

**UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
FACULTATEA DE INGINERIE HUNEDOARA
CATEDRA DE METALURGIE**

***CERCETĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA COMPORTĂRII LA
DEFORMARE A SEMIFABRICATELOR TURNATE CONTINUU***

**CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC,
Prof.univ.dr.ing. IOAN ILCA**

Membru Corespondent al Academiei de Științe Tehnice din România

**DOCTORAND,
Ing. ERIKA DIANA ARDELEAN**

642.446
369 E

**HUNEDOARA
2004**

TEZĂ DE DOCTORAT

CUPRINS

	<i>Scopul tezei</i>	5
Capitolul I	<i>Studiu privind stadiul actual al turnării continue a oțelului</i>	7
I.1.	Evoluția procesului de turnare continuă	7
I.2.	Stadiul actual al turnării continue a oțelului	11
I.3.	Tendențe de viitor în turnarea continuă a oțelului	13
I.4.	Concluzii	16
Capitolul II	<i>Analiză privind particularitățile procesului de solidificare la turnarea continuă a oțelului</i>	17
II.1.	Considerații tehnologice	17
II.2.	Solidificarea oțelului	19
II.2.1.	Formarea crustei de oțel și înaintarea frontului de solidificare	23
II.2.2.	Rezistența mecanică a crustei de oțel formată în cristalizor ...	28
II.2.3.	Formarea zonei axiale a semifabricatului	29
II.3.	Concluzii	31
Capitolul III	<i>Modelarea matematică a procesului de solidificare a oțelului</i>	32
III.1.	Solidificarea oțelului în zona de răcire primară	32
III.2.	Deducerea ecuației de repartizare a temperaturii în crusta semifabricatului	42
III.3.	Schimbul de căldură și solidificarea oțelului în zona de răcire secundară	50
III.4.	Verificarea practică a modelului matematic privind solidificarea semifabricatelor turnate continuu	57
III.5.	Simularea procesului de solidificare a semifabricatelor turnate continuu	63
III.5.1.	Modelarea prin metoda diferențelor finite	63
III.5.2.	Criteriul de stabilitate a ecuațiilor cu diferențe finite	66
III.5.3.	Modelul bidimensional al solidificării și răcirii semifabricatului	68
III.5.4.	Desfășurarea calculelor și funcționarea programului	69
III.5.4.1.	Conductibilitatea termică	70
III.5.4.2.	Temperatura redusă	71
III.5.4.3.	Dependența entalpiei de temperatură	72
III.5.4.4.	Relațiile de calcul utilizate în program	73
III.5.4.5.	Prezentarea programului conceput	75
III.5.5.	Rezultatele și interpretarea simulărilor	77
III.6.	Concluzii	86

Capitolul IV	<i>Cercetări și experimentări industriale referitoare la factorii de influență asupra calității semifabricatelor turnate continuu</i>	87
IV.1.	Influența elaborării și a tratamentului secundar	88
IV.2.	Temperatura de turnare	94
IV.3.	Timpul de turnare	97
IV.4.	Viteza de turnare	108
IV.5.	Răcirea primară	117
IV.6.	Răcirea secundară	127
IV.7.	Concluzii	138
Capitolul V	<i>Considerații referitoare la calitatea semifabricatelor turnate continuu și deformate plastic</i>	142
V.1.	Controlul defectelor de suprafață	148
V.2.	Controlul defectelor interne	150
V.3.	Concluzii	160
Capitolul VI	<i>Concluzii finale și contribuții personale</i>	162
	<i>Bibliografie</i>	172
	<i>Anexe</i>	179
Anexa III	Principalele subprograme ale programului TURNCON	180
Anexa IV		
IV.1.	Date privind compoziția chimică a șarjelor studiate	189
IV.2.	Date generale privind turnarea continuă	193
IV.3.	Date privind viteza de turnare	196
IV.4.	Date privind răcirea primară	200
IV.5.	Date privind temperatura oțelului în distribuitor	203
IV.6.	Date privind apa de răcire din cristalizor	206
IV.7.	Date privind răcirea secundară	219
IV.8-IV.9.	Variația principalelor elemente din compoziția chimică	222
IV.10-IV.12	Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura oțelului în distribuitor și gradientul de temperatură la 40min de la începutul turnării, pentru secțiunile considerate	224
IV.13-IV.17	Variația vitezei de turnare în funcție de parametrii apei de răcire din cristalizor, pentru cele trei secțiuni considerate la 40min de la începutul turnării	227
IV.18-IV.20	Variația vitezei de turnare în funcție de parametrii răcirii secundare, la 40min de la începutul turnării pentru secțiunile considerate	233
IV.21.	Prezentarea programului SIDHD1	239

SCOPUL TEZEI

Oțelul este și va rămâne în viitor principalul material utilizat în industria modernă pentru realizarea numeroaselor utilaje, mașini, instalații și bunuri de larg consum. Creșterea producției mondiale de oțel a fost favorizată și de perfecționarea și răspândirea largă a noilor procedee tehnologice de mare productivitate.

Un loc însemnat în dezvoltarea metalurgiei îi revine așa numitei „metalurgie în oală”, aceasta permițând atât creșterea producției cât și a calității oțelului, obținându-se totodată o reducere a consumurilor specifice și asimilarea de noi tehnologii de turnare mai precis trecerea de la turnarea oțelului în lingouri la turnarea continuă.

Turnarea continuă, în comparație cu turnarea clasică, prezintă o serie de avantaje tehnologice și economice, cele mai semnificative fiind: scoaterea de metal este de minim 96%; reducerea consumului de energie, materiale, manoperă pe fluxul oțelărie-laminoare; reducerea cheltuielilor de investiții pe fluxurile de laminare; creșterea calității semifabricatelor; reducerea gradului de poluare și îmbunătățirea condițiilor de muncă în oțelării.

În prezent se tinde, pe plan mondial ca, prin turnarea continuă, să se obțină semifabricate cu secțiune cât mai apropiată de secțiunea semifabricatului priză, în acest mod rezultând o creștere importantă privind economia de metal, energie, manoperă, investiții, etc.

Continuând mai departe prelucrarea semifabricatelor în flux, se tinde ca în urma proceselor de deformare plastică la cald să nu mai fie nevoie de prelucrarea ulterioară (finisarea) produsului finit. S-au dezvoltat astfel atât tehnologii performante de laminare a semifabricatelor turnate continuu cât și utilaje capabile să asigure aceste performanțe.

În prezenta teză de doctorat, pentru definirea scopului, s-a pornit de la premisa că, în condițiile în care tehnologia de deformare și utilajul utilizat în acest

scop sunt corespunzătoare, calitatea produsului finit este influențată în special de tehnologiile de elaborare și turnare a semifabricatelor. Pentru a se stabili calitatea semifabricatelor turnate continuu, s-au conturat două linii de cercetare:

- studiul solidificării semifabricatelor la turnarea continuă, știut fiind faptul că solidificarea, nu este un proces staționar ca în cazul turnării oțelului în lingouri. În acest sens s-a avut în vedere studiul matematic, verificarea relațiilor obținute precum și simularea procesului de solidificare;
- studiul factorilor tehnologici cu influență asupra calității semifabricatelor turnate continuu, limitați pentru partea de elaborare doar la compoziția chimică dar analizați amănunțit pentru procesul de turnare continuă;
- studiul defectelor evidențiate atât la semifabricatele turnate continuu cât și la produsul finit și modalitățile de limitare sau chiar evitarea apariției acestora. Se are în vedere urmărirea în practică a soluțiilor tehnologice propuse (a valorilor optime) și modul de influență asupra calității.

Într-adevăr, dezvoltarea industriei metalurgice, necesitatea fabricării prin turnarea continuă a unor produse cu performanțe calitative superioare și în același timp competitive reclamă cunoașterea aprofundată a fenomenelor și proceselor care au loc pe fluxul de elaborare – turnare – deformare plastică la cald.

Autoarea își exprimă întreaga sa recunoștință conducătorului științific Prof.univ.dr.ing. ILCA IOAN, adresându-i mulțumiri pentru îndrumările primite și pentru interesul cu care a coordonat elaborarea acestei lucrări.

De asemenea, mulțumește pe această cale colegilor din Facultatea de Inginerie Hunedoara pentru sugestiile date la redactarea lucrării precum și familiei pentru suportul moral dat.

CAPITOLUL I

STUDIU PRIVIND STADIUL ACTUAL AL TURNĂRII CONTINUE A OȚELULUI

1.1. Evoluția procedurii de turnare continuă

Conceptul inițial al turnării continue a metalelor a fost înregistrat la mijlocul secolului al XIX. Limitată de posibilitățile tehnologice de la acea oră, ideea turnării continue dezvoltată de G.E. Sellers (1840), J.Laing (1843) și H. Bessemer (1846) a fost aplicată doar la metale neferoase cu punct de topire scăzut. Prima propunere de construcție a unei mașini de turnare continuă, cu design apropiat de cel al mașinilor actuale de turnare continuă, a fost înregistrată în anul 1887 de către germanul R.M. Daelen. Mașina propusă, includea un cristalizor răcit cu apă deschis la ambele capete, o zonă de răcire secundară, o bară falsă, role de susținere și un utilaj de debitare a firului. Toate încercările de turnare continuă a oțelului din aceea perioadă au rămas la stadiul de propuneri sau experimente, până când, în anul 1933 Sigfried Junghans, considerat părintele turnării continue moderne, a conceput, dezvoltat și patentat sistemul de oscilare a cristalizorului. Această realizare a făcut posibilă dezvoltarea la scară industrială a turnării continue [1].

Prima mașină de turnare continuă a fost construită la Low Moor (Anglia) și a fost pusă în funcțiune în anul 1946, fiind o mașină verticală pentru țagle. După anul 1950 turnarea continuă a început să se dezvolte din ce în ce mai mult, în prezent înregistrându-se peste 7000 de patente în acest domeniu [1,2]. Principalele îmbunătățiri și dezvoltări din anul 1950 și până în prezent sunt analizate în continuare [1, 3].

- 1950 – Test cu mașina electromagnetică (EMS) sub cristalizor realizat de S. Junghans;
- 1951 – Prima mașină de turnare verticală - semicontinuă - în Rusia la uzina „Krasnîi Oktiabr”;
- 1952 – La Barrow Steel (Marea Britanie) intră în exploatare industrială o mașină verticală de turnare continuă construită de CONCAST. În același an, O Schaber în colaborare cu J. Junghans patentează o mașină de turnare cu fir curb;
- 1953 – Teste cu agitare electromagnetică (EMS) în cristalizor la Manesmann (Germania);
- 1954 – La Manesmann (Germania) este utilizată pentru prima dată o oală clasică de turnare echipată cu închizător cu dop la turnarea continuă. De asemenea, distribuitorul era echipat cu închizătoare cu dop pentru controlul celor patru fire. La Atlas Steel (Canada) este pusă în funcțiune o mașină de turnare continuă verticală pentru sleburi din oțel inoxidabil construită de CONCAST;
- 1956 – La Barrow Steel (Marea Britanie) firul unei mașini de turnare verticală a fost îndoit și îndreptat în plan orizontal, aceasta constituind prima încercare de realizare a unei mașini de turnare continuă cu fir curb de către CONCAST- HALLIDAY;
- 1958 – Se toarnă sleburi cu lățimea de 1000mm la Böhler în Austria cu o mașină construită de către Manesmann – Demag – Halliday;
- 1959 – La Terni (Italia) Manesmann – Demag- Böhler pun în funcțiune o mașină de turnare continuă a țagtelor cu 8 fire, dotată cu dopuri de închidere atât la oală cât și la distribuitor;
- 1961 – La Dillingen (Germania), CONCAST construiește o mașină de turnare continuă verticală cu îndoire și îndreptare;
- 1962 – Este introdus fluxul de lubrifiere la SAFE în Franța și Manesmann în Germania. Este patentat turnul rotitor de către CONCAST. Este pusă în funcțiune la Manesmann prima mașină care, prin schimbarea cristalizorului, putea turna 4 sleburi cu lățimea de 1500mm sau 9/8 blumuri sau 8 țagle pătrate sau rotunde;
- 1963 – Prima mașină de turnare continuă cu cristalizor curb pentru blumuri de 200x200mm este pusă în funcțiune la Manesmann. Cristalizorul curb pentru turnarea continuă a țagtelor este introdus de CONCAST la firma Moos Sthal. Turnarea continuă centrifugală pentru țagle și blumuri rotunde este introdusă la Societe Metalurgique d’Imphy (Franța) ;

- 1964 – Cristalizorul curb pentru sleburi late este folosit la Dillingen în Germania de către CONCAST. Este pusă în funcțiune la Manesmann prima mașină de turnare continuă cu fir curb pentru sleburi cu îndreptare progresivă. Aceasta este și prima mașină de turnare continuă cu fir curb și înălțime redusă („super low head”). Controlul automat al dopului de închidere la distribuitor este introdus de CONCAST la Barrow Steel (Marea Britanie). Pentru prima dată în lume toată producția unei uzine este turnată continuu. Acest record este înregistrat de Shelton Iron & Steel (Marea Britanie) care exploata mașina de turnare continuă construită de CONCAST;

- 1965 – Mașina de turnare continuă cu fir curb pentru turnarea blumurilor rotunde este pusă în funcțiune la Escheweller Bergwerksverein (Germania) de Manesmann – Demag. Primele tuburi imersate sunt folosite la SAFE în Franța și Manesmann în Germania. Îndreptarea și îndoirea progresivă este introdusă de Olson în S.U.A;

- 1966 – Aplicarea protecției între oală și distribuitor cu tuburi se face la Manesmann;

- 1967 – Masa de oscilare și primul segment sunt solidarizate în vederea schimbării rapide a acestora (Manesmann). Rautaruuki Oy (Finlanda) este prima oțelărie concepută prin proiectare, la care toată producția de oțel urma să se toarne continuu (tehnologii Rusia.);

- 1968 – La Algoma în Canada este introdusă la scară industrială turnarea continuă a profilelor (tehnologie BISRA și CONCAST). Turnul rotitor patentat de CONCAST în 1962 este aplicat în practică de VOEST (Austria). La McLouth Steel (SUA), sleburile turnate continuu sunt pentru prima dată încărcate în stare caldă într-un cuptor cu inducție în vederea transferului la laminare. General Motors în SUA și Davy – Loewy în Marea Britanie concep și construiesc o mașină semiindustrială de turnare continuă pe orizontală;

- 1969 - Este concepută și experimentată o duză de stropire cu unghi de 120° de către Manesmann – Demag – Lechler. CONCAST patentează bara falsa permanentă;

- 1971 – La US Steel Gary Works (SUA) este aplicată turnarea continuă prin compresiune. General Motors la Lanring (SUA) și Davy – Loewy la Jarrow (Marea Britanie) instalează și exploatează la scară industrială două mașini de turnare continuă orizontală;

- 1972 – La NSC Hirohata (Japonia) este experimentat un cristalizor pentru sleburi cu lățime ajustabilă în timpul turnării. Primul turn rotitor tip „fluture” este

construit la Peine-Salzgitter (Germania) de Manesmann – Demag. Reducerea timpului de pregătire a mașini pentru o nouă turnare se realizează de către Manesmann – Demag care a produs sistemul de introducere a barei false pe sus („top feed”) la Peine – Salzgitter;

- 1974 - Este concepută și experimentată o duză de stropire cu amestec aer-apă de către Manesmann – Lechler. La SAFE (Franța), după o tehnologie SAFE – IRSID - CEM, este aplicată la scară industrială agitarea electromagnetică sub cristalizor.

Un impact deosebit în dezvoltarea procedeelor de turnare continuă și aplicarea acestora de către un număr din ce în ce mai mare de producători de oțel, l-au avut crizele energetice.

Eficiența economică deosebită a procedurii de turnare continuă a oțelului constă în îmbunătățirea substanțială a indicelui de scoatere și reducerea numărului de etape de prelucrare a semifabricatului. Conform unor studii efectuate de International Iron and Steel Institute [4], în tab.1.1 sunt prezentați comparativ, indicii de scoatere obținuți la turnarea continuă a semifabricatelor, comparativ cu turnarea clasică.

Tab.1.1. Indici de scoatere

Semifabricat	Scoatere, %		Creștere, %
	Turnare clasică	Turnare continuă	
Taglă	81,29	95,57	14,28
Blum	82,93	95,87	12,94
Sleb	84,28	94,74	10,46
Total semifabricate	83,45	95,01	11,56

Totodată, prin folosirea directă și în stare caldă a produsului turnat continuu (în general sleburile), în următoarele etape ale fluxului de fabricație (laminare), se obțin de asemenea importante economii de energie.

Evoluția turnării continue a fost deosebit de spectaculoasă. Astfel, dacă în anul 1970 doar 5% din producția mondială a fost turnată continuu, în anul 1974 aceasta a crescut la 11,4%. În următorii ani, până în 1984, ponderea acesteia a crescut la 63,3%, ajungând ca în prezent în țările CEE, 95% din producția de oțel brut să fie turnată continuu [1, 5].

1.2. Stadiul actual al turnării continue a oțelului

Oțelurile elaborate și turnate în lingouri după procedeele obișnuite conțin ca impurități gaze, incluziuni nemetalice și elemente nocive (P, S, uneori Sb, Sn, Bi) și prezintă o neomogenitate chimică și structurală accentuată. Aceste deficiențe produc dificultăți în acțiunea de automatizare și raționalizare din industria constructoare de mașini, acțiune care necesită oțeluri cu proprietăți fizice și mecanice superioare și constante. Această cerință este satisfăcută în general, dacă se corelează just factorii turnării cu compoziția chimică a oțelurilor și dacă aceasta din urmă s-a realizat printr-o elaborare îngrijită (degazare și dezoxidare avansate, valori adecvate pentru temperatura de la începerea topirii până la evacuare).

Asigurarea cerințelor calitative referitoare la conținuturile scăzute de gaze și respectiv prezentarea mai favorabilă a incluziunilor nemetalice în masa de bază, ca și omogenizarea temperaturii de turnare și creșterea numărului de germeni de cristalizare (uniform distribuiți), cauzată de accelerarea solidificării, se pot obține mai avantajos prin turnarea continuă [1,6]

Deși ideea turnării continue a fost formulată încă în secolul trecut de către H. Bessemer, instalațiile au apărut abia după anul 1950. Acestea au cunoscut o extindere rapidă, astfel încât în prezent o cantitate tot mai mare din oțelul elaborat se toarnă prin acest procedeu. În anul 2003 s-a turnat continuu 90,28% din producția mondială de oțel [5].

Ca metodă, turnarea continuă se realizează prin introducerea oțelului lichid cu o temperatură bine determinată într-o formă cavă cu pereți răciți cu apă la interior, numită cristalizor și evacuarea la capătul opus, a „firului” de oțel solidificat.

Construcția și poziția cristalizorului a generat o diversificare foarte largă a procedeelor de turnare continuă. Pentru obținerea aceluiași produs prin turnarea continuă comparativ cu turnarea clasică, numărul fazelor se reduce cu peste 50%, în primul rând și prin manipularea de lingouri, striparea, încălzirea și uneori, laminarea acestora.

Astfel, extinderea turnării continue a oțelului se explică atât prin productivitatea deosebită a acestor instalații față de turnarea în lingotiere, cât și prin faptul că în comparație cu celelalte procedee, semifabricatele (sleburi, blumuri, țagle) se obțin cu cheltuieli mai mici.

La toate aceste avantaje se mai adaugă și faptul că la procedeele clasice de turnare și laminare, pierderile de metal la obținerea semifabricatelor din oțel se

ridică la 15-18%, în timp ce pierderile la obținerea acestor semifabricate prin turnarea continuă nu depășesc 5%.

Turnarea continuă se poate aplica cu succes la toate procedeele de elaborare a oțelului: convertizoare cu oxigen, cuptoare cu arc electric și chiar cuptoare Siemens – Martin. În prezent, turnarea continuă este mai des integrată în fluxurile societăților siderurgice mari, ajungându-se chiar la situații de eliminare completă a laminoarelor degrositoare.

Solidificarea oțelului și deci productivitatea instalației depind de lungimea cristalizorului și viteza de turnare. Când în cristalizor se realizează numai o solidificare parțială, productivitatea instalației este mai mare.

În țara noastră primele instalații de turnare continuă a oțelului au fost puse în funcțiune în anul 1978 la SIDEX Galați și SOCOMET Oțelul Roșu, iar în 1980 la SIDERCA Călărași. Ulterior astfel de instalații au fost implementate și la COST Târgoviște și la SIDERURGICA Hunedoara.

Introducerea turnării continue în anii 1960 și dezvoltarea acestei tehnologii în continuare a oferit producătorilor de oțel, în special celor de produse plate, o alternativă în practica turnării în lingouri, care erau apoi deformate în laminoare degrositoare (slebing, bluming). Noua metodă de producere a semifabricatelor de oțel s-a dezvoltat rapid, în prezent în țările dezvoltate circa 87% din oțelul lichid fiind turnat continuu [1,5].

Japonia, unul dintre cei mai mari producători de oțel toarnă continuu 94,7% din oțelul elaborat. Din țările comunității Europene, Franța și Italia toarnă continuu 96,2% din producția de oțel, iar toată Comunitatea Europeană 85,8%. Marea majoritatea a țărilor vestice toarnă continuu peste 67% din producția lor de oțel [5].

România turna continuu circa 30% în 1989, atingând în 1992 circa 52%, dar nu prin lărgirea ariei ocupate de turnarea continuă, ci prin restrângerea producției de oțel – lingou [1]. În prezent, se toarnă circa 61% din producția de oțel a țării [5].

Răspândirea pe scară largă a turnării continue a dus la apariția a peste 1400 de mașini de turnare continuă cu peste 4000 fire, tehnologia și utilajele fiind accesibile celor mai mulți producători.

Noile dezvoltări în turnarea continuă au oferit producătorilor de oțel alternative la turnarea continuă convențională, prin scăderea dimensiunilor semifabricatelor, în sensul apropiierilor de dimensiunea finală.

În prezent au ieșit din faza pilot și sunt în exploatare industrială mașini pentru turnarea continuă a sârmelor cu $\phi 3\text{mm}$ și a sleburilor cu grosimi de 40mm,

iar în fază de laborator sau pilot se toarnă continuu folii cu dimensiunile 300mm x 150 μ m și fibre metalice cu ϕ 30 μ m din metale amorfe [1].

1.3. Tendințe de viitor în turnarea continuă a oțelului

La a III-a Conferință Europeană pentru Turnare Continuă - Madrid 1998 [7] au fost evidențiate câteva preocupări ale perioadei actuale, în ce privește atât fabricarea de mașini de turnare continuă cât mai performante dar și pentru obținerea unor indicatori superiori la turnare și de asemenea, semifabricate turnate continuu de calitate superioară:

- găsirea și aplicarea de soluții tehnice pentru creșterea vitezei de turnare atât pentru mașinile de turnat sleburi și blumuri dar mai ales pentru cele de turnat țagle;
- opțiunea în fabricația de sleburi în condițiile unor viteze mărite pentru mașinile cu profil vertical în prima parte pe un tronson de 2,5m și apoi curb, din considerente de îmbunătățire a stării de puritate a semifabricatului turnat continuu;
- corelarea în măsură cât mai mare a caracteristicilor mașinii de turnare continuă și a echipamentului cu care este utilată cu sortimentația de fabricație căreia i se adresează, în cazul mașinilor noi și a celor re tehnologizate;
- utilizarea de cristalizoare cu lățime variabilă la turnarea sleburilor;
- creșterea lungimii metalurgice a slebului;
- prelungirea cât mai mult a secvenței de turnare continuă;
- creșterea performanței managementului de întreținere a utilajului și a echipamentelor auxiliare;
- grafice foarte strânse la punerea în funcțiune, și mai ales în cazul acțiunilor de modernizare/re tehnologizare, pentru limitarea la maxim a pierderilor de producție;
- preocuparea pentru modernizarea și re tehnologizarea mașinilor de turnare continuă, mai ales în Europa de Vest. În tab.1.2. este prezentată situația mașinilor de turnare continuă noi și modernizate în perioada 1994 – 2003 [5,7].

Tab.1.2.

Zona geografică	Sleburi		Țagle și blumuri	
	noi	modernizate	noi	modernizate
Europa de Vest	6	19	20	18
Europa de Est	10	5	23	6
America de Nord	10	13	16	9
Asia	18	5	27	4

Tendința producătorilor de oțel de a se apropia cât mai mult de dimensiunea finală a produsului prin turnarea continuă își găsește justificarea în economiile importante de energie care sunt realizate în urma scurtării fluxului tehnologic (energia necesară atât încălzirii cât și lucrul mecanic de deformare), prin micșorarea pierderilor de metal în timpul procesării și eliminării unor instalații care presupuneau investiții, personal, întreținere.

Problema majoră a apropierii semifabricatului turnat continuu de dimensiunea produsului finit este cuplarea „în linie” a mașinii de turnare continuă cu laminorul, urmărindu-se valorificarea optimă a căldurii fizice a semifabricatului și implicit mărirea productivității. Acest lucru a fost realizat și aplicat industrial pentru sleburile subțiri în cadrul variantelor ISP (Mannesmann) și CSP (Schloeman-Siemag).

În momentul de față, pe baza tehnologiilor dezvoltate în principal de Schloermann – Siemag (CSP), Mannesmann Demag (ISP), VAI (Conroll) și Danilei (TCS) siderurgia mondială beneficiază de trei tehnici de turnare de acest fel care și-au dovedit valabilitatea în domeniul oțelurilor carbon, dar și a oțelurilor silicioase și inoxidabile (experiența IPS la Arvedi și Conroll la ARMCO):

- turnarea continuă a slebului subțire (50 –90 mm);
- turnarea continuă a slebului mediu (120 – 150 mm);
- turnarea continuă a semifabricatului profilat.

În același timp în fază preindustrială, se depun de câțiva ani, eforturi mari de concepție și finanțare pentru a se pune la punct soluția tehnico- economică cea mai bună de turnare continuă a benzilor de grosimi sub 10mm.

Producția de sleb subțire este relativ tânără (10 ani) dar și-a câștigat încrederea producătorilor de oțel mai ales datorită capacității procedurii de a asigura o calitate ridicată (avantajele economice: reducerea cheltuielilor de investiții, durata mai scurtă de recuperare, costurile de producție mai mici, fiind de mult cunoscute și de necontestat). Ansamblul acestor avantaje au determinat creșterea permanentă a capacităților de producție, cu explozia semnificativă de după anul 1994 [8]. Având în vedere capacitățile de producție în funcțiune și cele comandate [9], producția de bandă laminată la cald obținută pe flux cu sleb subțire reprezenta în anul 2003 cca 18% din producția mondială, tinzând spre 20% în următorii 10 ani [5]. Soluția tehnologică de turnare continuă a slebului subțire inițial atașată fluxurilor de fabricație începe să fie tot mai mult îmbrățișată de producători cu flux integrat. După uzinele Acme Steel, AlgomaSteel (ambele din S.U.A.) și Posco, soluția acesta modernă a debutat și în Europa la Brukhausen

Thyssen/Germania (soluția CSP, mașină cu două fire cu alimentare din convertizor de 380 t), urmată în anul 2000 de PIF de la Hoogovens (soluția ISP mașină cu un fir, alimentare din convertizorul de 320 t) [10,11].

Din punct de vedere tehnic, inițial s-au turnat continuu sleburi de 50mm (Nucor Crawfordsville), dar din considerente de productivitate treptat grosimea sleburilor a fost crescută la:

- 70-90mm, aplicând pe segmentul I tehnica LCR (reducere pe miez lichid care înseamnă de fapt aplicarea unor forțe de presare pe ambele laturi ale slebului, producându-se o deformare până la grosimea de 50mm, în condiții de menținere a miezului lichid;
- 120-150mm determinând apariția familiei de mașini TC pentru sleburi de grosime medie.

De remarcat punerea în funcțiune în Cehia la Nova Hut Ostrava a primului astfel de „medium caster” din Europa (grosime sleb 120-125mm).

Perspectiva procedului, odată rezolvate problemele calitative și ale productivității este indubitabilă. Faptul că uzinele integrate adoptă procedeul creează cel puțin două premise:

- potențial de resurse financiare mai mari pentru cercetare - dezvoltare care vor permite perfecționarea și mai mult a procedului;
- amenințarea că producția de bandă laminată la cald să fie absorbită de uzine tip mini mill se micșorează, având în vedere că totuși costurile de fabricație în uzinele integrate sunt mai scăzute decât în uzinele mini mill. Asocierea procedului „smelting reduction” (tip COREX) poate interveni decisiv în această competiție a producătorilor.

Managementul uzinelor siderurgice producătoare de produse plate (cu precădere acelea unde banda laminată la cald deține o pondere mare în vânzări) este constrâns tot mai mult de evoluția pieței să adopte soluții tehnice generatoare de costuri minime. Cele prezentate se pot argumenta prin două exemple: indicele preturilor pe piața europeană pentru rulouri de bandă laminată la cald a scăzut continuu începând cu ani 80 și recesiunea din siderurgie în ultimul an a afectat de asemenea cel mai mult din punct de vedere al prețurilor de vânzare pe piața europeană producția de rulouri de bandă laminată la cald.

Soluția de realizare a semifabricatelor NNSC (near net shape casting) destinate fabricației de produse lungi (profile) s-a materializat de asemenea de câțiva ani prin intrarea în exploatare a așa numitului „beam blanks caster” (mașina de turnare continuă pentru semifabricate profilate). Uzinele ARBBED funcționând

cu CE de la Differdange, Unterwellenborn și Esch – Belval sunt principalele beneficiare ale acestui procedeu [12].

