



Universitatea  
Transilvania  
din Braşov

**ŞCOALA 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**

**BRAȘOV, 2018**

Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale  
2007-2013MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICEUniversitatea  
Politehnica  
Timișoara

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

## COMPONENȚA

### 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 .....

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 luați parte la ședința publică de susținere a tezei de  
doctorat.

Vă mulțumim.

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

OIPOSDRU

MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICEUniversitatea  
Politehnică  
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 ingineresti - ATTRACTING” POSDRU/159/1.5/S/137070.

Tot în perioada studiilor doctorale, am avut ocazia să țin ore de seminar și de laborator. Pentru această perioadă sunt recunoscătoare studenților mei, care m-au pus în fața provocărilor, 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 de teorie, 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 surprize 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.



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale  
2007-2013MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICE

OIPOSDRU

Universitatea  
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 Mátyás** 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 reprezentat o provocare. Datorez mulțumiri deosebite pentru Soacrei mele, pentru că a avut grijă, cu multe dragoste și răbdare, de Fiica mea în ultimul an, ca eu să pot să lucrez la teză. Mulțumiri deosebite vă 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 obositoare și pline 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





Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013Instrumente Structurale  
2007-2013MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICE

OIPOSDRU

Universitatea  
Politehnică  
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. Studiul 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 conducție 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





MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICE



5.4. Concluzii .....	128	79
<b>6. IMPLEMENTAREA AVANTAJELOR ANALIZEI DIMENSIONALE ÎN INVESTIGAȚII PE MODELE REDUSE LA SCARĂ</b> .....	129	80
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. Mulțimea dimensională și determinarea variabilelor cu dimensiuni impuse .....	131	81
6.1.4. Relevanța, respectiv irelevanța dimensională a unei variabile .....	136	85
6.1.5. Irelevanța 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
<b>7. CONCLUZII, CONTRIBUȚIILE AUTOAREI, DISEMINAREA REZULTATELOR, PERSPECTIVE</b> .....	159	101
7.1. Concluzii .....	159	101
7.2. Contribuțiile 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



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

OIPOSDRU

MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICE

## 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 aproximation 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





MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICE



<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	91
6.3. Conclusions.....	158	100
<b>7. CONCLUSIONS, PERSONAL CONTIRIBUTIONS,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 capacității 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 supleței 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 aceste informații se extrapolează pe prototip. În acest sens, Analiza Dimensională reprezintă o metodă eficientă, însă, utilizarea ei sub formă 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. Printr-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.

Ținând 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 al doctorandei a constat în urmărirea amănunţită a propagării câmpului termic pe modele neacoperite, respectiv acoperite cu vopsele intumescente, având secţiuni tubular-rectangulară. După aceasta s-a trecut la stabilirea legilor de distribuţie probabile ale câmpurilor termice, mai întâi pe modele, iar ulterior şi verificarea unor elemente la scară naturală.

Rezultatele măsurărilor au fost implementate, atât în calcule analitice, cât şi în cele numerice, obţinând o bună corespondenţă. În acest proces, Analiza Dimensională a oferit informaţii deosebit de utile.

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

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

Structura tezei:

În **Capitolul 1**, intitulat *Stadiul actual al cercetărilor teoretice şi experimentale* sunt sintetizate principalele realizări pe plan mondial privind evaluarea comportamentului la incendii al unor elemente structurale importante. Astfel, au fost trecute în revistă: importanţa protecţiei contra incendiilor; soluţii de protecţie utilizate la structuri metalice; avantajele şi limitele utilizării vopselelor intumescente în protecţia la incendii; principalele rezultate ale cercetărilor analitice şi numerice privind rezistenţa la incendii; rezultatele cele mai semnificative ale investigaţiilor experimentale; standurile cele mai utile din punctul de vedere al temei acestei teze, precum şi implementarea utilizării modelelor reduse la scară, atât în investigaţii teoretice, cât şi experimentale. Studii amănunţite privind stabilirea teoretică şi verificarea experimentală a distribuţiei câmpului termic de-a lungul unei bare drepte de secţiune plină prezentate în lucrările [TUR16] şi [TUR18] au servit drept repere utile în stabilirea strategiei proprii a doctorandei.

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

În **Capitolul 3**, *Conceperea şi 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 şi ale unor structuri de rezistenţă reduse la scara 1:10. Pe lângă descrierea detaliată a celor două standuri şi sublinierea avantajelor acestora, sunt prezentate şi particularităţile sistemului de achiziţie a datelor, respectiv al sistemului electronic de comandă de putere al standurilor.

**Capitolul 4**, intitulat *Cercetări experimentale pe elemente componente simple şi pe o structură spaţială*, conţine rezultatele experimentale ale investigaţiilor, efectuate pe segmente de stâlpi realizate la scările 1:1, 1:2 şi 1:4, pe un stâlp realizat la scara 1:10, prevăzută cu 1...4 grinzi, precum şi 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, contribuțiile 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 ŞI EXPERIMENTALE

## 1.1. Importanţa protecţiei contra incendiilor

Normativele EN 1993-1-2 şi P118/1 menţionează cerinţa esenţială, introdusă de către Directiva 89/106/EEC (Directiva produselor pentru construcţii), 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. Soluţii de protecţie ale structurilor metalice

Este bine-cunoscut faptul că structurilor de rezistenţă din oţel li-se reduce capacitatea portantă începând cu 200°C, iar la aproximativ 500°C acestea îşi pierd peste 50% din capacitatea lor portantă. Un asemenea fenomen are loc în cazul incendiilor, când elementele structurii de rezistenţă sunt încălzite în mod excesiv de fluxul termic degajat de focul produs.

În general protecţiile se categorizează în două grupuri mari:

- active, respectiv
- pasive.

*Protecţiile 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 şi ipsos;
  - Mortar pe baza de lână minerală, adaos de ciment, bentonită şi alţi aditivi;
- Acoperire cu beton a profilelor de oţel;
- Protejarea cu vopsea intumescentă;
- Îmbrăcarea cu ţigle [BEZ17].

O analiză comparativă detaliată a diferitelor soluţii de izolare se regăseşte şi 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. Vopseaua 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 solvenți;
- Bicomponentă cu rășini epoxidice cu sau fără solvenți.

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 oțelul, 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.



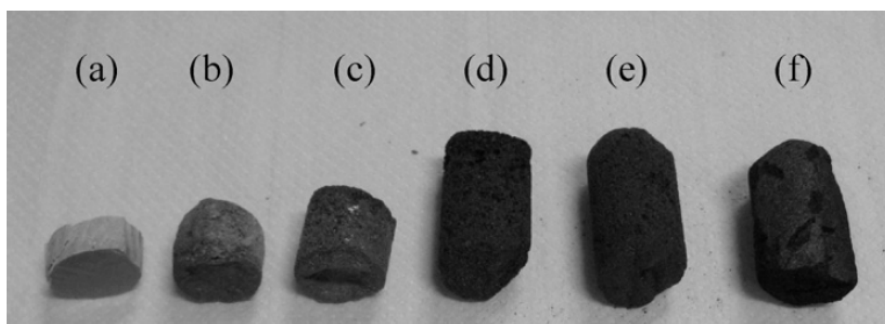
## 1.5. Cercetări experimentale ale comportamentelor la incendii

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 contracție. 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.

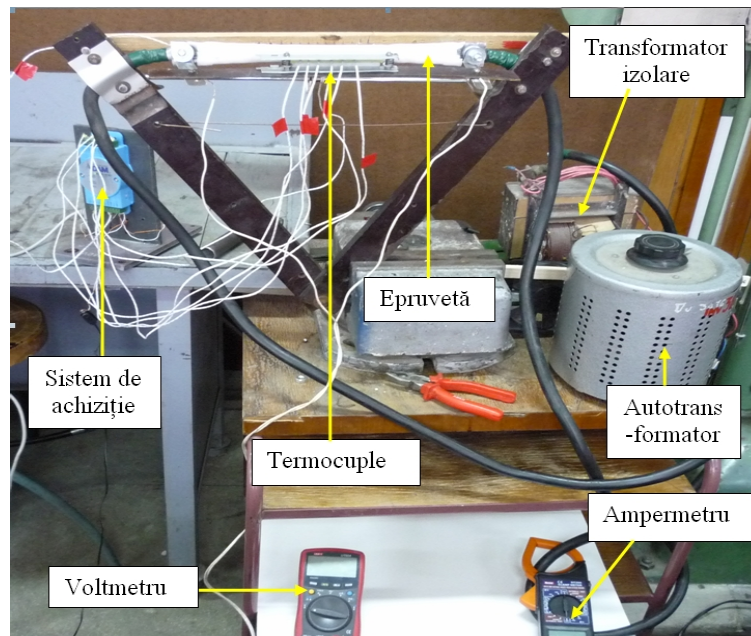


În acest caz epruveta tubulară este din țevă sudată de oțel, cu dimensiunile  $l=1000\text{ mm}$ ,  $\varnothing_{\text{exterior}}=22\text{ mm}$ , grosime de  $0,5\text{ mm}$  și încălzită electric la capete.

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 epruvetei;
- 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 justeții 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 realizați 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 de asemenea 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 conducție  $\lambda = 0,1089 \frac{W}{m \cdot K}$ .

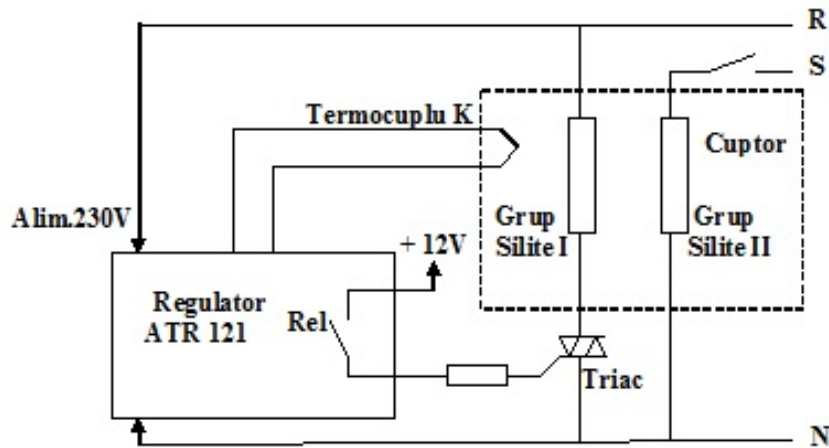


Fig.1.5.5. Schema electrică de principiu a cuptorului [DAN11]

Comparând cele două rezultate ale coeficientului de conducție  $\lambda$ , 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.*

*Acest rezultat neașteptat a îndemnat-o pe doctoranda să efectueze toate încercările 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 secțiuni 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 semicarcaselor **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 TC, 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 și secțiunile **H-H**, redată în aceeași **figură 1.5.7**).



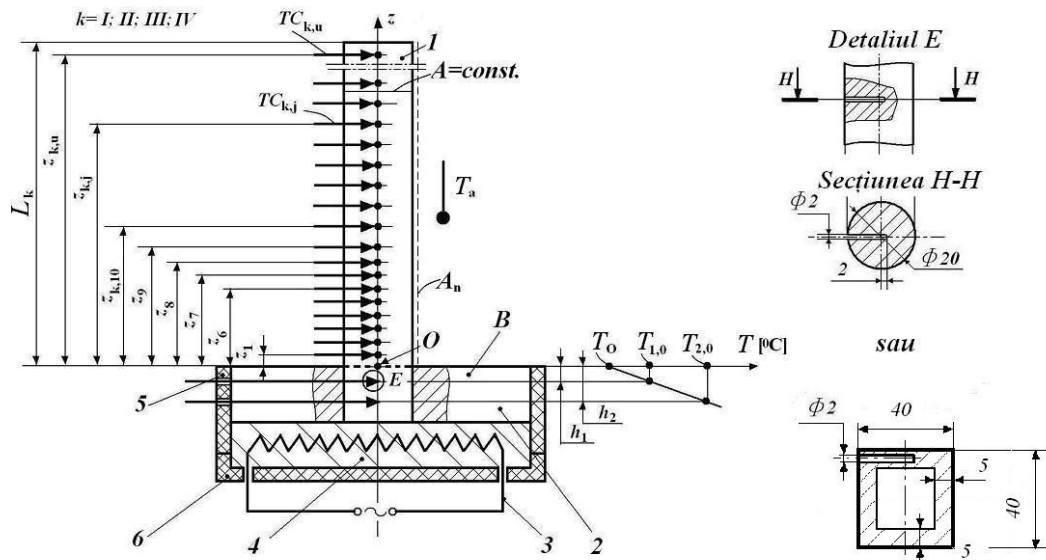


Fig. 1.5.7. Schema de principiu a standului destinat barelor singulare [TUR18]

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 termocuple, iar din valorile oferite de acestea și ținând seama de legea liniară de propagare a câmpului termic, a fost obținută această valoare:

$$T_0 = \frac{T_{1,0} \cdot h_2 - T_{2,0} \cdot h_1}{(h_2 - h_1)} \quad (1.1)$$

Atât aceste temperaturi  $T_{1,0}$  și  $T_{2,0}$ , cât și aceea a mediului ambiant  $T_a$  au fost obținute prin măsurători repetate, a câte 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 termocuplelor 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 finețe, 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;

$\alpha_n [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$  - coeficientul de transfer termic prin convecție pentru suprafața exterioară a barei ;

$\lambda [W/(m \cdot ^\circ C)]$  - coeficientul de conductivitatea termică a materialului barei.

În acest prim set de investigații experimentale au fost efectuate teste la două temperaturi nominale  $T_{0,n} : 100; 400 \text{ } ^\circ C$  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  $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}$  și lungimi de  $400 \text{ mm}$ .

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, doctoranda și-a adus modesta ei contribuție prin următoarele două aspecte, care și pentru prezenta teză de doctorat au constituit repere solide în analiza datelor măsurătorilor proprii, și anume:

- introducerea tuturor datelor măsurătorilor (temperatură-cotă "z" de dispunere a termocuplelor) 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 " $m_0$ " respecta (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 doctorandei 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 implicat 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 articole 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 testele 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 de doctorandă 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 însemnate 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], [THO83], [THO00], [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  $Z$ , reprezintă totodată și sursa de căldură. Acest corp  $B$  poate fi rotit împreună cu bara  $Z$ , 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 accelerației 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 conducție, fluxul de căldură  $Q(O)$ .



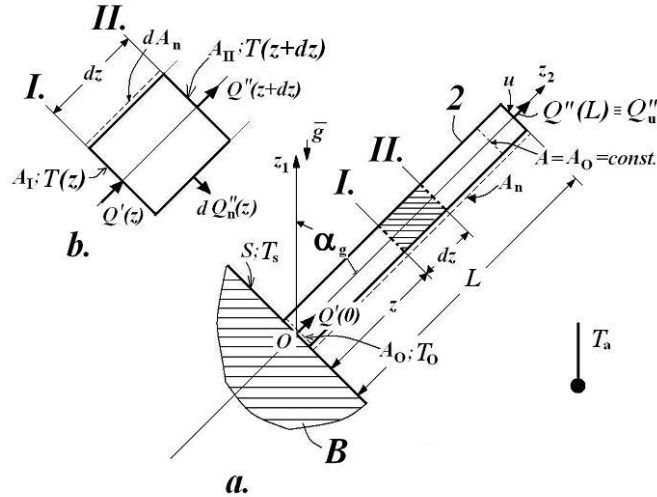


Fig.1.7.1. Schema de calcul a bilanţului termic [TUR16]

Fluxul de căldură  $Q(0)$  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 suprafeței 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

$c_1, c_2$  [°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:

- a) Fluxul termic total ieșit din bară trebuie să fie egal cu cel intrat  $Q'(0)$ ;
- b) 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 lucrării ([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, doctoranda 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 structuri spațiale, devine insuficientă;
- Comportamentul de izolare termică al stratului 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 conducție, 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 mărimii 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 (evident, în limitele rezonabilului), și care în acest caz nu mai trebuie să fie introduse în cuptor, dimensiunile standului se păstrează;
- Confecționarea unui stand, cu performanțe similare celui conceput și realizat fizic de către autorul principal al lucrării [TUR18], este irealizabilă din punct de vedere material de către doctorandă;
- În cercetările sale doctoranda avea 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 termocuplele speciale, de precizie metrologică, nu erau la dispoziția doctorandei;
- În lipsa unui asemenea stand, efectuarea pe plan local a unor teste cu elemente structural 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 de către doctorandă;
- În consecință, aceste concluzii și recomandări ale autorului principal al lucrării [TUR18], privind rezultatele cercetărilor sale proprii, vor fi luate în considerație de doctorandă în investigațiile sale prezente.

***Pe baza acestor concluzii doctoranda, pentru realizarea investigațiilor proprii, a propus următoarea strategie:***

- Luând în considerație faptul că, elementele structurale testate vor fi de obicei profile tubulare pătrate cu pereți relativ subțiri (de 1,5 mm), utilizarea unor termocuple 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 pereți suficient de groși ai țevilor, în care aceste termocuple ar trebui fixate;
- În consecință, doctoranda 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 utilizați 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 repetate ale termorezistențelor, nu va avea loc deterioarea acestora;
- Fixarea acestor subansamble (conector-PT) pe piesa supusă testelor se va realiza cu ajutorul unor șuruburi M3, deoarece, chiar la grosimi reduse ale pereților 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 doctorandei, este de cca.  $\pm(3 \dots 4)\%$  și este evident sub aceea de la termocuple;
- Din aceste motive, *nefiind vorba de măsurători metrologice, ci numai de a ilustra aplicabilitatea unei strategii elaborate de doctorandă, 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, autoarea și-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 coeficienților 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 ŞI 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 aşezat pe trei picioare **2**, prevăzute cu role (pentru asigurarea mobilităţii standului), peste care este fixat suportul **3**, sub formă de trunchi de piramidă, peste care sunt aşezate 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 funcţie de scara lungimilor adoptată), însă cu aceeaşi suprafaţă de aşezare 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

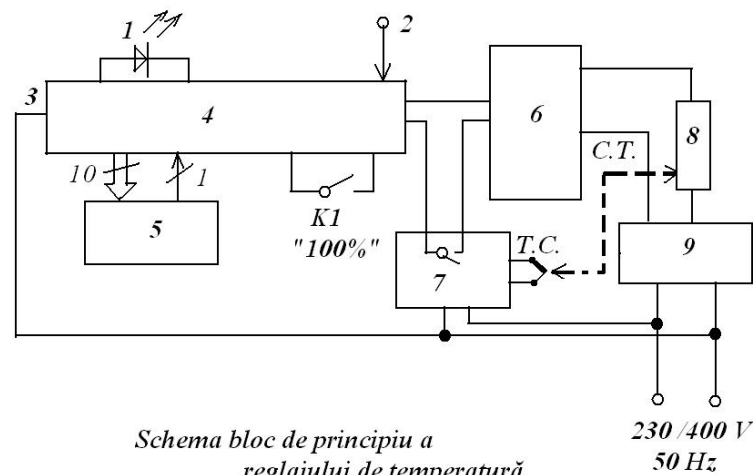
În **figura 3.1.2.a** și **b.** este redată dispunerea elementelor de încălzire (12 bucăți de bare de Silită), izolate la nivelul elementelor de conectare la curentul electric, iar **figura 3.1.2.b.** oferă o imagine din timpul încălzirii acestor bare de Silită. În vederea diminuării, pe cât era posibil, 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  $45\text{-}50^\circ\text{C}$ , iar sub cadrul metalic **1**, valoarea de cca.  $60\text{-}65^\circ\text{C}$ . 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  $500\text{-}600^\circ\text{C}$ . 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 reglatoarele 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. Reglatoarele inteligente cu autoînvățare – autoreglaj dau 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).



*Schema bloc de principiu a reglajului de temperatură*

1-LED semnalizare; 2 - Alimentare +12 V; 3 - Intrare sincron;  
4 - Circuit digital de comandă; 5 - Comutator selector;  
6 - Releu static "ZPS" de 40 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 blocate. 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 acționează 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 prestabilă. 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 conducție strict numai la trecerile prin zero ale tensiunii de alimentare (ZPS – zero point switch). Astfel, prin păstrarea nealterată a formei sinusoidale a tensiunii și curentului, 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 releelor 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 termocuple **T.C.**, fixată într-un alezaj potrivit în zone de





joncţiune 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).

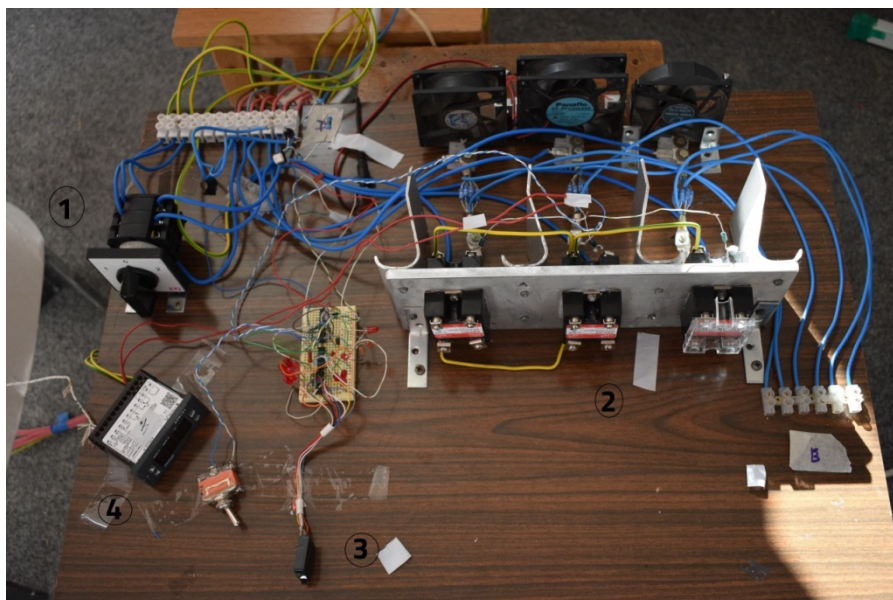


Fig.3.1.4. Vederea generală a sistemului de reglaj termic

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.

