



## **ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ**

**Facultatea: Inginerie Mecanică**

**Ing. Ildikó Renata MUNTEANU (căs. SZÁVA)**

**Cercetări privind propagarea câmpului termic în  
structuri metalice pe modele la scară redusă**

**Investigation concerning temperature field  
propagation along reduced scale modelled metal  
structures**

### **REZUMAT / ABSTRACT**

**Conducător științific**

**Prof.dr.ing. Sorin VLASE**

**BRAŞOV, 2018**



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL  
ROMÂNIEI



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



OIPOSDRU



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE



Universitatea  
Politehnica  
Timișoara

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

## COMPONENTĂ

### Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Brașov

Nr. 9304 din 11.07.2018

PREȘEDINTE:

**Prof.dr.ing. Ioan Călin ROȘCA**

Universitatea Transilvania din Brașov

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

**Prof.dr.ing. Sorin VLASE**

Universitatea Transilvania din Brașov

REFERENȚI:

**C.S.I.dr. Veturia CHIROIU**

Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române,  
București

**Prof.dr.ing. Polidor-Paul BRATU**

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

**Conf.dr.ing. Daniela ȘOVA**

Universitatea Transilvania din Brașov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat: 10.09.2018, ora 11:00,  
sala UII3.

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa [ildiko.munteanu@unitbv.ro](mailto:ildiko.munteanu@unitbv.ro).

Totodată, vă invităm să luati parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.



UNIUNEA EUROPEANĂ

Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale  
2007-2013

OPO SDRU

MINISTERUL  
EDUCАIEI SI  
CERCETАRII  
ШTINСTIFICEUniversitatea  
Politehnica  
Timișoara

## CUVÂNT ÎNAINTE

Ultimii 5 ani, au adus multe schimbări în viața mea, atât pe plan personal, cât și profesional. Perioada 2013-2018, durata studiilor mele doctorale în Cadrul Universității Transilvania din Brașov, a fost plină de aventuri dar și de provocări. Am avut ocazia să cunosc foarte multe persoane, colegi din cadrul Departamentului de Inginerie Mecanică, respectiv din străinătate (mobilități ERASMUS, COST la Miskolc, Budapesta în Ungaria și la Ferrara în Italia), am învățat mult și m-au ajutat în dezvoltarea personală. În această perioadă am fost finanțată, timp de 18 luni, de proiectul "Creșterea atractivității și performanței programelor de formare doctorală și postdoctorală pentru cercetatori în științe inginerești - ATRACTING" POSDRU/159/1.5/S/137070.

Tot în perioada studiilor doctorale, am avut ocazia să ţin ore de seminar și de laborator. Pentru această perioadă sunt recunoscătoare studentilor mei, care m-au pus în față provocările, fapt ce m-a ajutat enorm în dezvoltare și comunicare. Am învățat unul de la celălalt și s-a întărit în mine dorința de a deveni cadru didactic.

Întocmirea tezei a fost un drum plin cu provocări și bariere, dar mulțumită lui Dumnezeu și ajutorul unor persoane, totuși am reușit să duc la bun sfârșit acest capitol din viață. Chiar este rezultatul unei munci în echipă. Sunt dator cu mulțumiri pentru multe persoane pentru că m-au susținut și m-au ajutat în perioada aceasta de realizare a tezei de doctorat.

Mulțumesc în primul rând tuturor din **Departamentul de Inginerie Mecanică**, pentru acceptare, pentru ajutorul și sprijinul acordat.

Mă simt obligată să adresez mulțumiri deosebite conducătorilor mei de doctorat, pentru domnul **prof. dr.ing. Vlase Sorin** (2015-2018) și pentru domnului **prof. dr. ing. Száva Ioan** (2013-2015) pentru încrederea, viziunea optimistă în perioade grele și îndrumarea acordată în finalizarea tezei. Mulțumesc prof. dr. ing. Száva Ioan că m-a încurajat spre a mă înscrie la doctorat.

O parte a teoriei, care a stat la baza cercetărilor efectuate în cadrul acestei teze, îi aparține domnului **dr.ing. Turzó Gábor** de la institutul de cercetare Veiki Energia din Ungaria. Mulțumesc Dânsului că, mi-a împărtășit o parte din cunoștințele, rezultate ale cercetărilor sale, precum și viziunea privind abordarea acestei probleme. Mulțumesc Domnului Directorul **dr. Osztheimer Márton** al institutului de cercetare Veiki Energia, pentru oportunitatea creată să pot realiza studii în laboratoarele companiei, precum și pentru sprijinul material acordat perioadei de stagiu.

Perioada experimentelor a fost plină cu provocări, cu surpreze neașteptate și de multe ori nedorite. Datorez mulțumiri domnului **dr.ing. Dani Péter**, pentru conceperea și realizarea fizică a sistemului de achiziție a datelor, precum și a sistemului electronic de comandă al încălzirii elementelor structurale. Fără ajutorul Dânsului nu puteam să realizez o mare parte din experimentele propuse. Mulțumesc pentru timpul acordat în realizarea acestora, în același timp mulțumesc că avut multă răbdare și m-a introdus în lumea electronicii.





UNIUNEA EUROPEANĂ

Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale  
2007-2013

OPO SDRU

MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICEUniversitatea  
Politehnica  
Timișoara

Sunt recunoscătoare Domnului **Bogyó Károly** pentru asistența oferită în utilizarea contoarelor trifazice.

Mulțumesc frumos Domnului **dr.ing. Gálfi Botond Pál** pentru realizarea programului de comunicare dintre sistemul de achiziție și calculator, respectiv pentru ajutorul acordat în ușurarea procesului prelucrării datelor de măsurătoare.

Sunt recunoscătoare și mulțumesc Domnului **ing. Szász Mátýás** pentru ajutorul oferit în analiza numerică cu MEF în ABAQUS.

Mulțumesc Domnului **ing. Bondár Tibor** din Ungaria pentru sfaturile privind aplicarea vopselelor intumescente, precum și pentru ajutorul generos, privind oferirea unor cantități de vopsea suficientă pentru efectuarea tuturor testelor.

Mulțumesc Domnului director **Kolumbán Ferenc** al companiei GRIMAS Control din Sfântu Gheorghe, pentru punerea la dispoziție a aparaturii de măsurat grosimi de vopsea, precum și Doamnei **ing. László Erika** pentru ajutorul oferit în instruirea utilizării acestui aparat.

Mulțumiri pentru comisia de îndrumare și anume Doamnelor **prof. dr. ing Scutaru Maria Luminiță** și **conf.dr. ing. Șova Daniela**, respectiv Domnului **prof. dr. ing Teodorescu-Drăghicescu Horațiu**, pentru faptul că au stat la dispoziția mea, când am avut nevoie de ajutor. Mulțumesc pentru observațiile constructive legate de realizarea tezei. Mulțumesc Doamnei conf.dr.ing. Șova Daniela pentru ajutorul oferit în elucidarea unor probleme aparte de Termodinamică.

Sunt recunoscătoare din inimă Familiei mele, pentru că au stat alături de mine și că m-au susținut cu înțelegere și cu dragoste în această perioadă. Pentru toți, acești cinci ani care au reprezentat o provocare. Datorez mulțumiri deosebite Soacrei mele, pentru că a avut grijă, cu multă dragoste și răbdare, de Fiica mea în ultimul an, ca eu să pot să lucrez la teză. Mulțumiri deosebite datorez Socrului meu pentru tot sprijinul acordat, pentru sfaturi, pentru timpul și efortul acordat în realizarea tezei, și în special îi mulțumesc pentru răbdarea lui cu mine. Dumnezeu să le binecuvânteze viața.

Mulțumesc foarte mult Soțului meu, care m-a sprijinit în perioadele mai grele, mai ales când nu am putut să fiu prezentă, când am stat toată ziua la facultate timp de luni întregi obosită și plină de muncă. Mulțumesc Fetiței mele, că în ciuda faptului, că am lipsit mult de lângă ea, ea mi-a dăruit multe zâmbete și îmbrățișări, care mi-au dat forță pentru fiecare zi.

Nu în ultimul rând doresc să-i mulțumesc lui Dumnezeu, că mi-a dat forță și perseverență pentru realizarea tezei, mai ales în situații neprevăzute în timpul potrivit mi-a trimis ajutor. Mulțumesc și pentru toate cadourile pe care le-am primit în această perioadă. Mă rog să-i binecuvânteze pe toți cei care într-un fel m-au ajutat în realizarea tezei, care au făcut parte din acești cinci ani plini cu muncă și aventură.

Brașov, 2018

Munteanu (căs. Száva) Ildikó Renata





UNIUNEA EUROPEANĂ

Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale  
2007-2013

OIPOSDRU

MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICEUniversitatea  
Politehnica  
Timișoara

## CUPRINS

	Pg. teza	Pg. rezumat
<b>INTRODUCERE</b>	8	9
<b>1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE</b>	11	12
1.1 Importanța protecției contra incendiilor	11	12
1.2 Soluții de protecție ale structurilor metalice	11	12
1.3. Avantajele și limitele protecției cu vopsele intumescente	13	13
1.4. Cercetări analitice și numerice ale rezistenței la incendii	15	13
1.5. Cercetări experimentale ale comportamentelor la incendii	23	14
1.6. Utilizarea modelelor reduse la scară pentru evaluare comportamentului structurii reale la foc	32	19
1.7. Studii teoretice privind distribuția câmpului termic de-a lungul elementelor structurale de oțel [TUR16]	37	21
1.8. Concluzii și strategia posibilă a investigațiilor doctorandei	40	23
<b>2. OBIECTIVELE TEZEI</b>	42	25
<b>3. CONCEPEREA ȘI REALIZAREA FIZICĂ A STANDURILOR DE ÎNCERCARE</b>	43	26
3.1. Stand destinat testării unor elemente structurale la scară naturală	43	26
3.2. Stand destinat testării unor elemente structurale la scară redusă	47	29
<b>4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PE ELEMENTE COMPONENTE SIMPLE ȘI PE O STRUCTURĂ SPAȚIALĂ</b>	50	32
4.1. Rezultate ale măsurătorilor efectuate pe segmente de stâlpi	50	32
4.2. Rezultate obținute pe elemente structurale reduse la scara 1:10	60	39
4.3. Rezultate obținute pe structura redusă la scara 1:10	73	49
4.4. Concluzii privind rezultatele obținute	87	56
<b>5. CERCETĂRI ANALITICE ȘI NUMERICE PRIVIND PROPAGAREA CÂMPULUI TERMIC PE ELEMENTE STRUCTURALE</b>	88	57
5.1. Studiu analitic al transferului de căldură într-o bară de secțiune tubular-rectangulară	88	57
5.1.1. Aspecte generale	88	57
5.1.2. Calculul coeficienților de transfer de căldură prin convecție și radiație	92	60
5.1.3. Determinarea fluxului de căldură transmis prin conductie de-a lungul barei	101	64
5.2. Calcul analitic îmbunătățit al curbelor de temperatură	104	67
5.2.1. Aproximarea curbei $T(z)$ printr-o funcție polinomială	104	67
5.2.2. Introducerea curbei adimensionale $T_{\psi} [\%]$	108	69
5.2.3. Implementarea curbei $T_{\psi}$ într-o nouă abordare a determinării parametrilor $m_0$ și $\alpha_n$	115	72
5.3. Rezultatele cercetărilor prin MEF în ABAQUS	119	73





UNIUNEA EUROPEANĂ

GUVERNUL  
ROMÂNIEIROMÂNIA  
MINISTERUL  
EDUCĂRIEI  
SI CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICEFondul Social European  
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale  
2007-2013

OIPOSDRU

MINISTERUL  
EDUCĂRIEI  
SI CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICEUniversitatea  
Politehnica  
Timișoara

5.4. Concluzii	128	79
----------------	-----	----

## **6. IMPLEMENTAREA AVANTAJELOR ANALIZEI DIMENSIONALE ÎN INVESTIGAȚII PE MODELE REDUSE LA SCARĂ**

6.1. Considerații teoretice de bază [SZI97]	129	80
6.1.1. Proprietățile de bază ale mărimilor fizice	129	80
6.1.2. Matricea dimensională	130	80
6.1.3. Multimea dimensională și determinarea variabilelor cu dimensiuni impuse	131	81
6.1.4. Relevanța, respectiv irelevanța dimensională a unei variabile	136	85
6.1.5. Irrelanța fizică a unei variabile	137	86
6.1.6. Metode de reducere ale numărului variabilelor adimensionale	139	88
6.1.7. Aspecte de bază ale modelării dimensionale	141	88
6.2. Stabilirea criteriilor adimensionale pentru bare de secțiune circulară plină, respectiv tubulară rectangulară	143	91
6.3. Concluzii	158	100

## **7. CONCLUZII, CONTRIBUȚIILE AUTOAREI, DISEMINAREA REZULTATELOR, PERSPECTIVE**

7.1. Concluzii	159	101
7.2. Contribuțiiile autoarei la tematica abordată	161	103
7.3. Diseminarea rezultatelor cercetărilor	162	104
7.4. Perspective ale cercetărilor	163	105
<b>BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ</b>	165	107
<b>Anexa 1.- Rezumat</b>	174	110
<b>Anexa 2.- CV română</b>	176	111
<b>Anexa 3 - CV engleză</b>	178	112
<b>Anexa 4 - Declarația de autenticitate</b>	180	113





UNIUNEA EUROPEANĂ

GUVERNUL  
ROMÂNIEIMINISTERUL  
EDUCĂRIEI  
ȘI CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICEFondul Social European  
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale  
2007-2013

OIPoSDRU

MINISTERUL  
EDUCĂRIEI  
ȘI CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICEUniversitatea  
Politehnica  
Timișoara

## CONTENT

	Thesis page.	Abstract page
<b>INTRODUCTION</b>	8	9
<b>1. STATE OF ARTS IN THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES</b>	11	12
1.1. Importance of the fire protections	11	12
1.2. Fire protection solutions of metallic structures	11	12
1.3. Advantages and limits of intumescent coatings	13	13
1.4. Analytical and numerical researches on fire resistance problems	15	13
1.5. Experimental researches on fire behaviours	23	14
1.6. Reduced scale models involved in real structures fire response	32	19
1.7. Theoretical studies concerning thermal field distribution along steel structural elements [TUR16]	37	21
1.8. Conclusions and possible strategy of PhD researches	40	23
<b>2. OBJECTIVES OF THE THESIS</b>	42	25
<b>3. CONCEIVING AND MANUFACTURING OF THE TESTING BENCHES</b>	43	26
3.1. Testing bench destined for real scale structural elements	43	26
3.2. Testing bench destined for reduced scale structural elements	47	29
<b>4. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON SIMPLE STRUCTURAL ELEMENTS AND 3D STRUCTURE</b>	50	32
4.1. Measurement results on column segments	50	32
4.2. Results on 1:10 reduced scale structural elements	60	39
4.3. Results on 1:10 reduced scale 3D structure	73	49
4.4. Conclusions concerning the obtained results	87	56
<b>5. ANALYTICAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON THERMAL FIELD PROPAGATION ALONG STRUCTURAL ELEMENTS</b>	88	57
5.1. Analytical study of the heat transfer in a tubular-rectangular straight steel bar	88	57
5.1.1. Generalities	88	57
5.1.2. Heat transfer convection and radiation coefficients calculus	92	60
5.1.3. The heat flux along the bar by conduction	101	64
5.2. An improvement analytical calculus of the $T(z)$ temperature curves	104	67
5.2.1. The $T(z)$ curve approximation by polynomial function	104	67
5.2.2. The dimensionless $T_{\psi} [\%]$ curve	108	69
5.2.3. A new approach on $m_0$ and $\alpha_n$ parameters calculus by means of $T_{\psi}$ curve	115	72
5.3. FEM results in ABAQUS	119	73
5.4. Conclusions	128	79



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale  
2007-2013

<b>6. IMPLEMENTING OF THE DIMENSIONAL ANALYSIS ADVANTAGES IN INVESTIGATIONS ON REDUSED SCALE MODELS</b>	129	80
6.1. Theoretical background [SZI97]	129	80
6.1.1. The basic behaviours of the physical quantities	129	80
6.1.2. Dimensional Matrix	130	80
6.1.3. Dimensional set and calculus of variables with imposed dimensions	131	81
6.1.4. Dimensional relevance or irrelevance of a variable	136	85
6.1.5. Physical irrelevance of a variable	137	86
6.1.6. Strategies on diminishing the dimensionless variable numbers	139	88
6.1.7. Basics on dimensional modelling	141	88
6.2. Dimensionless criteria for massive circular and tubular-rectangular cross-sectional bars	143	
6.3. Conclusions	158	100
<b>7. CONCLUSIONS, PERSONAL CONTRIBUTIONS,DISSEMINATIONS OF THE RESULTS, FUTHUR GOALS</b>	159	101
7.1. Conclusions	159	101
7.2. Personal Contributions	161	103
7.3. Disseminations of the results	162	104
7.4. Future Goals	163	105
<b>BIBLIOGRAPHY</b>	165	107
<b>Appendix 1. - Abstract</b>	174	110
<b>Appendix 2. - CV Romanian</b>	176	111
<b>Appendix 3. - CV English</b>	178	112
<b>Appendix 4. - Authenticity statement</b>	180	113



## INTRODUCERE

În construcțiile civile și industriale structurile de rezistență realizate din oțel, dar și cele auxiliare trebuie să fie protejate contra incendiilor, deoarece propagarea câmpului termic conduce la scăderea capacitații portante a elementelor structurale. O izolare cât mai eficientă a elementelor structurale reprezintă un deziderat major al inginerilor constructori.

Sistemele de protecție în acest sens trebuie să asigure salvarea vieților omenești și a bunurilor materiale în timp util. Multitudinea sistemelor de protecție justifică încă odată importanța protecției contra incendiilor.

O metodă aparte de protecție se realizează cu ajutorul unor vopsele denumite *intumescente*, care în timpul incendiului își măresc în mod considerabil volumul (deci și grosimea), iar transformarea lor într-o spumă termoizolantă asigură o protecție eficientă. Un avantaj al acestora constă în păstrarea supletei structurilor de rezistență ale clădirilor, motiv pentru care, ea se utilizează din ce în ce mai mult.

Testarea eficienței unui sistem de protecție contra incendiilor se poate realiza, fie pe structura la scară naturală (denumită în continuare *prototip*), fie pe modele reduse la scară (adică pe *model*). Prima versiune, deși asigură un volum de informații mult mai mare, datorită condițiilor sale de realizare, nu reprezintă o variantă eficientă.

Din ce în ce mai mult se preferă efectuarea testelor pe modele reduse la scară, iar cu ajutorul unor metode specifice acestei informații se extrapolează pe prototip. În acest sens, Analiza Dimensională reprezintă o metodă eficientă, însă, utilizarea ei sub forma inițială, practic lipsește din literatura de specialitate. De obicei, cercetătorii recurg, fie la transformarea relațiilor analitice cunoscute în expresii adimensionale, fie utilizează numai criterii de similitudine simple. Dimpotrivă, Analiza Dimensională propriu-zisă pleacă de la variabilele fizice implicate în respectivul proces, care prezintă un număr finit de dimensiuni. Prinț-o tehnică specială a grupării variabilelor, prezentată în lucrarea [SZI97], se obține în final un număr redus de variabile adimensionale, egale întotdeauna cu niște constante, care sunt în măsură să descrie mult mai fidel fenomenul urmărit. Combinarea acestor variabile adimensionale (care vor fi egale tot cu niște constante) va conduce la eficientizarea acestui proces de descriere al comportamentului structurii, iar pentru stabilirea acestor constante se vor efectua pe model un număr redus de măsurători efective.

Monitorizarea propagării câmpului termic (fie pe prototip, fie pe model) de la sursa de căldură spre elementele structurale, reprezintă un aspect important, indiferent dacă acestea sunt sau nu protejate termic.

Tinând seama de avantajele nete ale utilizării modelelor, doctoranda și-a ales analiza comportamentului la incendii al acestora, făcând ulterior și compararea acestora cu rezultatele obținute pe prototip.



Un prim obiectiv a constat în urmărirea amănunțită a propagării câmpului termic pe modele neacoperite, respectiv acoperite cu vopsele intumescente, având secțiuni tubular-rectangulară. După aceasta s-a trecut la stabilirea legilor de distribuție probabile ale câmpurilor termice, mai întâi pe modele, iar ulterior și verificarea unor elemente la scară naturală.

Rezultatele măsurătorilor au fost implementate, atât în calcule analitice, cât și în cele numerice, obținând o bună corespondență. În acest proces, Analiza Dimensională a oferit informații deosebit de utile.

Au fost analizate elemente structurale, având secțiune tubulară, pentru care, la diferite temperaturi nominale ale sursei de căldură, s-au stabilit legile de distribuție probabile ale câmpurilor termice de-a lungul acestora. Aceste investigații experimentale au vizat, atât modelele reduse la scară, cât și elementele structurale la scară naturală.

Cu ajutorul acestor legi de distribuție, au putut fi determinate prin calcul, parametrii de bază ai propagării câmpului termic. Fiind monitorizat bilanțul energetic, analiza numerică efectuată pe baza acestui bilanț a oferit regimuri termice compatibile cu cele obținute experimental.

Structura tezei:

În **Capitolul 1**, intitulat *Stadiul actual al cercetărilor teoretice și experimentale* sunt sintetizate principalele realizări pe plan mondial privind evaluarea comportamentului la incendii al unor elemente structurale importante. Astfel, au fost trecute în revistă: importanța protecției contra incendiilor; soluții de protecție utilizate la structuri metalice; avantajele și limitele utilizării vopselelor intumescente în protecția la incendii; principalele rezultate ale cercetărilor analitice și numerice privind rezistența la incendii; rezultatele cele mai semnificative ale investigațiilor experimentale; standurile cele mai utile din punctul de vedere al temei acestei teze, precum și implementarea utilizării modelelor reduse la scară, atât în investigații teoretice, cât și experimentale. Studii amănunțite privind stabilirea teoretică și verificarea experimentală a distribuției câmpului termic de-a lungul unei bare drepte de secțiune plină prezentate în lucrările [TUR16] și [TUR18] au servit drept repere utile în stabilirea strategiei proprii de investigare.

**Capitolul 2**, intitulat *Obiectivele tezei*, trece în revistă elementele principale, care vor fi urmărite în cadrul acestei teze de doctorat.

În **Capitolul 3**, *Conceperea și realizarea fizică a standurilor de încercare*, sunt prezentate cele două standuri destinate testării elementelor structurale cu un gabarit mare (prototip), ale celor reduse la scară (modele), precum și ale unor structuri de rezistență reduse la scara 1:10. Pe lângă descrierea detaliată a celor două standuri și sublinierea avantajelor acestora, sunt prezentate și particularitățile sistemului de achiziție a datelor, respectiv al sistemului electronic de comandă de putere al standurilor.

**Capitolul 4**, intitulat *Cercetări experimentale pe elemente componente simple și pe o structură spațială*, conține rezultatele experimentale ale investigațiilor, efectuate pe segmente de stâlpi realizate la scările 1:1, 1:2 și 1:4, pe un stâlp realizat la scara 1:10, prevăzută cu 1...4 grinzi, precum și cele aferente unei structuri cu un nivel, având patru compartimente, toate fiind testate în varianta



neprotejată, respectiv protejată cu vopsea intumescentă. Aceste elemente structurale, precum și structura de rezistență redusă la scară, au provenit din elementele unei structuri reale.

În **Capitolul 5**, *Cercetări analitice și numerice privind propagarea câmpului termic pe elemente structurale*, sunt descrise aspectele teoretice de bază ale transferului de căldură într-o bară de secțiune tubular-rectangulară. În acest sens a fost dedusă legea de variație a temperaturii, bilanțul termic, precum și principalele relații de calcul ale parametrilor transferului de căldură prin conducție, convecție și radiație. Un alt aspect era legat de îmbunătățirea analizei teoretice a curbelor de temperatură, prin intermediul unei funcții polinomiale, respectiv a unei scări adimensionale, în vederea stabilirii prin calcul a parametrului  $m_0$  și a coeficientului  $\alpha_n$ . Rezultate ale cercetărilor prin Metoda Elementelor Finite în ABAQUS, efectuate pe elemente structurale simple la scară naturală și scări reduse, sunt de asemenea incluse în acest capitol.

**Capitolul 6**, intitulat *Implementarea avantajelor Analizei Dimensionale în investigații pe modele reduse la scară*, oferă noțiunile de bază ale Analizei Dimensionale, privind modalitatea eficientă de stabilire a unor mărimi adimensionale, cu ajutorul cărora, extrapolarea rezultatelor obținute pe modele la prototip devine posibilă. Pe baza unei abordări originale a autorului lucrării [SZI97], sunt prezentate aspectele de bază ale modelării dimensionale. Setul de variabile adimensionale, necesare descrierii comportamentului termic la prototip față de model, a fost dedus pentru două tipuri de secțiuni transversale (secțiune circulară și tubular-dreptunghiulară, cu particularizare la aceea tubular-pătratică) și pentru două stări (neprotejate și protejate cu vopsea intumescentă). La sfârșitul capitolului este ilustrată metodologia prezentată.

În **Capitolul 7**, *Concluzii, contribuțiiile autoarei, diseminarea rezultatelor, perspective*, sunt sintetizate principalele concluzii, care au reieșit de pe urma acestor investigații teoretice și experimentale. Sunt oferite principalele contribuții ale autoarei la tematica tezei, fiind indicate și modalitățile de fructificare, prin articole științifice, ale acestor rezultate. La sfârșitul acestui capitol sunt punctate patru direcții majore de cercetare, pentru care sunt asigurate deja, atât standurile, sistemele de achiziție, precum și strategiile necesare realizării acestor cercetări viitoare.



## 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE

### 1.1. Importanța protecției contra incendiilor

Normativele EN 1993-1-2 și P118/1 menționează cerința esențială, introdusă de către Directiva 89/106/EEC (Directiva produselor pentru construcții), ca structurile portante să fie proiectate astfel încât să asigure stabilitatea necesară, în timpul unui incendiu, pentru un interval normat de timp ([SRE93], [NOP16]).

### 1.2. Soluții de protecție ale structurilor metalice

Este bine-cunoscut faptul că structurile de rezistență din oțel li-se reduce capacitatea portantă începând cu  $200^{\circ}\text{C}$ , iar la aproximativ  $500^{\circ}\text{C}$  acestea își pierd peste 50% din capacitatea lor portantă. Un asemenea fenomen are loc în cazul incendiilor, când elementele structurii de rezistență sunt încălzite în mod excesiv de fluxul termic degajat de focul produs.

În general protecțiile se categorizează în două grupuri mari:

- active, respectiv
- pasive.

*Protecțiile active* sunt cele care sting efectiv focul, iar cele *pasive*, care doar protejează structura, ca să nu se încălzească.

Structurile metalice pot fi protejate cu diferite metode pasive ([COR06], [MRO16], [CTH13], [BEZ17], [MUN14-a], [MUN14-b], [CIO10], [\*1], [\*2], [\*3], [\*4], [\*5]):

- Protejarea cu plăci rezistente la foc (de ex. Plăci din gips carton; din silicat de calciu);
- Acoperire cu pătură flexibilă ( din diferite materiale );
- Produse de torcretare (pulverizare):
  - Acoperire cu mortar uscat: pe bază de ciment sau pe bază de sulfură;
  - Cementitos / Vermiculite Spray;
  - Mortar compus din vermiculit și ipsos;
  - Mortar pe baza de lână minerală, adăos de ciment, bentonită și alți aditivi;
- Acoperire cu beton a profilelor de oțel;
- Protejarea cu vopsea intumescentă;
- Îmbrăcarea cu țigle [BEZ17].

O analiză comparativă detaliată a diferitelor soluții de izolare se regăsește și în lucrarea [MRO16], iar [LAW01] face sinteza lucrărilor de bază în acest sens.



### **1.3. Avantajele și limitele protecției cu vopsele intumescente**

Acoperirea structurii de rezistență cu straturi de vopsele intumescente împiedică încălzirea bruscă a metalului, respectiv întârzie cedarea structurii și propagarea câmpului termic cauzat de incendiu dinspre exterior spre structura de rezistență. Vopsea își dezvoltă acțiunea prin transformarea sa într-o spumă, având în final o grosime chiar de ordinul câtorva centimetri, față de grosimea inițială de câteva zecimi de milimetri.

În funcție de compoziția lor, după autorul lucrării [GOO04], se pot distinge trei tipuri de vopsele:

- Monocomponentă pe bază de apă;
- Monocomponentă pe bază de solventi;
- Bicomponentă cu rășini epoxidice cu sau fără solventi.

Mecanismul umflării vopselei și transformarea ei în spumă au o mare influență asupra modului în care rășinile epoxidice intumescente realizează izolarea termică. Conductivitatea termică și densitatea aparentă este afectată în mare măsură de procesul de umflare al vopselei. Autorii lucrărilor [KAK07], [SZA14] au analizat temeinic procesul de transformare al vopselei în spumă, oferind și un model numeric pentru acest proces. De asemenea, s-a propus și o modalitate eficientă și deosebit de precisă de stabilire a calității de termoizolare a stratului de vopsea din timpul acestui proces de transformare în spumă [SZA14].

**Avantajele** metodei sunt:

- nu schimbă proprietățile mecanice ale materialului protejat;
- are un aspect estetic plăcut;
- permite aplicarea unor finisaje decorative;
- facilitate în aplicare pe zone complexe ale structurilor;
- aplicabilitate, atât pentru exterioare, cât și pentru interioare;
- poate fi utilizată la protejarea diferitelor tipuri de materiale, cum ar fi otelul, polimerii, lemnul, respectiv materiale textile [DUQ04].

**Dezavantajele** constau în:

- Prețul lucrării este mai ridicat;
- Este pretențioasă, în timpul aplicării, la condițiile atmosferice;
- Asigură protecție termică pentru un timp limitat (max. 60 - 120 minute);
- Cele epoxidice sunt materiale toxice în timpul aplicării.

### **1.4. Cercetări analitice și numerice ale rezistenței la incendii**

În cadrul tezei, aceste aspecte sunt analizate în mod detaliat.



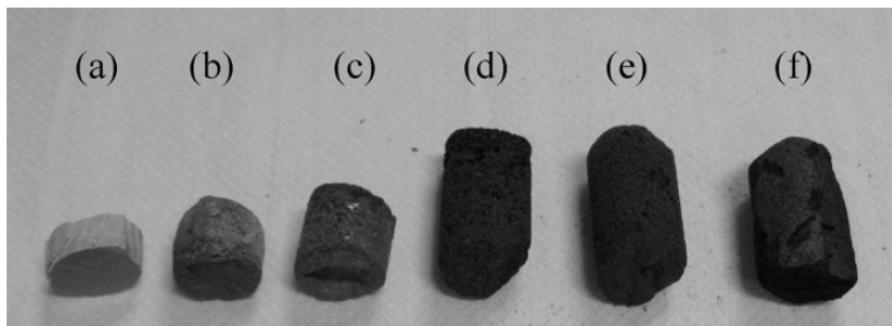
## 1.5. Cercetări experimentale ale comportamentelor la incendii

Din multitudinea de aspecte analizate prin investigații experimentale, în cadrul acestui **Rezumat** vor fi menționate numai acelea, care sunt strict legate de elaborarea cât mai eficientă a prezentei teze.

Rezultate ale unor teste pe epruvete cilindrice, având diametrul de 18 mm și înălțime de 9 mm, realizate din vopsea intumescentă pe baza de rășini epoxidice, supuse unor creșteri de temperatură, sunt prezentate în lucrarea [GOM12]. În **figura 1.5.2.** sunt oferite modificările în înălțime ale acestor epruvete. Se menționează faptul că, aceste epruvete au fost introduse în niște cilindri de oțel, în vederea evitării umflării lor laterale.

După cum menționează autorii, procesul de umflare se dezvoltă între 300-400 °C, iar la temperatura maximă (f) spuma carbonizată suferă o ușoară contractie. În final, la temperatura de 800 °C, creșterea volumică a fost între 3,5 – 4,6 față de cea inițială.

Testele termogravimetrice au identificat patru etape principale ale degradării vopselei, și anume: dehidratarea acidului boric, procesul de umflare, carbonizarea spumei și decompoziția termică finală a spumei. Aceste etape de degradare au fost incluse într-o analiză numerică, utilizând un model cinetic pentru simularea completă a comportamentului vopselei în caz de incendii.



**Fig. 1.5.2.** Etapele de transformare ale vopselei: (a) vopsea în stare inițială la 20 °C; (b) la 325 °C; (c) 350 °C; (d) 400 °C; (e) 600 °C; și (f) 800 °C[GOM12]

Cercetări similare, privind elaborarea unor modele numerice cinetice, pe baza unor măsurători experimentale, au fost realizate și de către autorii [KAK07].

Investigații privind determinarea coeficientului de transfer termic (de conductivitate termică)  $\lambda$  au fost efectuate și de autorul lucrării [DAN11]. Aici, determinarea coeficientului de transfer termic  $\lambda$  s-a realizat pe două căi: prima prin încălzirea inversă (de la epruveta de oțel spre exterior), iar a doua prin încălzire directă a vopselei din exterior (asemănător cazurilor de incendii).

Prima abordare a fost argumentată de autor de neajunsurile evidente ale încălzirii directe, unde în funcție de dimensiunile epruvetei, se vor modifica în limite foarte largi și dimensiunile cuptorului. De aceea, autorul lucrării [DAN11] a elaborat o altă metodologie, bazată pe încălzirea indirectă a stratului de vopsea.

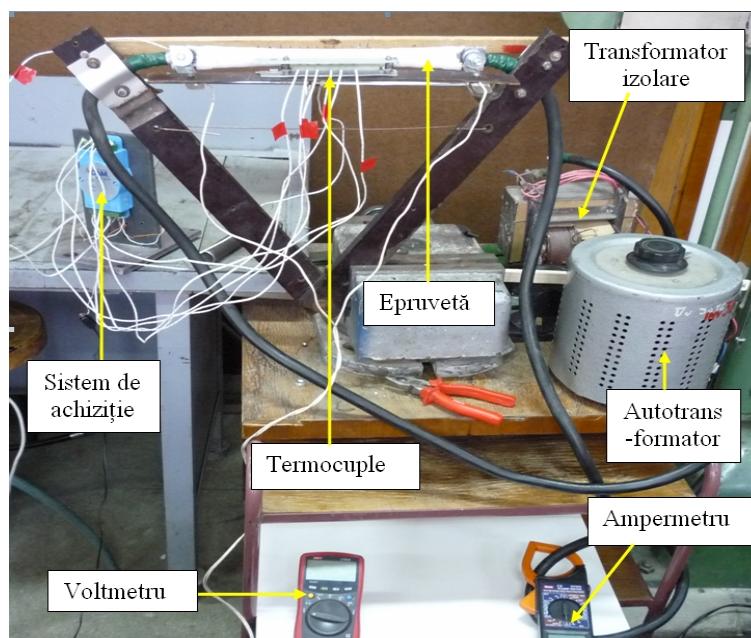


În acest caz epruveta tubulară este din ţeavă sudată de oțel, cu dimensiunile  $l=1000\text{ mm}$ ,  $\phi_{\text{exterior}}=22\text{ mm}$ , grosime de  $0,5\text{ mm}$  și încălzită electric la capete.

Subansamblul standului este redat în **figura 1.5.4.**, unde autotransformatorul asigură un reglaj continuu și precis al energiei introduse în epruvetă.

În mod suplimentar au fost monitorizați și parametrii:

- temperatura peretelui de oțel al epruvei;
- temperatura stratului de vopsea la diverse adâncimi;
- evoluția grosimi stratului de vopsea, respectiv
- parametrii curentului de alimentare.



**Fig.1.5.4.** Standul destinat testării vopselei prin încălzire interioară [DAN11]

Pe baza metodologiei descrisă în lucrare [DAN11], s-a obținut valoarea  $\lambda = 0,11021 \frac{W}{m \cdot K}$  pentru coeficientul de conductivitate termică al vopselei.

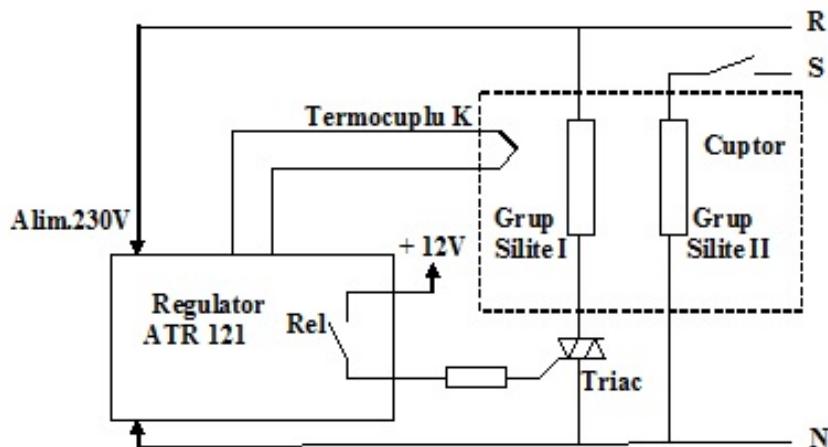
În vederea argumentării justătii și preciziei acestei metode neconvenționale, autorul a efectuat teste similare pe baza metodei încălzirii directe a stratului de vopsea.

Schema electrică principală a standului (un cuptor electric original) este redată în **figura 1.5.5.**

În acest caz, elementele de încălzire sunt cele 12 bare de Silită, iar prin intermediul regulatorului ATR-121 și a termocuplului tip *K*, introdus în incinta cuptorului, se reglează cu o precizie de  $\pm 2^\circ C$  temperatura din cuptor. Pereții cuptorului sunt realizati din fibră ceramică, iar epruveta, acoperită cu stratul de vopsea intumescentă, avea același dimensiuni ca mai înainte. Epruveta se introduce în cuptor, astfel încât capetele sale să fie amplasate în afara pereților cuptorului. Cu ajutorul unei suflante, prin tubul prevăzut cu diafragmă, se introduce aer la o presiune constantă și la o temperatură, monitorizată cu un termocuplu tip *K*. Un alt termocuplu monitorizează temperatura din



interiorul cuptorului. Temperatura din interiorul epruvetei în zona ei mediane este monitorizată. Cunoscând debitul aerului, ce trece prin epruvetă, precum și temperaturile de intrare și de ieșire ale aerului, se poate efectua un calcul precis al bilanțului termic, de unde, pe baza metodologiei descrise în lucrare [DAN11], va rezulta în cele din urmă valoarea coeficientului de conductie  $\lambda = 0,1089 \frac{W}{m \cdot K}$ .



**Fig.1.5.5.** Schema electrică de principiu a cuptorului [DAN11]

Comparând cele două rezultate ale coeficientului de conductie  $\lambda$ , se observă o diferență minimă de 1%, ceea ce reprezintă o eroare minimă, acceptabilă din punct de vedere ingineresc.

*Astfel, abordarea originală a încălzirii indirecte, propusă de autorul lucrării [DAN11] deschide noi facilități în investigarea proprietăților vopselelor intumescente, dar și a altor tipuri de soluții de izolare termică.*

*Din pricina acestui rezultat neașteptat a fost nevoie ca toate încercările să fie efectuate prin metoda încălzirii indirecte cu ajutorul unor instalații electrice prezentate în capitolele următoare.*

Autorul principal al lucrării [TUR18] a conceput și realizat fizic un stand deosebit de eficient, destinat unor analize de mare finețe, chiar de precizie metrologică, privind propagarea câmpurilor termice în bare drepte (cu secțiune plină, respectiv tubulară), încălzite la un capăt. Schema de principiu, în conformitate cu lucrarea [TUR18], a acestui stand este redată în **figura 1.5.7.**

Elementele sale principale sunt: bara de oțel **1**, încastrată în suportul metalic **2**, permite o rotire cu un unghi dorit  $\alpha_g \in [0;180^\circ]$  în raport cu direcția verticală. Suportul **2** este fixat în semicarcasele **5-6**, unde, sistemul electric de încălzire comandat electronic **3**, respectiv izolarea termică **4**, sunt fixate. În vederea monitorizării variației temperaturii de-a lungul barei, în alezaje cu diametru de 2 mm, au fost fixate termocuple de precizie **7C**, marca FPA15P, care au fost conectate la un sistem de achiziție al temperaturii, marca Ahlborn GmbH, Germania. În funcție de tipul secțiunii transversale, au fost utilizate soluții diferite de fixare ale acestor termocuple (a se vedea detaliul **E** și secțiunile **H-H**, redate în aceeași **figură 1.5.7.**).



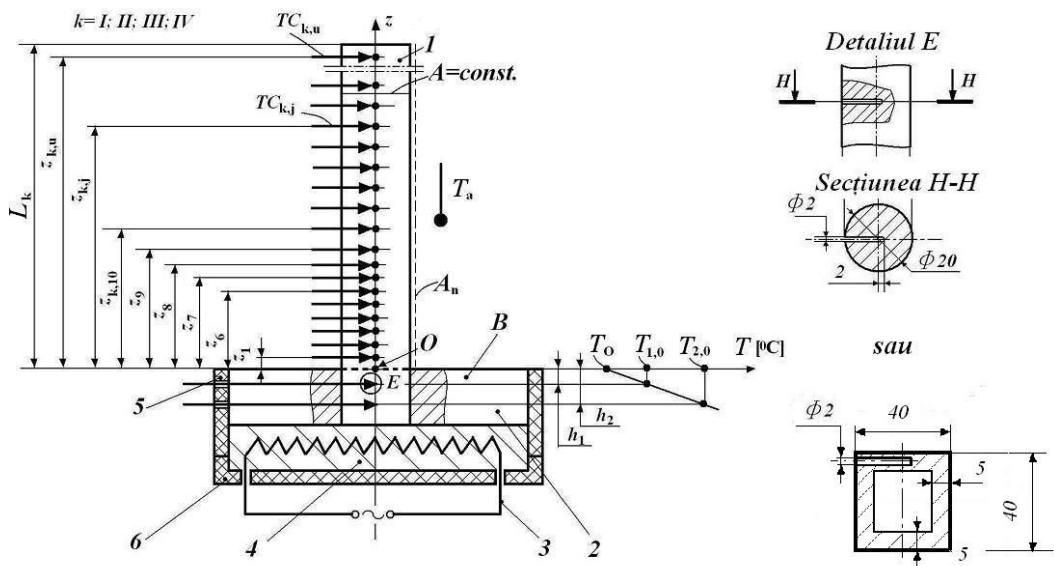


Fig. 1.5.7. Schema de principiu a standului destinat barelor singulare [TUR18]

Pentru a determina cât mai precis valoarea temperaturii nominale  $T_{0,n}$  de la baza plăcii calde 2, au fost amplasate la cotele  $h_1$ ,  $h_2$  două termocupluri, iar din valorile oferite de acestea și ținând seama de legea liniară de propagare a câmpului termic, a fost obținută această valoare:

$$T_o = \frac{T_{1,0} \cdot h_2 - T_{2,0} \cdot h_1}{(h_2 - h_1)} \quad (1.1)$$

Atât aceste temperaturi  $T_{1,0}$  și  $T_{2,0}$ , cât și aceea a mediului ambiant  $T_a$  au fost obținute prin măsurători repetitive, a căte 30 de măsurători, având durate de câte 5 s, până când erorile, față de valorile medii preconizate, au scăzut sub 0,04 %.

După obținerea acestor valori stabilizate ale temperaturilor  $T_{0,n}$  și  $T_a$ , s-a trecut la încălzirea barei supusă testelor, iar achiziția temperaturilor în timpul testelor au respectat norme metrologice similare.

Primele bare supuse testelor au fost de secțiune circulară plină, având diametrul de 20 mm, respectiv lungimi  $L_k$ , cuprinse între 50 și 200 mm. De asemenea, și amplasarea termocuprelor era în funcție de aceste cazuri analizate  $k$  (detaliate în lucrarea sus-menționată).

Scopul acestor investigații de mare precizie constă în:

- determinarea, pe baza acestor măsurători de mare finete, a constantelor de integrare ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $m$ ), care intervin în legea exponențială (1.2) de distribuție a temperaturii de-a lungul barei drepte încălzită la un capăt

$$T(z) = T_e(z) = c_1 \cdot e^{m \cdot z} + c_2 \cdot e^{-m \cdot z} + T_a, \quad (1.2)$$



- cât și în verificarea ipotezei  $m_0=\text{const.}$ , unde

$$m_0 = \sqrt{\frac{P}{A} \cdot \frac{\alpha_n}{\lambda}} \left[ \frac{1}{m} \right] \quad (1.3)$$

este un parametru general acceptat, care intervine în exponentul legii de distribuție(1.2).

În relația lui  $m_0$ :  $P[m]$  este perimetrul secțiunii transversale;

$A[m^2]$  – aria secțiunii transversale;

$\alpha_n [W/(m^2\text{C})]$  - coeficientul de transfer termic prin convecție pentru suprafața exterioare a barei ;

$\lambda [W/(m\text{C})]$  - coeficientul de conductivitatea termică a materialului barei.

În acest prim set de investigații experimentale au fost efectuate teste la două temperaturi nominale  $T_{0,n}$ :100; 400 °C și la două dispuneri unghiulare ( $\alpha_g=0^\circ$ ;  $90^\circ$ ) ale barelor.

Analiza teoretică detaliată a autorului principal, prezentată în lucrarea [TUR18], a oferit o metodologie originală și foarte eficientă în determinarea prin calcul analitic a mărimii parametrului  $m_0$ , astfel încât curba teoretică, oferită de legea exponențială (1.2), să se suprapună cu o foarte bună precizie peste aceea stabilită experimental.