1.4. Concluzii

Din cele prezentate, rezultă concluziile:

1. Cu toate realizările spectaculoase obținute până în prezent potențialul de dezvoltare a procedului de turnare continuă, spre deosebire de alte procedee siderurgice, este în continuare mare.

2. Principalele direcții ale dezvoltării tehnologice determinate nemijlocit de exigențele de competitivitate ale producătorilor sunt legate de creșterea productivității pe utilaj și aducerea cât mai aproape a dimensiunii semifabricatelor turnate continuu de dimensiunea produsului finit (în condiții de menținere sau creștere calitativă)

3. Presiunea pieței asupra costurilor de fabricație și a acestora asupra progresului în concepție și management tehnologic sunt evidente și reprezintă substratul majorității lucrărilor recent publicate

4. În mod cert în ani care vor urma vom asista la o ofensivă a producătorilor cu flux integrat, care, după ce în mare măsură au pierdut piața produselor lungi, în favoarea celor cu mini mill, vor trebui să facă eforturi considerabile pentru menținerea pe piață a produselor plate.

CAPITOLUL II

ANALIZĂ PRIVIND PARTICULARITĂȚILE PROCESULUI DE SOLIDIFICARE LA TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI

II.1. Considerații tehnologice

La turnarea continuă a oțelului, formarea semifabricatului este condiționată de aceleași legi fundamentale ca și formarea lingoului care se obține în urma solidificării oțelului într-o lingotieră clasică. Totuși, la turnare continuă, factorii tehnologici care au influență considerabilă sunt mult mai numeroși decât la turnarea clasică [13].

Pentru buna funcționare a instalației de turnare continuă și obținerea semifabricatelor de calitate corespunzătoare, este necesar a se cunoaște modul de avansare a frontului de solidificare a oțelului lichid (când și unde se solidifică complet semifabricatul). Decizii cu privire la viteza de turnare, de exemplu, sau ale debitului apei de pulverizare se pot lua doar cunoscând modul de avansare a frontului de solidificare.

Deci, fenomenele solidificării oțelului la turnarea continuă sunt mult mai complexe. Metodele de calcul analitice sunt prea complicate și greu de aplicat în practica curentă. Ca urmare, în practică se folosesc formule simplificate, iar datorită faptului că în aceste formule nu sunt luați în calcul o serie de factori cu o influență mai mult sau mai puțin considerabilă, există posibilitatea apariției unor erori.

La începerea turnării continue, oțelul este turnat până în momentul în care cristalizorul este umplut (fig.2.1), după care, fără a se opri turnarea oțelului, este acționată bara falsă montată anterior la fundul cristalizorului, împreună cu

642.44 17
369 E

semifabricatul deja format iese din cristalizor și își continuă traseul în instalația de turnare continuă până la zona de răcire secundară și de acolo mai departe, prin intermediul rolele de tragere și îndreptare, spre instalația de debitare și patul de răcire [14].

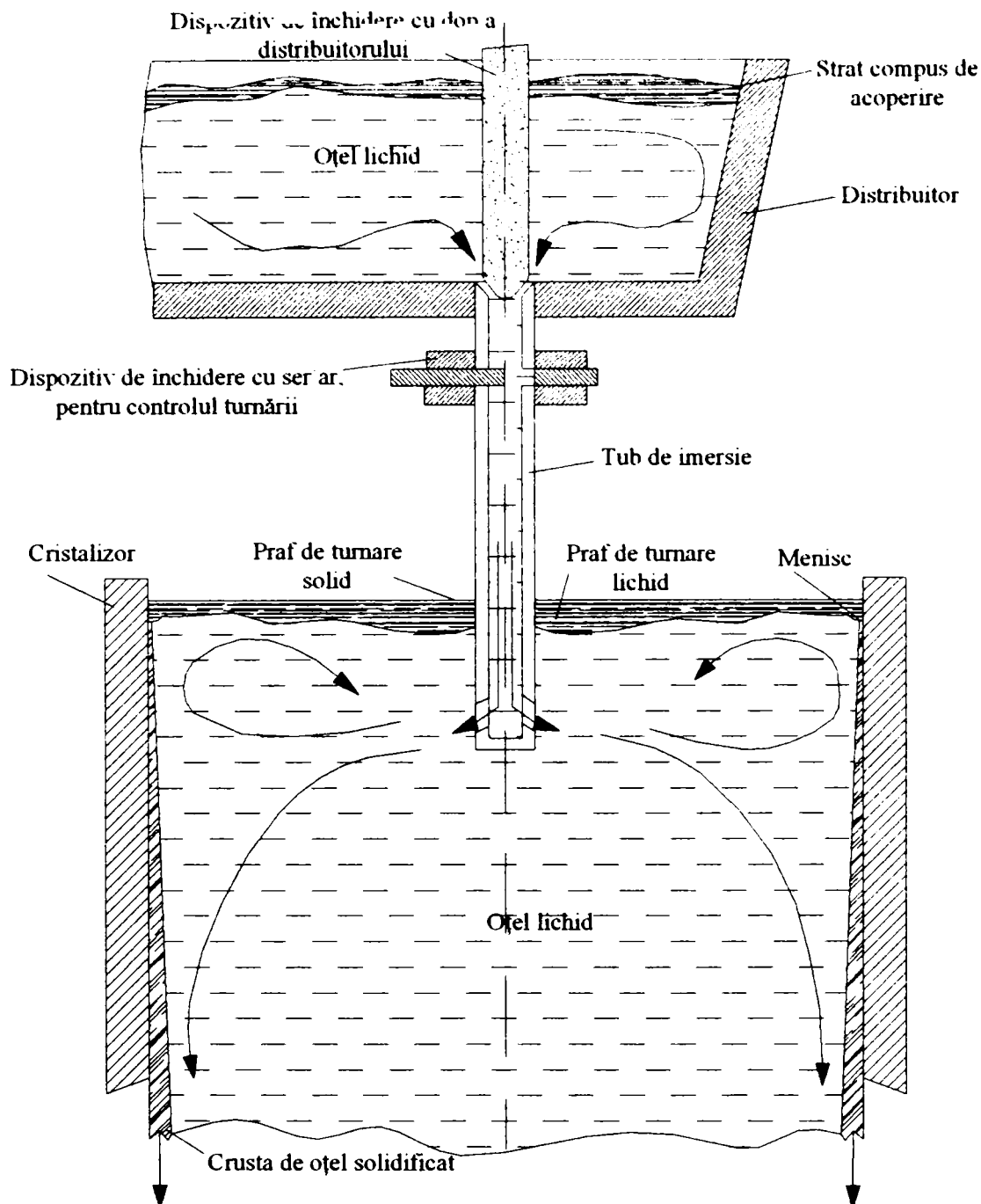


Fig.2.1. Turnarea oțelului din distribuitor în cristalizor

Înainte ca semifabricatul să părăsească cristalizorul are loc un schimb intens de căldură între suprafața exterioară a semifabricatului și pereții interiori ai cristalizorului, pereți care sunt puternic răciți cu apă. Răcirea care are loc în cristalizor ca urmare a schimbului de căldură, trebuie să asigure formarea unei cruste de oțel suficient de groasă, care trebuie să reziste în primul rând la eforturile

de tracțiune longitudinală (la deplasarea semifabricatului în raport cu pereții cristalizorului) și după ieșirea semifabricatului din cristalizor, crusta trebuie să reziste și la eforturile de tracțiune transversală (produsă de presiunea din interiorul oțelului).

Solidificarea semifabricatului turnat continuu nu diferă prea mult de cea a oțelului turnat sub formă de lingouri. Însă, datorită faptului că în primul caz, lungimea semifabricatului turnat continuu este foarte mare comparativ cu cea a unui lingou, condițiile de formare a zonei axiale sunt schimbate (zona de oțel lichid, respectiv conul de solidificare se întinde pe o lungime mult mai mare).

Principalii factori de influență la turnarea continuă îi constituie temperatura, timpul și viteza de turnare.

II.2. Solidificarea oțelului

Problema esențială a turnării continue o constituie solidificarea oțelului, adică posibilitatea realizării condițiilor de răcire (directă și indirectă) pentru a se asigura degajarea căldurii conținute în metalul topit.

Cercetarea și cunoașterea condițiilor de solidificare constituie baza teoretică a turnării continue, determinând condițiile de răcire în funcție de secțiunea și compoziția chimică a materialului, precum și unii dintre parametrii tehnologici constructivi ai instalației (viteza de turnare, numărul de fire, înălțimea și raza de curbare a instalației, etc).

Principale particularitățile ale oțelului care influențează în mare măsură turnarea lui continuă sunt: temperatura înaltă de turnare, conținutul mare de căldură al oțelului lichid, conductibilitatea termică și difuzibilitatea termică scăzută, viteza mare de cedare a căldurii prin radiație în stare lichidă, viteza mică de solidificare, etc.

Solidificarea oțelului începe în cristalizor, la primul contact dintre faza lichidă și pereții răciți cu apă și se consideră că s-a terminat doar înaintea rolor de extragere. Cercetările efectuate în stadiul inițial au stabilit că pentru turnarea continuă a oțelului este suficient să se formeze o crustă solidă relativ subțire în interiorul cristalizorului, iar solidificarea completă se poate efectua în afara cristalizorului, prin răcire directă.

Grosimea necesară a crustei solidificate la ieșirea semifabricatului din cristalizor depinde în primul rând de secțiunea produsului. Pentru țagtele mici este suficientă o crustă subțire, în timp ce secțiunile mari necesită o crustă mai groasă și mai rezistentă din cauza presiunii ferostatice mărite care acționează asupra

semifabricatului la ieșirea din cristalizor. Din acest motiv, viteza de turnare scade pe măsura măririi secțiunii transversale a semifabricatului.

Semifabricatul ieșit din cristalizor, în curs de solidificare, este deci format dintr-o crustă solidă, având grosimea crescândă de sus în jos și dintr-un miez lichid, în formă de V. Solidificarea acestui miez se realizează prin răcire directă cu apă (fig.2.2.) [17].

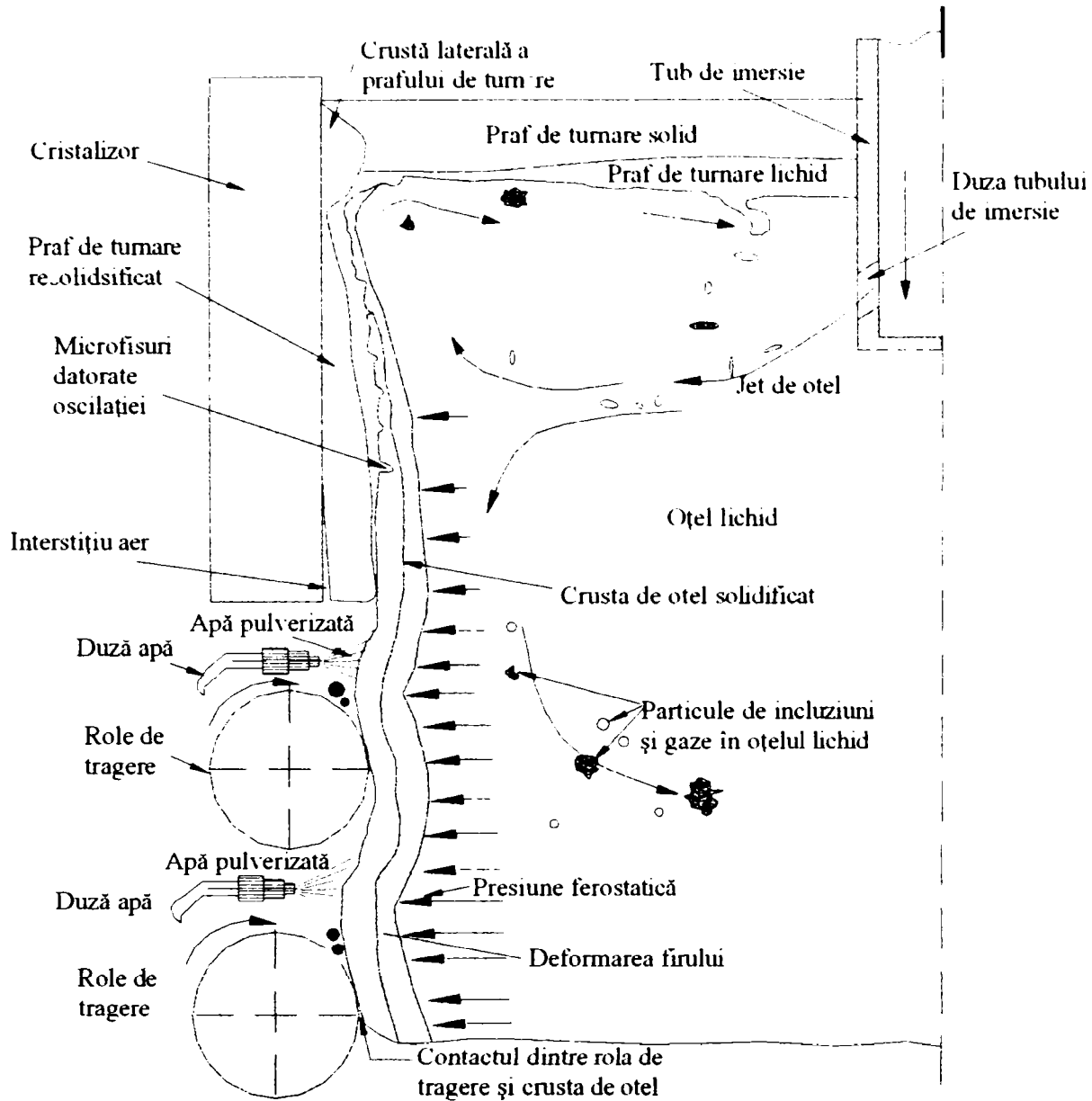


Fig. 2.2. Schema solidificării primare și secundare la turnarea continuă

Ținând seama de cele arătate, în principiu, procesul de solidificare la turnare continuă se compune din următoarele patru etape:

1. Formarea rapidă a unei cruste subțiri în partea superioară a cristalizorului; grosimea crustei crește brusc datorită contactului direct cu pereții cristalizorului răciți cu apă;

2. La o distanță mică de meniscul lichid, crusta solidificată este suficient de răcită pentru a se contracta, ceea ce face să dispară contactul dintre metal și cristalizor. Datorită interstițiului de aer dintre metal și cristalizor, condițiile schimbului de căldură se înrăutățesc, iar viteza de solidificare scade;
3. Solidificarea miezului, sub efectul răcirii secundare cu apă provoacă o mare diferență de temperatură între suprafața și centrul semifabricatului turnat continuu;
4. Egalizarea temperaturii pe secțiunea semifabricatului complet solidificată datorită răcirii în aer după zona de răcire secundară și transmiterea căldurii de la miez spre exterior și în continuare, răcirea întregii secțiuni în contact cu aerul.

Parametrul de bază al solidificării unui metal este viteza de formare a crustei solide, denumită și viteză de solidificare, care exprimă legătura dintre grosimea crustei și timp, și poate fi exprimată matematic printr-o lege parabolică de forma:

$$g = c\sqrt{\tau}, \quad (2.1)$$

în care g reprezintă grosimea crustei solidificate, [mm];

c – constantă denumită și coeficient de solidificare, [mm/min^{1/2}];

τ – timpul de la începutul turnării, [min]. [15,16]

Din această relație rezultă că viteza de solidificare nu este constantă, ci scade în cursul procesului, datorită scăderii intensității solidificării pe măsura creșterii grosimii crustei.

Formula simplificată a legii solidificării a fost completată prin introducerea altor constante determinate empiric.

De exemplu Chipman [16] propune pentru turnarea clasică formula:

$$g = -0,12 + 0,9\sqrt{\tau}. \quad (2.2)$$

După Lewis și Savage [16], legea pentru începutul solidificării este:

$$g = 0,12 (3 + 4\tau), \quad (2.3)$$

ceea ce corespunde unei creșteri aproape liniare a crustei solidificate.

K.G. Speith și A. Bungeroth [16] au calculat timpul de solidificare după formula:

$$\tau_s = D^2 - 33 \cdot 10^{-5} \quad (2.4)$$

sau după formulele simplificate a lui Klein [16]:

$$\tau_s = \left(\frac{D + 52}{74,5} \right)^2 - \text{pentru secțiuni rotunde}; \quad (2.5)$$

$$\tau_s = \left(\frac{D + 46}{66} \right)^2 - \text{pentru secțiuni pătrate,} \quad (2.6)$$

în care τ_s reprezintă timpul de solidificare, [min];

D – diametrul sau latura secțiunii pătrate a semifabricatului turnat continuu, [mm].

Pentru solidificarea oțelului la turnarea continuă sunt valabile în principiu aceleași legi ca și la turnarea în lingou, diferind însă valorile factorilor de influență (diferențele de temperatură dintre oțel și cristalizor, respectiv cristalizor și mediul ambiant sau mediul de răcire, conductibilitatea termică a cristalizorului, etc).

Diferența esențială între turnarea în lingouri și turnarea continuă constă în faptul că în timp ce la primul procedeu oțelul rămâne în lingotieră până la sfârșitul solidificării, astfel încât condițiile sunt aceleași pentru întreaga perioadă, la turnarea continuă, oțelul după ce părăsește cristalizorul din cupru trece în zona de răcire secundară unde constanta de solidificare se mărește datorită contactului direct cu apa de răcire, păstrându-se însă tendința de scădere a vitezei de solidificare pe baza legii parabolice. Datorită acestui fapt timpii totali de solidificare sunt mai mici cu circa 50% în cazul turnării continue decât la turnarea în lingouri, după cum rezultă din tab.2.1:

Tab.2.1.

Secțiunea transversală a semifabricatului, [mm]	Timpul de solidificare, [min]	
	Turnare în lingouri	Turnare continuă
100 x 100	6	3
160 x 160	16	7,5
280 x 280	49	23

Coeficientul de solidificare exprimă de fapt cantitatea de căldură evacuată din metalul turnat în unitatea de timp și depinde de caracteristicile instalației de turnare continuă (materialul și dimensiunile cristalizorului, debitul, viteza, presiunea apei de răcire în cristalizor și în zona de răcire secundară, viteza de turnare) și ale materialului turnat (calitatea oțelului, dimensiunile secțiunii transversale, supraîncălzirea oțelului). Însă, factorul determinant este eficacitatea răcirii în cristalizor și în zona de răcire secundară.

Datorită vitezei mici de solidificare a oțelului, sub nivelul de turnare din cristalizor se formează un con de câțiva metri de metal lichid (miezul lichid).

Necesitatea de a turna într-un timp relativ scurt cantități mari de oțel impune viteze ridicate de turnare, care asociate cu viteza scăzută de solidificare a oțelului

conduc la adâncimi mari ale miezului lichid. Această adâncime crește pe măsura măririi secțiunii transversale a semifabricatului. La aceeași intensitate de răcire secundară, miezul lichid se mărește în cazul secțiunilor dreptunghiulare față de cele pătrate de aceeași grosime, deoarece raportul dintre suprafața răcită și volum devine mai mic.

Lungimea miezului lichid este direct proporțională cu viteza de turnare și cu timpul de solidificare (sau invers proporțională cu viteza de solidificare) și rezultă din relația simplificată [17]:

$$l = \tau_s \cdot v_t , \quad (2.7)$$

în care l – reprezintă lungimea miezului lichid, [m];

τ_s – timpul de solidificare completă, [min];

v_t – viteza de turnare, [m/min].

Timpul de solidificare este o funcție directă a coeficientului de solidificare, care depinde de mai mulți factori. Un calcul teoretic mai precis al timpului de solidificare este foarte dificil și datorită faptului că coeficientul de solidificare are diferite valori în diversele etape ale procesului (prima perioadă după turnare, când există contact direct cu cristalizorul, după formarea interstițiului dintre metal și cristalizor, la răcirea directă prin stropire cu apă în zona de răcire secundară).

În practică se calculează timpii de solidificare pe baza diferitelor relații și se alege valoarea maximă rezultată pentru a avea siguranță la proiectarea instalației; adâncimea miezului lichid este factorul hotărâtor pentru determinarea înălțimii, respectiv lungimii desfășurate a instalației, deoarece tăierea semifabricatului se poate efectua numai după solidificarea completă a acestuia.

Din cele prezentate anterior, se poate concluziona că, la turnarea continuă, o importanță mult mai mare o au problemele legate de formarea crustei de oțel solidificat, de rezistența acesteia la solicitările la care este supusă, condițiile de formare a zonei axiale, durata totală a solidificării. De asemenea, se pun probleme legate de natura și mărimea forțelor de frecare între crusta semifabricatului turnat continuu și peretele cristalizorului, de deformările crustei de oțel și implicit, de defectele care pot apărea; mai pot ridica probleme forma și materialele din care se confecționează cristalizoarele, etc.

II.2.1. Formarea crustei de oțel și înaintarea frontului de solidificare

Pentru determinarea zonei solidificate și deci pentru a putea determina forma și dimensiunile conului de solidificare, în literatura de specialitate [18,19,20,21] sunt menționate o serie de metode experimentale, dintre care:

vărsarea părții nesolidificată a semifabricatului turnat continuu, introducerea unor indicatori radioactivi (metoda radiografică) și determinarea temperaturii în interiorul semifabricatului prin folosirea unor cuple termoelectrice.

Astfel, metoda radiografică constă în introducerea în firul turnat continuu, la sfârșitul turnării, a unui izotop radioactiv de fosfor (P^{32}) sau de sulf (S^{35}), însoțită de turnarea de plumb lichid. După solidificare, din semifabricat s-au tăiat probe longitudinale și transversale, care, după ce au fost lustruite, au fost radiografiate. Radiografiile obținute au pus în evidență forma și poziția conului de solidificare, după poziția plumbului din structura semifabricatului. (fig.2.3.) [18].

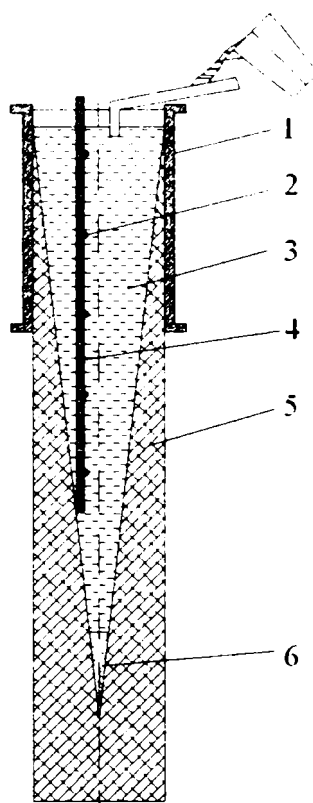


Fig.2.3. Determinarea adâncimii și formei concavității cu metal lichid prin introducerea în semifabricat a plumbului și a izotopului radioactiv de fosfor.

1 – cristalizor; 2 – izotop de fosfor; 3 – oțel lichid;
4 – tijă de oțel; 5 – crustă solidă; 6 – plumb

În ce privește a treia metodă, aceasta a fost realizată folosindu-se cuple termoelectrice Pt-PtRh, care au fost așezate pe marginea cristalizorului. Sudura cuplurilor a fost protejată, iar indicațiile cuplelor au fost înregistrate după care, în funcție de curba de variație a temperaturii în funcție de timp, s-a determinat timpul de solidificare completă a oțelului din semifabricatul turnat continuu [18].

Din analiza diagramelor care se obțin, (fig.2.4), se poate trage concluzia că frontul de solidificare nu reprezintă o suprafață uniformă, curbă sau rectilinie, constatându-se ridicături și adâncituri, datorate neuniformității răcirii semifabricatului în cristalizor, viteza de creștere diferită a cristalelor primare [18].

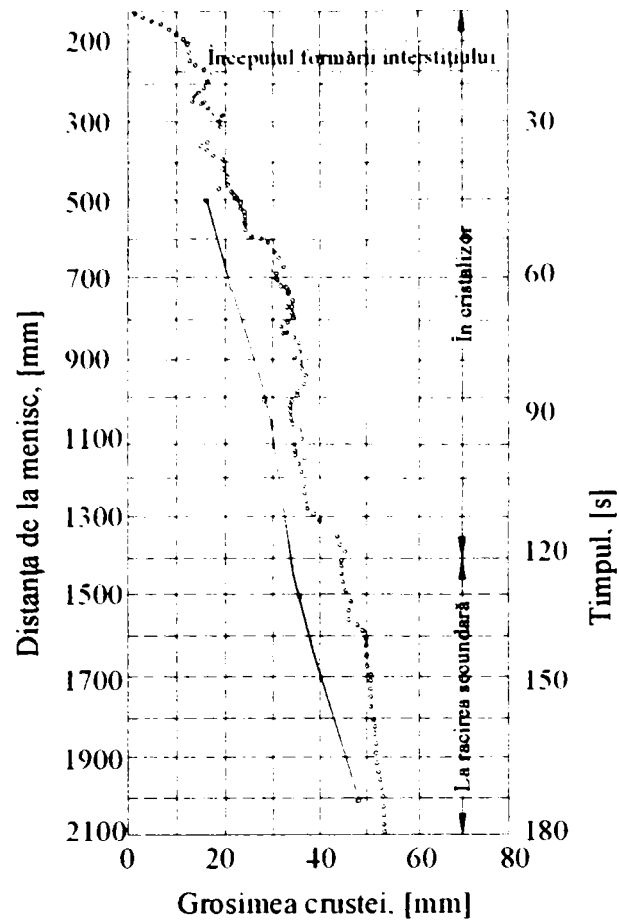


Fig.2.4. Variația grosimii crustei pe înălțimea unui semifabricat cu secțiunea de 150 x 475 mm, turnat cu o viteză de 700 mm/min.
 — pe fețele late; - pe fețele înguste.

Mai ales la oțelurile inoxidabile, variația grosimii crustei de oțel solidificat este foarte neuniformă.

Trebuie precizat că solidificarea oțelului se realizează într-un anumit interval de temperatură (solidus – lichidus). Astfel, în semifabricatul în curs de solidificare se găsesc simultan trei zone distincte: o zonă solidă, o zonă bifazică solid – lichid și o zonă de oțel lichid. Zona bifazică reprezintă un schelet de dendrite, între ramificațiile cărora se află metal cu o compoziție asemănătoare cu a oțelului lichid din interiorul conului de solidificare.

Dacă se folosește pentru măsurarea crustei de oțel solidificat (și implicit adâncimea și forma conului de solidificare) metoda cu deversarea oțelului rămas lichid, trebuie să se țină seama și de prezența zonei bifazice.

Prin folosirea metodei cu izotopi radioactivi, se poate delimita numai zona bifazică de cea lichidă (indicatorul radioactiv nu pătrunde din lichid prin ramificațiile dintre dendritele formate).

Pentru a realiza un calcul aproximativ a înaintării frontului de solidificare, trebuie să se admită o serie de ipoteze simplificatoare; cea mai importantă dintre acestea este aproximarea că temperatura la care are loc solidificarea metalului este

constantă. Astfel, la analiza unei diagrame de temperaturi pentru un semifabricat turnat continuu, se poate spune că distribuția temperaturilor în regiunea din semifabricat aflată în curs de solidificare, este liniară. De asemenea, considerând că solidificarea are loc doar în intervalul $T_1 - T_s$ (temperatura lichidus – temperatura solidus), se obțin următoarele expresii pentru lățimea zonelor solidă și bifazică, în funcție de lățimea totală a crustei:

$$g_1 = g_3 \cdot \frac{T_s - T_{\text{suprafata}}}{T_1 - T_{\text{suprafata}}}; \quad (2.8)$$

$$g_2 = g_3 \cdot \frac{T_1 - T_s}{T_1 - T_{\text{suprafata}}}; \quad (2.9)$$

$$g_1 = g_2 \cdot \frac{T_s - T_{\text{suprafata}}}{T_1 - T_s}, \quad (2.10)$$

unde g_1 reprezintă grosimea părții complet solidificate a crustei, [m];

g_2 – grosimea părții bifazice a crustei, [m];

g_3 – grosimea totală a crustei, [m];

T_1 – temperatura punctului lichidus, [°C];

T_s – temperatura punctului solidus, [°C];

$T_{\text{suprafata}}$ – temperatura suprafeței, [°C].

Se poate determina de asemenea durata solidificării complete, ca sumă a intervalului de timp măsurat de la începutul solidificării și până în momentul când zonele bifazice se unesc și a timpului solidificării complete a așa-numitului “dop” bifazic [22]. Diametrul sau lățimea dopului bifazic, care se formează în momentul în care cele două zone bifazice se unesc pe axa semifabricatului, se pot determina pe baza unor formule sau diagrame.

Astfel, în literatura de specialitate [16,17,23], se găsesc astfel de formule, pentru semifabricate turnate continuu de diverse secțiuni: circulară, pătrată, dreptunghiulară:

- pentru semifabricatele de secțiune circulară:

$$z_1 = \frac{v_t}{\pi \cdot \gamma \cdot k_1^2}; \quad (2.11)$$

$$z_2 = \frac{v_t}{\pi \cdot \gamma \cdot k_2^2}; \quad (2.12)$$

- pentru semifabricatele de secțiune pătrată:

$$z_1 = \frac{v_t}{4 \cdot \gamma \cdot k_1^2}; \quad (2.13)$$

$$z_2 = \frac{v_t}{4 \cdot \gamma \cdot k_2^2}; \quad (2.14)$$

- pentru semifabricatele de secțiune dreptunghiulară:

$$z_1 = \frac{v_t}{4 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot k_{11}^2}; \quad (2.15)$$

$$z_2 = \frac{v_t}{4 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot k_{22}^2}; \quad (2.16)$$

unde z_1 reprezintă distanța ocupată de zona lichidă, [m];

z_2 – distanța ocupată de zona bifazică, [m];

v_t - viteza de turnare, [m/min];

β – raportul dintre latura mare și latura mică a dreptunghiului;

k_1, k_{11} – coeficienții pentru determinarea momentului când zonele bifazice se unesc;

k_2, k_{22} – coeficienții pentru determinarea momentului solidificării complete.