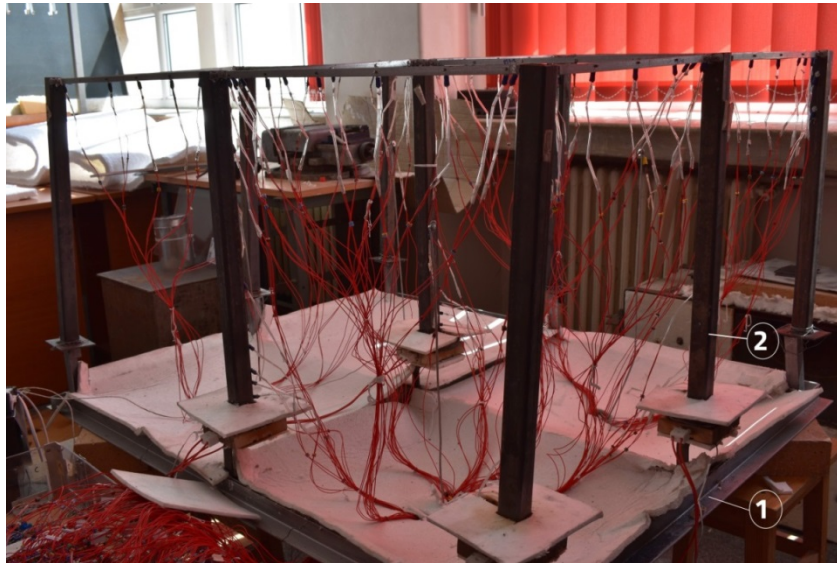
### 3.2. Stand destinat testării unor elemente structurale la scară redusă

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 monitorizării temperaturilor din cele patru compartimente), iar dispunerea 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 termoconducție 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 inerția termică foarte mică a stâlpului propriu-zis, 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.**



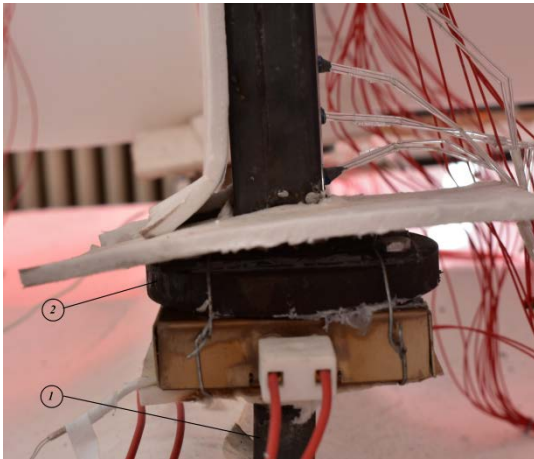


Fig.3.2.2. Detaliul sursei de căldură

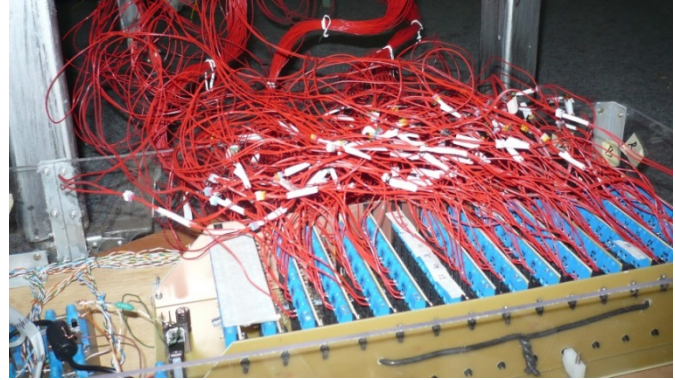


Fig.3.2.3. Sistemul de achiziție al datelor

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 ( $16 \times 8 = 128$ ).

*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), permițând 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.



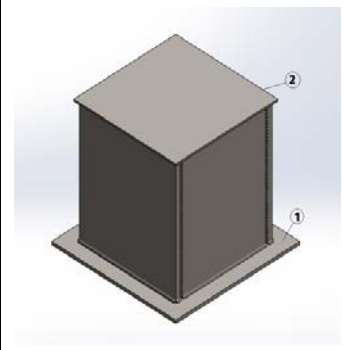
## 4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PE ELEMENTE COMPONENTE SIMPLE ŞI PE O STRUCTURĂ SPAȚIALĂ

### 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 (Braşov). S-a considerat un segment de înălțime 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 scările 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 temperatura 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 înălțimi).

Tabelul 4.1

	Scara	Dimensiuni [mm]	Înălțime [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 solvenți 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 asigură controlul termic al procesului de încălzire;





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

**Tabelul 4.2.**

Prototip Scara 1:1	Scara 1:2	Scara 1:4
<b><math>z(j)</math> [m]</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 şi 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 menţionat 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 stabile de 100 °C, a suplimentului de timp scurs până la atingerea regimului stabil de la 200 °C etc.

În **figurile 4.1.1.** şi **4.1.2.** sunt prezentate evoluţiile 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 şi 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 şase diagrame. Aceste aluri ale curbelor de temperatură-timp depindeau şi de poziţia senzorilor de temperatură pe elementul structural. Odată cu apropierea de partea superioară a elementului structural, aceste curbe deveneau tot mai netede.



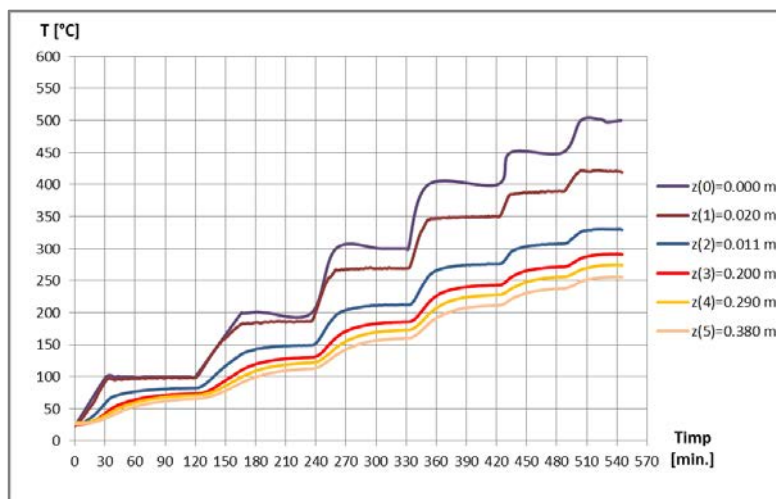


Fig. 4.1.1. Evoluția în timp a temperaturilor la prototipul nevopsit

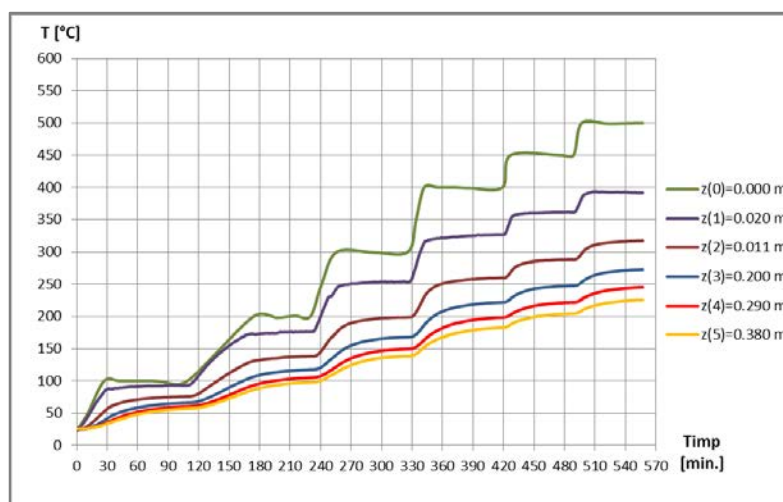


Fig. 4.1.2. Evoluția în timp a temperaturilor la prototipul vopsit

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 trasarea 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 îndepărtarea 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.

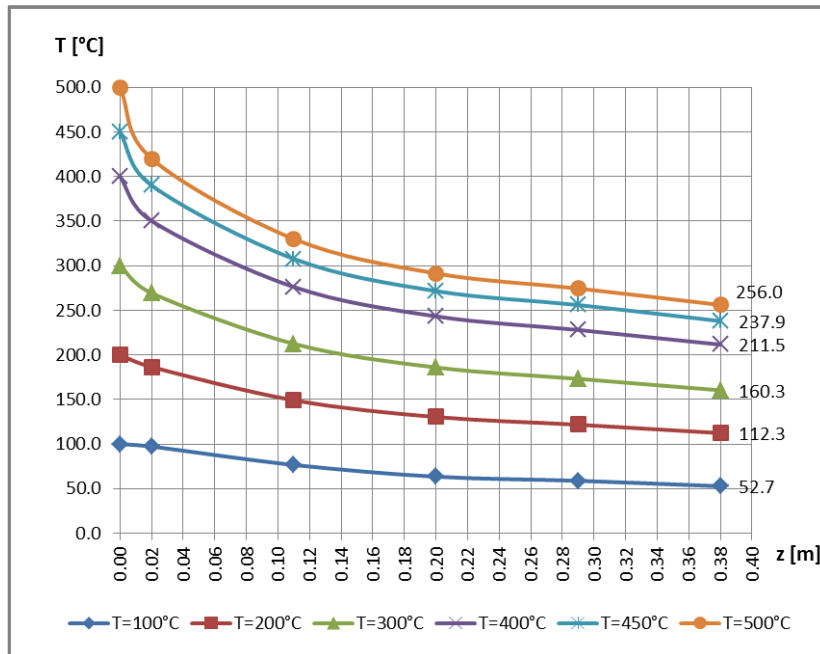


Fig. 4.1.7. Variația temperaturii de-a lungul prototipului nevopsit

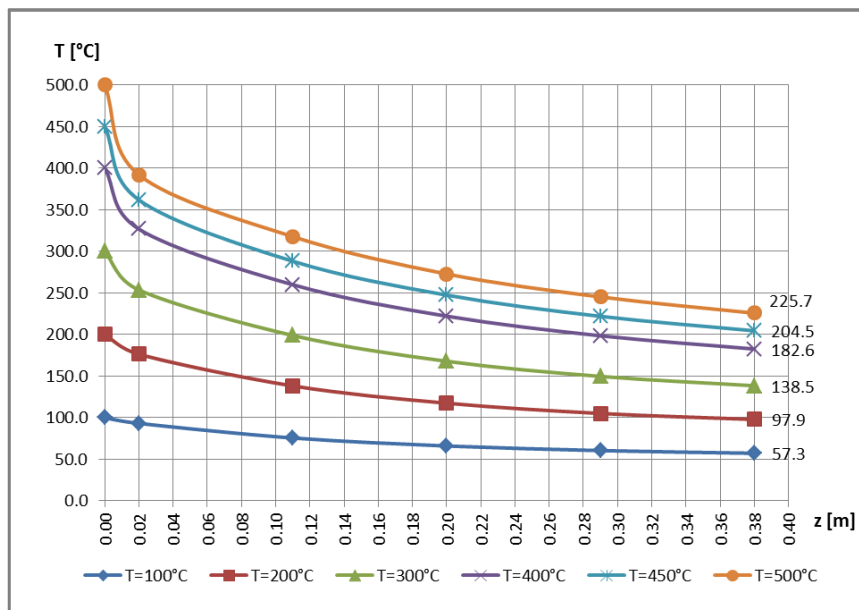


Fig. 4.1.8. Variația temperaturii de-a lungul prototipului vopsit



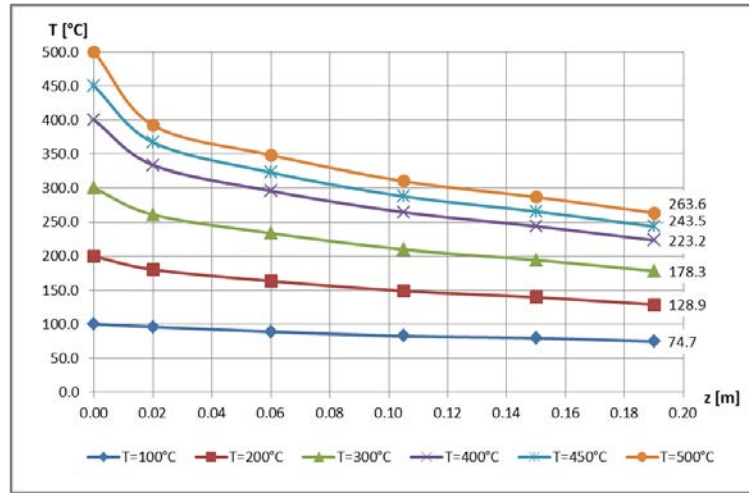


Fig. 4.1.9. Variația temperaturii de-a lungul modelului redus la scara 1:2 nevopsit

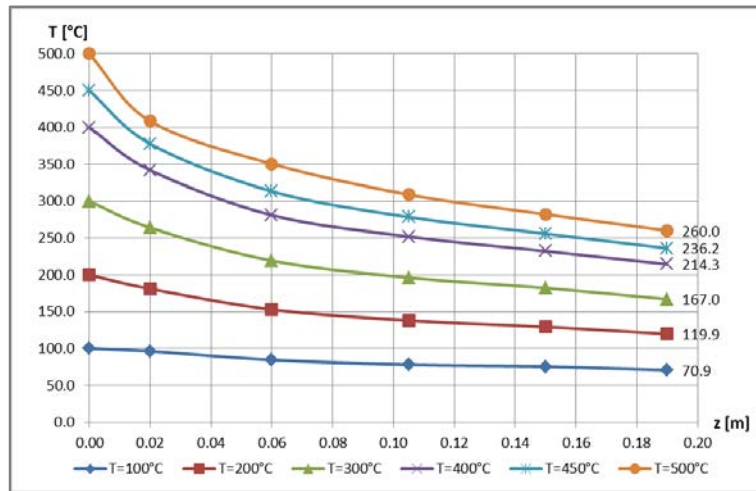


Fig. 4.1.10 . Variația temperaturii de-a lungul modelului redus la scara 1:2 vopsit

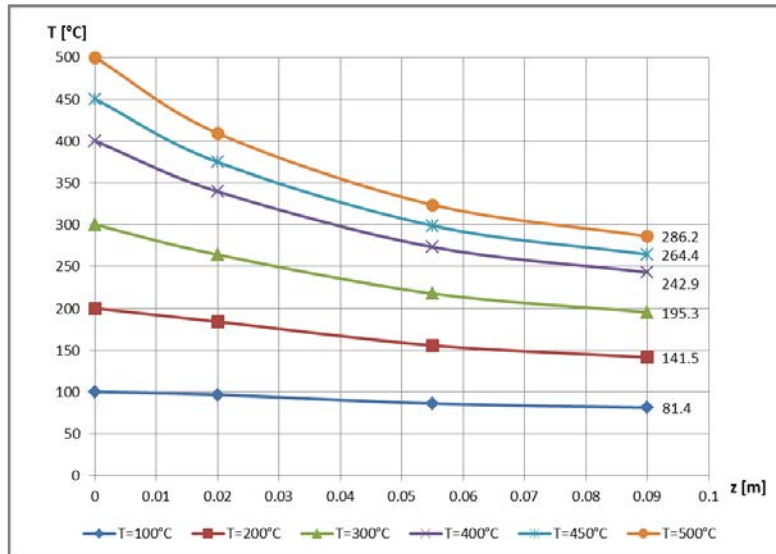


Fig. 4.1.11. Variația temperaturii de-a lungul modelului redus la scara 1:4 nevopsit





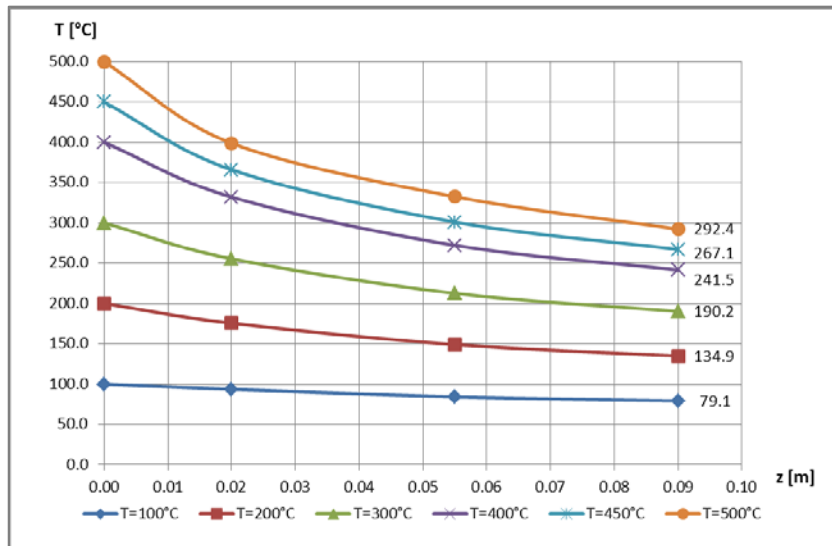


Fig. 4.1.12. Variația temperaturii de-a lungul modelului redus la scara 1:4 vopsit

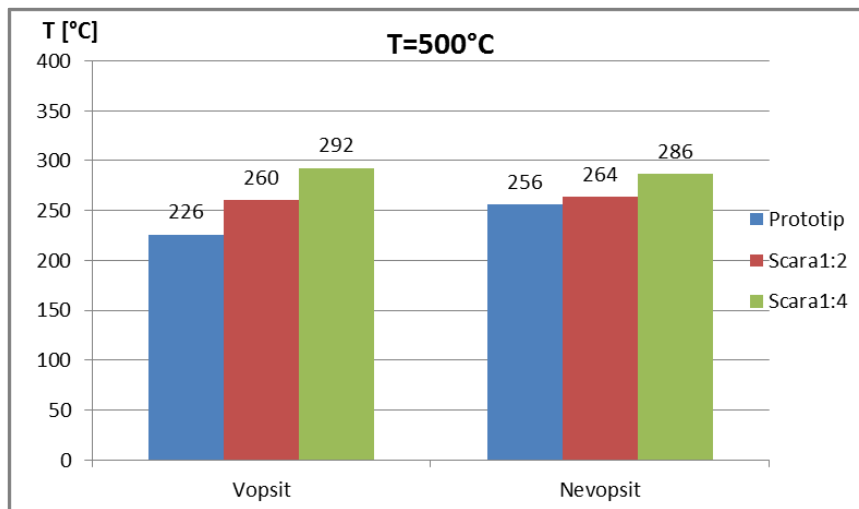


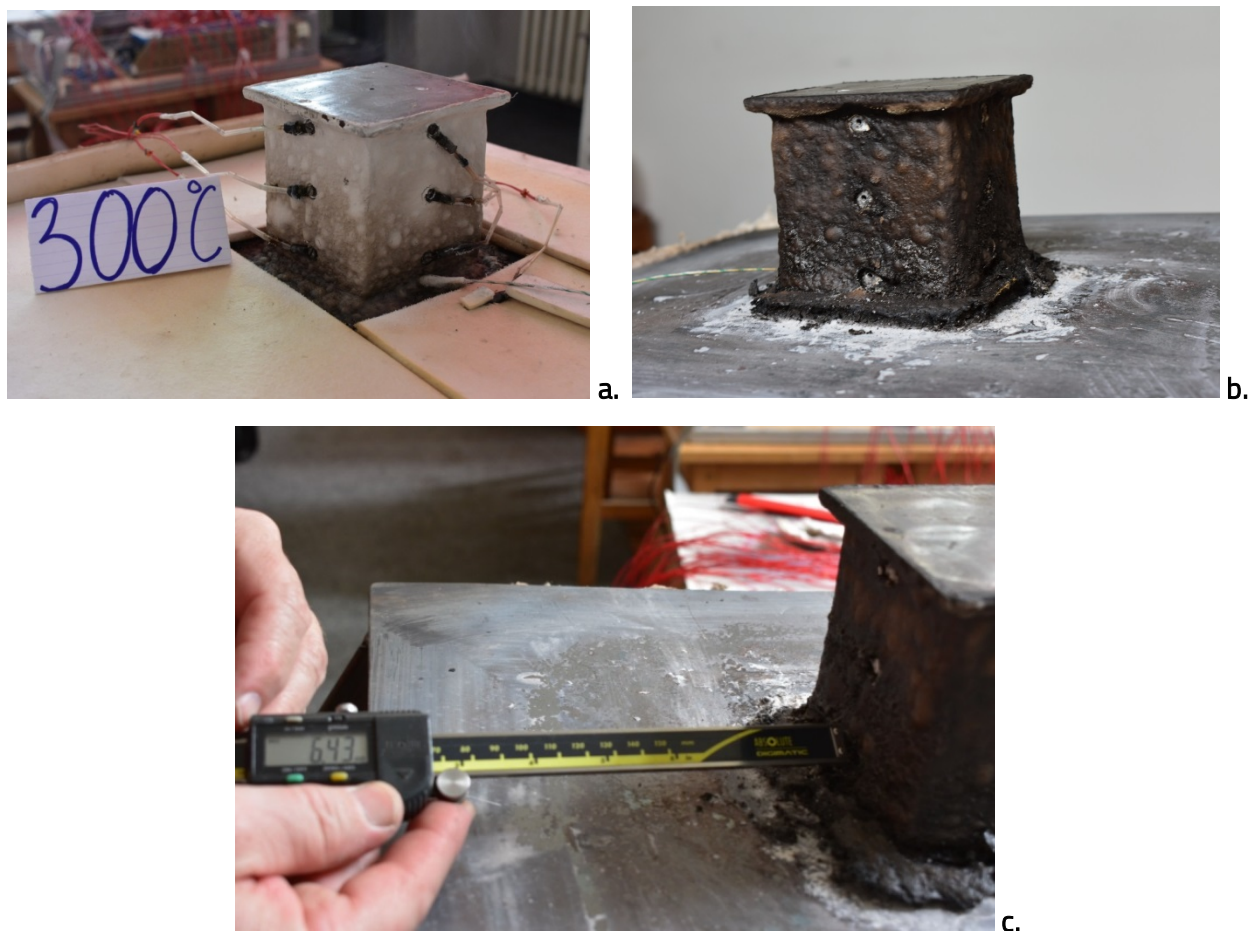
Fig. 4.1.13. Compararea valorilor măsurate, la capătul superior al stâlpilor, în cele două variante (nevopsit și vopsit)

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, explicabile 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 fotografiile ale modelului redus la scara 1:4, acoperite cu vopsea, la temperaturile de 300°C, 500°C, precum și măsurarea grosimii maxime a stratului de spumă termoizolantă ( $z(1)=0,020\text{ m}$ ).

