani, V., Pucciariello, P., Lavallata, V. (2017) Viscoelasticity of air-dried or thermo-treated woods. *J. Polym. Environ.* 25:479–486
- [190] Vlase, S. (1987) Elimination of Lagrangean Multipliers. *Mech. Research Communications*, 1987, 14, 17–20.
- [191] Vlase, S.; Paun, M. (2015) Vibration Analysis of a Mechanical System consisting of Two Identical Parts. *Ro. J. Techn. Sci. Appl. Mech.* 2015, 60, 216–230.
- [192] Vlase, S.; Marin, M.; Scutaru, M.L.; Munteanu, R. (2017) Coupled transverse and torsional vibrations in a mechanical system with two identical beams. *AIP Adv.* 2017, 7, 065301; doi: 10.1063/1.4985271.

Z

- [193] Zhang, Z.; Liu A., Fu J., Pi Y.L., Liu Y., Huang Y., (2021) Nonlinear in-plane buckling of fixed shallow arches with an orthotropic thin-walled section under uniform radial and thermal loading, *Thin-Walled Structures*, 165 (2021) 107988, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107988>.
- [194] Zar, J.H. (1974) *Biostatistical analysis*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs.
- [195] Zingoni, A. (2009) Group-theoretic exploitations of symmetry in computational solid and structural mechanics. *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 2009, 79, 253–289.
- [196] Zygmuntowicz, S. (2021) Violinmaker Uses CT Scans, 3D Lasers to Hone Craft. Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=SA4yu2C2aiM> (accessed on 16 November 2021.).

W

- [197] Wegst, U.G.K. (2006) Wood for sound. *Am. J. Bot.* 2006, 93, 1439–1448.
- [198] Weigl, M.; Müller, U.; Wimmer, R.; Hansmann, C. Ammonia vs. thermally modified timber – comparison of physical and mechanical properties. *Eur. J. Wood Prod.* 2012, 70, 233–239.
- [199] Woodhouse, J. (1993) On the playability of violins. Part I *Reflect. Funct. Acust.* 1993, 78, 125–136.

- [200] Woodhouse, J. (1998) The acoustics of “A0-B0 mode matching” in the violin: *Acust. Acta Acust.* 1998, 84, 947–956
- [201] Woodhouse, J. (2002) Body vibration of the violin—What can a maker expect to control. *Catgut Acoust. Soc. J.* 2002, 4, 43–49.
- [202] Woodhouse, J.; Langley, R.S. (2012) Interpreting the Input Admittance of Violins and Guitars. *Acta Acust. United Acust.* 2012, 98, 611–628, doi:10.3813/aaa.918542

Y

- [203] Yoshikawa S., Shinoduka M., Senda T. (2008) A comparison of string instruments based on wood properties: Biwa vs. cello, *Acoust. Sci.&Tech.* 29 (2008) 41–50.
- [204] Yoshikawa S., Waltham C. (2014) Woods for Wooden Musical Instruments, in *Proceedings of ISMA 2014, Le Mans, France*, pp.281-286.
- [205] Yoshizawa S., Kawai G., Watanabe K., Miura K., Hirao I. (1997) GNA trinucleotide loop sequences producing extraordinary stable DNA minihairpins. *Biochemistry.* 1997; 36: 4761-4767