Rezultatele acestor calcule se pot observa în fig.2.5., în care sunt delimitate atât mărimile pentru zonele lichide cât și pentru zonele bifazice în funcție de viteza de turnare, pentru cele trei tipuri de secțiuni ale semifabricatelor turnate continuu. Diferența dintre lungimile acestor zone reprezintă lungimea dopului bifazic [18,22].

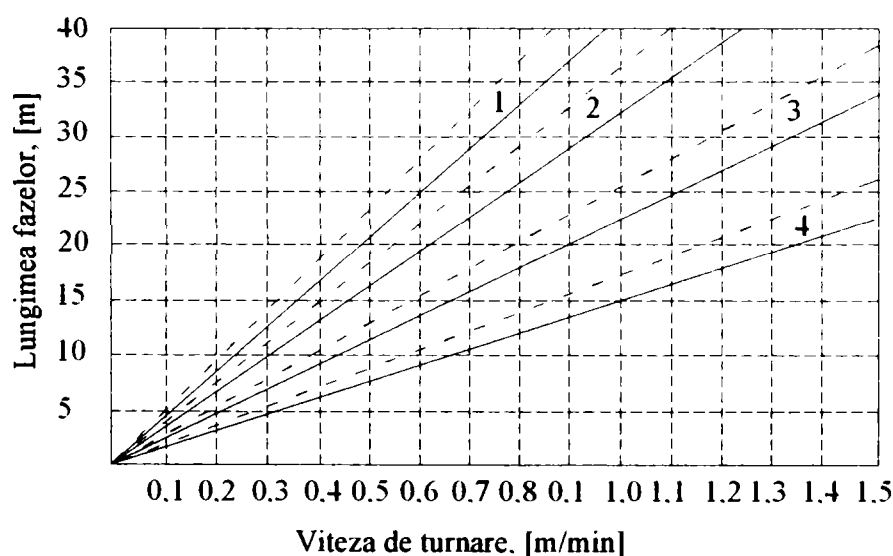


Fig.2.5. Mărimea zonelor lichidă și bifazică în funcție de viteza de turnare

- 1- semifabricat cu secțiune circulară; 2 - semifabricat cu secțiune dreptunghiulară, la $\beta=2$
 3 - semifabricat cu secțiune dreptunghiulară, la $\beta=3$;
 4 - semifabricat cu secțiune dreptunghiulară, la $\beta=4$.

II.2.2. Rezistența mecanică a crustei de oțel formată în cristalizor

Rezistența mecanică a crustei nou formate precum și mărimea forțelor de frecare între peretele interior al cristalizorului și această crustă, reprezintă factorii determinanți în alegerea condițiilor ce asigură formarea crustei.

Pentru determinarea practică a crustei, în literatura de specialitate [18,21] sunt prezentate o serie de metode, în urma cărora s-a determinat că rezistența crustei abia formate depinde în mare măsură de diferența de temperatură pe grosimea ei.

Creșterea acestei diferențe, respectiv micșorarea temperaturii suprafeței semifabricatului are influență atât asupra măririi rezistenței părții complet solidificate a crustei cât și asupra modificării raportului dintre lățimea zonei bifazice și lățimea totală a crustei care are loc în aceste condiții. Astfel, este normal să se mărească la maxim intensitatea de răcire a semifabricatului din perioada în care acesta alunecă de-a lungul pereților cristalizorului.

Alunecarea sau frânarea și ruperea crustei depind de raportul dintre valorile forțelor de frecare F_f și valorile forțelor care rup crusta F_r . Alunecarea este posibilă în cazul în care $F_f < F_r$. Dacă însă $F_f > F_r$, crusta nou formată se va rupe. Dacă

$$F_f = \mu N S_{fr} \cos \alpha$$

$$F_r = R_m S_{cr},$$

unde μ reprezintă coeficientul de frecare;

N – presiunea specifică, [daN/mm²];

α - unghiul format de crustă cu peretele cristalizorului;

R_m – rezistența la rupere prin tracțiune a crustei, [daN/mm²];

S_{fr} – suprafața de alunecare (de frecare), [mm²];

S_{cr} – secțiunea crustei la locul ruperii, [mm²].

Înlocuind expresiile celor două forțe în condiția de rupere a crustei nou formate a semifabricatului turnat continuu, se obține pentru coeficientul de frecare expresia:

$$\mu \geq \frac{R_m \cdot S_{cr}}{N \cdot S_{fr} \cdot \cos \alpha} \quad (2.17)$$

Din analiza acestei inegalități, și prin înlocuirea valorilor pentru mărimile prezente, rezultă o valoare considerabilă pentru coeficientul de frecare (valoare aproximativ egală cu 10). Această valoare poate fi explicată prin faptul că, în timpul mișcării de alunecare a crustei pe pereții cristalizorului, au acționat asupra ei forțe de aderență, observându-se lipirea crustei prin puncte de pereții

cristalizorului. În vederea micșorării acestor forțe de aderență, s-a încercat găsirea unor mijloace prin care să nu aibă loc lipirea crustei la pereții cristalizorului.

În acest scop, inițial s-au utilizat diferite unsori aplicate pe peretele interior al cristalizorului. Au fost folosite astfel, în calitate de unsori grafit, gudron îmbunătățit cu ulei de ricin și grafit, etc.

Cercetările în vederea găsirii unor prafuri sau a unor substanțe unguente au evoluat mult în ultimii ani, fiecare firmă metalurgică preocupându-se pentru găsirea unui compus care, pe lângă micșorarea frecării dintre semifabricat și cristalizor, și deci obținerea unui coeficient de frecare cât mai mic, trebuie să împiedice aderarea crustei la pereții cristalizorului, prin formarea unei pelicule fine între semifabricat și cristalizor [24,25].

Trebuie însă avut în vedere faptul că, în timpul alunecării crustei, acest compus nu trebuie să se descompună sau să ducă la formarea unor reziduuri care să mărească coeficientul de frecare.

II.2.3. Formarea zonei axiale a semifabricatului

Intensitatea și durata răcirii secundare depind de viteza de turnare și pot fi determinate pentru fiecare dimensiune concretă a semifabricatului, în funcție de viteza de extragere a acestuia, de distanța până la zona de răcire secundară și de gradientul de temperatură prescris. De exemplu, pentru o secțiune de 240x270mm, extrasă cu o viteză de cca 1m/min, zona de răcire secundară trebuie să aibă o lungime de minim 1 m [15].

Alegerea exactă a regimului răcirii secundare are o importanță deosebită, deoarece în cazul răcirii secundare incorecte, pot apare în semifabricat o serie de defecte.

Practica a arătat că dacă se creează o răcire secundară foarte intensă, fețele semifabricatului devin concave, iar dacă răcirea secundară este insuficientă, acestea se bombează. Nu se poate trece peste faptul că abaterea formei semifabricatului de la cea prescrisă, duce la provocarea de rupturi pe suprafața deformată a crustei. Dacă curbura fețelor este foarte mică, în funcție de compoziția chimică a oțelului solidificat și de distanța rupturii de la suprafața semifabricatului, aceste rupturi se pot prezenta sub forma unor porțiuni filiforme subțiri, cu sensibilitate mărită la atacul chimic; dacă curbarea fețelor este foarte mare, rupturile pot avea aspectul unor fisuri de lățime și lungime variabilă. Poziția acestor rupturi depinde de sensul în care se curbează crusta și de momentul în care se produce curbarea.

Dacă curbarea crustei se produce sub acțiunea unei răcirii de scurtă durată, însă prea intensă, imediat după ieșirea din cristalizor, atunci sensul ei va fi spre interior, iar rupturile vor fi situate nu prea departe de suprafața exterioară a semifabricatului. Lungimea fiecărei rupturi va depinde de durata răcirii excesiv de intense. La o asemenea deformare, rupturile vor fi dispuse în evantai și fiecare dintre ele are direcție perpendiculară pe fața deformată. Dacă însă asemenea fisuri pot lua naștere în urma unei bombări a semifabricatului din cauza răcirii insuficiente a suprafeței acestuia, atunci fisurile sunt situate în apropierea colțurilor.

În concluzie, răcirea secundară poate constitui o cauză de defecte ale semifabricatului turnat continuu; de aceea, se impune o alegere corectă a regimului de răcire secundară. La alegerea regimurilor de răcire secundară, trebuie astfel procedat încât gradientul de temperatură în crustă să nu provoace curbarea acesteia. Această condiție este îndeplinită dacă gradientul de temperatură din crustă nu va depăși valoarea:

$$\Delta T = k \frac{T_o - T_c}{g} \cong 100^\circ \quad (2.18)$$

în care: k reprezintă coeficient; k=1,2

g – grosimea crustei solidificate, [mm];

T_o – temperatura oțelului lichid, [°C];

T_c – temperatura crustei solidificate, [°C].

Mărimea zonei de solidificare a semifabricatelor turnate continue influențează condițiile de formare ale zonei axiale a acestora. Spre deosebire de lingourile clasice de oțel, la semifabricatele turnate continuu conicitatea naturală, respectiv unghiul sub care se întâlnesc fronturile de solidificare ce înaintază din părți opuse ale semifabricatului, este foarte mică. În aceste condiții, este îngreunată alimentarea porțiunilor axiale ale semifabricatului și crește considerabil viteza de deplasare a metalului lichid în raport cu limitele zonelor bifazice pe cale de a ajunge în contact. Mărirea vitezei de turnare a semifabricatelor turnate continuu, indiferent de forma secțiunii lor, duce de asemenea la creșterea vitezei de deplasare a metalului lichid de-a lungul axei semifabricatului și la micșorarea conicității naturale.

Toate acestea conduc la o neomogenitate axială a semifabricatului. Însă, deși gradul de neomogenitate axială care rezultă în aceste condiții nu variază în afara limitelor admise și nu constituie o cauză de rebutare a oțelului turnat continuu, acest fapt trebuie luat în considerare la stabilirea regimurilor de turnare continuă.

II.3. Concluzii

Din studiu efectuat se desprind următoarele concluzii:

1. Solidificarea oțelului la turnarea continuă este mult mai complexă decât în cazul turnării clasice (sub formă de lingouri), având în vedere complexitatea procesului, respectiv modificarea condițiilor de schimb de căldură de la răcirea primară la răcirea secundară și în final răcirea în aer.

2. Structura semifabricatelor turnate continuu este similară cu cea a lingourilor, distingându-se trei zone de cristalizare:

- o zonă de suprafață omogenă și cu cristale fine, formată imediat după turnare (la interfața oțel – cristalizor);
- o a doua zonă de solidificare cu cristale dendritice perpendiculare pe axa longitudinală a semifabricatului;
- o zonă cu cristale echiaxiale, mai mari ca dimensiune și mai impură din punct de vedere chimic;

3. Parametrul pe baza căruia trebuie corelați toți factorii de influență îl reprezintă crusta de oțel solidificat, respectiv viteza de creștere a grosimii acesteia. O crustă prea subțire poate duce la ruperea firului în timp ce o viteză de creștere a crustei prea mare duce la apariția tensiunilor termice în interiorul semifabricatului, determinând apariția fisurilor;

4. Determinarea practică a grosimii crustei solidificate este mai dificilă, presupunând lucrul cu surse radioactive și în condiții greu de obținut. Există însă o serie de relații empirice, formulate pe baza unor ipoteze simplificatoare, relații pe baza cărora se poate calcula grosimea cu suficientă precizie a stratului solidificat la un anumit moment de timp de la începutul turnării;

5. Rezistența mecanică a crustei solidificate trebuie să fie suficient de mare astfel încât să nu permită perforarea sau ruperea firului sub acțiunea diferitelor forțe care acționează asupra ei: presiunea ferostatică care acționează din interiorul firului, forța de frecare din cristalizor, presiunea exercitată de rolele de tragere, etc. În scopul reducerii acțiunii acestor forțe asupra crustei, în practica industrială se adoptă o serie de măsuri de ordin tehnologic, cum ar fi:

- corelarea parametrilor de răcire primară și secundară cu viteza, temperatura și timpul de turnare;
- utilizarea diferitelor prafuri unguente în cristalizor cu scopul atât de a reduce frecarea dintre crustă și cristalizor cât și de a nu modifica condițiile de schimb de căldură;
- montarea și alinierea corespunzătoare a rolelor de tragere.

CAPITOLUL III

MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE SOLIDIFICARE A OȚELULUI

III.1. Solidificarea oțelului în zona de răcire primară

La studiul schimbului de căldură și a solidificării oțelului în cazul turnării continue, metodele aproximative pentru calcularea grosimii stratului solidificat, care pornesc de la repartizarea liniară a temperaturilor în crusta solidă duc la obținerea de erori mari, deoarece, ca urmare a schimbului foarte intens de căldură între semifabricat și cristalizor, în special între semifabricat și răcirea secundară, repartizarea temperaturilor în crustă se deosebește de cea liniară [28].

Astfel, probleme cum sunt variația temperaturii suprafeței semifabricatului și a câmpului de temperatură în crusta solidă în funcție de viteza de turnare, profilul semifabricatului și construcția cristalizorului, nu pot fi rezolvate în cele mai multe cazuri cu ajutorul ecuațiilor aproximative [31].

Rezolvarea parțială a ecuației diferențiale fundamentale a conductibilității termice, care ține seama de variația neliniară a temperaturii în crustă, nu poate da rezultate satisfăcătoare din cauza caracterului nedeterminat al coeficientului vitezei de solidificare, care depinde de intensitatea schimbului de căldură și de grosimea crustei și din cauza ipotezei invariabilității temperaturii la suprafața semifabricatului.

Viteza relativ mare de solidificare a oțelului, în condițiile turnării continue, și variațiile importante ale intensității schimbului de căldură într-un interval de timp relativ scurt nu permit folosirea valorilor medii ale temperaturii suprafeței și ale coeficientului vitezei de solidificare, după cum se face la calculul solidificării lingoului în lingotieră.

Cercetarea proceselor de transmisie de căldură și a solidificării oțelului la turnarea continuă este ușurată într-o anumită măsură prin faptul că, în secțiunea semifabricatului, perpendicular pe direcția de mișcare a acestuia, schimbul de căldură poate fi considerat ca fiind staționar [29].

Mărimea schimbului de căldură în fiecare secțiune a semifabricatului aflat în cristalizor poate fi ușor determinată prin măsurarea temperaturii pereților de cupru ai cristalizorului. Astfel, pentru prelucrarea datelor experimentale, este important fluxul termic care străbate suprafața semifabricatului.

Pentru a se putea determina prin relații matematice modul în care are loc înaintarea frontului de solidificare, respectiv creșterea crustei de oțel solidificat în timp, se pornește de la schimbul de căldură care are loc în cristalizor, între oțelul lichid și peretele răcit cu apă a cristalizorului. Acest schimb de căldură este definit prin ecuația diferențială a conductibilității termice, exprimată în relația (3.1).

$$\frac{dT}{d\tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

Deoarece rezolvarea ecuației diferențiale a conductibilității termice, în cazul în care temperatura suprafeței semifabricatului variază în timp, este dificilă și aproape imposibilă (din cauza multitudinii de factori de care trebuie să se țină seama), este necesară folosirea unor soluții aproximative pentru rezolvarea acestor probleme (determinarea câmpului de temperaturi, a temperaturii suprafeței, etc).

Soluția particulară a ecuației diferențiale fundamentale a conductibilității termice cu aplicabilitate în calculul solidificării oțelului turnat continuu este:

$$T = T_{\text{sup rafaja}} + (T_{\text{solidif.}} - T_{\text{sup rafaja}}) \cdot \frac{G_{(x)}\left(\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}\right)}{G_{(x)}\left(\frac{k}{\sqrt{4a}}\right)} \quad (3.2)$$

în care T reprezintă temperatura unui punct oarecare al crustei solide, [°C];

$T_{\text{solidif.}}$ – temperatura de solidificare, [°C];

$T_{\text{suprafață}}$ – temperatura suprafeței semifabricatului, [°C];

$G_{(x)}$ – integrala probabilității, care are forma: $G_{(x)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-T^2} dT$

Această soluție reprezintă modul de calcul a temperaturii crustei solide după un anumit timp τ de la începerea turnării.

Pentru rezolvarea acestei probleme, se adoptă următoarea ipoteză simplificatoare: la suprafața semifabricatului se stabilește instantaneu temperatura $T_{\text{suprafață}}$, care se menține apoi constantă.

În ecuația (2.2), dacă înlocuim $T = T_{\text{solidif}}$.

$$x = g,$$

în care g reprezintă grosimea crustei solidificate, [m], atunci se obține:

$$\frac{G_{(x)}\left(\frac{g}{\sqrt{4a\tau}}\right)}{G_{(x)}\left(\frac{T}{\sqrt{4a}}\right)} = 1$$

de unde rezultă:
$$\frac{g}{\sqrt{4a\tau}} = \frac{k}{\sqrt{4a}}; \Rightarrow g = k \cdot \sqrt{\tau} \quad (3.3)$$

în care k reprezintă coeficientul vitezei de solidificare, [$\text{m/h}^{0.5}$];

τ - timpul de la începerea turnării, [h].

Relația anterioară reprezintă o relație simplificată de calcul a grosimii crustei de oțel solidificat după un anumit timp de la începerea turnării. Trebuie însă determinat coeficientul vitezei de solidificare, care se calculează dintr-o ecuație în funcție de temperatura suprafeței semifabricatului. Într-o formă adimensională, această ecuație are forma:

$$\frac{Q_{\text{solidif}}}{c_p (T_{\text{solidif}} - T_{\text{sup rafata}})} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{k^2 e^{4a}}{\frac{k}{\sqrt{4a}} \cdot G_{(x)}\left(\frac{k}{\sqrt{4a}}\right)} \quad (3.4)$$

în care Q_{solidif} reprezintă căldura latentă de solidificare, [kJ/kg];

c_p - căldura specifică a metalului, [kJ/kg °C];

a - coeficientul de difuzibilitate termică, [m^2/s].

Ipoteza cu privire la invariabilitatea temperaturii la suprafața semifabricatului în timpul solidificării limitează domeniul de aplicabilitate a relațiilor (3.2) și (3.3). În cazul variației temperaturii la suprafața semifabricatului, ecuația fundamentală a conductibilității termice nu are o soluție analitică. În acest caz, se folosesc diferite metode aproximative pentru rezolvarea problemei solidificării, fiind cunoscute atât metode care pornesc de la repartizarea liniară a temperaturii în crusta solidificată cât și metode care țin seama de repartizarea neliniară a temperaturii. Metodele aproximative pentru calculul grosimii crustei solidificate, în ipoteza repartizării liniare a temperaturii, dau rezultate satisfăcătoare numai într-un anumit interval de variație a temperaturii suprafeței. În cazul unei intensități mai mari a schimbului de căldură, repartizarea efectivă a temperaturii în crustă diferă mult de cea rectilinie iar metodele aproximative dau erori mari [28].

Perfecționarea metodelor aproximative se bazează pe introducerea unor coeficienți care exprimă caracterul neliniar al repartizării temperaturii în crustă.

Problemele solidificării oțelului în cazul unui schimb de căldură foarte intens pot fi rezolvate cu o anumită precizie, dacă se indică curba de repartizare a temperaturilor în crustă, pentru condițiile concrete de răcire a semifabricatului [30].

Presupunând că ecuația câmpului de temperatură este de forma:

$$T = p (x + m)^n, \quad (3.5)$$

în care p , m , n sunt funcții de timp.

Pentru $x = g$ și $T = T_{\text{solidif.}}$, ecuația (3.5) poate fi scrisă sub forma:

$$T_{\text{solidif.}} = p (g + m)^n \quad (3.6)$$

Efectuând raportul $T / T_{\text{solidif.}}$ din relațiile (3.5) și (3.6), rezultă:

$$\frac{T}{T_{\text{solidif.}}} = \frac{(x + m)^n}{(g + m)^n} \Rightarrow T = \frac{(x + m)^n}{(g + m)^n} \cdot T_{\text{solidif.}} \quad (3.7)$$

Coeficienții m și n se determină din condițiile limită, acestea putând fi date prin temperatura suprafeței semifabricatului sau prin fluxul termic care străbate suprafața semifabricatului.

Relația (3.5) nu este o soluție matematică a ecuației diferențiale fundamentale a conductibilității termice însă, rezolvarea problemelor la limită duc la o oarecare concordanță a soluțiilor aproximative cu cele analitice. Comparând soluția aproximativă cu cea exactă pentru condiția $T_{\text{suprafață}} = \text{constant}$, formulele deduse din soluția exactă în formă adimensională sunt:

$$\frac{g}{X} = \frac{k}{\sqrt{a}} \sqrt{\frac{a\tau}{X^2}} \quad (3.8)$$

în care X reprezintă dimensiunea caracteristică semifabricatului.

Introducând notațiile:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{g}{X} = \delta; \\ \frac{k}{\sqrt{a}} = B; \\ \frac{a\tau}{X^2} = Fo \end{array} \right| \Rightarrow \delta = B \cdot \sqrt{Fo} \quad (3.9)$$

în care B reprezintă coeficient adimensional al vitezei de solidificare;

Fo - criteriul Fourier (adimensional) .

Înlocuind aceleași notații și în relația (3.4), și notând termenul

$$\frac{Q_{solidif.}}{c_p (T_{solidif.} - T_{sup\ rafața})} = Q',$$

se obține pentru Q' expresia:

$$Q' = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{e^{-\left(\frac{1}{2} B\right)^2}}{\frac{1}{2} \cdot B \cdot G_{(x)} \cdot \left(\frac{1}{2} B\right)} \quad (3.10)$$

Relația (3.10) exprimă variația coeficientului B în funcție de Q' .

Pentru a deduce ecuația frontului de solidificare cu condiția din relația (3.7) privind repartizarea temperaturii în crustă, la $T_{suprafața} = \text{constant}$, coeficienții m și n nu depind de timp.

Ecuația bilanțului termic la limita frontului de solidificare, adică la interfața oțel lichid – crusta solidificată este dată în relația (3.11):

$$\rho \cdot Q_{solidif} \cdot dg = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=g} \cdot d\tau \quad (3.11)$$

în care ρ reprezintă greutatea volumetrică a oțelului în perioada de solidificare, $[\text{kg}/\text{m}^3]$;

λ - conductibilitatea termică a crustei solidificate, $[\text{kJ}/\text{mh}^\circ\text{C}]$.

Derivând relația (3.7) pentru condiția $x = g$, rezultă expresia:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=g} = \frac{n(g+m)^{n-1}}{(g+m)^n} \cdot T_{solidif.},$$

și înlocuind valoarea obținută în relația (3.11), se obține:

$$\rho \cdot Q_{solidif.} \cdot dg = \lambda \cdot \frac{n(g+m)^{n-1}}{(g+m)^n} \cdot T_{solidif.} \cdot d\tau \quad (3.12)$$

Înmulțind relația anterioară cu $(g+m)$, rezultă

$$\rho Q_{solidif} (g+m) dg = \lambda n T_{solidif} d\tau \quad (3.13)$$

Notând temperatura specifică a suprafeței semifabricatului cu $\mathcal{G} = \frac{T_{sup\ rafața}}{T_{solidif}}$,

atunci pentru condițiile $x = 0$ și $T = T_{suprafața}$, se obține din relația (3.7):

$$\mathcal{G} = \frac{m^n}{(g+m)^n} \quad \text{sau} \quad \mathcal{G}^{\frac{1}{n}} = \frac{m}{(g+m)}$$

$$\text{de unde: } m = \frac{g \cdot g^n}{1 - g^n} \quad (3.14)$$

Înlocuind valoarea obținută pentru coeficientul m în relația (3.13), aceasta devine:

$$\rho \cdot Q_{solidif} \left(g + \frac{g \cdot g^n}{1 - g^n} \right) dg = \lambda \cdot n \cdot T_{solidif} d\tau \Rightarrow \frac{\rho \cdot Q_{solidif}}{1 - g^n} \cdot g \cdot dg = \lambda \cdot n \cdot T_{solidif} d\tau \quad (3.15)$$

Prin integrarea expresiei pentru g de la zero până la g și pentru τ de la zero până la τ , rezultă:

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot Q_{solidif}}{1 - g^n} \cdot \int_0^g g \cdot dg &= \lambda \cdot n \cdot T_{solidif} \cdot \int_0^\tau d\tau \\ \frac{\rho \cdot Q_{solidif}}{1 - g^n} \cdot \frac{g^2}{2} &= \lambda \cdot n \cdot T_{solidif} \cdot \tau \end{aligned} \quad (3.16)$$

Rezolvând ecuația (3.16) în raport cu g , se obține expresia variației grosimii stratului de oțel solidificat în funcție de timp și de diferite constante termofizice și de material (conductibilitate termică, greutate volumetrică, căldura latentă de solidificare, temperatura specifică a suprafeței semifabricatului) și de coeficientul n [28].

$$g = \sqrt{\frac{2n \cdot \lambda \cdot T_{solidif} \cdot \left(1 - g^n\right)}{\rho \cdot Q_{solidif}}} \sqrt{\tau} \quad (3.17)$$

Din cele prezentate mai sus se observă că grosimea crustei este direct proporțională cu rădăcina pătrată, indiferent de relația utilizată.

Pentru determinarea coeficientului n , astfel încât soluția aproximativă pentru calculul crustei de oțel solidificat din relația (3.17) și soluția exactă din relația (3.3) să coincidă, se aduce relația anterioară la forma adimensională, prin înmulțirea celor doi termeni ai relației cu $1 / X^2$. Un alt artificiu matematic pentru efectuarea simplificărilor este înmulțirea cu c_p atât la numitorul cât și la numărătorul termenului drept:

$$\frac{g}{X} = \sqrt{\frac{2n \cdot T_{solidif} \cdot \left(1 - g^n\right) \cdot c_p}{Q_{solidif}}} \cdot \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \sqrt{\frac{\tau}{X^2}} \quad (3.18)$$

Notând și în acest caz cu:

$$\frac{g}{X} = \delta; \quad \left| \begin{array}{l} \sqrt{\frac{2n \cdot T_{solidif} \cdot \left(1 - g^n\right) \cdot c_p}{Q_{solidif}}} = B; \\ \sqrt{\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}} = \sqrt{a} \Rightarrow \sqrt{\frac{a\tau}{X}} = Fo \end{array} \right. \Rightarrow \delta = B \cdot \sqrt{Fo} \quad (3.19)$$

Deoarece mărimile $T_{solidif}$. (temperatura de solidificare), c_p (căldura specifică a metalului), $Q_{solidif}$ (căldura latentă de solidificare) sunt constante, valoarea lui Q' din relația (3.10) depinde numai de temperatura suprafeței semifabricatului $T_{suprafață}$ și prin urmare, coeficienții adimensionali ai vitezei de solidificare B și B' din relațiile (3.9) și respectiv (3.19) sunt determinați în funcție de temperatura suprafeței semifabricatului.

Egalând pe B cu B' , poate fi determinată pentru fiecare valoare $T_{suprafață}$ mărimea coeficientului n după ecuația:

$$\sqrt{\frac{2n \cdot T_{solidif} \left(1 - g^n\right) \cdot c_p}{Q_{solidif}}} = B' \quad (3.20)$$

Variația lui B' în funcție de valoarea coeficientului n , la diferite valori ale temperaturii suprafeței semifabricatului $T_{suprafață}$ sau Q' , este dată în fig.3.1.

În fig.3.2 este prezentată variația mărimii coeficientului n în funcție de Q' , pentru care soluția aproximativă corespunde cu cea exactă.

Pentru a evita efectuarea calculelor în vederea calculării coeficientului n , se poate considera că n are o valoare constantă, care este aleasă astfel încât abaterea lui B' de la B să fie minimă pe întregul interval al temperaturilor posibile ale suprafeței.

În diagrama din fig.3.3 am prezentat la scară logaritmică compararea coeficientului exact B cu B' (curba 1), pentru $n = 0,4$ (curba 2) și pentru $n = 0,5$ (curba 3). Pentru $n = 0,4$, abaterea maximă pentru B' de la valoarea exactă a lui B este de aproximativ 2% (la 1000°C). Pentru $n = 0,5$, numai în intervalul de la $T_{suprafață} = 1000^\circ\text{C}$ până la $T_{suprafață} = 500^\circ\text{C}$, eroarea este de 5 – 7% [28].

Având în vedere că folosirea formulei pentru n este relativ simplă, ea poate fi folosită totuși în întreg intervalul de temperaturi.