Pe baza măsurării pe întreaga suprafaţă şi evaluării statistice a datelor, s-a obţinut 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 creştere 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 acelaşi motiv, şi procesul de descompunere şi de transformare în spumă a vopselei a avut loc la temperaturi puţin mai ridicate ( $250\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ceea ce se poate urmări şi 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 şi 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 suprafaţa bazei elementului structural testat), aceasta a fost acoperită cu un strat de saltea termoizolantă (a se vedea pentru detalii şi **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 *kW*, iar cantitatea de căldură furnizată de acestea nu asigura decât atingerea unor temperaturi de maximum 400°C la baza stâlpilor, datorită pierderilor, pe care nu avea cum să le elimine doctoranda. În acest sens, un neajuns al acestui tip de încălzire consta în transferul primar al fluxului termic la talpa **1** din **figura 4.2.1.** (un cilindru de oțel cu diametrul de 105 *mm* și înălțimea de 15 *mm*, cu o inerție termică considerabilă față de profilul tubular pătratic, care reprezenta stâlpul testat). Chiar dacă elementul de încălzire putea furniza temperaturi de până la 600 °C, datorită acestui element intermediar, în timp util stâlpul testat ajungea numai la 400-450 °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 °C nu ridica 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 tăpii stâlpului



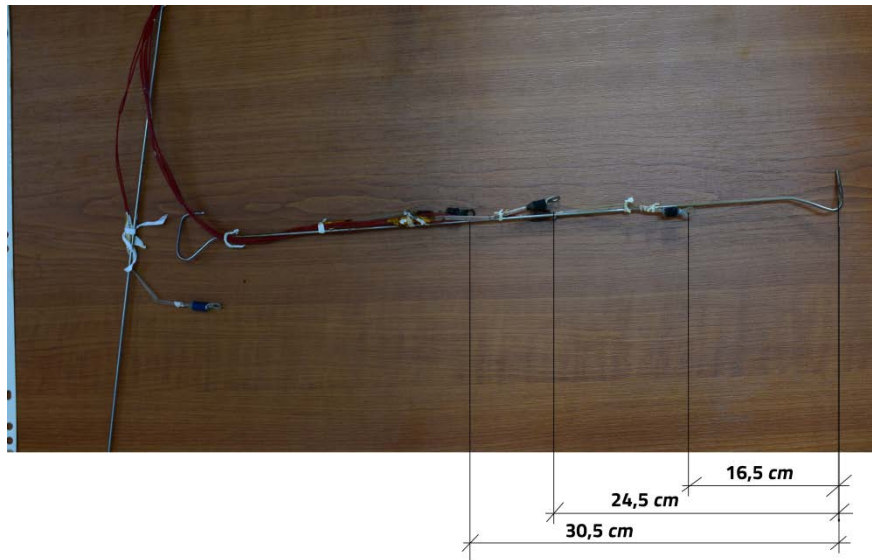
**Fig. 4.2.2.** Standul de putere mare, împreună cu incinta termoprotectoare a stâlpului

Ținând seama de inerția termică mică a stâlpului testat, s-a încercat delimitarea unei zone cilindrice în jurul acestuia, unde regimul termic să nu fie influențat de curenții de aer accidentali din laborator, 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 confecționat un cilindru cu un diametru de 450 *mm* și înălțime de 610 *mm* din saltea termoizolantă de 25 *mm* grosime (**Figura 4.2.2.**)

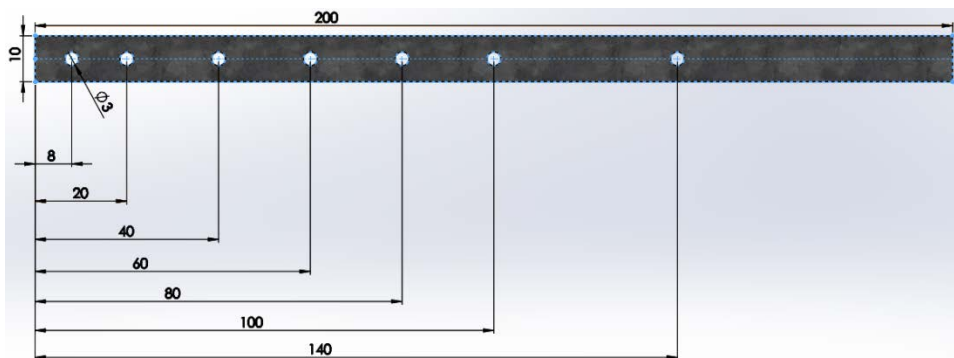


Pentru efectuarea bilanşului termic (ca o ilustrare a metodologiei propuse de doctorandă) era necesară şi cunoaşterea regimurilor termice din interiorul stâlpului încălzit. În acest sens, pe un suport de sârmă de oţel, au fost fixate trei termorezistenţe PT la distanţe bine-definite faţă de baza stâlpului (la 16,5 cm, 24,5 cm şi 30,5 cm) (Fig.4.2.3.a.).

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



**a.**



**b.**

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

**b.)** monitorizarea temperaturii grinzii

Grinzile au fost confecţionate din oţel plat cu dimensiuni de 10 x 1,5 mm şi lungime de 200 mm, iar stâlpul a avut dimensiuni de 30 x 30 x 1,5 mm şi cu o înălţime de 500 mm. În figura 4.2.3.b. este prezentată aşezarea găurilor la grinzi, unde au fost ulterior fixate PT-urile.

La baza stâlpului, în zona de joncţiune cu discul de oţel (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:  $z(1) = 0,015\text{ m}$ ,  $z(2) = 0,030\text{ m}$ ,  $z(3) = 0,045\text{ m}$ ,

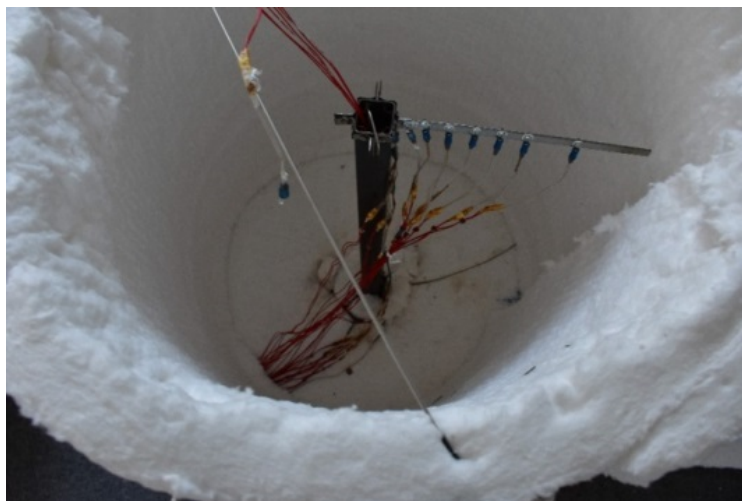




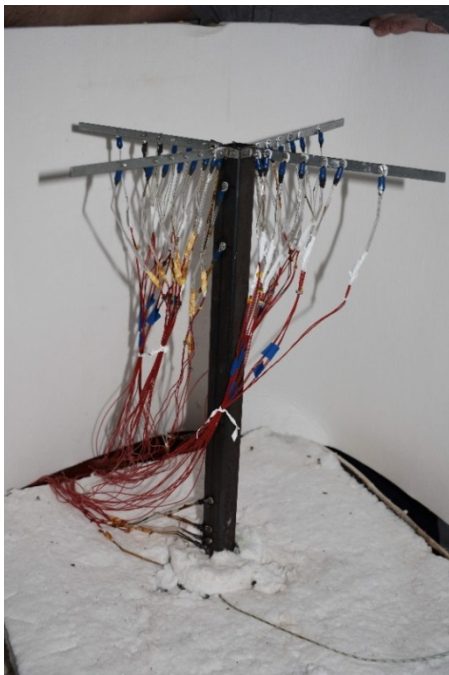
$z(4)= 0,060\ m$ ,  $z(5)= 0,100\ m$ ,  $z(6)= 0,200\ m$ ,  $z(7)= 0,400\ m$ ,  $z(8)= 0,460\ m$ , respectiv la capătul superior al stâlpului la distanţa  $z(9)= 0,495\ m$ .

De asemenea, pentru a putea fi fixat acest stâlp (împreună cu suportul lui cilindric) pe zona de aşezare 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 aşezat în condiţii bune. Între suportul cilindric al stâlpului şi 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 şi în acest caz acoperită cu o saltea termoizolantă de  $25\ mm$  grosime.

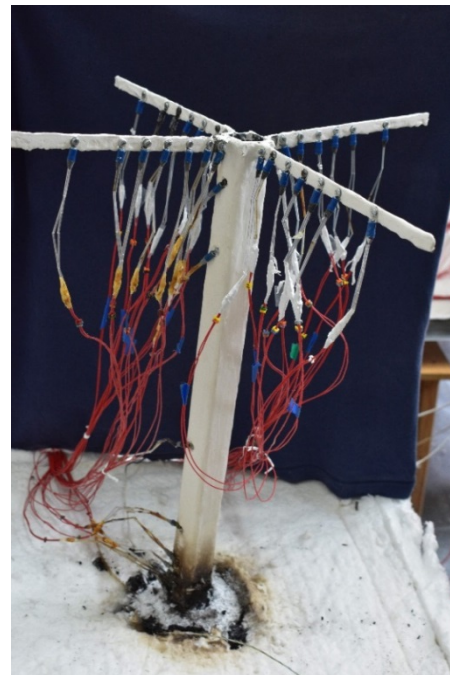
Din figurile următoare se poate observa izolarea termică atentă a elementului testat cu saltea termoizolantă.



a.



b.



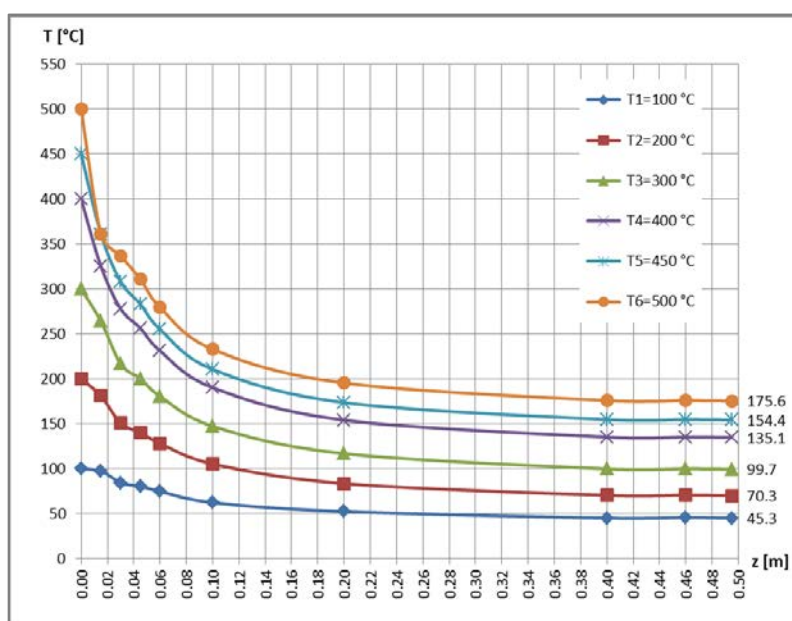
c.

**Fig. 4.2.5.** Testarea stâlpului: a.) cu o singură grindă şi 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 constatat 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 redată în **Tabelul. 4.4.**

**Tabelul 4.4.**

Cazul	$T_7=500^{\circ}\text{C}$			
	$z(7)=0.400\text{ m}$	$z(8)=0.460\text{ m}$	$z(9)=0.495\text{ m}$	$T_{\text{amb.}} [^{\circ}\text{C}]$
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 indentice 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  $T_{0,n} = z(0)$ ,  $z(7)$  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 cilindru protector neacoperit.

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



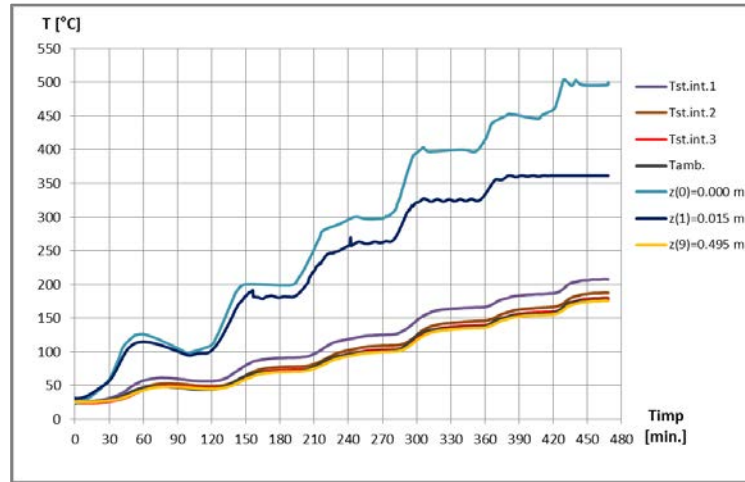


Fig. 4.2.7. Evoluțiile în timp ale temperaturilor aerului din interiorul stâlpului, când cilindru a fost închis

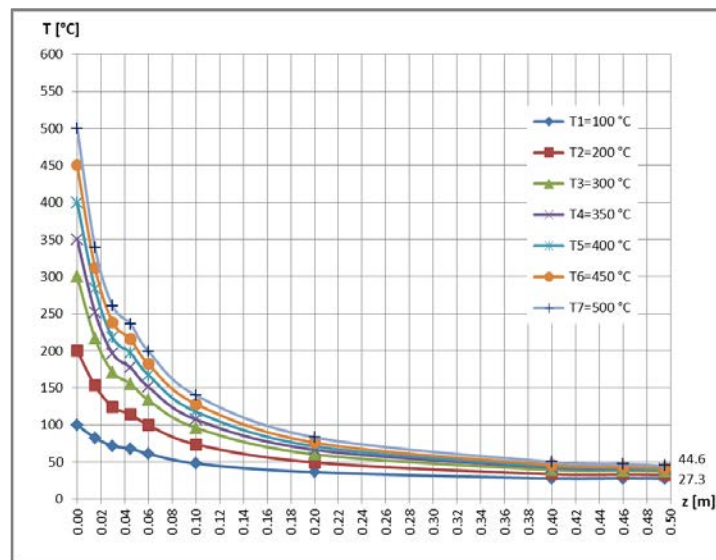


Fig. 4.2.8. Variația temperaturii de-a lungul stâlpului, cu cilindru deschis la capătul superior

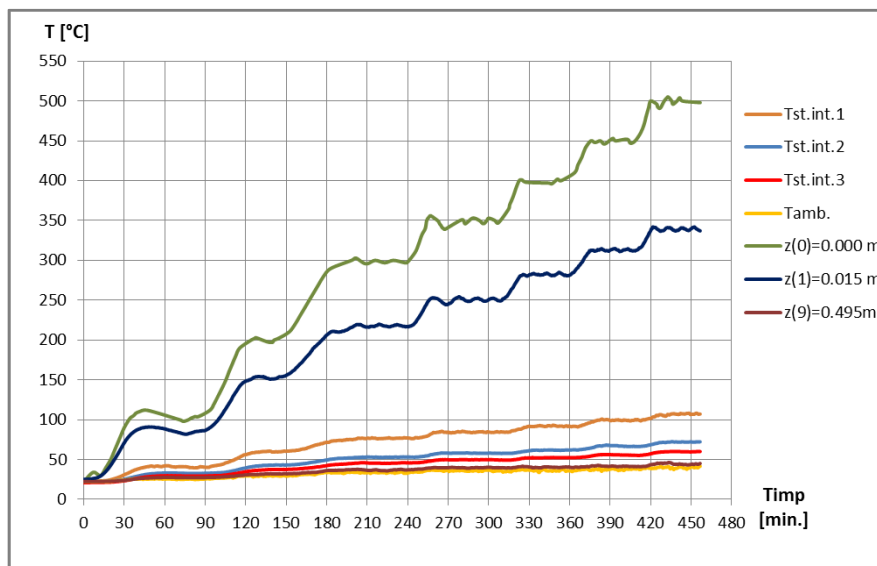


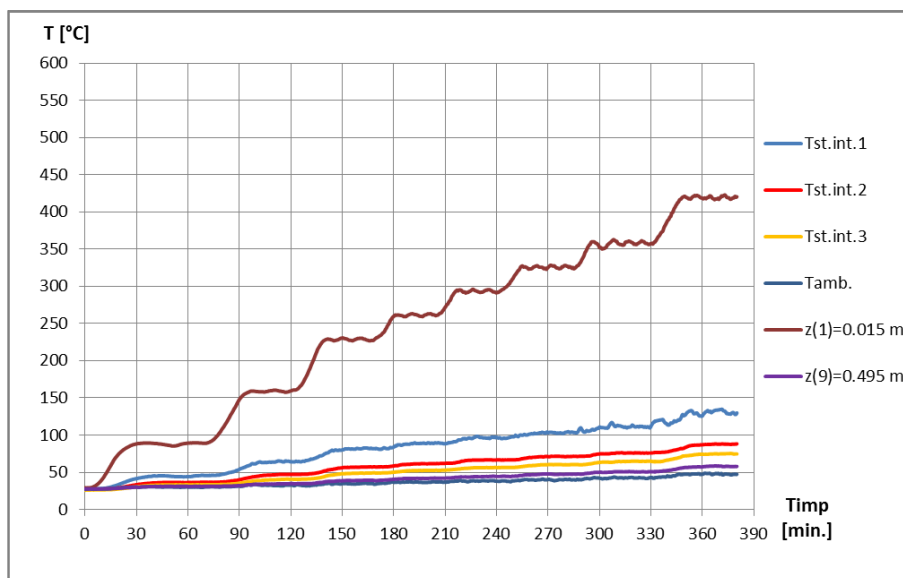
Fig. 4.2.9. Evoluțiile în timp ale temperaturilor aerului din interiorul stâlpului, când cilindru protector a fost deschis la capătul superior





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 ambiant, respectiv din interiorul stâlpului, pentru cazul elementelor neacoperite cu vopsea termoprotectoare.

Restul cazurilor, din motive de spațiu limitat, se regăsesc în lucrarea în 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  $z_I \in [0 \div 0,03] m$ ;  $z_{II} \in [0,03 \div 0,06] m$ ;  $z_{III} \in [0,06 \div 0,50] m$ , 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 redată aceste noi intervale. Ultimele două **figuri 4.2.16.c. și 4.2.17.c.,** la prima vedere, par să prezinte gradienti 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  $z_{III} \in [0,06 \div 0,50] m$ .

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



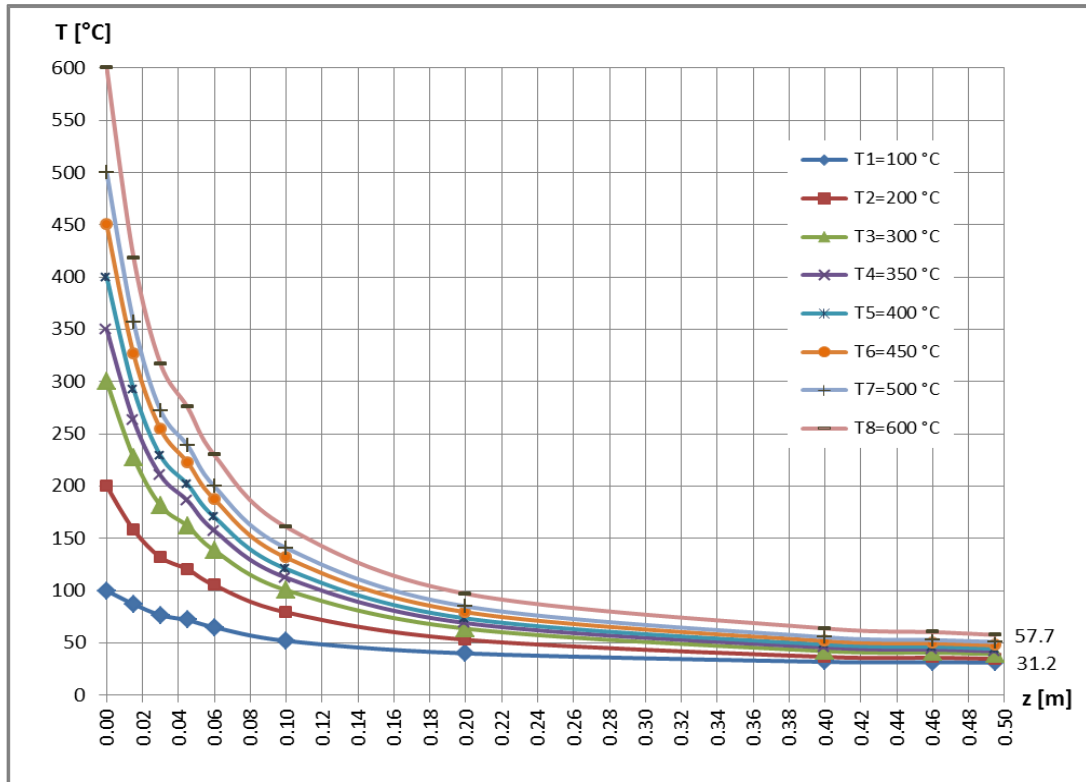


Fig. 4.2.14. Variația temperaturii de-a lungul stâlpului nevopsit, prevăzut cu patru grinzi