Cercetările ulterioare ale autorului principal, neincluse în această lucrare [TUR18], au avut în vedere și verificarea veridicității ipotezei de  $m_0=\text{const.}$  la barele cu secțiuni tubulare de formă rectangulară, având dimensiunile secțiunii transversale de 40x40x5 mm și lungimi de 400 mm.

Pe baza unor investigații experimentale detaliate ale autorului principal al lucrării [TUR18], s-a demonstrat faptul că, această ipoteză rămâne valabilă numai pe intervale mai mici, nu pe întreaga lungime a barei tubulare.

În această etapă de prelucrarea datelor, ea și-a adus modesta ei contribuție prin următoarele două aspecte, care și pentru prezența teză de doctorat au constituit repere solide în analiza datelor măsurătorilor proprii, și anume:

- introducerea tuturor datelor măsurătorilor (temperatură-cotă "z" de disponere a termocouplelor) într-un mini-program de stabilire al celor trei constante ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $m$ ), obținând cu ajutorul acestor valori o bună suprapunere cu rezultatele măsurătorilor, respectiv
- a efectuat, sub directă îndrumare a autorului principal al lucrării [TUR18], un calcul minuțios al variației parametrului " $m_0$ " de-a lungul barelor tubulare rectangulare testate; pe baza acestui calcul s-au putut evidenția cele trei intervale semnificative, unde parametrul " $m_0$ " respectă (în mod individual) condiția  $m_0=\text{const.}$ , evident pentru alte valori numerice ale lui " $m_0$ ".

Aceste informații deosebit de utile, obținute în urma colaborării cu autorul principal al articolului [TUR18], i-au permis să-și revizuiască strategia inițială, privind amplasarea senzorilor de temperatură, respectiv tipul încercărilor preconizate, aferente elementelor structurale supuse testelor proprii.



## 1.6. Utilizarea modelelor reduse la scară pentru evaluare comportamentului structurii reale la foc

Cercetătorii recunosc faptul că, studiul rezistenței la incendii pe elemente structurale, respectiv pe structuri realizate la scară naturală, prezintă pe lângă avantaje și o serie de neajunsuri, datorită multitudinii și complexității fenomenelor, care influențează asupra evoluției focului în caz de incendii, motiv pentru care utilizarea prototipurilor presupune o evaluare atentă a avantajelor și limitelor acestei abordări.

*Avantajele analizei structurilor la scară reală sunt:*

- Permite o analiză fidelă a fenomenului;
- Asigură măsurători detaliate, chiar și în locuri greu accesibile;
- Permite elaborarea unor concluzii și deducerea unor relații analitice pertinente asupra fenomenului.

*Dezavantajele analizei la scară reală sunt:*

- Costuri ridicate;
- Personal numeros și de înaltă calificare implicaț în desfășurarea experimentelor;
- Necesită spații speciale (deosebit de voluminoase și cu protecție PSI speciale);
- Condițiile de simulare ale unui incendiu sunt greu de asigurat;
- Aparatură deosebit de pretențioasă.

Din acest motiv a căpătat o largă aplicabilitate analiza pe modele, confirmată și de multitudinea de articolelor publicate în literatura de specialitate ([QUI06], [QUI78], [EMO83], [CHO08] și altele).

*Avantajele testării pe modele sunt:*

- Costuri reduse;
- Personal minim, fără înaltă calificare;
- Standuri cu volum redus, fără a necesita spații speciale, voluminoase;
- Condițiile PSI sunt mult mai ușor de îndeplinit;
- Sursele de căldură utilizate sunt simple, ușor de controlat și au un cost redus.

*Dezavantajele testării pe modele sunt:*

- Nu oferă o analiză detaliată, ca teste la scară naturală;
- Rezultatele măsurătorilor, dacă nu este implicată și Analiza Dimensională, nu pot fi aplicate direct pe structura reală.

După obținerea unor rezultate pe modele, se caută o modalitate cât mai eficientă de a extrapola rezultatele obținute și pe prototip.

Dintre aceste modalități se pot menționa: Teoria Similitudinii, Teoria Analogiilor, respectiv Analiza Dimensională.



Informațiile oferite de *Teoria Similitudinii* se concentrează de fiecare dată la studiul unui singur parametru, care are o anumită influență asupra fenomenului studiat. Spre exemplu se introduc scări, cum ar fi: a lungimilor, a forțelor, a temperaturilor, a caracteristicilor mecanice etc. [SED82]. Criteriile de similitudine analizează de asemenea doar aspecte specifice ale fenomenului și nu oferă o abordare globală.

*Teoria Analogiilor* oferă informații utile privind realizarea modelelor reduse la scară, însă și în acest caz, numărul factorilor de influență, care intervin în analiza fenomenului, este limitat [THE77]. De asemenea, ambele metode presupun o cunoaștere temeinică a teoriei, care guvernează fenomenul, ceea ce reprezintă un dezavantaj pentru o mare parte a cercetătorilor.

Dimpotrivă, *Analiza Dimensională*, mai ales prin metodologia elaborată în lucrarea [SZI97], oferă un instrument sigur și deosebit de facil în deducerea unor relații globale, ce sunt apte să descrie fenomenul studiat. *Marele avantaj al acestei metodologii originale*, prezentată în lucrarea [SZI97], pe lângă simplitate, constă și în aceea că, cercetătorul trebuie să cunoască numai numărul și dimensiunile variabilelor independente, care acționează asupra fenomenului, respectiv numărul și dimensiunile variabilelor dependente, care ar putea descrie fenomenul analizat. Prin aplicarea respectivei metodologii, fără să fie implicată cunoașterea temeinică a fenomenului de către cercetători, va rezulta un număr redus de mărimi adimensionale, pe care le vom considera constante. Aceste mărimi adimensionale vor îngloba factorii de influență prin intermediul variabilelor independente, iar rezultatele unui număr minimal de măsurători experimentale vor oferi corelații sigure între variabilele independente și acelea dependente. Determinarea mărimii acestor constante adimensionale, prin măsurători experimentale, permite modificarea rând pe rând a mărimii variabilelor independente conținute în respectiva mărime adimensională, ceea ce echivalează de fapt cu evaluarea unui nou caz concret (fără a efectua în mod real acel experiment).

În sinteză se pot evidenția următoarele *avantaje ale Analizei Dimensionale*:

- Utilizează un număr redus de parametri globali adimensionali, fiecare dintre aceștia înglobând un număr însemnat de criterii de similitudine;
- Prin efectuarea unui număr minimal de teste (mai cu seamă pe model) se determină pentru fiecare parametru global adimensional câte o valoare numerică concretă;
- Păstrând aceste valori numerice constante, se pot modifica rând pe rând valorile criteriilor de similitudine implicate în acest parametru global adimensional;
- Prin aceasta, practic se simulează un număr însemnat de experimente, fără a mai fi necesară testarea efectivă a structurii în condiții diferite;
- Permite transferarea datelor măsurătorilor de la structura la scară redusă, la aceea reală, fără a denatura fenomenul urmărit.

În vederea deducerii parametrilor adimensionali ai Analizei Dimensionale, după cum este menționată în lucrarea [QUI06], se pot utiliza trei metode:

- Separarea, din relația de calcul cea mai simplă, ce descrie fenomenul, a unor grupuri adimensionale;



- Analiza relației de calcul (cea mai simplă versiune, care descrie fenomenul) cu ajutorul Metodei Diferențelor Finite în vederea formării a grupurilor adimensionale;
- Aplicarea directă a principiilor, care guvernează Analiza Dimensională.

În literatura studiată s-au regăsit numai primele două abordări, plecând de la teoria dezvoltată de Quintiere în lucrarea [QUI06] legată de separarea unor grupuri adimensionale (prima abordare).

Quintiere în lucrarea [QUI06] propune un set de variabile adimensionale privind ecuațiile de conservare și condițiile la limită aferente unei descrieri corespunzătoare a modelării incendiilor. Utilizarea unei părți din acest set de variabile adimensionale permite modelarea, cu anumită precizie, a problemei incendiilor, făcând legătură între *model* și *prototip*. După cum menționează și autorul, nu toate aceste variabile adimensionale pot fi utilizate simultan, iar selectarea unora dintre acestea, depinde de importanța aspectului urmărit.

Cele mai însemnante rezultate, obținute de o serie de cercetători pe baza teoriei elaborate de Quintiere, sunt trecute în revistă în cadrul tezei propriu-zise.

**Sinteza multitudinii** abordărilor propuse în constituirea legăturii dintre model și prototip se regăsesc în lucrările ([QUI78], [EMO83], [WAN08], [TH083], [TH000], [QUI89]).

În cadrul tezei propriu-zise, în **Subcapitolul 1.6.**, sunt analizate în mod detaliat rezultatele obținute cu ajutorul primelor două abordări, atât din punctul de vedere al unor calcule analitice sau numerice, cât și cele prin măsurători experimentale.

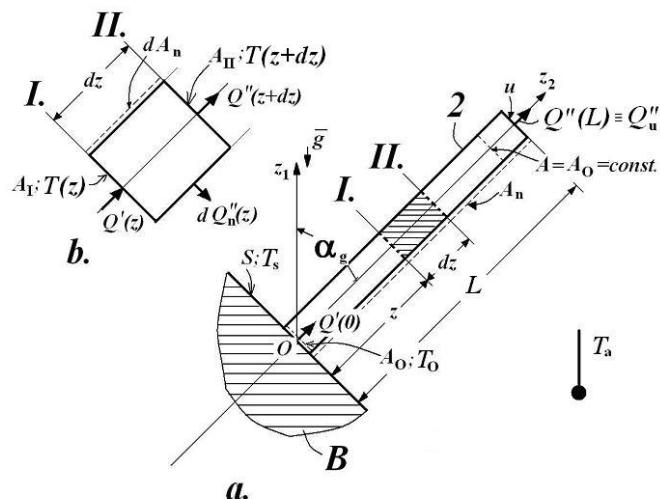
## 1.7. Studii teoretice privind distribuția câmpului termic de-a lungul elementelor structurale de oțel [TUR16]

Autorul lucrării [TUR16] prezintă bazele teoretice ale propagării fluxului termic într-o bară dreaptă din oțel, de secțiune plină constantă, încălzită la capăt. În **figura 1.7.1.** este prezentată schema de calcul a propagării fluxului termic.

În acest sens, s-a considerat o bară dreaptă de lungime  $L$ , având secțiunea constantă  $A = A_0 = \text{const.}$ , încastrată la capătul inferior, și înclinată cu unghiul  $\alpha_g$  față de direcția verticală  $z_1$ . Corpul  $B$ , în care este încastrată bara  $2$ , reprezintă totodată și sursa de căldură. Acest corp  $B$  poate fi rotit împreună cu bara  $2$ , cu unghiul dorit  $\alpha_g \in [0;180^\circ]$ . Perimetrul secțiunii transversale este  $P$ , aria laterală a barei este  $A_n$ , originea sistemului de referință este  $O$ , care este totodată și centrul de greutate al secțiunii transversale, iar axa longitudinală a barei este  $O - z_2$ . Direcția  $O - z_1$  este direcția verticală, orientată în sensul negativ al vectorului accelerării gravitaționale  $\vec{g}$ . Temperatura corpului  $B$ , la nivelul barei, este  $T_0$ , a suprafeței  $S$  este  $T_s$ , pe când a mediului ambiant  $T_a$ .

Prin suprafața  $S_f = S - A_0$  are loc transferul de căldură prin convecție liberă, iar prin suprafața  $A_0$  intră, prin conduction, fluxul de căldură  $Q(O)$ .





**Fig.1.7.1.** Schema de calcul a bilanțului termic [TUR16]

Fluxul de căldură  $Q(\theta)$  este disipat pe două căi:

- Prin conducție ajunge la capătul superior al barei și o părăsește, prin convecție liberă, cu o magnitudine  $Q_u \equiv Q(L)$ , prin convecție liberă;
- Prin convecție liberă, la nivelul suprafetei exterioare a barei, având mărimea  $Q_n$ .

Au fost acceptate ipotezele unei bare suficient de lungi, respectiv dependența exclusivă, de coordonata  $z$ , a temperaturii  $T$  și a coeficientului de transfer convectiv de căldură prin suprafața exterioară a barei de coordonata  $z$ , adică  $T \equiv T(z)$  și  $\alpha_n \equiv \alpha_n(z)$ .

S-a considerat echilibrul termic al elementului de bară de lungime  $dz$ , situat la distanța  $z$  de originea  $O$  (vezi fig. 1.7.1. b.).

Aplicând principiul conservării energiei pentru elementul de bară, în urma calculelor, ecuația bilanțului energetic va conduce la:

$$\frac{d^2 T_r(z)}{dz^2} = m_0^2 \cdot T_r(z), \quad (1.7)$$

unde

$$m_0 = \sqrt{\frac{P}{A} \cdot \frac{\alpha_n}{\lambda}} \left[ \frac{1}{m} \right], \quad (1.3)$$

reprezintă un parametru general acceptat, iar

$$T_r(z) = [T(z) - T_a] \quad (1.8)$$

este temperatura relativă a barei.

În ipoteza  $m_0 = \text{const}$ . soluția generală a ecuației (1.6) va fi:

$$T_r(z) = T_e(z) = c_1 \cdot e^{m_0 \cdot z} + c_2 \cdot e^{-m_0 \cdot z}, \quad (1.2)$$



unde indicele " $e$ " se referă la valoarea estimată a temperaturii, iar

$c_1, c_2 [^{\circ}\text{C}]$  - constante de integrare, care se obțin din condițiile la limită.

După cum menționează autorul lucrării [TUR16], există două modalități de stabilire ale fluxului termic total care părăsește bara, și anume:

- Fluxul termic total ieșit din bară trebuie să fie egal cu cel intrat  $Q'(O)$ ;
- Se utilizează egalitatea  $Q'' = Q_u'' + Q_n''$ , unde

$$Q_u'' = \alpha_u \cdot A \cdot T_e(L) \quad (1.12)$$

$$Q_n'' = m_0^2 \cdot A \cdot \int_0^L \lambda(z) \cdot T_e(z) \cdot dz, \quad (1.13)$$

care este fluxul de căldură transferat spre exterior prin suprafața laterală a barei.

Autorul lucrării [TUR16] a utilizat aceasta a doua modalitate, menționând faptul că, în literatura de specialitate nu a găsit rezultate sau referiri, în ceea ce privește determinarea prin calcul a coeficientului  $\alpha_n(z)$  pentru bare cu variații de temperatură. În calculele sale, bazate pe cercetări experimentale detaliate, autorul a utilizat Metoda Celor Mai Mici Pătrate aplicată pentru perechi de date  $T-\lambda$ . În aceeași lucrare sunt oferite și detaliile acestui calcul analitic.

Cercetările experimentale efectuate de autorul lucrărilor ([TUR16], [TUR18]), pe bare de secțiune plină, au confirmat valabilitatea ipotezei  $m_0 = \text{const}$  pe întreaga lungime  $L$  a barei, însă pentru cele de secțiune tubulară, după cum a fost specificat în **Subcapitolul 1.5.**, respectiv, cum va rezulta și din calculele prezentate în capitolele următoare, aceasta ipoteză rămâne valabilă numai pe tronsoane componente ale barei.

## 1.8. Concluzii și strategia posibilă a investigațiilor doctorandei

Pe baza analizei atente a datelor din literatură, detaliate în cadrul tezei, s-a ajuns la următoarele concluzii:

- Analiza pe modele va reprezenta calea de urmat în elaborarea tezei;
- Rezultatele obținute pe modelele vor fi interpretate cu ajutorul Analizei Dimensionale, după metodologia elaborate de [SZI97];
- În cele mai multe cazuri, cercetările experimentale efectuate pe plan internațional, au monitorizat temperaturile într-un număr destul de redus de puncte, ceea ce, pentru monitorizarea răspunsului (comportamentului) termic al unor structure spațiale, devine insuficientă;
- Comportamentul de izolare termică al stratul intumescent aplicat este practic insensibil la sensul de introducere al fluxului termic (din exterior, respectiv interior), adică prezintă valori practic identice (cu o diferență de 1 %), ale coeficientului de transfer termic prin conduction, lucru demonstrat prin cercetări experimentale detaliate de către autorul lucrării [DAN11];



- În consecință, modalitatea cea mai eficientă de introducere a fluxului de căldură în elementele supuse testelor va fi aceea prin încălzirea acestora din interior, cu ajutorul unor elemente adecvate de încălzire electrică;
- În cazul acestor elemente electrice de încălzire, controlul mărimi fluxului termic introdus va fi mult mai precis și totodată reproductibil;
- Investițiile materiale, legate de realizarea acestor standuri, se va reduce în mod considerabil, față de cazul unor cuptoare electrice sau cu gaz;
- Această soluție, a încălzirii electrice din interior, asigură totodată și dimensiuni optime ale standului, deoarece, indiferent de dimensiunile elementelor supuse testelor (evidenț, în limitele rezonabilului), și care în acest caz nu mai trebuie să fie introduse în cupitor, dimensiunile standului se păstrează;
- În cazul de față, confectionarea unui stand, cu performanțe similare celui conceput și realizat fizic de către autorul principal al lucrării [TUR18], este irealizabilă din punct de vedere material;
- Pentru cercetări era nevoie de un stand cu minimum 90 de canale, care la performanțele similare cu cele menționate în lucrarea [TUR18] nu era posibilă, deoarece atât aparatul de măsură, cât și termocouplele speciale, de precizie metrologică, nu se aflau în dotarea laboratorului Departamentului de Inginerie Mecanică;
- În lipsa unui asemenea stand, efectuarea pe plan local a unor teste cu elemente structurale rotabile cu un anume unghi  $\alpha_g$  în raport cu direcția verticală devine nerealizabilă;
- De asemenea, efectuarea unor investigații similare și de precizie metrologică, privind verificarea experimentală a legilor teoretice de variație ale temperaturii de-a lungul unor bare drepte, cu cele ale autorului principal al lucrării [TUR18], nu este realizabilă în cazul de față;
- În consecință, aceste concluzii și recomandări ale autorului principal al lucrării [TUR18], privind rezultatele cercetărilor sale proprii, vor fi luate în considerație în realizarea prezentei teze.

*Pe baza acestor concluzii au fost propusă următoarea strategie:*

- Luând în considerație faptul că, elementele structurale testate vor fi de obicei profile tubulare pătrate cu pereti relativ subțiri (de 1,5 mm), utilizarea unor termocouple speciale, cum au fost cele folosite de către autorul principal al lucrării [TUR18], adică cu tub de protecție solid, devine dificilă în lipsa existenței unor pereti suficient de groși ai țevilor, în care aceste termocouple ar trebui fixate;
- În consecință, în cadrul prezentei teză s-a optat pentru utilizarea unor elemente miniaturizate de tipul termorezistențelor tip PT-100, ale căror fixare, pe suprafața elementelor testate, s-a realizat prin intermediul unor conectori utilizati în instalațiile electrice;
- Partea termosensibilă a PT-urilor s-a fixat în acești conectori cu ajutorul unei paste termorezistente, care de fapt avea un rol dublu: apăsarea cât mai bună a părții termosensibile a termorezistenței de corpul metalic al acestor conectori (în vederea asigurării unui contact cât mai bun), cât și fixarea cât mai rigidă a termorezistenței în acești conectori; astfel, în urma unor montări și demontări repetitive ale termorezistențelor, nu va avea loc deterioarea acestora;
- Fixarea acestor subansamblu (conector-PT) pe piesa supusă testelor se va realiza cu ajutorul unor șuruburi M3, deoarece, chiar la grosimi reduse ale peretilor pieselor testate, acest tip de fixare asigură un contact termic bun;
- În vederea asigurării unui contact termic cât mai bun (cel puțin până la valori de 250 ... 300°C ), a fost aplicată, în zona de contact dintre conector (în care a fost fixată termorezistența) și suprafața



piesei testate, o pasta termoconductoare; din păcate, în comerț la ora actuală asemenea paste se găsesc numai în domeniul de temperaturi de până la 250 ... 300°C; peste aceste temperaturi pasta se transformă într-o pulbere, care reduce puțin calitățile de termoconducție ale pastei inițiale;

- Precizia acestor termorezistențe uzuale (nu a celor de precizie ridicată), care aveau și un preț accesibil este de cca. ±(3 ...4)% și este evident sub aceea de la termocouple;
- Din aceste motive, *nefiind vorba de măsurători metrologice, ci numai de a ilustra aplicabilitatea unei strategii elaborate, aceste erori de măsurare pot fi acceptabile în cadrul unei teze de doctorat*, evident, pentru măsurători de mare finețe se vor utiliza senzori de temperatură mult mai precise;
- O măsură suplimentară de protecție a fost aplicată terminalelor (sârmelor de legătură de cca. 150 mm lungime) acestor termorezistențe (care inițial au fost neprotejate), în vederea evitării realizării unor contacte electrice nedorite, cât și a acțiunii nedorite a temperaturilor ridicate: aceste sârme au fost introduse în niște tuburi capilare de sticlă; restul zonelor, unde s-a realizat conectarea acestor sârme de legătură cu cabluri speciale termorezistente (de până la 250°C), câmpurile termice nu mai erau periculoase;

## 2. OBIECTIVELE TEZEI

Pe baza analizei atente a literaturii de specialitate și a tematicii prezentei teze de doctorat, s-a propus atingerea următoarelor obiective:

- Conceperea unei strategii de analiză comparativă a unor elemente structurale la scară naturală cu unele reduse la scară;
- Conceperea și realizarea fizică a instalațiilor pentru investigațiile experimentale:
  - a unui stand destinat încercării elementelor structurale la scară naturală;
  - a unui stand special destinat testării unor structuri 3D la scară redusă;
  - a unui sistem de achiziție și de prelucrare a datelor pe minimum 90 de canale;
  - a unui sistem electronic de comandă al celor două standuri;
- Efectuarea unui calcul termic analitic pe un element structural simplu, în vederea ilustrării aplicabilității relațiilor teoretice;
- Îmbunătățirea fructificării informațiilor oferite de măsurători:
  - privind legile de variație ale temperaturii de-a lungul structurii;
  - elaborarea unei noi strategii pentru calculul coeficientilor de convecție termică;
  - efectuarea unor simulări numerice și compararea acestora cu rezultatele măsurătorilor;
- Prezentarea avantajelor Analizei Dimensionale în transferarea datelor măsurătorilor obținute pe modele la prototip;
- Propunerea unei strategii îmbunătățite, privind evaluarea datelor măsurătorilor obținute pe modele.



### 3. CONCEPEREA ȘI REALIZAREA FIZICĂ A STANDURILOR DE ÎNCERCARE

#### 3.1. Stand destinat testării unor elemente structurale la scară naturală

În figura 3.1.1. este redat standul asamblat, unde se pot distinge elementele de bază ale acestuia. Cadrul metalic solid **1** este așezat pe trei picioare **2**, prevăzute cu role (pentru asigurarea mobilității standului), peste care este fixat suportul **3**, sub formă de trunchi de piramidă, peste care sunt așezate pe rând elementele structurale supuse testelor.

În toate cazurile, în vederea asigurării unui control cât mai precis al fluxului termic introdus în elementul structural supus testelor, acestea au fost prevăzute cu plăci de bază de grosimi diferite (în funcție de scara lungimilor adoptată), însă cu aceeași suprafață de așezare pe suportul **3**.



**Fig. 3.1.1.** Vederea generală a standului de putere mare



a.



b.

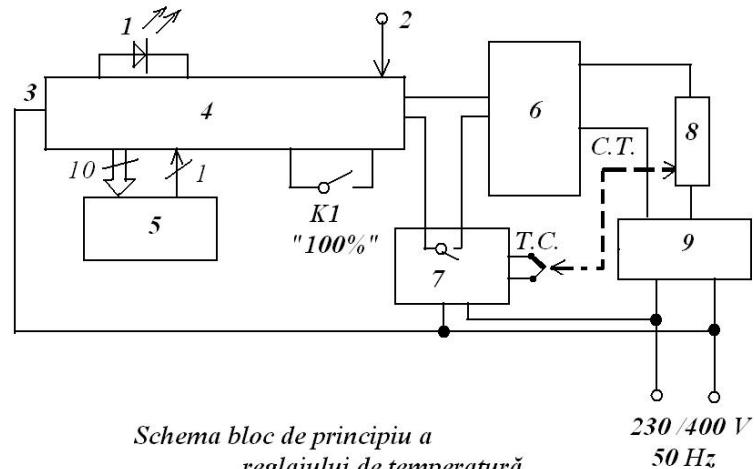
**Fig. 3.1.2.** Elementele de încălzire: a.) protejarea termică a barelor de Silită; b.) barele de Silită conectate la curentul electric

În figura 3.1.2.a și b. este redată dispozitiva elementelor de încălzire (12 bucăți de bare de Silită), izolate la nivelul elementelor de conectare la curentul electric, iar figura 3.1.2.b. oferă o imagine din timpul încălzirii acestor bare de Silită. În vederea diminuării, pe cât era posibil, a pierderilor de căldură, atât cadrul **1**, cât și suportul **3** au fost prevăzuți cu câte un strat de saltea din fibră ceramică



termoizolantă, cu o densitate de  $128 \text{ kg/m}^3$  și de grosime  $25,4 \text{ mm}$ . Calculul acestor pierderi de căldură din timpul experimentelor, în funcție de perioada și temperatura nominală de încălzire este prezentat în **Capitolul 5.1**. Ca o măsură a gradului de izolare, se poate menționa faptul că, la temperatura nominală de  $600^\circ\text{C}$ , în jurul suportului **3** temperatura nu depășea  $45-50^\circ\text{C}$ , iar sub cadrul metalic **1**, valoarea de cca.  $60-65^\circ\text{C}$ . Evident, pe baza experienței acumulate, acest grad de izolare se va putea îmbunătăți în viitor.

În figura 3.1.3. este prezentată schema de principiu al sistemului electronic original de comandă și de reglare al temperaturii de încercare. *Sistemul de reglaj a temperaturii* este o structură electronică digitală complexă, care asigură reglarea precisă a temperaturii într-o gamă largă de puteri disipate și măsurarea exactă a energiei electrice consumate pentru încălzire. Tematica urmărită de experimente impune cerințe înalte, simultan pentru reglaj și pentru măsurare. La valoarea nominală a tensiunii de alimentare, sistemul de încălzire are o putere de cca.  $25 \text{ kW}$ , și se pot atinge temperaturi de  $500-600^\circ\text{C}$ . În condițiile în care, tensiunea de alimentare nu se poate modifica, reglarea precisă a temperaturii la valori reduse (de ex.  $600^\circ\text{C}$ ) este imposibilă cu tehnica simplă on-off, oferită de obicei de regulatoarele de temperatură, deoarece din cauza puterii instalate foarte mari, încălzirea este rapidă și exagerată, iar din cauza inerției termice mari, bucla de reglaj nu poate interveni eficient. Regulatoarele inteligente cu autoînvățare – autoreglaj dă rezultate bune în regim permanent, dar în primul ciclu există oscilații ale temperaturii exagerate, ceea ce nu se poate accepta în condițiile unui reglaj fin și precis al temperaturii preconizate. În scopul evitării încălzirilor exagerate (deci a prezentării acestor oscilații termice mari) se impune reducerea puterii disipate. Intervenția trebuie să păstreze forma sinusoidală a tensiunii de alimentare și regimul rezistiv (pentru a se putea folosi contoare uzuale).



- 1 - LED semnalizare;
- 2 - Alimentare  $+12 \text{ V}$ ;
- 3 - Intrare sincron;
- 4 - Circuit digital de comandă;
- 5 - Comutator selector;
- 6 - Releu static "ZPS" de  $40 \text{ A}$ , tip SSR-4028ZD3;
- 7 - Regulator temperatură ATR 121;
- 8 - Element de încălzire;
- 9 - Contor energie electrică
- T.C. - termocupla
- C.T. - Contact termic prin piesele încălzite

**Fig. 3.1.3.** Schema bloc a sistemului de reglaj termic

Soluții posibile în principiu ar fi:

- autotransformatoare cu prize potrivite, însă care, la asemenea puteri, sunt rare și ar avea preț prea prohibitiv;
- înserierea de rezistențe de putere, care însă ar produce căldură, care se pierde, dar ridică și problema serioasă a evacuării căldurii;
- înserierea de inductivități, unde nu mai avem regim rezistiv, ci inductiv;
- triace cu comanda în fază reglabilă, circuite chopper sau cu PWM modifică forma de undă, și în consecință contorul electric standard, omologat, nu funcționează corect;

Singura soluție potrivită rămâne alimentarea încălzirii cu trenuri de semisinusoide întregi, serii de lungime programabilă.

Schema bloc pentru reglajul de temperatură prezintă componentele principale ale acestui ultim sistem, care îndeplinește cerințele experimentelor.

Componenta principală este circuitul digital de comandă. Acesta urmărește, prin intrarea de sincronizare, tensiunea de alimentare de la rețea, în scopul determinării momentelor, când tensiunea trece prin zero. Se definește un ciclu de 10 semiunde (semisinusoide), din care, prin programare, se selectează numărul de semiunde, pentru care se va activa releul static de putere de la ieșire, care va lăsa să treacă numai numărul dorit de semiunde prin sarcină; restul, până la 10, vor fi blocați. Repetarea ciclurilor de 10 semiperioade este semnalizată de un LED. Numărul de semiunde active se selectează dintr-un comutator selector cu 10 poziții. Din acestea sunt folosite valorile de la 1 până la 9, asigurând un reglaj de putere de la 10% până la 90% din puterea maximă, în trepte de 10%. Pentru puterea totală, se activează comutatorul K1, prin care se renunță la cicluri de 10 semiperioade, toate sunt active.

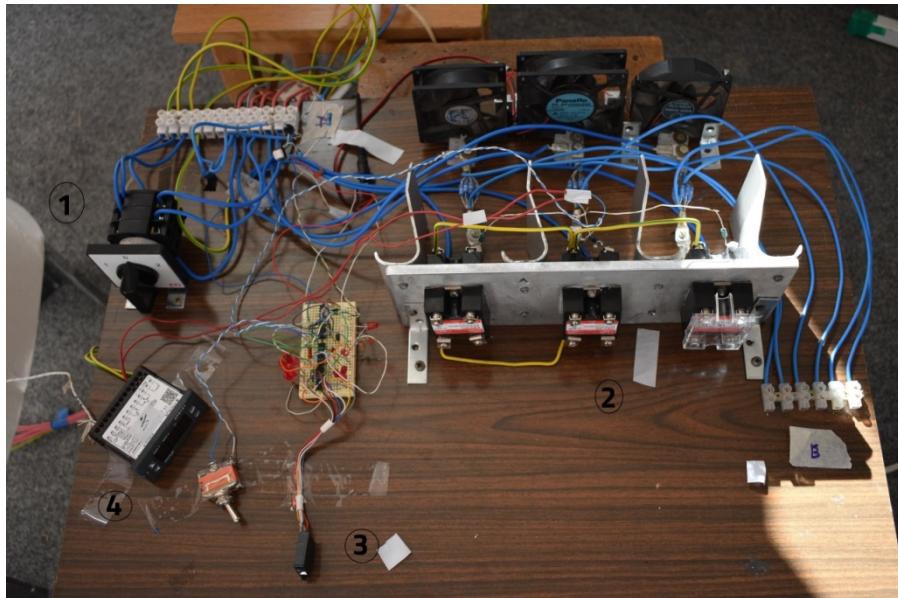
Între circuitul de comandă și releul static, intervine regulatorul de temperatură de tipul ATR121B, care, printr-un contact de releu intern, validează sau oprește încălzirea la treapta de putere prestabilită. Treapta de putere se alege astfel încât să permită atingerea unei temperaturi puțin mai ridicate decât cea necesară, iar temperatura nominală ( $T_{0,n}$ ) pentru experiment se programează din regulatorul de temperatură ATR121B. Pentru controlul elementelor de încălzire se folosesc relee statice de tipul SSR-4028ZD3 și SSR-4048ZD3, care permit un curent nominal de până la 40 A, și tensiuni de alimentare de 280 V, respectiv, 480 V. Acestea au izolare optică între bornele de comandă și cele de putere, cuprind și circuite, care asigură intrarea în conductie strict numai la trecerile prin zero ale tensiunii de alimentare (ZPS – zero point switch). Astfel, prin păstrarea nealterată a formei sinusoidale a tensiunii și currentului, măsurarea energiei electrice consumate se face corect, și în plus, nu apar nici perturbații electromagnetice în rețeaua electrică.

În figura 3.1.4. este redată fotografia acestui sistem electronic din timpul investigațiilor experimentale. Se pot distinge printre altele și următoarele elemente de bază: întrerupătorul general al sursei de curent 1, blocul releeelor de comandă (SSR-40) 2, comutatorul selectorului de trepte 3, precum și regulatorul de temperatură (ATR 121) 4.

După cum s-a menționat și pe schema bloc, reglajul temperaturii nominale  $T_{0,n}$  la baza elementului structural testat, se realizează cu ajutorul unei termocouple  $T.C.$ , fixată într-un alezaj potrivit în zone de



joncțiune dintre placa de bază și trunchiul elementului structural, iar acest senzor de temperatură este conectat la regulatorul de temperatură ATR 121. Înaintea începerii experimentelor se selectează temperatura nominală dorită  $T_{0,n}$  pe regulatorul de temperatură, respectiv pe comutatorul selector de trepte: procentul dorit din tensiunea de alimentare. Deoarece regulatorul de temperatură are și funcția de autoînvățare, practic după primul ciclu al atingerii temperaturii nominale, reglajul temperaturii va avea loc în limite foarte restrânse (de max. 4-5°C la o temperatură nominală de 600°C).



**Fig.3.1.4.** Vederea generală a sistemului de reglaj termic

De fiecare dată s-a urmărit atingerea regimurilor termice stabilizate, evaluate prin perceperea unor oscilații ale temperaturii la nivelul ultimului rând de termorezistențe (în partea superioară a respectivului element structural) de maximum 0,2-0,3°C pe o perioadă de timp de aproximativ 2-3 minute. După atingerea acestui regim stabil, s-a citit și cantitatea de energie electrică consumată, în [ $kWh$ ], de la începutul procesului de încălzire. Prin scăderea pierderilor de căldură prin păturile termoizolatoare ale standului, a rezultat în urma calculelor, cantitatea de căldură total investită în elementul structural testat  $Q_{total}$  [ $kJ$ ], pentru atingerea acestui regim termic stabilizat.

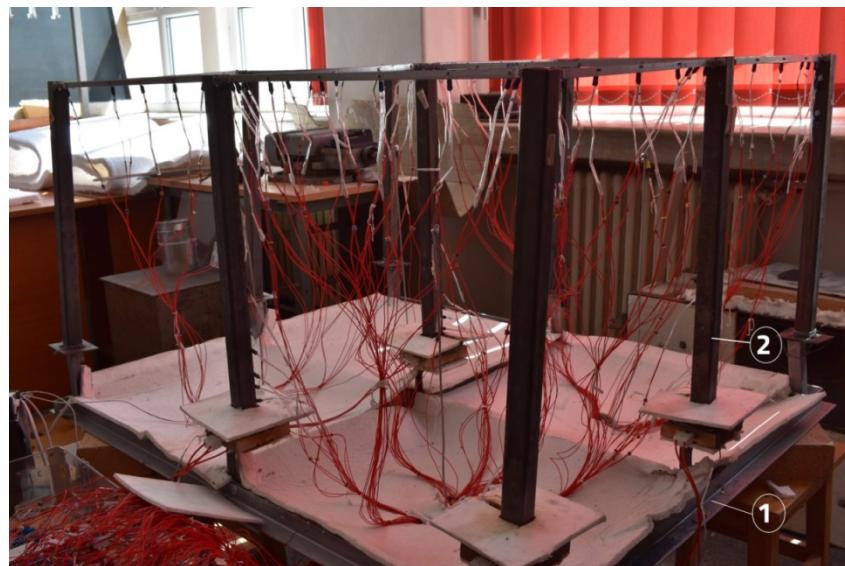
### 3.2. Stand destinat testării unor elemente structurale la scară redusă

În aceste cazuri, ale testării elementelor structurale reduse la scară (1:10), puterea necesară era mult mai mică și totodată căldura era direcționată precis către bazele stâlpilor acestor structuri.

Din acest motiv, a fost necesară conceperea și realizarea fizică a unui alt stand, care să permită testarea unor modele la scara 1:10, unde simularea incendiului se realiza prin încălzirea individuală sau concomitentă a unui număr de stâlpi (la bazele acestora), aferenți unui singur compartiment al respectivei clădiri. S-a optat pentru testarea structurii de rezistență (la scară redusă) a unei clădiri cu un singur nivel și patru compartimente (camere), unde incendiul a avut loc numai în primul compartiment.



Cei patru stâlpi ai acestui compartiment ales au fost încălziti, fie în mod individual, fie concomitent, fiind monitorizate câmpurile termice, precum și propagarea acestora pe restul elementelor neîncălzite (grinzi și stâlpi). În **figura 3.2.1.** este redat acest stand, împreună cu structura de rezistență supusă testelor.



**Fig.3.2.1.** Vederea generală a standului de putere mică

Cadrul rigid **1** susține structura testată **2**, iar datorită izolării termice corespunzătoare a cadrului rigid, întregul subansamblu poate fi amplasat oriunde (chiar și pe niște tabureți), fără existența pericolului de incendii. Pe structura de rezistență sunt deja montate termorezistențele (100 de bucăți), incluzând și cele patru destinate monotorizării temperaturilor din cele patru compartimente), iar disponerea cablurilor de conexiune se pot observa pe aceeași figură.

La baza stâlpilor **1**, **2**, **4** și **5** sunt montate cele patru elemente de încălzire (niște rezistențe electrice speciale, cu dimensiunile de gabarit  $95 \times 85 \times 23 \text{ mm}$ , respectiv putere de  $1,2 \text{ kW}$ ), așezate în niște carcase metalice paralelipipedice izolate corespunzător electric. O asemenea rezistență specială este redată în **figura 3.2.2.** Se poate observa faptul că, spre cadrul suport **1**, deci în partea inferioară a rezistenței speciale, există o pătură termoizolantă, pe când, în partea ei superioară există un contact metal-pe-metal cu placa de bază **2** a respectivului stâlp. În vederea creșterii eficienței contactului termic, pe suprafața respectivă a fost aplicată o pastă cu proprietăți de termoconduție ridicate (Heat sink Compounds Hy410, cu conductivitatea termică  $\lambda > 1,42 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). Aceste tălpi **2** au fost necesare pentru a contracara inertia termică foarte mică a stâlpului propriu-zise, care era un profil tubular pătratic  $30 \times 30 \times 1,5 \text{ mm}$ . Prin intermediul acestor tălpi **2**, s-a putut asigura o încălzire progresivă adecvată a sistemului supus testelor. Sistemul de comandă al reglajului temperaturii a fost identic cu cel anterior prezentat, însă au existat patru asemenea module identice (câte unul pentru fiecare stâlp supus încălzirii, prin intermediul rezistențelor de  $1,2 \text{ kW}$ ), care puteau fi comandate în mod individual.

În ambele cazuri sistemul de măsurare și de achiziție era același. Schema de principiu a acestui sistem electronic original, elaborat și realizat fizic cu ocazia măsurătorilor acestei teze de doctorat, este redată în **figura 3.2.3.**



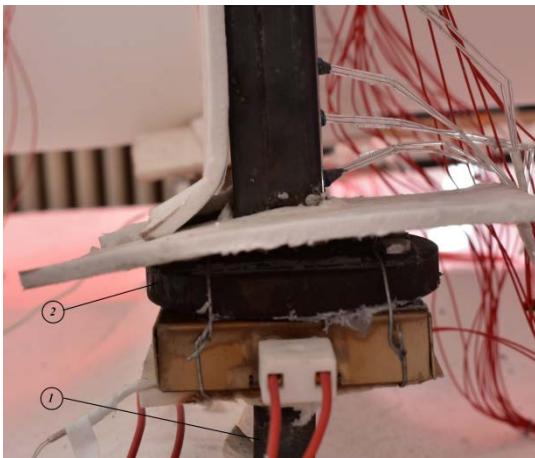


Fig.3.2.2. Detaliul sursei de căldură

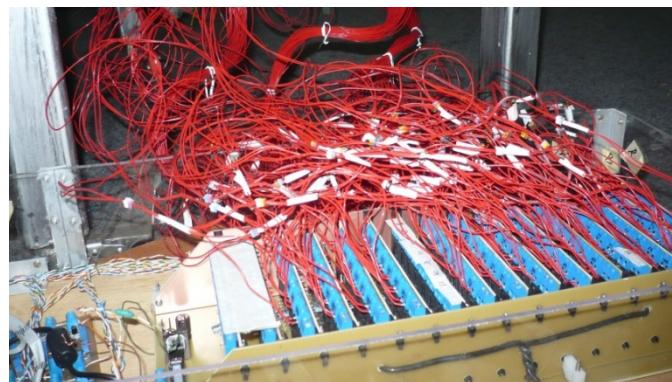


Fig.3.2.3. Sistemul de achiziție al datelor

Acest sistem electronic de măsurare – achiziții de date este format din trei părți importante:

- blocul de selecție și comutare;
- modulul de achiziții de date;
- calculatorul PC / laptop.

*Blocul de selecție și comutare, de concepție originală, a fost realizat pentru acest tip de experiment.* Acest bloc servește pentru selecția senzorilor de temperatură (în cazul de față termorezistențe de tip PT100), ale căror semnale se transformă în tensiuni electrice proporționale cu temperatura. Blocul de selecție și comutare se compune din 16 submodule de circuite de adaptare și comutare. La fiecare din aceste submodule sunt conectați 8 senzori.

În prima fază, cu ajutorul unor relee reed, comandate electronic, se selectează un senzor din cele 8, apoi se transformă valorile de rezistență electrică ale senzorilor în tensiune electrică. În acest mod, la un moment dat se pot urmări simultan 16 senzori, după care se poate selecta un alt set de 16 senzori. În total, sistemul de selecție permite măsurarea temperaturilor în maximum 128 de puncte prin multiplexare, cu un modul de achiziții de date cu 16 intrări (16x8=128).

*Modulul de achiziție de date* servește la conversia semnalelor electrice analogice (diferite valori de tensiuni) în reprezentare digitală. Tipic, aceste module au 8 sau 16 intrări analogice. Modulul de achiziție de date folosit pentru experimente a fost un Labjack UE9 profesional din comerț.

Acest modul are numai 14 intrări analogice accesibile extern pentru utilizator (intern are 16 canale, 2 canale sunt utilizate în alte scopuri), însă oferă semnale de comandă de multiplexare pe 3 biți (deci 8 combinații, adică permite alegerea unui releu din opt disponibile), permitând în acest mod măsurători în  $14 \times 8 = 112$  puncte în total.

Pentru convertirea valorilor în format digital, a fost scris un program original, prin intermediul căruia, placa de achiziție Labjack UE9 și calculatorul (PC/laptop) comunică prin interfață USB. De asemenea, s-a asigurat și înregistrarea volumului considerabil de informații despre modificările în timp ale temperaturilor pe parcursul experimentelor.



## 4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PE ELEMENTE COMPOUNTE SIMPLE ȘI PE O STRUCTURĂ SPAȚIALĂ

### 4.1. Rezultate ale măsurătorilor efectuate pe segmente de stâlpi

În cadrul acestor investigații, s-a plecat de la dimensiunile unor stâlpi existenți dintr-un proiect imobiliar (Brașov). S-a considerat un segment de înăltime de 400 mm, de la baza stâlpului, care a servit în cercetările următoare drept *prototip*. Suplimentar, au fost realizate și *două modele* ale acestuia, la scarile de 1:2, respectiv 1:4, cu dimensiuni sintetizate în **Tabelul 4.1**. Asamblarea tuturor segmentelor s-a realizat prin cordoane de sudură.

Pentru măsurarea temperaturii au fost folosite termorezistențe tip PT100-420 cu terminale lungi (150 mm) având temperatură de lucru cuprins între -70...+500°C. În imediata vecinătate a elementului metalic, pe terminalele PT-urilor, în vederea protejării acestora de temperaturile ridicate, au fost aplicate șiruri de tuburi capilare din sticlă. La fiecare stâlp, au fost practicate găuri filetate pentru montarea acestor senzori de temperatură. Pe prototip, la diferite nivele, au fost montate 15 bucăți de PT-uri, pe modelul redus la scara 1:2 erau 20 de bucăți, iar la stâlpul realizat la scara 1:4, au fost montate 12 PT-uri. Pentru temperaturile monitorizate la diferite nivele, au fost considerate valorile medii ale celor măsurate pe diferitele laturi (evident, la aceleași înăltimi).

**Tabelul 4.1**

Scara	Dimensiuni [mm]	Înăltime [mm]	Placa 1 [mm]	Placa 2 [mm]
1:1	350 x 350 x 16	400	450 x 450 x 10	370 x 370 x 6
1:2	175 x 175 x 8	200	450 x 450 x 5	185 x 185 x 3
1:4	87,5 x 87,5 x 4	100	450 x 450 x (2,5...3)	108 x 108 x (1,5...2)

Aceste teste au fost efectuate cu ajutorul primului stand, destinat încălzirii cu puteri mari ale elementelor structurale. Toate aceste elemente au fost supuse testelor, atât în varianta neacoperită, cât și acoperită cu vopsea intumescentă (pe bază de solventi tip: Interchar 404, de la International Marine & Protective Coatings), având o grosime de 1,2 mm.