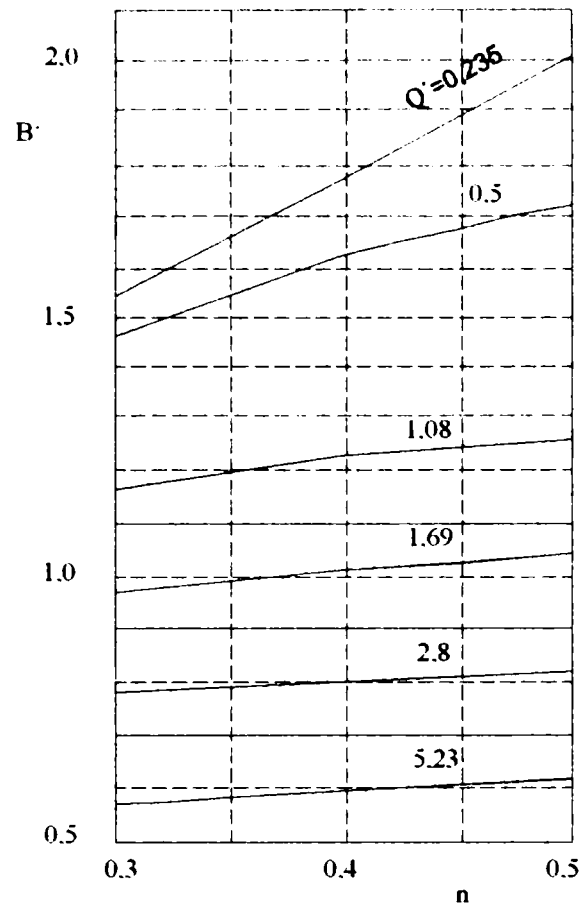


Fig.3.1. Variația lui B' în funcție de valoarea coeficientului n la diferite valori ale lui Q'

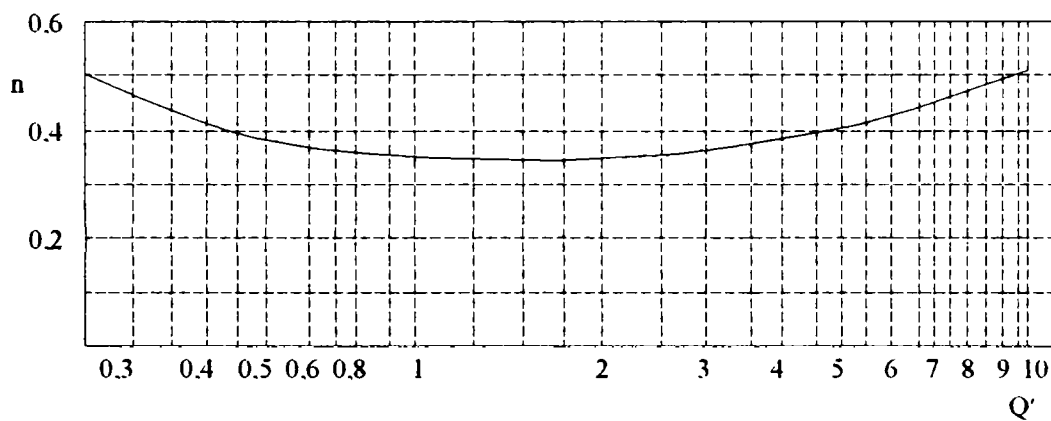


Fig.3.2. Variația lui Q' în funcție de valoarea coeficientului n

Astfel, pentru determinarea grosimii crustei la o valoare a coeficientului $n = 0,5$, se poate folosi relația:

$$\delta = \sqrt{\frac{P}{Q'}} \cdot \sqrt{Fo} \quad (3.21)$$

în care $P = \frac{T_{solidif} + T_{suprafata}}{T_{solidif}}$, iar ecuația câmpului de temperatură este dată de

$$\text{relația: } T = \sqrt{\frac{x+m}{g+m}} \cdot T_{solidif} \quad (3.22)$$

în care coeficientul m se determină cu relația: $m = \frac{g \cdot g^2}{1 - g^2}$. O soluție mai exactă pentru determinarea grosimii stratului de oțel solidificat se poate obține folosind relația:

$$\delta = \sqrt{\frac{0,8 \cdot T_{solidif} \cdot c_p \cdot (1 - g^{2,5})}{Q_{solidif}}} \cdot \sqrt{Fo} \quad (3.23)$$

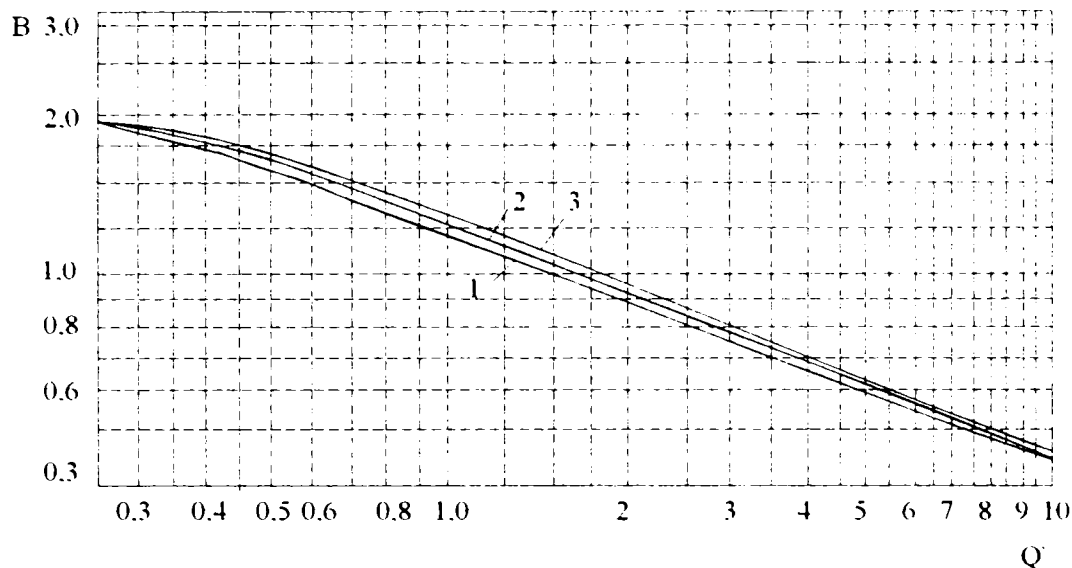


Fig.3.3. Variația lui B în funcție de Q

Relația (3.23) reprezintă un alt mod de calcul al grosimii crustei de oțel solidificată la turnarea continuă, în care intervin diferite constante de material (temperatura de solidificare, căldură specifică, căldură latentă de solidificare). Trebuie menționat că și în acest caz grosimea crustei solidificate depinde de timp (din exprimarea criteriului adimensional Fourier).

În diagrama 3.4, sunt reprezentate comparativ câmpurile de temperatură obținute cu ecuația aproximativă (3.22) și respectiv cu ecuația exactă (3.23). Analizând cele două variații se constată că între valorile temperaturilor calculate anterior nu există o diferență mai mare de 4% și acesta doar la mijlocul crustei (la cele două extremități valorile aproape coincid).

Pe baza soluției aproximative, poate fi determinată legea creșterii crustei solide și în cazul în care temperatura suprafeței semifabricatului variază în timp. În acest caz, coeficientul m va fi o funcție de timp.

La fel ca în cazul precedent, coeficientul n se consideră constant.

Dacă $T_{suprafață} = f(\tau)$, atunci:

$$m = \frac{g \left[\frac{f(\tau)}{T_{solidif}} \right]^{\frac{1}{n}}}{1 - \left[\frac{f(\tau)}{T_{solidif}} \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (3.24)$$

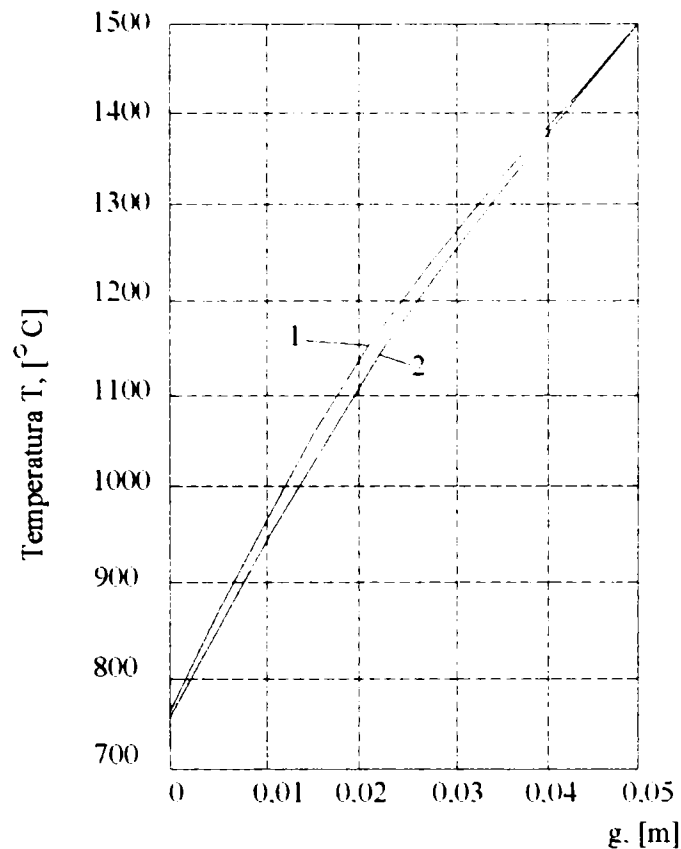


Fig.3.4. Câmpul de temperatură în crusta semifabricatului
1 – conform ecuației exacte; 2 – conform ecuației aproximative.

Ecuția bilanțului termic va avea forma:

$$\frac{\rho \cdot Q_{solidif}}{1 - \left[\frac{f(\tau)}{T_{solidif}} \right]^{\frac{1}{n}}} \cdot g \cdot dg = n \cdot \lambda \cdot T_{solidif} \cdot d\tau \quad (3.25)$$

Separând variabilele și integrând relația anterioară, rezultă:

$$\rho \cdot Q_{solidif} \int_0^g g \cdot dg = n \cdot \lambda \cdot T_{solidif} \left\{ \int_0^{\tau} d\tau - \int_0^{\tau} \left[\frac{f(\tau)}{T_{solidif}} \right]^{\frac{1}{n}} d\tau \right\}$$

$$g^2 = \frac{2 \cdot n \cdot \lambda \cdot T_{solidif}}{\rho \cdot Q_{solidif}} \left\{ \tau - \int_0^{\tau} \left[\frac{f(\tau)}{T_{solidif}} \right]^{\frac{1}{n}} d\tau \right\} \quad (3.26)$$

Dacă se cunoaște forma funcției $f(\tau)$, atunci integrala poate fi rezolvată.

III.2. Deducerea ecuației de repartizare a temperaturii în crusta semifabricatului

O altă problemă importantă la solidificarea semifabricatelor turnate continuu constă în cunoașterea modului de repartizare a temperaturii în crusta semifabricatului; această deducere se face în ipoteza în care temperatura suprafeței semifabricatului este funcție de timp $f(\tau)$ și când se cunoaște mărimea fluxului termic care străbate suprafața semifabricatului, care este de asemenea o funcție de timp [28,31].

Presupunând că ecuația câmpului termic are forma :

$$T = \frac{(x + m)^n}{(g + m)^n} \cdot T_{solidif}$$

o soluție corectă se obține în cazul când m și n sunt variabile care depind de condițiile de răcire. Pentru cazul general, când condițiile de răcire variază în timp, coeficienții m și n pot fi determinați din următoarele condiții limită:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{q}{\lambda} \quad (3.27)$$

în care q – fluxul termic, $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}]$.

Substituind valoarea derivatei din ecuația (3.7), se obține:

$$\frac{n(m)^{n-1} \cdot T_{solidif}}{(g + m)^n} = \frac{q}{\lambda}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=g} = \frac{\rho \cdot Q_{solidif}}{\lambda} \cdot \frac{dg}{d\tau} \quad (3.28)$$

$$\frac{n(g + m)^{n-1} \cdot T_{solidif}}{(g + m)^n} = \frac{\rho \cdot Q_{solidif}}{\lambda} \cdot \frac{dg}{d\tau}$$

Soluția mai precisă poate fi obținută dacă se cunoaște variația temperaturii suprafeței semifabricatului în funcție de timp $T_{suprafață} = f(\tau)$.

$$\frac{dT_{sup\ rafața}}{d\tau} = a \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{x=0}$$

$$\frac{dT_{sup\ rafața}}{d\tau} = a \frac{n(n-1)m^{n-2}}{(g + m)^n} \cdot T_{solidif} \quad (3.29)$$

După substituirea valorii derivatei din ecuația (3.27) se obține:

$$\frac{m^{n-1}}{(g + m)^n} = \frac{q}{\lambda \cdot n \cdot T_{solidif}} \quad (3.30)$$

și dacă înmulțim cu m ambii termeni ai ecuației (3.29), atunci

$$\frac{dT_{\text{suprafata}}}{d\tau} m = a \frac{n(n-1)m^{n-1}}{(g+m)^n} \cdot T_{\text{solidif}},$$

de unde rezultă:

$$\frac{m^{n-1}}{(g+m)^n} = \frac{dT_{\text{suprafata}}}{a \cdot n(n-1) \cdot T_{\text{solidif}} d\tau} \quad (3.31)$$

Egalând expresiile (3.30) cu (3.31), și efectuând calculele, se obține:

$$\frac{q}{\lambda} = \frac{dT_{\text{suprafata}}}{(n-1)a d\tau},$$

iar valoarea coeficientului m se poate calcula cu relația:

$$m = \frac{qa(n-1)}{dT_{\text{suprafata}} \lambda} d\tau \quad (3.32)$$

Din analiza expresiei pentru coeficientul m , se poate observa că acesta depinde de timp, de constantele de material cât și de coeficientul n (care la rândul său depinde de timp).

Substituind valoarea coeficientului m în ecuația (3.28), se obține:

$$\frac{n \cdot T_{\text{solidif}} \left[\frac{qa(n-1)}{dT_{\text{suprafata}} \lambda} d\tau \right]^{n-1}}{\left[g + \frac{qa(n-1)}{dT_{\text{suprafata}} \lambda} d\tau \right]^n} - \frac{q}{\lambda} = 0 \quad (3.33)$$

Rezolvând această ecuație pe cale grafică în raport cu n se poate obține valoarea pentru fiecare moment de timp.

Prin urmare, o repartizare a temperaturii apropiată de cea reală, poate fi obținută numai în cazul când s-au determinat pe cale experimentală expresiile $q(\tau)$, $T_{\text{suprafata}}(\tau)$ și $g(\tau)$. Soluții mai puțin exacte se pot obține cunoscând pe $q(\tau)$ și $g(\tau)$, și rezolvând împreună ecuațiile (3.27) și (3.28).

După cum s-a arătat anterior, o soluție aproximativă cu precizie suficientă pentru scopurile practice poate fi obținută și pentru valori constante ale exponentului n . În acest caz, este suficient a se cunoaște numai $q(\tau)$ și $g(\tau)$.

Pentru $n = 0,5$, ecuația câmpului de temperatură poate fi scrisă sub forma generală:

$$T = \sqrt{\frac{x+m}{g+m}} \cdot T_{solidif}$$

iar coeficientul m poate fi determinat din condiția la limită:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{q}{\lambda}$$

Substituind valoarea derivatei, se obține:

$$\frac{T_{solidif}}{2\sqrt{m(g+m)}} = \frac{q}{\lambda}$$

Rezolvând ecuația în raport cu m , vom avea:

$$m = \frac{\sqrt{q^2 g^2 + T_{solidif}^2 \lambda^2} - q \cdot g}{2q} \quad (3.34)$$

Ecuația câmpului de temperatură pentru cazul considerat se transcrie sub forma:

$$T = \frac{\sqrt{x + \frac{\sqrt{q^2 g^2 + T_{solidif}^2 \lambda^2} - q \cdot g}{2q}}}{\sqrt{\frac{\sqrt{q^2 g^2 + T_{solidif}^2 \lambda^2} - q \cdot g}{2q}}} \cdot T_{solidif} \quad (3.35)$$

Pentru condițiile la limită, când $x = 0$ și $T = T_{suprafață}$, după transformări, se obține:

$$T = \frac{\sqrt{q^2 g^2 + T_{solidif}^2 \lambda^2} - q \cdot g}{\lambda} \quad (3.36)$$

Relația reprezintă modul în care variază temperatura unui punct oarecare al crustei solidificate în funcție de caracteristicile fizice ale oțelului turnat continuu, de mărimea grosimii crustei de oțel și de mărimea fluxului termic care străbate suprafața semifabricatului în timpul considerat.

Ținând seama de repartizarea neliniară a câmpului termic din crusta solidificată de oțel, se poate deduce și pentru acest caz grosimea crustei solidificate într-un anumit timp.

Considerând că în crustă câmpul de temperatură este caracterizat de relația:

$$T = \sqrt{\frac{x+m}{g+m}} \cdot T_{solidif}$$

se scrie ecuația bilanțului termic:

$$q d\tau = \rho Q_{\text{solidif}} dg + \gamma c_p g dT \quad (3.37)$$

De asemenea, pe baza fig.3.5 se poate considera că [28]:

$$dT = \frac{EF + CD}{2}; EF = dg \cdot \operatorname{tg} \phi_1$$

$$\operatorname{tg} \phi_1 = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=g}; \operatorname{tg} \phi_1 = k \cdot \operatorname{tg} \phi_2 \quad (3.38)$$

$$\operatorname{tg} \phi_2 = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}; k = \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=g}}{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}}$$

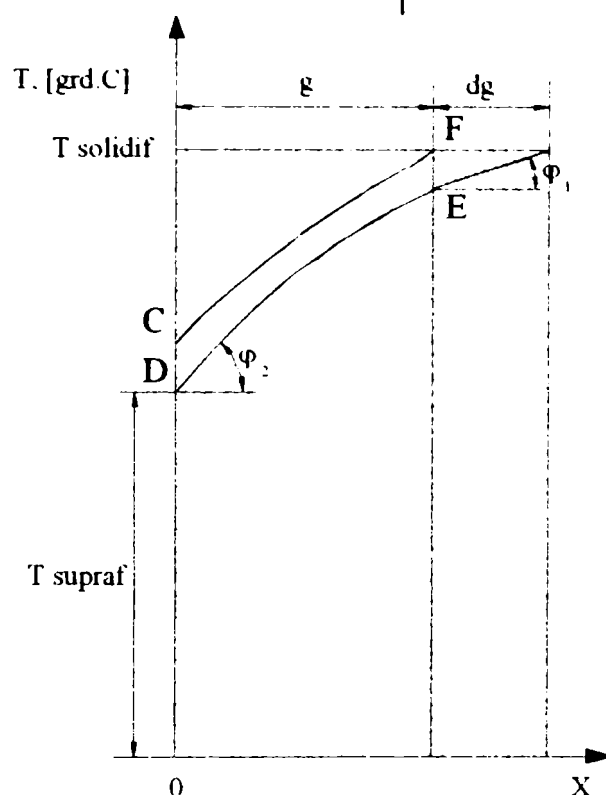


Fig.3.5. Schema pentru deducerea ecuației grosimii crustei solidificate în cazul repartizării neliniare a temperaturilor în crustă

Substituind valoarea derivatelor din ecuația (2.22), rezultă:

$$k = \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{g+m}} \quad (3.39)$$

$$\operatorname{tg} \phi_2 = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{q}{\lambda}; EF = \frac{q}{\lambda} k dg$$

Înlocuind în ecuația (3.39) valoarea coeficientului m din relația (3.34), după transformări, se obține:

$$k = \frac{T_{\text{solidif}} \cdot \lambda}{\sqrt{q^2 g^2 + T_{\text{solidif}}^2 \lambda^2 + qg}} \quad (3.40)$$

Segmentul CD este egal cu dT_{supraf} . Diferențind ecuația (3.36), rezultă:

$$-\frac{\partial T_{\text{supraf}}}{\partial g} = -\frac{q^2 g}{\lambda \sqrt{q^2 g^2 + T_{\text{solidif}}^2} \lambda^2} + \frac{q}{\lambda}$$

$$\partial T_{\text{supraf}} = \left(\frac{q}{\lambda} - \frac{q^2 g}{\lambda \sqrt{q^2 g^2 + T_{\text{solidif}}^2} \lambda^2} \right) dg$$

$$\Rightarrow dT = \frac{1}{2} \left[\frac{q}{\lambda} k dg + \left(\frac{q}{\lambda} - \frac{q^2 g}{\lambda \sqrt{q^2 g^2 + T_{\text{solidif}}^2} \lambda^2} \right) dg \right]$$

Înlocuind valoarea dT în ecuația bilanțului termic, și totodată substituind și valoarea pentru k obținută în relația (3.40), se obține:

$$qd\tau = \rho Q_{\text{solidif}} dg + \rho c_p g \frac{1}{2} \left[\frac{q}{\lambda} \frac{T_{\text{solidif}} \lambda}{\sqrt{q^2 g^2 + T_{\text{solidif}}^2} \lambda^2} + \frac{q}{\lambda} - \frac{q^2 g}{\lambda \sqrt{q^2 g^2 + T_{\text{solidif}}^2} \lambda^2} \right] dg$$

Notând:

$$\frac{1}{2} \left[1 + \frac{T_{\text{solidif}}}{\sqrt{q^2 g^2 + T_{\text{solidif}}^2} \lambda^2} + \frac{q g}{\lambda \sqrt{q^2 g^2 + T_{\text{solidif}}^2} \lambda^2} \right] = \mu \quad (3.41)$$

$$\Rightarrow qd\tau = \left(\rho Q_{\text{solidif}} + \frac{\rho c_p g q}{\lambda} \mu \right) dg$$

Înlocuind și $\frac{\lambda}{c_p \rho} = a$, rezultă că:

$$dg = \frac{qd\tau}{\rho Q_{\text{solidif}} + \frac{gq}{a} \mu} \quad (3.42)$$

Structura ecuației (3.42), dedusă pe baza considerării repartizării neliniare a câmpului de temperatură în crustă, este similară cu cea a ecuațiilor deduse pornind de la premisa repartizării liniare a temperaturii și se deosebește de aceasta prin coeficientul μ cu care se înmulțește de fapt căldura specifică a oțelului.

Coeficientul μ depinde de intensitatea schimbului de căldură și de grosimea crustei și variază între limitele $0 < \mu \leq 1$.

În diagrama din fig.3.6. este reprezentată variația coeficientului μ în funcție de grosimea crustei și de fluxul termic [28].

Pentru a putea integra ecuația (3.41), q și μ sunt substituiți cu valorile lor medii în intervalul de la zero la τ .

$$dg = \frac{q_{\text{mediu}} d\tau}{\rho Q_{\text{solidif}} + \frac{q_{\text{mediu}} \mu_{\text{mediu}}}{a} g}$$

Integrând ecuația între limitele de la zero până la g și respectiv de la zero până la τ , rezultă:

$$\rho Q_{\text{solidif}} g + \frac{q_{\text{mediu}} \mu_{\text{mediu}}}{2a} g^2 = Q \quad (3.43)$$

în care Q reprezintă cantitatea de căldură pierdută de semifabricat până la momentul de timp τ .

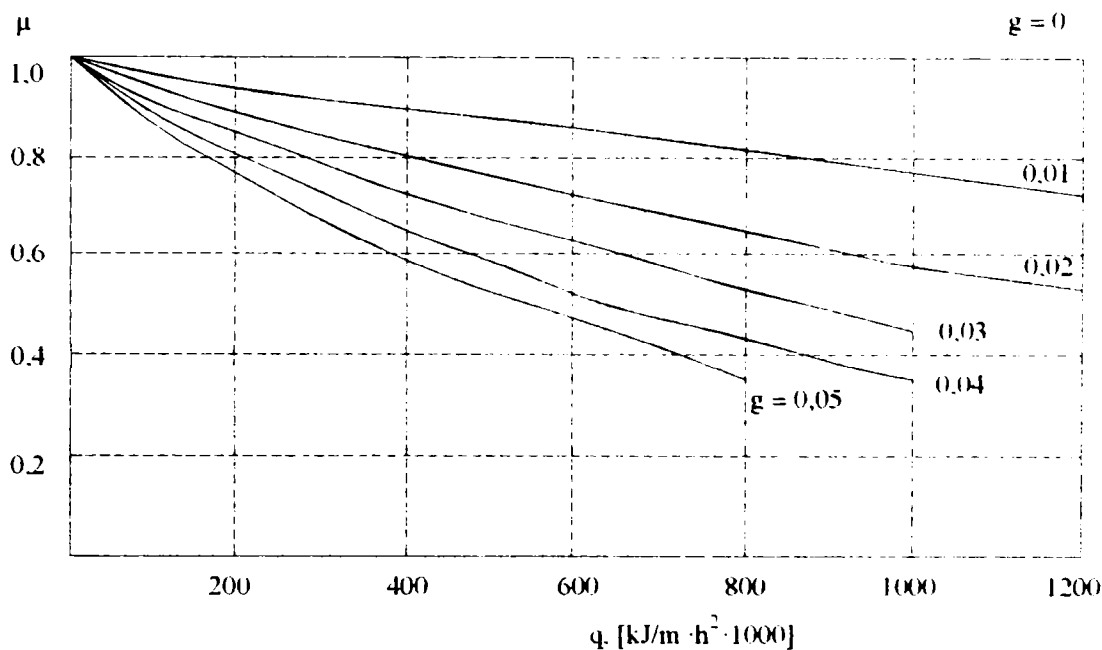


Fig.3.6. Variația coeficientului μ în funcție de grosimea crustei semifabricatului și de fluxul termic q

Rezolvând ecuația (3.43) în raport cu g , rezultă grosimea crustei de oțel solidificat:

$$g = \frac{\sqrt{(\rho Q_{\text{solidif}})^2 + \frac{2q_{\text{mediu}} \mu_{\text{mediu}} Q}{a}} - \rho Q_{\text{solidif}}}{\frac{q_{\text{mediu}} \mu_{\text{mediu}}}{a}} \quad (3.44)$$

Înlocuind q_{mediu} și μ_{mediu} prin valorile lor în momentul de timp τ , se obține:

$$g = \frac{\sqrt{(\rho Q_{solidif})^2 + \frac{2q\mu Q}{a}} - \rho Q_{solidif}}{q\mu a} \quad (3.45)$$

Relația (3.45) reprezintă modul de calcul pentru grosimea crustei solidificate în cazul repartizării neliniare a câmpului termic în crustă. Această expresie este similară cu celelalte relații de calcul pentru g , cu deosebirea că în acest caz se ține seama, pe lângă caracteristicile de material și de mărimea fluxului termic, de cantitatea de căldură pierdută de semifabricat și de coeficientul μ .

Pentru aducerea ecuației (3.45) la forma adimensională, se împart ambii termeni cu o anumită mărime caracteristică corpului X , egală cu jumătate din grosimea semifabricatului. Se obține astfel relația:

$$\frac{g}{X} = \sqrt{\left(\frac{\rho Q_{solidif} a}{qX\mu}\right)^2 + \frac{2Qa}{qX^2\mu}} - \frac{\rho Q_{solidif} a}{qX\mu} \quad (3.46)$$

Se fac notațiile: $\frac{g}{X} = \delta$ și $\frac{\rho Q_{solidif} a}{qX} = k_1$

în care δ reprezintă grosimea relativă a crustei.

De asemenea, cel de-al doilea termen de sub radical se scrie sub o altă formă, dată mai jos:

$$\frac{2Qa}{qX^2\mu} = \frac{2}{\mu} \cdot \frac{\rho Q_{solidif} a}{qX} \cdot \frac{Q}{\rho Q_{solidif} X}$$

Și în acest caz se face notația: $\frac{Q}{\rho Q_{solidif} X} = k_2$

Astfel, cu notațiile prezentate anterior, relația (3.46) devine:

$$\delta = \sqrt{\frac{k_1^2}{\mu^2} + \frac{2}{\mu} k_1 k_2} - \frac{k_1}{\mu} \quad (3.47)$$

Aducând și ecuația (3.36), pentru determinarea temperaturii suprafeței semifabricatului la forma adimensională, rezultă expresia:

$$\frac{T_{sup raf}}{T_{solidif}} = \sqrt{\left(\frac{qg}{T_{solidif} \lambda}\right)^2 + 1} - \frac{qg}{T_{solidif} \lambda} \quad (3.48)$$

Se notează cu: $\frac{T_{sup raf}}{T_{solidif}} = \vartheta_s$ și $\frac{qg}{T_{solidif} \lambda} = k_3$

în care ϑ_s reprezintă temperatura relativă a suprafeței semifabricatului.

Ecuția (3.48) cu notațiile anterioare devine:

$$g_s = \sqrt{k_3^2 + 1} - k_3 \quad (3.49)$$

Înmulțind criteriul k_3 cu k_1 , se obține:

$$k_3 k_1 = \frac{qg}{T_{solidif} \lambda} \cdot \frac{\rho Q_{solidif} \lambda}{q X c_p \rho} = \frac{g}{X} \cdot \frac{Q_{solidif}}{T_{solidif}}$$

în care: $\frac{g}{X} = \delta$ și $\frac{T_{solidif} c_p}{Q_{solidif}} = Ka$

Acest criteriu este caracteristic pentru procesele de transfer de căldură cu modificarea stării de agregare. Astfel se obține:

$$\delta = k_1 k_3 Ka \quad (3.50)$$

În această ecuație, criteriile k_1 și Ka sunt determinate iar δ și k_3 sunt nedeterminate. Se transformă ecuația astfel încât să avem ca nedeterminat numai criteriul k_3 .

Din ecuația (3.47) se obține:

$$\frac{\delta}{k_1} = \sqrt{\frac{1}{\mu^2} + \frac{2}{\mu} \cdot \frac{k_2}{k_1}} - \frac{1}{\mu}$$

Din ecuația (3.50), rezultă $\frac{\delta}{k_1} = k_3 Ka$.

Egalând părțile din dreapta a ecuațiilor, se obține relația criteriului k_3 în funcție de criteriile determinate k_1 , k_2 și Ka .

$$k_3 Ka = \sqrt{\frac{1}{\mu^2} + \frac{2}{\mu} \cdot \frac{k_2}{k_1}} - \frac{1}{\mu} \quad (3.51)$$

Transformând ecuația (3.41) într-o ecuație în formă criterială, se obține expresia:

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{k_3^2 + 1} + k_3} - \frac{k_3}{\sqrt{k_3^2 + 1}} \right) \quad (3.52)$$

Substituind valoarea lui μ în ecuația (3.51) și rezolvând ecuația în raport cu k_3 se obține relația:

$$k_3 = f\left(\frac{k_2}{k_1}; Ka\right)$$

în care Ka este un parametru.