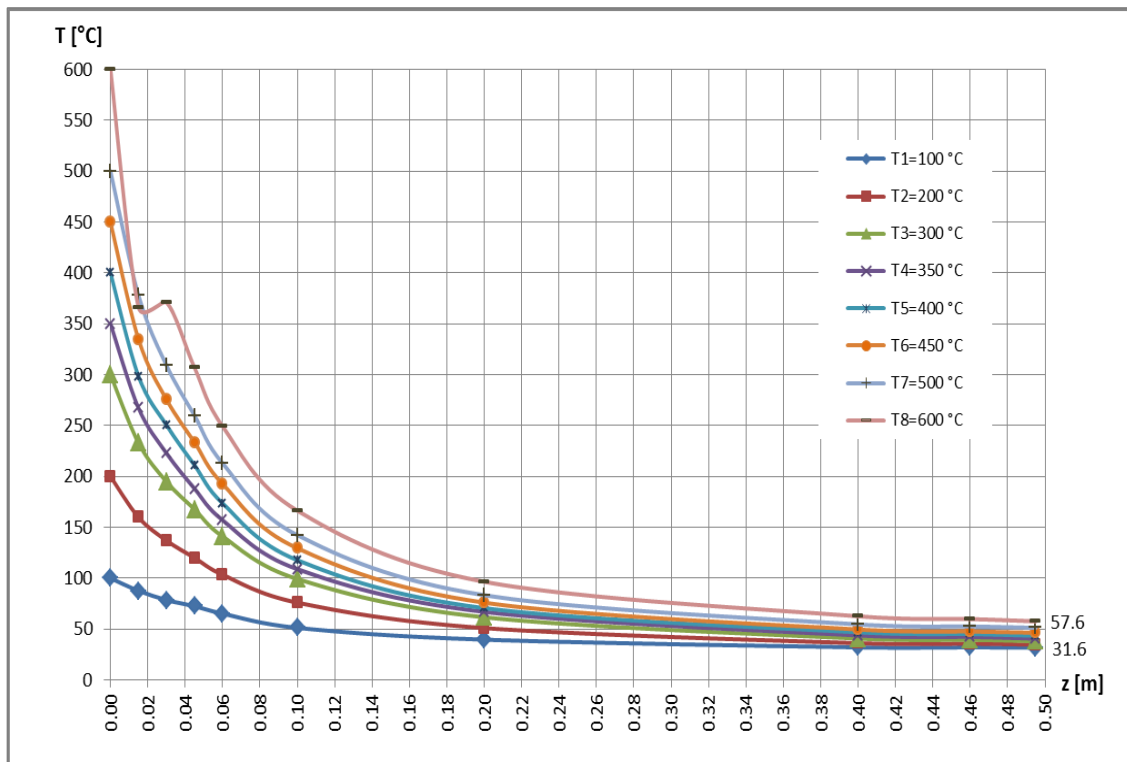
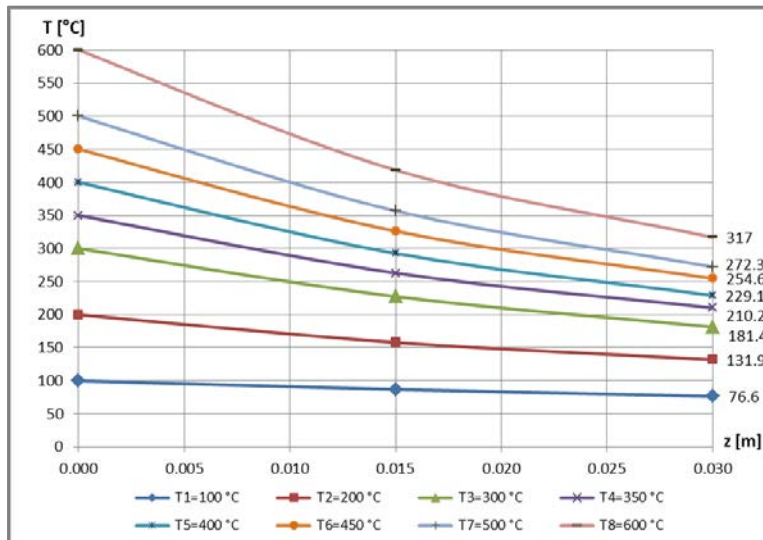
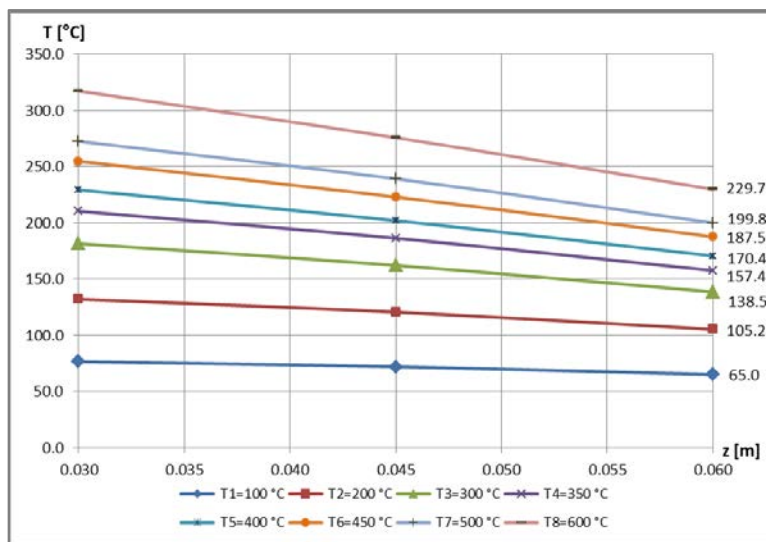


Fig. 4.2.15. Variația temperaturii de-a lungul stâlpului vopsit, prevăzut cu patru grinzi

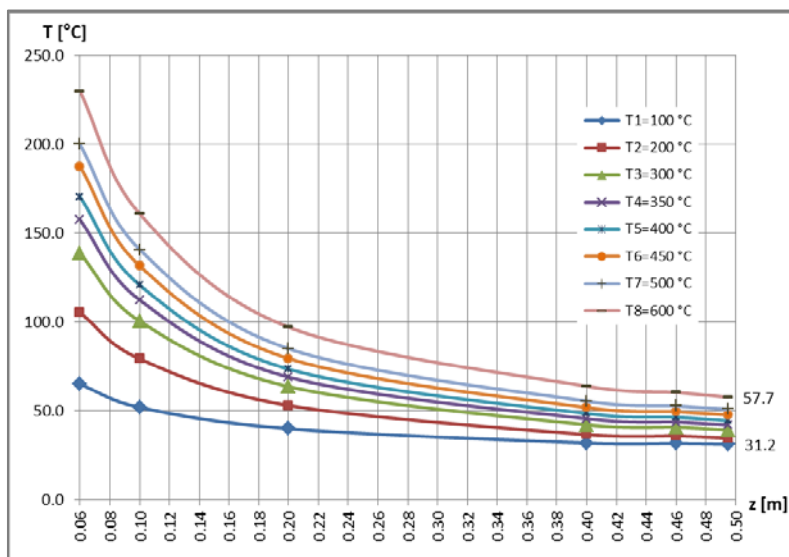




a.



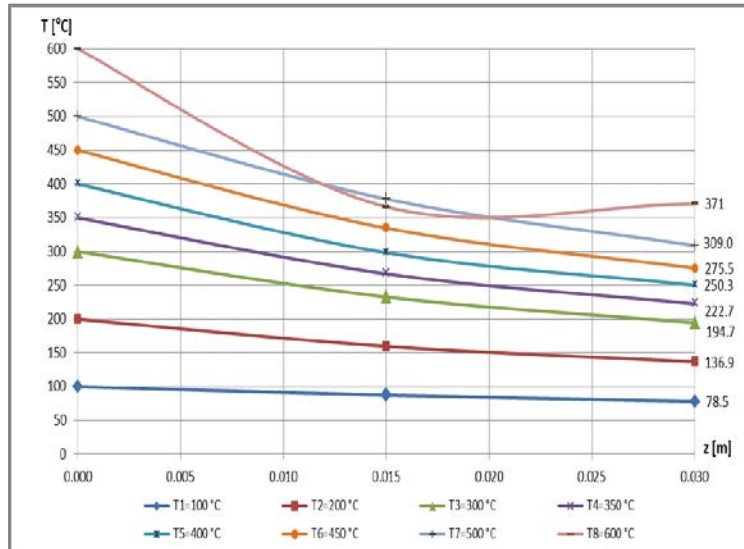
b.



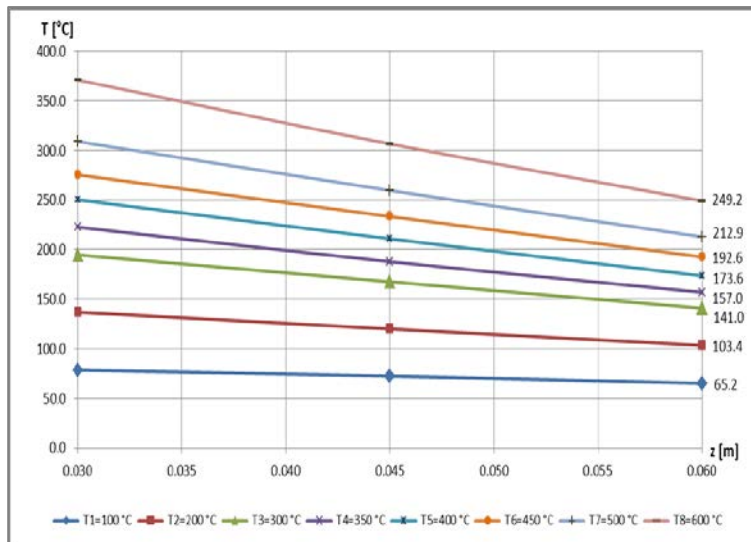
c.

**Fig. 4.2.16.** Variația temperaturii de-a lungul intervalelor stâlpului nevopsit după Fig.4.2.14.: a.)  $z_I$ ; b.)  $z_{II}$ ; c.)  $z_{III}$ .

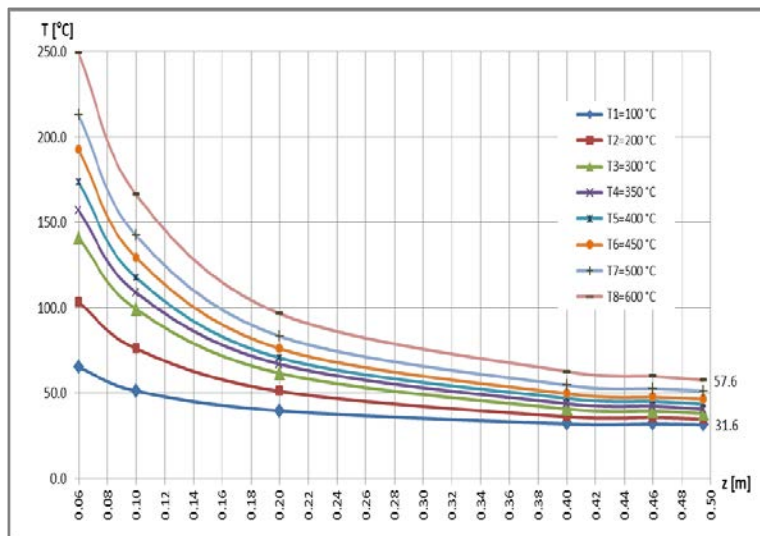




a.



b.

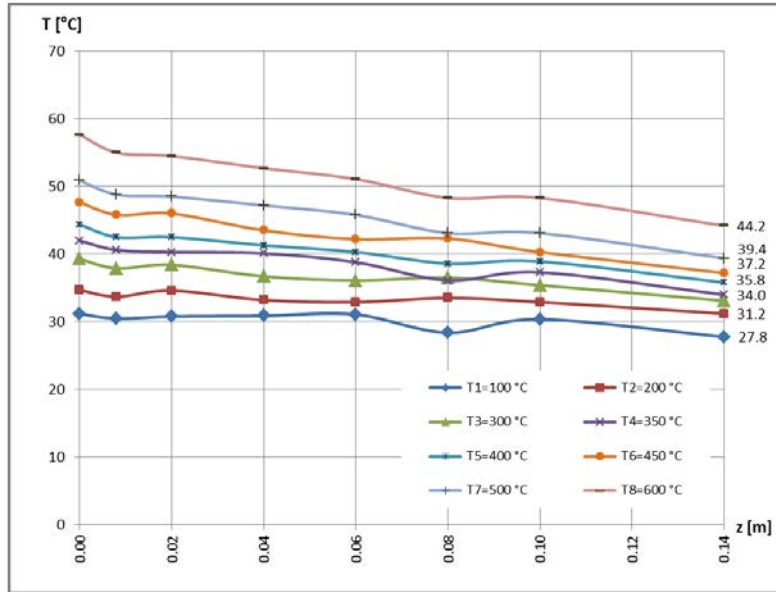


c.

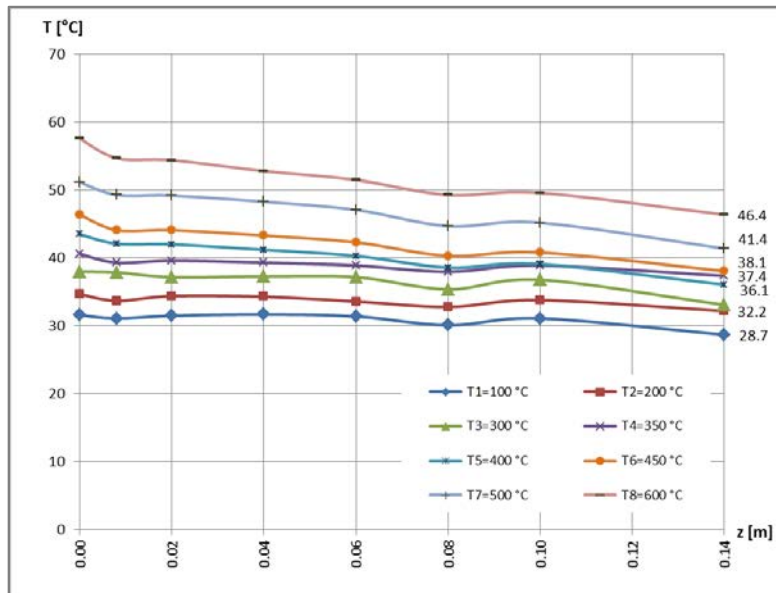
**Fig. 4.2.17.** Variația temperaturii de-a lungul intervalelor stâlpului vopsit după Fig.4.2.15.: a.)  $z_I$ ; b.)  $z_{II}$ ; c.)  $z_{III}$ .



Evoluţii similare în timp, însă cu variaţii mai puţin accentuate au fost observate şi la grinzi (a se vedea lucrarea in extenso). Drept ilustrare a răspunsului termic al grinzilor solidarizate de stâlp, în **figurile 4.2.20.-4.2.21.** sunt redată variaţiile temperaturii în funcţie 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 grinzii nevopsite nr.4



**Fig. 4.2.21.** Variația temperaturii de-a lungul grinzii 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.



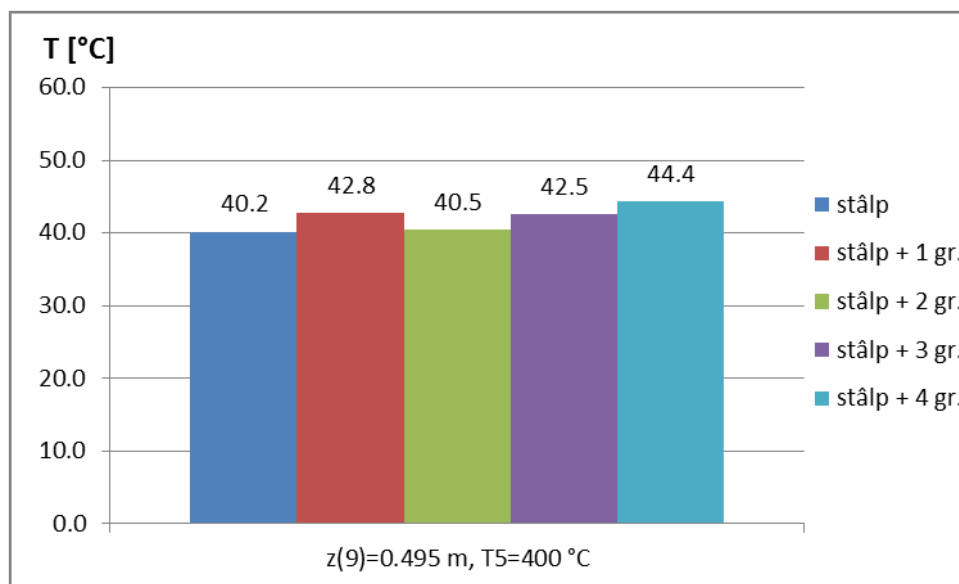


Fig.4.2.22. Temperaturile la nivelul capătului superior al grinzii în cele cinci cazuri la  $T_{0,n}=400^{\circ}\text{C}$

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  $T_{0,n}=400^{\circ}\text{C}$ .

#### 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 x 30 x 1,5 mm), iar grinzile au fost confecționate din oțel plat cu dimensiuni de 10 x 1,5 mm. În toate cazurile analizate au fost păstrate aceleași valori ale factorului de secțiune (raportul dintre perimetrul și aria secțiunii transversal) cu cele de la structura reală, de la care s-a pornit.

Pentru patru stâlpi, aferenți primului compartiment, au fost interpusse între suport și stâlp câte o rezistență electrică specială de 1,2 kW (Fig.3.2.2.). Între suport și rezistența 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 rezistența 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 ambiant), peste întreaga structură 3D s-a montat un strat termoizolator de 25 mm de saltea din fibră ceramică (Fig.4.3.3.).

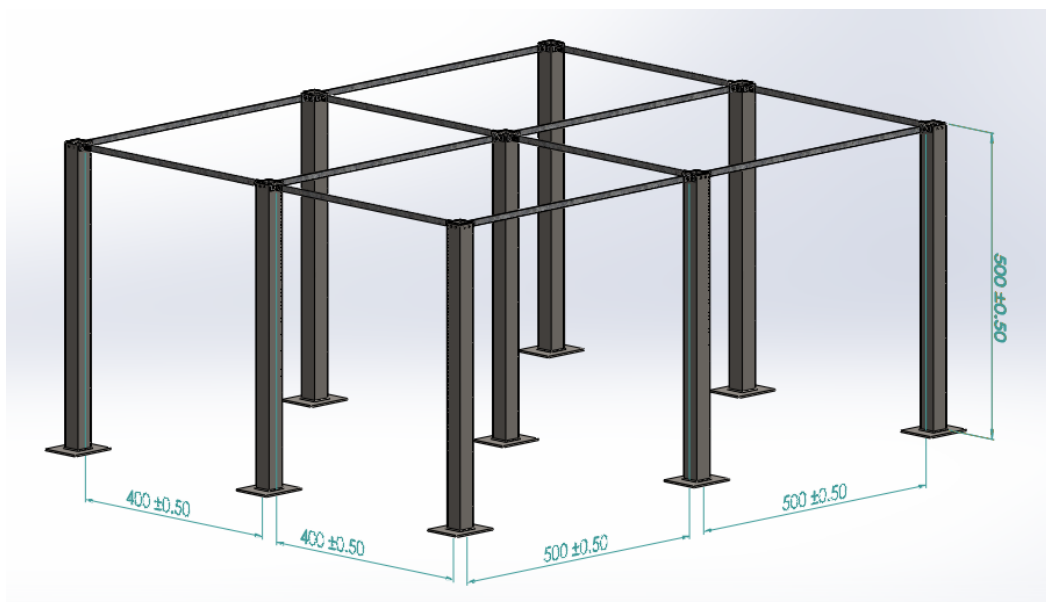
La cei patru stâlpi încălziți au fost montate câte opt PT-uri, una la baza și șapte de-a lungul stâlpului. Grinzile erau prevăzute cu șapte sau opt PT-uri, în funcție de lungimea lor.





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.**Schița 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





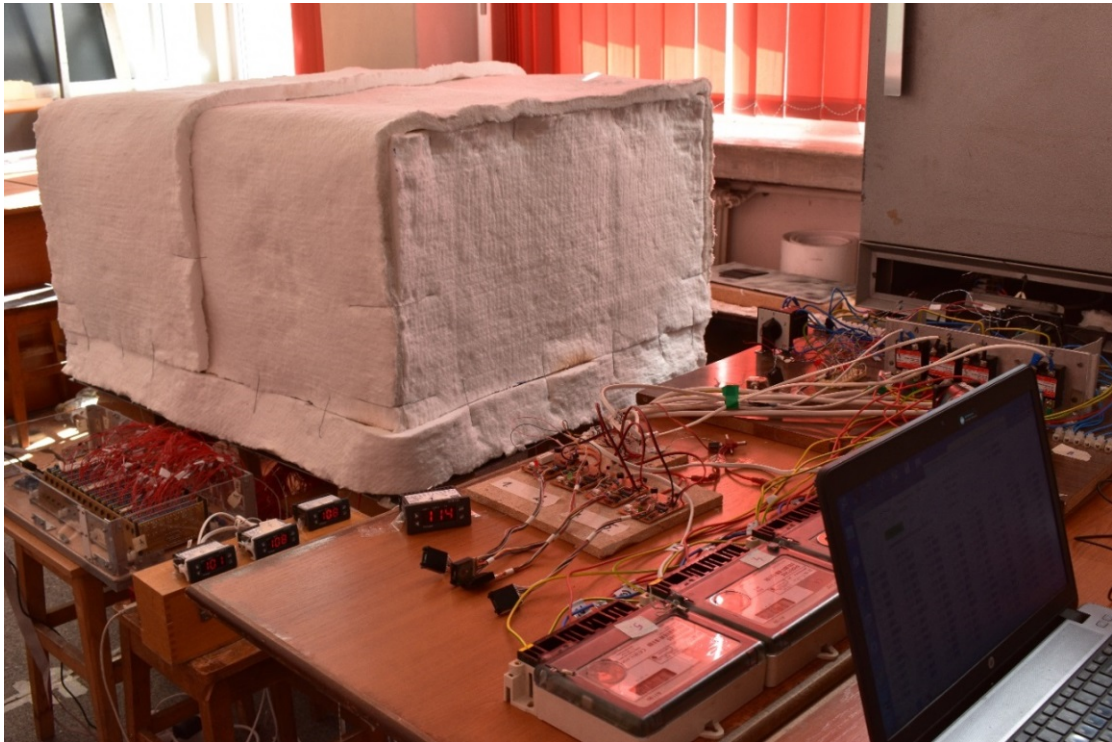


Fig. 4.3.3. Vedere generală, cu structura acoperită cu saltea din fibră ceramică termoizolantă