Protocolul de încălzire cuprindea următoarele etape:

1. Așezarea respectivului element pe suportul **3**, sub formă de trunchi de piramidă (**Fig.3.1.1**), prin interpunerea unui segment de saltea din fibră ceramică izolatoare termic în zonele de contact dintre element și suport, în vederea asigurării unui contact cât mai bun și fără pierderi termice;
2. Montarea pe elementul testat, la baza acestuia, a unui termocuplu tip **K**, conectat la regulatorul de temperatură ATR-121, care asigura controlul termic al procesului de încălzire;



3. Montarea, pe elementul testat, a tuturor termorezistențelor PT100, având configurația lor de dispunere sintetizată în **Tabelul 4.2.** (înălțimea  $z$  măsurată de la baza stâlpului, de la partea superioară a plăcii 1).
4. Conectarea termorezistențelor la sistemul de achiziție de date;
5. Verificarea funcționării tuturor termorezistențelor;
6. Selectarea temperaturii nominale  $T_{0,n}$  pe regulatorul de temperatură, respectiv a treptei de putere cu ajutorul comutatorului selector cu 10 poziții (poziția 5 din Fig.3.1.3.);
7. Se conectează instalația la sursa de alimentare 380 V, iar cu ajutorul întrerupătorului general 1 din **Figura 3.1.4.** se pornește instalația;

**Tabelul 4.2.**

Prototip Scara 1:1	Scara 1:2	Scara 1:4
<b><math>z(j) [m]</math></b>		
0.02	0.020	0.020
0.11	0.060	0.055
0.20	0.105	0.090
0.29	0.150	
0.38	0.190	

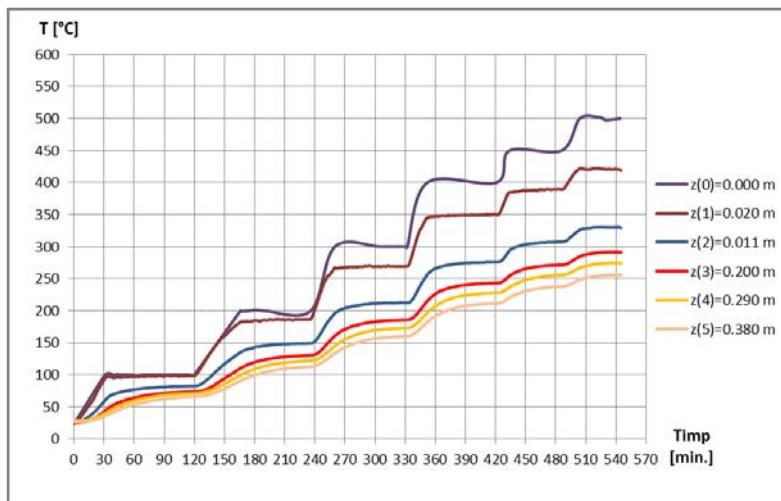
8. Încălzirea, la treapta de temperatură aleasă, s-a continuat până la atingerea unui regim termic stabilizat, specificat în **Capitolul 3.1.:**
9. După atingerea acestui regim termic stabilizat, au fost înregistrate: timpul necesar atingerii acestui proces de stabilizare, precum și energia electrică consumată (citită de pe contorul electric trifazic);
10. Au fost repetate etapele 6-9 pentru toate temperaturile nominale preconizate (100, 200, 300, 400, 450, 500 °C).

Trebuie menționat faptul că, timpii necesari atingerii regimurilor termice stabilizate s-au determinat prin însumarea timpilor necesari atingerii treptelor anterioare. Astfel spre exemplu, timpul necesar stabilizării la 200 °C, a însemnat adunarea la timpul aferent atingerii temperaturii stable de 100 °C, a suplimentului de timp scurs până la atingerea regimului stabil de la 200 °C etc.

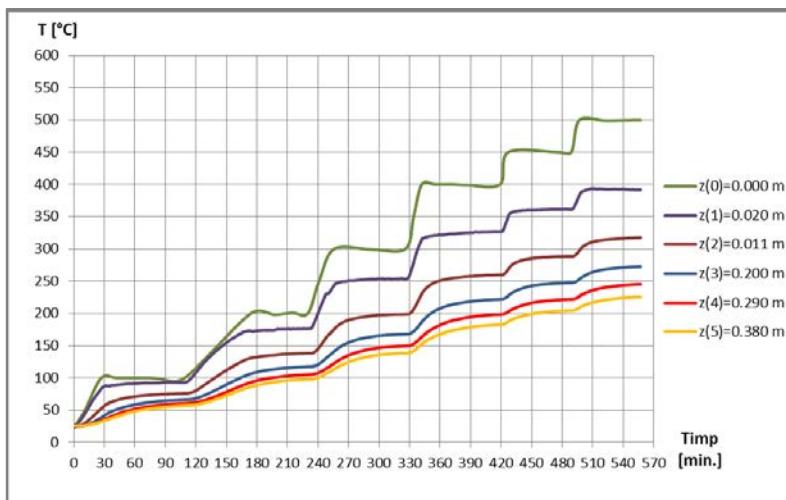
În **figurile 4.1.1. și 4.1.2.** sunt prezentate evoluțiile în timp ale temperaturilor la prototip.

Drept o particularitate a răspunsului elementelor nevopsite, respectiv vopsite la încălzire până la stabilizare, constă în: observarea unor intervale diferite de timp necesare atingerii temperaturii nominale  $T_{0,n}$ ; a formei curbelor dependente de aceste temperaturi nominale, precum și în intervalul de timp scurs până la atingerea regimurilor stabilizate. Acest lucru nu depindea de scara geometrică de realizare a elementului structural, ceea ce se poate observa din compararea atentă a celor șase diagrame. Aceste aluri ale curbelor de temperatură-timp depindeau și de poziția senzorilor de temperatură pe elementul structural. Odată cu apropierea de partea superioară a elementului structural, aceste curbe devin tot mai netede.





**Fig. 4.1.1.** Evoluția în timp a temperaturilor la prototipul nevopsit



**Fig. 4.1.2.** Evoluția în timp a temperaturilor la prototipul vopsit

În **Tabelul 4.3.** este oferită sinteza privind timpii necesari atingerii temperaturilor stabilizate (de 100...500 °C), precum și energiile electrice totale consumate (citite de pe contorul electric).

**Tabelul 4.3.**

Temp. la baza stâlpului [ °C ]	Prototip nevopsit		Prototip vopsit		1:2 nevopsit		1:2 vopsit		1:4 nevopsit		1:4 vopsit	
	Timp [h]	E <sub>tot</sub> [kWh]	Timp [h]	E <sub>tot</sub> [kWh]	Timp [h]	E <sub>tot</sub> [kWh]	Timp [h]	E <sub>tot</sub> [kWh]	Timp [h]	E <sub>tot</sub> [kWh]	Timp [h]	E <sub>tot</sub> [kWh]
100	01:57	2.5	01:49	2.5	01:08	0.9	01:08	1.0	01:05	0.5	01:14	0.6
200	03:53	7.1	03:51	7.4	02:28	2.7	02:27	3.1	01:55	1.6	02:50	2.2
300	05:28	13.6	05:27	13.6	03:31	5.0	03:35	5.9	03:14	3.8	04:17	4.7
400	07:01	23.1	07:00	21.8	04:35	8.3	03:50	9.8	04:13	6.4	05:10	6.9
450	08:05	30.9	08:09	28.4	05:23	11.3	05:37	12.5	05:30	10.1	06:00	9.1
500	09:04	39.4	09:18	35.7	06:16	15.0	06:34	16.0	06:26	13.4	07:01	12.1



În urma analizei și prelucrării datelor măsurătorilor, a devenit posibilă trăsarea curbelor  $T$ - $z$ , reprezentând variația temperaturii de-a lungul elementului structural analizat, corespunzătoare regimurilor stabilizate de temperatură (Fig.4.1.7....4.1.12.).

În toate cazurile se poate constata un gradient puternic al variației temperaturii în apropierea sursei de căldură (în apropierea bazei), care se diminuează odată cu îndepărarea de aceasta. De asemenea, odată cu creșterea temperaturii nominale  $T_{0,n}$  aceste curbe prezintă variații mai puternice, indiferent dacă structura era protejată sau neprotejată termic.

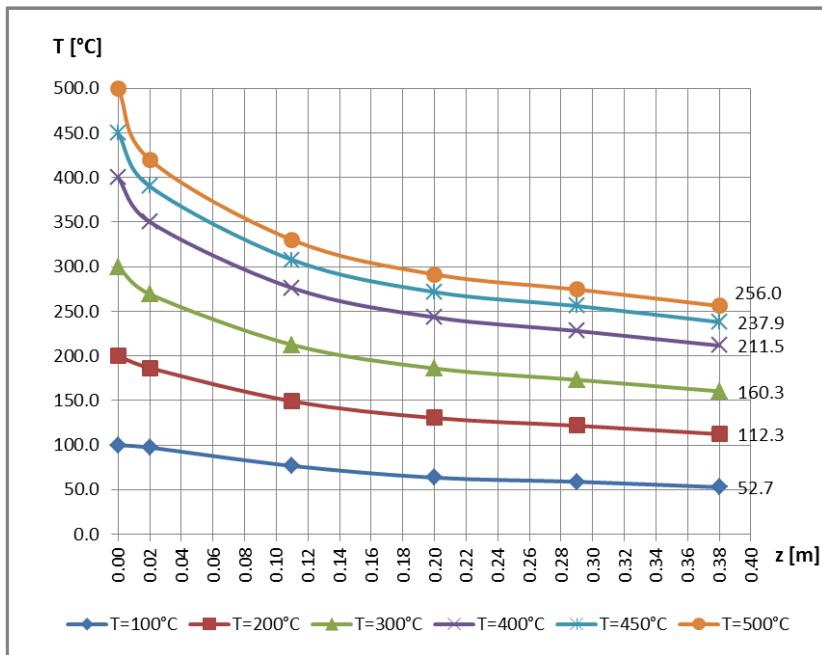


Fig. 4.1.7. Variația temperaturii de-a lungul prototipului nevopsit

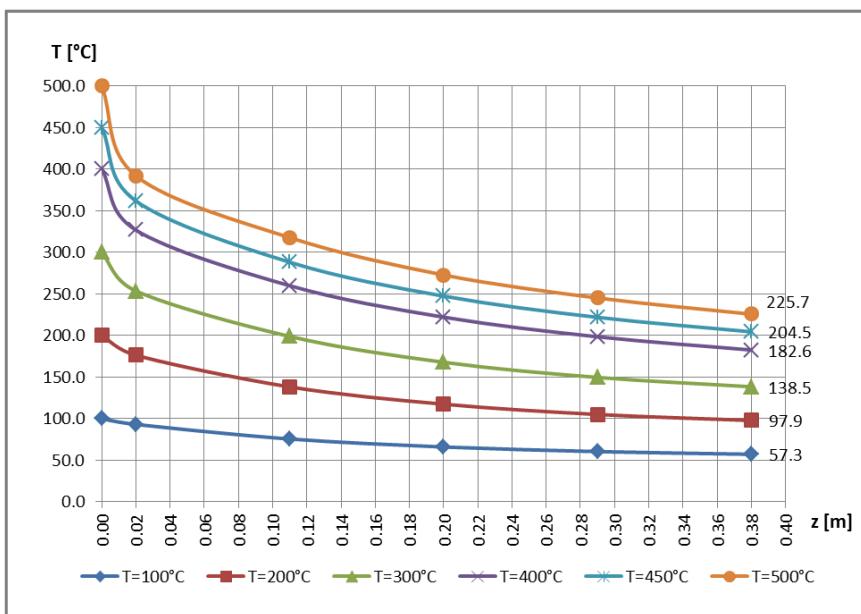


Fig. 4.1.8. Variația temperaturii de-a lungul prototipului vopsit



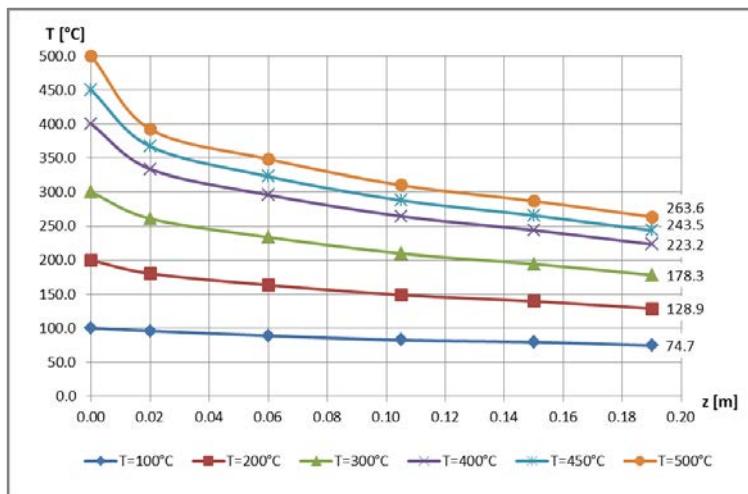


Fig. 4.1.9. Variația temperaturii de-a lungul modelului redus la scara 1:2 nevopsit

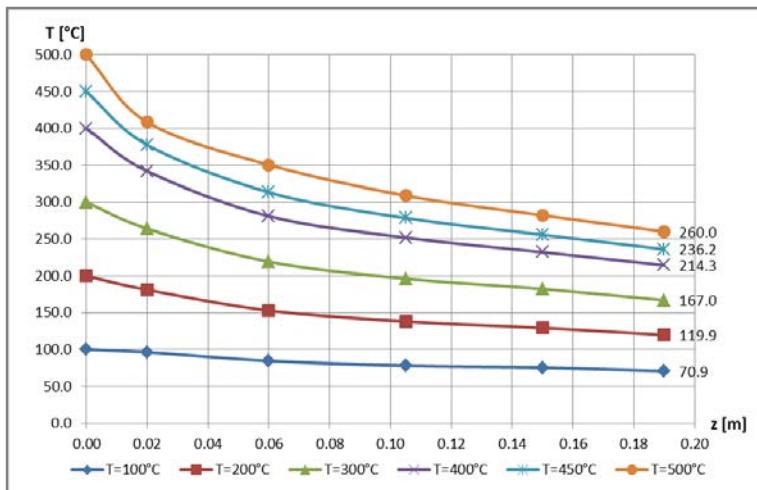


Fig. 4.1.10 . Variația temperaturii de-a lungul modelului redus la scara 1:2 vopsit

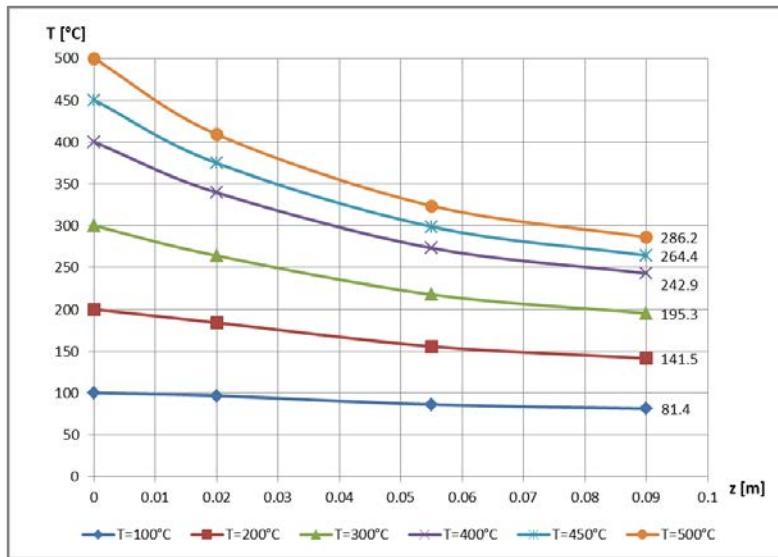


Fig. 4.1.11. Variația temperaturii de-a lungul modelului redus la scara 1:4 nevopsit



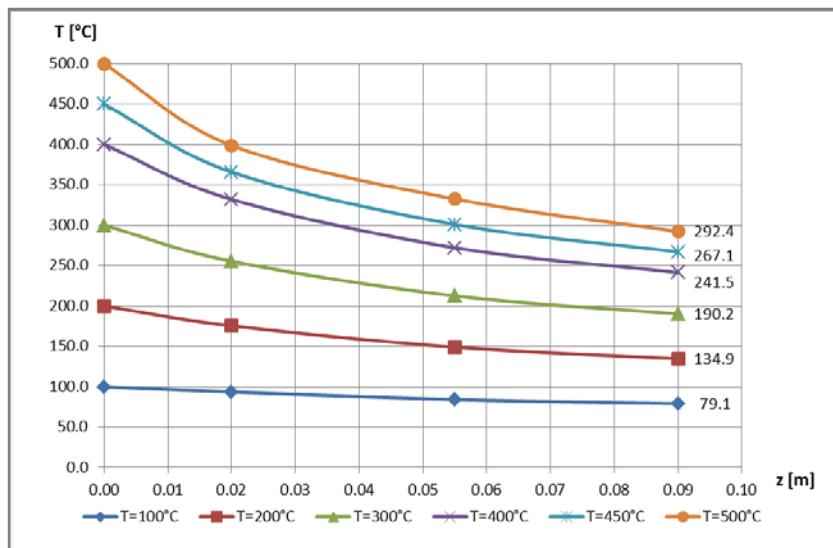


Fig. 4.1.12. Variatia temperaturii de-a lungul modelului redus la scara 1:4 vopsit

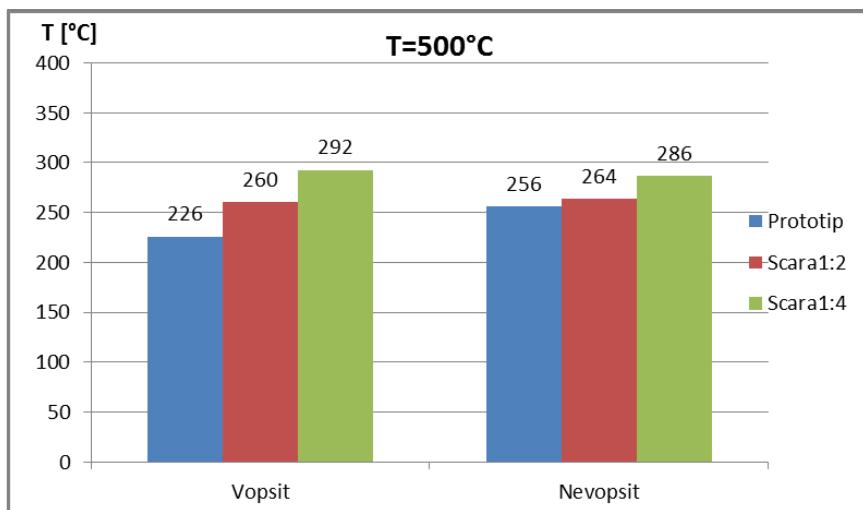


Fig. 4.1.13. Compararea valorilor măsurate, la capătul superior al stâlpilor, în cele două variante (nevopsit și vopsit)

Un alt lucru demn de reținut este faptul că, structurile nevopsite atingeau temperaturi stabilizate mai ridicate decât cele vopsite (Fig.4.1.13.). De obicei, această legitate s-a păstrat, numai în cazul modelului redus la 1:4, la două temperaturi s-au constatat anomalii, explicable mai mult ca sigur prin pierderi de căldură, datorate unor curenți de aer accidentali din incinta, unde au fost efectuate încercările, la care acest model era mult mai sensibil decât celelalte două.

În figurile 4.1.14. a-c sunt oferite fotografii ale modelului redus la scara 1:4, acoperite cu vopsea, la temperaturile de  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$ , precum și măsurarea grosimii maxime a stratului de spumă termoizolantă ( $z(1)=0,020\text{ m}$ ).



Pe baza măsurării pe întreaga suprafață și evaluării statistice a datelor, s-a obținut grosimea medie ponderată a stratului de vopsea de  $1,2\text{ mm}$ ; s-a utilizat un instrument pe bază de ultrasunete (DUALSCOPE MPOR de la Fischer).

În toate cazurile ale aplicării vopselei intumescente, s-a constatat o creștere a grosimii spumei mai mică decât cea preconizată de firmă, deoarece încălzirea s-a produs mult mai lent, decât în cazul unui incendiu real. Tot din același motiv, și procesul de descompunere și de transformare în spumă a vopselei a avut loc la temperaturi puțin mai ridicate ( $250\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ceea ce se poate urmări și în aceste figuri.



**Fig.4.1.14.** Stâlpul redus la scara 1:4 la temperatura de a.)  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; b.)  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
c.) Determinarea grosimii maxime după finalizarea încercării

Făcând o analiză comparativă a grosimilor maxime ale stratului de spumă, s-a putut constata o modificare a grosimii odată cu reducerea dimensiunii modelului. Astfel, la baza elementelor testate această grosime era de aproximativ  $6\text{-}7\text{ mm}$  (modelele scara 1:4 și 1:2), pe când la prototip între  $11\text{-}13\text{ mm}$ .

În toate cazurile, pentru reducerea pierderilor de căldură prin placa de bază a elementului structural testat (care era mai mare decât suprafața bazei elementului structural testat), aceasta a fost acoperită cu un strat de saltea termoizolantă (a se vedea pentru detalii și **Capitolul 5**).



#### 4.2. Rezultate obținute pe elemente structurale reduse la scara 1:10

Cel de al doilea stand, destinat testării structurii 3D, avea elemente de încălzire de numai  $1,2 \text{ kW}$ , iar cantitatea de căldură furnizată de acestea nu asigura decât atingerea unor temperaturi de maximum  $400^\circ\text{C}$  la baza stâlpilor, datorită pierderilor, pe care soluția constructivă nu le putea elimina. În acest sens, un neajuns al acestui tip de încălzire constă în transferul primar al fluxului termic la talpa **1** din **figura 4.2.1.** (un cilindru de oțel cu diametrul de  $105 \text{ mm}$  și înălțimea de  $15 \text{ mm}$ , cu o inertie termică considerabilă față de profilul tubular pătratic, care reprezinta stâlpul testat). Chiar dacă elementul de încălzire putea furniza temperaturi de până la  $600^\circ\text{C}$ , datorită acestui element intermediar, în timp util stâlpul testat ajungea numai la  $400\text{--}450^\circ\text{C}$ .

Din acest motiv, pentru testarea individuală a stâlpului (fie individual, fie prevăzut cu unu până la patru grinzi), s-a utilizat tot standul cu barele de Silită, unde atingerea unor regimuri termice de  $600^\circ\text{C}$  nu ridică probleme, iar pierderile termice puteau fi mult mai ușor controlate.

În **figurile 4.2.1. 4.2.2., 4.2.3 și 4.2.5.** sunt ilustrate etapele încercărilor stâlpului redus la scara 1:10.



**Fig. 4.2.1.** Detaliul tălpiei stâlpului



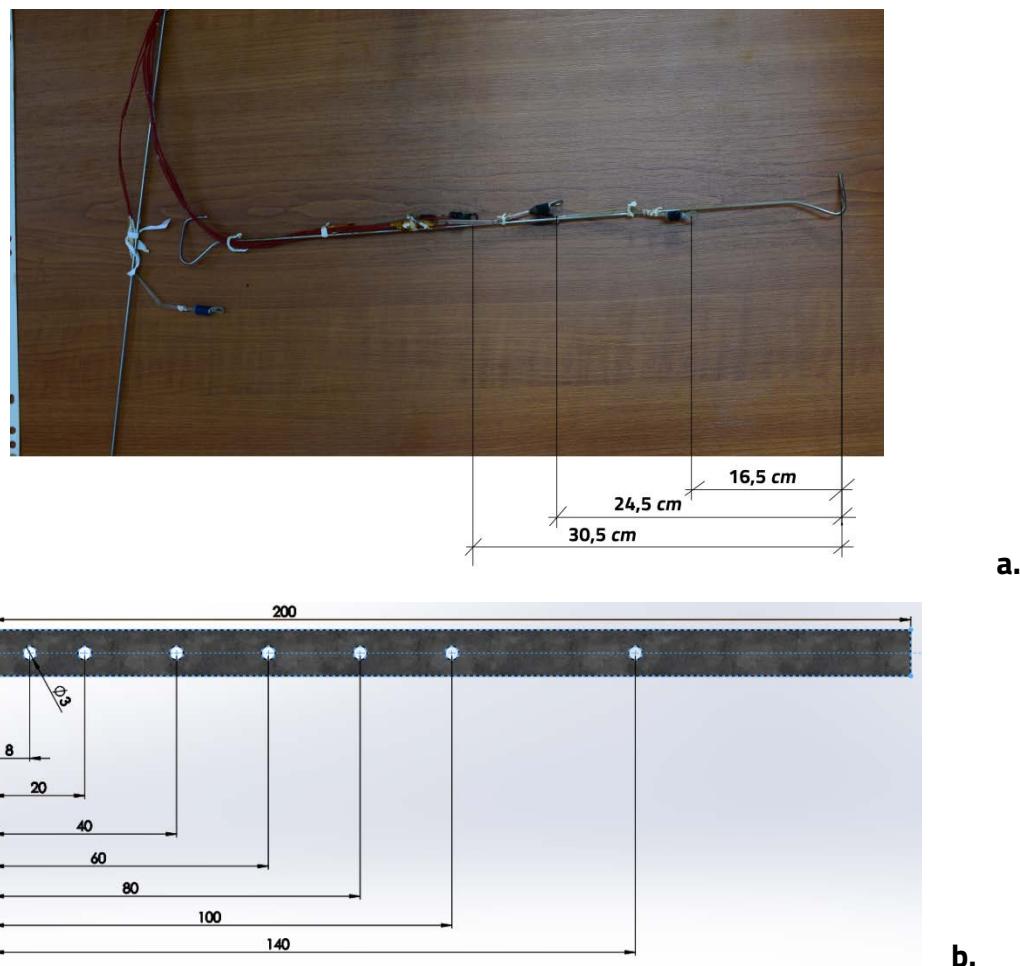
**Fig. 4.2.2.** Standul de putere mare, împreună cu incinta termoprotectoare a stâlpului

Ținând seama de inertie termică mică a stâlpului testat, s-a încercat delimitarea unei zone cilindrice în jurul acestuia, unde regimul termic să nu fie influențat de curentii de aer accidentali din laboratorul, unde au fost efectuate încercările. Dimensiunile acestui cilindru, prin intermediul razei sale, au fost comparabile cu semidistanța dintre stâlpii reali ai construcției, evident redusă la scara 1:10. În consecință, s-a confectionat un cilindru cu un diametru de  $450 \text{ mm}$  și înălțime de  $610 \text{ mm}$  din saltea termoizolantă de  $25 \text{ mm}$  grosime (**Figura 4.2.2.**).



Pentru efectuarea bilanțului termic (ca o ilustrare a metodologiei propuse) era necesară și cunoașterea regimurilor termice din interiorul stâlpului încălzit. În acest sens, pe un suport de sârmă de oțel, au fost fixate trei termorezistențe PT la distanțe bine-definite față de baza stâlpului (la 16,5 cm, 24,5 cm și 30,5 cm) (Fig.4.2.3.a.).

Pentru monitorizarea temperaturii mediului ambiant (de la nivelul părții superioare a cilindrului de pătură termoizolantă) s-a utilizat o altă termorezistență PT, dispusă la o distanță de 6 cm de la partea superioară a stâlpului.



**Fig. 4.2.3.**Cazuri speciale de dispunere a PT-urilor: **a.)** monitorizarea temperaturii aerului;  
**b.)** monitorizarea temperaturii grinzi

Grinziile au fost confectionate din oțel plat cu dimensiuni de 10 x 1,5 mm și lungime de 200 mm, iar stâlpul a avut dimensiuni de 30 x 30 x 1,5 mm și cu o înălțime de 500 mm. În figura 4.2.3.b. este prezentată așezarea găurilor la grinzi, unde au fost ulterior fixate PT-urile.

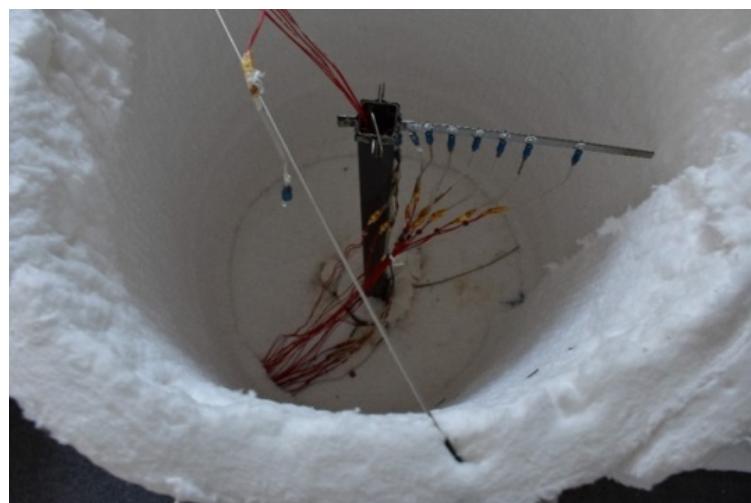
La baza stâlpului, în zona de joncțiune cu discul de oțel (talpa), la nivelul respectivului cordon de sudură a fost montat un termocuplu tip K, pentru a controla temperatura nominală preconizată. Pe lungimea stâlpilor au fost fixate câte 9 PT-uri, în următoarea ordine:  $z(1)= 0,015 \text{ m}$ ,  $z(2)= 0,030 \text{ m}$ ,  $z(3)= 0,045 \text{ m}$ ,



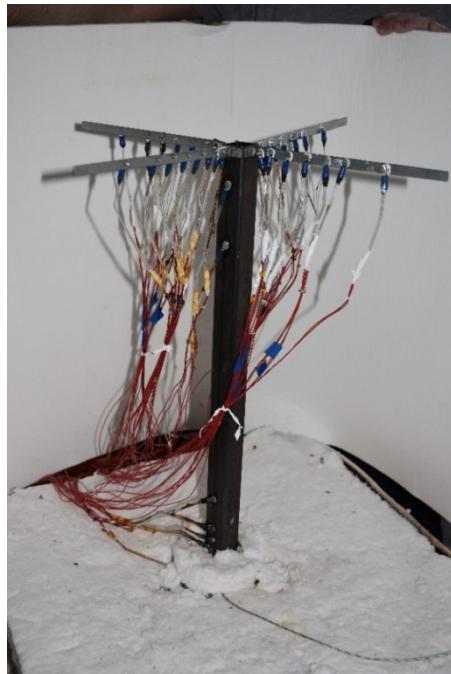
$z(4)=0,060\ m$ ,  $z(5)=0,100\ m$ ,  $z(6)=0,200\ m$ ,  $z(7)=0,400\ m$ ,  $z(8)=0,460\ m$ , respectiv la capătul superior al stâlpului la distanța  $z(9)=0,495\ m$ .

De asemenea, pentru a putea fixa acest stâlp (împreună cu suportul lui cilindric) pe zona de așezare a suportului, sub formă de trunchi de piramidă, al standului, s-a prevăzut un suport intermediar (o placă de inox cu dimensiunile  $450 \times 450 \times 3\ mm$ ), pe care stâlpul putea fi așezat în condiții bune. Între suportul cilindric al stâlpului și placa intermediară s-a aplicat un strat de pastă termoconductoare, identică cu aceea utilizată la fixarea PT-urilor pe structură, iar placa de inox a fost și în acest caz acoperită cu o saltea termoizolantă de  $25\ mm$  grosime.

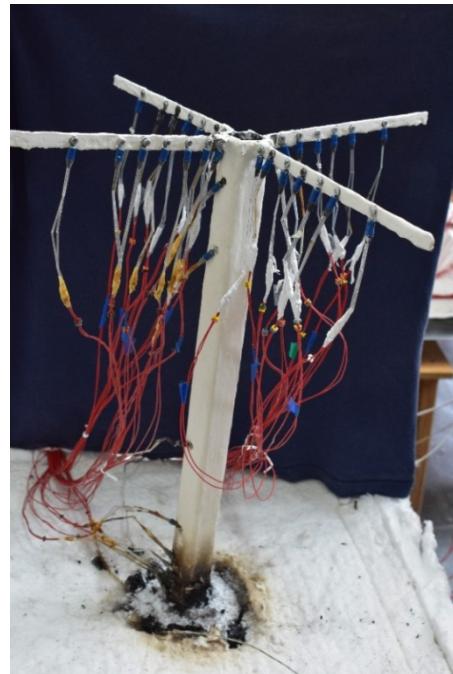
Din figurile următoare se poate observa izolarea termică atentă a elementului testat cu saltea termoizolantă.



a.



b.



c.

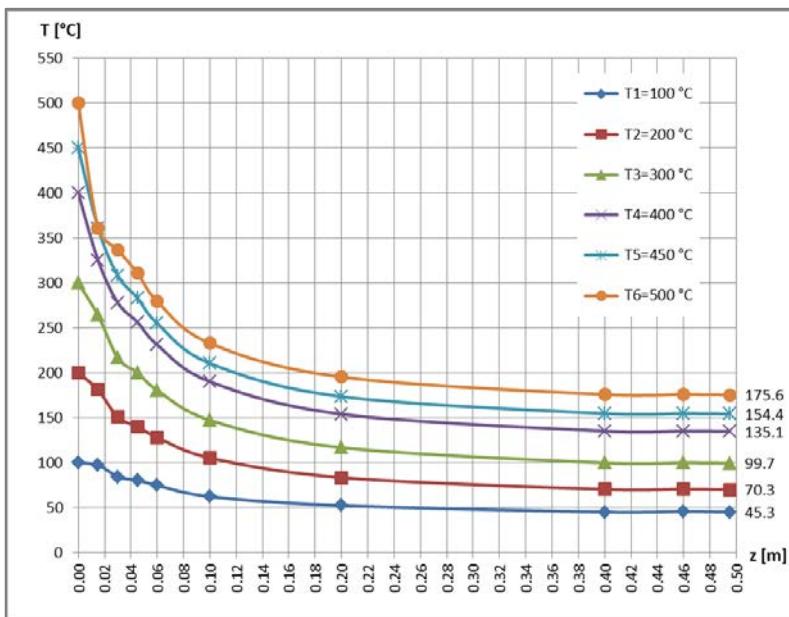
**Fig. 4.2.5.** Testarea stâlpului: a.) cu o singură grindă și cu PT-urile pentru monitorizarea temperaturii aerului; cu patru grinzi în: b.) varianta nevopsită; c.) varianta vopsită, după finalizarea încercărilor



Prima dată s-a efectuat un set de încercări la care acest cilindru de termoprotecție era obturat la capătul superior, în vederea creării unui spațiu închis din punct de vedere termic. În **figura 4.2.6.** sunt centralizate rezultatele acestui tip de măsurători. Din păcate, s-a constat o uniformizare accentuată a temperaturilor părții superioare cu aceea a mediului ambiant. Astfel, pentru regimul termic cu  $T_{0,n}=500^{\circ}\text{C}$ , după stabilizare, au fost obținute temperaturile redate în **Tabelul 4.4.**

**Tabelul 4.4.**

Cazul	T7=500°C			
	$z(7)=0.400\text{ m}$	$z(8)=0.460\text{ m}$	$z(9)=0.495\text{ m}$	Tamb. [ °C ]
Varianta deschisă	49.8	46.9	44.6	40.5
Varianta închisă	176.0	176.0	175.6	177.1



**Fig. 4.2.6.** Variația temperaturii de-a lungul stâlpului cu cilindrul închis

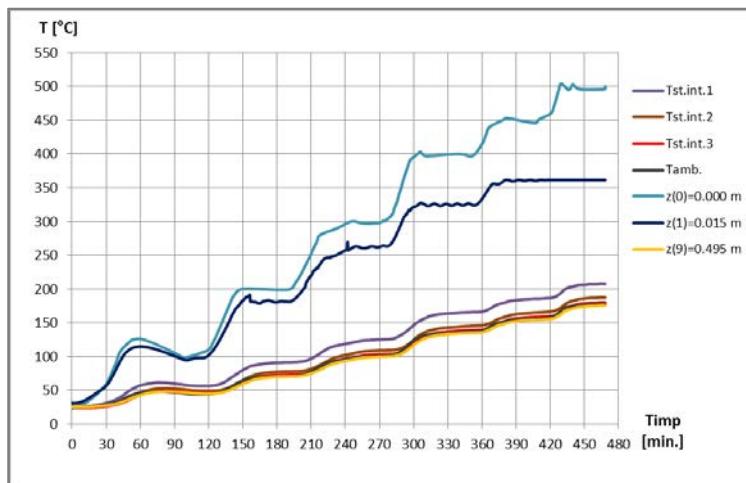
Drept rezultat al acestei uniformizări, practic pe ultimii 100 mm de la partea superioară a stâlpului, s-au obținut temperaturi identice și egale cu aceea a mediului ambiant din cilindrul închis.

În **figura 4.2.7.** sunt oferite evoluțiile în timp ale temperaturilor: aerului din interiorul stâlpului; ale mediului ambiant de la nivelul părții superioare a cilindrului acoperit; temperatura nominală  $T_{0,n} = z(0)$ ,  $z(1)$  și  $z(9)$ . Se poate observa și în această figură acest proces de omogenizare a temperaturilor.

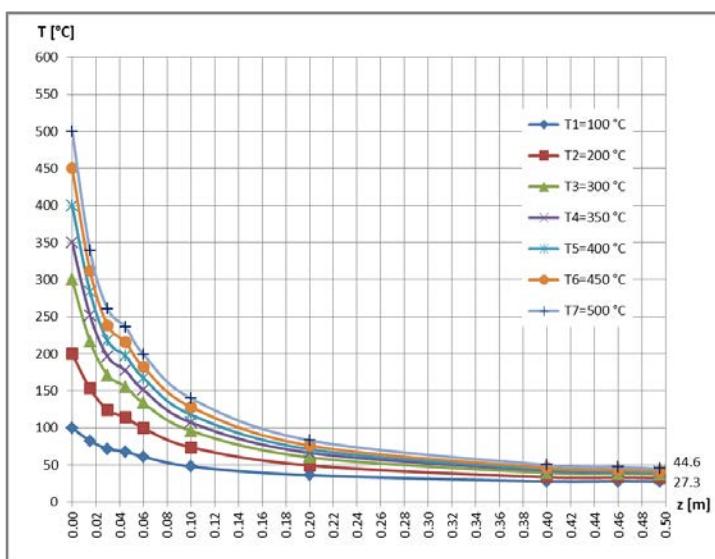
În vederea evitării acestei omogenizări a temperaturilor, s-a optat pentru cilindrul protector neacoperit.

Rezultatele măsurătorilor similiare, cu cilindrul protector neacoperit, sunt cuprinse în **figurile 4.2.8.-4.2.9.**, iar sinteza acestor comparații se regăsește în **tabelul 4.4.**

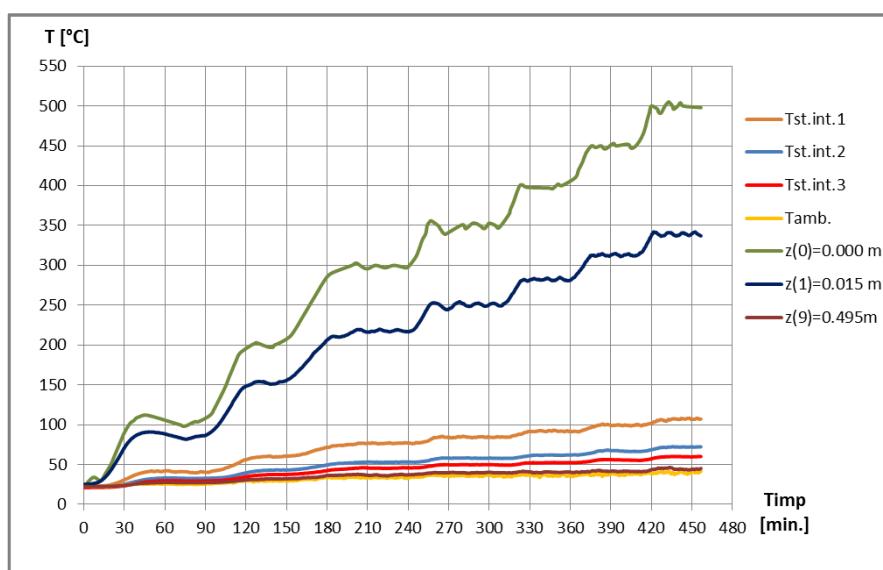




**Fig. 4.2.7.** Evoluțiile în timp ale temperaturilor aerului din interiorul stâlpului, când cilindrul a fost închis



**Fig. 4.2.8.** Variația temperaturii de-a lungul stâlpului, cu cilindrul deschis la capătul superior

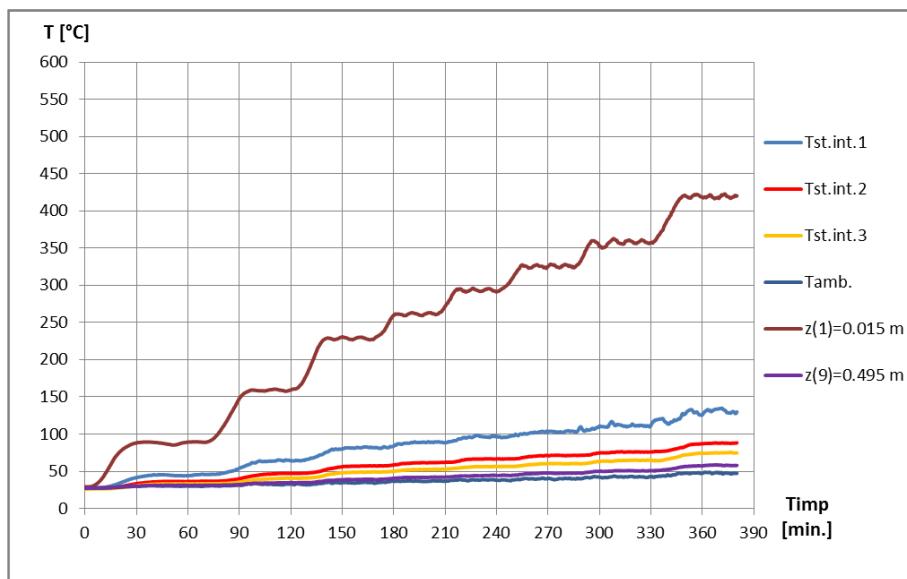


**Fig. 4.2.9.** Evoluțiile în timp ale temperaturilor aerului din interiorul stâlpului, când cilindrul protector a fost deschis la capătul superior



Cele mai semnificative rezultate au fost obținute pe stâlpul prevăzută cu 4 grinzi, în varianta nevopsită, respectiv vopsită. În **figura 4.2.12.** este oferită evoluția în timp a regimurilor termice, modificările temperaturilor mediului ambient, respectiv din interiorul stâlpului, pentru cazul elementelor neacoperite cu vopsea termoprotectoare.

Restul cazurilor, din motive de spațiu limitat, se regăsesc în lucrarea in extenso.



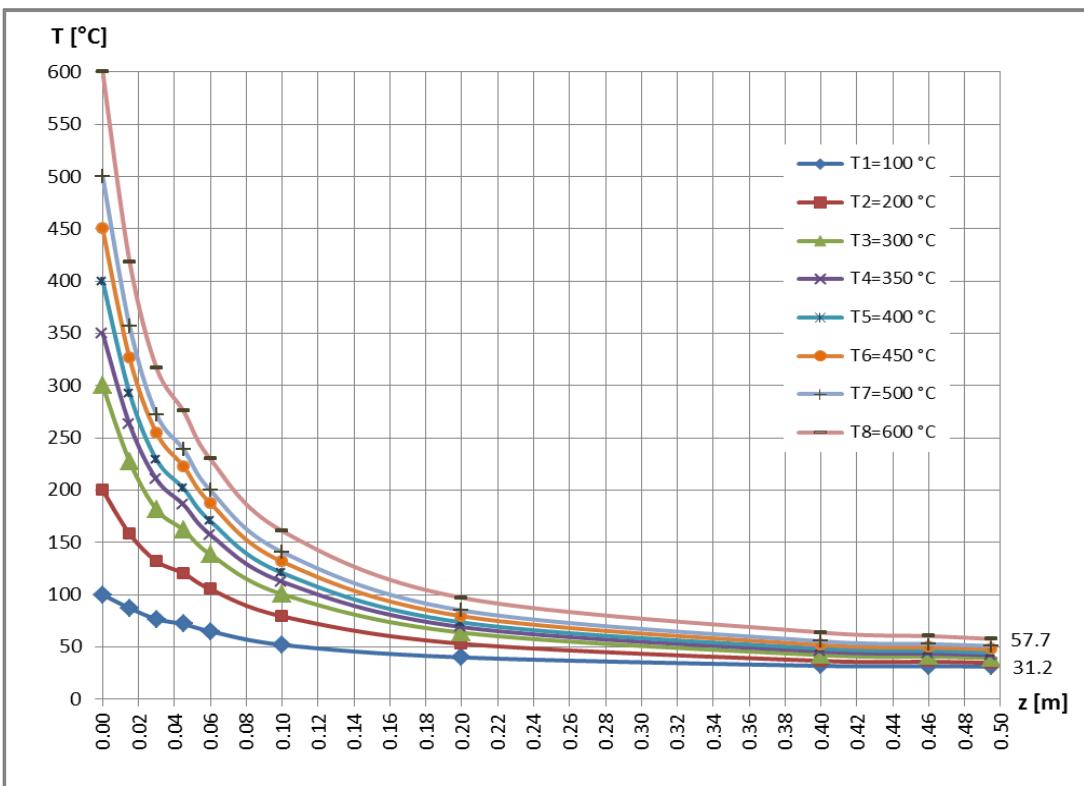
**Fig.4.2.12.** Evoluțiile în timp ale temperaturilor aerului din interiorul stâlpului nevopsit, prevăzut cu patru grinzi, precum și ale temperaturilor la cele două capete ale stâlpului

În **figurile 4.2.14. și 4.2.17.** sunt centralizate variațiile câmpurilor termice de-a lungul stâlpului, în varianta nevopsită, respectiv cea acoperită cu vopsea.