Din fig. 3.7. se observă că variația criteriului k_3 în funcție de raportul k_2 / k_1 este aproape liniară în intervalul valorilor sale practice.

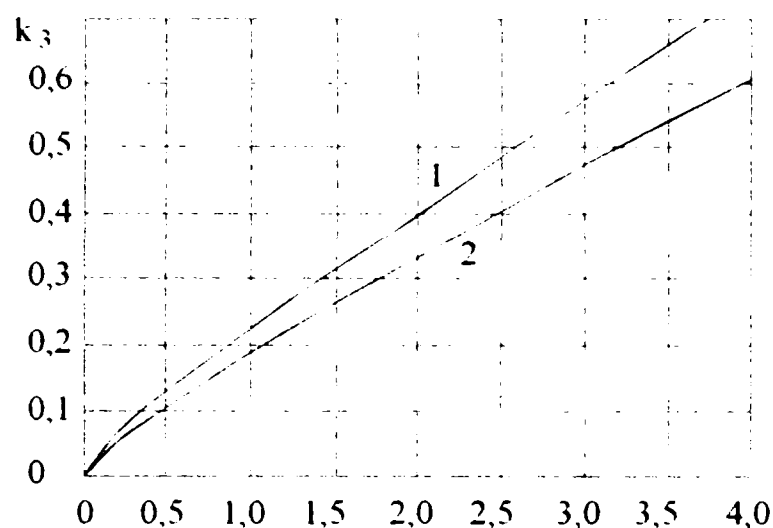


Fig.3.7. Variația criteriului k_3 în funcție de raportul k_2/k_1
 1 – pentru $Ka = 3,45$ (supraîncălzire 50°C);
 2 – pentru $Ka = 4$ (fără supraîncălzire).

De aici rezultă că produsul $k_1 k_3$ depinde numai de Q și nu depinde aproape deloc de q . Astfel, cu mărirea lui q și menținerea constantă a lui Q , criteriul k_1 se micșorează iar raportul k_2/k_1 și prin urmare k_3 se măresc tot de atâtea ori; ca rezultat produsul $k_1 k_3$ rămâne constant.

Din cele arătate rezultă că determinarea grosimii crustei solidificate cu ajutorul relației (3.50) nu dă practic erori, cu toate că după integrarea ecuației (3.42) s-a efectuat înlocuirea mărimilor q_{mediu} și μ_{mediu} cu valorile lor în momentul de timp τ .

III.3. Schimbul de căldură și solidificarea oțelului în zona de răcire secundară

În general, este mai dificil să se cerceteze schimbul de căldură și solidificarea lingoului în zona de răcire secundară față de răcirea în cristalizor. Procesul de solidificare a oțelului poate fi cercetat din două puncte de vedere: ca un proces termic, adică ca degajare a căldurii latente de solidificare și cedarea acestei călduri mediului exterior și ca un proces de formare a structurii oțelului [28,30].

Calculul schimbului de căldură și a solidificării oțelului în zona de răcire secundară se bazează pe ecuațiile deduse anterior, pentru câmpul de temperatură

în crusta unui semifabricat.

$$T = \sqrt{\frac{x+m}{g+m}} \cdot T_{solidif} \quad (3.53)$$

Căldura cedată mediului exterior (apei de răcire) se caracterizează prin coeficientul transmisiei de căldură α ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$), care este constant pentru anumite condiții de răcire. În acest caz este necesar să se determine variația temperaturii la suprafața semifabricatului în funcție de timp $T_{supraf.} = f(\tau)$ și a câmpului de temperatură în $T = f(x; \tau)$.

Pentru aceasta, se alege axa τ pe suprafața semifabricatului și axa x în dreptul tăieturii inferioare a cristalizorului. Condițiile limită se caracterizează prin ecuațiile:

$$\alpha(T_{supraf} - T_{apă}) = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (3.54)$$

în care $T_{apă}$ – temperatura apei de răcire, [$^\circ\text{C}$].

$$\frac{dT_{supraf}}{d\tau} = a \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{x=0} \quad (3.55)$$

în care a – coeficientul de difuzibilitate termică, [m^2/h].

Din ecuația (3.54), se obține T_{supraf} :

$$T_{supraf} = \frac{\lambda}{\alpha} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + T_{apă} .$$

Substituind în această relație valoarea derivatei din ecuația (3.53), rezultă:

$$T_{supraf} = \frac{\lambda T_{solidif}}{2\alpha} \cdot \frac{1}{\sqrt{m(g+m)}} + T_{apă} \quad (3.56)$$

Diferențiind relația (3.56) în raport cu τ , se obține:

$$\frac{dT_{supraf}}{d\tau} = -\frac{\lambda T_{solidif}}{4\alpha} \cdot \frac{(g+2m) \frac{\partial m}{\partial \tau}}{\sqrt{m(g+m)} [m(g+m)]} \quad (3.57)$$

Substituind în condiția din relația (3.55) valoarea derivatei, se obține:

$$\frac{dT_{supraf}}{d\tau} = -\frac{a T_{solidif}}{4m} \frac{1}{\sqrt{m(g+m)}} \quad (3.58)$$

Egalând părțile din dreapta ale expresiilor (3.57) și (3.58), se obține:

$$\frac{\lambda T_{solidif}}{4\alpha} \cdot \frac{(g+2m) \frac{\partial m}{\partial \tau}}{\sqrt{m(g+m)}[m(g+m)]} = \frac{a T_{solidif}}{4m} \frac{1}{\sqrt{m(g+m)}}$$

După efectuarea reducerilor, rezultă:

$$\frac{a\alpha}{\lambda} = \frac{g+2m}{g+m} \cdot \frac{\partial m}{\partial \tau}$$

Separând variabilele și integrând relația anterioară, rezultă:

$$\frac{a\alpha}{\lambda} \int d\tau = g \int \frac{\partial m}{g+m} + 2 \int \frac{m \cdot dm}{g+m};$$

$$\frac{a\alpha}{\lambda} \tau = g \ln(g+m) + 2[m - \ln g(\xi+m)] + C$$

$$\Rightarrow (g+m)g = e^{\left(2m - \frac{a\alpha}{\lambda} \tau + C\right)} \quad (3.59)$$

Constanta de integrare C se determină din condițiile inițiale:

$$\tau = 0; m = m_0$$

$$C = g \ln(g+m_0) - 2m_0 \quad (3.59)$$

iar m_0 se determină din condiția limită (32.54)

$$\alpha(T_{supr} - T_{apă}) = \frac{\lambda T_{solidif}}{2\sqrt{m_0(g+m_0)}} \quad (3.60)$$

După cum se observă, parametrul determinant din ecuația (3.60) este coeficientul transmisiei de căldură α . Temperatura suprafeței semifabricatului care iese din cristalizor variază în limite restrânse și influențează puțin mărimea valorii pentru m_0 . Rezolvând ecuația (3.60) în raport cu valoarea lui m_0 , se obține valoarea acestuia:

$$m_0 = \sqrt{\frac{g^2}{4} + \left(\frac{\lambda T_{solidif}}{2\alpha\Delta T}\right)^2} - \frac{g}{2} \quad (3.61)$$

Deoarece nu este posibil să se rezolve algebric ecuația (3.59) în raport cu m , se caută o rezolvare pe cale grafică. Astfel, reprezentând grafic variația lui m în funcție de τ , se constată că această relație este practic liniară:

$$m = m_0 + k \cdot \tau$$

Coeficientul unghiular k depinde de α , la valori constante pentru g și ΔT , iar pentru valorile mai sus indicate ale acestor mărimi, k este legat de α prin expresia

$$k = \frac{\alpha}{1000}.$$

Substituind valoarea $m = f(\tau)$ în ecuația (3.56), rezultă relația temperaturii la suprafața semifabricatului în funcție de timp:

$$T_{\text{supraf}} = \frac{\lambda T_{\text{solidif}}}{2\alpha} \cdot \frac{1}{\sqrt{(m_0 + k\tau)(g + m_0 + k\tau)}} + T_{\text{apă}} \quad (3.62)$$

Această expresie mai poate fi scrisă și sub forma:

$$T_{\text{supraf}} = \frac{\lambda T_{\text{solidif}}}{2\alpha \sqrt{A\tau^2 + B\tau + C}} + T_{\text{apă}} \quad (3.63)$$

în care:

$$A = k^2$$

$$B = g + 2m_0$$

$$C = m_0(g + m_0)$$

Ca bază pentru calcule, au fost folosite curbele de variație a temperaturii la suprafața semifabricatului, obținute pe cale experimentală.

Astfel, în fig.3.8. este prezentată o astfel de diagramă, pentru un blum cu secțiunea de 150x600mm, cu o viteză de turnare de 400mm/min, iar debitele apei de răcire pentru răcirea secundară de 11 l/s și respectiv 23 l/s.

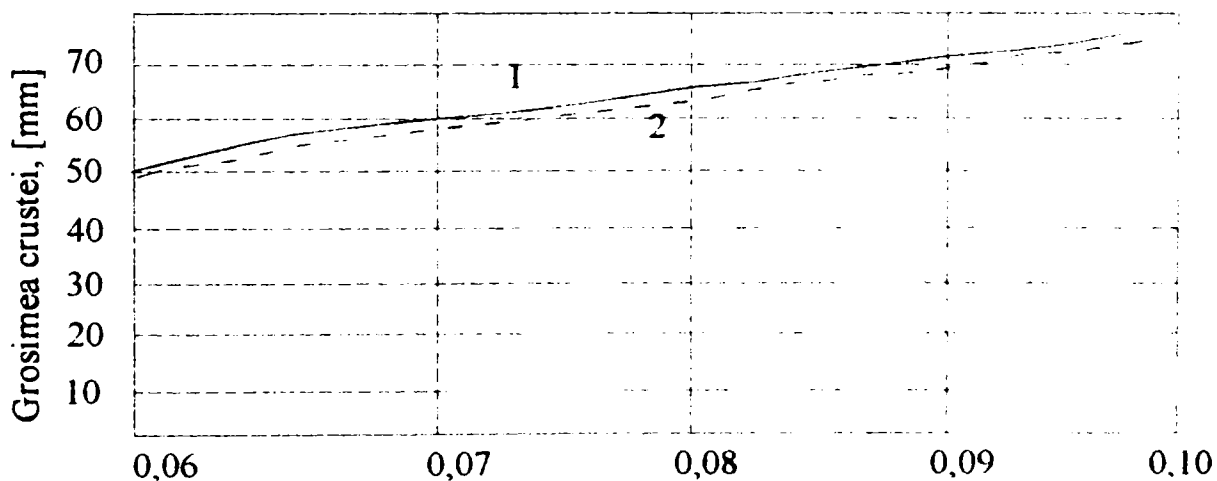


Fig.3.8. Variația grosimii crustei la răcirea secundară
 1 – la un debit de apă de 23 l/s;
 2 – la un debit de apă de 11 l/s.

Diagrama reprezintă curbele de variație a frontului de solidificare în timpul răcirii secundare obținute prin calcul. După cum se observă, la un debit de apă

pentru răcirea secundară de 23 l/s, numai la început se constată o oarecare mărire a vitezei de solidificare în comparație cu curba corespunzătoare debitului de apă de 11 l/s [15,28].

Folosind ecuațiile anterioare, poate fi calculată variația temperaturii la suprafața semifabricatului în funcție de coeficientul transmisiei de căldură de la semifabricat la apa de răcire.

Astfel, în diagrama din fig.3.9. sunt trasate curbele de răcire a suprafeței, determinate prin calcul pentru exemplul dat anterior. Pe aceeași diagramă, sunt trasate și curbele experimentale de variație a temperaturii suprafeței semifabricatului în zona de răcire secundară [15,28].

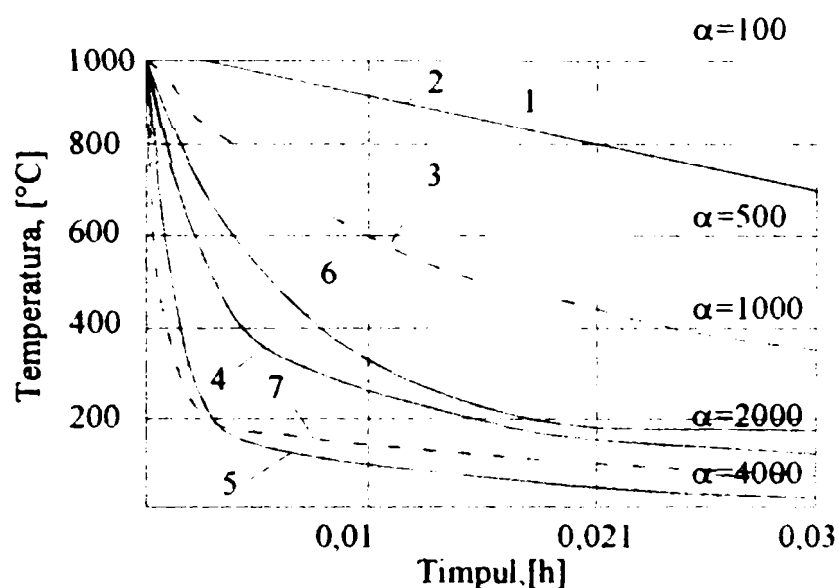


Fig.3.9. Variația temperaturii suprafeței semifabricatului în funcție de coeficientul transiterii de căldură, α
1 – 5 – curbele calculate pentru $\alpha = 100 - 4000$;
6 – 7 – curbe experimentale la debite pentru răcirea secundară de 11 și respectiv 23 l/s.

Din punct de vedere practic, un mare interes îl prezintă valoarea coeficientului transiterii de căldură de la semifabricat la apa de răcire și variația acestuia în funcție de debitul de apă și construcția sistemului de răcire secundară.

În cazul răcirii bruște a suprafeței semifabricatului, temperatura ajunge practic după scurt timp la o anumită valoare, care apoi rămâne aproape constantă (intervine echilibrul termic la suprafață). În primul moment, în straturile exterioare a semifabricatului are loc o contracție care atrage după sine și straturile interioare, ducând astfel la apariția unor eforturi de compresiune. Deformațiile de compresiune nu duc de obicei la perturbarea continuității metalului în cazul temperaturilor înalte, astfel încât în straturile interioare nu se vor forma fisuri.

Straturile superioare sunt, în acest timp, supuse acțiunii unor tensiuni de întindere, însă, deoarece aceste tensiuni au o rezistență mare datorită temperaturilor joase, la oțelurile carbon nu se vor forma nici fisuri exterioare.

În diagrama din fig.3.10 sunt redată curbele de variație a vitezei de scădere a temperaturii în straturile exterioare și în cele interioare. Se poate constata că mărimea contracției libere a straturilor este proporțională cu viteza de variație a temperaturii.

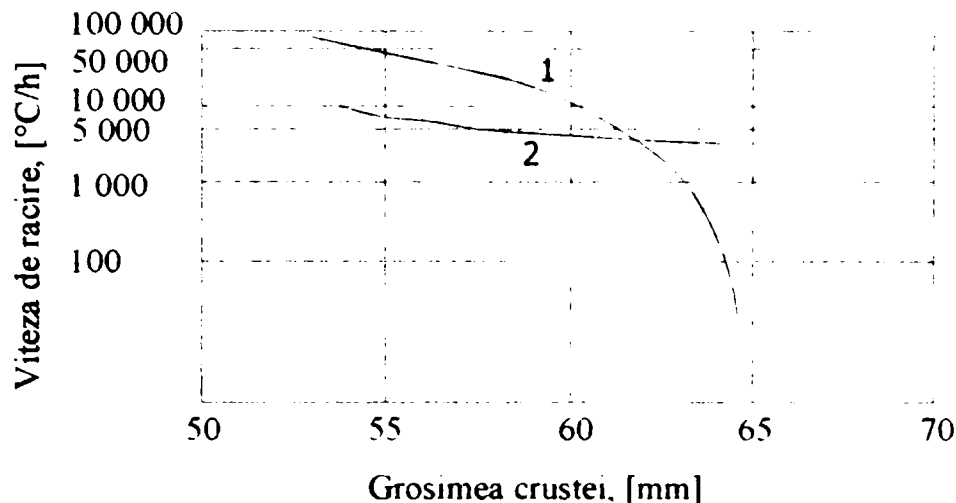


Fig.3.10. Viteza de scădere a temperaturii în straturile superioare (1) și interioare (2) ale crustei

După cum se observă din diagramă, pe măsura apropierei temperaturii suprafeței de o valoare constantă, viteza de scădere a temperaturii straturilor interioare, precum și viteza de contracție vor fi mai mari decât cele ale straturilor exterioare. În acest caz, straturile interioare vor fi supuse la întindere, iar întrucât la temperaturi apropiate de temperatura de solidificare, metalele au rezistența de rupere la tracțiune foarte mică, în anumite condiții se pot forma în aceste straturi fisuri la limitele cristalelor. Aceste fisuri se formează pe frontul de solidificare și se propagă spre suprafața semifabricatului până în momentul în care rezistența de rupere depășește valoarea tensiunilor de întindere.

Prin urmare, fisurile interne se formează ca urmare a diferenței între valorile contracției straturilor exterioare și interioare, în anumite momente de timp, fenomen care are loc în mod obligatoriu la răcirea intensă cu apă a suprafeței semifabricatului turnat continuu.

Pentru a obține un semifabricat turnat continuu cu o structură fără defecte interne, răcirea trebuie condusă astfel încât să se producă scăderea treptată a temperaturii suprafeței (dacă este posibil cu o viteză constantă) până aproape de

terminarea solidificării semifabricatului.

Dacă se presupune că odată cu mărirea contracției în perioada de solidificare se micșorează porozitatea axială, atunci trebuie ales regimul optim de răcire pentru condițiile de turnare date (viteza și temperatura), și, după cum s-a arătat anterior, răcirea suprafeței semifabricatului trebuie să se realizeze continuu, până la terminarea solidificării, iar încălzirea semifabricatului în vederea prelucrării ulterioare nu trebuie să se facă înainte de terminarea solidificării, deoarece și aceasta ar duce la formarea fisurilor interne.

Pentru a se putea alege regimul de răcire secundară în funcție de parametrii tehnologici principali, folosind în primă aproximare formulele analitice, trebuie să se cunoască valoarea coeficientului de transmitere a căldurii de la semifabricat la apă, în funcție de debitul de apă, iar pentru cercetarea schimbului de căldură dintre semifabricat și sistemul de răcire secundară, trebuie determinat coeficientul de transmitere a căldurii. Pentru determinarea aproximativă a acestui coeficient, se pornește de la ecuația dedusă mai sus, care dă variația temperaturii suprafeței în funcție de timp pentru diferite valori ale coeficientului de transmitere a căldurii.

Coeficientul de transmitere a căldurii poate fi determinat pe două căi:

- compararea curbelor de variație a temperaturii suprafeței, obținute pe cale experimentală (cu cupluri termoelectrice) și prin calcul;
- compararea fluxului de variație a fluxului termic total în zona de răcire secundară, obținute pe cale experimentală (cu ajutorul temperaturii de încălzire a apei) și prin calcul.

Cele două metode sunt aproximative, deoarece în primul caz, datele obținute din curba de variație a temperaturii suprafeței depind de precizia de așezare a cuplurilor termoelectrice, de inerția lor și de inerția aparatelor de măsurare. În plus, cuplul termoelectric modifică câmpul de temperatură efectiv din crustă. În al doilea caz, este nedeterminată suprafața semifabricatului care cedează căldura apei, deoarece o parte a apei poate curge de-a lungul semifabricatului, încălzindu-se suplimentar sub acțiunea radiațiilor semifabricatului, etc.

Prin micșorarea debitului de apă sub o anumită limită, precum și în cazul unui grad mai mare de pulverizare a apei, are loc o modificare calitativă a acțiunii de răcire, când se produce răcirea datorită vaporizării. În acest caz este și mai dificilă determinarea coeficientului de transmitere a căldurii.

III.4. Verificarea practică a modelului matematic privind solidificarea semifabricatelor turnate continuu

Pentru a efectua verificarea practică a modelului matematic în ceea ce privește grosimea crustei de oțel solidificate, a formei conului de solidificare și a timpului de solidificare completă, s-a apelat și la o serie de relații prezentate și în subcapitolul anterior [32,33].

Astfel, o primă relație între grosimea crustei și timpul de la începutul solidificării este exprimată matematic prin legea parabolică prezentată în relația (2.1). Analizând această relație rezultă că viteza de solidificare nu este constantă, ci scade în timpul procesului datorită scăderii intensității solidificării pe măsura creșterii grosimii crustei.

Pentru a realiza grafic această variație, am considerat intervale egale de timp (respectiv de 5min.) de la începutul turnării, dependență prezentată în fig.3.11a. Cu ajutorul acesteia, s-a obținut fig.3.11b, respectiv forma conului de solidificare pentru un semifabricat cu latura de 270mm. (calcul acoperitor pentru latura mică a semifabricatului turnat la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara: 240mm.). Se poate observa că în cazul unei răcirii intense ($c=30\text{mm}/\text{min}^{0.5}$), timpul complet de solidificare este de cca. 20min și respectiv de 23min pentru o răcire medie ($c=28\text{mm}/\text{min}^{0.5}$).

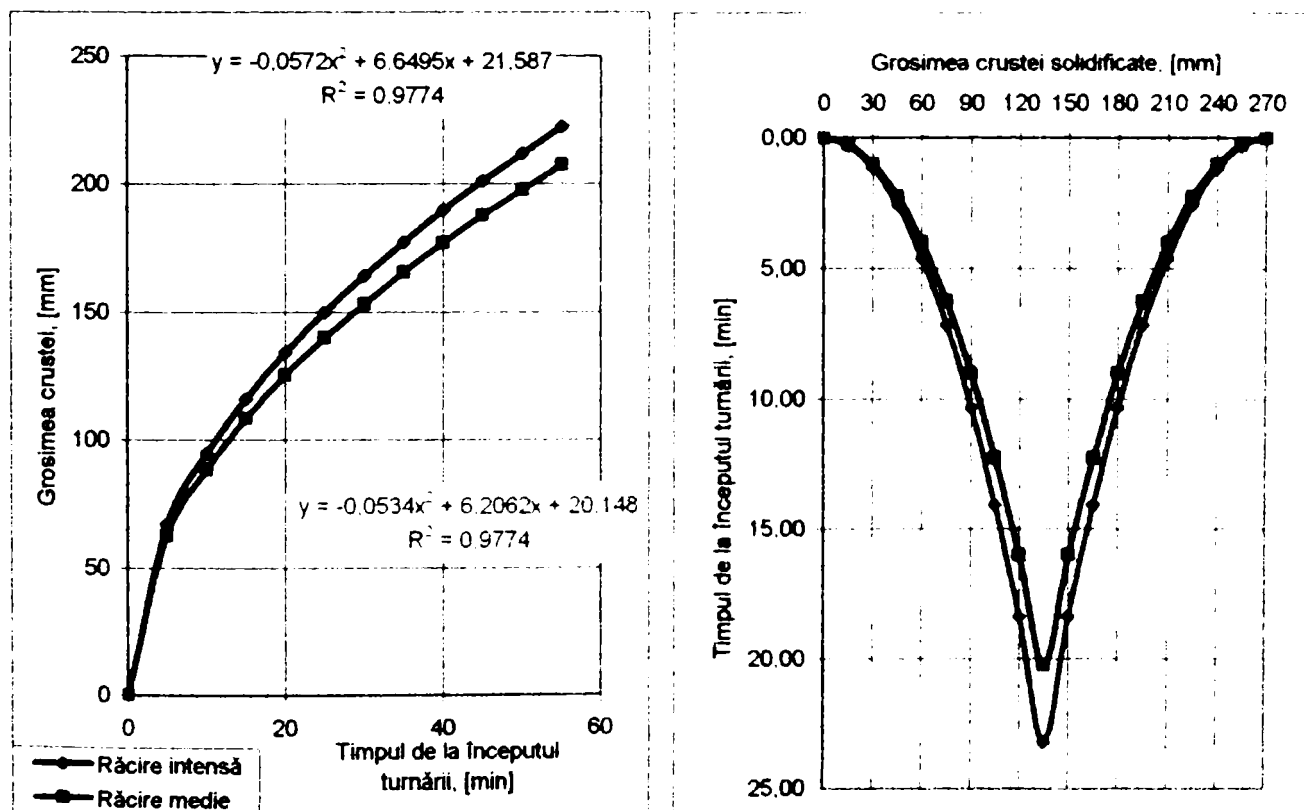


Fig.3.11. Variația grosimii crustei solidificate (a) și forma conului de solidificare (b) după relația (2.1)

Pentru calculul grosimii crustei solidificate după relația lui Chipman (2.2.), timpul complet de solidificare este de 30min. În schimb, după relația lui Lewis și Savage (2.3.), timpul de solidificare este de 27min.

Însă, conform ultimelor două relații (2.2) și (2.3), creșterea grosimii crustei înregistrează o variație liniară, ceea ce nu corespunde realității, fiind utilizate o serie de ipoteze simplificatoare, care au dus la obținerea relațiilor menționate.

O altă relație de calcul prezentată în literatura de specialitate [17] este:

$$g = 0,34 \cdot \sqrt{t}, \quad (3.64)$$

similară cu cele prezentate anterior, dar în urma căreia rezultă un timp de solidificare a oțelului de max. 10min pentru secțiunea analizată.

Variația grosimii crustei solidificate, conform ecuațiilor (2.2), (2.3), (3.64) este prezentată în fig.3.12a, 3.13a și 3.14a iar forma conului de solidificare, în fig.3.12b, 3.13b și respectiv 3.14b.

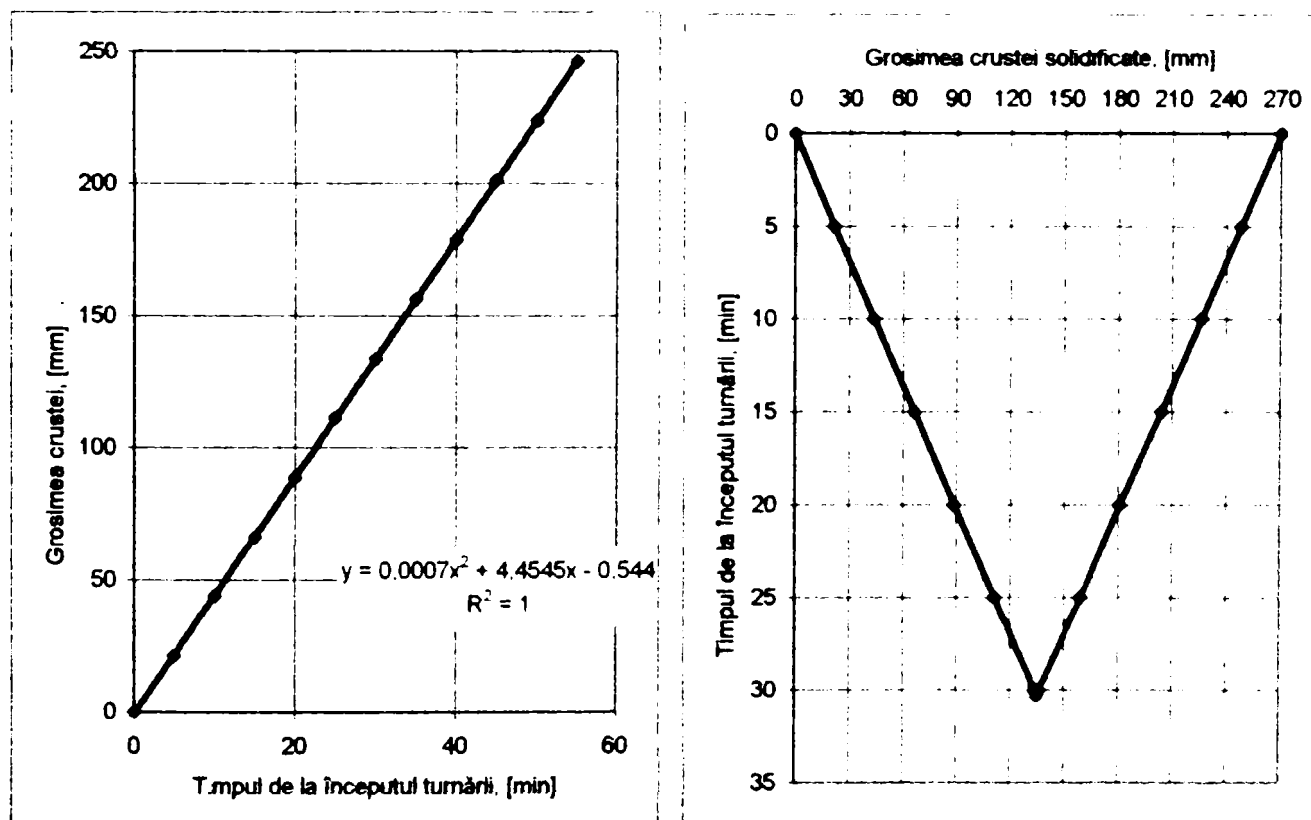


Fig.3.12. Variația grosimii crustei solidificate (a) și forma conului de solidificare (b) după relația (2.2.)

Pe baza modelului matematic prezentat anterior referitor la solidificarea oțelului turnat continuu, s-a ajuns la o relație (3.17) pentru calculul grosimii crustei solidificate funcție de timp și de diferite constante termofizice și de material (conductibilitate termică, greutate volumetrică, căldura latentă de solidificare, temperatura specifică a suprafeței semifabricatului).