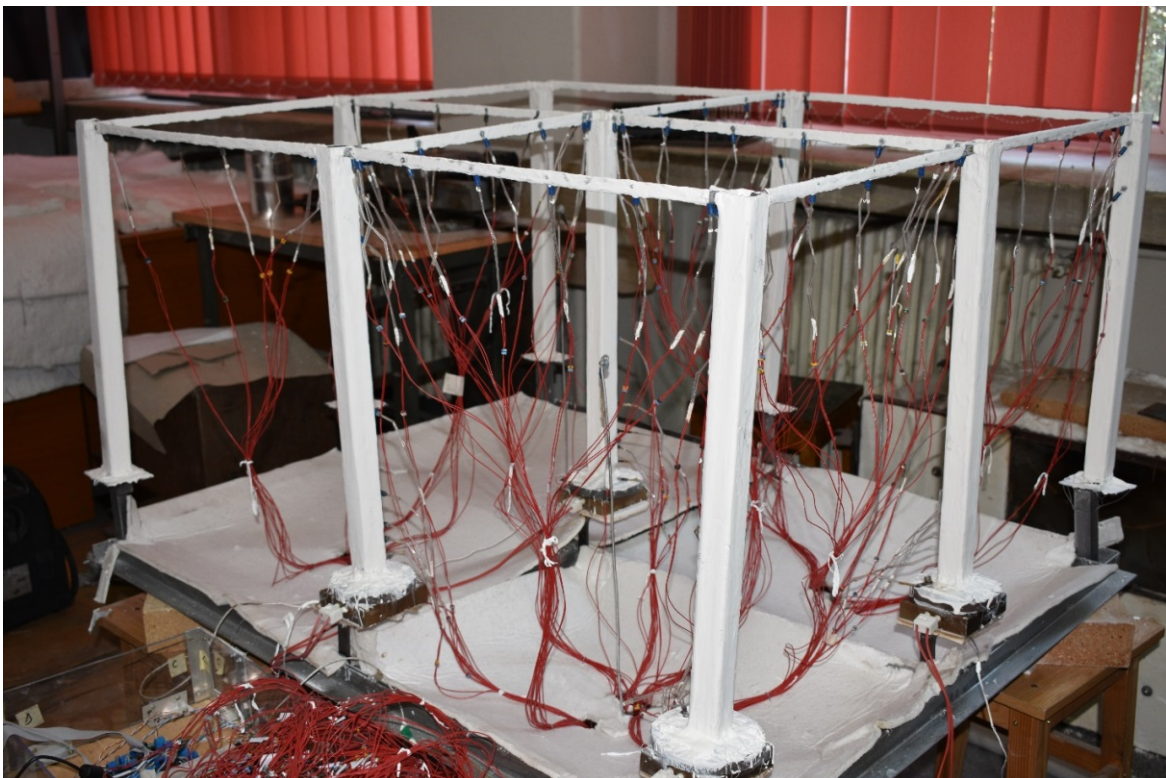


Fig. 4.3.4. Structura protejată cu vopsea termoizolantă

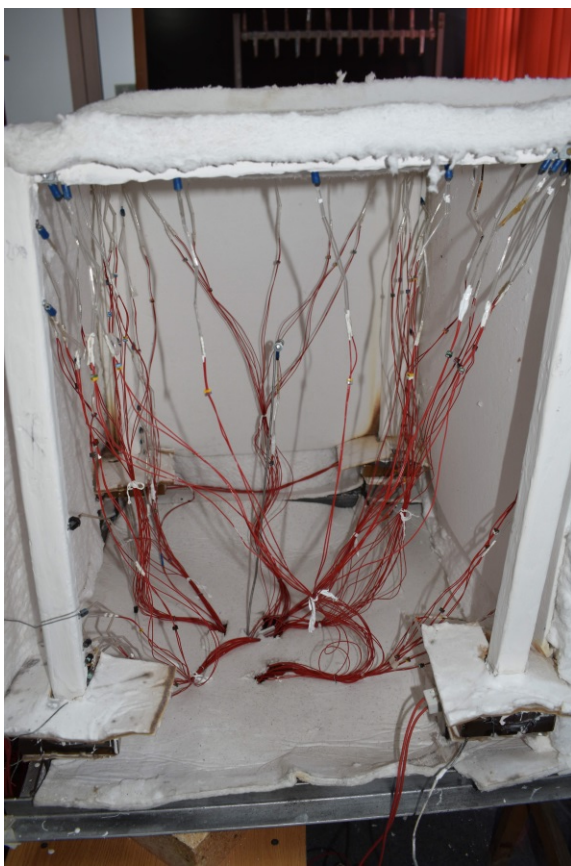


Fig. 4.3.5. Interiorul compartimentului 1, înainte de acoperire

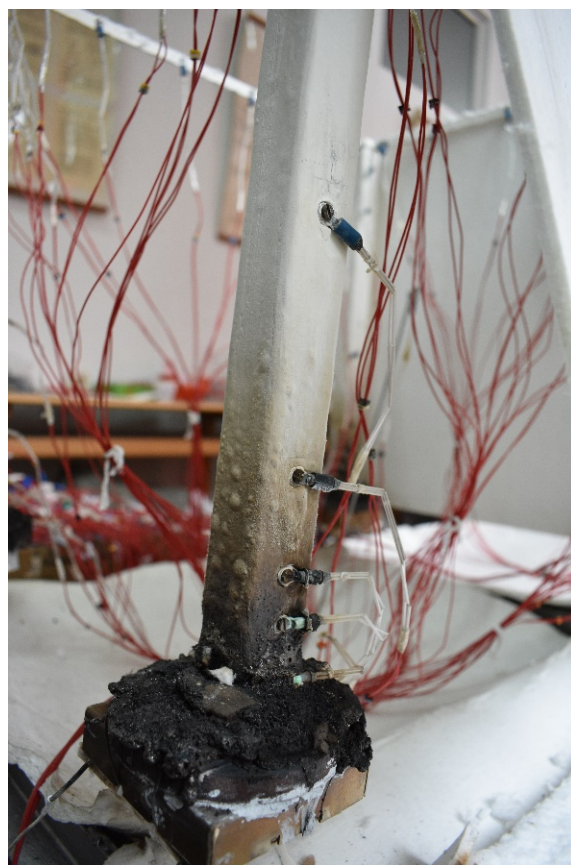


Fig. 4.3.6. Vederea stâlpului 2, după finalizarea experimentului

Din figura 4.3.6. se poate observa mecanismul de formare al spumei termoizolante, cu o intensitate mai mare la nivelul tălpii, 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 prezentau 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 ne semnificative pentru fenomenul de ansamblu.





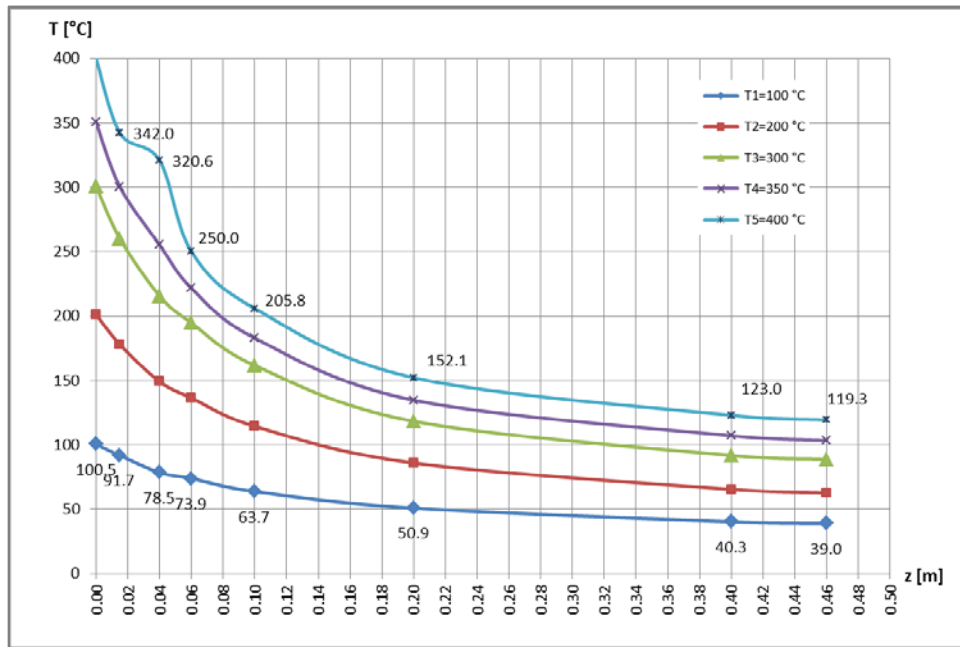


Fig. 4.3.13. Variația câmpului termic la stâlpul 5 în varianta nevopsită

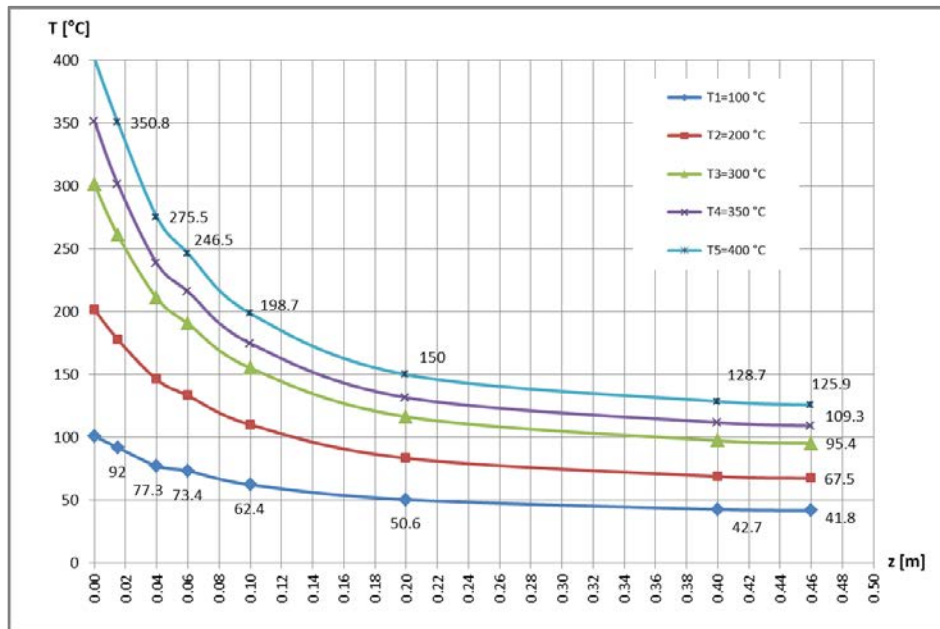


Fig. 4.3.14. Variația câmpului termic la stâlpul 5 în varianta vopsită

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



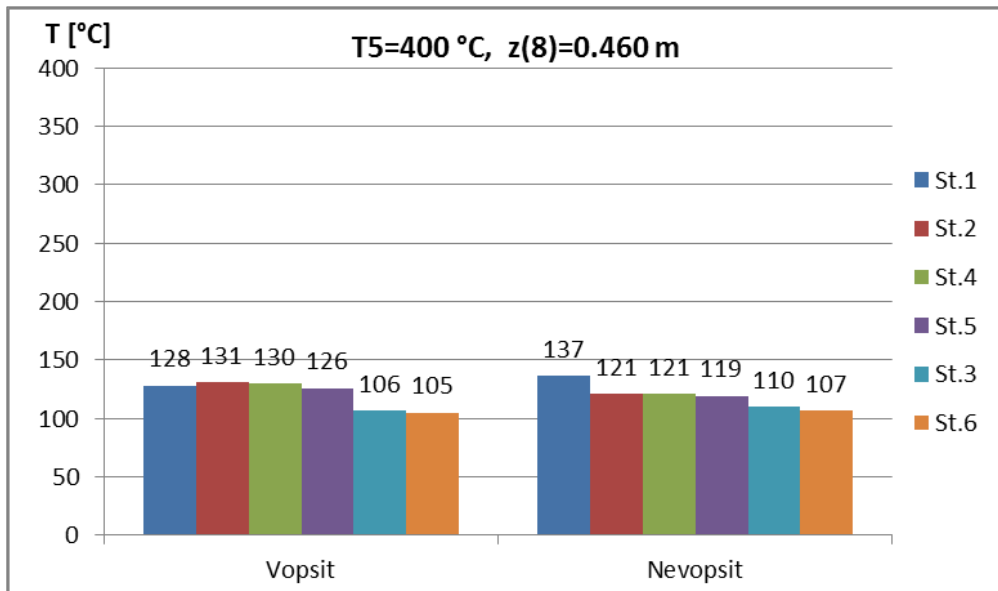


Fig. 4.3.15. Rezultatele comparative ale temperaturilor de la nivelul ultimului punct de monitorizare la cei şase stâlpi

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

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

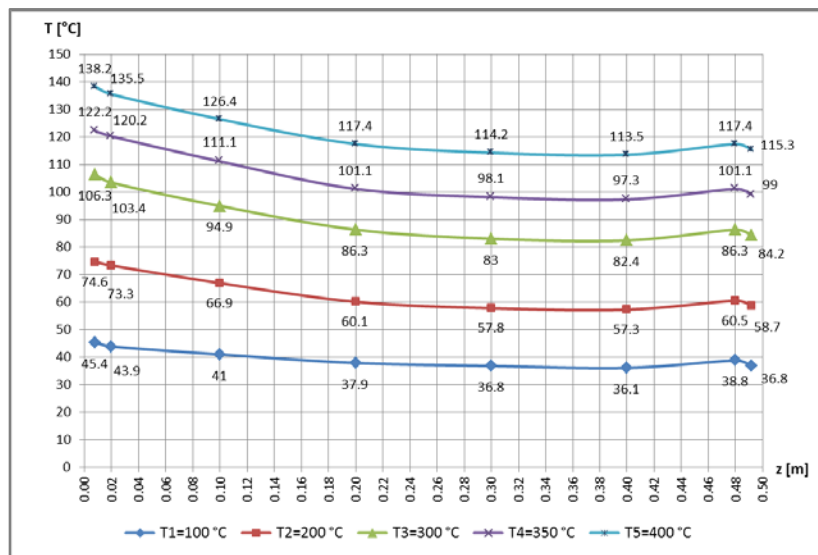


Fig. 4.3.18. Variația temperaturii de-a lungul grinzii nevopsite 1-4



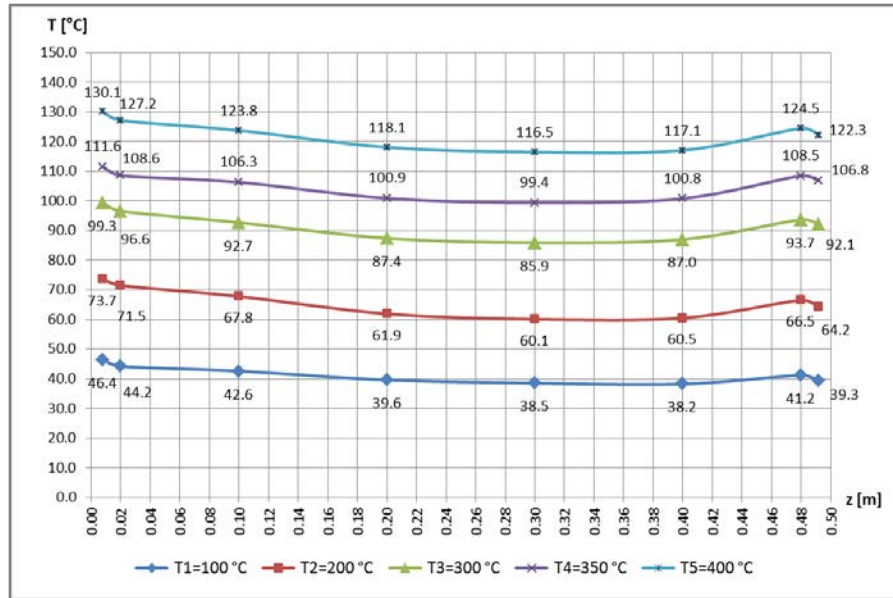
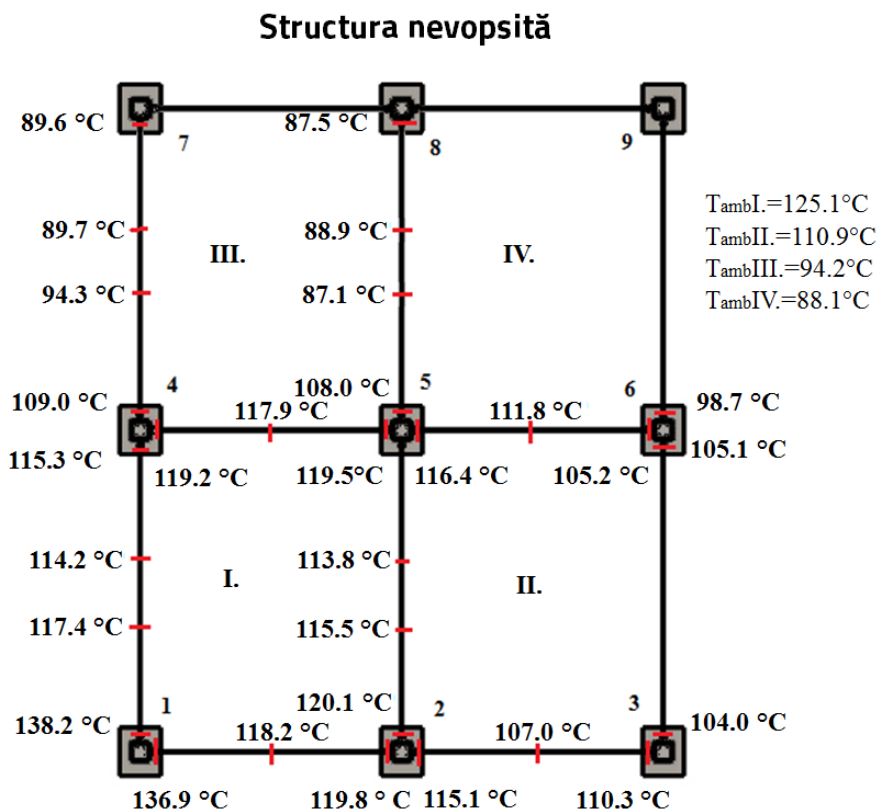


Fig. 4.3.19. Variația temperaturii de-a lungul grinzii vopsite 1-4

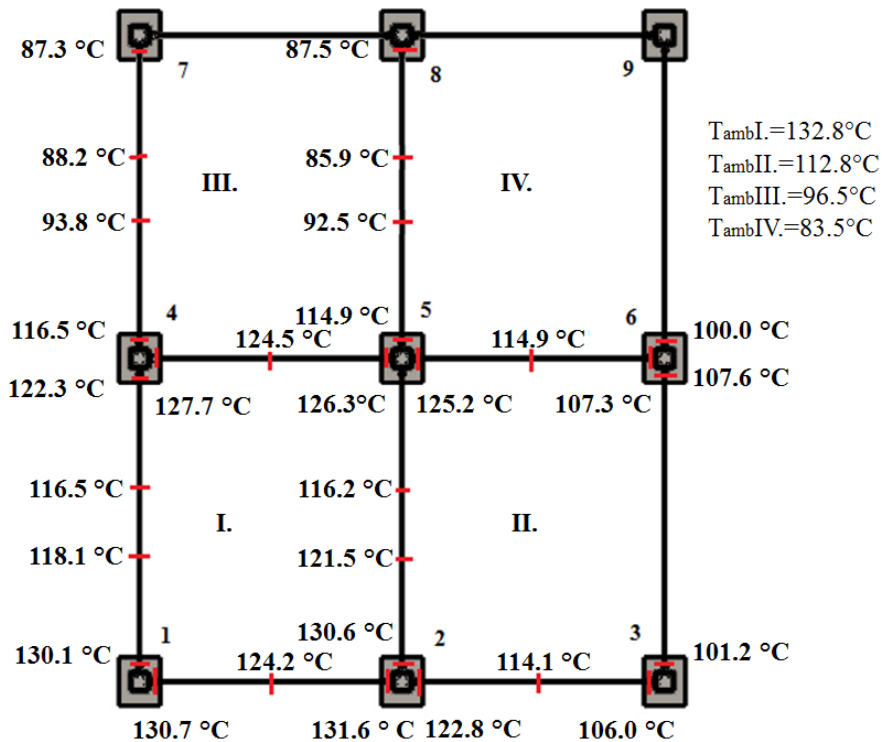
În figura 4.3.30. a. și b. sunt sintetizate valorile temperaturilor de la capetele, respectiv la mijloacele grinzilor scurte și la cotele de 20 și 30 cm la cele lungi, corespunzătoare unei temperaturi nominale  $T_{0,n}=400^{\circ}\text{C}$  și celor două versiuni (fără și cu vopsea termoprotectoare).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



a.



### 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 intumescentă), au permis compararea răspunsurilor acestora la acțiunea unui foc simulat la baza elementelor. Curbele de variație  $T(z)$  au prezentat aluri practic identice (a se vedea **Capitolul 5.**), ceea ce a confirmat justetea 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  $T(z)$ , precum și elaborarea unei noi strategii de evaluare a acestora (**Capitolul 5.**).



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

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

#### 5.1.1. Aspecte generale

Se consideră bara metalică de secţiune tubular-pătrată indicată în figura 5.1.1. [CENO2].

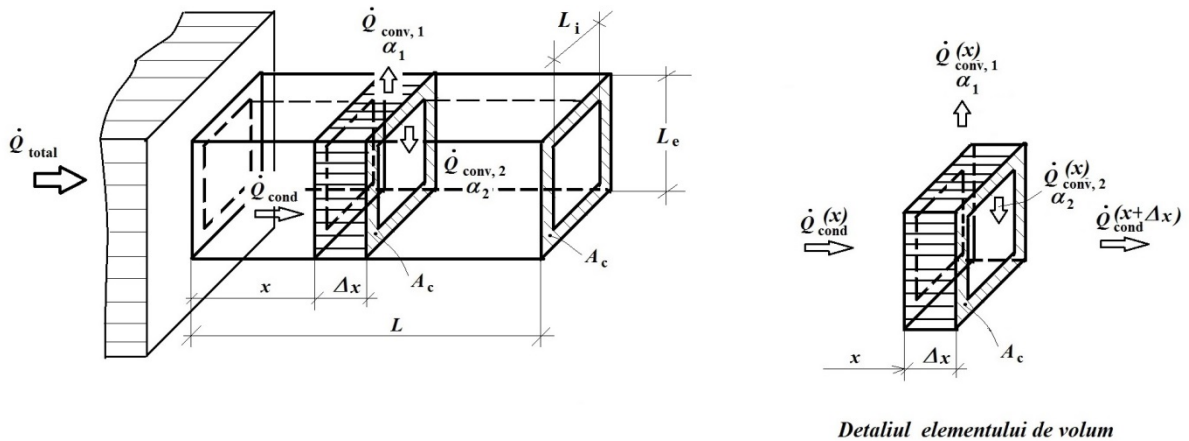


Fig. 5.1.1. Schema de calcul a bilanţului termic

Bara este fixată de un element de fundaţie (bază), care este încălzit electric. Transferul de căldură se realizează prin conducţie în peretele tubular şi prin convecţie şi radiaţie la aerul din interiorul, respectiv exteriorul barei.