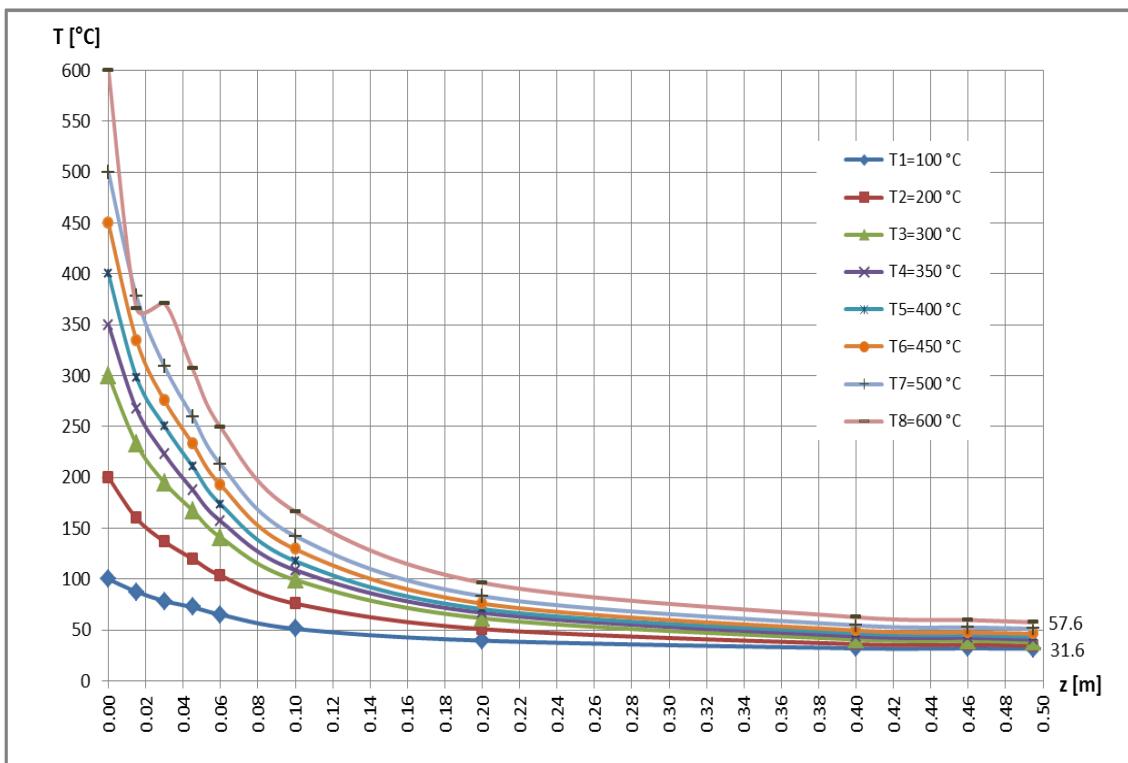
În urma analizei atente a acestor curbe, precum și pe baza experienței anterioare, devine eficientă împărțirea acestora pe trei intervale  $z_I \in [0 \div 0,03] \text{ m}$ ;  $z_{II} \in [0,03 \div 0,06] \text{ m}$ ;  $z_{III} \in [0,06 \div 0,50] \text{ m}$ , deoarece astfel devine posibilă aproximarea acestor curbe prin funcții polinomiale cu grad relativ mic. În **figurile 4.2.16.a, b, c.** respectiv **4.2.17.a, b, c.** sunt redate aceste noi intervale. Ultimale două **figuri 4.2.16.c. și 4.2.17.c.,** la prima vedere, par să prezinte gradienți puternici de variație a temperaturilor, însă dacă se urmărește atent scara  $z(m)$ , se constată că de fapt aceste lungimi sunt mult mai mari, decât la primele două seturi de diagrame (**figurile 4.2.16.a-b., 4.2.17.a-b.**), rezultând astfel modificări foarte line ale temperaturilor pe porțiunea  $z_{III} \in [0,06 \div 0,50] \text{ m}$ .

În **figurile 4.2.15. și 4.2.17.a.** se pot constata anomaliiile unei termorezistențe, care la temperaturi de peste  $300^\circ\text{C}$  nu indică în mod corect valorile temperaturii, însă încercarea nu se putea opri și nici relua pentru o singură termorezistență.

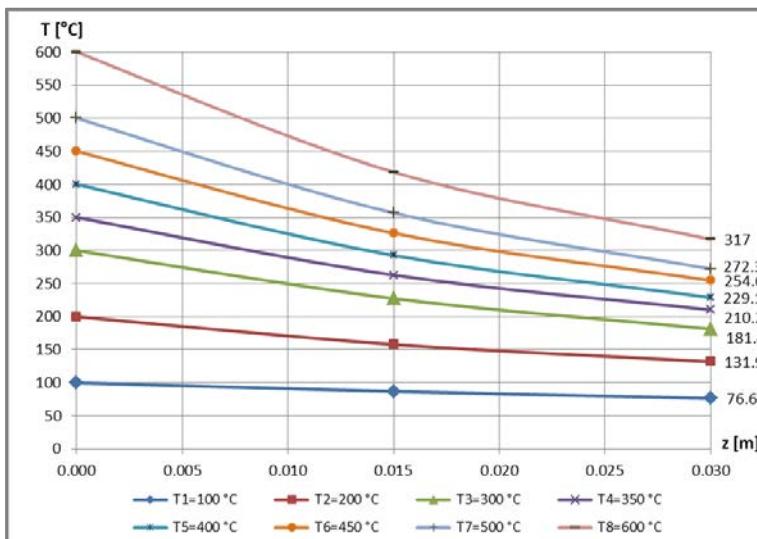




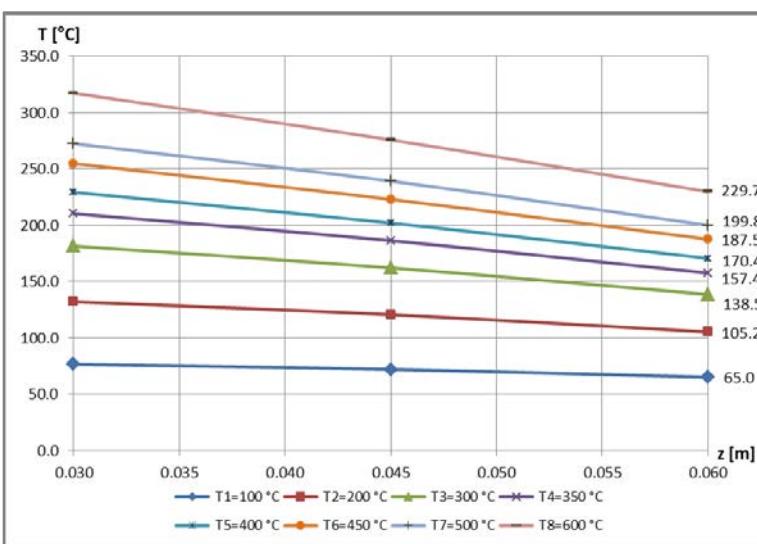
**Fig. 4.2.14.** Variatia temperaturii de-a lungul stâlpului nevopsit, prevazut cu patru grinzi



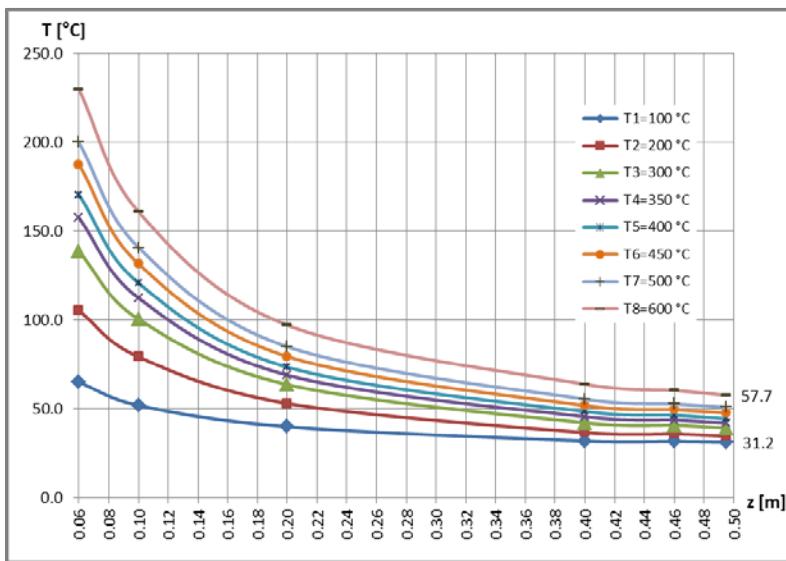
**Fig. 4.2.15.** Variatia temperaturii de-a lungul stâlpului vopsit, prevazut cu patru grinzi



a.



b.

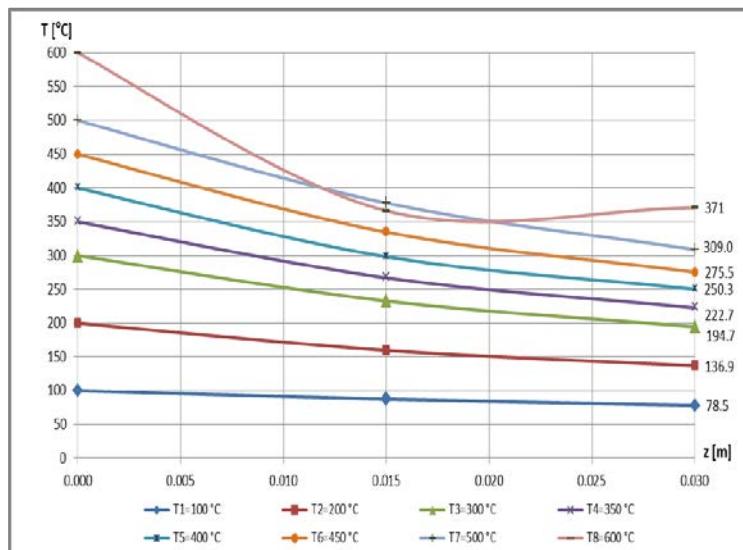


c.

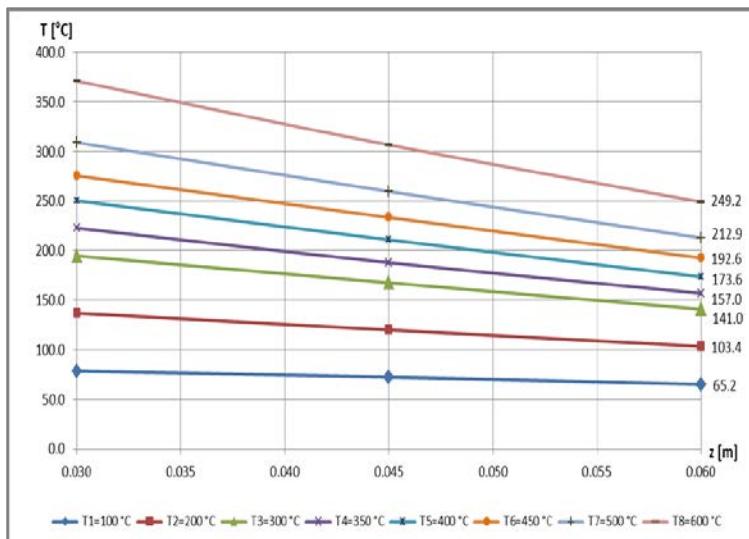
**Fig. 4.2.16.** Variatia temperaturii de-a lungul intervalelor stâlpului nevopsit după

**Fig.4.2.14.: a.)**  $Z_I$ ; **b.)**  $Z_{II}$ ; **c.)**  $Z_{III}$ .

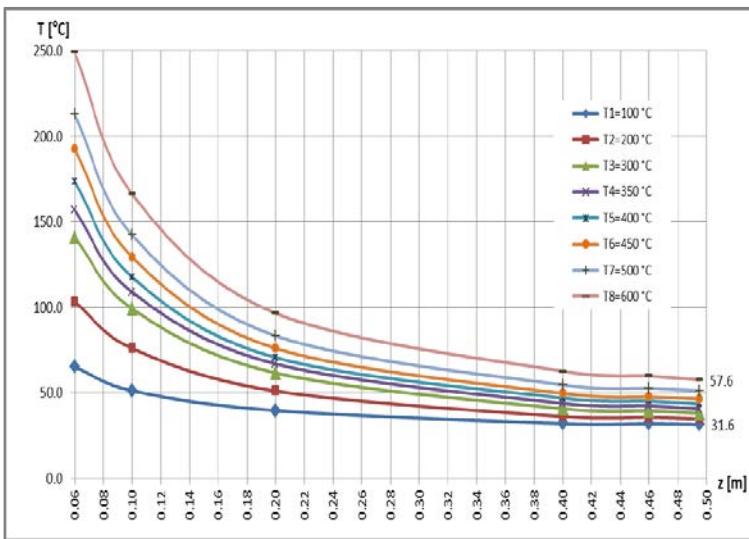




a.



b.



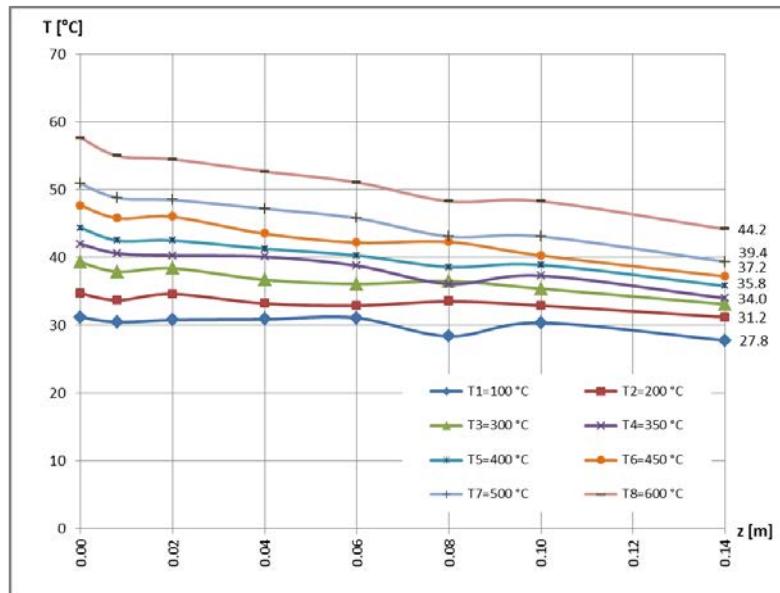
c.

**Fig. 4.2.17.** Variația temperaturii de-a lungul intervalelor stâlpului vopsit după

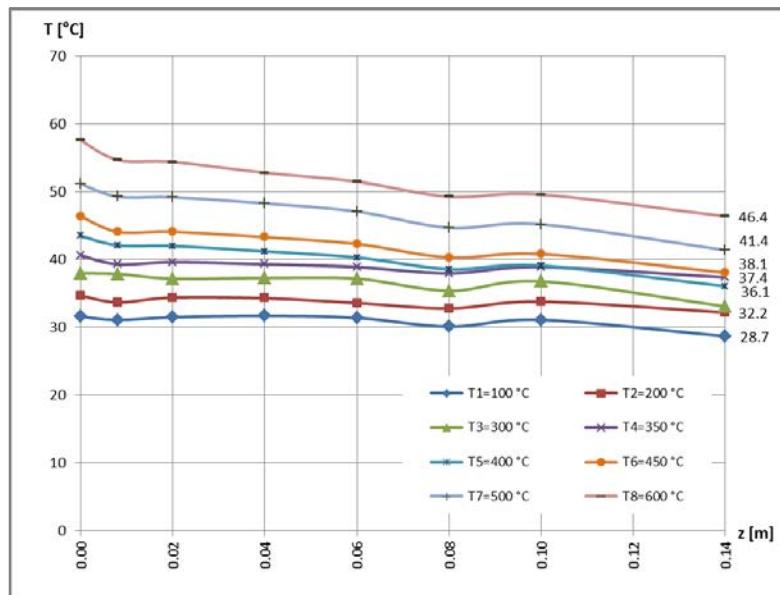
**Fig.4.2.15.: a.)**  $z_I$ ; **b.)**  $z_{II}$ ; **c.)**  $z_{III}$ .



Evoluții similare în timp, însă cu variații mai puțin accentuate au fost observate și la grinzi (a se vedea lucrarea în extenso). Drept ilustrare a răspunsului termic al grinzelor solidarizate de stâlp, în **figurile 4.2.20.-4.2.21.** sunt redate variațiile temperaturii în funcție de coordonata senzorului de temperatură la grinda numărul 4, în cele două variante (nevopsită, respectiv vopsită).



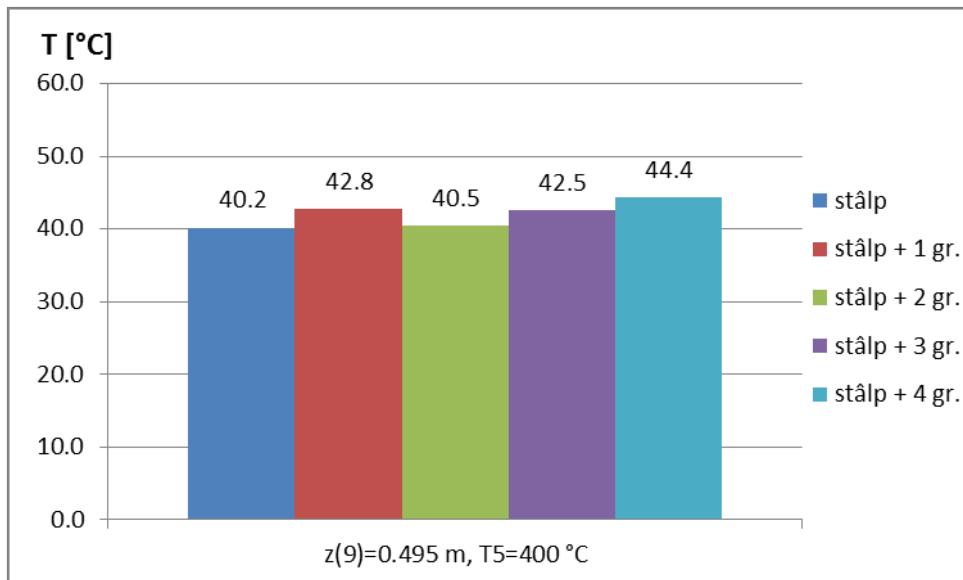
**Fig. 4.2.20.** Variația temperaturii de-a lungul grinzi nevopsite nr.4



**Fig. 4.2.21.** Variația temperaturii de-a lungul grinzi vopsite nr.4

Trebuie subliniat faptul că, aceste patru grinzi au prezentat comportamente practic identice, motiv pentru care, s-a prezentat cazul unei singure grinzi. În ceea ce privește răspunsul termic al celor cinci variante constructive (stâlp singular, stâlp prevăzut cu una până la patru grinzi), s-au putut constata diferențe minore.





**Fig.4.2.22.** Temperaturile la nivelul capătului superior al grinziîn cele cinci cazuri la  $T_{0,n}=400 \text{ }^{\circ}\text{C}$

În **figura 4.2.22.** sunt sintetizate aceste diferențe la nivelul ultimelor termorezistențe  $z(9)$ , situate aproape de capătul superior al stâlpilor, la o temperatură nominală  $T_{0,n}=400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.3. Rezultate obținute pe structura redusă la scara 1:10

Testele privind comportamentul structurii 3D la incendii (simularea unui foc) au fost efectuate pe cel de-al doilea stand (**Fig.4.3.1-4.3.2.**). După cum s-a arătat, pe un cadru metalic solid sunt fixate cele nouă suporturi, pe care se fixează stâlpii structurii. În **Fig.4.3.1.** este prezentată schița acestuia cu dimensiunile aferente; secțiunile transversale ale stâlpilor au fost identice cu cele din cazul anterior prezentat ( $30 \times 30 \times 1,5 \text{ mm}$ ), iar grinziile au fost confectionate din oțel plat cu dimensiuni de  $10 \times 1,5 \text{ mm}$ . În toate cazurile analizate au fost păstrate aceleasi valori ale factorului de secțiune (raportul dintre perimetru și aria secțiunii transversale) cu cele de la structura reală, de la care s-a pornit.

Pentru patru stâlpi, aferenți primului compartiment, au fost interpusă între suport și stâlp câte o rezistență electrică specială de  $1,2 \text{ kW}$  (**Fig.3.2.2.**). Între suport și rezistență electrică s-a interpus un strat de termoizolare, iar peste acest strat termoizolator a fost așezat câte un termocuplu (care astfel era în contact direct cu rezistența electrică specială, asigurându-se controlul termic al rezistenței). În vederea asigurării unui contact termic cât mai bun, între rezistență electrică și stâlp (mai bine zis, talpa acestuia) s-a aplicat un strat de pastă termoconductoare. După montarea tuturor termorezistențelor (pe elementele structurale, în cele patru compartimente, pentru monitorizarea temperaturii mediului ambient), peste întreaga structură 3D s-a montat un strat termoizolator de  $25 \text{ mm}$  de saltea din fibră ceramică (**Fig.4.3.3.**).

La cei patru stâlpi încălziti au fost montate câte opt PT-uri, una la baza și șapte de-a lungul stâlpului. Grinziile erau prevăzute cu șapte sau opt PT-uri, în funcție de lungimea lor.



În total pe structură erau montate 96 de PT-uri, iar în interiorul compartimentelor au fost montate alte patru PT-uri pentru măsurarea temperaturii ambiante din acestea.

Testele au fost efectuate în cele două variante, neacoperite și acoperite cu vopsea (Figurile 4.3.2 și 4.3.4-4.3.5.), fiind simulate focare de incendii la câte un stâlp, respectiv la toți stâlpii deodată.

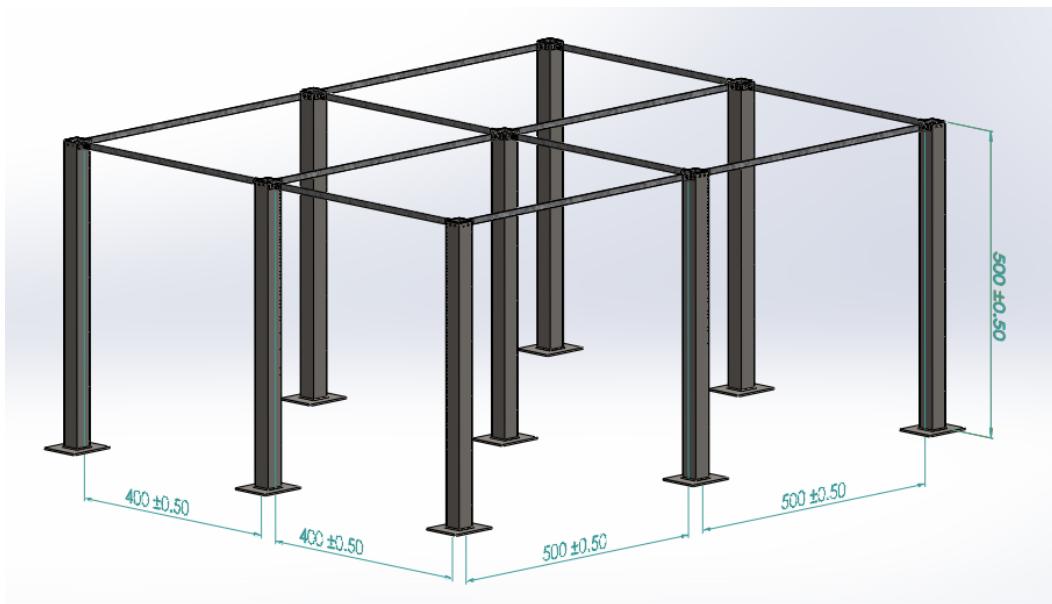


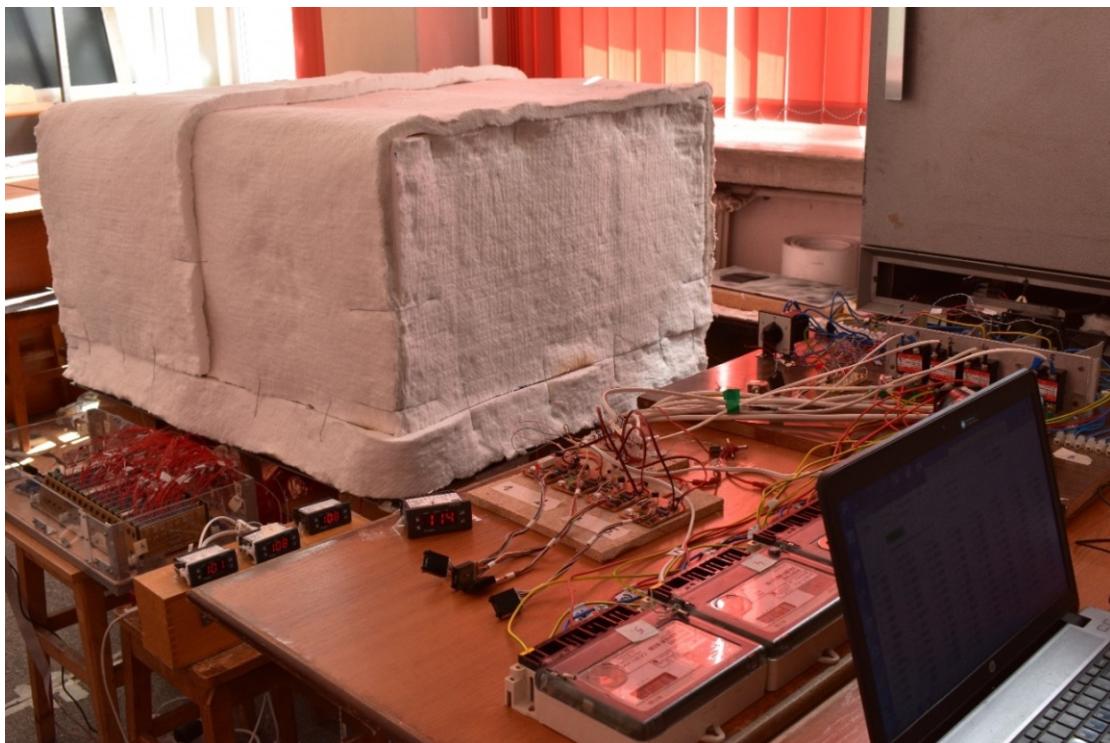
Fig.4.3.1.Schiță structurii 3D în Solid Works 2017

În figura 4.3.2. se poate urmări modul în care, în cele patru compartimente, au fost dispuse termorezistențele, ale căror cabluri de conexiune au fost coborâte sub pătură termoizolantă.

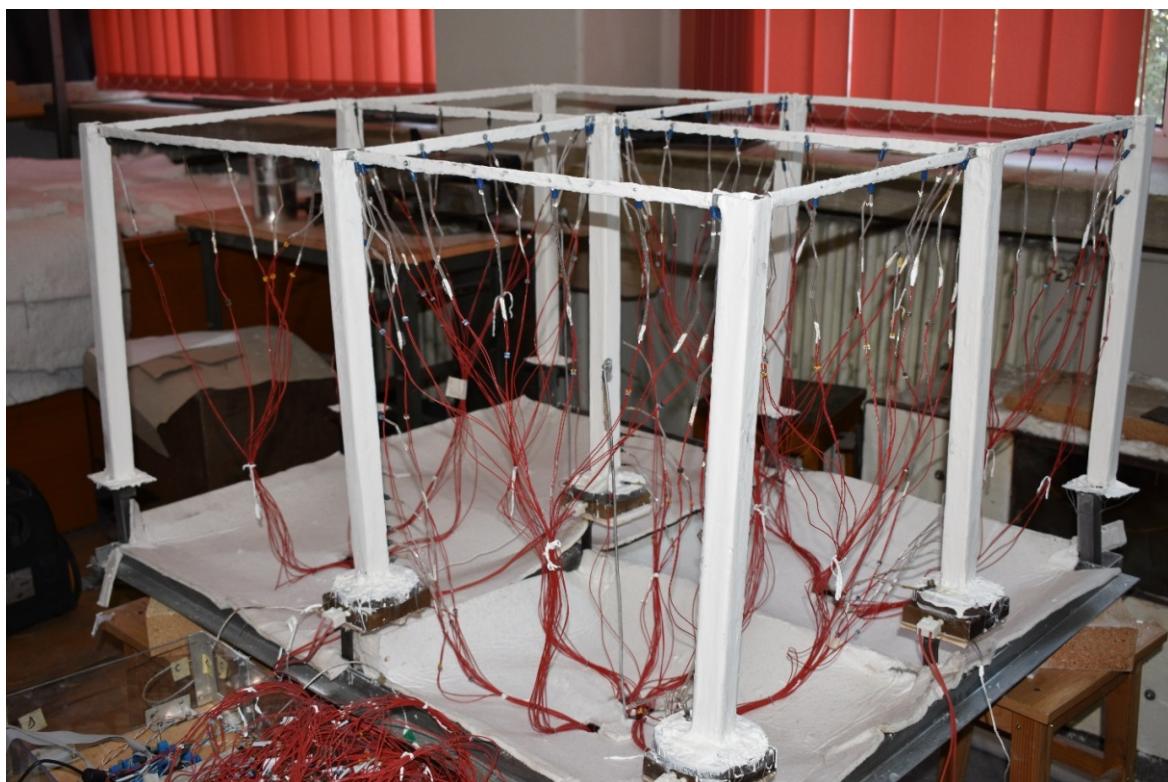


Fig. 4.3.2. Compartimentarea structurii spațiale



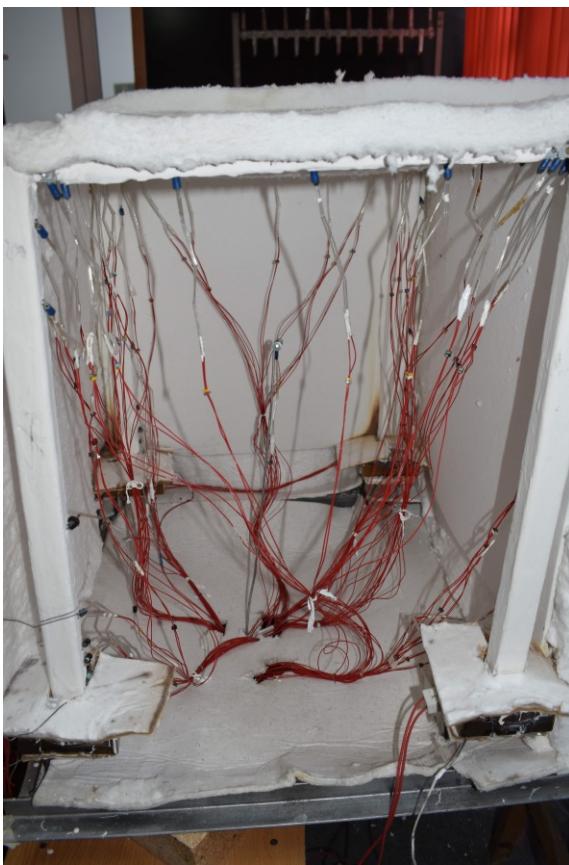


**Fig. 4.3.3.** Vedere generală, cu structura acoperită cu saltea din fibră ceramică termoizolantă

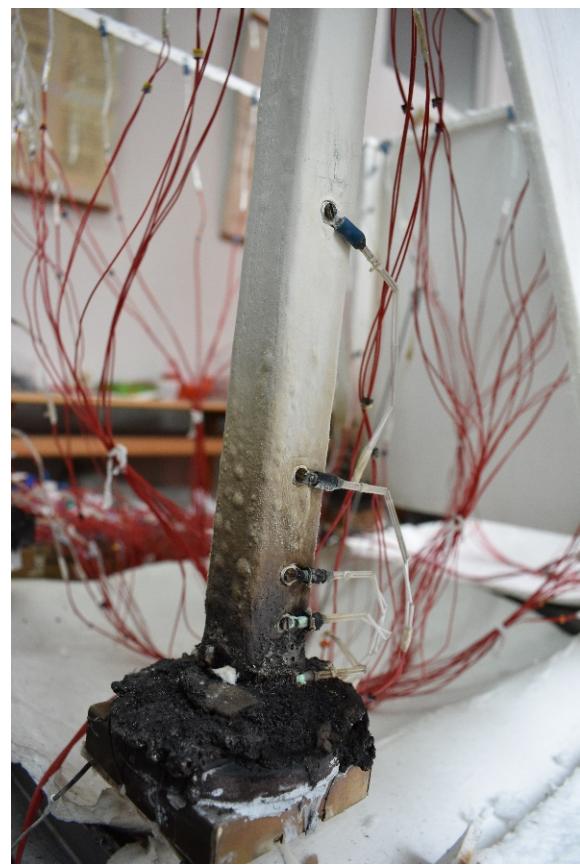


**Fig. 4.3.4.** Structura protejată cu vopsea termoizolantă





**Fig. 4.3.5.** Interiorul compartimentului 1, înainte de acoperire



**Fig. 4.3.6.** Vederea stâlpului 2, după finalizarea experimentului

Din **figura 4.3.6.** se poate observa mecanismul de formare al spumei termoizolante, cu o intensitate mai mare la nivelul tălpiei, însă, cu modificări minimale de la cota de 60 mm.

În cele ce urmează, sunt prezentate câteva din rezultatele măsurătorilor, privind ultimul caz al încălzirii tuturor celor patru stâlpi, restul graficelor se găsește în lucrarea propriu-zisă.

Se menționează faptul că, stâlpii **1, 2, 4 și 5** au aparținut compartimentului încălzit, adică au fost stâlpii încălziți, pe când stâlpi **3 și 6** aparțineau unor compartimente neîncălzite (a se vedea amplasarea acestora în **figura 4.3.30.**).

În varianta protejată termic cu vopsea s-a observat faptul că, stâlpii din compartimentul încălzit prezintau regimuri termice foarte apropiate cu cele ale mediului ambiant, nedepășindu-l pe acesta din urmă. Stâlpii **3 și 6** au prezentat întotdeauna valori termice sub cele ale mediului ambiant din compartimentul **2**.

**Figurile 4.3.13. și 4.3.14.** oferă legile de variație ale temperaturii pentru stâlpul cu nr. **5** în cele două variante. Mici abateri (oscilații) s-au putut constata la unele din termorezistențe, însă nesemnificative pentru fenomenul de ansamblu.



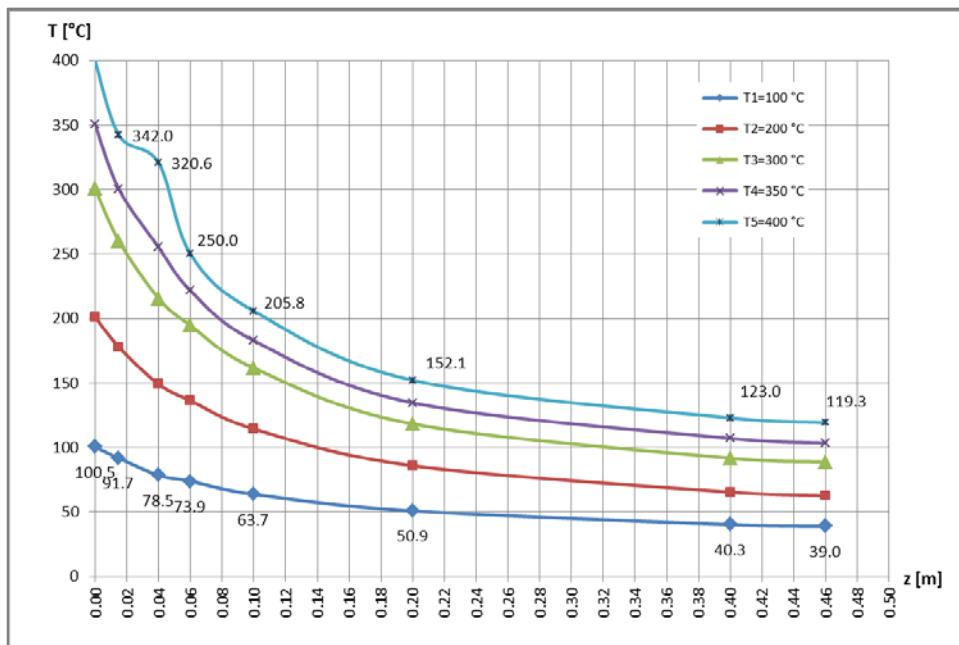


Fig. 4.3.13. Variația câmpului termic la stâlpul 5 în varianta nevopsită

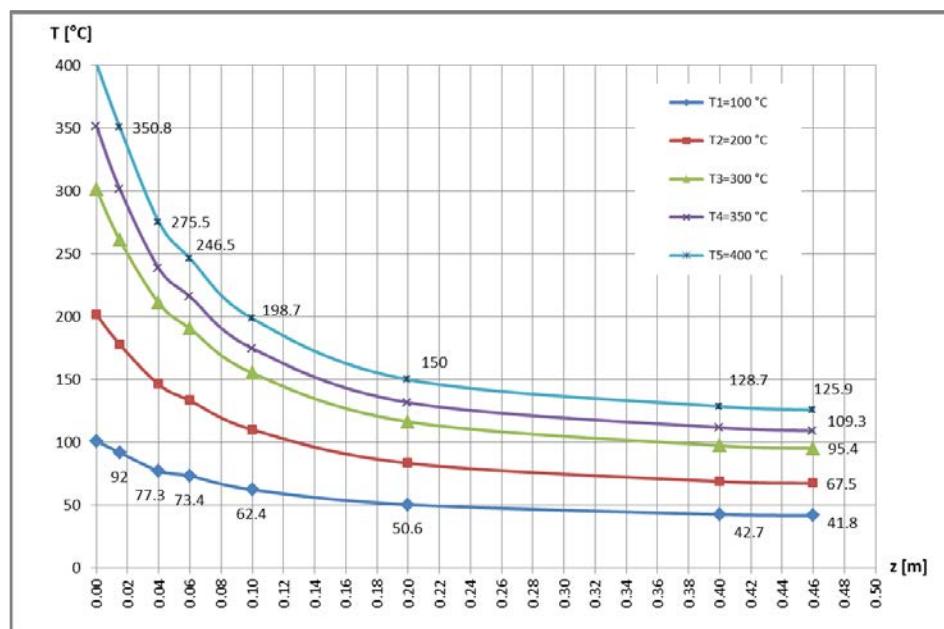
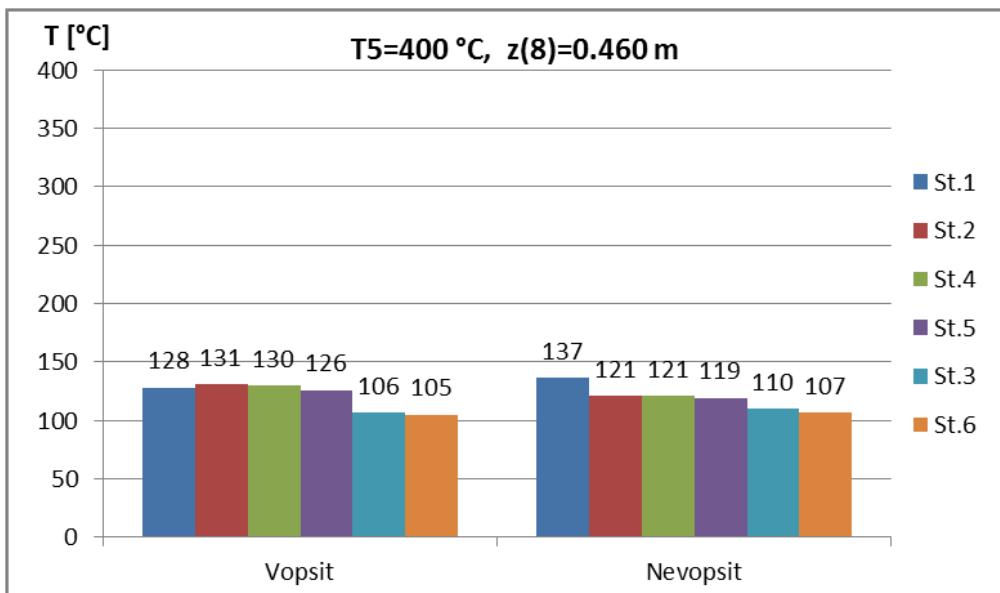


Fig. 4.3.14. Variația câmpului termic la stâlpul 5 în varianta vopsită

În figura 4.3.15. este prezentată o evaluare comparativă a temperaturilor atinse la nivelul ultimului punct de monitorizare de la cei şase stâlpi în cele două variante, corespunzătoare temperaturii nominale  $T_{0,n}=400$  °C. Cu excepția stâlpului nr. 1, restul stâlpilor încălziti prezintau regimuri termice mai reduse în varianta nevopsită.

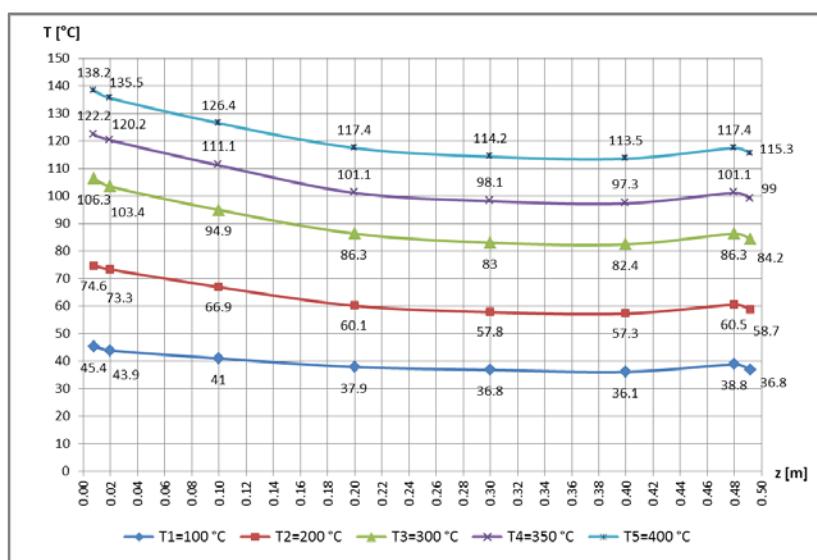




**Fig. 4.3.15.** Rezultatele comparative ale temperaturilor de la nivelul ultimului punct de monitorizare la cei șase stâlpi

Pentru elementele transversale (grinzi), evoluțiile în timp ale propagării câmpurilor termice sunt ilustrate prin intermediul grinzi nr. 1-4, în ambele variante (neprotejată și protejată cu vopsea). Grinda 1-4, făcea legătura între doi stâlpi încălziti ai compartimentului nr. 1.  $T_{amb1}$  reprezintă temperatura mediului ambiant din compartimentul 1. În versiunea nevopsită regimurile termice erau mai disperse, decât în versiunea protejată termic cu vopsea.