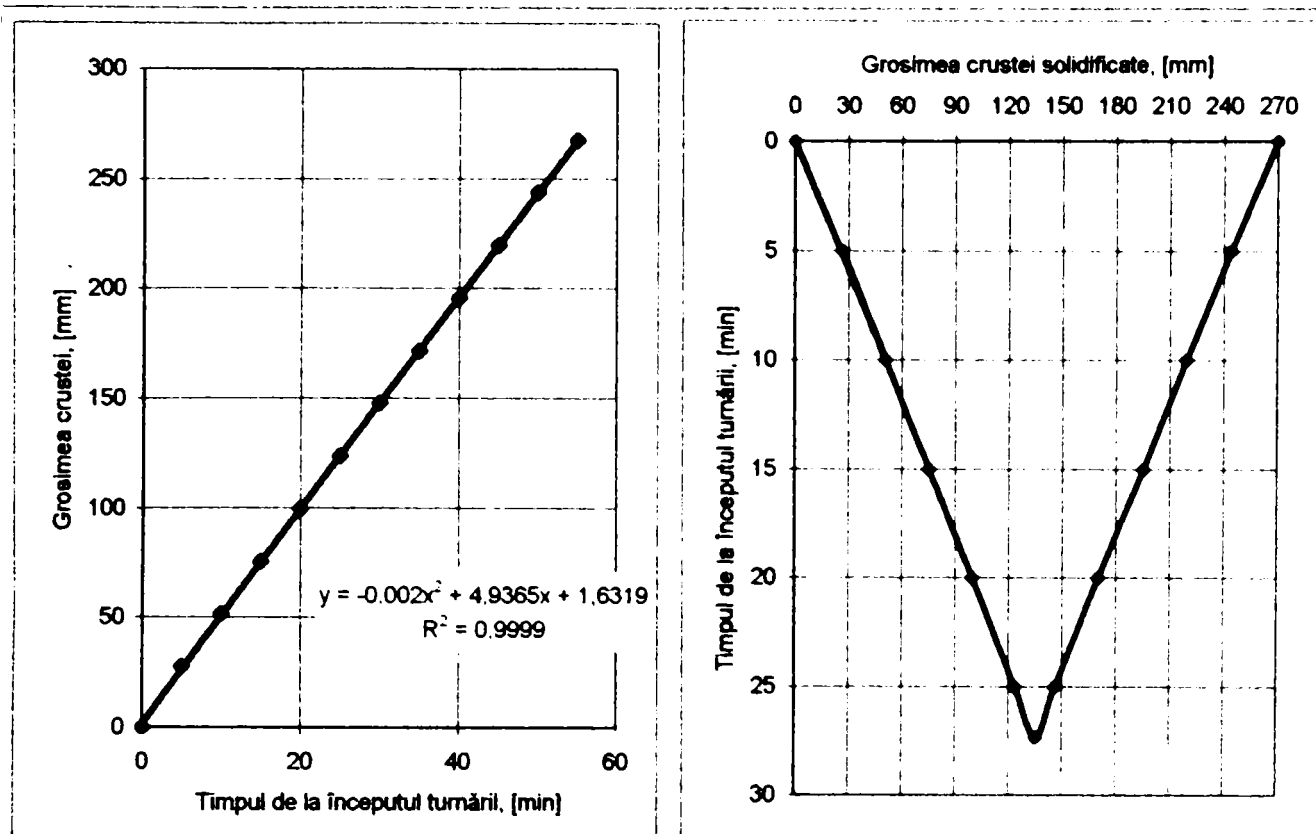


Fig.3.15. Variația grosimii crustei solidificate (a) și forma conului de solidificare (b) după relația (2.3.)

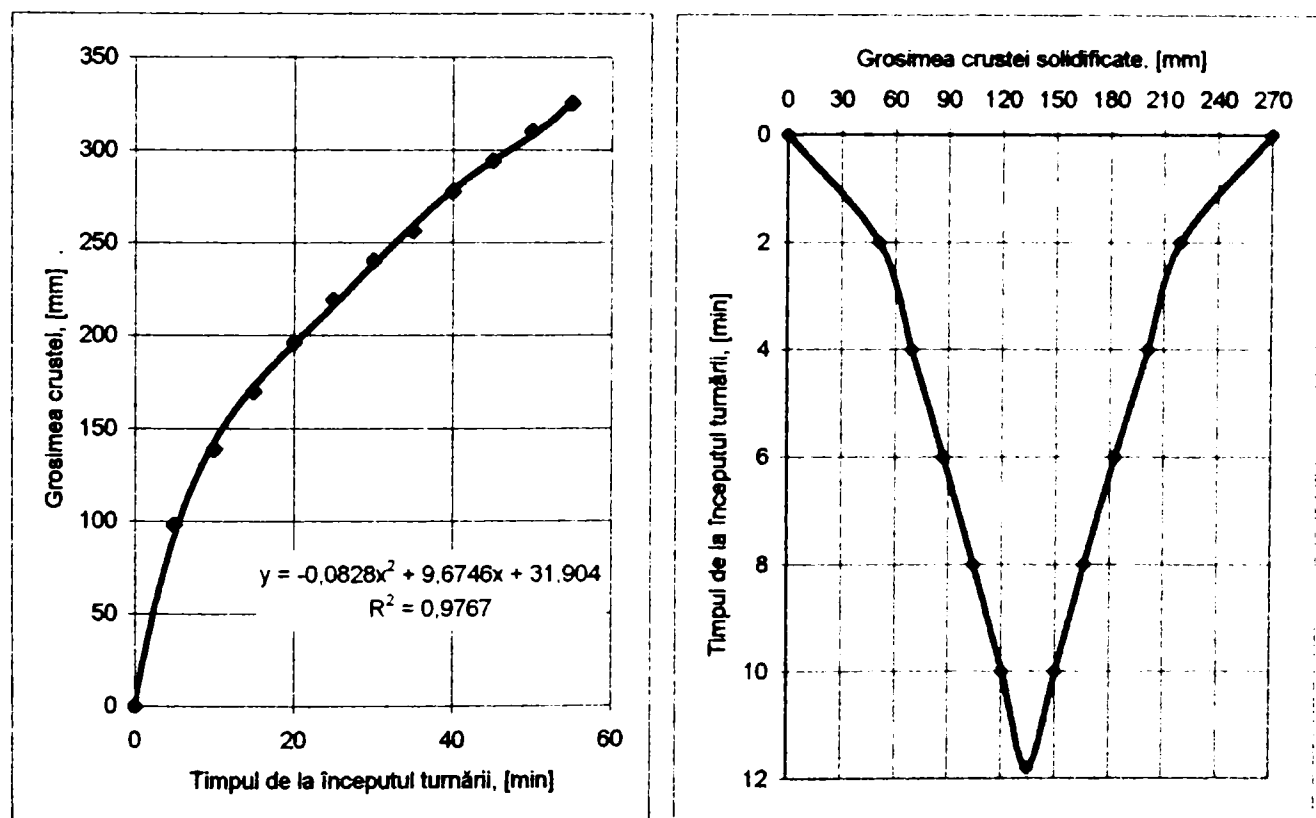


Fig.3.17. Variația grosimii crustei solidificate (a) și forma conului de solidificare (b) după relația (3.64.)

Pentru determinarea grosimii crustei după relația (3.17) s-au efectuat experimentări pe instalația de turnare continuă de la Siderurgica Hunedoara,

brevăzută cu cinci fire de turnare, secțiunea semifabricatului fiind de 240x270mm iar greutatea unei șarje, elaborată într-un cuptor electric, fiind de 100t.

Temperatura suprafeței semifabricatului a fost măsurată cu un piometru optic cu radiație de tip Pyrovar (ce admite o eroare de măsurare de $\pm 0,5\%$ din valoarea măsurată – fig.3.15) în 11 puncte pe lungimea firului. În zona 0 (imediat la ieșirea din cristalizor), datorită modului de amplasare a rozelor și duzelor de răcire nu s-a putut măsura temperatura. Primele măsurători s-au efectuat începând cu zona 1 (camera de ceață) și a continuat pe lungimea firului.

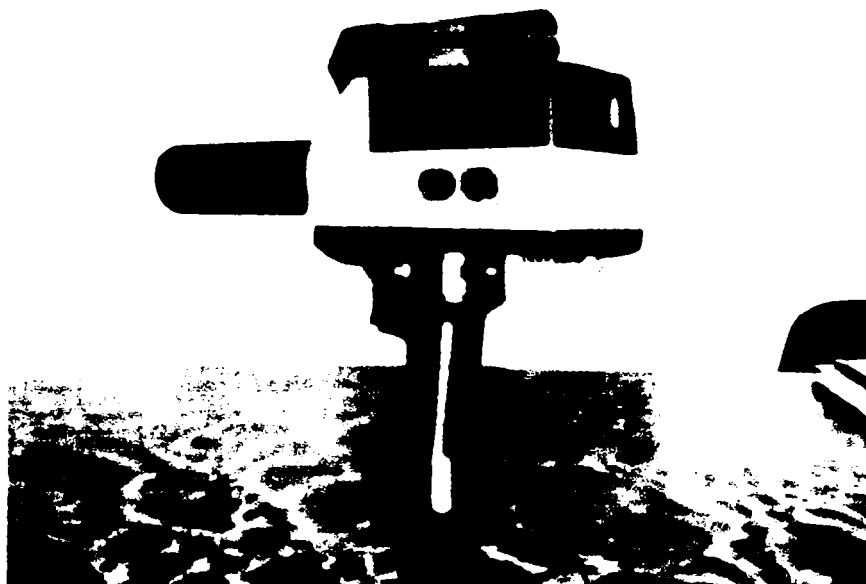


Fig.3.15. Aparatura utilizată pentru măsurarea temperaturi suprafeței semifabricatului

Măsurătorile au fost efectuate pe un număr de 7 șarje, câte trei valori pentru fiecare turnare. Datele sunt prezentate în tab.3.1.

În fig.3.16 este indicat modul de amplasare a punctelor în care s-au efectuat măsurătorile, calculate de la ieșirea firului din cristalizor.

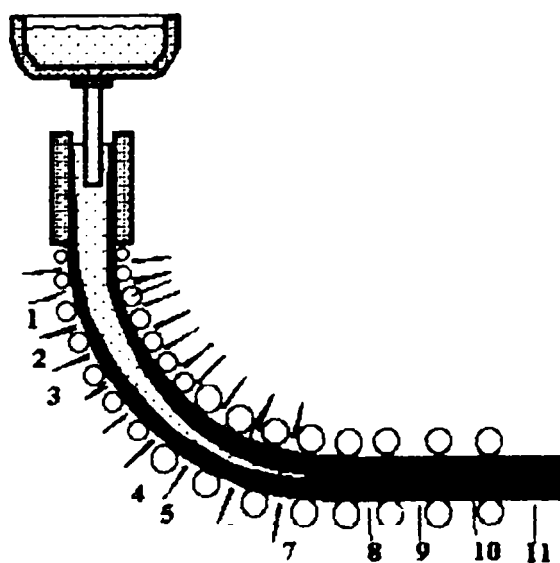


Fig.3.16. Amplasarea punctelor în care s-au făcut măsurători

Tab.3.1 – Punctele de măsurare a temperaturii.

Nr.	Punct	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ort.	Lung.fir,[m]	2,10	3,50	4,36	10,65	11,86	13,95	16,12	18,22	20,32	21,65	24,52
Temperatura suprafeței semifabricatului, [°C]												
	1	1320	1236	1156	988	962	943	927	905	886	875	852
	2	1400	1365	1345	1175	1138	1094	1057	1012	978	954	926
	3	1345	1278	1213	1056	1014	982	964	936	913	890	865
	4	1368	1286	1209	1090	1042	1013	985	962	941	916	885
	5	1334	1250	1178	960	945	935	900	880	855	840	822
	6	1387	1296	1166	1055	1021	987	962	940	912	892	867
	7	1359	1273	1195	1036	990	961	942	915	895	880	862
	8	1372	1256	1161	1040	1005	982	965	938	918	895	870
	9	1290	1219	1144	1090	1053	1029	998	972	955	931	912
	10	1366	1252	1176	1015	982	961	945	916	895	876	862
	11	1372	1296	1202	1042	1012	985	966	937	919	895	884
	12	1286	1205	1164	1015	985	962	946	925	900	887	862
	13	1390	1304	1220	1106	1082	1064	1031	1005	984	967	933
	14	1355	1300	1259	1033	1012	995	963	945	921	904	886
	15	1367	1282	1205	1085	1054	1021	995	974	965	942	913
	16	1323	1268	1200	1046	1022	1000	978	964	932	912	895
	17	1287	1212	1130	1037	997	974	955	932	916	894	875
	18	1293	1229	1135	1029	1004	982	966	948	932	905	887
	19	1375	1260	1142	1025	994	973	951	930	912	890	869
	20	1344	1270	1189	1050	1022	997	981	964	932	921	895
	21	1380	1307	1235	1090	1064	1031	1005	987	962	938	912

Cu datele din tab.3.1. s-a trasat fig.3.17 - variația temperaturii suprafeței firului pe lungimea acestuia. Pe diagramă sunt reprezentate valorile maxime, minime și medii ale temperaturilor măsurate.

Pentru calculul grosimii crustei solidificate, s-au admis următoarele ipoteze simplificatoare:

- s-a considerat constantă conductibilitatea termică a crustei solidificate, cu toate că aceasta variază cu temperatura;

- pentru coeficientul "n" s-au adoptat doar valorile extreme: 0,4 și 0,5;

- este posibil ca temperatura măsurată să admită erori față de valorile reale, datorate atât aparaturii utilizate pentru măsurători cât și faptului că aceasta a fost

influențată de mediul de măsurare (pentru a obține valori cât mai apropiate de cele reale, a fost nevoie de efectuarea măsurărilor la o distanță de cca.2m față de firul turnat, distanță la care căldura radiată de semifabricat a fost considerabilă);

- pentru timpul de la începutul solidificării am utilizat intervale destul de mari între valorile utilizate la trasarea curbei de variație (5 min).

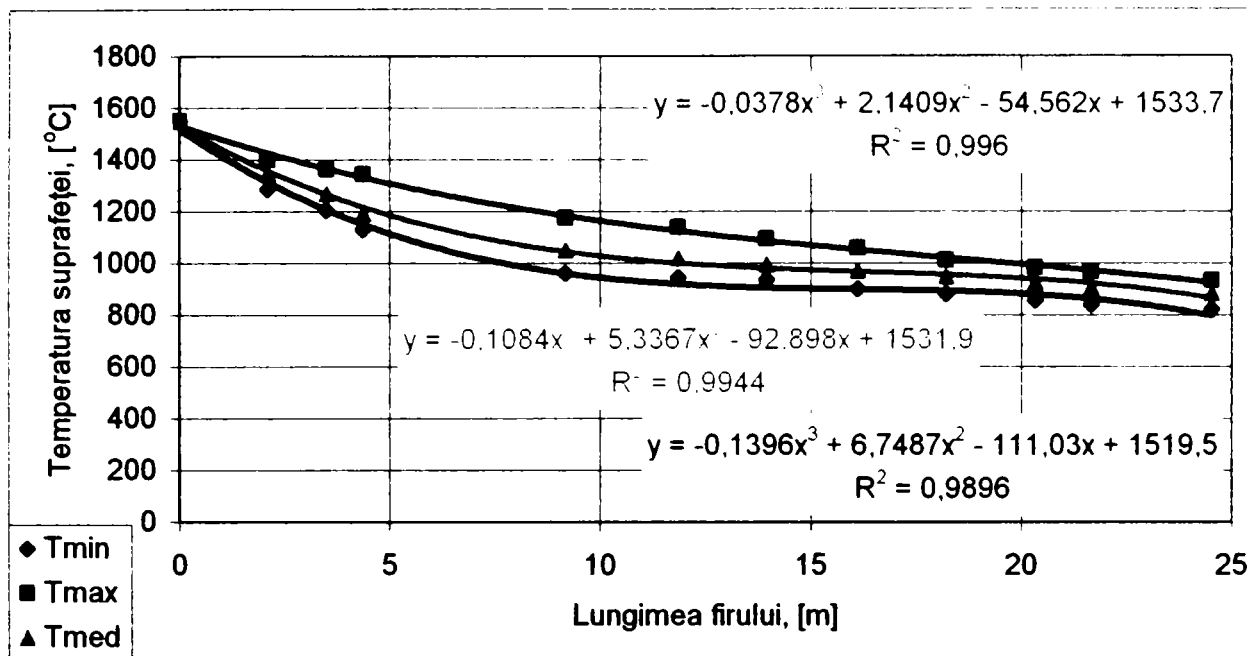


Fig.3.17. Temperatura suprafeței firului cu secțiunea 240x270mm

Astfel a rezultat modul de variație a grosimii crustei solidificate a semifabricatului în timp, variație redată în fig.3.18a iar în fig.3.18b se prezintă forma conului de solidificare, care se apropie cel mai mult de situația reală.

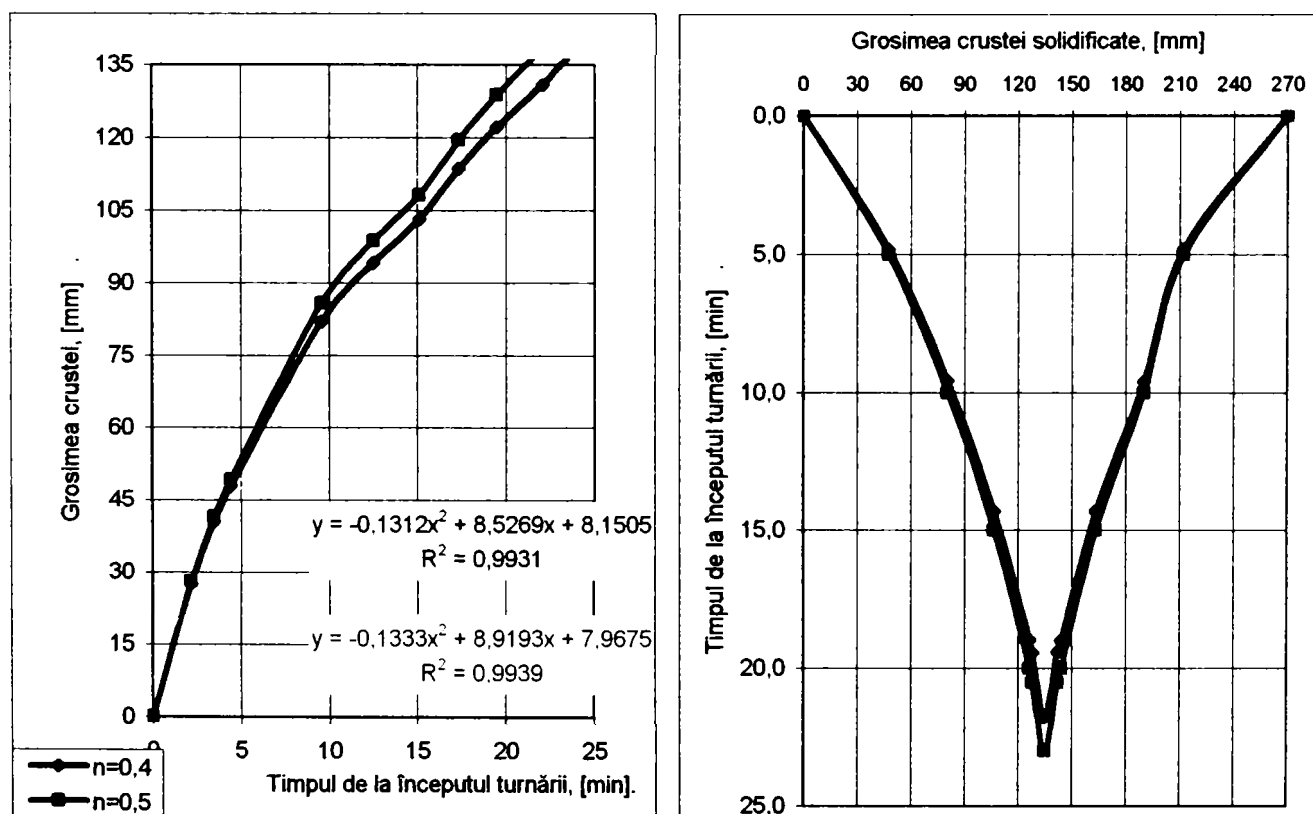


Fig.3.18. Variația grosimii crustei solidificate (a) și forma conului de solidificare după relația (3.17)

III.5. Simularea procesului de solidificare a semifabricatelor turnate continuu

Modelarea matematică a fenomenului de solidificare și răcire a semifabricatelor turnate continuu, prezentată în continuare, se bazează pe descrierea matematică a acestui fenomen. Soluția acestei probleme este de fapt soluționarea ecuației transmiterii căldurii în regim nestaționar.

Pentru a defini transmiterea de căldură între semifabricat și cristalizor este necesară cunoașterea condițiilor inițiale, legea de variație a fluxului de căldură semifabricat-cristalizor, a fluxului de căldură cristalizor-apă de răcire. Unele condiții se pot ușor schematiza, altele însă conduc la sisteme de ecuații care nu au putut fi soluționate pe cale analitică.

III.5.1. Modelarea prin metoda diferențelor finite

Această metodă se bazează pe transformarea ecuației diferențiale a transmiterii căldurii în ecuații cu diferențe finite [34,35,36].

Ecuația diferențială a transmiterii căldurii după cele trei axe are forma:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.65)$$

unde:

- T este temperatura, [°C] ;
- τ – timpul, [s];
- a – difuzibilitatea termică, [m²/s];
- x, y, z – coordonate spațiale.

Dacă se neglijează transmiterea de căldură pe verticală, relația devine:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.66)$$

Având în vedere dependența conductibilității termice λ de temperatură se introduce o temperatură redusă care să includă această variație:

$$\Phi = \int_{T_0}^T \frac{\lambda}{\lambda_0} dT \quad (3.67)$$

unde λ și λ_0 sunt conductibilitățile termice la temperatura T și la o temperatură arbitrară T_0 . Astfel:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = a(\Phi) \cdot \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot \frac{\rho \cdot c}{\lambda} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \quad (3.69)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\rho}{\lambda} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \quad (3.70)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\lambda_0}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) \quad (3.71)$$

Ultima relație este avantajoasă pentru că face posibil calculul direct al conținutului de căldură (entalpia H), care include în faza lichidă și căldura latentă.

S-au folosit relațiile pentru difuzibilitatea termică $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ și căldura specifică

$$c = \frac{\partial H}{\partial \tau}.$$

Pentru a transforma relația (3.71) într-o ecuație cu diferențe finite se exprimă temperatura unui punct (i, j) în funcție de temperatura punctelor vecine. Se consideră pentru început cazul din figura 3.19 adică un punct din interior.

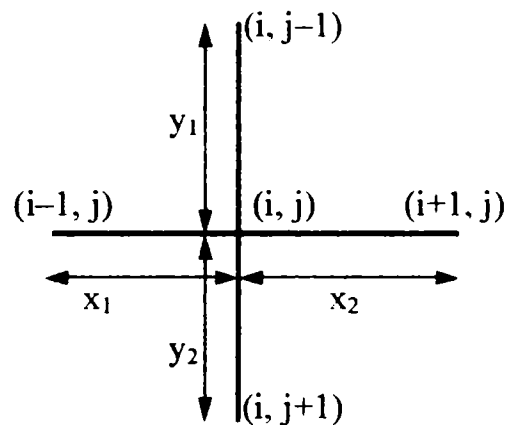


Fig.3.19 Nod în interiorul semifabricatului

Valorile i-1, i, i+1 se referă la axa X; j-1, j, j+1 la axa Y, iar k și k+1 la succesiunea în timp. Dacă se dezvoltă funcția $\Phi = f(x, y)$ în serie Taylor față de x și se neglijează termenii superiori, începând cu ordinul trei, se obține:

$$\Phi_{i-1,j,k} = \Phi_{i,j,k} - \frac{x_1}{1!} \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} + \frac{x_1^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (3.72)$$

și

$$\Phi_{i+1,j,k} = \Phi_{i,j,k} + \frac{x_2}{1!} \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} + \frac{x_2^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (3.73)$$

de unde rezultă:

$$x_2 \Phi_{i-1,j,k} + x_1 \Phi_{i+1,j,k} = (x_1 + x_2) \Phi_{i,j,k} + \frac{x_2 x_1^2 + x_1 x_2^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (3.74)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} = \frac{2}{x_1 x_2 (x_1 + x_2)} \cdot [x_2 \Phi_{i-1,j,k} + x_1 \Phi_{i+1,j,k} - (x_1 + x_2) \Phi_{i,j,k}] \quad (3.75)$$

Pentru axa y se procedează identic și se obține:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial y^2} = \frac{2}{y_1 y_2 (y_1 + y_2)} \cdot [y_2 \Phi_{i,j-1,k} + y_1 \Phi_{i,j+1,k} - (y_1 + y_2) \Phi_{i,j,k}] \quad (3.76)$$

Variația de entalpie se exprimă sub formă de diferență finită:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} \cong \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} \quad (3.77)$$

Dacă se introduc relațiile (3.75), (3.76) și (3.77) în (3.71) se obține:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = & \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot x_1 x_2 (x_1 + x_2)} \cdot [x_2 \Phi_{i-1,j,k} + x_1 \Phi_{i+1,j,k} - (x_1 + x_2) \Phi_{i,j,k}] + \\ & \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot y_1 y_2 (y_1 + y_2)} \cdot [y_2 \Phi_{i,j-1,k} + y_1 \Phi_{i,j+1,k} - (y_1 + y_2) \Phi_{i,j,k}] \end{aligned} \quad (3.78)$$

În cazul în care distribuția punctelor de discretizare este omogenă de-a lungul celor două axe (caz frecvent utilizat) și notând $x_1 = x_2 = x$, $y_1 = y_2 = y$ se obține:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = & \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \\ & \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}] \end{aligned} \quad (3.79)$$

Ecuția cu diferențe finite face posibilă determinarea variației de entalpie într-un interval de timp $\tau_{k+1} - \tau_k$, în funcție de temperatura punctelor vecine. Dacă se cunoaște distribuția inițială de temperaturi $\Phi_{i,j,0}$ (sau entalpii $H_{i,j,0}$) se poate determina pe baza relației (3.78) sau (3.79) distribuția de temperaturi după un interval dat, rezultând $\Phi_{i,j,1}$. Pe baza acestui rezultat se poate determina distribuția de temperaturi $\Phi_{i,j,2}$ etc. Deci, printr-o metodă iterativă se poate determina evoluția distribuției de temperaturi în cursul răcirii, solidificării semifabricatului.

Ecuția (3.78) este valabilă pentru un punct din interior. Pentru un punct situat pe o suprafață limită, aceasta însă se modifică. Pentru punctele de pe suprafața de separație se scrie ecuația fluxului de căldură la suprafață:

$$W = -\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} \quad (3.80)$$

unde $\Phi_{i,j,k}$ este temperatura la suprafață (limita considerată paralelă cu axa Y).

Expresia $\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x}$ se poate scrie sub formă de diferență finită în funcție de o

temperatură $\Phi_{i+1, j, k}$ a unui punct imaginar situat la distanța $x = x_1$ (pentru simplificare) de suprafață. Fluxul de căldură prin suprafață trebuie să fie:

$$W = \frac{\lambda_0}{2x} \cdot (\Phi_{i-1, j, k} - \Phi_{i+1, j, k}) \quad (3.81)$$

de unde:

$$\Phi_{i+1, j, k} = \Phi_{i-1, j, k} - \frac{2x}{\lambda_0} \cdot W \quad (3.82)$$

Relația (3.75) devine:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i, j, k}}{\partial x^2} = \frac{2}{x^2} \cdot \left[\Phi_{i-1, j, k} - \frac{2x}{\lambda_0} W - \Phi_{i, j, k} \right] \quad (3.83)$$

iar (3.78)

$$\frac{H_{i, j, k+1} - H_{i, j, k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{2\lambda_0}{\rho x^2} \cdot \left[\Phi_{i-1, j, k} - \frac{x}{\lambda_0} W - \Phi_{i, j, k} \right] + \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot y_1 y_2 (y_1 + y_2)} \cdot [y_2 \Phi_{i, j-1, k} + y_1 \Phi_{i, j+1, k} - (y_1 + y_2) \Phi_{i, j, k}] \quad (3.84)$$

Pentru o suprafață paralelă cu axa X se obține (în mod identic):

$$\frac{H_{i, j, k+1} - H_{i, j, k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot x_1 x_2 (x_1 + x_2)} \cdot [x_2 \Phi_{i-1, j, k} + x_1 \Phi_{i+1, j, k} - (x_1 + x_2) \Phi_{i, j, k}] + \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[\Phi_{i, j-1, k} - \frac{y}{\lambda_0} W - \Phi_{i, j, k} \right] \quad (3.85)$$

Pentru un punct de colț rezultă relația:

$$\frac{H_{i, j, k+1} - H_{i, j, k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{2\lambda_0}{\rho x^2} \cdot \left[\Phi_{i-1, j, k} - \frac{x}{\lambda_0} W - \Phi_{i, j, k} \right] + \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[\Phi_{i, j-1, k} - \frac{y}{\lambda_0} W - \Phi_{i, j, k} \right] \quad (3.86)$$

III.5.2 Criteriul de stabilitate a ecuațiilor cu diferențe finite

Una din problemele critice ale aplicării prin iterație a ecuației cu diferențe finite este asigurarea stabilității și acurateții soluției în cursul integrării. Pentru a asigura stabilitatea soluției, adică pentru a împiedica oscilația soluției în cursul integrării, intervalul de timp între iterații și dimensiunile rețelei trebuie ales în conformitate cu criteriile de stabilitate deduse. Acuratețea soluției, adică concordanța cât mai bună cu soluția analitică este de asemenea de dorit. Aceasta depinde de forma ecuației cu diferențe finite și de desimea rețelei.