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

- transferul de căldură este staţionar;
- nu există surse generatoare de căldură în bară;
- conductivitatea termică a materialului este constantă;
- coeficienţii de convecţie şi radiaţie sunt mărimi constante şi uniforme pe suprafeţele (interioară şi exterioară) barei.

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

Din bilanţul 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 suprafețe, interioară și exterioară, sunt  $\alpha_i$  și  $\alpha_e$ ;
- perimetrele corespunzătoare celor două suprafețe 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 coeficienților 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 conducției 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 (oţel).

Prin înlocuirea ecuaţiei (5.11) în ecuaţia (5.10) se obţine *ecuaţia diferenţială 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  $\lambda$  şi  $A_t$  sunt constante, ecuaţia diferenţială (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 notaţiilor  $a^2$  şi  $b^2$  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 conductivităţii termice în funcţie de temperaturile măsurate experimental:

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

Ecuaţia diferenţială (5.14) este de ordinul doi, liniară, cu coeficienţi constanţi.

Soluţia ecuaţiei omogenă, ataşată ecuaţiei diferenţiale (5.14) este:

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

O soluţie particulară, care trebuie să satisfacă ecuaţia iniţială neomogenă, este:

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

Astfel, soluţia 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  $C_1$  şi  $C_2$  se obţin din condiţiile la limită, corespunzător la  $x=0$  şi  $x=L$ .

### **Observaţii importante:**

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

$m_0 = \sqrt{\frac{P}{A} \cdot \frac{\alpha_n}{\lambda} \left[ \frac{1}{m} \right]}$  din aceeaşi relaţie (1.2) din [TUR16], care de altfel poate constitui relaţia 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 coeficienților de transfer de căldură prin convecție și radiație

Ecuțiile 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

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

**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 ( $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ) 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, $T_{m,bara} [^{\circ}\text{C}]$	Temperatura medie a aerului ext., $T_{aer,e} [^{\circ}\text{C}]$	Temperatura medie a stratului limită termic, $T_m [^{\circ}\text{C}]$	Coef. de conductivitate termică, $\lambda \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	Coef. de viscozitate cinematică, $\nu \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	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:

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

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

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

**Tabelul 5.2.a.**

	$Pr$	$Gr$	$Ra$	$Nu$	$\alpha_{conv,e} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\alpha_{rad,e} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$\dot{Q}_{conv,e} [W]$
1	0.71	$3.752 \times 10^8$	$2.664 \times 10^8$	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.

	$Pr$	$Gr$	$Ra$	$Nu$	$\alpha_{conv,e} \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$	$\alpha_{rad,e} \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$	$\dot{Q}_{conv,e} [W]$
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.

	$Pr$	$Gr$	$Ra$	$Nu$	$\alpha_{conv,e} \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$	$\alpha_{rad,e} \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$	$\dot{Q}_{conv,e} [W]$
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 coeficienților 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 in extenso, în Tabelele 5.3 și 5.4 sunt sintetizate rezultatele obținute.



**Tabelul 5.3.**

	Temperatura bazei, $T_{baza} [^{\circ}\text{C}]$	Temperatura medie a aerului ext., $T_{aer,e} [^{\circ}\text{C}]$	Temperatura medie a stratului limită termic, $T_m [^{\circ}\text{C}]$	Coef. de conductivitate termică, $\lambda \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	Coef. de viscozitate cinematică, $\nu \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	Coef. de dilatate 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	$\alpha_{conv,bază} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$	$\alpha_{rad} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$	$\dot{Q}_{conv,bază} [W]$
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 în 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 în extenso.

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

Expresia fluxului termic transmis prin conducție prin bară este:

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

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 conducție, corespunzătoare stâlpului singular la scara 1:10 și neprotejată termic cu vopsea:

**abelul 5.11.**

	Temp. la bază, $T_{baza} [^{\circ}\text{C}]$	Temp. la vârf, $T_v [^{\circ}\text{C}]$	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 $\alpha_i \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	$a^2$	$b^2$	$\frac{b^2}{a^2}$	$C_1$	$C_2$	$\dot{Q}_{conv,i} [W]$
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 conducție 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),

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

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  $600^{\circ}\text{C}$ .

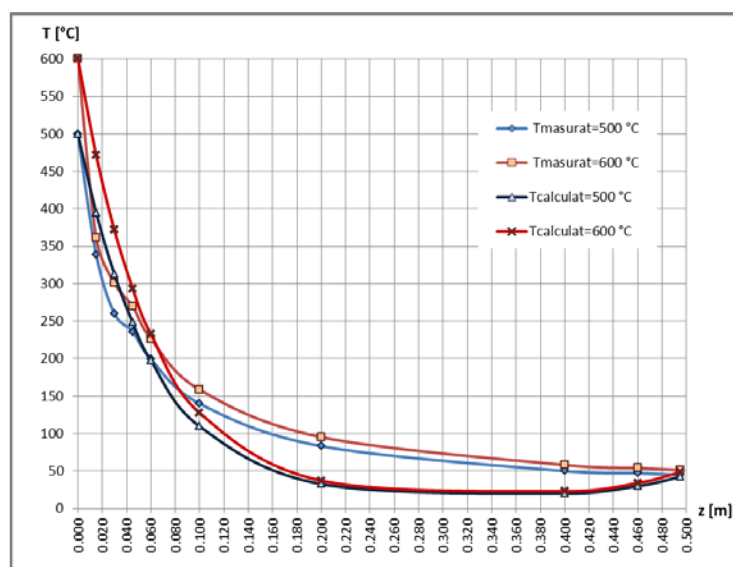


Fig.5.1.1. Compararea temperaturilor măsurate cu cele teoretice

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 (450–600°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 $\tau(z)$ 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.

Doctoranda din acest motiv s-a gândit să facă o aproximare polinomială a curbei  $\tau(z)$  obținută experimental. După cum se va arăta în continuare, funcții polinomiale de maximum ordinul IV sunt de obicei suficiente pentru aproximarea curbelor stabilite experimental.

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

Această nouă abordare a fost propusă de doctorandă în cadrul articolului [TUR18], unde doctoranda este coautoare.

Această nouă abordare a curbelor  $\tau(z)$  prezintă câteva avantaje nete față de expresiile exponențiale, de tipul (5.23), cum ar fi:

- Reduce în mod semnificativ timpul necesar calculului parametrilor  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $m_0$ , deoarece într-un program minimal Matlab, odată cu introducerea datelor măsurărilor (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, deşi atât ca dimensiuni, cât şi volum erau foarte diferite. În figură sunt menţionate şi curbele polinomiale, de maximum de ordinul IV., care aproximează fenomenul cu un factor de corelaţie  $R^2$  foarte bun.

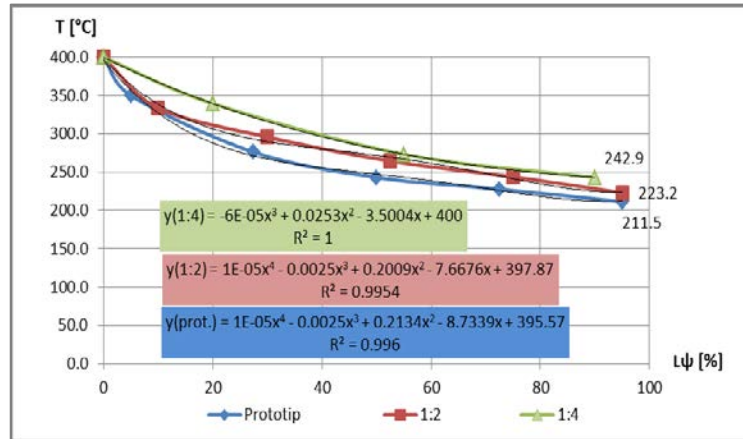


Fig. 5.2.1. Cele trei segmente de coloane nevopsite, la 400°C

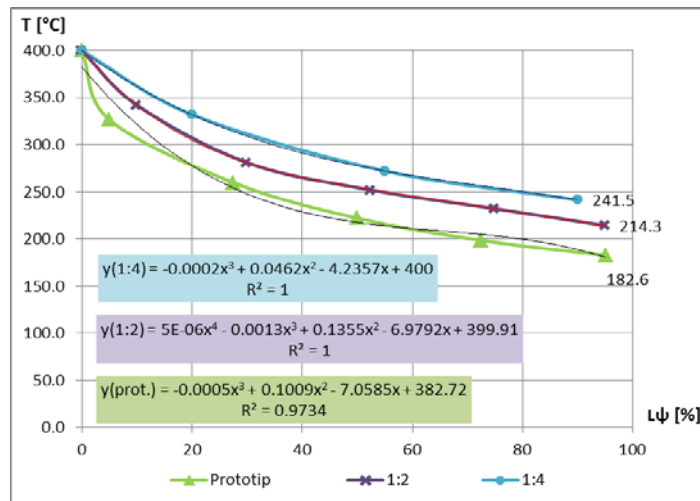


Fig. 5.2.2. Cele trei segmente de coloane vopsite, la 400°C

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 împărţirea lungimii totale a stâlpului în trei intervale distincte  $z_I$ ,  $z_{II}$ ,  $z_{III}$ , pentru a reduce gradul funcţiilor polinomiale de aproximaţie. O funcţie polinomială unică nu numai că ar fi de un grad mare, dar suprapunerea ei peste rezultatele măsurătorilor ar oferi o curbă cu fluctuaţii (abateri) însemnate faţă de unirea acestor puncte.

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



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

În urma analizei atente a alurii curbelor, doctoranda a ajuns la 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.

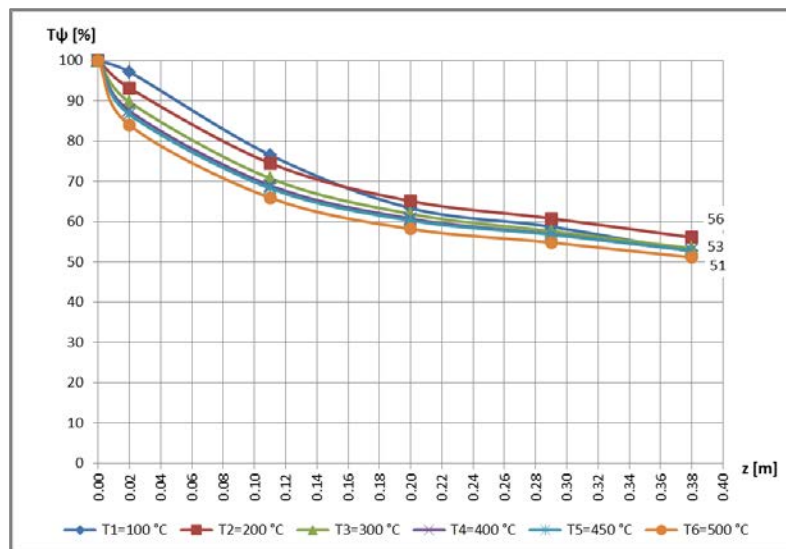


Fig. 5.2.10. Variația temperaturilor de-a lungul prototipului nevopsit, în reprezentare adimensională



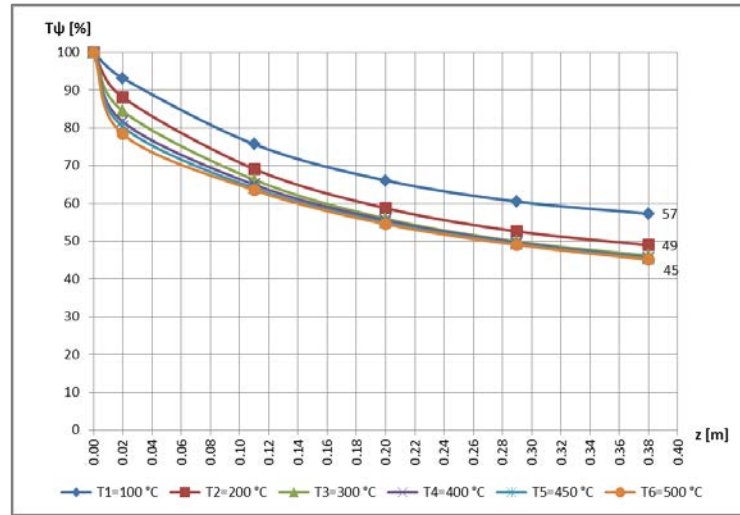


Fig. 5.2.11. Variația temperaturilor de-a lungul prototipului vopsit, în reprezentare adimensională

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

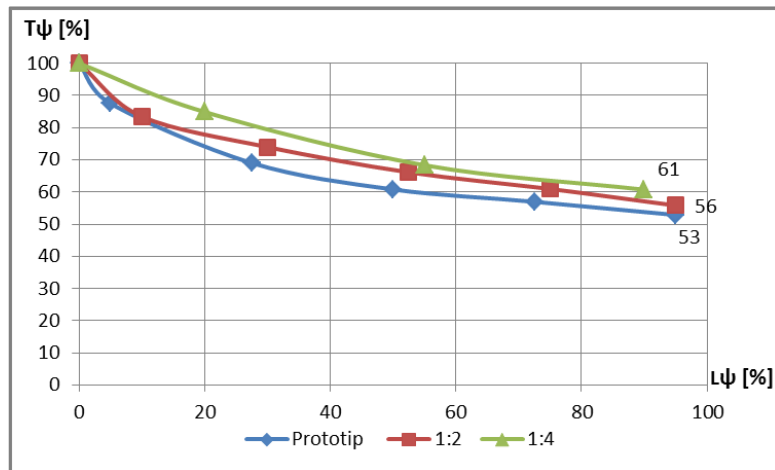


Fig. 5.2.16. Cele trei segmente de stâlp nevopsite, la  $400^\circ\text{C}$ , în sistem de coordonate adimensional

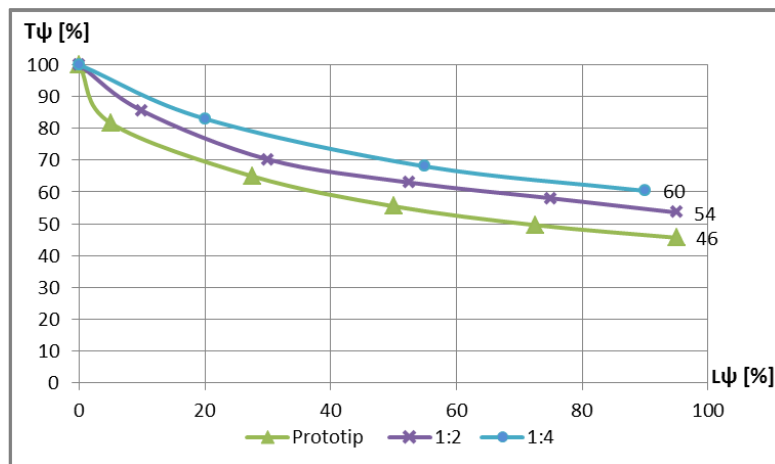


Fig. 5.2.17. Cele trei segmente de stâlp vopsite, la  $400^\circ\text{C}$ , în sistem de coordonate adimensional





O analiză similară a fost efectuată și în cazul stâlpilor realizați 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 justetea acestei noi abordări a prezentei teze de doctorat.

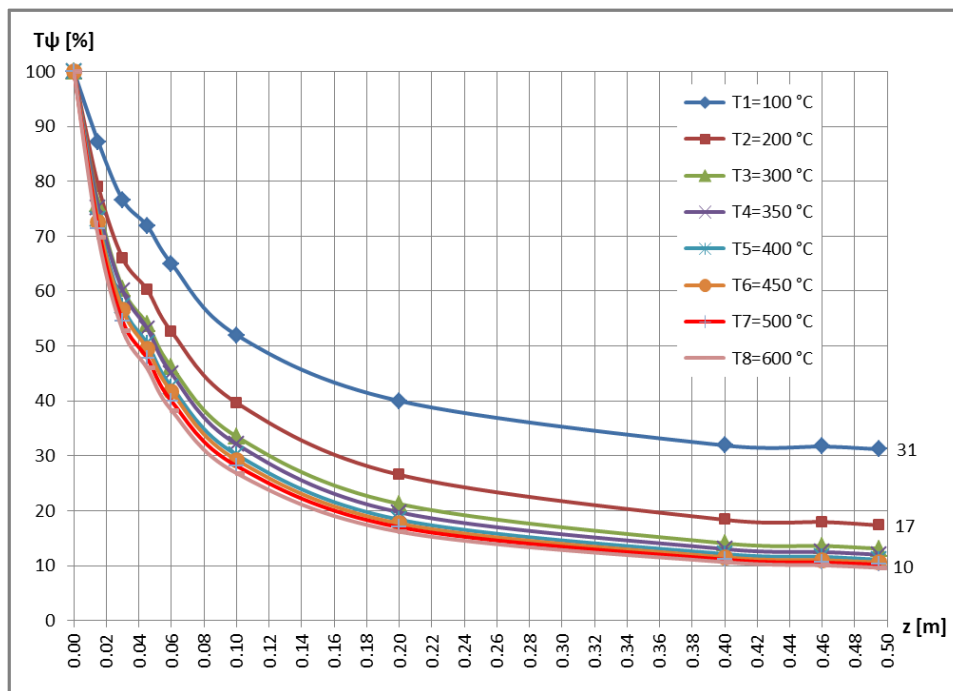


Fig. 5.2.18. Variația temperaturilor de-a lungul stâlpului nevopsit, prevăzut cu patru grinzi, în reprezentare adimensională

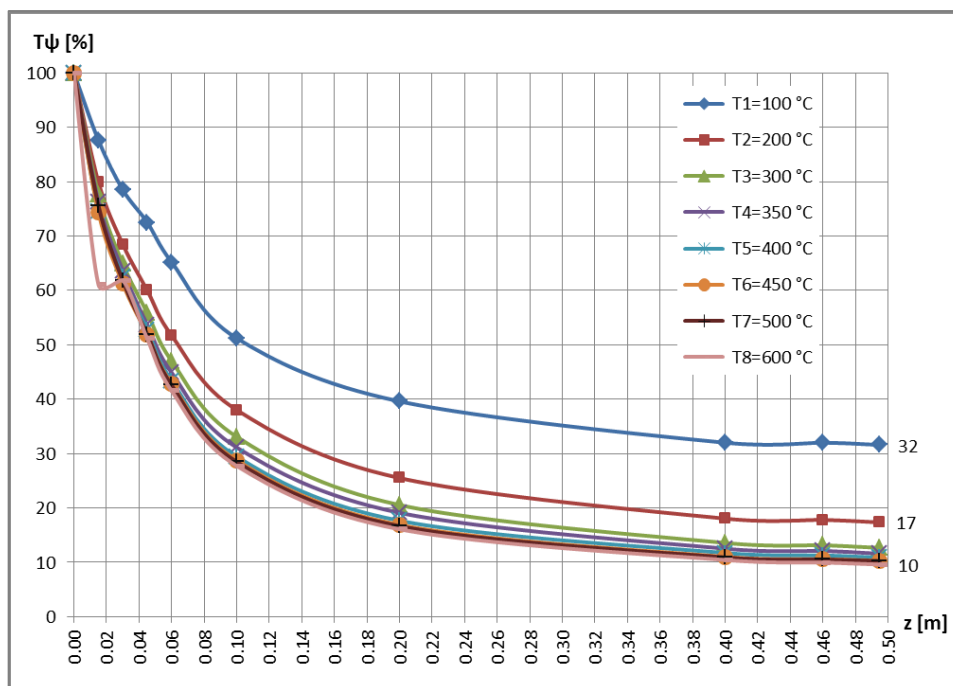


Fig. 5.2.19. Variația temperaturilor de-a lungul stâlpului vopsit, prevăzut cu patru grinzi, în reprezentare adimensională



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

În vederea optimizării utilizării curbelor  $T_{\psi}$ , autoarea propune aproximarea acestora tot prin funcţii polinomiale, care va deveni foarte eficientă, în special în determinarea valorii parametrului  $m_0$ , precum şi în stabilirea legilor sale de variaţie  $m_0(\mathbf{z})$ , 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 $m_0$ şi $\alpha_n$

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

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

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

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

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

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

De aceea, doctoranda şi-a propus o altă strategie, bazată tot pe rezultatele măsurătorilor, însă plecând prima dată de la aproximarea polinomială a curbei  $T(\mathbf{z})$ , iar ulterior de la aproximarea polinomială a curbei adimensionale  $T_{\psi}(\mathbf{z})$ .