Chiar dacă toate cele patru elemente electrice de rezistență oferă cantități practic identice de energie electrică, totuși datorită disponerii favorabile a stâlpului 1, în ceea ce privește pătura termoizolatoare, acesta prezinta temperaturi mai ridicate la partea superioară față de restul stâlpilor. La nivelul stâlpului 1-4 ultimul PT la temperaturi ridicate indică valori puțin mai mici decât restul, după cum se poate observa și din **figurile 4.3.18. și 4.3.19.**



**Fig. 4.3.18.** Variația temperaturii de-a lungul grinzi nevopsite 1-4

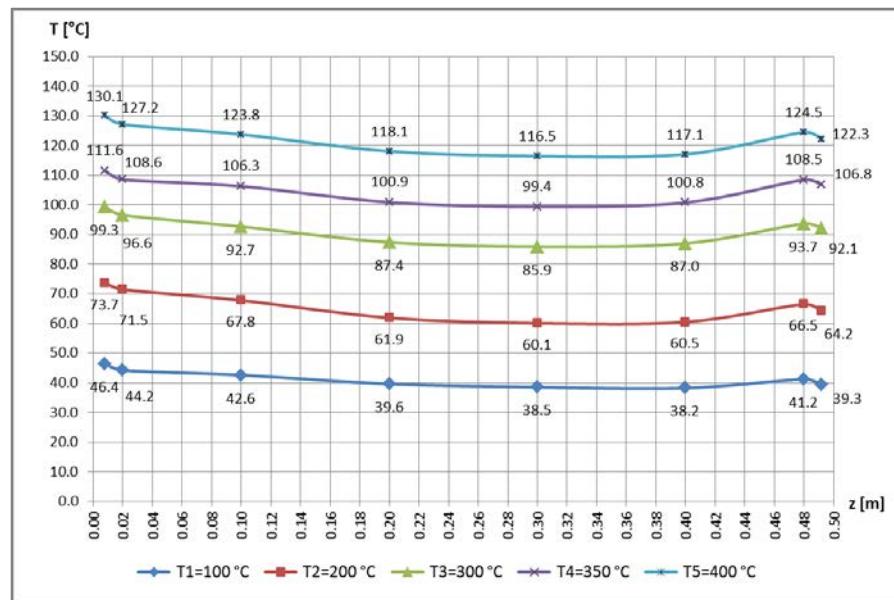
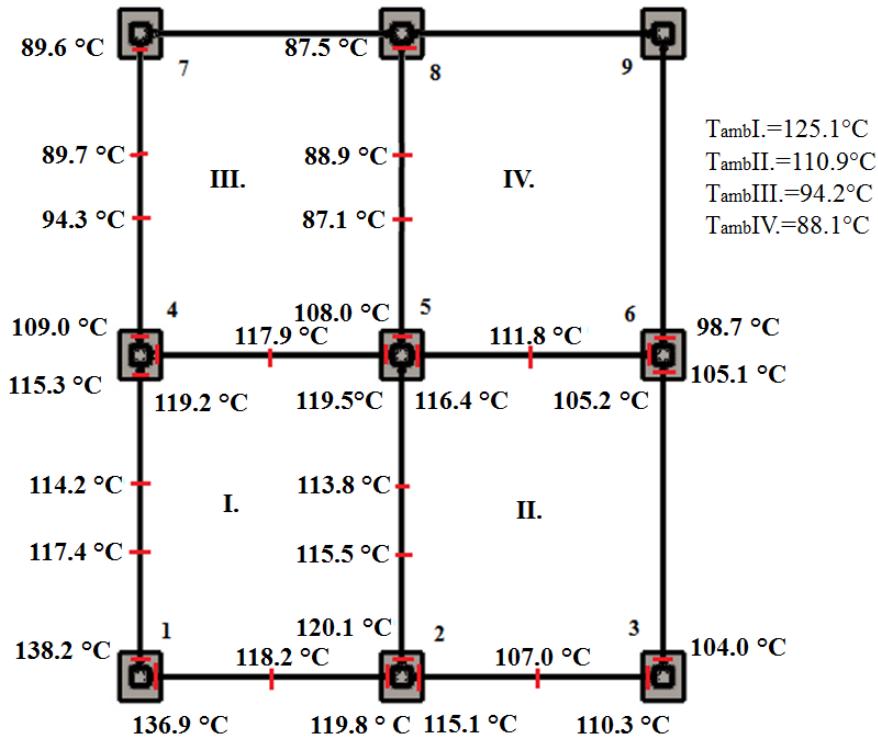


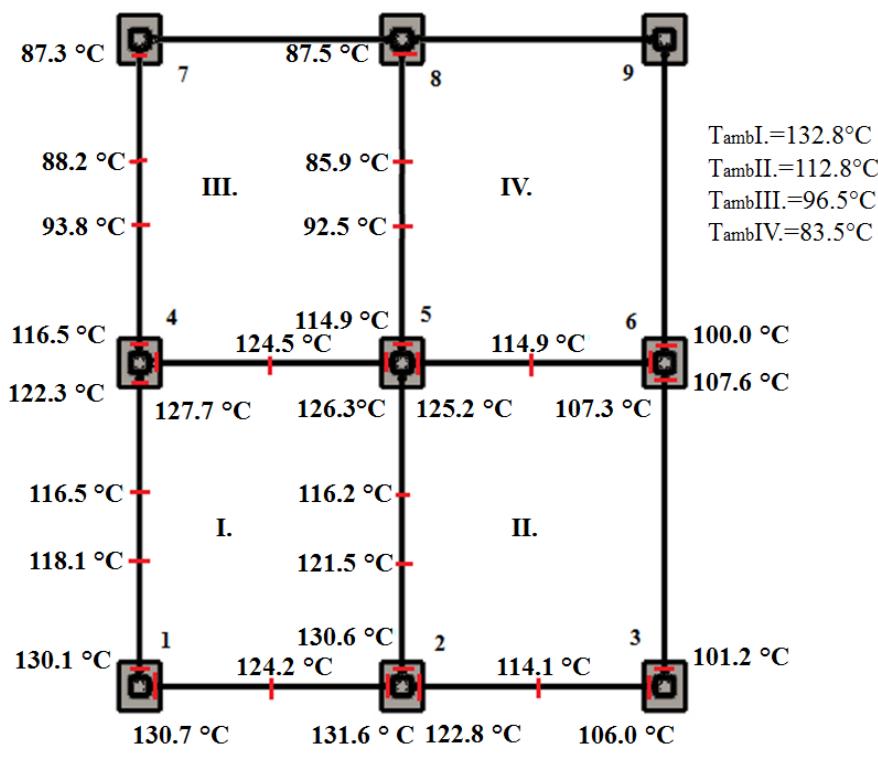
Fig. 4.3.19. Variatia temperaturii de-a lungul grinzi vopsite 1-4

În figura 4.3.30. a. și b. sunt sintetizate valorile temperaturilor de la capetele, respectiv la mijloacele grinziilor scurte și la cotele de 20 și 30 cm la cele lungi, corespunzătoare unei temperaturi nominale  $T_{0,n}=400^{\circ}\text{C}$  și celor două versiuni (fără și cu vopsea termoprotectoare). Pe lângă indicarea celor patru compartimente, sunt oferite și valorile temperaturilor din acestea.

### Structura nevopsită



### Structura vopsită



b.

**Fig. 4.3.30.** Vederea de sus a structurii 3D, cu indicarea temperaturilor grinzilor și a temperaturilor compartimentelor

#### 4.4. Concluzii privind rezultatele obținute

Cercetările efectuate pe segmente de coloană, realizate la scara naturală și la scările 1:2, respectiv 1:4, în două variante (neacoperite, respectiv acoperite cu vopsea intumescență), au permis compararea răspunsurilor acestora la acțiunea unui foc simulant la baza elementelor. Curbele de variație  $\pi(\tau)$  au prezentat aluri practic identice (a se vedea **Capitolul 5.**), ceea ce a confirmat justețea aplicării principiilor Analizei Dimensionale în acest sens, adică asigurarea unei similitudini termice tuturor elementelor supuse testelor (**Capitolul 6.**).

În toate cazurile, efectul de transformare a vopselei intumescente într-o spumă groasă a fost diminuat de încălzirea mult mai lentă a acestora, față de cazul unor incendii reale. De altfel, scopul investigațiilor fiind acela de a obține răspunsul termic stabilizat al respectivului element, aplicarea unei curbe termice de încărcare standard (ISO-834) nu avea nici un sens, deoarece aceste curbe sunt destinate simulării unor incendii și nu pentru atingerea unor regimuri stabilizate din punct de vedere termic.

Investigațiile efectuate pe elemente structurale reduse la scara 1:10 au permis în mod suplimentar și verificarea curbelor teoretice  $\pi(\tau)$ , precum și elaborarea unei noi strategii de evaluare a acestora (**Capitolul 5.**).

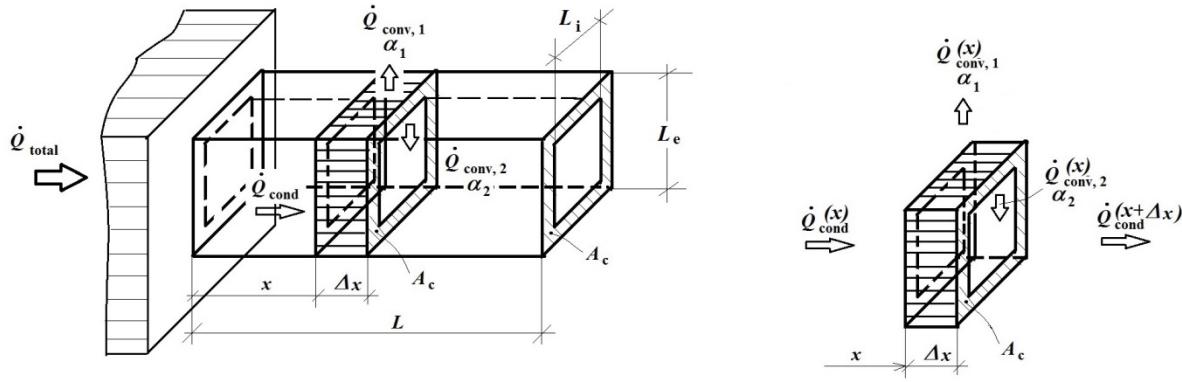


## 5. CERCETĂRI ANALITICE ȘI NUMERICE PRIVIND PROPAGAREA CÂMPULUI TERMIC PE ELEMENTE STRUCTURALE

### 5.1. Studiul analitic al transferului de căldură într-o bară de secțiune tubular-rectangulară

#### 5.1.1. Aspecte generale

Se consideră bara metalică de secțiune tubular-pătrată indicată în figura 5.1.1. [CEN02].



*Detaliul elementului de volum*

**Fig. 5.1.1.** Schema de calcul a bilanțului termic

Bara este fixată de un element de fundație (bază), care este încălzit electric. Transferul de căldură se realizează prin conducție în peretele tubular și prin convecție și radiație la aerul din interiorul, respectiv exteriorul barei.

Pentru obținerea câmpului de temperatură în bară se consideră următoarele ipoteze:

- transferul de căldură este staționar;
- nu există surse generatoare de căldură în bară;
- conductivitatea termică a materialului este constantă;
- coeficienții de convecție și radiație sunt mărimi constante și uniforme pe suprafetele (interioară și exterioară) barei.

Se consideră un element de volum al barei aflat la distanța  $x$  de bază, având lungimea  $\Delta x$ , aria transversală  $A_t$ , perimetrul interior  $P_i$  și perimetrul exterior  $P_e$  (Fig. 5.1.1.).

Din bilanțul energetic al acestui volum elementar:

$$\dot{Q}_{cond,x} = \dot{Q}_{cond,x+\Delta x} + \dot{Q}_{conv,i} + \dot{Q}_{conv,e}; \quad (5.1)$$

în care:

$$\dot{Q}_{conv,i} = \alpha_i(P_i\Delta x)(T_i - T_{aer,i}); \quad (5.2)$$



$$\dot{Q}_{conv,e} = \alpha_e (P_e \Delta x) (T_e - T_{aer,e}). \quad (5.3)$$

În condiții staționare se acceptă următoarele ipoteze de bază:

- temperatura pe suprafața interioară și exterioară a barei este aceeași ( $T_i = T_e = T$ );
- coeficienții de convecție și radiație pe cele două suprafete, interioară și exterioară, sunt  $\alpha_i$  și  $\alpha_e$ ;
- perimetrele corespunzătoare celor două suprafete sunt  $P_i$  și  $P_e$ , care se mențin constante pe lungimea barei;
- se consideră valori medii pentru  $T_{aer,i}$  și  $T_{aer,e}$ .

Perimetrele se vor calcula în funcție de diametrele hidraulice  $d_i$  și  $d_e$ .

*Diametrul hidraulic* reprezintă lungimea caracteristică pentru determinarea coeficientilor de convecție superficiali.

Astfel:

$$P_i = \pi d_i \quad (5.4)$$

$$P_e = \pi d_e \quad (5.5)$$

Ecuția de calcul a diametrelor hidraulice [CEN02] este:

$$d_h = \frac{4A}{P}, \quad (5.6)$$

unde:  $A$  reprezintă aria respectivei secțiuni transversale, iar

$P$  - perimetrul acesteia.

În urma calculelor, rezultă pe rând:

$$d_i = \frac{4 \cdot L_i^2}{4 \cdot L_i} = L_i, \quad (5.7)$$

respectiv

$$d_e = \frac{4 \cdot L_e^2}{4 \cdot L_e} = L_e. \quad (5.8)$$

Din ecuația (5.1) rezultă pe rând:

$$\frac{d\dot{Q}_{cond}}{dx} + \alpha_i P_i (T - T_{aer,i}) + \alpha_e P_e (T - T_{aer,e}) = 0; \quad (5.10)$$

Din ecuația conductionii termice (Fourier) se poate exprima fluxul termic, adică:

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda A_t \frac{dT}{dx}, \quad (5.11)$$



unde  $\lambda$  este coeficientul de conductivitate termică al materialului barei (oțel).

Prin înlocuirea ecuației (5.11) în ecuația (5.10) se obține *ecuația diferențială a câmpului de temperatură prin bară*.

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda A_t \frac{dT}{dx} \right) - \alpha_i P_i (T - T_{aer,i}) - \alpha_e P_e (T - T_{aer,e}) = 0, \quad (5.12)$$

din care, în ipoteza că  $\lambda$  și  $A_t$  sunt constante, ecuația diferențială (5.12) devine:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{\alpha_i P_i + \alpha_e P_e}{\lambda A_t} \cdot T + \frac{\alpha_i P_i T_{aer,i} + \alpha_e P_e T_{aer,e}}{\lambda A_t} = 0, \quad (5.13)$$

sau, prin introducerea notațiilor  $a^2$  și  $b^2$  aceasta devine:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - a^2 \cdot T + b^2 = 0, \quad (5.14)$$

Se poate calcula o valoare medie a conductivității termice în funcție de temperaturile măsurate experimental:

$$\lambda_m = \frac{\int_{T(x=0)}^{T(x=L)} \lambda(T) dT}{T(x=0) - T(x=L)}. \quad (5.17)$$

Ecuția diferențială (5.14) este de ordinul doi, liniară, cu coeficienți constanți.

Soluția ecuației omogenă, atașată ecuației diferențiale (5.14) este:

$$T_{omog} = C_1 e^{-ax} + C_2 e^{ax} \quad (5.21)$$

O soluție particulară, care trebuie să satisfacă ecuația inițială neomogenă, este:

$$T_{part} = \frac{b^2}{a^2}. \quad (5.22)$$

Astfel, soluția generală devine:

$$T = T_{omog} + T_{part} = C_1 e^{-ax} + C_2 e^{ax} + \frac{b^2}{a^2}. \quad (5.23)$$

Constantele de integrare  $C_1$  și  $C_2$  se obțin din condițiile la limită, corespunzător la  $x=0$  și  $x=L$ .

#### *Observații importante:*

- Constantele de integrare  $C_1$  și  $C_2$  sunt similare cu cele din relația (1.2) din [TUR16], dedusă în cazul barei de secțiune plină;
- exponentul  $a$  din relațiile (5.21) și (5.22) este similar cu parametrul bine-cunoscut

$m_0 = \sqrt{\frac{P}{A} \cdot \frac{\alpha_n}{\lambda} \left[ \frac{1}{l_m} \right]}$  din aceeași relație (1.2) din [TUR16], care de altfel poate constitui relația de bază în determinarea mărimii coeficientului de transfer convectiv de căldură  $\alpha_n$  ;



- În consecință, se va reține această egalitate importantă

$$a = m_0 = \sqrt{\frac{P}{A} \cdot \frac{\alpha_n}{\lambda}} \left[ \frac{1}{m} \right] \quad (5.24)$$

pentru calculele ce urmează.

Punând condiții la limită, în cazul particular al neglijării transferului de căldură prin vârful barei, constantele de integrare devin:

$$C_1 = \frac{T_{baza} \cdot e^{aL} - T_v + \frac{b^2}{a^2} (1 - e^{aL})}{e^{aL} - e^{-aL}}; \quad (5.30)$$

$$C_2 = \frac{T_v - T_{baza} \cdot e^{-aL} + \frac{b^2}{a^2} (e^{-aL} - 1)}{e^{aL} - e^{-aL}}. \quad (5.31)$$

### 5.1.2. Calculul coeficientilor de transfer de căldură prin convecție și radiație

Ecuatiile criteriale utilizate în convecția naturală sunt de forma:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n = C \cdot Ra^n; \quad (5.33)$$

în care:  $Nu$  este criteriul de similitudine Nusselt

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}; \quad (5.34)$$

$Gr$  - criteriul de similitudine Grashof

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T - T_{aer}) \cdot L^3}{\nu^2}; \quad (5.35)$$

$Pr$  - criteriul de similitudine Prandtl

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}; \quad (5.36)$$

$Ra$  - criteriul de similitudine Rayleigh

$$Ra = Gr \cdot Pr; \quad (5.37)$$

$L$  - lungimea caracteristică.

Constantele  $C$  și  $n$  din ecuația (5.33) depind de geometria suprafeței de schimb de căldură și de regimul de curgere, caracterizat de criteriul Rayleigh.



Conform lucrării [CEN02], de regulă, valoarea lui  $n$ , este:

- pentru curgerea laminară  $n = 1/4$ , respectiv
- pentru curgerea turbulentă  $n = 1/3$ , pe când
- valoarea constantei  $C$  este de obicei subunitară.

Toate proprietățile fluidului ( $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\beta$ ,  $a$ ) sunt obținute la valoarea temperaturii medii a stratului limită termic:

$$T_m = \frac{1}{2}(T + T_{aer}). \quad (5.38)$$

Valorile mărimilor de calcul al **coeficientului de convecție exterior** sunt indicate în **Tabelul 5.1.** [KUZ76].

**Tabel 5.1.**

	Temperatura medie a barei, $T_{m,bara} [\text{°C}]$	Temperatura medie a aerului ext., $T_{aer,e} [\text{°C}]$	Temperatura medie a stratului limită termic, $T_m [\text{°C}]$	Coef. de conductivitate termică, $\lambda \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	Coef. de viscozitate cinematică, $\nu \left[ \frac{m^2}{s} \right]$	Coef. de dilatare volumetrică, $\beta [K^{-1}]$
1	54.99	25.3	40.145	0.0265	$17.6 \times 10^{-6}$	$3.192 \times 10^{-3}$
2	91.21	29.7	60.455	0.0279	$19.46 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-3}$
3	124.76	33.3	79.03	0.0292	$21.42 \times 10^{-6}$	$2.84 \times 10^{-3}$
4	142.24	35.5	88.87	0.0299	$22.67 \times 10^{-6}$	$2.76 \times 10^{-3}$
5	157.94	36.9	97.42	0.0305	$23.4 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-3}$
6	160.42	38.4	99.4	0.03066	$23.55 \times 10^{-6}$	$2.684 \times 10^{-3}$
7	189.83	40.5	115.165	0.0317	$25.34 \times 10^{-6}$	$2.575 \times 10^{-3}$
8	201.4	44.9	123.15	0.0322	$26.26 \times 10^{-6}$	$2.523 \times 10^{-3}$

Pentru calculul coeficientului de convecție exterior s-au utilizat mai multe variante de ecuații criteriale [CEN02]; [DAY13]. Astfel, în varianta plăcilor verticale, lungimea caracteristică este înălțimea barei tubulare,  $H=0.5 \text{ m}$ .

Se consideră faptul că, bara se află la o temperatură medie constantă  $T_{m,bara} = \text{const.}$ , când ecuația criterială poate să fie una din cele de mai jos, rezultând **diferite condiții criteriale**, și anume:

#### Criteriul 1

pentru  $Ra: 10^4-10^9$ :

$$Nu = 0.59 \cdot Ra^{1/4} \quad (5.39)$$

#### Criteriul 2

pentru  $Ra: 10^{-1}-10^9$ :

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2, \quad (5.40)$$

respectiv în cazul unui cilindru vertical, una din relațiile propuse [DAY13] este:



### Criteriul 3

$$\frac{Nu_L}{Nu_{L,p.v.}} = 1 + 0.3 \left[ 32^{0.5} \cdot Gr_L^{-0.25} \frac{L}{D} \right]^{0.909}, \quad (5.41)$$

În care, criteriul Nusselt pentru o placă plană verticală se determină, conform lucrării [DAY13] din:

$$Nu_{L,p.v.} = 0.68 + \frac{0.67 \cdot Ra_L^{1/4}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}}. \quad (5.42)$$

Coeficientul de transfer de căldură prin radiație se calculează, conform lucrării [CEN02], cu relația:

$$\alpha_{rad,e} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^2 - T_{aer,e}^2) (T + T_{aer,e}), \quad (5.43)$$

în care,  $\varepsilon$  este coeficientul de emisie al suprafeței barei, iar

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right] \text{ – constanta Stefan-Boltzmann.}$$

Pentru bara metalică din oțel oxidat, după lucrarea [STE83], s-a ales  $\varepsilon=0.79$ .

Coeficientul de transfer de căldură total este dat de relația:

$$\alpha_{ext,total} = \alpha_{conv,e} + \alpha_{rad,e}, \quad (5.44)$$

iar fluxul termic:

$$\dot{Q}_{conv,e} = \alpha_{ext,total} \cdot (T - T_{aer,e}) \cdot A_e. \quad (5.45)$$

Aria suprafeței exterioare a barei este:

$$A_e = 4L \cdot l_e = 4 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 0,06 m^2. \quad (5.46)$$

În **Tabelele 5.2** sunt centralizate valorile mărimilor calculate.

- După ecuația criterială nr. 1., unde s-a considerat lungimea caracteristică  $L=0.5 m$

**Tabelul 5.2.a.**

	<i>Pr</i>	<i>Gr</i>	<i>Ra</i>	<i>Nu</i>	$\alpha_{conv,e} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\alpha_{rad,e} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\dot{Q}_{conv,e} [W]$
1	0.71	$3.752 \times 10^8$	$2.664 \times 10^8$	75.376	3.919	0.522	7.911
2	0.71	$5.975 \times 10^8$	$4.242 \times 10^8$	84.673	4.725	1.226	21.963
3	0.71	$6.942 \times 10^8$	$4.929 \times 10^8$	87.911	5.134	2.032	39.324
4	0.71	$7.029 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	88.225	5.276	2.506	49.839
5	0.71	$7.319 \times 10^8$	$5.196 \times 10^8$	89.078	5.434	2.978	61.09
6	0.71	$7.241 \times 10^8$	$5.141 \times 10^8$	88.841	5.448	3.034	62.1
7	0.71	$7.343 \times 10^8$	$5.214 \times 10^8$	89.155	5.652	4.034	86.785
8	0.71	$7.021 \times 10^8$	$4.985 \times 10^8$	88.159	5.677	4.4038	94.659



- După ecuația criterială nr. 2, unde s-a considerat lungimea caracteristică  $L=0.5\text{ m}$

**Tabelul 5.2.b.**

	$Pr$	$Gr$	$Ra$	$Nu$	$\alpha_{conv,e} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\alpha_{rad,e} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\dot{Q}_{conv,e} [W]$
1	0.71	$3.752 \times 10^8$	$2.664 \times 10^8$	82.95	4.39	0.522	8.76
2	0.71	$5.975 \times 10^8$	$4.242 \times 10^8$	95.586	5.33	1.226	24.195
3	0.71	$6.942 \times 10^8$	$4.929 \times 10^8$	100.081	5.845	2.032	43.224
4	0.71	$7.029 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	100.52	6.011	2.506	54.546
5	0.71	$7.319 \times 10^8$	$5.196 \times 10^8$	101.713	6.2045	2.978	66.687
6	0.71	$7.241 \times 10^8$	$5.141 \times 10^8$	101.381	6.217	3.034	67.726
7	0.71	$7.343 \times 10^8$	$5.214 \times 10^8$	101.82	6.455	4.034	93.979
8	0.71	$7.021 \times 10^8$	$4.985 \times 10^8$	100.428	6.467	4.4038	102.086

- După ecuația criterială nr. 3, unde s-a considerat lungimea caracteristică  $L=0.5\text{ m}$ , iar diametrul hidraulic  $d_e=0.03\text{ m}$ , determinată cu ajutorul relației (5.8)

**Tabelul 5.2.c.**

	$Pr$	$Gr$	$Ra$	$Nu$	$\alpha_{conv,e} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\alpha_{rad,e} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\dot{Q}_{conv,e} [W]$
1	0.71	$3.752 \times 10^8$	$2.664 \times 10^8$	80.376	4.26	0.522	8.519
2	0.71	$5.975 \times 10^8$	$4.242 \times 10^8$	88.613	4.945	1.226	22.773
3	0.71	$6.942 \times 10^8$	$4.929 \times 10^8$	91.48	5.342	2.032	40.468
4	0.71	$7.029 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	91.764	5.4875	2.506	51.194
5	0.71	$7.319 \times 10^8$	$5.196 \times 10^8$	92.512	5.643	2.978	62.611
6	0.71	$7.241 \times 10^8$	$5.141 \times 10^8$	92.303	5.66	3.034	63.651
7	0.71	$7.343 \times 10^8$	$5.214 \times 10^8$	92.581	5.87	4.034	88.735
8	0.71	$7.021 \times 10^8$	$4.985 \times 10^8$	91.7	5.905	4.4038	96.804

Se observă că valorile coeficientilor de transfer de căldură și fluxului termic sunt apropiate în toate cele trei variante de ecuații criteriale.

În interiorul barei tubulare transferul de căldură prin convecție se realizează de la suprafața caldă a bazei (zona delimitată de contrul interior al țevii pătrate) la aer și de la suprafața interioară a barei la aerul din interiorul ei.

**Coeficientul de transfer de căldură de la baza barei la aer** se obține din modelul transferului de căldură prin convecție liberă, de la o suprafață orizontală încălzită la aerul înconjurător, pe baza următoarelor relații criteriale [CEN02]:

$$\text{pentru } Ra: 10^4-10^9; \quad Nu = 0,54 \cdot Ra^{1/4}; \quad (5.47)$$

$$\text{pentru } Ra: 10^7-10^{11}; \quad Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3}. \quad (5.48)$$

Pe baza calculelor, prezentate în lucrarea în extenso, în Tabelele 5.3 și 5.4 sunt sintetizate rezultatele obținute.



**Tabelul 5.3.**

	Temperatura bazei, $T_{baza}$ [°C]	Temperatura medie a aerului ext., $T_{aer,e}$ [°C]	Temperatura medie a stratului limită termic, $T_m$ [°C]	Coef. de conductivitate termică, $\lambda \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	Coef. de viscozitate cinematică, $\nu \left[ \frac{m^2}{s} \right]$	Coef. de dilatare volumetrică, $\beta [K^{-1}]$
1	100	25.3	62.65	0.0281	$19.73 \times 10^{-6}$	$2.978 \times 10^{-3}$
2	200	29.7	114.85	0.0317	$25.31 \times 10^{-6}$	$2.577 \times 10^{-3}$
3	300	33.3	166.65	0.0348	$31.4 \times 10^{-6}$	$2.274 \times 10^{-3}$
4	350	35.5	192.75	0.0365	$34.594 \times 10^{-6}$	$2.146 \times 10^{-3}$
5	400	36.9	218.45	0.0381	$37.97 \times 10^{-6}$	$2.034 \times 10^{-3}$
6	450	38.4	244.2	0.0396	$41.423 \times 10^{-6}$	$1.933 \times 10^{-3}$
7	500	40.5	270.25	0.0412	$45.035 \times 10^{-6}$	$1.84 \times 10^{-3}$
8	600	44.9	322.45	0.0441	$52.478 \times 10^{-6}$	$1.679 \times 10^{-3}$

**Tabelul 5.4.**

	Pr	Gr	Ra	Nu	$\alpha_{conv,baza} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\alpha_{rad} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\dot{Q}_{conv,baza}$ [W]
1	0.71	$1.724 \times 10^3$	$1.224 \times 10^3$	3.194	13.297	1.509	0.806
2	0.71	$2.067 \times 10^3$	$1.467 \times 10^3$	3.342	15.696	4.593	2.519
3	0.71	$1.856 \times 10^3$	$1.318 \times 10^3$	3.254	16.774	9.248	5.059
4	0.71	$1.701 \times 10^3$	$1.208 \times 10^3$	3.183	17.215	12.231	6.751
5	0.71	$1.545 \times 10^3$	$1.097 \times 10^3$	3.108	17.541	15.722	8.805
6	0.71	$1.399 \times 10^3$	$0.993 \times 10^3$	3.031	17.785	19.738	11.259
7	0.71	$1.258 \times 10^3$	$0.893 \times 10^3$	2.952	18.02	24.31	14.179
8	0.714	$1.021 \times 10^3$	$0.729 \times 10^3$	2.806	18.332	35.282	21.696

Pentru calculul **coeficientului de convecție interior** s-au utilizat aceleași ecuații criteriale folosite și la determinarea coeficientului de convecție exterior. Rezultatele și detaliile calculelor sunt prezentate în lucrarea in extenso.

În mod similar, considerând obținerea **coeficientul de transfer de căldură de la vârful barei la aer** din modelul transferului de căldură prin convecție liberă de la o suprafață orizontală încălzită la aerul înconjurător, detaliile calculelor și rezultatele acestora se regăsesc în lucrarea in extenso.

### 5.1.3. Determinarea fluxului de căldură transmis prin conduction de-a lungul barei

Expresia fluxului termic transmis prin conduction prin bară este:

$$\dot{Q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} \cdot A_t. \quad (5.32)$$

Derivata câmpului de temperatură este:

$$\frac{dT}{dx} = -aC_1 e^{-ax} + aC_2 e^{ax}, \quad (5.58)$$

respectiv, pentru bara de lungime  $x=L$ , se obține:



$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = -aC_1 e^{-aL} + aC_2 e^{aL}. \quad (5.59)$$

Aria transversală este:

$$A_t = L_e^2 - L_i^2 = 0,03^2 - 0,027^2 = 0,000171 \text{ m}^2. \quad (5.60)$$

În tabelul 5.1.1. sunt înscrise valorile de calcul și rezultatele fluxului termic transmis prin conduction, corespunzătoare stâlpului singular la scara 1:10 și neprotejată termic cu vopsea:

**Tabelul 5.11.**

	Temp. la bază, $T_{baza}$ [°C]	Temp. la vârf, $T_v$ [°C]	Coef. de cond. termică al barei la temp.medie, $\lambda \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	Coef. de conv. termică exterior, $\alpha_e \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	Coef. de conv. termică interior $\alpha_i \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	$a^2$	$b^2$	$\frac{b^2}{a^2}$	$C_1$	$C_2$	$\dot{Q}_{cond}$ [W]
1	100	27.3	52.169	4.782	4.403	117.63	193.82	1,650	98.24	0.11	2.37
2	200	32.1	50.963	6.171	5.603	153.63	721.29	4,696	195.25	0.055	2.88
3	300	37.1	49.845	7.374	6.614	187.62	1467.88	7,824	292.14	0.03	3.266
4	350	39.8	49.263	7.993	7.213	206.33	1885.57	9,139	340.84	0.023	3.63
5	400	40.2	48.741	8.621	7.744	224.47	2307	10,278	389.7	0.0166	3.69
6	450	41.6	48.658	8.694	7.692	225.23	2576.75	11,441	438.54	0.0165	3.71
7	500	44.6	47.675	9.904	8.829	262.74	3468.41	13,201	486.79	0.0094	4.1
8	600	51.1	47.293	10.309	8.939	272.35	4138.2	15,194	584.8	0.0093	4.74

În tabelul următor sunt centralizate toate fluxurile termice:

**Tabelul 5.12.**

	$\dot{Q}_{sursa}$ [W]	$\dot{Q}_{conv,e}$ [W]	$\dot{Q}_{conv,baza}$ [W]	$\dot{Q}_{conv,suport}$ [W]	$\dot{Q}_{conv,i}$ [W]	$\dot{Q}_{cond}$ [W]	Diferența $\Delta\dot{Q}$ [W]
1	560	8.519	0.806	8.77	4.95	2.37	534.585
2	714	22.773	2.519	27.4	13.457	2.88	644.97
3	1233	40.468	5.059	55.03	23.57	3.266	1105.607
4	1010	51.194	6.751	73.438	30.437	3.63	844.55
5	1173	62.611	8.805	95.777	37.349	3.69	964.768
6	1296	63.651	11.259	122.475	35.885	3.71	1059
7	1372	88.735	14.179	154.9	52.303	4.1	1057.783
8	1517	96.804	21.696	236	52.714	4.74	1105.046

Valorile mici ale fluxurilor termice transmise prin conduction și convecție se datorează ariilor mici de transfer de căldură.

Diferența obținută din bilanțul termic se regăsește în fluxul termic acumulat de suport și de bară pe durata încălzirii, respectiv în fluxul termic transmis către sol.

În vederea comparării valorilor măsurate cu cele teoretice, oferite de soluția generală (5.23),

$$T = T_{omo_g} + T_{part} = C_1 e^{-ax} + C_2 e^{ax} + \frac{b^2}{a^2} \quad (5.23)$$

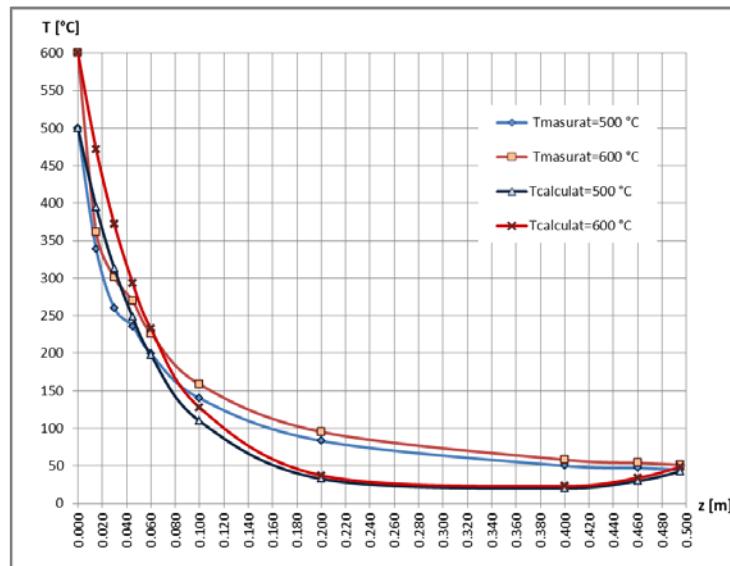
s-a efectuat calculul acestor temperaturi teoretice, indicate în paranteze pe lângă cele măsurate (Tabelul 5.13.). Constantele de integrare  $C_1$ ,  $C_2$  și  $b^2/a^2$  au fost determinate anterior.



**Tabelul 5.13.**

i	$z(j)$ [m]	$T(1,j)$ [°C]	$T(2,j)$ [°C]	$T(3,j)$ [°C]	$T(4,j)$ [°C]	$T(5,j)$ [°C]	$T(6,j)$ [°C]	$T(7,j)$ [°C]	$T(8,j)$ [°C]
1	0.000	100.0	200.0	300.0	350.0	400.0	450.0	500.0	600.0
2	0.015	82.5 (85.27)	152.9 (166.88)	216.8 (245.74)	251.6 (283.94)	283.5 (321.56)	311.9 (361.64)	339.2 (394.93)	- (471.73)
3	0.030	71.7 (72.75)	124.1 (139.39)	170.9 (201.57)	195.8 (230.69)	217.1 (258.92)	238.0 (291.1)	260.0 (312.54)	300.7 (371.69)
4	0.045	67.9 (62.128)	114.3 (116.57)	155.6 (165.61)	177.1 (187.76)	196.9 (208.89)	215.3 (234.76)	235.8 (247.94)	269.4 (293.53)
5	0.060	61.0 (53.1)	99.6 (97.623)	133.5 (136.32)	151.0 (153.16)	167.3 (168.93)	182.1 (189.78)	199.1 (197.28)	226.2 (232.52)
6	0.100	47.8 (35.18)	73.7 (61.41)	96.0 (82.2)	107.2 (90.28)	117.8 (97.46)	128.2 (109.41)	139.8 (109.49)	158.4 (127.52)
7	0.200	36.2 (13.84)	49.2 (21.72)	60.2 (27.16)	66.3 (28.82)	71.1 (33.07)	76.0 (33.6)	83.1 (32.47)	95.1 (37.02)
8	0.400	27.6 (11.35)	33.3 (13.89)	39.3 (16.23)	42.5 (17.42)	43.7 (17.9)	46.1 (19.2)	49.8 (20.1)	57.9 (22.83)
9	0.460	27.9 (18.46)	32.9 (21.81)	38.2 (24.71)	41.1 (26.63)	41.8 (27)	43.2 (28.26)	46.9 (29.76)	53.8 (33.89)
10	0.495	27.3 (25.7)	32.1 (30.53)	37.1 (34.56)	39.8 (37.58)	40.2 (38.11)	41.6 (39.38)	44.6 (42.06)	51.1 (48.14)

În figura 5.1.1. sunt comparate legile de variația măsurate și calculate ale temperaturii de-a lungul stâlpului, pentru două temperaturi nominale  $T_{0,n}=500^{\circ}\text{C}$  și  $600^{\circ}\text{C}$ .



**Fig.5.1.1. Compararea temperaturilor măsurate cu cele teoretice**

Cele mai mari abateri s-au înregistrat în zona centrului barei, unde ecuațiile criteriale nu se verifică. Este posibil, ca în această zonă să apară turbulențe, să fie un regim de tranziție semiturbulent, iar viteza aerului din interiorul barei să crească. Variații mai mari de temperatură au apărut și în zonele cu

temperaturi mai ridicate ale barei ( $450\text{--}600^{\circ}\text{C}$ ), deoarece diferența între aceste temperaturi și temperatura medie a barei este semnificativă.

În afara acestei influențe a regimului termic de tranziție, o altă cauză posibilă a acestor abateri dintre valorile măsurate și cele teoretice putea să fie existența unor contacte electrice temporar imperfecte la barele de Silită, motiv pentru care timpii necesari atingerii temperaturilor nominale  $T_{0,n}$ , respectiv cele de stabilizare, difereau de la caz la caz, cu valori de ordinul 30–50 de minute. Totodată, nu sunt excluse nici erorile umane privind evaluarea obiectivă a atingerii regimurilor stabilizate. Evident, consumurile electrice corespunzătoare acestor diferențe de timp, conduceau la creșterile acelor cantități ale fluxurilor termice disipate către mediul înconjurător.

## 5.2. Calcul analitic îmbunătățit al curbelor de temperatură

### 5.2.1. Aproximarea curbei $T(z)$ printr-o funcție polinomială

În capitolul anterior 5.1., precum și în **Capitolul 1.7.** [TUR16] au fost prezentate relațiile analitice, privind legile de variație a temperaturilor de-a lungul unor bare drepte, fie de secțiune tubulară, respectiv de secțiune plină.

După cum s-a văzut în **Capitolul 5.1.**, prin intermediul relației (5.23), respectiv în [TUR16], legea este una exponențială cu doi termeni, deosebit de dificilă și de analizat și de reprezentat.

Din acest motiv, trebuia să se facă o aproximare polinomială a curbei  $T(z)$  obținută experimental. După cum se va arăta în continuare, funcții polinomiale de maximum ordinul IV sunt deobicei suficiente pentru aproximarea curbelor stabilite experimental.

Mai bine zis, prin punctele stabilite, pe baza măsurătorilor experimentale, se pot duce funcții polinomiale, ale căror dispunere în raport cu punctele măsurătorilor este cel puțin la fel de precisă ca prin intermediul unor relații exponențiale de tipul (5.23).

Această nouă abordare a fost propusă în cadrul articolului [TUR18], în cadrul articolului [TUR18], a curbelor  $T(z)$  prezintă câteva avantaje nete față de expresiile exponențiale, de tipul (5.23), cum ar fi:

- Reduce în mod semnificativ timpul necesar calculului parametriilor  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $m_0$ , deoarece într-un program minimal Matlab, odată cu introducerea datelor măsurătorilor (perechi de valori temperatură-coordonată), aceste mărimi se determină direct;
- Implementarea unei funcții exponențiale duble (cu doi termeni) într-un program de calcul sau într-o analiză numerică prin MEF, ridică serioase probleme;
- Expresiile polinomiale permit, după cum se va arăta în **Capitolul 5.2.2.**, o determinare mult mai simplă nu numai a parametrului  $m_0$ , dar și a coeficientului de transfer convectiv de temperatură  $\alpha_c$ , care reprezintă un obiectiv major al acestor analize prin intermediul relațiilor tip (5.23).

Eficiența acestei noi abordări este ilustrată prin intermediul graficelor analizate în continuare.

În **figura 5.2.1. și 5.2.2.** sunt prezentate curbele comparative ale temperaturilor pentru prototip și modelele reduse la scară, unde în locul cotelor reale  $z [m]$  s-a utilizat o lungime procentuală  $L\psi [\%]$ .

Această lungime procentuală consideră valoarea 100% mărimea cotei  $z_{\max}$ . Se poate observa un comportament foarte asemănător al celor trei elemente structurale, deși atât ca dimensiuni, cât și



volum erau foarte diferite. În figură sunt menționate și curbele polinomiale, de maximum de ordinul IV., care aproximează fenomenul cu un factor de corelație  $R^2$  foarte bun.

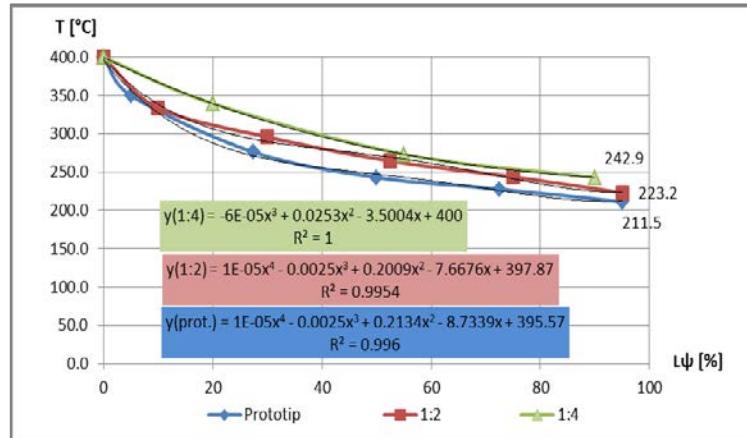


Fig. 5.2.1. Cele trei segmente de coloane nevopsite, la 400°C

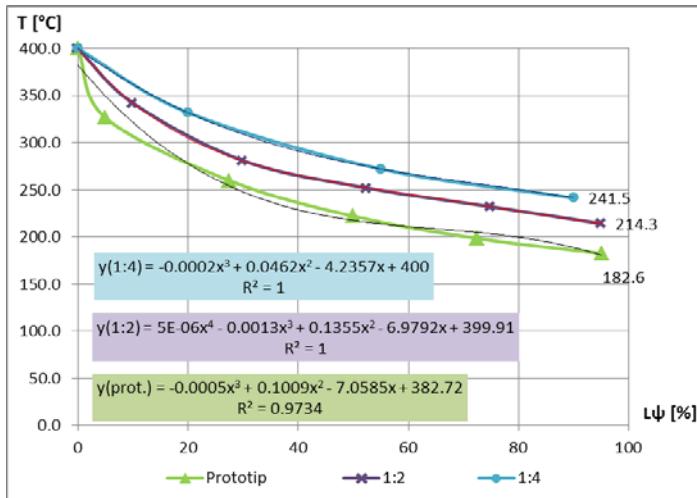


Fig. 5.2.2. Cele trei segmente de coloane vopsite, la 400°C

Un caz mult mai complex analizat în **Capitolul 4.2**, prin intermediul **figurilor 4.2.14-4.2.17** de la stâlpul redus la scara 1:10, a sugerat împărțirea lungimii totale a stâlpului în trei intervale distințe  $z_1$ ,  $z_{II}$ ,  $z_{III}$ , pentru a reduce gradul funcțiilor polinomiale de aproximare. O funcție polinomială unică nu numai că ar fi de un grad mare, dar suprapunerea ei peste rezultatele măsurătorilor ar oferi o curbă cu fluctuații (abateri) însemnate față de unirea acestor puncte.

O asemenea abordare, de împărțire în trei intervale distințe a lungimii totale, se va aplica și în cazul determinării parametrului  $m_o$ . După cum s-a arătat în articolul [TUR18], ipoteza  $m_o=const.$  este valabilă pentru întreaga lungime a barei numai în cazul secțiunilor transversale pline. În cazul secțiunilor tubulare, aceasta ipoteză de  $m_o=const.$ , rămâne valabilă numai pe intervale restrânse ale barei, exact cum a fost și în cazul anterior ( $z_1$ ,  $z_{II}$ ,  $z_{III}$ ). Pe baza experienței autoarei, în cazul unor variații puternice ale curbelor  $\pi(z)$ , se poate aplica chiar și o împărțire în patru intervale a lungimii totale.



## 5.2.2. Introducerea curbei adimensionale $T_\psi$ [%]

În urma analizei atente a alurii curbelor, a fost trasă concluzia că, aceste curbe pot fi trecute într-o formă adimensională prin intermediul variabilei  $T_\psi$  [%]. În acest sens, se consideră 100% valoarea temperaturii nominale de încălzire  $T_{0,n}$ , iar restul temperaturilor monitorizate de-a lungul structurii vor fi doar procente bine-stabilite din aceasta.

Un avantaj nesperat al acestei reprezentări, observat ulterior, constă în faptul că, diferite curbe la care temperatura nominală  $T_{0,n}$  prezintă abateri de ordinul a câtorva zeci de grade, conduceau la curbe  $T_\psi$  practic identice. Explicația acestui lucru era că, aceste abateri de ordinul zecilor de grade reprezentau doar părți din procentele unor temperaturi nominale de ordinul sutelor de grade, motiv pentru care, aceste curbe se puteau unifica. O altă idee, care stătea la baza acestei noi abordări, era problema reprezentării unitare a curbelor  $T(z)$  pentru elemente structurale de lungimi diferite. Problema împărțirii lungimii totale în mai multe intervale de la curbele obișnuite  $T(z)$  s-a putut extinde cu succes și la aceste curbe  $T_\psi$ .

În figurile următoare se ilustrează avantajul acestei noi abordări.

Astfel, în **figurile 5.2.10 și 5.2.11.** sunt oferite aceste curbe adimensionale pentru elementul structural realizat la scara 1:1.