În concluzie, desimea rețelei se stabilește pornind de la necesitatea găsirii unei rezolvări a următoarei contradicții: pe de o parte folosirea unei rețele mai dese mărește precizia modelului (eroarea introdusă prin ipoteza că suprafața adiacentă

fiecărui nod are aceeași temperatură cu a nodului scade odată cu aria nodului rețelei); pe de altă parte o rețea deasă mărește durata de efectuare a calculelor atât datorită creșterii numărului de noduri, cât și reducerii intervalelor de timp între iterații dictate de condițiile de stabilitate a soluției.

Din analiza stabilității ecuației cu diferențe finite se deduc următoarele criterii:

$$\text{- în interior } \Delta\tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[\frac{1}{x_1 x_2} + \frac{1}{y_1 y_2} \right]} \quad (3.87)$$

$$\text{- pe margine } \Delta\tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[\frac{1}{x_1 x_2} + \frac{1}{y^2} + \frac{W}{\lambda \cdot y} \right]} \quad (3.88)$$

$$\text{- pe colț } \Delta\tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{y^2} + \frac{W}{\lambda \cdot x} + \frac{W}{\lambda \cdot y} \right]} \quad (3.89)$$

Intervalul de timp ales reprezintă de fapt timpul în care procesul nestaționar al transmiterii căldurii este aproximat cu un proces staționar. Din această cauză, cu cât caracteristicile procesului real se abat mai puternic de la cele ale unui proces staționar, cu atât trebuie să fie mai mică durata iterației.

În relațiile (3.78), (3.79), (3.84), (3.85), (3.86) se observă că termenul drept depinde numai de mărimi cunoscute la momentul iterației k . Dacă notăm aceste expresii cu $G_{i,j,k}$ se obține:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = G_{i,j,k} \quad (3.90)$$

Mărimea $G_{i,j,k}$ reprezintă de fapt viteza de variație a entalpiei punctului (i, j) în procesul considerat staționar care începe la momentul τ_k . Cu cât această mărime este mai mare în valoare absolută, cu atât procesul este mai nestaționar, iar intervalul de timp trebuie ales mai mic.

Soluția optimă constă în folosirea unui interval de timp variabil și limitarea variației entalpiei la o valoare fixată ΔH_{\max} , adică:

$$\Delta\tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k = \frac{\Delta H_{\max}}{\max_{(i,j) \in D} |G_{i,j,k}|} \quad (3.91)$$

unde D este domeniul valorilor (i, j) .

Astfel se obține un interval de timp mic atunci când variația entalpiei este mare (la turnare) și un interval mare atunci când aproximarea cu un proces staționar este mai bună.

III.5.3 Modelul bidimensional al solidificării și răcirii semifabricatului

În vederea realizării modelării matematice bidimensionale a unui semifabricat se consideră o secțiune a ansamblului semifabricat-cristalizer care se împarte cu ajutorul unei rețele de discretizare (fig.3.20). Temperatura în fiecare nod reprezintă temperatura medie a suprafeței adiacente nodului, În aceste noduri se scriu ecuațiile cu diferențe finite prezentate anterior.

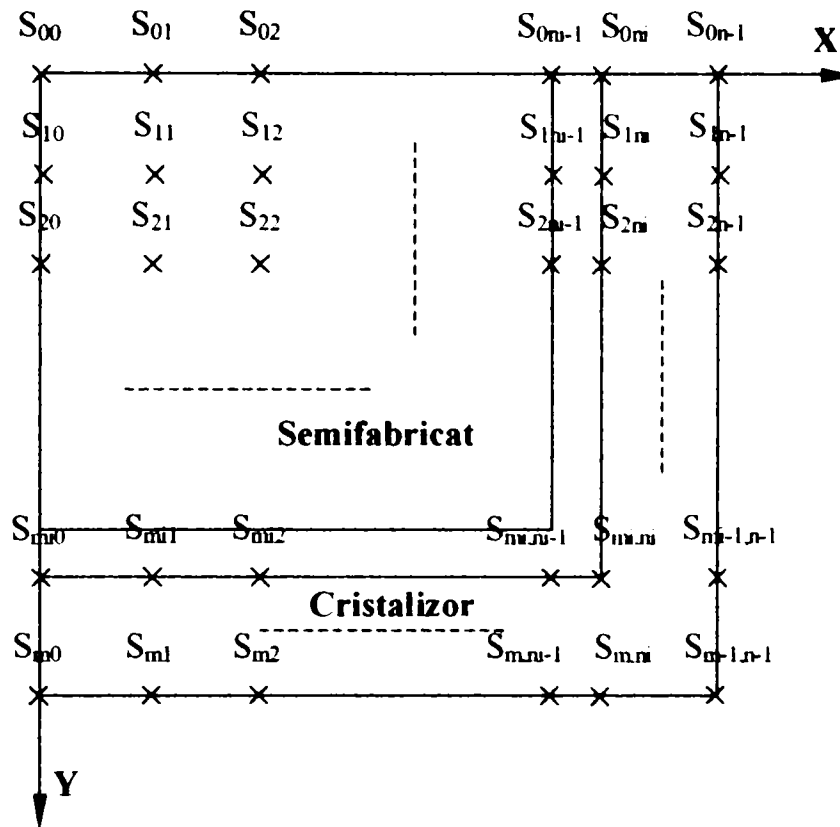


Fig.3.20. Schema rețelei utilizate la aplicarea metodei diferențelor finite

Modelul se realizează pe baza următoarelor ipoteze simplificatoare:

1. Se neglijează transmiterea căldurii pe axa longitudinală, considerând că ea are loc doar în secțiunea orizontală a semifabricatului.
2. Se neglijează variația de densitate
3. Secțiunea cristalizorului se consideră a fi o secțiune echivalentă dreptunghiulară.
4. Se consideră că cristalizorul pierde căldură în mod uniform de pe toate suprafețele.
5. Se consideră că în momentul zero temperatura masei de oțel este uniformă. Pentru nodurile de suprafață este corect să se presupună că în momentul turnării are loc formarea unui strat subțire de oțel solidificat, iar căldura pierdută de acest strat se transmite instantaneu nodurilor de pe suprafața interioară a cristalizorului.

6. Degajarea căldurii latente de topire se face în intervalul lichidus–solidus proporțional cu temperatura.

Ca urmare a ipotezelor considerate, ansamblul semifabricat-cristalizer este simetric față de axa longitudinală a semifabricatului. Sistemul de axe va avea originea în centrul semifabricatului, iar calculele se vor efectua numai pentru x și y pozitivi.

Fluxul de căldură transmis apei de răcire în zona primară și secundară de răcire se calculează cu relațiile:

$$W = K \cdot (T_M - T_A)^{1,25} \quad (3.92)$$

$$W = K \cdot (T_S - T_A)^{1,25} \quad (3.93)$$

unde:

- T_S este temperatura absolută a suprafeței semifabricat, [$^{\circ}\text{K}$];
- T_M – temperatura absolută a suprafeței interioare a cristalizerului, [$^{\circ}\text{K}$];
- T_A – temperatura apei de răcire [$^{\circ}\text{K}$].
- K – constanta de convecție.

III.5.4. Desfășurarea calculelor și funcționarea programului

Pentru a implementa un algoritm care să urmeze modelul descris anterior, avem nevoie de următoarele date inițiale:

- Temperatura ambiantă.
- Temperatura de turnare.
- Temperatura inițială a cristalizerului.
- Dimensiunile semifabricatului și grosimea peretelui cristalizerului.
- Numărul nodurilor din semifabricat și cristalizer după cele două axe.
- Valorile conductibilității termice a oțelului și cuprului în funcție de temperatură.
- Valorile entalpiei oțelului și cuprului în funcție de temperatură. În cazul oțelului, această dependență funcțională trebuie să includă căldura latentă de topire.
- Constanta de convecție K (formulele 3.92 și 3.93).
- Condiția de evacuare a semifabricatului din instalație.
- Condiția de oprire a desfășurării algoritmului. Aceasta poate fi: oprire manuală, după un anumit timp, sau la o temperatură minimă, medie sau maximă a semifabricatului specificată.

– Maximul variației entalpiei la o iterație.

Relația (3.78) permite calculul entalpiei unui nod în funcție de entalpia aceluiași nod la momentul precedent și temperaturile reduse ale nodului respectiv și a celor adiacente. Pentru a continua iterarea, avem nevoie să deducem temperatura din entalpie, apoi temperatura redusă din temperatură. La o iterație, avem nevoie de următoarele transformări:

$$\dots \rightarrow \Phi \rightarrow H \rightarrow T \rightarrow \Phi \rightarrow \dots$$

Pentru a efectua calculele, avem nevoie de dependențele funcționale $\lambda(T)$, $\Phi(T)$, $T(\Phi)$, $H(T)$ și $T(H)$. Acestea trebuie să fie suficient de precise, dar și să fie executate rapid de către calculator. De exemplu, dacă avem o rețea de 50×50 noduri și un număr de 150.000 iterații (situație obișnuită), aceste funcții vor fi calculate de 375.000.000 ori. Rezultă de aici că aceste funcții sunt critice din punct de vedere al timpului de execuție.

Graficele și tabelele următoare corespund mărcii de oțel OL37-2k.

III.5.4.1. Conductibilitatea termică

Conductibilitatea termică a oțelului și cuprului este dată în literatură sub formă de tabele sau grafice. Reprezentând grafic o astfel de dependență, se observă ca ea poate fi aproximată foarte bine printr-o funcție pe două intervale: un arc de parabolă până la o temperatură ($T_{cr} = 768 \text{ }^\circ\text{C}$, este temperatura punctului Curie), și o valoare constantă peste această temperatură. Funcția are forma:

$$\lambda(T) = \begin{cases} a \cdot T^2 + b \cdot T + c, & T \leq T_{cr} \\ \lambda_{cr}, & T > T_{cr} \end{cases} \quad (3.94)$$

unde, pentru a asigura continuitatea funcției în punctul $T = T_{cr}$ se calculează λ_{cr} cu:

$$\lambda_{cr} = a \cdot T_{cr}^2 + b \cdot T_{cr} + c \quad (3.95)$$

Parabola este un polinom de regresie de ordinul 2, ai cărui coeficienți sunt calculați prin metoda celor mai mici pătrate. Valorile obținute sunt:

$$a = -3,325347756276 \cdot 10^{-5}$$

$$b = -8,628845527225 \cdot 10^{-3}$$

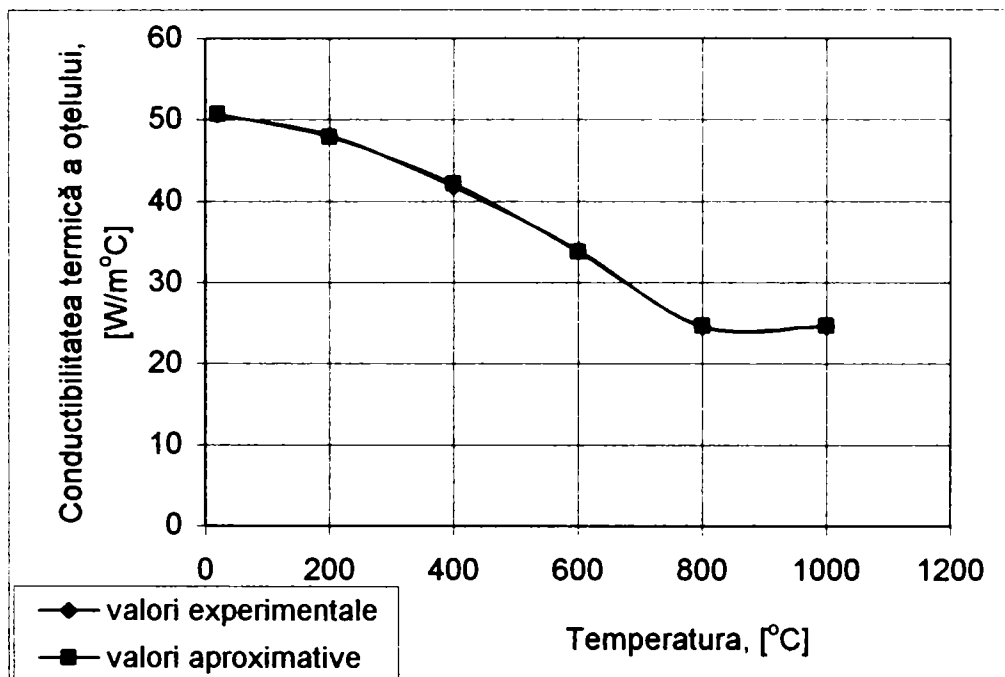
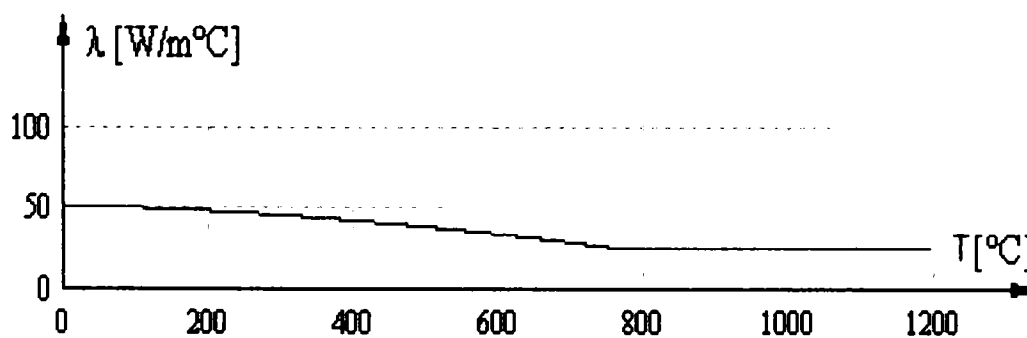
$$c = 5,0928618576856$$

În tab.3.2 se prezintă valorile experimentale [36] și cele approximate prin această metodă, iar în figura 3.21 aceleași date sub formă de grafic.

În fig.3.22 sunt prezentate dependența conductibilității de temperatură rezultată în urma simulării unor condiții practice. Se poate observa similitudinea celor două grafice, atât în ce privește forma curbei cât și valorile variabilelor.

Tab. 3.2

T [°C]	λ [W/m°C] experimental	λ [W/m°C] aproximat
20	50,66	50,743
200	48,13	47,873
400	41,85	42,157
600	33,95	33,780
800	24,65	24,688
1000	24,65	24,688

Fig.3.21. Dependența $\lambda(T)$, valori experimentale (punctele) și approximateFig.3.22. Dependența $\lambda(T)$, rezultată din simulare

III.5.4.2 Temperatura redusă

Faptul că $\lambda(T)$ are forma dată de (3.96) ușurează mult calculul integralei

$$\Phi(T) = \int_{T_0}^T \frac{\lambda}{\lambda_0} dT \quad (3.96)$$

deoarece se poate aplica o metodă analitică. Pentru simplificare (amintim că T_0 este ales arbitrar, iar $\lambda_0 = \lambda(T_0)$), alegem $T_0 = 0^\circ\text{C}$. Astfel, deoarece $\lambda_0 = \lambda(0) = c$, relația (3.98) devine:

$$\Phi(T) = \frac{1}{c} \cdot \int_{T_0}^T \lambda(T) dT = \begin{cases} \frac{a}{3c} T^3 + \frac{b}{2c} T^2 + T, & T \leq T_{cr} \\ \frac{a}{3c} T_{cr}^3 + \frac{b}{2c} T_{cr}^2 + T_{cr} + (T - T_{cr}) \frac{\lambda_{cr}}{c}, & T > T_{cr} \end{cases} \quad (3.97)$$

sau:

$$\Phi(T) = \begin{cases} T \left(\frac{a}{3c} T^2 + \frac{b}{2c} T + 1 \right), & T \leq T_{cr} \\ T \frac{\lambda_{cr}}{c} + T_{cr} \left(\frac{a}{3c} T_{cr}^2 + \frac{b}{2c} T_{cr} + 1 - \frac{\lambda_{cr}}{c} \right), & T > T_{cr} \end{cases} \quad (3.98)$$

III.5.4.3 Dependența entalpiei de temperatură

Dependența $H(T)$ este dată în literatură sub formă tabelară sau grafică, dar numai pentru temperaturi inferioare punctului solidus. Pentru a continua și peste aceasta avem nevoie de temperaturile solidus și lichidus, căldura latentă de topire a oțelului și căldura specifică a oțelului topit. În tab.3.3 sunt date valorile pentru H în funcție de temperatură, ultimele 3 linii fiind calculate pe baza mărimilor enumerate mai sus. Funcțiile $H(T)$ și $T(H)$ se obțin prin interpolare polinomială.

Tab. 3.3

Nr.	T [°C]	H [kcal/kg]	H [kJ/kg]
0	100	11,2	46,88
1	200	22,6	94,59
2	300	36,2	151,52
3	400	49,9	208,86
4	500	64,3	269,13
5	600	82,0	343,21
6	700	101,0	422,74
7	800	130,8	547,46
8	900	148,1	619,87
9	1000	164,6	688,93
10	1100	181,7	760,51
11	1200	198,6	831,24
12	1300	207,5	868,49
13	1440	220,0	920,64
14	1500	284,0	1188,51
15	1600	310,6	1300,27

Figura 3.23 prezintă funcția $H(T)$ sub formă grafică.

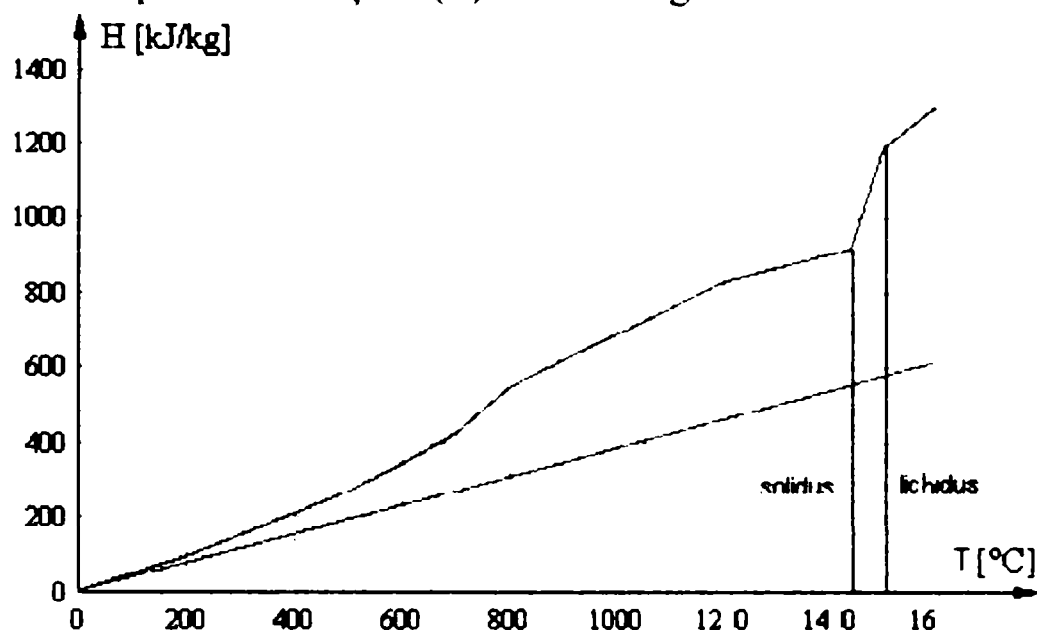


Fig.3.23. Dependența $H(T)$

III.5.4.4 Relațiile de calcul utilizate în program

Din cauza utilizării simetriei centrale, apar situații în care unul (sau amândoi) din indicii i, j vor fi -1 . Aceasta se întâmplă atunci când se calculează un nod situat pe una din axele X, Y sau în origine. Astfel sunt încă trei cazuri distincte, chiar dacă rezolvarea lor este simplă:

$$\begin{aligned}\Phi_{-1,j,k} &= \Phi_{1,j,k} \\ \Phi_{i,-1,k} &= \Phi_{i,1,k} \\ \Phi_{-1,-1,k} &= \Phi_{1,1,k}\end{aligned}\quad (3.99)$$

În scopul simplificării calculului, se utilizează rețele de discretizare cu noduri distribuite uniform de-a lungul axelor X și Y . De asemenea se rescriu relațiile prezentate anterior pentru a reduce numărul cazurilor distincte. Astfel:

$$1. \text{ Originea axelor } (i = j = 0): \quad \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [0 + 2\Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [0 + 2\Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}] \quad (3.100)$$

$$2. \text{ Axa } Y \text{ } (i = 0): \quad \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [0 + 2\Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}] \quad (3.101)$$

$$3. \text{ Axa X } (j = 0): \quad \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [0 + 2\Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}] \quad (3.102)$$

$$4. \text{ Interior:} \quad \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}] \quad (3.103)$$

$$5. \text{ Margine Y } (i = n-1): \quad \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot \left[2\Phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} W - 2\Phi_{i,j,k} \right] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}] \quad (3.104)$$

$$6. \text{ Margine X } (j = m-1): \quad \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[2\Phi_{i,j-1,k} - \frac{2y}{\lambda_0} W - 2\Phi_{i,j,k} \right] \quad (3.105)$$

$$7. \text{ Colț:} \quad \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot \left[2\Phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} W - 2\Phi_{i,j,k} \right] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[2\Phi_{i,j-1,k} - \frac{2y}{\lambda_0} W - 2\Phi_{i,j,k} \right] \quad (3.106)$$

Se observă că toate relațiile de mai sus pot fi scrise sub forma:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [A_x + B_x - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [A_y + B_y - 2\Phi_{i,j,k}] \quad (3.107)$$

unde:

$$A_x = \begin{cases} 0, & i = 0 \\ \Phi_{i-1,j,k}, & 0 < i < n-1 \\ 2\Phi_{i-1,j,k}, & i = n-1 \end{cases} \quad A_y = \begin{cases} 0, & j = 0 \\ \Phi_{i,j-1,k}, & 0 < j < m-1 \\ 2\Phi_{i,j-1,k}, & j = m-1 \end{cases} \quad (3.108)$$

$$B_x = \begin{cases} 2\Phi_{i+1,j,k}, & i = 0 \\ \Phi_{i+1,j,k}, & 0 < i < n-1 \\ -\frac{2x}{\lambda_0} W, & i = n-1 \end{cases} \quad B_y = \begin{cases} 2\Phi_{i,j+1,k}, & j = 0 \\ \Phi_{i,j+1,k}, & 0 < j < m-1 \\ -\frac{2y}{\lambda_0} W, & j = m-1 \end{cases} \quad (3.109)$$

Relațiile (3.107)–(3.109) sunt mult avantajoase față de (3.100)–(3.106), deoarece deciziile se iau numai pentru unul din indicii i, j și nu pentru amândoi. Aceasta conduce la o simplificare serioasă a algoritmului și la mărirea vitezei de execuție a programului.

III.5.4.5 Prezentarea programului conceput

Programul de calcul este realizat în limbajul C++ și funcționează sub platforme Win32 (adică Windows 95, 98, Me, NT4, 2000, XP – cu procesor Intel). Pentru interfața grafică, programul folosește MFC (Microsoft Foundation Classes), o bibliotecă de clase care încapsulează funcționalitatea interfeței standard de programare Windows (API – Application Program Interface). Funcțiile C standard (cum sunt `fopen()` sau `exit()`), care nu sunt parte din Windows API necesită o altă bibliotecă: MSVCRT (Microsoft Visual C Runtime). Graficele tridimensionale sunt realizate cu implementarea Windows a specificației OpenGL (Open Graphics Library). Aceste biblioteci dinamice (MFC42.DLL, MSVCRT.DLL, OPENGL32.DLL și GLU32.DLL) sunt instalate implicit cu orice sistem de operare din cele menționate, cu excepția Windows 95 – unde trebuie instalate explicit [37].

Sursa programului are o construcție modulară și orientată pe obiecte. Un modul C++ constă în general dintr-o pereche de fișiere: unul cu extensia .H (de la header–antet) care conține declarații de funcții și/sau clase, fiind folosit la interfațarea cu celelalte module, și unul cu extensia .CPP (de la C++) care conține definiții (implementări ale funcțiilor și claselor declarate în header). Programul de față conține 28 astfel de module, însă numai 4 dintre acestea privesc în mod direct calculele și vor fi prezentate în anexa III. Celelalte sunt auxiliare acestora sau implementează grafice, ferestre, dialoguri etc.

Cele mai importante clase C++ implicate în procesul de simulare sunt:

– Material – conține descrierea unui material (oțel sau cupru). Această clasă implementează dependențele funcționale $\lambda(T)$, $\Phi(T)$, $T(\Phi)$ prin metode analitice și $H(T)$ și $T(H)$ prin interpolare polinomială, așa cum s-a arătat în subcapitolele III.5.4.1, III.5.4.2 și III.5.4.3. Clasa dispune de metode pentru serializare (poate fi scrisă într-un fișier sau citită dintr-unul).

– HeatFlowCalculator – această clasă realizează calculele corespunzătoare unei singure iterații, conform relațiilor (3.105), (3.106) și (3.107). Constructorul acestei clase are ca argumente două referințe: una către clasa MetalDataFile (descrisă mai jos) care a creat-o și una către o altă instanță a HeatFlowCalculator care reprezintă momentul de timp precedent. Dacă această referință este invalidă (NULL), atunci este vorba de prima iterație, iar acțiunea va fi de a aplica valorile inițiale pentru T , Φ și H . Pentru a reduce la minim necesitatea conversiilor între T , Φ și H , clasa conține trei matrici distincte corespunzătoare acestor mărimi în nodurile rețelei.

Toate calculele sunt realizate în virgulă mobilă dublă precizie, pentru a reduce erorile propagate. Acestea se datorează faptului că, deși precizia este destul de mare atât pentru simplă precizie (float – 32 biți, 8 zecimale) cât și în dublă precizie (double – 64 biți, 17 zecimale), simularea conduce la un șir foarte lung de valori care sunt calculate unele din altele.

După terminarea calculelor, numai temperaturile vor fi salvate în fișierul gestionat de MetalDataFile în simplă precizie – suficientă pentru construirea de grafice.

– SequenceInterpolator – deoarece clasele care implementează grafice au nevoie de funcții continue, iar temperatura unui nod este considerată media temperaturii suprafeței adiacente, este necesară interpolarea valorilor obținute prin calcul pentru a obține o funcție continuă. Această sarcină îi revine clasei SequenceInterpolator. Interpolarea este liniară și se realizează mai întâi după axa X și apoi după Y. Contrar aparențelor, rezultatul nu este o suprafață plană ci un hiperboloid mărginit de patru segmente de dreaptă pe care le atinge.

Clasa MetalDataFile, atunci când este în starea de furnizor de date, păstrează în memorie două instanțe ale SequenceInterpolator. Acestea sunt folosite pentru încă o interpolare liniară, de data aceasta în timp.

– CProgressDialog – este o derivată a clasei MFC CDialog și implementează un dialog modal (care nu permite accesul la fereastra principală). Aceasta se deschide atunci când se pornește procesul de calcul – pe care îl controlează indirect – și se închide la terminarea calculelor fie prin comandă manuală, fie la atingerea condiției de oprire (fig.3.24).

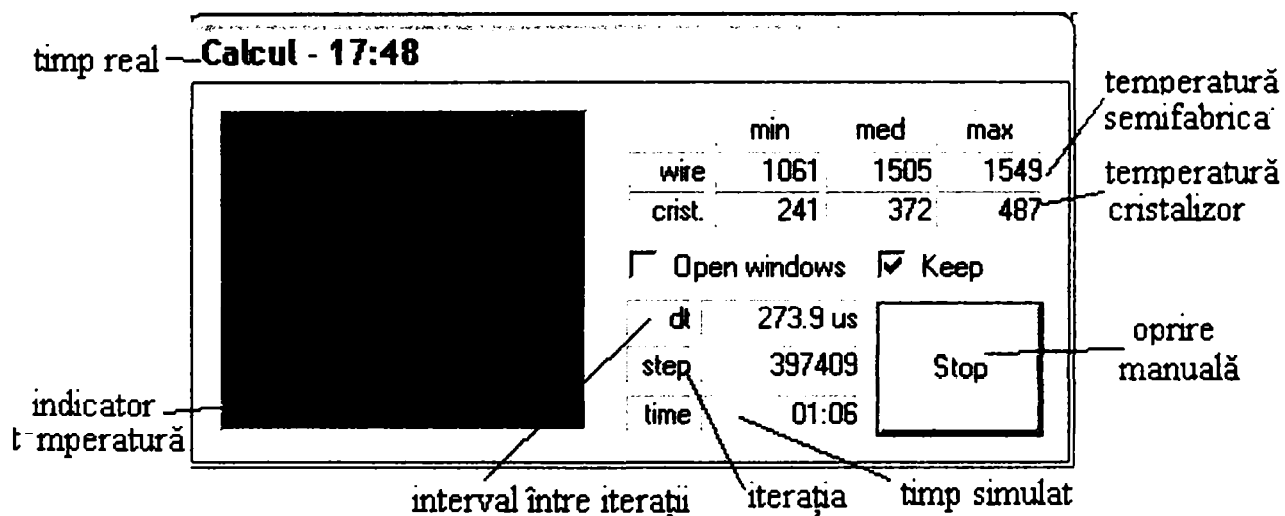


Fig.3.24. Fereastra de dialog pentru progresul calculelor

La inițializarea dialogului se pornește un fir de execuție (thread) separat de cel principal, cu care va rula în paralel. Acest thread efectuează de fapt calculele

apelând funcția calculate() a clasei MetalDataFile. La rândul ei, aceasta apelează funcția callback() a clasei CProgressDialog la fiecare iterație, ceea ce permite actualizarea datelor afișate. Deoarece este vorba de calcule intensive și îndelungate thread-ul are nivel de prioritate scăzut (-2), ceea ce înseamnă că va ceda timp altor programe dacă este cazul (se poate lucra bine în același timp cu altceva).