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

- Se ataşează curbei experimentale  $T(\mathbf{z})$  o curbă adimensională  $T_{\psi}(\mathbf{z})$ ;
- 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  $C_1'$ ,  $C_2'$  şi  $m_0'$  ale soluţiei ecuaţiei diferenţiale a temperaturii (5.21); se consideră un număr mai mare de puncte (adică: patru) pentru a rămâne o ecuaţie şi pentru verificare, altfel, trei puncte, cu cele trei ecuaţii aferente, ar fi suficiente pentru determinarea celor trei constante căutate ( $C_1'$ ,  $C_2'$  şi  $m_0'$ ), însă cu patru puncte şi patru ecuaţii, se asigură şi verificarea rezultatelor obţinute;
- Se ia un nou set de patru puncte (2-3-4-5), pentru care se obţin în mod similar valorile  $C_1''$ ,  $C_2''$  şi  $m_0''$ ;



- 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 măsurărilor, 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



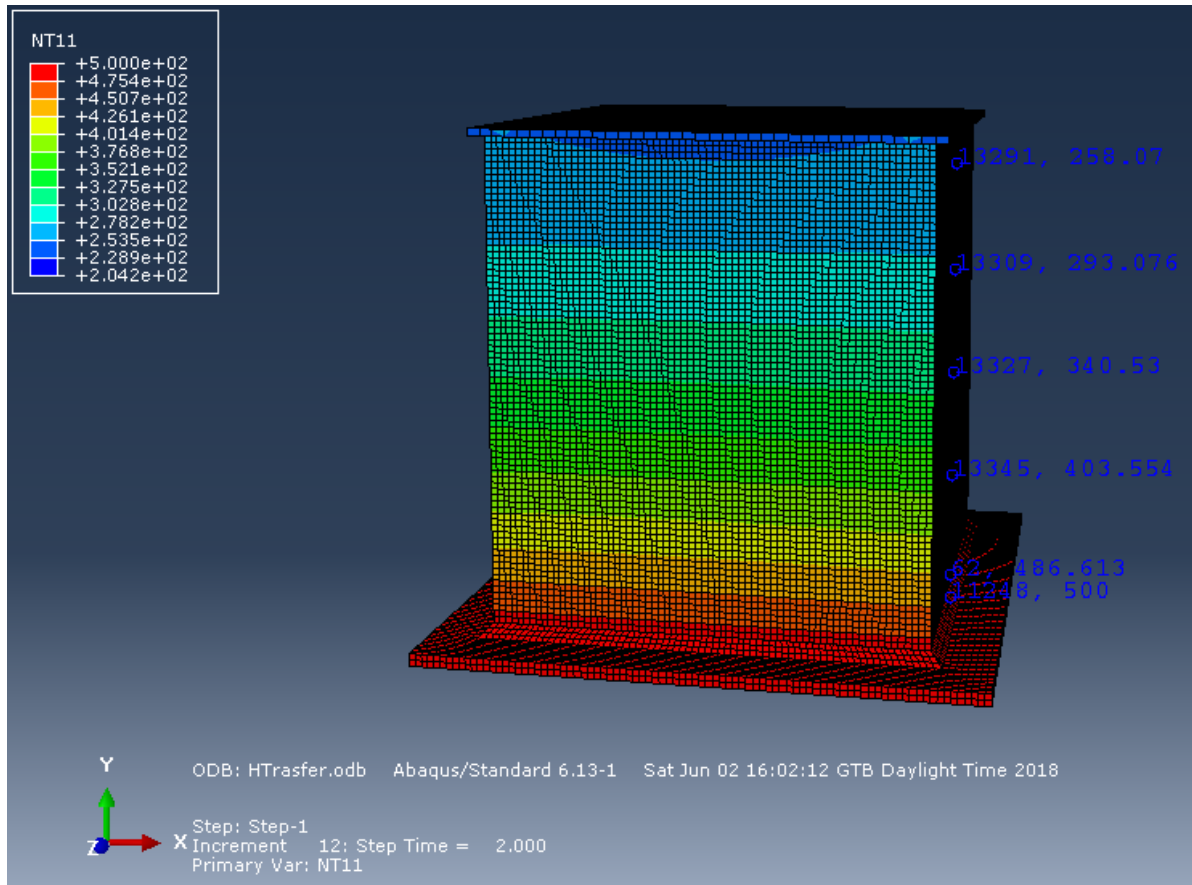


Fig.5.3.1. Distribuția temperaturii la prototipul nevopsit, pentru  $T_{0,n}=500^{\circ}\text{C}$

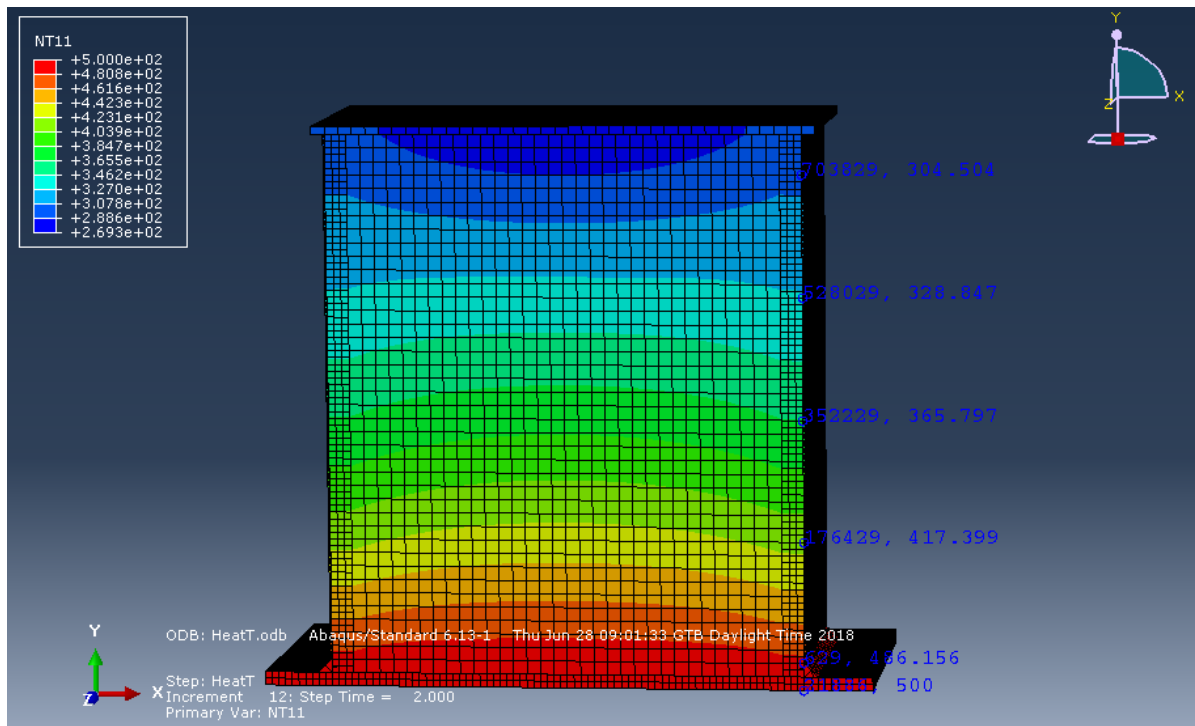


Fig.5.3.2. Distribuția temperaturii la prototipul vopsit, pentru  $T_{0,n}=500^{\circ}\text{C}$



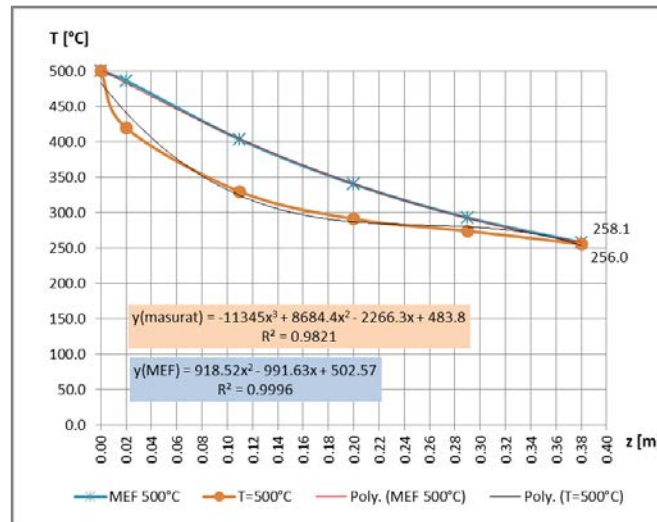
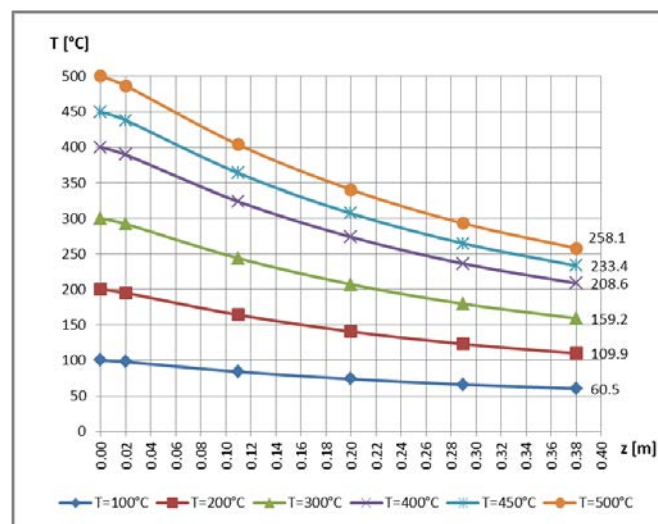


Fig.5.3.3. Compararea rezultatelor măsurătorilor cu cele de la MEF la prototipul nevopsit

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.

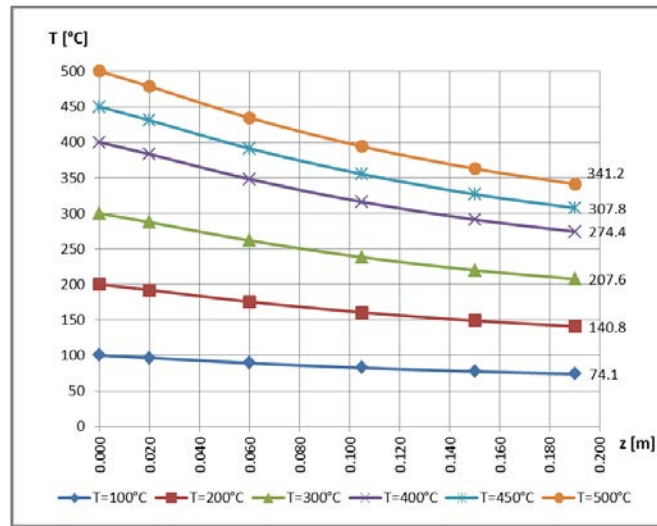
În figurile 5.3.8. a,b,c sunt sintetizate rezultatele analizei numerice la diferite temperaturi pentru cele trei elemente structurale în varianta nevopsită.

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 grinzilor 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 subsansamblu stâlp-grinzi a fost introdus într-un cilindru cu proprietăți termoizolatoare, având dimensiuni și proprietăți termice identice cu cele de la experimente.

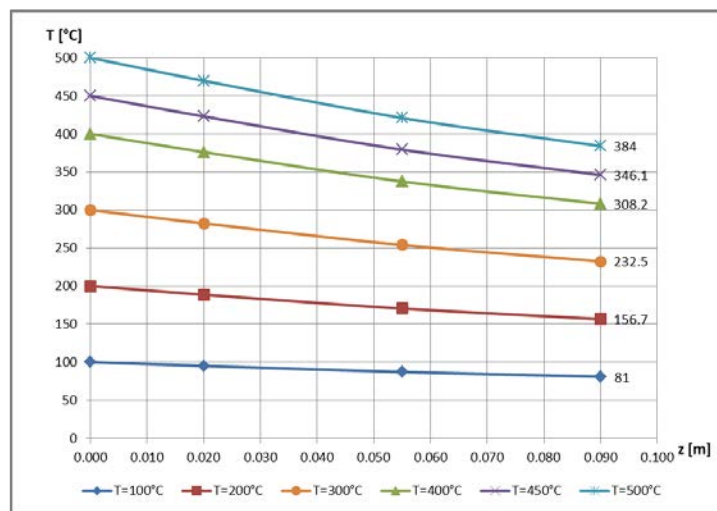


a.



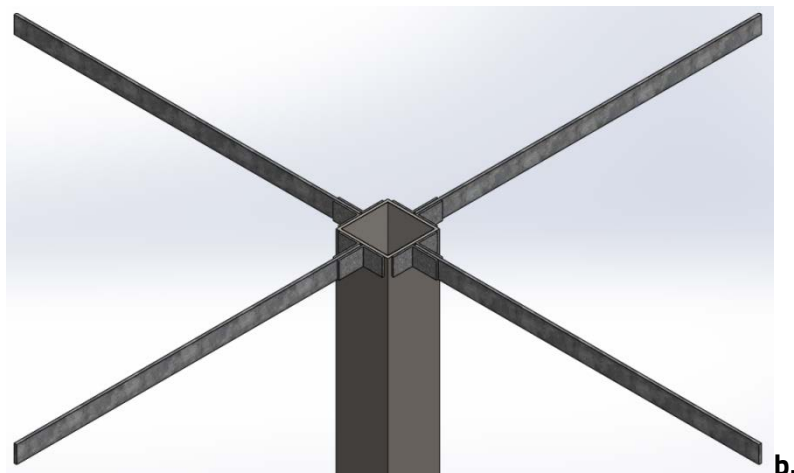


b.



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.

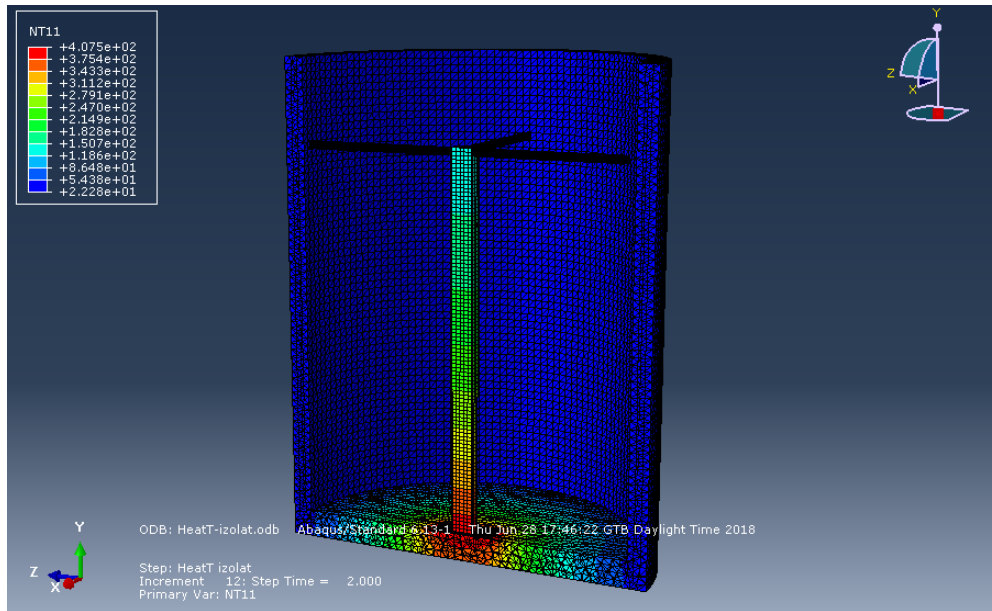
Fig. 5.3.9. Detaliu montaj simplificat



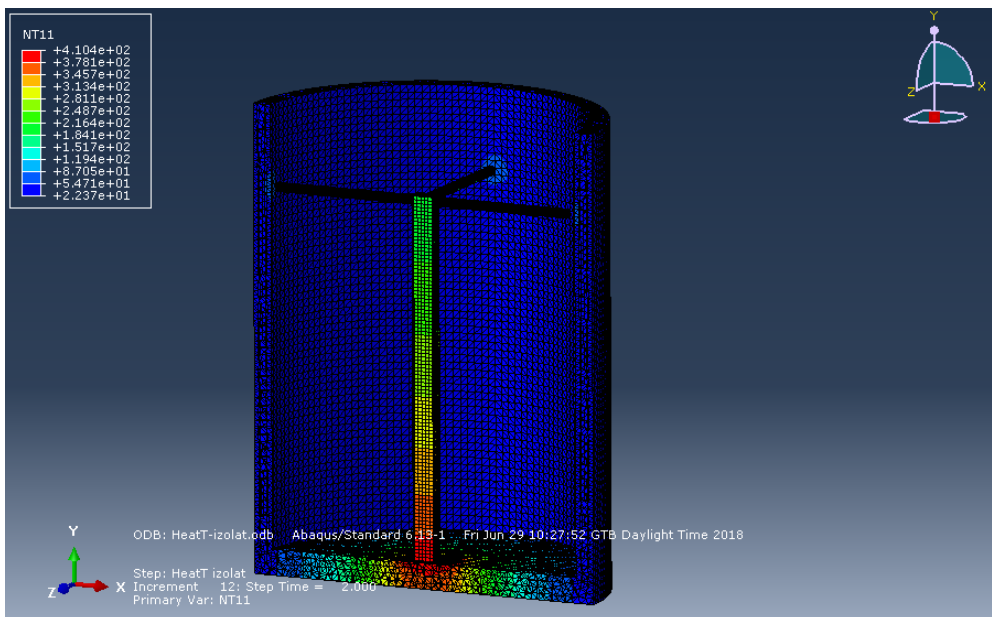
În **figurile 5.3.10.** și **5.3.11.** sunt oferite rezultatele acestei modelări pentru versiunea neacoperită, respectiv acoperită cu vopsea termoizolatoare.

În comparație cu rezultatele măsurătorilor, și în acest caz apar diferențe, datorate nu numai acelor condiții semiturbulente din interiorul stâlpului (detaliat 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 curenților de aer din interiorul acestui cilindru protector, față de cazul real al experimentelor.



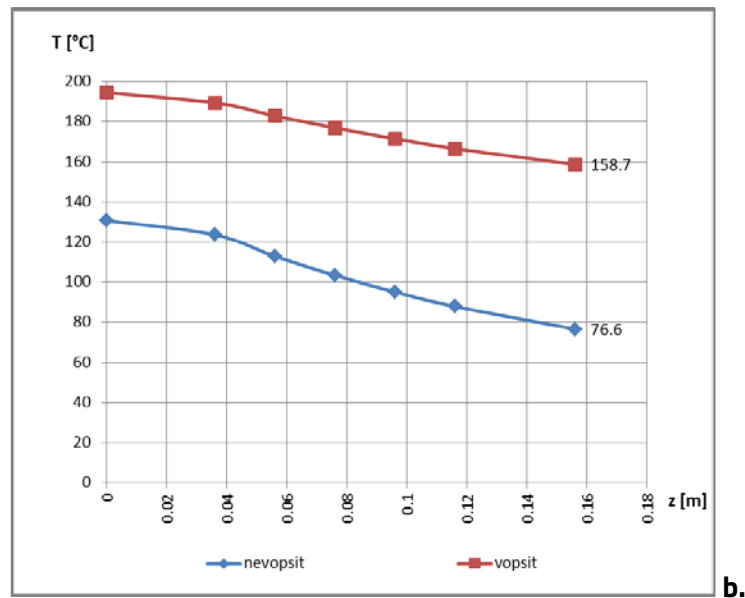
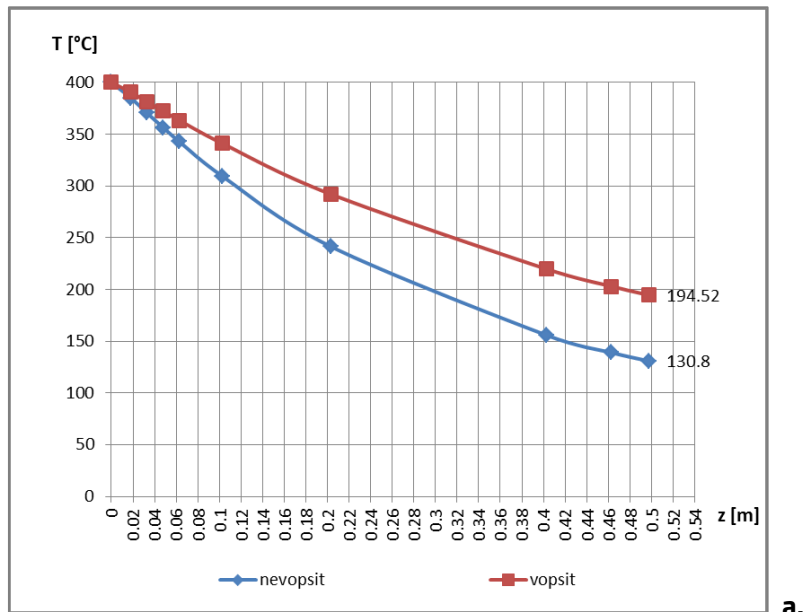
**Fig. 5.3.10.** Rezultatul simulării numerice la modelul nevopsit, prevăzut cu 4 grinzi



**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 grinzii reduse la scara 1:10. Se poate observa comportamentul diferit al acestora în dependență de varianta analizată.



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

Aceste rezultate ale simulării numerice sunt foarte apropiate de cele obținute experimental în varianta cilindului 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 conducția prin secțiunea transversală a barei, și de fenomenele de convecție și de radiație, care însoțesc 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, doctoranda a propus în locul curbei exponențiale teoretice o aproximare polinomială, care din multe puncte de vedere prezenta avantaje nete. În vederea generalizării relațiilor  $T(z)$ , doctoranda 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, prezentau aluri identice și astfel, ele se puteau sintetiza într-una 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 liniară  $\varepsilon[-]$  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  $d_1^{e_1} \cdot d_2^{e_2} \cdot d_3^{e_3} \cdot \dots \cdot d_n^{e_n}$  a dimensiunilor de bază, unde  $e_1, e_2, e_3$ , sunt exponenții dimensiunilor de bază, pe când  $n$  este numărul dimensiunilor de bază implicate.

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

Regulile de bază ale *omogenității dimensionale* sunt descrise în lucrarea în 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 acelea dependentă.

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

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



Se formează *matricea dimensională* din exponenții dimensiunilor

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

Matricea asociată  $M$  este deci:

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

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  $M$ , 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  $A$ , începând cu elementele din dreapta sus a matricei  $M$ , 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  $M$ , și implicit alegerea acelor variabile independente, ale căror dimensiuni vor avea exponenții cuprinși în matricea  $A$ . Această matrice  $A$  evident nu are voie să fie singulară ( $\det|A| \neq 0$ ), iar liniile sale conțin exponenții dimensiunilor principale ale variabilelor independente păstrate. Liniile rămase din matricea  $M$  formează așa-numita *matrice dimensională redusă*. Aceste linii conțin *dimensiunile principale* (adică *dimensiunile care pot fi alese arbitrar*), iar coloanele sale, neincluse în matricea  $A$ , vor forma matricea  $B$ .

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

Pe baza metodologiei prezentate în lucrarea [SZI97] se definește *Mulțimea dimensională*  $M_1$ , 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:

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

(6.4)



Forma generală a mulțimii dimensionale  $M_1$  este:

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

(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 doctorandă 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 sale și de doctorandă, corespunde aceluși 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 mulțimii 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 independenței 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  $\tau_j$ , exponenții 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 exponenții 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 exponenţi  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots$  ai variabilelor  $V_j$ , care satisfac o condiţie dimensională prealabil impusă ( $d_1^{q_1} \cdot d_2^{q_2} \cdot d_3^{q_3} \dots$ ), adică să satisfacă relaţia dimensională

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

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 exponenţilor  $q_i$  ai dimensiunilor din relaţia (6.10), care sunt diferiţi de zero pentru condiţia de mai înainte.