De asemenea, comportamentul foarte asemănător al acestor elemente structurale, observabil și în figurile sus-menționate, ne îndreptățește să utilizăm o singură curbă  $T_\psi$ , ca o medie ponderată a acestora, care va fi de mare folos într-o evaluare a comportamentului structurilor cu ajutorul Analizei Dimensionale. În acest sens, după cum se menționează în **Capitolul 6.**, testarea acestor elemente structurale s-a realizat cu asigurarea unei similitudini termice, adică atingerea unor temperaturi identice în punctele omoloage ale structurilor. Punctele omoloage cele mai importante din punct de vedere termic au fost punctele de măsurare de la bază, respectiv din apropierea capătului superior al respectivului element.

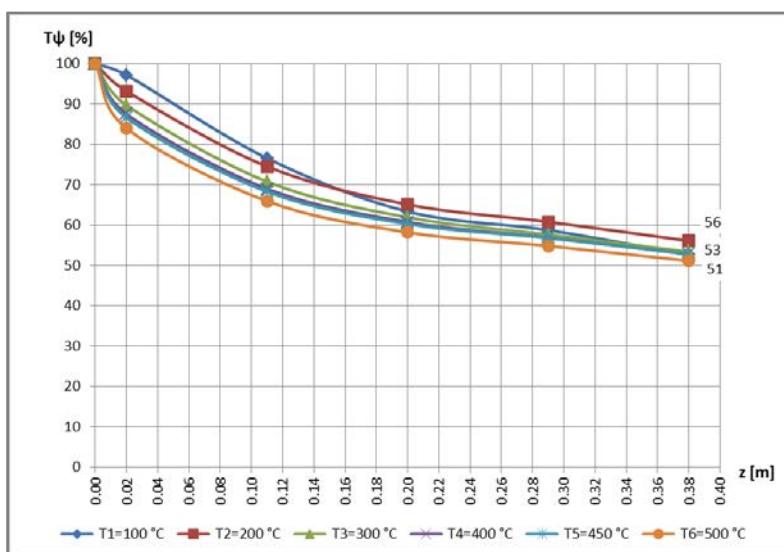
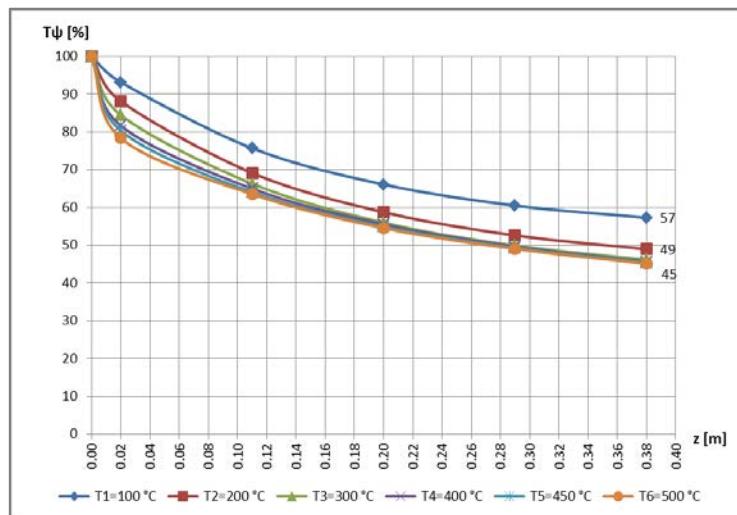


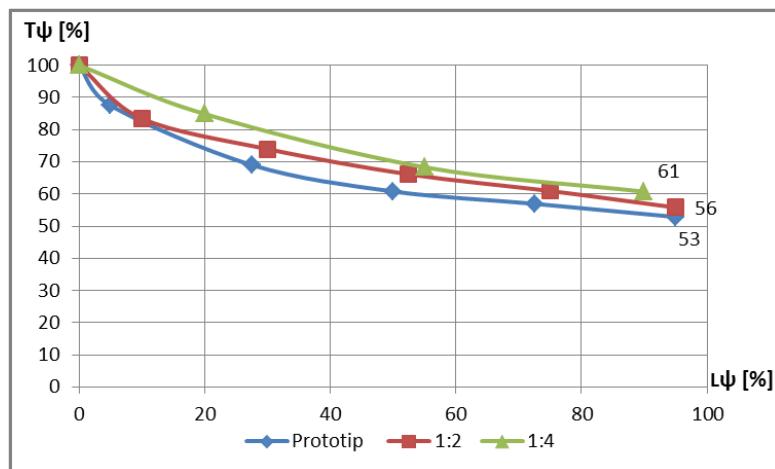
Fig. 5.2.10. Variația temperaturilor de-a lungul prototipului nevopsit, în reprezentare adimensională



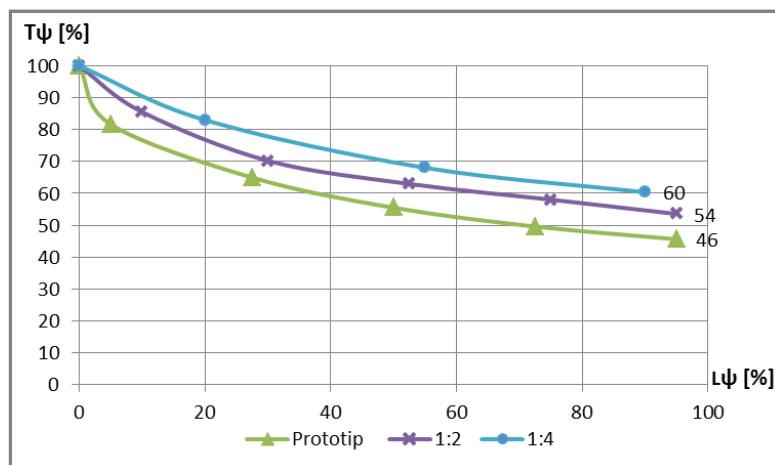


**Fig. 5.2.11.** Variația temperaturilor de-a lungul prototipului vopsit, în reprezentare adimensională

În cazul **figurilor 5.2.16-5.2.17.**, pentru analiza comparativă eficientă a celor trei elemente structurale de mai înainte, s-a aplicat din nou reprezentarea procentuală a lungimii acestora.



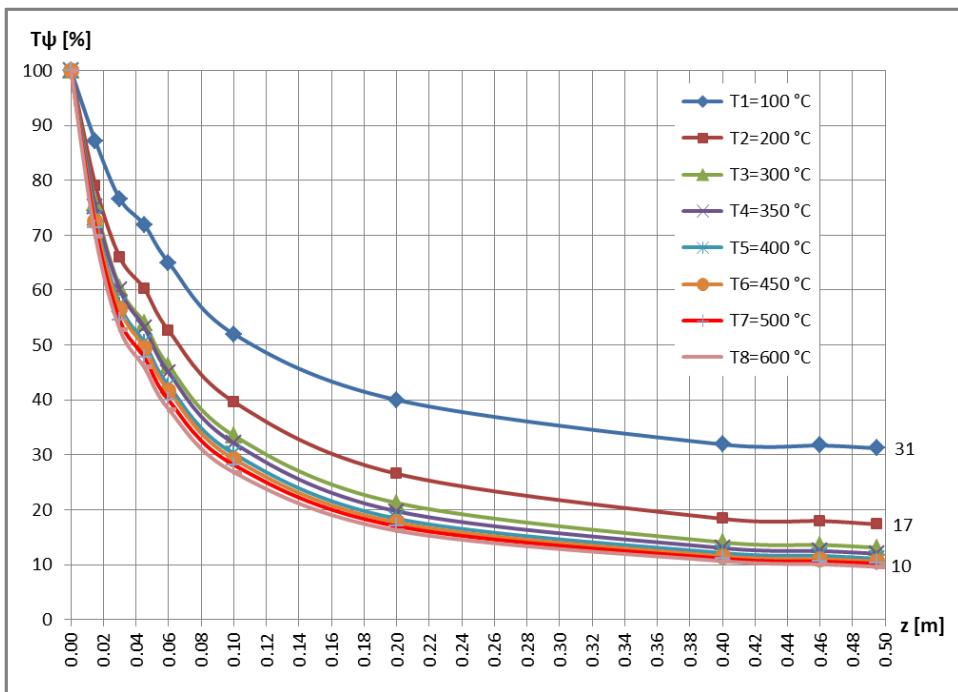
**Fig. 5.2.16.** Cele trei segmente de stâlp nevopsite, la 400°C, în sistem de coordonate adimensional



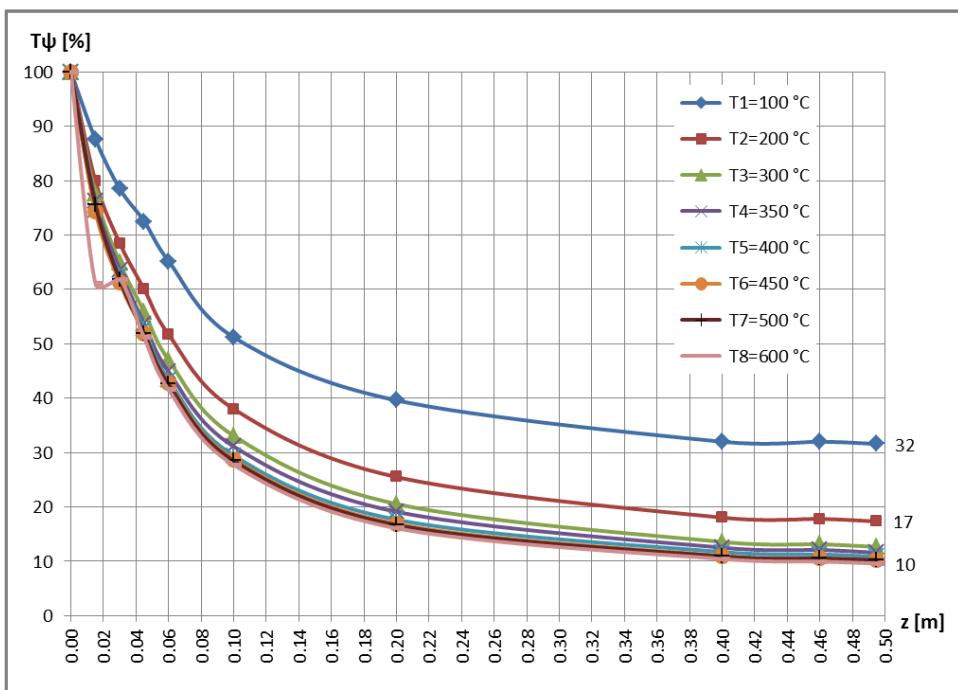
**Fig. 5.2.17.** Cele trei segmente de stâlp vopsite, la 400°C, în sistem de coordonate adimensional



O analiză similară a fost efectuată și în cazul stâlpilor realizati la scara 1:10. În **figurile 5.2.18.** și **5.2.19.** sunt redate aceste curbe  $T_\psi$ , corespunzătoare unui număr de opt temperaturi nominale  $T_{0,n}$ . Se poate constata faptul că, începând de la  $T_{0,n} = 300^\circ\text{C}$ , practic toate curbele se suprapun; acest lucru subliniază încă odată justitia acestei noi abordări a prezentei teze de doctorat.



**Fig. 5.2.18.** Variația temperaturilor de-a lungul stâlpului nevopsit, prevăzut cu patru grinzi,  
în reprezentare adimensională



**Fig. 5.2.19.** Variația temperaturilor de-a lungul stâlpului vopsit, prevăzut cu patru grinzi,  
în reprezentare adimensională



O împărțire similară, în câte trei (sau chiar în patru) intervale a lungimii totale a stâlpului, aferentă acestor curbe  $T_\psi(z)$ , permite o analiză mult mai detaliată a răspunsului termic urmărit.

În vederea optimizării utilizării curbelor  $T_\psi$ , în cadrul lucrării a fost propusă aproximarea acestora tot prin funcții polinomiale, care va deveni foarte eficientă, în special în determinarea valorii parametrului  $m_0$ , precum și în stabilirea legilor sale de variație  $m_0(z)$ , va deveni foarte eficientă (a se vedea în Capitolul 5.2.3.).

### 5.2.3. Implementarea curbei $T_\psi$ într-o nouă abordare a determinării parametrilor $m_0$ și $\alpha_n$

După cum s-a arătat mai înainte, parametrul  $m_0$  se definește ca:

$$m_0 = \sqrt{\frac{P}{A} \cdot \frac{\alpha_n}{\lambda}} \left[ \frac{1}{m} \right]. \quad (1.3)$$

În această relație  $P$ ,  $A$  și  $\lambda/T$  sunt mărimi cunoscute, pe când mărimea lui  $\alpha_n(T)$  trebuie stabilită.

Acest coeficient de transfer termic  $\alpha_n(T)$  se poate determina și pe cale teoretică, însă va prezenta abateri față de cazul concret analizat din cauza unor pierderi, care nu pot fi prevăzute în relațiile teoretice.

Din acest motiv, autorul [TUR16] a propus o strategie originală bazată pe măsurătorile efective ale temperaturii, deci plecând de la curba  $T(z)$ .

Însă, strategia descrisă în lucrarea [TUR16] presupune utilizarea curbei exponențiale teoretice (5.21), ceea ce reprezintă un calcul anevoie.

De aceea, a fost propusă o altă strategie, bazată tot pe rezultatele măsurătorilor, însă plecând prima dată de la aproximarea polinomială a curbei  $T(z)$ , iar ulterior de la aproximarea polinomială a curbei adimensionale  $T_\psi(z)$ .

În opinia autoarei prezentei teze, strategia privind determinarea celor doi parametri ( $m_0$  și  $\alpha_n$ ) constă în următoarele etape:

- Se atașează curbei experimentale  $T(z)$  o curbă adimensională  $T_\psi(z)$ ;
- Se caută, pentru un număr bine-definit de intervale (trei sau patru), legile polinomiale cele mai fidele de aproximare;
- În cadrul unui interval dat al barei, se împarte această lungime într-un număr suficient de mare de segmente, spre exemplu 10 sub-intervale identice;
- Se consideră primele patru puncte limitrofe ale acestor sub-intervale (punctele 1-2-3-4), pentru care, fie în Excel, fie în Matlab, se determină constantele de integrare  $C_1'$ ,  $C_2'$  și  $m_0'$  ale soluției ecuației diferențiale a temperaturii (5.21); se consideră un număr mai mare de puncte (adică: patru) pentru a rămâne o ecuație și pentru verificare, altfel, trei puncte, cu cele trei ecuații aferente, ar fi suficiente pentru determinarea celor trei constante căutate ( $C_1'$ ,  $C_2'$  și  $m_0'$ ), însă cu patru puncte și patru ecuații, se asigură și verificarea rezultatelor obținute;
- Se ia un nou set de patru puncte (2-3-4-5), pentru care se obțin în mod similar valorile  $C_1''$ ,  $C_2''$  și  $m_0''$ ;



- Se reia acest calcul până la atingerea limitei intervalului analizat, obținând de fiecare dată seturi de valori ale acestor constante;
- Se face reprezentarea grafică a funcției  $m_0(z)$  pentru acest interval;
- Peste această curbă  $m_0(z)$  se va suprapune o funcție polinomială de aproximare, rezultând astfel o lege de variație ușor de analizat;
- Cu ajutorul acestei legi polinomiale de aproximare se poate determina practic din milimetru în milimetru perechile  $m_0(T) - z$ ;
- Tot în Excel sau în Matlab se poate scrie un mic program de calcul al lui  $\alpha_n(T)$ , bazat pe relația de definiție a lui  $m_0$ ;
- Se reia acest ciclu și pentru restul intervalelor barei analizate, obținând în final legea de variație a coeficientului  $\alpha_n(T, z)$ .

### 5.3. Rezultatele cercetărilor prin MEF în ABAQUS

Simularea numerică a comportamentului termic a fost realizată în ABAQUS 6.13, atât pentru elementele structurale realizate la scările 1:1, 1:2 și 1:4, cât și pentru stâlpul redus la 1:10 prevăzut cu patru grinzi.

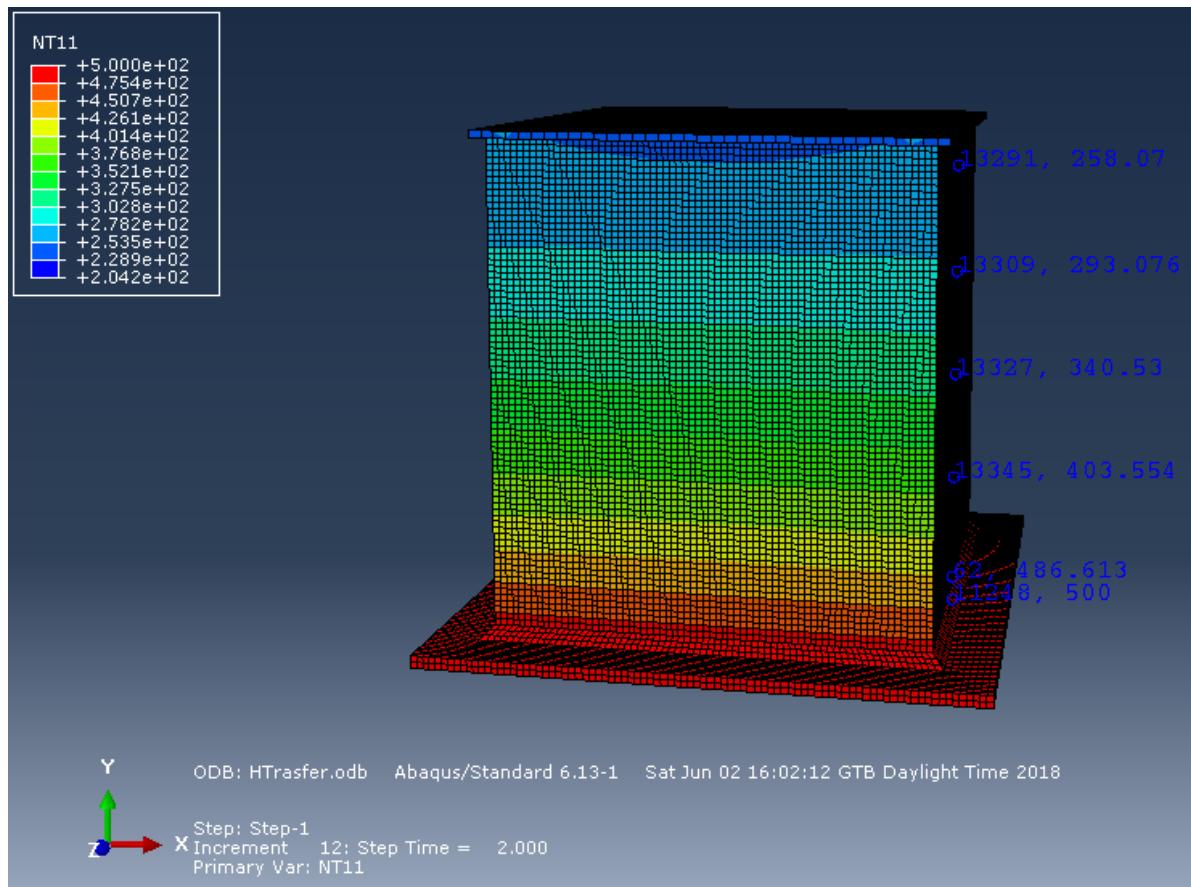
În **figurile 5.3.1.** și **5.3.2.** sunt prezentate rezultatele modelării prototipului neacoperit, respectiv acoperit cu vopsea termorezistentă. În **figura 5.3.3.** se prezintă diagrama de variație a temperaturilor pe baza măsurătorilor, aferentă regimului termic stabilizat, respectiv diagrama temperaturilor, ca rezultat al simulării numerice, corespunzătoare atingerii temperaturii nominale  $T_{0,n} = 500^\circ\text{C}$ . Dat fiind faptul că, în simularea numerică nu se putea impune atingerea unui regim termic stabilizat, ci doar o anumită temperatură în zona încălzită, se observă o altă alură a acesteia din urmă. Evident, pentru regimul stabilizat termic alura ar fi mult mai apropiată de curba experimentală. În figură sunt indicate și funcțiile polinomiale de aproximare ale acestor curbe.

În **tabelul 5.3.1.** sunt sintetizate principalele caracteristici ale modelărilor numerice.

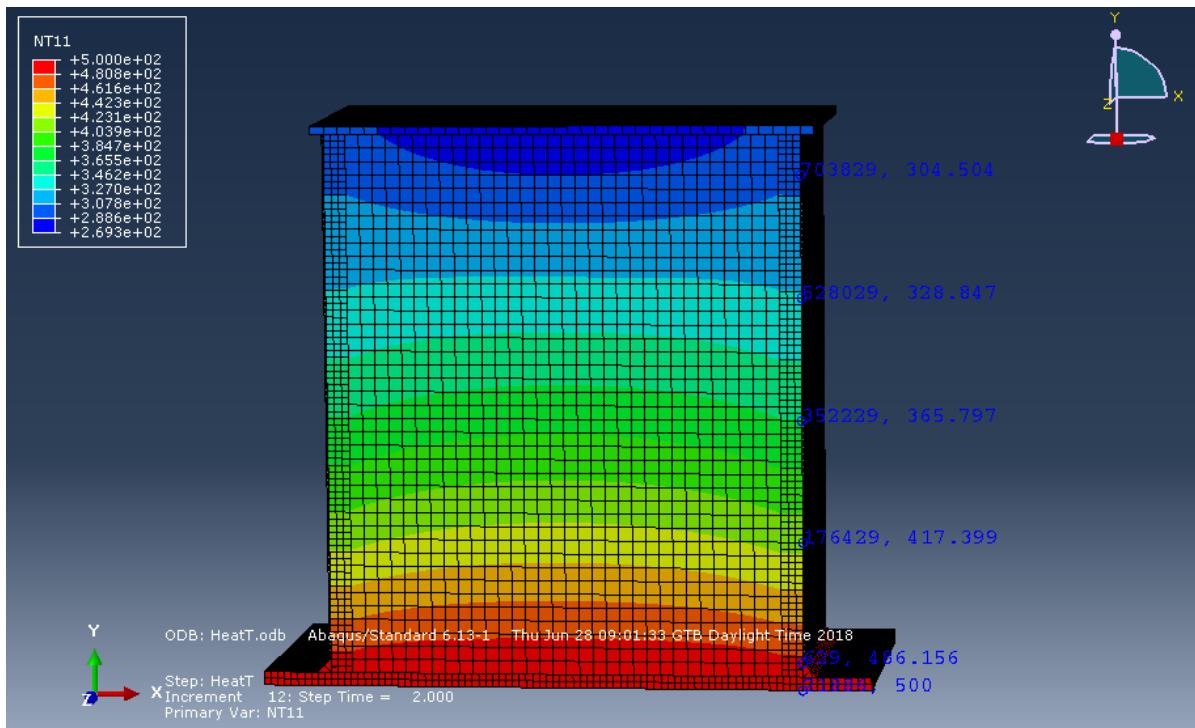
**Tabelul 5.3.1.**

Elementul structural		Numărul de elemente	Numărul de noduri	Tip element
Prototip	Nevopsit	145497	184546	Brick
	Vopsit	929969	1350506	Brick, Shell
Model redus Scara 1:2	Nevopsit	68068	85828	Brick
	Vopsit	243972	358752	Brick, Shell
Model redus Scara 1:4	Nevopsit	339590	417352	Brick
	Vopsit	387510	489840	Brick, Shell
Model redus Scara 1:10	Nevopsit	804449	240936	Brick
	Vopsit	830383	252386	Brick, Shell

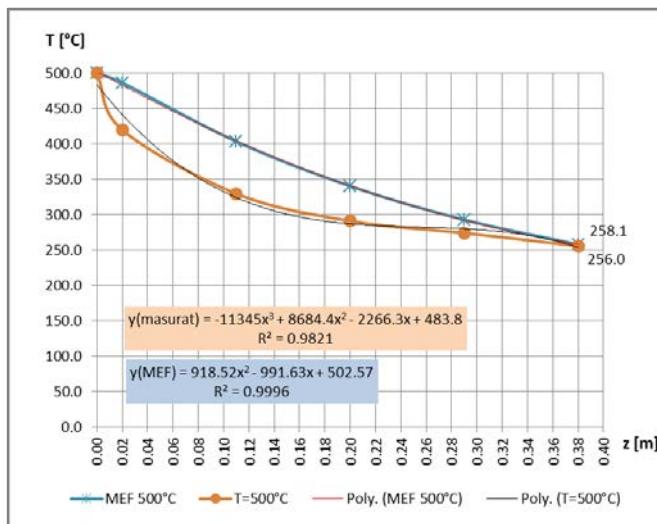




**Fig.5.3.1.** Distribuția temperaturii la prototipul nevopsit, pentru  $T_{0,n}=500^{\circ}\text{C}$



**Fig.5.3.2.** Distribuția temperaturii la prototipul vopsit, pentru  $T_{0,n}=500^{\circ}\text{C}$

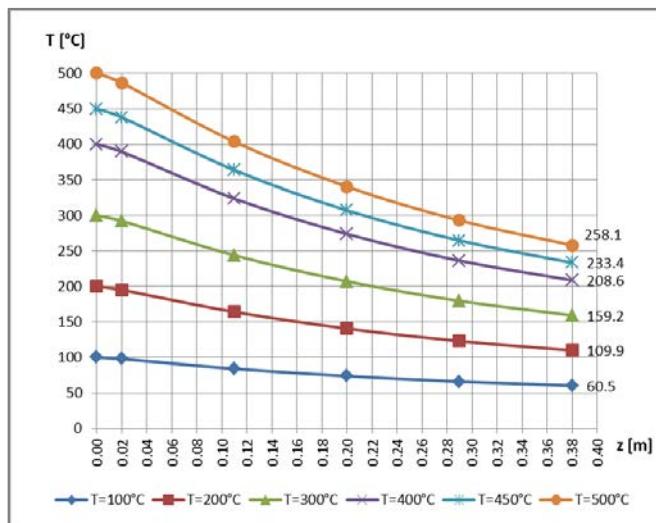


**Fig.5.3.3.** Compararea rezultatelor măsurătorilor cu cele de la MEF la prototipul nevopsit

În mod similar au fost efectuate simulările numerice și pentru modelele realizate la scara 1:2, respectiv 1:4, în cele două variante (nevopsit și vopsit), pentru care datele se regăsesc în lucrarea în extenso.

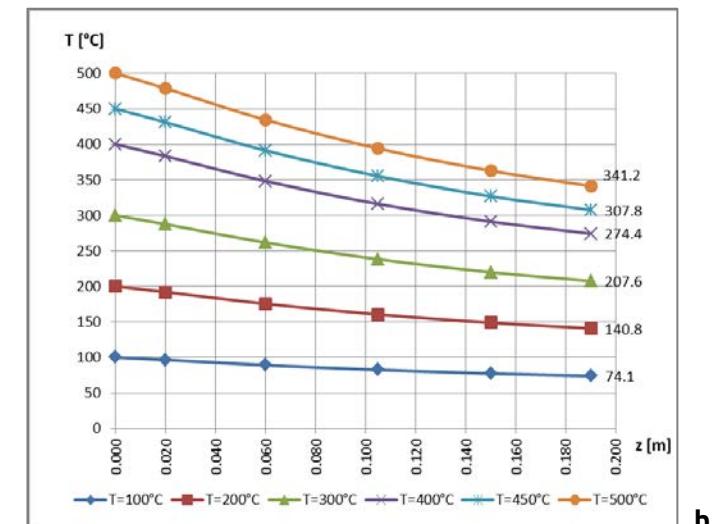
În figurile 5.3.8. a,b,c sunt sintetizate rezultatele analizei numerice la diferite temperaturi pentru cele trei elemente structurale în varianta nevopsită.

În vederea simulării comportamentului termic al unui stâlp redus la scara 1:10, prevăzut cu patru grinzi, s-a utilizat un model simplificat redat în figura 5.3.9.b. În acest model simplificat nu au fost incluse șuruburile și piulițele de fixare a grinzelor de stâlp, și nici găurile prevăzute pentru fixarea termorezistențelor PT pe grindă. Acest, al doilea lucru se justifică prin faptul că, în urma montajului PT-urilor acele găuri vor fi umplute cu metal și în consecință, nu vor prezenta reduceri de secțiune în calea fluxului termic. În vederea asigurării unui mediu ambiant similar cu cel prevăzut în experimente, acest subansamblu stâlp-grinzi a fost introdus într-un cilindru cu proprietăți termoizolatoare, având dimensiuni și proprietăți termice identice cu cele de la experimente.

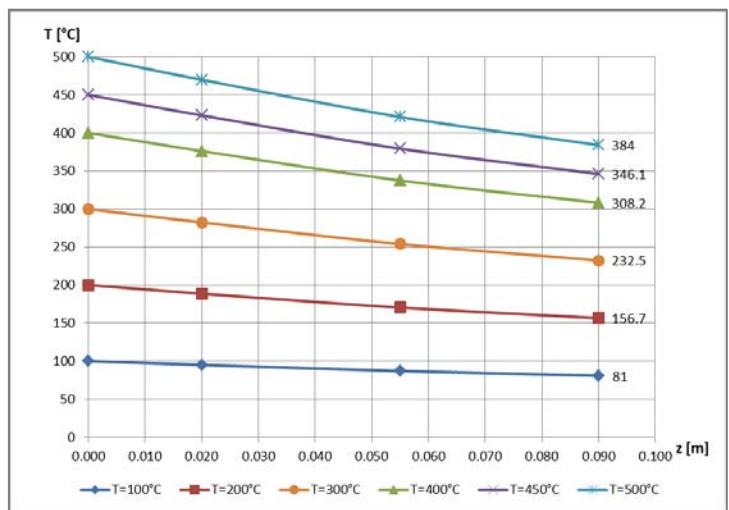


a.



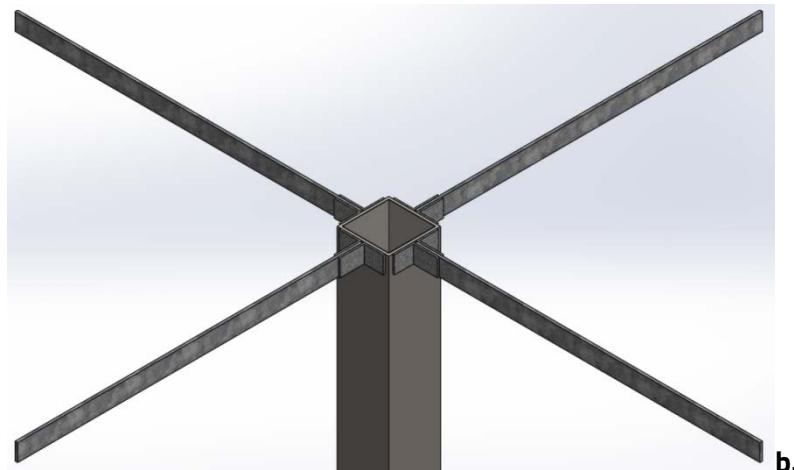


b.



c.

**Fig.5.3.8.** Sinteza variației temperaturii de-a lungul segmentelor nevopsite, obținută prin MEF: a.) prototip; b.) model redus la scara 1:2; c.) model redus la scara 1:4



b.

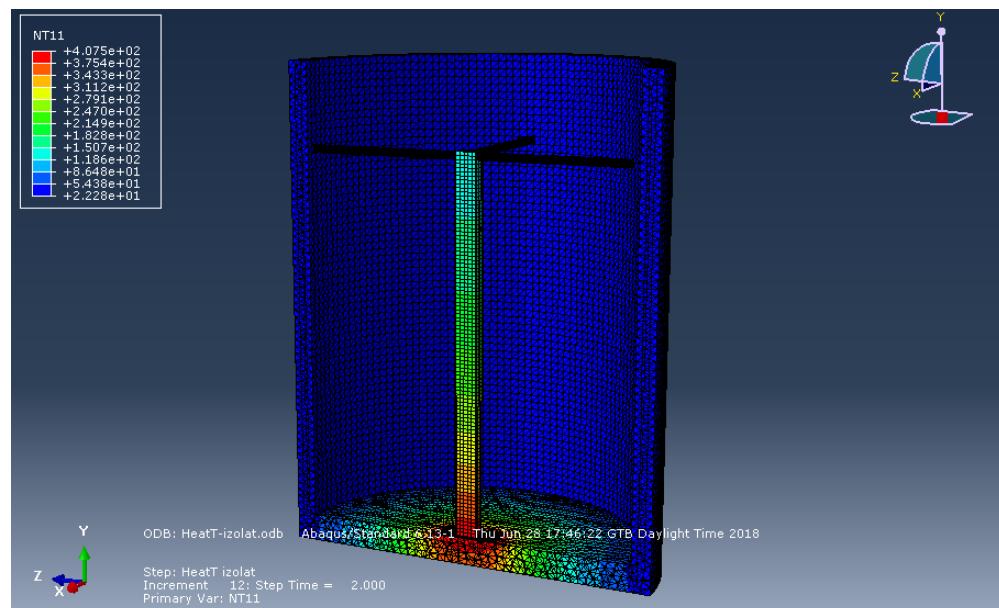
**Fig. 5.3.9.** Detaliu montaj simplificat



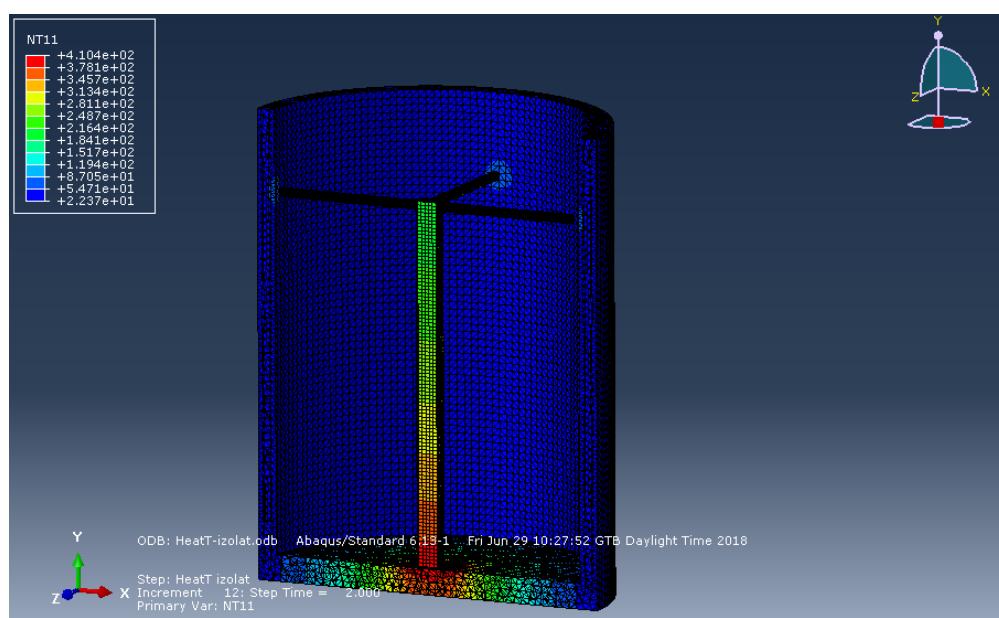
În figurile 5.3.10. și 5.3.11. sunt oferite rezultatele acestei modelări pentru versiunea neacoperită, respectiv acoperită cu vopsea termoizolatoare.

În comparație cu rezultatele măsurătorilor, și în acest caz apar diferențe, datorate nu numai acelor condiții semiturbulente din interiorul stâlpului (detaliate în **Capitolul 5.2.1.**), dar și simulării unor regimuri termice nestabilizate.

O altă cauză posibilă a diferențelor de la simulare față de măsurători, poate să fie imposibilitatea simulării numerice corecte a curentilor de aer din interiorul acestui cilindru protector, față de cazul real al experimentelor.



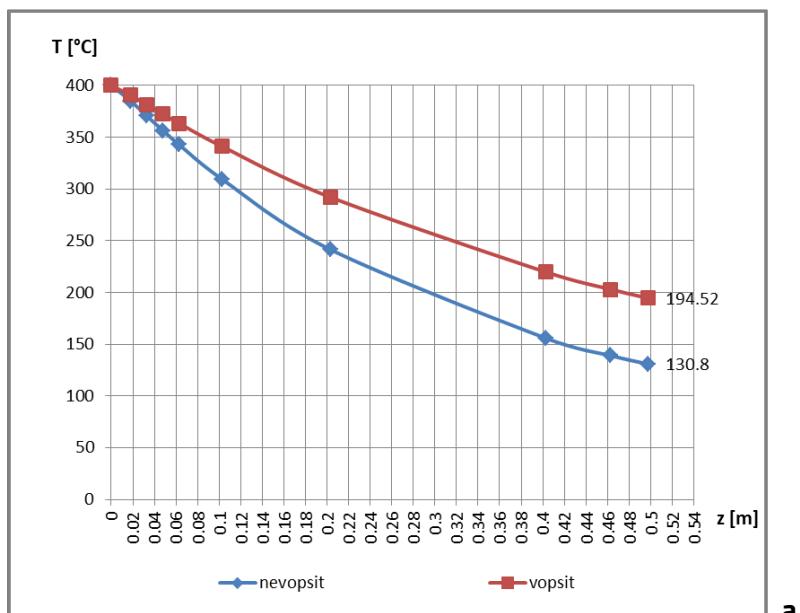
**Fig. 5.3.10.** Rezultatul simulării numerice la modelul nevopsit, prevăzut cu 4 grinzi



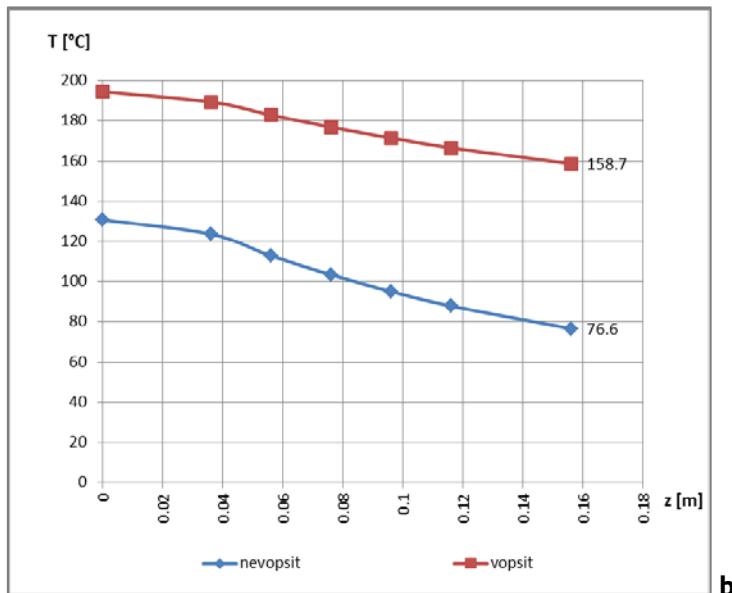
**Fig. 5.3.11.** Rezultatul simulării numerice la modelul vopsit, prevăzut cu 4 grinzi



**Figurile 5.3.12.a. și b.** oferă compararea rezultatelor simulării numerice pentru cele două variante (vopsit și nevopsit) ale stâlpului, respectiv grinzi reduse la scara 1:10. Se poate observa comportamentul diferit al acestora în dependență de varianta analizată.



a.



b.

**Fig. 5.3.12.** Compararea, în cele două variante (vopsit și nevopsit) a câmpului de temperaturi, obținută prin MEF de-a lungul: a.) stâlpului; b.) grinzi

Aceste rezultate ale simulării numerice sunt foarte apropiate de cele obținute experimental în varianta cilindrului protector acoperit. Probabil, analiza numerică consideră zona apropiată subansamblului studiat, ca fiind practic izolată de restul mediului înconjurător.



## 5.4. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost descrise condițiile, în care se realizează schimbul termic la o bară tubulară pătrată, încălzită la un capăt, fără să fie acoperită cu strat termoizolant.

În urma scrierii bilanțului termic, care a ținut cont, pe lângă conduction prin secțiunea transversală a barei, și de fenomenele de convecție și de radiație, care însotesc transferul de căldură de la capătul încălzit al barei către mediul înconjurător (aer). În acest sens, în cele din urmă, s-a obținut ecuația diferențială de ordinul doi, a cărei soluție generală descrie legea de variația a temperaturii de-a lungul barei.

Soluția omogenă este identică cu aceea de la bara de secțiune plină și conține printre altele parametrul  $m_0$ , care urmează să fie determinat.

În urma aplicării bilanțului termic la stâlpul redus la scara 1:10, încălzit la un capăt și neprotejat termic, s-au constatat abateri ale valorilor teoretice față de cele experimentale, datorită unor pierderi, care nu se puteau cuantifica în relații analitice și nici în măsurătorile experimentale.

Un alt aspect, analizat în cadrul acestui capitol, este legat de îmbunătățirea abordării curbei  $T(z)$  în vederea extragerii unor informații utile și cu efort minim. În acest sens, s-a propus în locul curbei exponentiale teoretice o aproximare polinomială, care din multe puncte de vedere prezinta avantaje nete. Totodată în vederea generalizării relațiilor  $T(z)$ , s-a propus o curbă adimensională  $T_\psi$  [%] la care temperaturile de la nivelul unor cote  $z$  reprezentau procente din temperatura bazei încălzite  $T_{0,n}$ . În continuare, printr-o aproximare polinomială a acestei curbe  $T_\psi$ , devine posibilă analiza mult mai eficientă a fenomenului de propagare a căldurii, deoarece, după cum s-a arătat în acest capitol, curbele  $T_\psi$  aferente unor temperaturi nominale  $T_{0,n}$  diferite chiar cu sute de grade, prezintă aluri identice și astfel, ele se puteau sintetiza într-o singură.

Tot în cadrul acestui capitol, a fost prezentată și o strategie originală de calcul al parametrului  $m_0$ , precum și al coeficientului de transfer termic prin convecție  $\alpha_n$ .

Un ultim obiectiv al acestui capitol a constat în efectuarea unor simulări numerice pe elemente structurale analizate în investigațiile experimentale și în compararea câmpurilor termice obținute cu cele experimentale.

Pe baza experienței acumulate, după cum se va arăta și în **Capitolul 7.**, aceste investigații teoretice și experimentale au deschis noi orizonturi în analiza fenomenului de protecție la incendii.



## 6. IMPLEMENTAREA AVANTAJELOR ANALIZEI DIMENSIONALE ÎN INVESTIGAȚII PE MODELE REDUSE LA SCARĂ

### 6.1. Considerații teoretice de bază [SZI97]

În cadrul tezei, pentru acest capitol, există o analiză detaliată, însă aici, datorită spațiului limitat, vor fi prezentate numai aspectele cele mai elocvente.

#### 6.1.1. Proprietățile de bază ale mărimilor fizice

Orice sistem de unități prezintă *dimensiuni de bază* (care sunt adoptate în prealabil) și *derivate* (care rezultă, prin aplicarea unor relații fundamentale asupra respectivelor mărimi; spre exemplu, viteza liniară  $v$ :  $m/s$ , accelerația liniară  $m/s^2$ ); la noi se aplică sistemul de unități *SI*.

Mărimile fizice a căror dimensiune este egală cu unitatea, în mod curent se numesc *mărimi adimensionale* (cum ar fi: coeficientul lui Poisson  $\nu[-]$ , deformația specifică linară  $\varepsilon[-]$  și altele). Mărimile fizice pot fi constante sau variabile, iar cele variabile pot fi independente și dependente.

În cadrul unei relații fizice poate exista *o singură variabilă dependentă* și un număr finit de variabile independente. Variabilele se vor nota prin  $V_1, V_2, V_3$ , pe când dimensiunile acestora prin  $d_1, d_2, d_3$ ,

*Dimensiunile derivate* se obțin printr-o combinație de tipul  $d_1^{e_1} \cdot d_2^{e_2} \cdot d_3^{e_3} \cdots \cdot d_n^{e_n}$  a dimensiunilor de bază, unde  $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$  sunt exponenții dimensiunilor de bază, pe când  $n$  este numărul dimensiunilor de bază implicate.

O variabilă oarecare  $V_j$  are dimensiunea  $[V_j] = \alpha_j \cdot d_1^{e_{1j}} \cdot d_2^{e_{2j}} \cdot d_3^{e_{3j}} \cdots$ , unde  $\alpha_j$  este un coeficient numeric (o constantă oarecare).

Regulile de bază ale *omogenității dimensionale* sunt descrise în lucrarea in extenso.

#### 6.1.2. Matricea dimensională

*Matricea dimensională DM (Dimensional Matrix)* se formează din exponenții tuturor dimensiunilor implicate, care descriu totalitatea variabilelor independente și pe aceea dependente.

Spre exemplu, să considerăm cazul a patru variabile (printre care una este dependentă, spre exemplu:  $V_1$ ), care sunt descrise de următoarele relații dimensionale:

$$\begin{aligned} V_1 &= d_1^{\alpha_1} \cdot d_2^{\beta_1} \cdot d_3^{\gamma_1} \cdot d_4^{\delta_1}; \\ V_2 &= d_1^{\alpha_2} \cdot d_2^{\beta_2} \cdot d_3^{\gamma_2} \cdot d_4^{\delta_2}; \\ V_3 &= d_1^{\alpha_3} \cdot d_2^{\beta_3} \cdot d_3^{\gamma_3} \cdot d_4^{\delta_3}; \\ V_4 &= d_1^{\alpha_4} \cdot d_2^{\beta_4} \cdot d_3^{\gamma_4} \cdot d_4^{\delta_4}; \end{aligned} \tag{6.1}$$



Se formază *matricea dimensională* din exponentii dimensiunilor

$$\begin{array}{c} & (V_1) & (V_2) & (V_3) & (V_4) \\ 
 (d_1) & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ 
 (d_2) & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \\ 
 (d_3) & \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \\ 
 (d_4) & \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 \end{array} \quad (6.2)$$

Matricea asociată  $\mathbf{M}$  este deci:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \\ \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

În cazul general avem  $N_V$  variabile (independente și aceea dependentă) și  $N_d$  dimensiuni (de bază), care definesc, atât matricea dimensională, cât și pe aceea asociată ei  $\mathbf{M}$ , sub forma unor matrici cu  $N_d$  linii și  $N_V$  coloane. Se recomandă, ca variabila dependentă să fie întotdeauna  $V_1$ .

Se caută acea submatrice pătratică  $\mathbf{A}$ , începând cu elementele din dreapta sus a matricei  $\mathbf{M}$ , care are rangul maxim, și care va reprezenta și rangul matricei dimensionale propriu-zise  $R_{DM} = r$ . Acest lucru presupune eliminarea unor linii (*dimensiuni care nu se vor putea alege*, ci vor rezulta dintr-un calcul arătat mai jos) și coloane din matricea  $\mathbf{M}$ , și implicit alegerea acelor variabile independente, ale căror dimensiuni vor avea exponentii cuprinși în matricea  $\mathbf{A}$ . Această matrice  $\mathbf{A}$  evident nu are voie să fie singulară ( $\det|\mathbf{A}| \neq 0$ ), iar liniile sale conțin exponentii dimensiunilor principale ale variabilelor independente păstrate. Liniile rămase din matricea  $\mathbf{M}$  formează așa-numita *matricea dimensională redusă*. Aceste linii conțin *dimensiunile principale* (adică *dimensiunile care pot fi alese arbitraj*), iar coloanele sale, neincluse în matricea  $\mathbf{A}$ , vor forma matricea  $\mathbf{B}$ .

### 6.1.3. Multimea dimensională și determinarea variabilelor cu dimensiuni impuse

Pe baza metodologiei prezentate în lucrarea [SZI97] se definește *Multimea dimensională  $\mathbf{M}_1$* , respectiv se exemplifică după aceeași lucrare pe cazul existenței a 6 variabile ( $V_1$  –dependentă, iar  $V_2 \dots V_6$  –variabilele independente) și 4 dimensiuni  $d_1, \dots, d_4$ , cu următoarele elemente:

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	
$d_1$	1	2	3	5	2	3	Matricea dimensională redusă $(\mathbf{B}+\mathbf{A})$
$d_2$	4	1	2	1	2	4	
$d_3$	5	3	5	6	4	7	Dimensiuni eliminate (șterse)
$d_4$	9	4	7	7	6	11	



Forma generală a multimii dimensionale  $M_1$  este:

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$
$d_1$						
$d_2$					$A$	
$\tau_1$						
$\tau_2$						
$\tau_3$			$D$		$C^*)$	
$\tau_4$						
$\tau_5$						

(6.5)

\*) Cazul ilustrat în acest exemplu numeric, reprezintă cazul unor noi variabile cu dimensiuni impuse  $\tau_j$  (fără a fi adimensionale), ceea ce pentru teza de doctorat nu a constituit subiect de analiză; relația de calcul a matricei  $C$  sub forma ei generală se regăsește în lucrarea [SZI97]. Trebuie menționat faptul că, relația de calcul al matricei  $C$ , sub forma  $C = -(A^{-1} \cdot B)^T$ , utilizată în calculele de față, corespunde aceluia caz, în care s-a optat pentru setul de noi variabile ca fiind adimensionale  $\pi_j$ .

În cazul prezentat a fost impus faptul că, în expresiile tuturor noilor variabile dimensionale  $\tau_j$  să avem  $(d_1^2 \cdot d_2^3)$ , iar exponenții  $d_3 \cdot d_4$  (de asemenea identici în toate aceste variabile dimensionale  $\tau_j$ ) să rezulte în urma acestui calcul al multimii dimensionale.

Plecând de la coloana dreapta sus din elementele lui (6.4), s-a găsit rangul cel mai mare  $r = 2$  al matricei  $A$ , corespunzător liniilor  $(d_1 - d_2)$  și coloanelor  $(V_5 - V_6)$ . Elementele rămase în primele două rânduri formează matricea  $B$ , adică liniile  $(d_1 - d_2)$  și coloanele  $(V_1 - V_4)$ .

În consecință avem:

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 \\ 4 & 1 & 2 & 2 \end{bmatrix},$$

iar în urma calculelor, pe baza relației generale deduse în lucrarea [SZI97], se obține:

$$C = \begin{bmatrix} 3.5 & -2 \\ -3 & 2 \\ -3.5 & 2 \\ -9 & 5 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (6.6)$$



Matricea  $D$  se formează (prin alegerea arbitrară a elementelor sale), astfel, încât să completeze mulțimea dimensională, prin oferirea a trei linii și cinci coloane.

Dacă elementele care lipsesc necesită număr egal de linii și coloane, atunci matricea  $D$  va fi o matrice pătratică, și se preferă să fie matricea unitate, adecvată acestei dimensiuni; în caz contrar, elementele sale se aleg liber, însă impunând condiția independentei între ele a coloanelor sale; pentru aceste elemente alese liber, se preferă numere cât mai mici (0 și 1).

Indiferent de modul în care sunt alese elementele matricei  $D$ , rezultatul final, în ceea ce privește, atât matricea  $C$ , cât și expresiile noilor variabile impuse  $\tau_j$ , vor fi același.

În cazul de față s-a optat pentru

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6.7)$$

În urma înlocuirii celor patru matrici ( $A$ ,  $B$ ,  $C$  și  $D$ ), rezultă elementele efective ale acestei mulțimi dimensionale  $M_1$ :

$$M_1 = \begin{bmatrix} & (V_1) & (V_2) & (V_3) & (V_4) & (V_5) & (V_6) \\ (d_1) & 1 & 2 & 3 & 5 & 2 & 3 \\ (d_2) & 4 & 1 & 2 & 1 & 2 & 4 \\ (\tau_1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 3.5 & -2 \\ (\tau_2) & 0 & 1 & 0 & 0 & -3 & 2 \\ (\tau_3) & 0 & 0 & 1 & 0 & -3.5 & 2 \\ (\tau_4) & 0 & 0 & 0 & 1 & -9 & 5 \\ (\tau_5) & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (6.8)$$

Astfel, devine posibilă identificarea celor 5 variabile noi cu dimensiuni impuse a priori:

$$\tau_1 = \frac{V_1 \cdot V_3^{3.5}}{V_6^2}; \quad \tau_2 = \frac{V_2 \cdot V_6^2}{V_5^3}; \quad \tau_3 = \frac{V_3 \cdot V_6^2}{V_3^{3.5}}; \quad \tau_4 = \frac{V_4 \cdot V_6^5}{V_5^9}; \quad \tau_5 = \frac{V_1 \cdot V_2 \cdot V_5}{V_6}. \quad (6.9)$$

În toate aceste noi variabile  $\tau_j$ , exponentii dimensiunilor principale (care au putut fi alese, a priori și în mod independent) toți vor fi identici, cu cei arbitrar aleși la început, adică  $(d_1^2 \cdot d_2^3)$ , pe când exponentii dimensiunilor auxiliare (adică ale celor dependente și care rezultă prin calculul bazat pe această metodologie de mai sus) vor fi toți  $d_3^5 \cdot d_4^8$ .

Dacă coloanele matricei  $D$  ar fi dependente între ele, atunci aceste noi variabile  $\tau_j$  ar fi dependente între ele, ceea ce ar conduce de fapt la obținerea unui număr mai mic de noi variabile  $\tau_j$ .



În exemplul anterior s-au căutat acei exponenti  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots$  ai variabilelor  $V_j$ , care satisfac o condiție dimensională prealabil impusă ( $d_1^{q_1} \cdot d_2^{q_2} \cdot d_3^{q_3} \cdots$ ), adică să satisfacă relația dimensională

$$V_1^{\varepsilon_1} \cdot V_2^{\varepsilon_2} \cdot V_3^{\varepsilon_3} \cdots = d_1^{q_1} \cdot d_2^{q_2} \cdot d_3^{q_3} \cdots ; \quad (6.10)$$

iar în urma acestor calcule au fost găsite toate variantele căutate.

S-a arătat faptul că, rangul matricei dimensionale este identic cu numărul dimensiunilor independente, adică al liniilor independente din matricea dimensională.

Să considerăm  $N_{q \neq 0}$  numărul exponentilor  $q_i$  ai dimensiunilor din relația (6.10), care sunt diferiți de zero pentru condiția de mai înainte.

În consecință, avem:

$N_V$  - numărul variabilelor (al tuturor variabilelor);

$N_d$  - numărul dimensiunilor;

$N_{q \neq 0}$  - numărul acelor exponenti  $q_i$ , care sunt diferiți de zero;

$N_p$  - numărul grupurilor (expresiilor)  $d_1^{q_1} \cdot d_2^{q_2} \cdot d_3^{q_3} \cdots$ , care se pot forma, cu dimensiuni independente impuse; aceste grupuri pot fi după dorință, fie dimensionale, fie adimensionale; ele se vor numi în continuare *variabile noi cu dimensiuni impuse*;

$R_{DM} = r$  - rangul matricei dimensionale (care este de fapt  $r = N_d$ ).

Există două cazuri distințe și anume:

1.  $N_{q \neq 0} = 0$ , când numărul  $N_p$  al soluțiilor (deci al grupurilor independente) este  $N_p = N_V - r$ ;
2.  $N_{q \neq 0} > 0$  (cazul în care cel puțin un exponent impus este diferit de zero), când avem  $N_p = N_V - r + 1$ .

Primul caz este cel descris de *teorema lui Buckingham*.

#### *Observații utile:*

1. Dacă matricea  $A$  este singulară, atunci pentru cazul:

- $\Delta = N_d - r = 0$  se aplică schimbarea între ele a două linii sau coloane și astfel, matricea  $A$  devine nesingulară;
- $\Delta = N_d - r > 0$  trebuie să eliminăm un număr de  $\Delta$  dimensiuni (adică să eliminăm  $\Delta$  linii din matricea dimensională inițială) și în consecință: tot atâtea dimensiuni vor deveni dependente (deci nu se pot alege a priori). Astfel, va rezulta matricea dimensională redusă, considerată în cele ce urmează, ca fiind nouă matrice dimensională, cu care se lucrează.

2. Dacă noile variabile cu dimensiuni impuse au dimensiuni diferite de unitatea (deci nu sunt adimensionale, după uzanța din inginerie, sau  $[\tau_j] \neq 1$ ), atunci se vor nota prin  $\tau_j$ , iar dacă sunt adimensionale ( $[\pi_j] = 1$ ), le vom nota prin  $\pi_j$ ;

3. Dacă a trebuit să eliminăm un număr de linii (deci și de dimensiuni) pentru a obține din matricea dimensională o matrice  $A$  nesingulară, atunci dimensiunile eliminate devin automat dependente, adică exponentii lor (în acel set de variabile noi, cu dimensiuni impuse a priori) vor rezulta prin calculul aferent mulțimii dimensionale (adică nu se pot impune de la bun început).



4. Se dorește obținerea unui număr minim  $N_p$  de variabile noi cu dimensiuni impuse (fie dimensionale, fie adimensionale), deoarece descrierea fenomenului urmărit devine mai clar și mai precis; cazurile ideale sunt:

- $(N_p)_{\min} = 1$  dacă  $N_{q \neq 0} = 0$ , respectiv
- $(N_p)_{\min} = 2$  dacă  $N_{q \neq 0} > 0$ .

Acest lucru înseamnă că, dacă variabilele noi impuse sunt adimensionale, numărul lor minim este 1, iar dacă sunt dimensionale, numărul lor minim este 2.

5. Dacă  $N_p = 1$ , atunci variabila nouă este sigur adimensională și egală cu o constantă;
6. Dacă numărul inițial al dimensiunilor este egal cu cel al variabilelor, atunci matricea dimensională este singulară și trebuie să aplicăm recomandările de la Observația nr.1;
7. Dacă numărul inițial al dimensiunilor este mai mare decât al variabilelor, atunci sigur va trebui eliminat un număr de dimensiuni, pentru a face matricea dimensională nesingulară.
8. Relația de calcul a matricei  $C$  sub forma  $C = -(A^{-1} \cdot B)^T$ , corespunde cazului, în care s-a optat pentru ca setul de noi variabile să fie adimensional  $\pi_j$ ;
9. Dacă s-a optat pentru setul de noi variabile adimensionale  $\pi_j$  și matricea  $D$  ar fi pătratică, însă neunitară (folosim o altă completare cu valori numerice ale elementelor sale, nu aceea de matrice unitate  $I_{n \times n}$ ), atunci relația de calcul a matricei  $C$  devine:  $C = -D \cdot (A^{-1} \cdot B)^T$ , după cum este demonstrată în lucrarea [SZI97];
10. Formula generalizată a matricei  $C$  (pentru cazul unui set de variabile noi cu dimensiuni alese a priori, și care nu sunt variabile adimensionale, adică se caută mulțimea  $\tau_j$ ), se regăsește în lucrarea [SZI97], însă în cazul tezei nu a fost relevantă pentru investigațiile experimentale;
11. Schimbarea liniilor din matricea dimensională nu influențează mărimea matricei  $C$  și în consecință, nici componenta mărimilor adimensionale ( $\tau_j$  sau  $\pi_j$ ) obținute;

#### **6.1.4. Relevanța, respectiv irelevanța dimensională a unei variabile**

O variabilă este *irelevantă dimensională*, dacă *numai datorită dimensiunii sale* nu poate să facă parte din nici o relație dintre variabile; o astfel de variabilă poate să facă parte numai din matricea  $A$  și niciodată din  $B$ .

Această irelevanță se poate evidenția, respectiv se poate demonstra prin faptul că, în matricea  $C$ , coloana aferentă acestei variabile, conține numai termeni nuli, ceea ce se va reflecta și în rândurile corespunzătoare ale variabilelor adimensionale obținute ( $\tau_j$  sau  $\pi_j$ ).

*Teoreme utile în acest sens* sunt următoarele:

1. Dacă o variabilă are o asemenea dimensiune de bază (fundamentală), care nu se regăsește în restul variabilelor, atunci respectiva *variabilă este dimensională irelevantă* în respectivul context;
2. Dacă o variabilă este irelevantă dimensională într-o matrice dimensională restrânsă ( $A+B$ ), atunci indiferent ce dimensiuni are, tot irelevantă dimensional rămâne;



3. Eliminarea din matricea dimensională (deci și din mulțimea dimensională) a unui număr de  $n$  variabile irelevante dimensionale, conduce la reducerea tot cu  $n$  a rangului matricei dimensionale, fără a schimba compoziția variabilelor adimensionale urmărite ( $\tau_j$  sau  $\pi_i$ );
4. Dacă o dimensiune este prezentă numai într-o singură coloană a unei matrici dimensionale, atunci această variabilă poate fi considerată a fi irelevantă dimensional și exclusă din respectiva matrice, deoarece în urma efectuării tuturor calculelor în coloana aferentă a matricei  $C$  se vor obține numai termeni nuli (deci într-adevăr, respectiva variabilă este irelevantă dimensional);
5. Repetarea acestui procedeu de excludere se numește *efectul în cascadă (Cascading Effect)*, iar în urma acestui proces, deși se reduce mulțimea dimensională, totuși se vor păstra toți parametrii adimensionali căutați ( $\tau_j$  sau  $\pi_i$ ); totodată, se poate verifica, dacă nu cumva s-a omis vreo variabilă relevantă din matricea dimensională;
6. Dacă prin excluderea unei variabile, matricea  $A$  devine nulă, deci singulară, atunci respectiva variabilă este sigur irelevantă dimensional.

### 6.1.5. Irrelevantă fizică a unei variabile

Spunem că, o variabilă este irrelevantă din punct de vedere fizic într-o relație, dacă influența ei asupra modificării variabilei dependente este nesemnificativă (se află sub un anume prag minimal impus); ea poate fi așezată numai în matricea  $A$ , și în consecință, își va face apariția numai într-o singură variabilă adimensională  $\pi_i$ .

*Condiția suficientă*, ca o variabilă să fie irrelevantă din punct de vedere fizic este, ca aceasta să fie irrelevantă din punct de vedere dimensional.

*Irrelevantă dimensională* a unei variabile nu reprezintă *condiția necesară* a irrelevantă sale din punct de vedere fizic.

Diagrama Venn din **figura 6.1.1.** [SZI97] ilustrează foarte bine aceste două condiții și anume: arată că, variabila  $V_1$  este relevantă, pe când  $V_2$  și  $V_3$  sunt irrelevante;  $V_2$  este irrelevantă numai din punct de vedere fizic, pe când  $V_3$  și din cel dimensional.

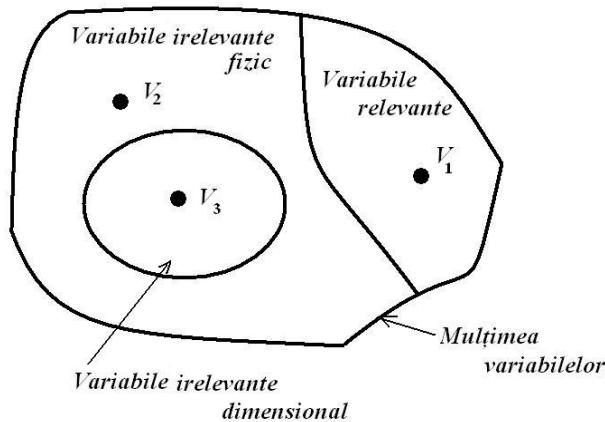


Fig. 6.1.1. Diagrama Venn privind cazurile de irrelevantă [SZI97]



Variabila irelevantă din punct de vedere fizic poate să apară numai într-o singură variabilă adimensională și în consecință, această variabilă adimensională poate fi neglijată.

În caz contrar, multimea dimensională trebuie astfel modificată, încât această variabilă să ajungă în matricea  $B$ .

Trebuie menționat și faptul că, variabila dependentă se recomandă să fie așezată tot în matricea  $B$  și astfel, chiar dacă sunt mai multe variabile adimensionale dependente, care le constituie, se pot separa cu ușurință.

Aceeași recomandare rămâne valabilă și în cazul existenței mai multor variabile dependente, unde toate variabilele dependente se vor așeza în matricea  $B$ , iar toate variabilele independente în matricea  $A$ .

Dacă într-o relație de tipul  $\pi_1 = \Psi\{\pi_2\}$ , modificarea lui  $\pi_2$  nu schimbă mărimea lui  $\pi_1$ , atunci toate variabilele, care sunt prezente în  $\pi_2$ , însă lipsesc din  $\pi_1$ , sunt irelevante din punct de vedere fizic pentru  $\pi_1$ , ceea ce se poate verifica ușor pe baza reprezentării grafice a relației  $\pi_1 = \Psi\{\pi_2\}$ , cum se arată în lucrarea [SZI97].

*Un avantaj incontestabil* al Analizei Dimensionale rezidă în simplificarea reprezentărilor grafice ale variabilei dependente în funcție de cele independente.

Spre exemplu, dacă au rezultat două variabile adimensionale  $\pi_1$  și  $\pi_2$ , atunci graficul  $\pi_1 = \Psi\{\pi_2\}$  echivalează cu un număr însemnat de nomograme, care doresc să reflecte legătura variabilei dependente de cele independente, cu luarea în considerație a parametrilor rezultați în urma analizei matricei dimensionale.

Spre exemplu, în cazul unui singur parametru și  $k$  valori distincte ale variabilei independente, vor fi necesare un număr de  $k$  curbe; dacă sunt doi parametri și  $k$  valori distincte ale variabilei independente, atunci vor fi necesare  $k^2$  curbe, iar în cazul a  $p$  parametri, numărul necesar de curbe se ridică la  $k^p$ , față de un singur grafic  $\pi_1 = \Psi\{\pi_2\}$ !

În urma obținerii numărului finit de variabile adimensionale (spre exemplu:  $\pi_1, \dots, \pi_4$ ), legătura cea mai simplă și totodată eficientă a corelației acestora este sub formă monomială, cum ar fi:

$$\pi_1 = c \cdot \pi_2^{\varepsilon_2} \cdot \pi_3^{\varepsilon_3} \cdot \pi_4^{\varepsilon_4}, \quad (6.11)$$

unde:

$c$  reprezintă o constantă, iar

$\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  - exponenti numerici.

Determinarea acestor mărimi ( $c$  și  $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ ) necesită un număr finit de măsurători experimentale, egal cu numărul acestor variabile adimensionale, care în acest caz este 4.

Pe baza măsurătorilor efectuate, prin înlocuiri în relația (6.11), se va scrie sistemul de ecuații al acestor mărimi necunoscute, iar *condiția necesară și suficientă a existenței unei soluții unice*, este ca matricea coeficienților acestor necunoscute să nu fie singulară.

Încă odată se subliniază faptul că, variabilele fizice adimensionale relevante trebuie să fie poziționate în matricea  $B$  și nu în  $A$ .



În matricea  $A$  a mulțimii dimensionale nu pot exista mai multe variabile cu aceleași dimensiuni, altfel această matrice devine singulară.

Însă, în matricea  $B$  a mulțimii dimensionale pot exista mai multe variabile cu aceleași dimensiuni.

Relațiile, care conțin mai multe variabile adimensionale dependente  $\pi_i$ , sunt interzise, fiind inutilizabile.

Totuși, dacă avem mai multe variabile adimensionale, ele se pot îngloba într-o singură mulțime dimensională, cu condiția, ca toate variabilele dependente să fie amplasate în  $B$ , și toate variabilele independente în  $A$ . În acest caz, toate variabilele independente vor fi considerate, ca fiind separate de restul (variabilelor independente) și în consecință, în fiecare variabilă adimensională își va face apariția numai câte o variabilă dependentă, adică: fiecare variabilă adimensională va conține numai câte o singură variabilă dependentă.

#### **6.1.6. Metode de reducere ale numărului variabilelor adimensionale**

În Subcapitolul 6.1.3. s-a arătat faptul că, numărului  $N_p$  al variabilelor adimensionale  $\pi_i$  este:

$$N_p = N_v - R_{DM}, \quad (6.12)$$

însă, în condiții uzuale  $R_{DM} = N_d$  și astfel relația (6.12) devine:

$$N_p = N_v - N_d. \quad (6.13)$$

Ideal ar fi să avem  $N_p=1$ , pentru care trebuie să recurgem la *metode de reducere a numărului variabilelor adimensionale  $N_p$* .

Acstea *metode de reducere* sunt obținute prin:

1. reducerea numărului variabilelor independente  $N_v$ ;
2. comasarea variabilelor adimensionale;
3. creșterea numărului dimensiunilor implicate  $N_d$ .

În toate aceste cazuri trebuie să cunoaștem foarte bine noțiunile teoretice, care guvernează fenomenul, altfel metoda nu va da rezultatul scontat.

#### **6.1.7. Aspecte de bază ale modelării dimensionale**

Rolul *modelării dimensionale* constă în posibilitatea efectuării unor încercări/teste pe modele reduse la scară, iar rezultatele obținute să fie extrapolate la prototip.

În realizarea unei modelări eficiente, este necesară înțelegerea fenomenului fizic de bază, iar introducerea tuturor mărimilor relevante (variabile, parametri, respectiv constante) este obligatoriu.

Însă, nu este necesară cunoașterea în detaliu a modului în care aceste mărimi relevante influențează fenomenul în ansamblu; acesta este poate cel mai mare avantaj al modelării dimensionale.



Principalele etape ale modelării dimensionale sunt:

- crearea bazei teoretice, care cuprinde și legea modelului;
- conceperea modelului;
- realizarea fizică a modelului;
- efectuarea testelor pe model;
- analiza critică a rezultatelor obținute,
- extrapolarea rezultatelor obținute la prototip.

În cadrul modelării dimensionale se dorește să fie analizate/comparate *fenomene omoloage*, care se petrec în timpi omologi, adică, dacă prezintă poziții, forme, deformații etc., omoloage în timpi omologi.

Altfel spus, când în cele două sisteme se produc fenomene similare (cum ar fi spre exemplu, atingerea pozițiilor elongațiilor maxime), în timpi omologi (care evident, nu se vor produce neapărat după intervale identice de timp în cele două sisteme).

Câteva cazuri de similitudine des întâlnite sunt:

- *Similitudinea geometrică*, care presupune existența unei scări a reducerii (sau măririi) dimensiunilor, în vederea obținerii dintr-un prototip a modelului corespunzător;
- *Similitudinea cinematică* presupune faptul că, punctele omoloage, în timpi omologi, prezintă aceleași legi de mișcare;
- *Similitudinea dinamică* are loc, dacă asupra punctelor omoloage, în timpi omologi, acționează sarcini identice;
- *Similitudinea termică* presupune atingerea, în timpi omologi, a unor temperaturi identice, în punctele omoloage ale celor două sisteme;
- *Similitudinea dimensională* presupune faptul că, toate mărimile adimensionale implicate în descrierea celor două sisteme fizice, trebuie să fie identice (rând pe rând), atât din punctul de vedere al expresiilor, cât și al mărimilor.

*Similitudinea dimensională reprezintă piatra fundamentală a modelării dimensionale.* S-a arătat faptul că, comportamentul unui sistem este definit de multimea variabilelor adimensionale, stabilită pe baza variabilelor independente relevante.

Altfel spus, cele două sisteme vor fi similare dimensional, dacă aceste variabile adimensionale corespunzătoare (rând pe rând), vor lua valori identice în cele două sisteme. De aceea, rezultatele măsurătorilor obținute pe un sistem pot fi transferate și la celălalt sistem, ceea ce reprezintă și esența modelării dimensionale.

Însă, multimea variabilelor (fizice) independente relevante poate conține numai o singură variabilă dependentă.

Se pot formula următoarele *legi de bază ale modelării dimensionale*:

- În definirea multimii variabilelor adimensionale trebuie să existe o singură variabilă (fizică) dependentă;
- Această variabilă dependentă poate să apară numai într-una din aceste variabile adimensionale; în acest sens, se recomandă dispunerea acestei variabile dependente în matricea **B** a multimii dimensionale;



- Scara  $S$  a unei variabile fizice oarecare reprezintă raportul dintre mărimea acestei variabile la model (indexată cu 2) și la prototip (indexată cu 1); spre exemplu scara lungimilor;

$$S_L = \frac{L_2}{L_1} = \frac{\text{lungimea modelului}}{\text{lungimea prototipului}}.$$

- În oricare modelare dimensională există atâtea scări, câte variabile fizice am avut;
- În fiecare variabilă adimensională  $\pi_i$ , expresiile variabilelor independente implicate se vor înlocui cu aceste scări  $S$ .
- În cadrul modelării dimensionale, variabilele și constantele fizice implicate se pot împărti în trei categorii distincte, și anume:
  - Categoria 1.* - mărimele, care se aleg în mod liber, adică cele, ale căror mărimi se cunosc în prealabil (fie că sunt mărimi date, fie se pot alege sau calcula înaintea începerii procesului de modelare);
  - Categoria 2.* – mărimele, care se obțin prin aplicarea legilor modelării, respectiv
  - Categoria 3.* – mărimele obținute prin măsurători efective pe model.

Trebuie menționat faptul că, dacă o mărime se obține printr-o măsurătoare pe prototip, aceasta este de *Categoria 1.*, deoarece această măsurătoare este independentă de procesul propriu-zis al modelării.

Toate datele se vor introduce într-un tabel de sinteză, similar cu cel de mai jos (**Tabelul 6.1.**), unde aceste date au fost arbitrar alese.

**Tabelul 6.1.**

Variabilele implicate în procesul modelării dimensionale					Factorul de scară $S$	Categoria variabilei	
Numele	Simbolul	Dimen-siunea	Prototip (indexat cu 1)	Model (indexat cu 2)	Model/prototip	Prototip	Model
Lungime	$L$	$m$	7,5	0,75	0,10	1	1
Modulul de elasticitate	$E$	$N\cdot m^2$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	1	1	1
Forță aplicată	$F$	$N$	9000	350	0,0388	1	2
Deforma-tia produsă	$u$	$m$	0,29067	0,0436	0,15	2	3
...							
Variabile adimensionale	$\pi_1$	1	0,925	0,925	1	-	-
	$\pi_1$	1	0,033	0,033	1	-	-
	$\pi_1$	1	0,138	0,138	1	-	-
Categorii de variabile	1.	Liber alese, date a priori sau determinate în mod independent					
	2.	Determinate pe baza legii (legilor) modelării dimensionale					
	3.	Determinate prin măsurători efective pe model					



## 6.2. Stabilirea criteriilor adimensionale pentru bare de secțiune circulară plină, respectiv tubulară rectangulară

În vederea elaborării unei strategii unitare, doctoranda a analizat, atât cazul secțiunii circulare pline, cât și acela al profilului tubular rectangular, în cele două versiuni (neacoperită, respectiv acoperită cu vopsea intumescentă).

**În cazul secțiunii circulare pline, de diametrul  $d$  și lungimea  $L$ , au fost alese drept elemente importante, care ar putea influența transferul de căldură  $Q[J]$ , următoarele:**

$\alpha_n \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafața laterală a cilindrului;

$\lambda_x \left[ \frac{W}{m \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de conductivitate termică al barei pe direcția  $x$ ;

$\lambda_r \left[ \frac{W}{m \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de conductivitate termică al stratului de vopsea pe direcția  $x$ ;

$d_r [m]$  - grosimea stratului de vopsea termoprotectoare pe suprafața laterală, măsurată pe direcție radială;

$\alpha_{n,f} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafața stratului de vopsea termoprotectoare;

$V [m^3]$  - volumul barei;

$A_{tr} [m^2]$  - aria secțiunii transversale a barei;

$A_{lat} [m^2]$  - aria suprafeței laterale a barei;

$L_x [m]$  - lungimea barei;

$\Delta T [^0 C]$  - diferența de temperatură bară-aer;

$c_{aer} \left[ \frac{J}{kg \cdot ^0 C} \right]$  - căldura specifică a aerului;

$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - densitatea materialului piesei;

$\nu_{aer} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  - viscozitatea cinematică a aerului;

$a \left[ \frac{m^2}{s} \right]$  - difuzivitatea termică;

$\beta \left[ \frac{1}{^0 C} \right]$  - coeficientul de dilatare volumică, respectiv

$g \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  - accelerația gravitațională.

$\rho_{aer} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - densitatea aerului;

$t [s]$  - timpul.



În cazul secțiunii tubulare rectangulare (și ulterior particularizată la aceea pătrată) au fost alese drept elemente importante, care ar putea influența transferul de căldură  $Q[J]$ , următoarele, ținând seama de faptul că, axa longitudinală este OX, iar axele OY și OZ sunt cel din secțiunea transversală a barei:

$\alpha'_n \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafața XOY;

$\alpha''_n \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafața XOZ;

$\alpha'''_n \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafața ZOY (adică la bază, respectiv

pe suprafața de la capătul superior al țevii);

$\lambda_x \left[ \frac{W}{m \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de conductivitate termică al barei pe direcția  $x$ ;

$\lambda_y \left[ \frac{W}{m \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de conductivitate termică al stratului de vopsea termoprotectoare pe direcția  $y$ ;

$\lambda_z \left[ \frac{W}{m \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de conductivitate termică al stratului de vopsea termoprotectoare pe direcția  $z$ ;

$d_y [m]$  - grosimea stratului de vopsea termoprotectoare, aplicată pe suprafața XOY;

$d_z [m]$  - grosimea stratului de vopsea termoprotectoare, aplicată pe suprafața XOZ;

$\alpha'_{n,f} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafața stratului de vopsea

termoprotectoare, aplicată pe suprafața XOY;

$\alpha''_{n,f} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^0 C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafața stratului de vopsea

termoprotectoare, aplicată pe suprafața XOZ;

$V [m^3]$  - volumul barei tubulară (țevii rectangulare);

$A_{tr} [m^2]$  - aria secțiunii transversale a barei;

$A'_{lat} [m^2]$  - aria suprafeței laterale XOY a barei;

$A''_{lat} [m^2]$  - aria suprafeței laterale XOZ a barei;

$L_x [m]$  - lungimea barei;

$\Delta T [{}^0 C]$  - diferența de temperatură bară-aer;

$c_{aer} \left[ \frac{J}{kg \cdot {}^0 C} \right]$  - căldura specifică a aerului;

$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - densitatea materialului barei;

$\nu_{aer} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  - viscozitatea cinematică a aerului;

$a \left[ \frac{m^2}{s} \right]$  - difuzivitatea termică;



$\beta \left[ \frac{1}{0_C} \right]$  - coeficientul de dilatare volumică, respectiv

$g \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  - accelerația gravitațională.

$\rho_{aer} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - densitatea aerului;

$t [s]$  - timpul.

Datorită simetriei, în cazul secțiunii tubular-pătrate avem:  $\alpha'_n = \alpha''_n$ ;  $\lambda_z = \lambda_y$ ;  $d_y = d_z$ ;  $\alpha'_{n,f} = \alpha''_{n,f}$ ;  $A'_{lat} = A''_{lat}$ .

În vederea efectuării calculelor pentru determinarea mărimilor adimensionale  $\pi_1, \dots, \pi_k$  se formează prima dată *Matricea Dimensională*, având liniile cu dimensiunile de bază și coloanele cu variabilele (independente și dependente), unde de fapt sunt trecuți exponentii dimensiunilor de bază, aferenți respectivei variabile.

Pornind de la coloanele și rândurile din dreapta, se caută o matrice cât mai mare nesingulară (deci cu determinant nenul), denumită în continuare matricea **A**.

Pentru ilustrarea metodologiei, se consideră aceea corespunzătoare cazului secțiunii circulare pline și neprotejată cu vopsea termorezistentă, varianta **MD2**, adică:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (\nu_{aer}) & (c_{aer}) & (A_{lat}) & (\beta) & (\rho_{aer}) & (t) \\ 2 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Pentru această matrice nesingulară **A** se determină inversul  $\mathbf{A}^{-1}$ , iar cu ajutorul restului elementelor componente ale Matricei Dimensionale, inițiale se formează matricea **B**.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (Q) & (A_{tr}) & (\lambda_x) & (L_x) & (V) & (g) & (\Delta T) & (a) & (\alpha_n) & \rho \\ (m_x) & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 2 & -1 & -1 \\ (m_r) & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 \\ (m_t) & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (kg) & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ (S) & -2 & 0 & -3 & 0 & 0 & -2 & 0 & -1 & -3 & 0 \\ (^{\circ}C) & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Cu ajutorul acestor două matrici se determină pe rând:  $\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}$ ;  $(\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B})^T$ , respectiv  $\mathbf{C} = -(\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B})^T$ , care pentru cazul prezentat este:



$$C = \begin{bmatrix} -1,5 & -3 & 2 & 3 & -1 & -5,5 \\ -1 & -2 & 2 & 2 & 0 & -5 \\ -1 & -3 & 2 & 2 & -1 & -4 \\ -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,5 \\ -0,5 & -1 & 0 & 1 & 0 & -2,5 \\ -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1,5 & -3 & 3 & 2 & -1 & -4,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

În urma dispunerii acestor trei și completând cu o matrice unitate de ordinul corespunzător, se obține în cele din urmă **Mulțimea Dimensională**, redată în cazul MD2.

Pentru a le deosebi mai ușor, cele trei matrici ( $A$ ,  $B$  și  $C$ ) au fost colorate diferit, iar matricea unitate, numită matricea  $D$ , a fost păstrată fără culori.

Se poate remarcă faptul că, în prima coloană, unde sunt trecute dimensiunile de bază, după ele urmează un număr de 10 termeni ( $\pi_1, \dots, \pi_{10}$ ) de mărimi adimensionale.

Expresiile acestor mărimi adimensionale se formează luând din coloană variabila ( $Q, \lambda, \Delta T$  etc.), iar din sirul aferent acestui parametru adimensional  $\pi_j$ , exponentul.

Astfel, avem pe rând:

$$\pi_1 = \text{const.} = Q \cdot v_{aer}^{-1,5} \cdot c_{aer}^{-3} \cdot A_{lat}^2 \cdot \beta^3 \cdot \rho_{aer}^{-1} \cdot t^{-5,5};$$

$$\pi_2 = \text{const.} = A_{tra}^1 \cdot v_{aer}^{-1} \cdot c_{aer}^{-2} \cdot A_{lat}^2 \cdot \beta^2 \cdot \rho_{aer}^0 \cdot t^{-5};$$

$$\pi_3 = \text{const.} = \lambda_x^1 \cdot v_{aer}^{-1} \cdot c_{aer}^{-3} \cdot A_{lat}^2 \cdot \beta^2 \cdot \rho_{aer}^{-1} \cdot t^{-4};$$

.....

.....

$$\pi_{10} = \text{const.} = \rho_{otel}^1 \cdot v_{aer}^0 \cdot c_{aer}^0 \cdot A_{lat}^0 \cdot \beta^0 \cdot \rho_{aer}^{-1} \cdot t^0 = \frac{\rho_{otel}}{\rho_{aer}}.$$

Din oricare relație, cum și din ultima, se poate exprima oricare dintre mărimile care intervin. Astfel spre exemplu, din ultima relație avem:  $\rho_{otel} = \text{const.} \cdot \rho_{aer}$ .

În vederea obținerii unor relații cât mai eficiente, două sau mai multe expresii  $\pi_1, \dots, \pi_{10}$  se pot combina după necesitate. În general, setul de mărimi adimensionale oferă un sistem, din care se pot exprima, după dorință, oricare dintre variabilele vizate.

Se introduc *scările dimensiunilor* (adică *factorii de scară ai dimensiunilor*)  $S_\omega = \frac{\omega_{\text{model}}}{\omega_{\text{prototip}}}$ , care, prin

definiție, reprezintă raportul mărimii (exprimată în cifre) dimensiunii respective  $\omega$ , pentru model (de obicei redus la scară) și prototip (întotdeauna în această ordine!).

Spre exemplu, dacă avem același material pentru model și prototip, atunci  $S_\rho = 1$ ;  $S_\lambda = 1$  etc.

Se înlocuiesc toate variabilele din expresiile celor zece mărimi adimensionale cu acești factori de scară, care vor fi de fapt rapoarte ale celor trei categorii de mărimi ale variabilelor (categoria celor care



se aleg liber, a celor care se determină pe baza legilor modelării dimensionale, respectiv a celor pe care le obținem prin măsurători efective pe model).

După cum s-a menționat în prezentarea aspectelor teoretice ale Analizei Dimensionale, toate aceste date se vor trece într-un tabel de sinteză.

Pentru exemplificarea acestei abordări cu ajutorul Analizei Dimensionale, să găsim corelații dintre factorul de scară al lungimilor, al temperaturii și al timpului necesar efectuării procesului de încălzire (în vederea asigurării similitudinii termice, adică să obținem în puncte omoloage temperaturi omoloage la tempi omologi).

În cazul Multimii Dimensionale **MD1** avem

$$\pi_6 = \text{const.} = t \cdot \alpha_n^{0,5} \cdot \lambda_x^{-0,5} \cdot c_{aer}^{0,5} \cdot A_{tra}^{-0,25} \cdot A_{lat}^0 \cdot \Delta T^{0,5} = t \cdot \frac{\sqrt{\alpha_n \cdot c_{aer} \cdot \Delta T}}{\sqrt{\lambda_x} \cdot \sqrt[4]{A_{tr}}} ,$$

de unde rezultă:

$$t = \text{const.} \cdot \frac{\sqrt{\lambda_x} \cdot \sqrt[4]{A_{tr}}}{\sqrt{\alpha_n \cdot c_{aer} \cdot \Delta T}} ,$$

respectiv pentru factorii de scară ai lui  $\alpha_n$ ,  $c_{aer}$ , și  $\lambda_x$  acceptând valori egale cu unitatea (fiind vorba de același material la prototip și modele, respectiv de condițiile atmosferice identice), corespunzător prototipului și modelului redus la scara 1:2, factorul de scară al ariilor secțiunilor transversale devine

$$S_{A_{tr}} = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^2}{\left(\frac{1}{1}\right)^2} = \frac{1}{4} .$$

În consecință, factorul de scară al timpilor omologi va fi

$$S_t = \text{const.} \cdot \frac{\sqrt{1} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{4}}}{\sqrt{1 \cdot 1} \cdot S_{\Delta T}} \text{ de unde, în urma calculelor, rezultă că } S_t \propto \frac{1}{\sqrt{2 \cdot S_{\Delta T}}} .$$

Din **MD2** se obține o corelație interesantă, și anume:

$$\pi_4 = \text{const.} = L_x \cdot v_{aer}^{-0,5} \cdot c_{aer}^0 \cdot A_{lat}^0 \cdot \beta^0 \cdot \rho_{aer}^0 \cdot t^{-0,5} = L_x \cdot \frac{1}{\sqrt{v_{aer} \cdot t}} ;$$

de unde, pentru condiții identice ale mediului ambiant, unde se efectuează experimentele, deci cu factorul de scară  $S_{v_{aer}} = 1$ , rezultă  $S_L \propto \sqrt{S_t}$ .

Pentru cazul analizei comparative a prototipului și a modelului redus la scara 1:2, avem  $S_L = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{1}} = \frac{1}{2}$  și în consecință,  $S_t \propto \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$ , adică, pentru modelul redus la scara 1:2, timpul necesar atingerii acestor temperaturi omoloage se reduce la o pătrime din cel aferent prototipului.



În cazul barei realizate dintr-un profil tubular pătratic, varianta neprotejată cu vopsea termoizolantă (cazul **MD4**), mărimea adimensională  $\pi_1$  prezintă interes, având expresia:

$$\pi_{11} = \text{const.} = t \cdot \lambda_x^{0,333} \cdot A_{tr}^{-0,666} \cdot A'_{lat}^0 \cdot \rho_{otel}^{-0,333} \cdot \alpha_n'^0 \cdot \Delta T^{0,333} = t \cdot \frac{\sqrt[3]{\lambda_x \cdot \Delta T}}{\sqrt[3]{(A'_{tr})^2 \cdot \rho_{otel}}},$$

de unde, pentru aceleasi materiale ale prototipului și modelului redus la scara 1:2, obținem factorii de scară  $S_{\lambda_x} = S_{\rho_{otel}} = 1$ , iar acela al arilor transversale, de la care are loc transferul de căldură prin conductie, va fi

$$S_{A'_{tr}} = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^2}{\left(\frac{1}{1}\right)^2} = \frac{1}{4}.$$

În urma înlocuirilor, va rezulta corelația căutată între timpul de încălzire necesar al prototipului și al modelului redus la scara 1:2, pentru atingerea temperaturilor omoloage în punctele omoloage ale celor două elemente structurale.

Tot din **MD1** avem o legătură utilă între cantitatea de căldură  $Q$  introdusă în sistem, parametrii geometrici ai barei, precum și variația temperaturii  $\Delta T$ :

$$\pi_1 = \text{const.} = Q \cdot \alpha_n^{-0,5} \cdot \lambda_x^{-0,5} \cdot c_{aer}^{0,5} \cdot A_{tr}^{-0,25} \cdot A_{lat}^{-1} \cdot \Delta T^{-0,5} = Q \cdot \frac{\sqrt{c_{aer}}}{A_{lat} \cdot \sqrt{\alpha_n \cdot \lambda_x \cdot \Delta T} \cdot \sqrt[4]{A_{tr}}},$$

respectiv din **MD2**, unde avem o legătură între  $Q$ , parametrii geometrici și timpul  $t$ :

$$\pi_1 = \text{const.} = Q \cdot v_{aer}^{-1,5} \cdot c_{aer}^{-3} \cdot A_{lat}^2 \cdot \beta^3 \cdot \rho_{aer}^{-1} \cdot t^{-5,5} = Q \cdot \frac{A_{lat}^2 \cdot \beta^3}{c_{aer}^3 \cdot \rho_{aer} \cdot \sqrt{v_{aer}^3 \cdot t^{11}}}.$$

În cazul secțiunii tubular-rectangulare, pentru varianta neprotejată cu vopsea intumescentă (**MD4**), avem:

$$\pi_1 = \text{const.} = Q \cdot \lambda_x^{1/3} \cdot A_{tr}^{-2/3} \cdot (A'_{lat})^{-1} \cdot \rho_{otel}^{-1/3} \cdot (\alpha_n')^{-1} \cdot \Delta T = Q \cdot \frac{\sqrt[3]{\lambda_x}}{A'_{lat} \cdot \alpha_n' \cdot \sqrt[3]{A_{tr}^2 \cdot \rho_{otel} \cdot \Delta T^2}}.$$

Evident, pe baza unei analize similare cu aceea menționată mai înainte privind înlocuirea factorilor de scară în aceste variabile adimensionale, se pot obține alte corelații utile între comportamentul prototipului și cel al modelului.

Calcule similare se pot efectua și pentru compararea prototipului cu modelele reduse la scara 1:4, respectiv 1:10.

În lucrarea in extenso sunt analizate și o serie de variante, din care un lucru demn de reținut constă în acela că, elementele matricei  $B$  odată stabilite, *indiferent de ordinea lor de așezare în cadrul matricei  $B$ , vor conduce la aceleasi expresii ale mărimilor adimensionale  $\pi_1, \dots, \pi_k$* ; acest lucru se poate verifica prin compararea acestor expresii adimensionale în cele două cazuri **MD6** și **MD7**, motiv pentru care, cele 8 cazuri prezentate de fapt se reduc la 7.