În consecinţă, avem:

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

$N_d$  - numărul dimensiunilor;

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

$N_p$  - numărul grupurilor (expresiilor)  $d_1^{q_1} \cdot d_2^{q_2} \cdot d_3^{q_3} \dots$ , care se pot forma, cu dimensiuni independente impuse; aceste grupuri pot fi după dorinţă, 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 distincte şi anume:

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

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

### **Observaţii 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 şi 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 iniţială) şi în consecinţă: 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 noua matrice dimensională, cu care se lucrează.

2. Dacă noile variabile cu dimensiuni impuse au dimensiuni diferite de unitatea (deci nu sunt adimensionale, după uzanţa 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 şi de dimensiuni) pentru a obţine din matricea dimensională o matrice  $A$  nesingulară, atunci dimensiunile eliminate devin automat dependente, adică exponenţii lor (în acel set de variabile noi, cu dimensiuni impuse a priori) vor rezulta prin calculul aferent mulţimii dimensionale (adică nu se pot impune de la bun început).



4. Se doreşte obţinerea unui număr minim  $N_p$  de variabile noi cu dimensiuni impuse (fie dimensionale, fie adimensionale), deoarece descrierea fenomenului urmărit devine mai clar şi 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 şi egală cu o constantă;
6. Dacă numărul iniţial al dimensiunilor este egal cu cel al variabilelor, atunci matricea dimensională este singulară şi trebuie să aplicăm recomandările de la Observaţia nr.1;
7. Dacă numărul iniţial al dimensiunilor este mai mare decât al variabilelor, atunci sigur va trebui eliminat un număr de dimensiuni, pentru a face matricea dimensională nesingulară.
8. Relaţia 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  $\pi_j$  şi 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 relaţia 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, şi care nu sunt variabile adimensionale, adică se caută mulţimea  $\tau_j$ ), se regăseşte în lucrarea [SZI97], însă pentru doctoranda nu a prezentat interes în investigaţiile sale experimentale;
11. Schimbarea liniilor din matricea dimensională nu influenţează mărimea matricei  $C$  şi în consecinţă, nici componenţa mărimilor adimensionale ( $\tau_j$  sau  $\pi_j$ ) obţinute;

#### 6.1.4. Relevanţa, respectiv irelevanţa dimensională a unei variabile

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

Această irelevanţă se poate evidenţia, respectiv se poate demonstra prin faptul că, în matricea  $C$ , coloana aferentă acestei variabile, conţine numai termeni nuli, ceea ce se va reflecta şi în rândurile corespunzătoare ale variabilelor adimensionale obţinute ( $\tau_j$  sau  $\pi_i$ ).

*Teoreme utile în acest sens* sunt următoarele:

1. Dacă o variabilă are o asemenea dimensiune de bază (fundamentală), care nu se regăseşte în restul variabilelor, atunci respectiva *variabilă este dimensional irelevantă* în respectivul context;
2. Dacă o variabilă este irelevantă dimensional 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 dimensional, conduce la reducerea tot cu  $n$  a rangului matricei dimensionale, fără a schimba componența variabilelor adimensionale urmărite ( $\tau_j$  sau  $\pi_i$ );
4. Dacă o dimensiune este prezentă numai într-una dintre variabilele 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. Irelevanța fizică a unei variabile

Spunem că, o *variabilă este irelevantă din punct de vedere fizic* într-o relație, dacă influența ei asupra modificării variabilei dependente este nesemnificativă (se află sub un anumit 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 irelevantă din punct de vedere fizic este, ca aceasta să fie irelevantă din punct de vedere dimensional.

*Irelevanța dimensională* a unei variabile nu reprezintă *condiția necesară* a irelevanței 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 irelevante;  $V_2$  este irelevantă numai din punct de vedere fizic, pe când  $V_3$  și din cel dimensional.

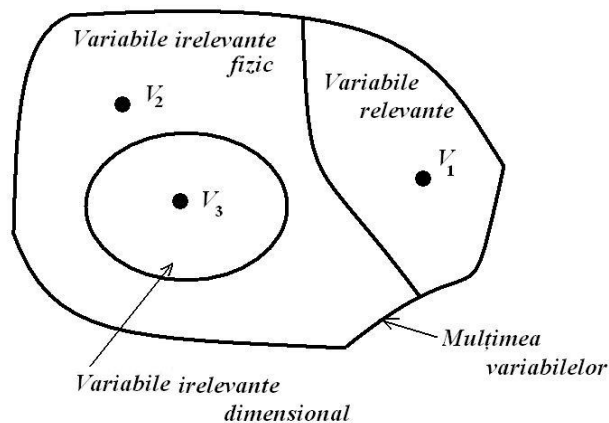


Fig. 6.1.1. Diagrama Venn privind cazurile de irelevanță [SZI97]



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, mulțimea 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.

Aceași 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

$\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  - exponenți 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  $N_p$* .

Aceste *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 mulțimea 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, mulțimea variabilelor (fizice) independente relevante poate conține numai o singură variabilă dependentă.

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

- În definierea mulțimii 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 mulțimii 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 împărți în trei categorii distincte, și anume:
  - *Categoria 1.*- mărimile, 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.* – mărimile, care se obțin prin aplicarea legilor modelării, respectiv
  - *Categoria 3.* – mărimile 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	Dimensiunea	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
Forța aplicată	F	$N$	9000	350	0,0388	1	2
Deformația 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 secţiune circulară plină, respectiv tubulară rectangulară

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

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

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

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

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

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

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

termoprotectoare;

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

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

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

$L_x [m]$  - lungimea barei;

$\Delta T [^\circ C]$  - diferenţa de temperatură bară-aer;

$c_{aer} \left[ \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$  - 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;

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

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

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

$t [s]$  - timpul.



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

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

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

$\alpha'''_n \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafaţa ZOY (adică la bază, respectiv pe suprafaţa de la capătul superior al ţevii);

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

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

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

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

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

$\alpha'_{n,f} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafaţa stratului de vopsea termoprotectoare, aplicată pe suprafaţa XOY;

$\alpha''_{n,f} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$  - coeficientul de transfer convectiv de căldură pe suprafaţa stratului de vopsea termoprotectoare, aplicată pe suprafaţa XOZ;

$V [m^3]$  - volumul barei tubulare (ţevii rectangulare);

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

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

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

$L_x [m]$  - lungimea barei;

$\Delta T [^\circ C]$  - diferenţa de temperatură bară-aer;

$c_{aer} \left[ \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$  - 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;



$\beta \left[ \frac{1}{0\text{C}} \right]$  - 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 exponenții 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:

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

Pentru această matrice nesingulară **A** se determină inversul **A<sup>-1</sup>**, iar cu ajutorul restului elementelor componente ale Matricei Dimensionale, inițiale se formează matricea **B**.

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

Cu ajutorul acestor două matrici se determină pe rând:  $A^{-1} \cdot B$ ;  $(A^{-1} \cdot B)^T$ , respectiv  $C = -(A^{-1} \cdot B)^T$ , 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 remarca 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 șirul aferent acestui parametru adimensional  $\pi_j$ , exponentul.

Astfel, avem pe rând:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= const. = Q \cdot v_{aer}^{-1,5} \cdot c_{aer}^{-3} \cdot A_{lat}^2 \cdot \beta^3 \cdot \rho_{aer}^{-1} \cdot t^{-5,5}; \\ \pi_2 &= const. = A_{tra}^1 \cdot v_{aer}^{-1} \cdot c_{aer}^{-2} \cdot A_{lat}^2 \cdot \beta^2 \cdot \rho_{aer}^0 \cdot t^{-5}; \\ \pi_3 &= const. = \lambda_x^1 \cdot v_{aer}^{-1} \cdot c_{aer}^{-3} \cdot A_{lat}^2 \cdot \beta^2 \cdot \rho_{aer}^{-1} \cdot t^{-4}; \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ \pi_{10} &= const. = \rho_{otel}^1 \cdot v_{aer}^0 \cdot c_{aer}^0 \cdot A_{lat}^0 \cdot \beta^0 \cdot \rho_{aer}^{-1} \cdot t^0 = \frac{\rho_{otel}}{\rho_{aer}}. \end{aligned}$$

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

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*)  $S_\omega = \frac{\omega_{model}}{\omega_{prototip}}$ , 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 temperaturării și al timpul necesar efectuării procesului de încălzire (în vederea asigurării similitudinii termice, adică să obținem în puncte omoloage temperaturi omoloage la timpi omologi).

În cazul Mulțimii Dimensionale **MD1** avem

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

de unde rezultă:

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

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

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

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

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

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 acelor 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:

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

de unde, pentru aceleaşi materiale ale prototipului şi modelului redus la scara 1:2, obţinem factorii de scară  $S_{\lambda_x} = S_{\rho_{otel}} = 1$ , iar acela al ariilor transversale, de la care are loc transferul de căldură prin conducţie, 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 corelaţia căutăată între timpul de încălzire necesar al prototipului şi 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 şi variaţia temperaturii  $\Delta T$ :

$$\pi_1 = const. = Q \cdot \alpha_n'^{-0,5} \cdot \lambda_x^{-0,5} \cdot c_{aer}^{0,5} \cdot A_{tr}'^{-0,25} \cdot A_{lat}'^{-1} \cdot \Delta T^{-0,5} = Q \cdot \frac{\sqrt{c_{aer}}}{A_{lat}' \cdot \sqrt{\alpha_n' \cdot \lambda_x \cdot \Delta T} \cdot \sqrt[4]{A_{tr}'^4}},$$

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

$$\pi_1 = const. = Q \cdot \nu_{aer}^{-1,5} \cdot c_{aer}^{-3} \cdot A_{lat}'^2 \cdot \beta^3 \cdot \rho_{aer}^{-1} \cdot t^{-5,5} = Q \cdot \frac{A_{lat}'^2 \cdot \beta^3}{c_{aer}^3 \cdot \rho_{aer} \cdot \sqrt[3]{\nu_{aer}^3 \cdot t^{11}}}$$

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

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

Evident, pe baza unei analize similare cu aceea menţionată mai înainte privind înlocuirea factorilor de scară în aceste variabile adimensionale, se pot obţine alte corelaţii utile între comportamentul prototipului şi cel al modelului.

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

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



Secțiunea circulară plină, varianta nevopsită (MD1)

	Q	V	Lx	$\rho$	$\rho_{aer}$	t	v aer	a	Beta	g	$\alpha_n$	$\lambda_x$	c aer	Atr.	A lat.	$\Delta T$
<b>m<sub>x</sub></b>	0	1	1	-1	-1	0	2	2	0	1	-1	-1	0	0	1	0
<b>m<sub>r</sub></b>	1	1	0	-2	-2	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0
<b>m<sub>t</sub></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><math>\pi_1</math></b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	-0.5	0.5	-0.25	-1	-0.5
<b><math>\pi_2</math></b>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	-1	0
<b><math>\pi_3</math></b>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	-1	0
<b><math>\pi_4</math></b>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0.5	-1.5	1.5	0.75	0	0.5
<b><math>\pi_5</math></b>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0.5	-1.5	1.5	0.75	0	0.5
<b><math>\pi_6</math></b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.5	-0.5	0.5	-0.25	0	0.5
<b><math>\pi_7</math></b>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-2.5	2.5	-0.5	0.25	-2	-0.5
<b><math>\pi_8</math></b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-2.5	2.5	-0.5	0.25	-2	-0.5
<b><math>\pi_9</math></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
<b><math>\pi_{10}</math></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-2	2	-1	0.5	-1	-1



Secțiunea circulară plină, varianta nevopsită (MD2)

	Q	Atr.	$\lambda x$	Lx	V	g	$\Delta T$	a	$\alpha n$	$\rho$	v aer	c aer	A lat.	Beta	paer	t
mx	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
mt	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
kg	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
s	-2	0	-3	0	0	-2	0	-1	-3	0	-1	-2	0	0	0	1
°C	0	0	-1	0	0	0	1	0	-1	0	0	-1	0	-1	0	0
$\pi 1$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.5	-3	2	3	-1	-5.5
$\pi 2$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	2	2	0	-5
$\pi 3$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-3	2	2	-1	-4
$\pi 4$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-0.5	0	0	0	0	-0.5
$\pi 5$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-0.5	-1	0	1	0	-2.5
$\pi 6$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-0.5	0	0	0	0	1.5
$\pi 7$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$\pi 8$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0
$\pi 9$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1.5	-3	3	2	-1	-4.5
$\pi 10$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0



### Secțiunea tubulară, varianta nevopsită (MD4)

	Multimea dimensională			Lx	c aer	v aer	a	Beta	g	paer	t	λx	A tr.	A lat'	ρ	α'n	ΔT
	Q	α'''n	V														
<b>m<sub>x</sub></b>	0	0	1	1	0	2	2	0	1	-1	0	-1	0	1	-1	-1	0
<b>m<sub>y</sub></b>	1	0	1	0	1	0	0	0	0	-2	0	1	1	1	-1	0	0
<b>m<sub>z</sub></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>π<sub>1</sub></b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3333	-0.67	-1	-0.33	-1	-0.67
<b>π<sub>2</sub></b>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	-1	0
<b>π<sub>3</sub></b>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	-1	0
<b>π<sub>4</sub></b>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	-1	0
<b>π<sub>5</sub></b>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-0.667	0.333	0	0.667	0	0.333
<b>π<sub>6</sub></b>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1.6667	0.667	-2	0.333	-2	-0.33
<b>π<sub>7</sub></b>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1.6667	0.667	-2	0.333	-2	-0.33
<b>π<sub>8</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>π<sub>9</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.3333	1.333	-1	0.667	-1	-0.67
<b>π<sub>10</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	-1	0	-1	-2	0
<b>π<sub>11</sub></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 măsurărilor 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 legături 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, doctoranda este convinsă de eficiența aparte a acestei abordări, prezentate în lucrarea [SZ197];
- Ținând seama de simplitatea și profunzimea acestei abordări, doctoranda în viitor intenționează să 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, doctoranda a efectuat 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 anevoioasă 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, doctoranda și-a formulat *propria ei strategie*, bazată pe utilizarea următoarelor elemente:

- Alegerea, drept sursă de căldură pentru simularea incendiilor, a energiei electrice, deoarece aceasta prezenta 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  $\pi(z)$ , în vederea determinării prin calcul a unor parametri 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, doctoranda și-a finalizat 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 subansamble 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 de doctorandă, 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 i-a permis doctorandei și formularea unor direcții viitoare de cercetare.





## 7.2. Contribuțiile autoarei la tematica abordată

În decursul elaborării tezei, autoarea și-a 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, permițând 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 după cunoștințele doctorandei, nu a mai fost aplicată pentru probleme termice de tipul incendiilor.



### 7.3. Diseminarea rezultatelor cercetărilor

În perioada elaborării tezei, doctoranda a 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 GÁLFI, 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 Hoşa „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 doctoranda a mai elaborat și alte articole în domeniul ingineresc.



În cadrul mobilităţilor 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, doctoranda a participat, pe o perioadă 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 atractivității și performanței programelor de formare doctorală și postdoctorală pentru cercetători în științe inginerești -ATTRACTING”; Numărul de identificare al contractului: **POSDRU/159/1.5/S/137070**; Beneficiar: Universitatea Politehnica Timisoara; Partener: Universitatea Transilvania din Braşov.

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

Experiența acumulată de doctorandă 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 conducție  $\lambda$ .

Doctoranda, în calitate de co-autoare la lucrarea [SZA14] a participat la elaborarea unei noi strategii de măsurare a variației lui  $\lambda$ , bazată pe dispunerea 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 termoprotectoare, însoțită 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  $\lambda(T)$ , 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 ambiant, unde elementul structural va fi amplasat în cazul real.



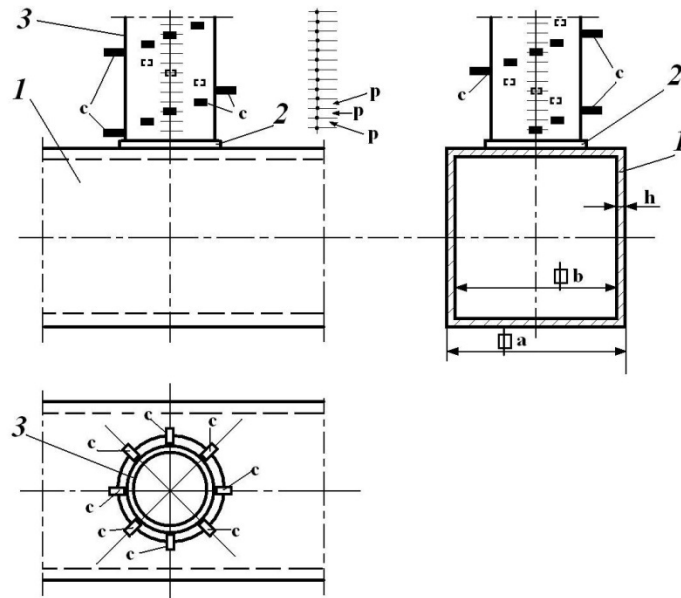


Fig.7.4.1. Dispozitiv de măsurat variația lui  $\lambda$  pe grosimea vopselei [SZA14]

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 amănunțit 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, doctoranda dispune, atât de aparatură, standuri, cât și de 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 termosfumante ecologice de protecție la foc”, *Brevet de invenție*, Oficiul de stat pentru invenții 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 Braşov, 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-Roşca, 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. Gálfi, A. Carol, P. Orbán, „Soluții pentru îmbunătățirea măririi capacității 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: Acţiuni asupra structurilor, Partea 1-2: Acţiuni generale – Acţiuni asupra structurilor expuse la foc, Asociaţia de Standardizare din România (ASRO), 2004
- [SRE93] SR EN 1993-1-2 Eurocod 3: Proiectarea structurilor de oţel, Partea 1-2: Reguli generale Calculul structurilor la foc, Asociaţia de Standardizare din România (ASRO), 2006
- [STE83] D. Ştefănescu, A. Leca, L. Luca, A. Badea, M. Marinescu, „Transfer de căldură şi masă. Teorie şi aplicaţii”. Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 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, Bucureşti, 1977
- [TH000] P. H. Thomas „Dimensional analysis: a magic art in fire research? ” Vol. 34, Iss. 2., Fire Safety Journal, 2000
- [TH083] 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. Hoţa „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\\_steelwork](http://www.steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelwork)
- [\*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-ugniai/>
- [\*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) asigură 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 (căș. Száva) Ildikó Renata

 (România)

 ildiko.munteanu@unitbv.ro

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

### EXPERIENȚA 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; Ținerea 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**

Univesritatea Transilvania din Braşov, 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 competente profesionale arte plastice, grafica**

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

### COMPETENȚE PERSONALE

Limba(i) maternă(e)

maghiară

Limbile străine

română

engleză

germană

ÎNȚELEGERE		VORBIRE		SCRIERE
Ascultare	Citire	Participare la conversație	Discurs oral	Ascultare
C1	C1	B2	B1	B2
A2	B1	A2	A2	A2
A1	A1			

Niveluri: A1 și A2: Utilizator elementar - B1 și B2: Utilizator independent - C1 și C2: Utilizator experimentat  
[Cadru european comun de referință pentru limbi străine](#)

Competențe de comunicare

Competențe organizaționale/manageriale

Competențe dobândite la locul de muncă

Competențele digitale

- competențe de comunicare bune dobândite prin experiența proprie de voluntariat
- leadership (am supravegheat muncitorii pe șantier);
- competențe organizatorice bune, lucrul în echipă (am organizat diferite evenimente pentru tineri).
- autoînvățare (am lucrat la o firmă mică, unde multe ori am fost singură și a trebuit să rezolv diferite situații).
- 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

 <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)

s10/2002–06/2006

**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 „Palo 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  
Organisational / managerial skills

- good communication skills gained through experience of volunteering;
- leadership (I supervised workers on site);
- 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);

Job-related skills

Computer skills

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



## DECLARAȚIE DE AUTENTICITATE

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

în calitate de

student - doctorand al IOSUD: Universitatea Transilvania din Braşov

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 Braşov

declarăm pe proprie răspundere că am luat la cunoștință de prevederile art.143 alin (4) si (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) îndrumătorii lucrărilor de licenţă, de diplomă, de disertaţie, de doctorat răspund solidar cu autorii acestora de asigurarea originalităţii conţinutului acestora.

(5) este interzisă comercializarea de lucrări ştiinţifice în vederea facilitării falsificării de către cumpărător a calităţii de autor al unei lucrări de licenţă, de diplomă, de disertaţie 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 şcolii doctorale se poate obţine după cel puţin 5 ani de la pierderea acestei calităţi, numai în urma reluării procesului de acreditare, conform art. 158.

(3) Redobândirea calităţii de conducător de doctorat se poate obţine după cel puţin 5 ani de la pierderea acestei calităţi, 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 condiţii necesare pentru aprobare din partea Ministerului Educaţiei, Cercetării, Tineretului şi Sportului.

(4) Conducătorii de doctorat sunt evaluaţi o dată la 5 ani. Procedurile de evaluare sunt stabilite de Ministerul Educaţiei, Cercetării, Tineretului şi Sportului, la propunerea CNATDCU.

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

(6) studentul - doctorand este autorul tezei de doctorat şi îşi asumă corectitudinea datelor şi informaţiilor. prezentate în teză, precum şi a opiniilor şi demonstraţiilor exprimate în teză.

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

\*\*\*\* protecţia 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 existenţa plagiatului, în cadrul tezei şi/sau al activităţilor care au dus la realizarea acesteia, aceştia invalidează teza de doctorat, comunică aceste constatări celorlalţi membri ai comisiei de evaluare şi sesizează Consiliul general CNATDCU pentru analiza responsabilităţii conducătorului de doctorat sau a şcolii doctorale şi 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 situaţia 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 preşedintele 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 existenţa plagiatului, iar preşedintele CNATDCU transmite autorului sesizării, autorului tezei şi IOSUD decizia Consiliului general al CNATDCU şi motivarea acesteia. Aceştia au la dispoziţie 10 zile pentru formularea unei contestaţii privitoare la procedură, iar Consiliul general al CNATDCU are la dispoziţie 10 zile pentru formularea răspunsului la contestaţie.

(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 priveşte plagiatul, preşedintele CNATDCU propune Ministerului Educaţiei Naţionale şi Cercetării Ştiinţifice una sau mai multe din următoarele măsuri:

- a) retragerea calităţii de conducător de doctorat;
- b) retragerea titlului de doctor;
- c) retragerea acreditării şcolii doctorale.