**Sectiunea circulară plină, varianta nevopsită (MD1)**

	Q	V	Lx	ρ	p aer	t	v aer	a	Beta	g	αn	λx	c aer	Atr.	A lat.	ΔT
<b>mx</b>	0	1	1	-1	-1	0	2	2	0	1	-1	-1	0	0	1	0
<b>mr</b>	1	1	0	-2	-2	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0
<b>mt</b>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
<b>kg</b>	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
<b>s</b>	-2	0	0	0	0	1	-1	-1	0	-2	-3	-3	-2	0	0	0
<b>°C</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	-1	0	0	1
<b>π1</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	-0.5	0.5	-0.25	-1	-0.5
<b>π2</b>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	-1	0
<b>π3</b>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	-1	0
<b>π4</b>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0.5	-1.5	1.5	0.75	0	0.5
<b>π5</b>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0.5	-1.5	1.5	0.75	0	0.5
<b>π6</b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.5	-0.5	0.5	-0.25	0	0.5
<b>π7</b>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-2.5	2.5	-0.5	0.25	-2	-0.5
<b>π8</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-2.5	2.5	-0.5	0.25	-2	-0.5
<b>π9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
<b>π10</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-2	2	-1	0.5	-1	-1



### Secțiunea circulară plină, varianta nevopsită (MD2)

	<b>Q</b>	<b>Atr.</b>	<b><math>\lambda x</math></b>	<b>Lx</b>	<b>V</b>	<b>g</b>	<b><math>\Delta T</math></b>	<b>a</b>	<b><math>\alpha n</math></b>	<b><math>\rho</math></b>	<b>v aer</b>	<b>c aer</b>	<b>A lat.</b>	<b>Beta</b>	<b>paer</b>	<b>t</b>
<b>mx</b>	0	0	-1	1	1	1	0	2	-1	-1	2	0	1	0	-1	0
	1	2	1	0	1	0	0	0	1	-2	0	1	0	0	-2	0
<b>mt</b>	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
<b>kg</b>	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
<b>s</b>	-2	0	-3	0	0	-2	0	-1	-3	0	-1	-2	0	0	0	1
<b>°C</b>	0	0	-1	0	0	0	1	0	-1	0	0	-1	0	-1	0	0
<b>π1</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.5	-3	2	3	-1	-5.5
<b>π2</b>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	2	2	0	-5
<b>π3</b>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-3	2	2	-1	-4
<b>π4</b>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-0.5	0	0	0	0	-0.5
<b>π5</b>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-0.5	-1	0	1	0	-2.5
<b>π6</b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-0.5	0	0	0	0	1.5
<b>π7</b>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
<b>π8</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0
<b>π9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1.5	-3	3	2	-1	-4.5
<b>π10</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0



### Secțiunea tubulară, varianta nevopsită (MD4)

	Multimea dimensională																
	Q	$\alpha''n$	V	Lx	c aer	v aer	a	Beta	g	p aer	t	$\lambda x$	A tr.	A lat'	$\rho$	$\alpha'n$	$\Delta T$
<b>mx</b>	0	0	1	1	0	2	2	0	1	-1	0	-1	0	1	-1	-1	0
<b>my</b>	1	0	1	0	1	0	0	0	0	-2	0	1	1	1	-1	0	0
<b>mz</b>	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	-1	1	0
<b>kg</b>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0
<b>s</b>	-2	-3	0	0	-2	-1	-1	0	-2	0	1	-3	0	0	0	-3	0
<b>°C</b>	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	-1	1
<b><math>\pi_1</math></b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3333	-0.67	-1	-0.33	-1	-0.67
<b><math>\pi_2</math></b>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	-1	0
<b><math>\pi_3</math></b>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	-1	0
<b><math>\pi_4</math></b>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	-1	0
<b><math>\pi_5</math></b>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-0.667	0.333	0	0.667	0	0.333
<b><math>\pi_6</math></b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1.6667	0.667	-2	0.333	-2	-0.33
<b><math>\pi_7</math></b>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1.6667	0.667	-2	0.333	-2	-0.33
<b><math>\pi_8</math></b>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b><math>\pi_9</math></b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.3333	1.333	-1	0.667	-1	-0.67
<b><math>\pi_{10}</math></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	-1	0	-1	-2	0
<b><math>\pi_{11}</math></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.3333	-0.67	0	-0.33	0	0.333



### 6.3. Concluzii

- Metoda, bazată pe Analiza Dimensională, poate constitui într-un viitor apropiat un mijloc deosebit de eficient în estimarea comportamentului structurilor la incendii;
- Un prim aspect va consta în efectuarea unor teste pe modele reduse la scară în variante neprotejate, respectiv protejate termic, iar rezultatele măsurătorilor vor fi transferate, prin intermediul acestei metodologii, la structura reală (la prototip);
- Un alt obiectiv important poate să fie studiul experimental al comportamentului straturilor termoprotectoare (printre altele și al vopselelor intumescente) pe elemente structurale simple (la scară naturală și la diferite scări reduse), pe baza cărora se pot stabili legități privind optimizarea corelației dintre grosimea stratului aplicat și particularitățile structurale ale construcției (formă, dimensiuni, zone convexe, respectiv concave, zone cu elemente de îmbinare etc.);
- În pofida faptului că, în literatura de specialitate această abordare specifică nu s-a regăsit, fiind utilizate alte metode de stabilire a unor variabile adimensionale, eficiența acestei abordări prezentată în lucrarea [SZI97], este inconstestabilă;
- Înținând seama de simplitatea și profunzimea acestei abordări, se intenționează în viitor să se implementeze cât mai curând avantajele acestei metode în problematicile sus-menționate.



## 7. CONCLUZII, CONTRIBUȚIILE AUTOAREI, DISEMINAREA REZULTATELOR, PERSPECTIVE

### 7.1. Concluzii

În cadrul acestei lucrări, a fost efectuată o analiză critică a stadiului actual, privind evaluarea comportamentului structurilor la incendii.

Pe baza acestui studiu și-a formulat obiectivele prezentei lucrări, bazându-se mai ales pe următoarele categorii de informații:

- Legea teoretică de variație a temperaturii de-a lungul barei drepte [TUR16];
- Cercetările teoretice și experimentale efectuate de autorul lucrării [DAN11], privind posibilitatea inversării direcției de încălzire a stratului termoprotector, fără modificări semnificative în comportamentul acestuia;
- Existența unor cercetări teoretice și experimentale, privind utilizarea principiilor Analizei Dimensionale, însă cu deducerea variabilelor adimensionale bazată pe gruparea destul de anevoieoașă a termenilor din expresiile aferente ecuațiilor de conservare;
- Studiul modelelor la scară redusă, cu ajutorul Analizei Dimensionale, într-o abordare originală și foarte eficientă de către autorul lucrării [SZI97].

În consecință, a fost propusă o strategie proprie, bazată pe utilizarea următoarelor elemente:

- Alegerea, drept sursă de căldură pentru simularea incendiilor, a energiei electrice, deoarece aceasta prezinta o serie de avantaje;
- Necesitatea conceperii și realizării fizice a unui stand de putere mare, destinat testării la scară naturală a unor elemente structurale de oțel;
- Necesitatea conceperii și realizării fizice a unui stand de putere mai mică, destinat testării elementelor structurale la scară redusă, respectiv a unor structuri de rezistență 3D la scară redusă;
- Conceperea și realizarea fizică a sistemului electronic de comandă a încălzirii acestor standuri, precum și monitorizarea precisă a cantităților de energie electrică introduse în circuitele electrice de putere;
- Conceperea și realizarea fizică a unui sistem de achiziție a datelor cu un număr de peste 100 de canale;
- Elaborarea unui program de achiziție și prelucrare a datelor, capabil să funcționeze la acest număr de canale;
- Efectuarea unor teste detaliate pe modele la scară naturală, respectiv redusă, în două variante constructive (neacoperite și acoperite cu strat de vopsea termoprotectoare);
- Efectuarea unui calcul analitic, destinat descrierii propagării câmpului termic în bare de secțiuni tubulare și compararea rezultatelor cu cele experimentale;



- Elaborarea unei metodologii mai eficiente, privind evaluarea curbelor  $T(z)$ , în vederea determinării prin calcul a unor parametru de bază, cum sunt  $m_0$  și  $\alpha_n$ ;
- Efectuarea unor simulări numerice cu un program de calcul performant pe aceste elemente structurale testate și compararea rezultatelor simulărilor cu cele experimentale;
- Elaborarea unor concluzii privind eficiența măsurătorilor experimentale, a standurilor proprii, a rezultatelor calculelor analitice, precum și a simulărilor numerice;
- Formularea unor direcții privind implementarea Analizei Dimensionale (versiunea [SZI97]) în transferarea cât mai eficientă a informațiilor măsurătorilor, efectuate pe elemente structurale la scară redusă, la structurile existente;
- Formularea unor direcții viitoare proprii de cercetare, pe baza experienței acumulate.

Pe baza acestei strategii, au fost finalizate cercetările teoretice și experimentale, de pe urma cărora a putut formula o serie de concluzii:

- Standurile electrice realizate cu ocazia tezei de doctorat satisfac cerințele unor cercetări detaliate reproductibile, la un preț relativ redus și totodată sigure din punct de vedere funcțional și PSI;
- Sistemul de achiziție și de prelucrare a datelor, realizat tot cu ocazia prezentei teze, a satisfăcut cerințele unei cercetări moderne, însă pe baza experienței cumulate, acesta urmează să fie îmbunătățit în viitorul apropiat;
- Au fost alese spre analiză elemente structurale, respectiv subansamblu structurale rezultate dintr-o structură reală, redusă ulterior la scările 1:2, 1:4 și 1:10;
- Rezultatele testelor efectuate, atât pe elemente structurale la scară reală, cât și pe cele la scară redusă (elemente simple și o structură 3D, de rezistență a unei clădiri cu un singur nivel și patru compartimente, redusă la scara 1:10,) au satisfăcut cerințele formulate, iar pe baza experienței acumulate și strategia de măsurare urmează să fie îmbunătățită în viitor;
- Relațiile de calcul elaborate în cadrul tezei, precum și strategia de evaluare a datelor măsurătorilor pe baza acestor relații, au oferit o abordare mai eficientă a problemei formulate în tematica tezei;
- Rezultatele simulării numerice, în urma comparării cu valorile experimentale, au condus la optimizarea modelării din punctul de vedere al răspunsului termic pentru elementele structurale simple;
- Deducerea principalelor relații ale variabilelor adimensionale pentru două cazuri de bază (secțiune circulară plină și secțiune tubulară-rectangulară, cu particularizarea pentru secțiune tubular-pătrată) deschide noi orizonturi în privința evaluării mai corecte a răspunsului termic pentru o structură reală, bazată pe măsurători efectuate pe modele reduse;
- Experiența acumulată în cadrul acestor investigații teoretice și experimentale au permis formularea unor direcții viitoare de cercetare.



## 7.2. Contribuțiile autoarei la tematica abordată

În decursul elaborării tezei s-au adus următoarele contribuții la tematica abordată:

1. A efectuat o sinteză a stadiului actual al cercetărilor privind propagarea câmpului termic în structurile metalice (la scară naturală și la scară redusă);
2. Au fost concepute, realizate fizic și testate două standuri electrice destinate testării elementelor structurale la scară naturală, ale celor la scară redusă, respectiv testării structurilor 3D la scară redusă;
3. A fost conceput, realizat fizic și testat un sistem de achiziție de date cu un număr peste 100 de canale, la care numai placa de achiziție LabJack-UE9, a fost cumpărat din comerț;
4. A efectuat teste multiple pe elemente structurale la scara naturală, respectiv la scările 1:2 și 1:4, în două variante (neacoperite, respectiv acoperite cu vopsea intumescentă), în vederea stabilirii experimentale a legilor de propagare a câmpurilor termice de-a lungul acestora;
5. Pe un stâlp de secțiune tubular-pătrată, redus la scara 1:10, prevăzut cu 1...4 grinzi, a efectuat teste multiple privind răspunsul termic la acțiunea unei surse de căldură situată la baza stâlpului; și în acest caz elementele structurale erau în două variante, neacoperite și acoperite cu strat intumescent;
6. A prelucrat datele măsurătorilor și a elaborat o nouă abordare pentru evaluarea mai eficientă a curbelor de temperatură  $T(z)$ ;
7. A introdus utilizarea unor curbe adimensionale  $T_\psi [\%]$  pentru analiza unitară și mai eficientă a curbelor  $T(z)$ ;
8. A propus înlocuirea curbelor teoretice exponențiale cu unele polinomiale, a căror precizie în aproximarea rezultatelor măsurătorilor a fost mai bună, decât a celor teoretice, utilizate la ora actuală;
9. Pe baza acestor curbe polinomiale, determinarea prin calcul a parametrilor  $m_0$  și  $\alpha_n$  se simplifică în mod considerabil, fără a se reduce precizia;
10. Rezultatele simulărilor numerice, efectuate pe elemente structurale simple, au fost comparate cu rezultatele măsurătorilor, permitând stabilirea unor concluzii utile;
11. A aplicat principiile Analizei Dimensionale pentru stabilirea mărimilor adimensionale importante, privind răspunsul unei structuri (protejată sau neprotejată termic) la acțiunea sursei de căldură (asemănător incendiilor), atât în varianta elementelor structurale de secțiune circulară plină, cât și în aceea a secțiunilor tubulare rectangulare; această analiză fost bazată pe metodologia originală elaborată de autorul lucrării [SZI97], care nu a mai fost aplicată pentru probleme termice de tipul incendiilor.



### 7.3. Diseminarea rezultatelor cercetărilor

În perioada elaborării tezei, a fost elaborat un număr de 8 articole, în domeniul tezei, dintre care la 4 a fost prim autor, iar la 4 co-autor și anume:

1. János Száva, Károly Jármai, Tibor Bondár, Sorin Vlase, Péter Dani, András Kakucs, Horațiu Teodorescu-Drăghicescu, **Renata Munteanu**, Botond Pál Gálfi, „New Testing Device For Validation Of The Intumescent Paints’ Fem Modelling” Multiscience-XXVIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc University, Hungary, 10-11 April, 2014, ISBN 978-963-358-051-6 (**articol BDI**)
2. **Ildikó Renata Munteanu**, Ioan Száva, Botond-Pál Gálfi, Carol Ambrus, Piroska Orbán, „Soluții pentru îmbunătățirea măririi capacității portante a structurilor de rezistență în caz de incendii”, Știință și Inginerie, volumul 25, Editura AGIR, București, 2014, 625-632 (**articol BDI**)
3. **Munteanu Ildikó Renata**, Carol Ambrus, „A possible solution with passive protection structural resistance elements to cargo ships”, Journal of Industrial Design and Engineering Graphics (JIDEG), Volume 9 Special Issue: International Conference ISTM 2014 papers, pg 41-44, ISSN 1843-3766, online version: ISSN 2344-4681, ISSN-L 1843-3766 (**articol BDI**)
4. I. Száva, K. Jármai, S. Vlase, T. Bondár, V.V. Ungureanu, B.P. Gálfi, P. Dani, R. **Munteanu**, Fl.L. Tămaș, „The Intumescent Paint Layer’s Thickness Influence on the Load-Bearing Capacity of the Steel Joints”, Published in the Physical Aspects of Civil Engineering, Special Issue of the Advanced Materials Research Journal, Vol. 969 (2014), pp. 332-339, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.969.332 (**articol BDI**)
5. **Ildikó Renata Munteanu**, Péter DANI, Botond-Pál GÁLFYI, Leonard SERBINA, „Original electric stand and approach on the intumescent paint’s experimental investigation”, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, Vol. 58, Issue 2, 2015 (**articol BDI**)
6. **Ildikó Renata Száva (Munteanu)**, István SEBE, Dr. Károly JÁRMAI, „Optimum Design Of Vessel Supporting Frame For Fire”, Multiscience-XXX microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc University, Hungary, 21-22 April, 2016, ISBN 978-963-358-113-1
7. Gábor Turzó, **Renata Ildikó Száva**, Botond-Pál Gálfi, Ioan Száva, Sorin Vlase, Holger Hoța „Temperature distribution of the straight bar, fixed into a heated plane surface” FIRE AND MATERIALS, Volume 42, Issue 2, 2018 (March), ISSN 0308-0501, <https://doi.org/10.1002/fam.2481> (**articol ISI, FI: 1,220**)
8. Dani Péter, **Ildikó Renáta Száva**, Imre Kiss, Ioan Száva, Popa Gabriel, „Principle schema of an original full-, and reduced-scale testing bench, destined to fire protection investigations” ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering, Tome XVI, 2018, Fascicule 2 (May) (**articol BDI**).

Dintre aceste articole două au fost susținute la conferințe naționale cu participare internațională, și două la conferințe internaționale. În afara acestora au mai fost elaborate și alte articole în domenii inginerești.



În cadrul mobilităților ERASMUS+ a efectuat un stagiu de două luni, de studii doctorale la Universitatea din Miskolc, Ungaria.

Pe baza rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale parțiale, legată de tematica tezei, a participat, pe o perioada de 18 luni, în Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013, la Axa prioritară 1 „Educație și formare profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”, având domeniul major de intervenție 1.5. „Programe doctorale și post-doctorale în sprijinul cercetării”, cu titlul proiectului: „Creșterea atraktivității și performanței programelor de formare doctorală și postdoctorală pentru cercetători în științe ingineresci -ATRACTING”; Numărul de identificare al contractului: POSDRU/159/1.5/S/137070; Beneficiar: Universitatea Politehnica Timisoara; Partener: Universitatea Transilvania din Brașov.

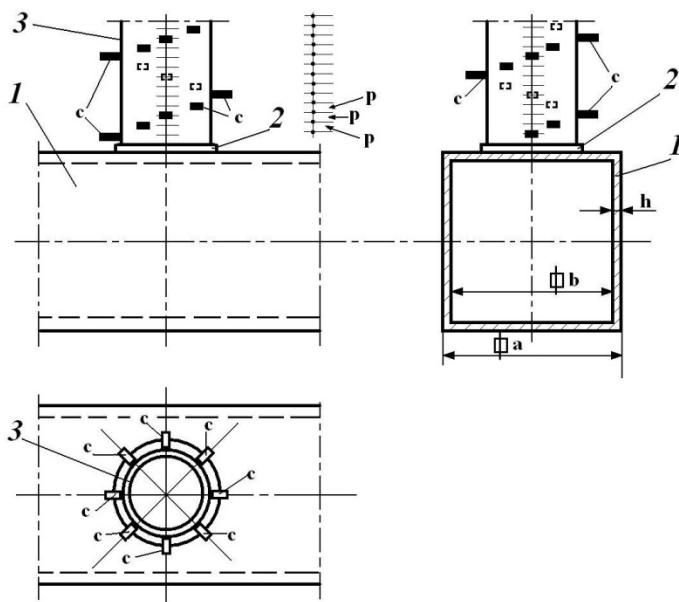
#### **7.4. Perspective ale cercetărilor**

Experiența acumulată în perioada elaborării tezei, i-a permis formularea unor noi direcții de cercetare și anume:

1. Studiul comportamentului stratului de vopsea intumescentă în timpul transformării sale într-o spumă termoizolantă

Din cercetările efectuate de ([KAK07], [DAN11]) a reieșit faptul că, procesul de transformare a stratului de vopsea într-o spumă termoizolantă are loc în patru etape, fiecare având un comportament termic diferit din punctul de vedere al coeficientului de transfer prin conductie  $\lambda$ . În calitate de co-autoare a lucrării [SZA14], a participat la elaborarea unei noi strategii de măsurare a variației lui  $\lambda$ , bazată pe disponerea în spirală, a unui număr suficient de mare de PT-uri miniaturizate, pe un cilindru cu dimensiuni mici, fixat pe o placă etalon, acoperită cu vopsea intumescentă (a se vedea **figura 7.4.1.**). În timpul încălzirii plăcii stratul termoprotector se va transforma treptat într-o spumă termoprotector, însotită de creșterea în grosime a acestui strat. PT-urile sunt dispuse astfel, încât permit monitorizarea temperaturilor la fiecare milimetru înălțime față de suprafața plăcii. Astfel, prin intermediul modificărilor de temperatură, corelate cu dezvoltarea în grosime a stratului termoprotector, devine posibilă determinarea lui  $\lambda(\eta)$ , de unde se poate obține valoarea lui  $\lambda$  corespunzătoare fiecărei etape de transformare a stratului de vopsea într-o spumă termoizolantă. Acest tip de cercetare fundamentală trebuie efectuat pe diferite calități de vopsele, aplicate în straturi de grosimi diferite, corelate totodată și cu condițiile de mediu ambient, unde elementul structural va fi amplasat în cazul real.





**Fig.7.4.1.** Dispozitiv de măsurat variația lui  $\lambda$  pe grosimea vopselei [SZA14]

2. Studiul comportamentului joncțiunilor protejate cu vopsele termoprotectoare supuse la incendii, în vederea optimizării grosimii vopselei

Este bine-cunoscut faptul că, la nivelul unei joncțiuni secțiunea transversală a metalului, care transmite fluxul termic, se modifică în limite largi. Din acest motiv și gradul de încălzire a elementelor implicate va fi diferit. De aceea, un studiu amănuntit privind corelația dintre tipul joncțiunii și grosimea stratului de vopsea termoprotectoare ar prezenta interes major celor din domeniul construcțiilor.

3. Optimizarea grosimii stratului de vopsea intumescentă în cazul unor construcții de mare importanță.
4. Analiza primară, pe modele la scară redusă, a unor structuri aflate în stadiul de proiectare din punctul de vedere al comportamentului la incendiu.
5. Elaborarea unor lucrări științifice în reviste de specialitate recunoscute, pe baza prelucrării ulterioare a rezultatelor cercetărilor deja obținute în cadrul tezei de doctorat.

Pentru toate aceste direcții de cercetare, la ora actuală există, atât aparatură, standuri, cât și cunoștințele necesare efectuării cu succes a respectivelor cercetări.



## Bibliografie selectivă

- [BEZ17] M.Z. Bezas, Th.N. Nikolaidis, C.C. Baniotopoulos, „Fire Protection and Sustainability of Structural Steel Buildings with Double-Shell Brickwork Cladding”, Procedia Environmental Sciences Volume 38, pg. 298-305, 2017, doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.082
- [CEN02] Y.A. Cengel, „Heat transfer. A practical approach”. Second edition. McGraw-Hill, New York, 2002
- [CHO08] W. K. Chow, H. W. Lo Henry, „Scale Modeling on Natural Smoke Filling in an Atrium”, Heat Transfer Engineering, Vol. 29, 2008
- [CIO10] L. Cioroianu, G. Cioroianu, „Compoziții termospumante ecologice de protecție la foc”, *Brevet de inventie*, Oficiul de stat pentru inventii și mărci, RO 122857 B1, București, 2010
- [COR06] Corus Construction & Industrial, „Fire resistance of steel-framed buildings”, Corus Construction & Industria, Technical Sales and Marketing, PO Box 1, Brigg Road, Scunthorpe North Lincolnshire, DN16 1BP, 2006
- [CTH13] Siniat S.A., *Catalog Tehnic: „Sisteme de gips carton”*, București, Ediția 1/2013 [www.siniat.ro](http://www.siniat.ro)
- [DAN11] P. F. DANI, Teză de Doctorat: „Studiul teoretic și experimental al efectului propagării câmpului termic prin acoperirile de protecție multi-strat asupra stării de tensiuni și deformații a structurilor metalice”, Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Inginerie Mecanică, 2011
- [DAN18] D. Péter, I. R. Száva, I. Kiss, I. Száva, P. Gabriel „Principle schema of an original full-, and reduced-scale testing bench, destined to fire protection investigations” ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering, Tome XVI, Fascicule 2 (May), 2018
- [DAY13] J.C. Day, M.K. Zemler, M.J. Traum, S.K.S. Boetcher, „Laminar natural convection from isothermal vertical cylinders: revisiting a classical subject”, Journal of Heat Transfer, 135(2): pg.1-9, 2013
- [DIR88] Directiva Consiliului 89/106/CEE, cunoscută ca Directiva produselor pentru construcții - CPD (*Construction Products Directive 89/106/EEC*), din 21 decembrie 1988
- [DUQ04] S. Duquesne, S. Magnet, C. Jama, R. Delobel, „Intumescent paints:fire protective coatings for metallic substrates”, Surface and Coatings Technology 180-181, pg. 302-307, Elsevier, 2004
- [EMO83] R.I. Emori, K. SAITO, „A Study of Scaling Laws in Pool and Crib Fires”. Combustion Science and Technology Vol. 31, 1983
- [FRA06] J.M. Franssen, „Calculation of temperature in fire-exposed bare steel structures: Comparison between ENV 1993-1-2 and EN 1993-1-2”, Fire Safety Journal 41 pg.139–143, 2006, doi:10.1016/j.firesaf.2005.11.007



- [GOM12] M. Gomez-Mares, A. Tugnoli, G. Landucci, F. Barontini, „Behavior of intumescent epoxy resins in fireproofing applications”, Journal of Analytical Pyrolysis 97, pg..99-108, Elsevier, 2012
- [GOO04] M. G. Goode, „Fire Protection of Structural Steel in High-Rise Buildings”, National Institute of Standards and Technology (NIST GCR 04-872), 2004
- [HIR14] T. Hirashima, K. Okuwaki, X. Zhao, Y. Sagami, K. Toyoda, „An Experimental Investigation Of Structural Fire Behaviour Of A Rigid Steel Frame”, Fire Safety Science-Proceedings Of The Eleventh International Symposium, pg. 677-690, 2014
- [JIA14] J. Jiang, G.-Q. Li, A. Usmani, „Progressive Collapse Mechanisms of Steel Frames Exposed to Fire”, Advances in Structural Engineering, vol 17, Issue 3, pg. 381-398, 2014
- [KAK07] A.Kakucs, P.Dani, V.Costantin, I.Száva, F.Tolvaly-Roșca, S.C.Popa, „New Method in Modeling Intumescent Coatings”, Bulletin of Transilvania University of Brasov, Supliment BRAMAT 2007, pg.27., Transilvania University Press, 2007, ISSN-1223-9631
- [KUZ76] R. Kuzman, „Handbook of thermodynamic tables and charts”, Hemisphere, Washington, 1976
- [LAW01] R.M. Lawson, „Fire engineering design of steel and composite buildings”, Journal of Constructional Steel Research 57, pg.1233-1247, Elsevier, 2001
- [MRO16] K. Mróz, I. Hager, K. Korniejenko, „Material solutions for passive fire protection of buildings and structures and their performances testing”, Procedia Engineering, Volume 151, pg. 284-291, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.388>
- [MUN14a] I. R. Munteanu, I. Száva, B.P. Gálfy, A. Carol, P. Orbán, „Soluții pentru îmbunătățirea măririi capacitatății portante a structurilor de rezistență în caz de incendii”, Știință și Inginerie, volumul 25, Editura AGIR, București, pg. 625-632, 2014
- [MUN14b] I. R. Munteanu, A. Carol, „A possible solution with passive protection structural resistance elements to cargo ships”, Journal of Industrial Design and Engineering Graphics (JIDEG), Volume 9 Special Issue: International Conference ISTM, pg. 41-44, ISSN 1843-3766, 2014
- [NOP16] P118/1 - Normativ privind securitatea la incendiu a construcțiilor, Partea I-Construcții, (Proiect), Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrație Publice, Ministerul Afacerilor Interne, 2016
- [QUI06] J. G.Quintiere, „Fundamentals of Fire Phenomena”, John Wiley & Sons, Ltd,England, ISBN-13 978-0-470-09113-5 (HB), 2006
- [QUI78] J. G. Quintiere, B.J. McCaffrey, T. Kashiwagi, „A scaling study of a corridor subject to a room fire”, Combustion Science and Technology, 1978
- [QUI89] J. G.Quintiere, „Scaling applications in fire research”, Vol. 15, Fire Safety Journal, 1989
- [RAC17b] E. Rackauskaite, P. Kotsovinos, A. Jeffers, G. Rein, „Structural analysis of multi-storey steel frames exposed to travelling fires and traditional design fires”, Engineering Structures 150, pg. 271–287, 2017



- [SED82] L. I. Sedov, „Similarity and Dimensional Methods in Mechanics”, MIR Publishers Moscow, 1982
- [SRE91] SR EN 1991-1-2 Eurocod 1: Acțiuni asupra structurilor, Partea 1-2: Acțiuni generale – Acțiuni asupra structurilor expuse la foc, Asociația de Standardizare din România (ASRO), 2004
- [SRE93] SR EN 1993-1-2 Eurocod 3: Proiectarea structurilor de oțel, Partea 1-2: Reguli generale Calculul structurilor la foc, Asociația de Standardizare din România (ASRO), 2006
- [STE83] D. Ștefănescu, A. Leca, L. Luca, A. Badea, M. Marinescu, „Transfer de căldură și masă. Teorie și aplicații”. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
- [SZA14] J. Száva, K. Jármai, T. Bondár, S. Vlase, P. Dani, A. Kakucs, H. Teodorescu-Drăghicescu, R. Munteanu, B.-P. Gálfi, „New Testing Device For Validation Of The Intumescent Paints’ Fem Modelling” Multiscience-XXVIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc University, Hungary, pg. 10-11 ISBN 978-963-358-051-6 , April 2014
- [SZI97] T. SZIRTES, „Applied Dimensional Analysis and Modeling”, McGraw-Hill, New York, USA, ISBN 0-07-062811-4, 1997
- [THE77] P.S.Theocaris, ş.a. „Analiza Experimentală a Tensiunilor Vol.II, Editura Tehnică, București, 1977
- [THO00] P. H. Thomas „Dimensional analysis: a magic art in fire research? ” Vol. 34, Iss. 2., Fire Safety Journal, 2000
- [THO83] P. H. Thomas „Modelling of Compartment Fires”, Fire Safety Journal, 5 1983
- [TUR16] G. Turzó, „Temperature distribution along a straight bar sticking out from a heated plane surface and the heat flow transmitted by this bar (I)-Theoretical Approach”, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering, Tome XIV, Fascicule 3, pg. 49-53, ISBN:1584-2665, 2016
- [TUR18] G.Turzó, I. R. Száva, B.-P. Gálfi, I. Száva, S. Vlase, H. Hoța „Temperature distribution of the straight bar, fixed into a heated plane surface” Fire And Materials, Volume 42, Issue 2, (March) 2018, <https://doi.org/10.1002/fam.2481>
- [WAN08] Wang M., Perricone J., Chang C. P., J. G. Quintiere „Scale Modeling of Compartment Fires for Structural Fire Testing”, Journal of Fire Protection Engineering. Vol. 18, 2008

Surse internet:

- [\*1] \*\*\* [http://www.steelconstruction.info/Fire\\_protecting\\_structural\\_steelework](http://www.steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelework)
- [\*2] \*\*\* <http://www.iasisting.ro/servicii/termoprotectie-structuri-metalice.html>
- [\*3] \*\*\* <http://www.superizol.ro/ro/produse/firefree-izolatie-antifoc-elementelor-metalice>
- [\*4] \*\*\* <http://fogo.lt/en/galleries/atsparumas-ugnai/>
- [\*5] \*\*\* <https://davi-comfire.eu/protectie-pasivaPodolski>



## Anexa 1.- Rezumat

În cadrul prezentei teze de doctorat au fost analizate o serie de aspecte, privind propagarea câmpului termic în elemente structurale și structuri metalice. În acest sens, plecând de la dimensiunile unei structuri metalice reale, au fost realizate din oțel: segmente de stâlpi la scara 1:1, precum și la scările reduse de 1:2 și 1:4; o coloană la scara 1:10, respectiv un nivel dintr-o structură cu 4 compartimente, tot redus la scara 1:10. Toate aceste elemente și structura 3D la scara 1:10 au fost supuse testelor în două variante: neacoperite, respectiv acoperite cu vopsea termoizolatoare. În acest sens, au fost concepute două standuri electrice originale, unul de putere mare, destinat testării elementelor structurale la scară naturală, iar altul, de putere mică, destinat analizei elementelor și structurilor la scară redusă. Controlul energiei electrice introduse în elementele testate, supuse încălzirii, s-a realizat cu un sistem electronic original. De asemenea, a fost conceput și realizat fizic un sistem de achiziție cu 128 de canale, pentru monitorizarea temperaturii cu ajutorul termorezistențelor tip PT-100, iar placa de achiziție profesională atașată (LabJack UE9) asigura transferul datelor prin multiplexare pentru 112 canale. Numărul maxim al punctelor monitorizate (de temperatură), la structura 3D redusă la scară, a fost de 100. S-a studiat propagarea câmpului termic de-a lungul acestor elemente structurale încălzite la un capăt, prin experimentele efectuate cu ajutorul standurilor, printr-un calcul analitic, respectiv cu analiză numerică (în ABAQUS). A fost propusă o nouă abordare a evaluării mai eficiente a curbelor de variație ale temperaturii de-a lungul structurii (elementelor structurale). Seturile de mărimi adimensionale, elaborate cu ajutorul Analizei Dimensionale, cu referire la secțiunile circulară plină, respectiv tubular-rectangulară au ilustrat eficiența Analizei Dimensionale.

## ABSTRACT

In this PhD thesis several main aspects concerning the heat transfer along metal structural elements and structures were analyzed. Inspired from a real steel structure column part at 1:1, 1:2, 1:4 scale, a column at 1:10, as well as a whole level with four compartments at the same 1:10 scale were manufactured. All of them were subjected to experimental tests in two ways: unprotected and protected with intumescent paint against heat transfer. Two original testing benches were conceived: the first, with a higher electric heating power, destined to real-scale structural elements' testing, the second, having a lower power, for the reduced scale models. The control of the invested electric power, destined for heating of the tested structural elements, was assured by an original electronic system. Also, an original data acquisition system, with 128 channels for temperature monitoring with PT-100 type thermo-resistors, was conceived and manufactured. A commercial LabJack UE9 interface with 112 channels assured the data transfer to the computer. At the 3D reduced scale structure the maximum number of the monitored points was 100. The heat propagation along the above-mentioned structural elements was analyzed, involving both testing benches, the analytical calculus and the numerical simulation (in ABAQUS). A new approach of the temperature variation laws with respect to the experimental-obtained ones was proposed. The worked-out sets of dimensionless variables, with respect to the massive circular and tubular-cross-sections, using the principles of the Dimensional Analysis, were applied for some precise cases.



## Anexa 2. - CV română

### INFORMAȚII PERSONALE

Munteanu (căs. Száva) Ildikó Renata

 (România)

 ildiko.munteanu@unitbv.ro

 <https://orcid.org/0000-0001-8181-5823>

### EXPERIENȚĂ PROFESIONALĂ

03/2012–10/2013

**Director de societate comercială**

S.C. Condor Servicii SRL/Condor IM, Cluj-Napoca (România)

Analizarea ofertelor furnizorilor; întocmirea antemăsurătorilor; întocmirea ofertelor de preț; urmărirea continuă a noilor proiecte; Supervizarea lucrărilor de execuție; Înținerea în evidență a dosarelor personalului.

11/2010–03/2012

**Inginer constructor**

S.C. Condor Servicii SRL, Cluj-Napoca (România)

Analizarea ofertelor furnizorilor; întocmirea antemăsurătorilor; întocmirea ofertelor de preț; urmărirea continuă a noilor proiecte;

03/2010–08/2010

**Technician constructor**

S.C. KESZ. SRL, Cluj-Napoca (România)

Analizarea ofertelor subantreprenorilor și furnizorilor, întocmirea antemăsurătorilor, urmărirea continuă a noilor proiecte.

### EDUCAȚIE ȘI FORMARE

10/2013–Present

**Student doctorand**

Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Inginerie Mecanică (România)

10/2010–06/2012

**Masterat in domeniul Inginerie Civilă**

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca , Facultatea de Construcții (România)

10/2002–06/2006

**Inginer constructor în domeniul Construcțiilor civile, industriale și agricole**

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca , Facultatea de Construcții (România)

09/2002–06/2006

**Diplomă de bacalaureat, Certificat de competențe profesionale arte plastice, grafica**

Liceul de Arta „Pallo Imre”, Odorheiu Secuiesc (România)

### COMPETENȚE PERSONALE

Limba(i) maternă(e)

maghiară

Limbile străine

	ÎNTELEGERE		VORBIRE		SCRIERE
	Ascultare	Citire	Participare la conversație	Discurs oral	Ascultare
română	C1	C1	B2	B1	B2
engleză	A2	B1	A2	A2	A2
germană	A1	A1			

Niveluri: A1 și A2: Utilizator elementar - B1 și B2: Utilizator independent - C1 și C2: Utilizator experimentat  
Cadrul european comun de referință pentru limbi străine

Competențe de comunicare

- competențe de comunicare bune dobândite prin experiența proprie de voluntariat

Competențe

organizaționale/manageriale

muncitorii pe șantier);

- competențe organizatorice bune, lucru în echipă (am organizat diferite evenimente pentru tineri).

Competențe dobândite la locul de muncă

- autoînvățare (am lucrat la o firmă mică, unde multe ori am fost singură și a trebuit să rezolv diferite situații).

Competențele digitale

- o bună cunoaștere a instrumentelor Microsoft Office™;

- folosirea de nivel mediu a programelor de AutoCAD, Ansys ,Mathcad, programe de devize;



## Anexa 3. - CV engleză

### PERSONAL INFORMATION

Ildikó Renata Munteanu (Száva)  
📍 (Romania)  
✉️ [ildiko.munteanu@unitbv.ro](mailto:ildiko.munteanu@unitbv.ro)  
🌐 <https://orcid.org/0000-0001-8181-5823>

### WORK EXPERIENCE

03/2012–10/2013

#### Director of commercial company

S.C. Condor Servicii SRL/Condor IM, Cluj-Napoca (Romania)

Analysis for suppliers; technical and economic documentation for tendering construction work ; preparation of price offers; continuous pursuit of new projects; Supervising the construction work; Keeping of the personnel files.

11/2010–03/2012

#### Civil engineer

S.C. Condor Servicii SRL, Cluj-Napoca (Romania)

Analysis for suppliers; technical and economic documentation for tendering construction work ; preparation of price offers; continuous pursuit of new projects;

03/2010–08/2010

#### Construction technician

S.C. KESZ. SRL, Cluj-Napoca (Romania)

Analysis for suppliers; technical and economic documentation for tendering construction work ;

### EDUCATION AND TRAINING

10/2013–Present

#### PhD Student

Transilvania University of Brasov, Faculty of Mechanical Engineering (Romania)

10/2010–06/2012

#### Master (University Studies-Cycle II) of Civil Engineering

Technical University of Cluj –Napoca, Faculty of Civil Engineering (Romania)

10/2002–06/2006

#### Engineer; Civil, industrial and agricultural construction

Technical University of Cluj –Napoca, Faculty of Civil Engineering (Romania)

09/2002–06/2006

#### Baccalaureate degree

Art High School „Pallo Imre”, Odorheiu Secuiesc (Romania)

### PERSONAL SKILLS

Mother tongue(s)

Hungarian

Foreign language(s)

	UNDERSTANDING		SPEAKING		WRITING
	Listening	Reading	Spoken interaction	Spoken production	
Romanian	C1	C1	B2	B1	B2
English	A2	B1	A2	A2	A2
German	A1	A1			

Levels: A1 and A2: Basic user - B1 and B2: Independent user - C1 and C2: Proficient user  
[Common European Framework of Reference for Languages](#)

Communication skills

- good communication skills gained through experience of volunteering;

Organisational / managerial skills

- leadership (I supervised workers on site);

Job-related skills

- good organizational skills, teamwork (I have organized various events for young people);
- self-learning (I worked at a small firm where I was often alone and had to solve different situations);

Computer skills

- good command of Microsoft Office™ tools
- use of mid-level programs AutoCAD, Ansys, Mathcad, programs currencies;



## DECLARAȚIE DE AUTENTICITATE

Subsemnatii: **MUNTEANU (căs. SZÁVA) Ildikó Renata**

în calitate de

student - doctorand al IOSUD: Universitatea Transilvania din Brașov

autor al tezei de doctorat cu titlul: „Cercetări privind propagarea câmpului termic în structuri metalice pe modele la scară redusă”

și **VLASE Sorin**

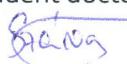
în calitate de Conducător de doctorat al autorului tezei

la instituția Universitatea Transilvania din Brașov

declarăm pe proprie răspundere că am luat la cunoștință de prevederile art.143 alin (4) și (5)\* și art. 170\*\* din Legea educației naționale nr. 1/2011, ale art. 65, alin. 5-7\*\*\*, art. 66, alin (2)\*\*\*\* din Hotărârea Guvernului nr. 681/2011, privind aprobarea Codului Studiilor universitare de doctorat, ale art. I alin. (5) și (7)\*\*\*\*\* din Hotărârea nr. 134 privind modificarea Codului studiilor universitare de doctorat, aprobat prin HG nr. 681/2011 și ale Anexei nr. 2 (Soluționarea sesizărilor cu privire la nerespectarea standardelor de calitate sau de etică profesională, inclusiv cu privire la existența plagiatului, în cadrul unei teze de doctorat) din Ordinul MENCS nr. 3482/2016 privind aprobarea Regulamentului de organizare și funcționare a Consiliului Național de Atestare a Titlurilor, Diplomelor și Certificatelor Universitare (CNATDCU) și ne asumăm consecințele nerespectării acestora.

Semnătură

Student doctorand



Semnătură

Conducător de doctorat





**\*(4)** indrumatorii lucrărilor de licență, de diplomă, de disertație, de doctorat răspund solidar cu autorii acestora de asigurarea originalității conținutului acestora.

**(5)** este interzisă comercializarea de lucrări științifice în vederea facilitării falsificării de către cumpărător a calității de autor al unei lucrări de licență, de diplomă, de disertație sau de doctorat.

**\*\*(1)** În cazul nerespectării standardelor de calitate sau de etică profesională, se aplică prevederile Hotărârii nr. 134 privind modificarea Codului studiilor universitare de doctorat, aprobat prin HG nr. 681/2011.

**(2)** Reacreditarea școlii doctorale se poate obține după cel puțin 5 ani de la pierderea acestei calități, numai în urma reluării procesului de acreditare, conform art. 158.

**(3)** Redobândirea calității de conducător de doctorat se poate obține după cel puțin 5 ani de la pierderea acestei calități, la propunerea IOSUD, pe baza unui raport de evaluare internă, ale cărui aprecieri sunt validate printr-o evaluare externă efectuată de CNATDCU. Rezultatele pozitive ale acestor proceduri sunt condiții necesare pentru aprobare din partea Ministerului Educației, Cercetării, Tineretului și Sportului.

**(4)** Conducătorii de doctorat sunt evaluati o dată la 5 ani. Procedurile de evaluare sunt stabilite de Ministerul Educației, Cercetării, Tineretului și Sportului, la propunerea CNATDCU.

**\*\*\* (5)** teza de doctorat este o lucrare originală, fiind obligatorie menționarea sursei pentru orice material preluat.

**(6)** studentul - doctorand este autorul tezei de doctorat și își asumă corectitudinea datelor și informațiilor.

prezentate în teză, precum și a opinilor și demonstrațiilor exprimate în teză.

**(7)** conducătorul de doctorat răspunde împreună cu autorul tezei de respectarea standardelor de calitate sau de etică profesională, inclusiv de asigurarea originalității conținutului, conform art. 170 din Legea nr. 1/2011.

**\*\*\*\*** protecția drepturilor de proprietate intelectuală asupra tezei de doctorat se asigură în conformitate cu prevederile legii.

**\*\*\*\*\*****(5) (6)** În cazul în care membrii CNATDCU din cadrul unei comisii de evaluare a unei teze de doctorat constată nerespectarea standardelor de etică profesională, inclusiv existența plagiatului, în cadrul tezei și/sau al activităților care au dus la realizarea acesteia, aceștia invalidează teza de doctorat, comunică aceste constatări celorlalți membri ai comisiei de evaluare și sesizează Consiliul general CNATDCU pentru analiza responsabilității conducătorului de doctorat sau a școlii doctorale și pentru aplicarea prevederilor art. 69 alin. (5).

**(7) (3)** În termenul prevăzut la alin. (2), Consiliul general al CNATDCU solicită IOSUD punctul de vedere care trebuie formulat în termen de maximum 30 de zile de la primirea solicitării. În situația în care IOSUD confirmă încălcarea standardelor de calitate sau de etică profesională, va transmite CNATDCU decizia privind propunerea de retragere a titlului, semnată de rector sau, după caz, de președintele Academiei Române, avizată din punct de vedere juridic de universitate sau, după caz, de Academia Română.

**(4)** În termenul prevăzut la alin. (2), Consiliul general al CNATDCU decide dacă au fost sau nu respectate standardele de calitate sau de etică profesională, inclusiv existența plagiatului, iar președintele CNATDCU transmite autorului sesizării, autorului tezei și IOSUD decizia Consiliului general al CNATDCU și motivarea acesteia. Aceștia au la dispoziție 10 zile pentru formularea unei contestații privitoare la procedură, iar Consiliul general al CNATDCU are la dispoziție 10 zile pentru formularea răspunsului la contestație.

**(5)** În cazul în care Consiliul general al CNATDCU decide că nu au fost respectate standardele de calitate sau de etică profesională, inclusiv în ceea ce privește plagiatul, președintele CNATDCU propune Ministerului Educației Naționale și Cercetării Științifice una sau mai multe din următoarele măsuri:

- a)** retragerea calității de conducător de doctorat;
- b)** retragerea titlului de doctor;
- c)** retragerea acreditării școlii doctorale.