Temperaturile sunt indicate prin intermediul unui gradient de culoare, cu valorile: roșu pentru temperatura de turnare, albastru pentru temperatura ambiantă și verde pentru media lor. Orice temperatură intermediară este o combinație a acestora.

– MetalDataFile – această clasă gestionează un fișier temporar, în care sunt scrise datele în procesul de calcul și din care sunt citite pentru construcția de grafice. S-a folosit un fișier și nu memoria pentru că dimensiunea datelor rezultate în urma calculelor poate fi foarte mare și este în plus și imprevizibilă. Fișierul este șters de către destructorul acestei clase (atunci când se termină programul), dar poate fi copiat în alt loc și utilizat mai târziu prin comenzi din meniu.

Salvarea datelor în fișier nu are loc neapărat la fiecare iterație – nu ar avea rost, ținând cont că la momentul inițial și la evacuare intervalul dintre iterații este de ordinul milisecundelor – ci numai dacă intervalul de la ultima salvare este de cel puțin 5 secunde în timp simulat. Astfel se asigură o dimensiune rezonabilă a fișierului fără să se piardă rezoluția simulării.

Această clasă conține bucla principală de calcul și instanțe sau referințe către instanțe ale claselor precedente. Există o singură instanță globală a MetalDataFile.

III.5.5. Rezultatele și interpretarea simulărilor

Pentru toate simulările prezentate în continuare s-au folosit caracteristicile mărcii de oțel OL37-2k, și anume:

- masa specifică (densitatea) $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$;
- temperatura solidus $T_{\text{sol}} = 1464 \text{ }^\circ\text{C}$;
- temperatura lichidus $T_{\text{lich}} = 1522 \text{ }^\circ\text{C}$;
- căldura latentă de topire $q_t = 64 \text{ kcal/kg} = 267,87 \text{ kJ/kg}$;
- căldura specifică a fazei lichide $c_l = 1,118 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$;
- dependențele funcționale $\lambda(T)$, $\Phi(T)$ și $H(T)$ prezentate anterior.

Datele ambientale folosite sunt:

- temperatura mediului ambiant 20°C ;
- temperatura de turnare 1550°C ;

- constanta de convecție $K = 15$.

Simulările sunt realizate cu următoarele date:

- numărul nodurilor de discretizare pentru semifabricat 20×20 ;
- numărul nodurilor de discretizare pentru cristalizor 7×7 ;
- maximul variației entalpiei într-o iterație 10 J/kg .

Simularea s-a realizat pentru blmurile cu secțiune $240 \times 270 \text{ mm}$.

Datele sunt stabilite și introduse în program prin intermediul unei ferestre de preluare a datelor, prezentată în fig.3.25. Cu cât numărul de noduri de discretizare este mai mare (atât pentru cristalizor cât și pentru semifabricat) și respectiv maximul variației entalpiei într-o iterație mai mic, cu atât timpul real de simulare este mai mare. În cazul datelor prezentate anterior, timpul real de simulare a fost $7,25 \text{ min}$ pentru un timp simulat de $13,33 \text{ min}$. Dacă crește variația entalpiei într-o iterație la 100 J/kg , timpul real de simulare a fost de $1,06 \text{ min}$ (din care $1,04 \text{ min}$ pentru parcurgerea cristalizorului de către secțiunea considerată în simulare) și un timp simulat de $13,38 \text{ min}$.

Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1555	°C
Dimensiunile firului	270 x 240	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	20 x 20	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	7 x 7	-
Maximul variației entalpiei / iterație	10	J/kg
Viteza de turnare	800	mm/min
Înălțimea cristalizorului	900	mm
Înălțimea camerei de ceata	10000	mm
Putere disipata in cristalizor	626	kW
Putere disipata la r. s.	5350	kW
<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> OK Cancel Reset </div>		

Fig.3.25. Fereastră de dialog pentru stabilirea datelor de rulare a programului

Rularea programului poate fi întreruptă în orice moment cu mențiunea că nu

poate fi pornit din același moment de timp ci trebuie rulat programul de la început. Pentru o mai bună ilustrare a funcționării programului, am efectuat capturi ale ecranului la diferite momente de timp, figuri prezentate mai jos, din care se pot obține informații privind temperaturile din fir și cristalizor și timpul simulat până la momentul respectiv de timp real.

Astfel, în ceea ce urmează sunt prezentate ferestrele de dialog rezultate la 10s (fig.3.26), 40s (fig.3.27), 1,06min (înainte de ieșirea suprafeței considerate din cristalizor – fig.3.28) și la ieșirea din zona de răcire secundară, respectiv 13,33min timp simulat (fig.3.29).

La oprirea procesului de simulare, programul prezintă opțiunea de afișare a variației parametrilor simulați în timp (fig.3.30).

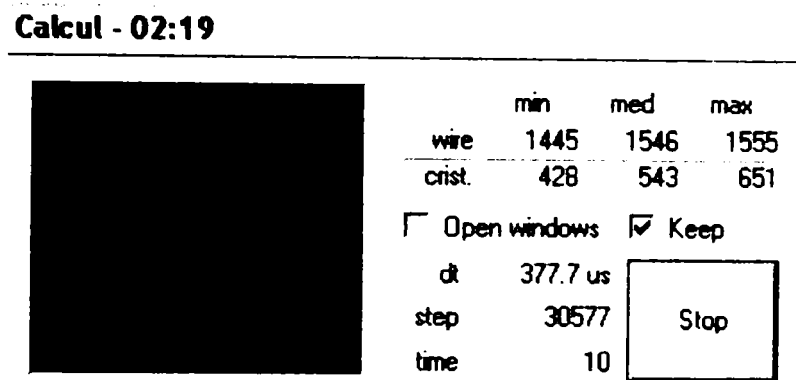


Fig.3.26. Fereastra de dialog la 2,19min timp real, respectiv 10s timp simulat

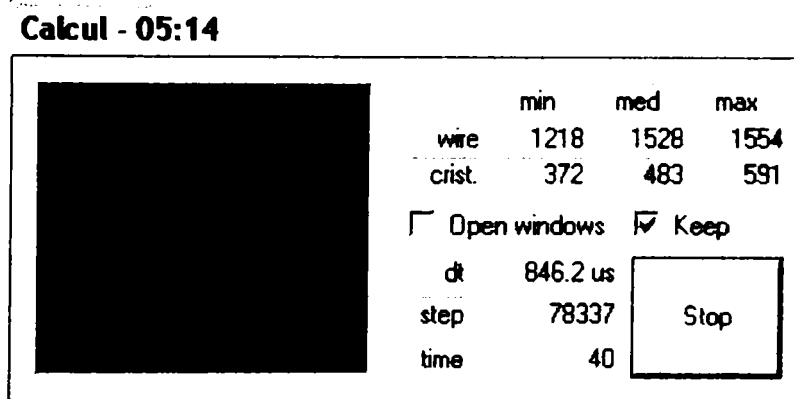


Fig.3.27. Fereastra de dialog la 5,14min timp real, respectiv 40s timp simulat

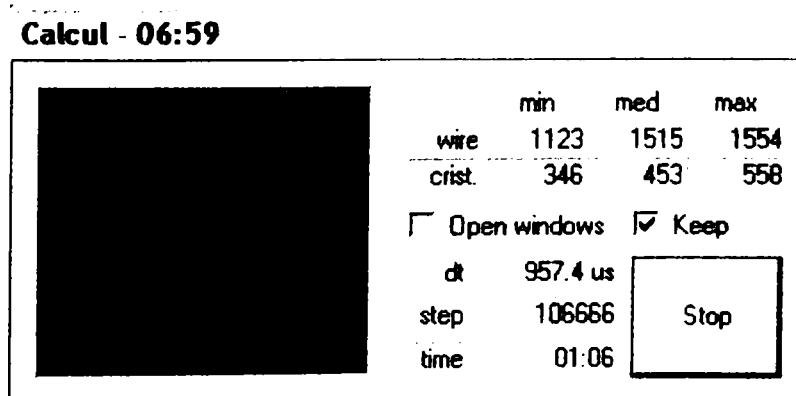


Fig.3.28. Fereastra de dialog la 6,59min timp real, respectiv 1,06min timp simulat

Calcul - 07:25

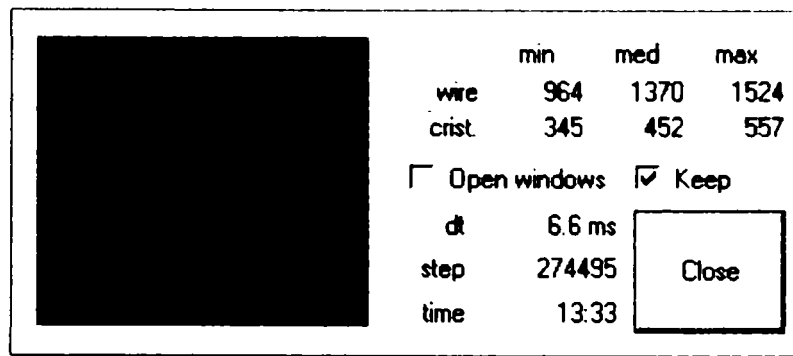


Fig.3.29. Fereastra de dialog la 7,25min timp real, respectiv 13,33 timp simulat (sfârșitul rulării programului)

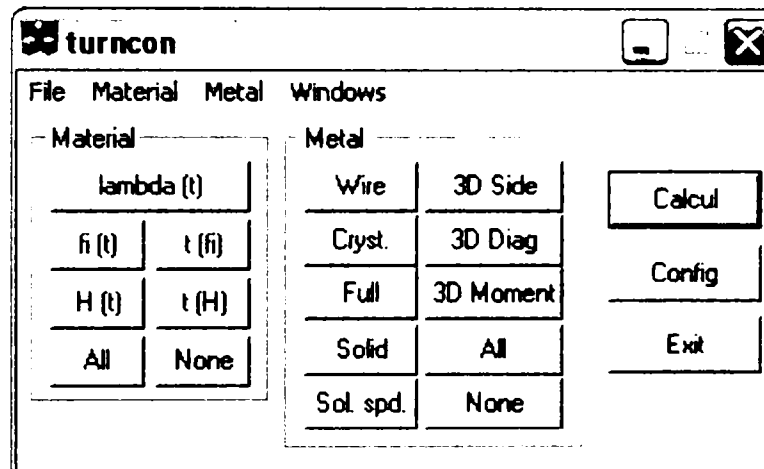


Fig.3.30. Interfața principală a programului

O primă dependență obținută o reprezintă variația temperaturii în semifabricat în funcție de timp (fig.3.31). Distribuția punctelor discretizate este de asemenea prezentată.

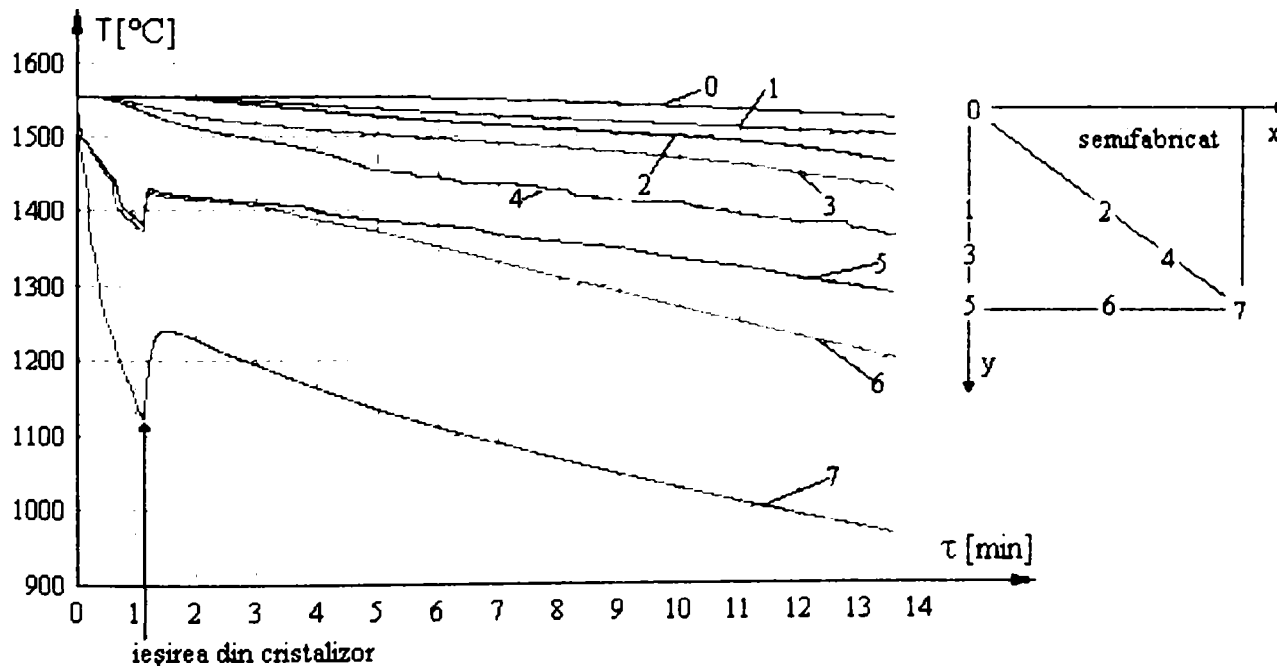


Fig.3.31. Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp

Se remarcă scăderea lentă a temperaturii punctelor aflate spre centrul semifabricatului dar și modul de variație a temperaturii din straturile mai aproape de suprafața firului.

La un moment de timp (în cazul prezentat egal cu 1,07min), când are loc ieșirea suprafeței considerate din cristalizor are loc, în straturile superioare ale semifabricatului o creștere a temperaturii (cu circa 100°C în colț și cu 35-50°C în punctele 5 și 6 ale suprafeței). Această creștere a temperaturii se datorează lipsei de răcire a firului imediat după ieșirea acestuia din cristalizor până în dreptul primului inel al răcirii secundare. După acest moment, răcirea și totodată solidificarea firului are loc normal, temperaturile înregistrate corespunzând cu cele măsurate (pentru suprafață) și prezentate anterior (tab.3.4).

Tab.3.4. Comparația valorilor măsurate și a celor obținute în urma simulării

Puncte măsurare	Interval de variație a temperaturii măsurare, [°C]	Temperaturi rezultate în urma simulării, [°C] în punctele de pe suprafața semifabricatului:		
		5	6	7
1	1286-1400	1405,4	1397,4	1259,8
2	1205-1365	1378,6	1360,5	1197,7
3	1130-1345	1359,8	1339,2	1130,5
4	960-1175	1200,3	1168,8	968,5

Trebuie specificat și faptul că simularea este realizată doar pentru răcirea primară și secundară și nu pentru întregul parcurs al firului în instalație. Astfel se explică valorile încă mari ale temperaturii oțelului din interiorul semifabricatului (straturile din mijloc) dar care scad până sub valoarea temperaturii solidus până la momentul în care semifabricatul este debitat.

În ceea ce privește distribuția temperaturilor în cristalizor (care preia căldura cedată de semifabricat și o cedează la rândul lui apei de răcire), acesta este prezentată în fig.3.32. Și în acest caz am prezentat alăturat modul de amplasare a punctelor de discretizare.

Dacă la începutul turnării temperaturile din cristalizor (în punctele discretizate) au fost relativ ridicate: la 10s au variat între 428-651°C, acestea au scăzut treptat, pe măsură ce suprafața a înaintat în cristalizor, ajungând ca după 40s de la începutul turnării temperaturile din peretele interior al cristalizorului să varieze între 372-591°C iar la ieșirea suprafeței din cristalizor să ajungă la 345-557°C (la 1,07min de la începutul turnării). Acest moment este de altfel este marcat pe grafic prin scăderea bruscă a temperaturii tuturor punctelor discretizate.

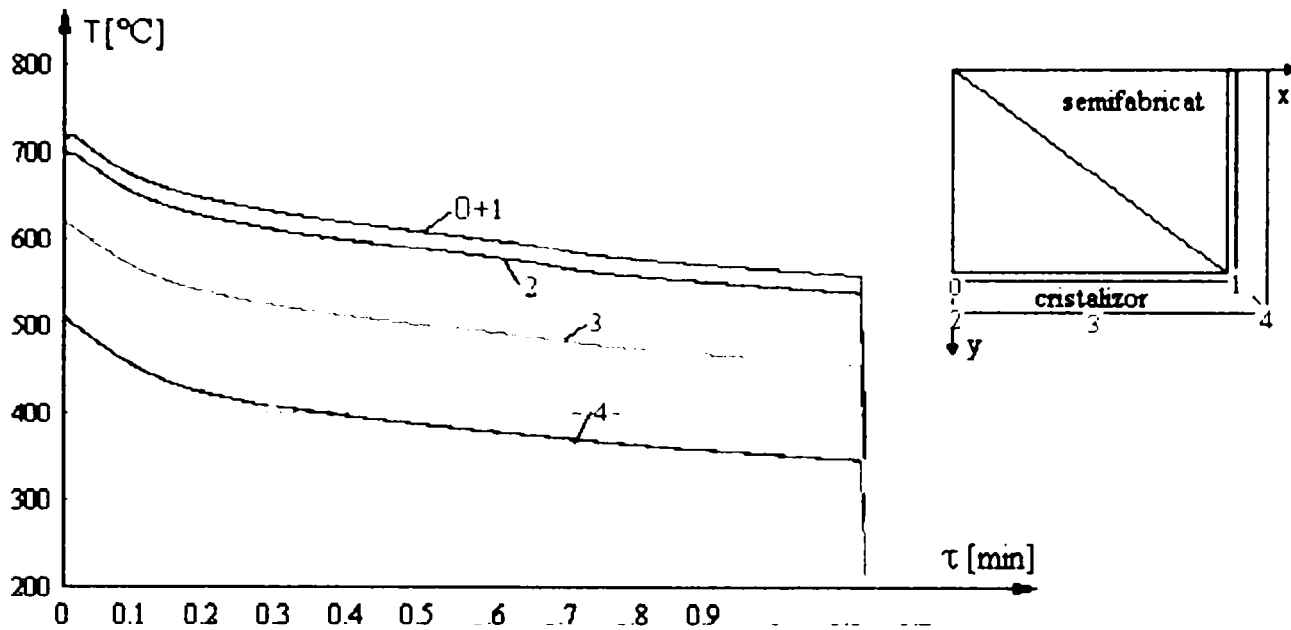


Fig.3.32. Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp

O imagine de ansamblu se poate obține din diagrama cumulată a temperaturilor, atât din fir cât și din peretele cristalizorului (fig.3.33).

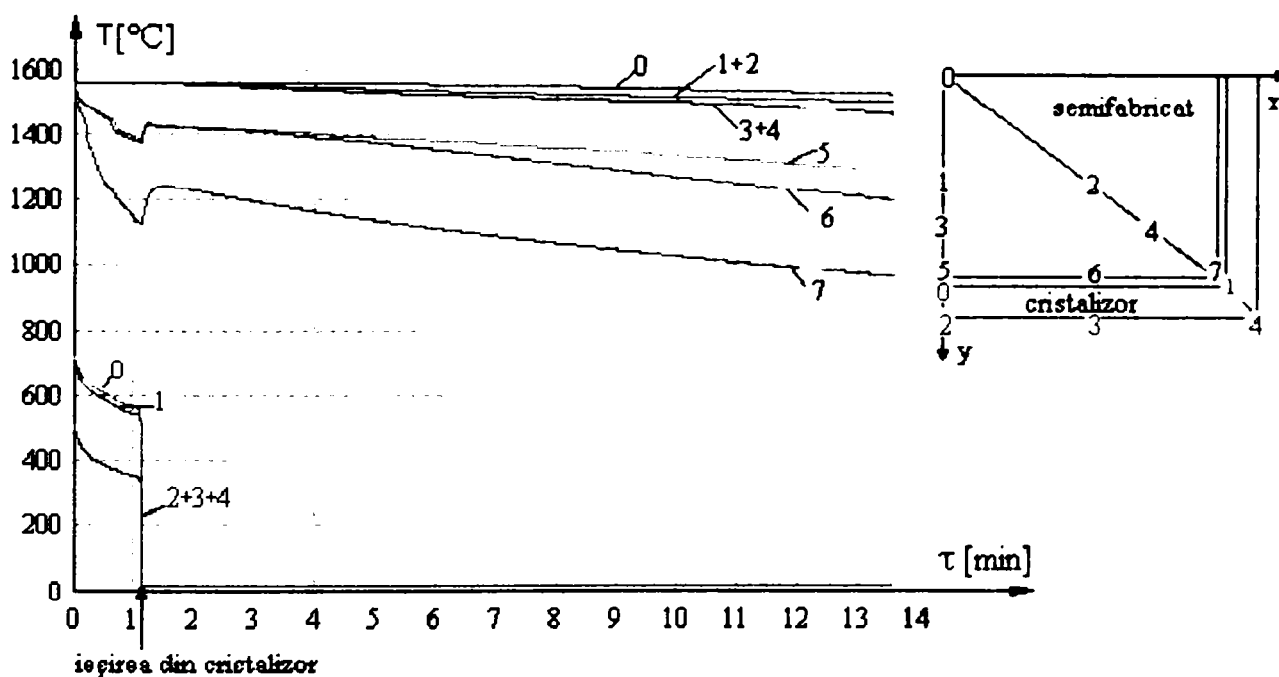


Fig.3.33. Variația temperaturii din fir și cristalizor, în funcție de timp

Se disting astfel cele două zone de răcire, respectiv răcirea primară din cristalizor (când variază atât temperaturile din fir cât și cele din cristalizor) și răcirea secundară (când sunt figurate doar temperaturile din fir). Cele două zone sunt delimitate de momentul ieșirii secțiunii considerate din cristalizor când temperaturile din fir cresc brusc iar cele din peretele cristalizorului scad.

Un alt tip de distribuție a temperaturilor din semifabricat în momentul ieșirii secțiunii considerate din zona de răcire secundară este prezentat în fig.3.34.

Suprafața de regresie obținută este corespunzătoare unui sfert din secțiunea semifabricatului, fiind similară și pentru celelalte părți ale secțiunii. Din punct de vedere a valorilor temperaturilor, colțul semifabricatului este acela care se răcește cel mai intens iar centrul – cel mai lent.

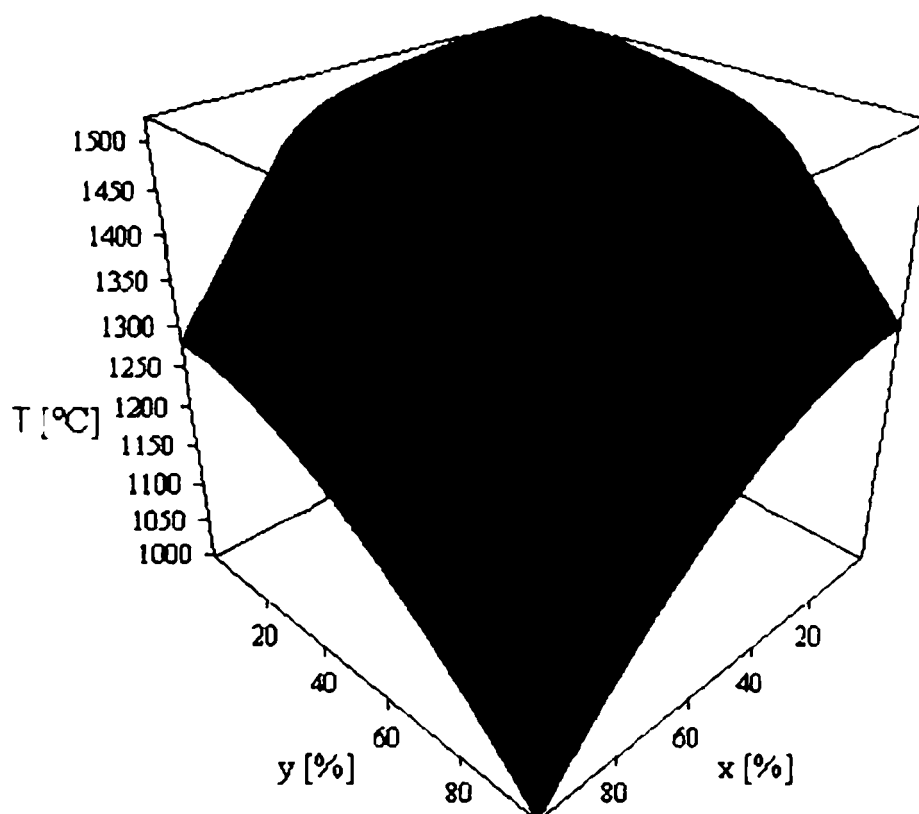


Fig.3.34. Distribuția temperaturilor în semifabricatul cu secțiune 240x270mm la 13,33min de la începutul turnării

Interfața principală a programului mai permite și obținerea distribuției temperaturii după o anumită axă (fig.3.35) sau după diagonală (fig.3.36), în funcție de timp.

La o primă vedere cele două variații sunt similare ca și alură; la distribuția temperaturilor după o latură (s-a considerat axa x), saltul de temperatură la ieșirea din cristalizor nu este atât de mare ca în cazul distribuției temperaturilor după diagonală, caz în care colțul (respectiv oțelul din acea zonă) este cel care preia cantitatea cea mai mare de căldură și ca atare este cel care se încălzește cel mai mult.

Și în aceste cazuri, distribuțiile sunt prezentate la momentul ieșirii din zona de răcire secundară (aproximativ 11m sub cristalizor).

Tot pe baza programului TURNCON s-a obținut și modul de variație în timp a vitezei de solidificare. Este vorba de o viteză de solidificare calculată între două iterații consecutive, ceea ce explică în parte și aspectul oscilant al curbelor prezentate în fig.3.37.

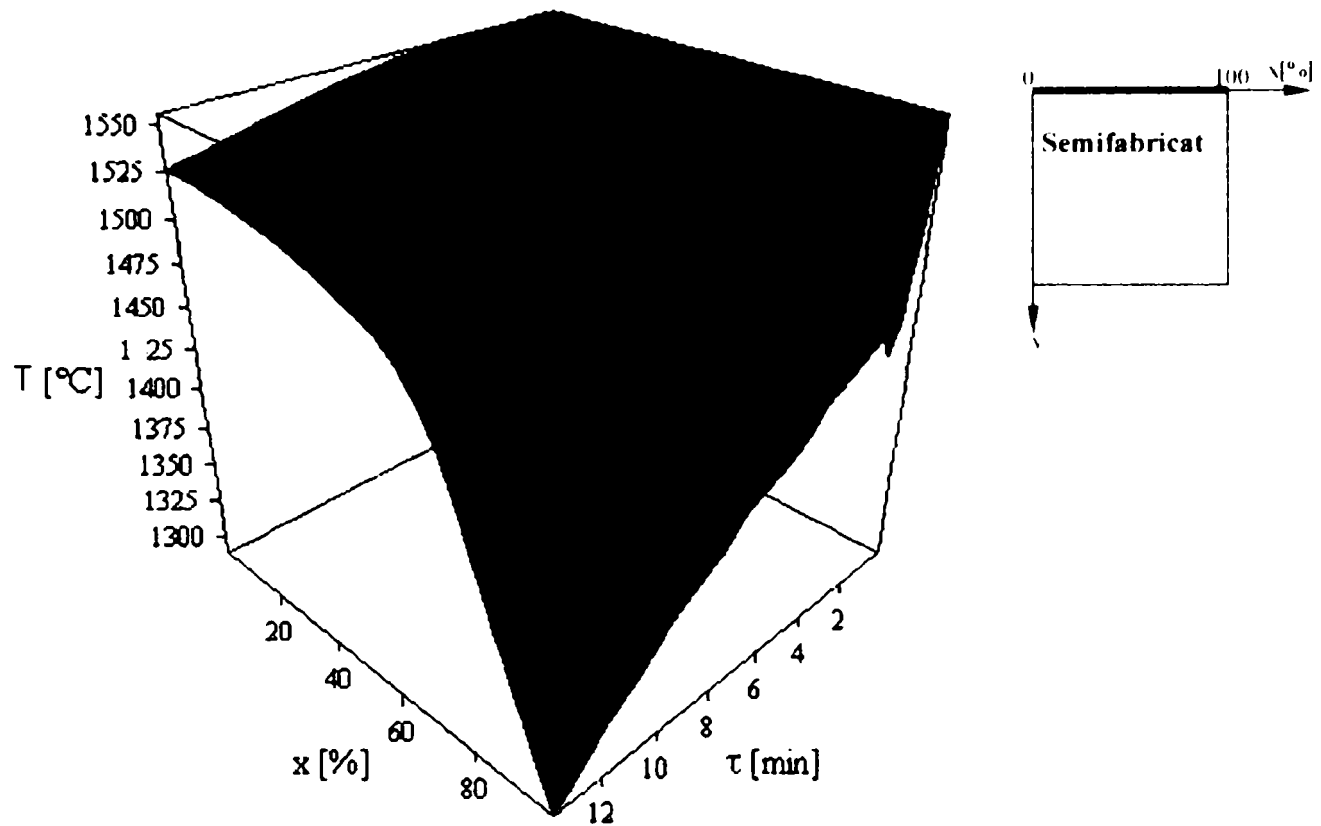


Fig.3.35. Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul axei x pentru $y = 0$, în funcție de timp

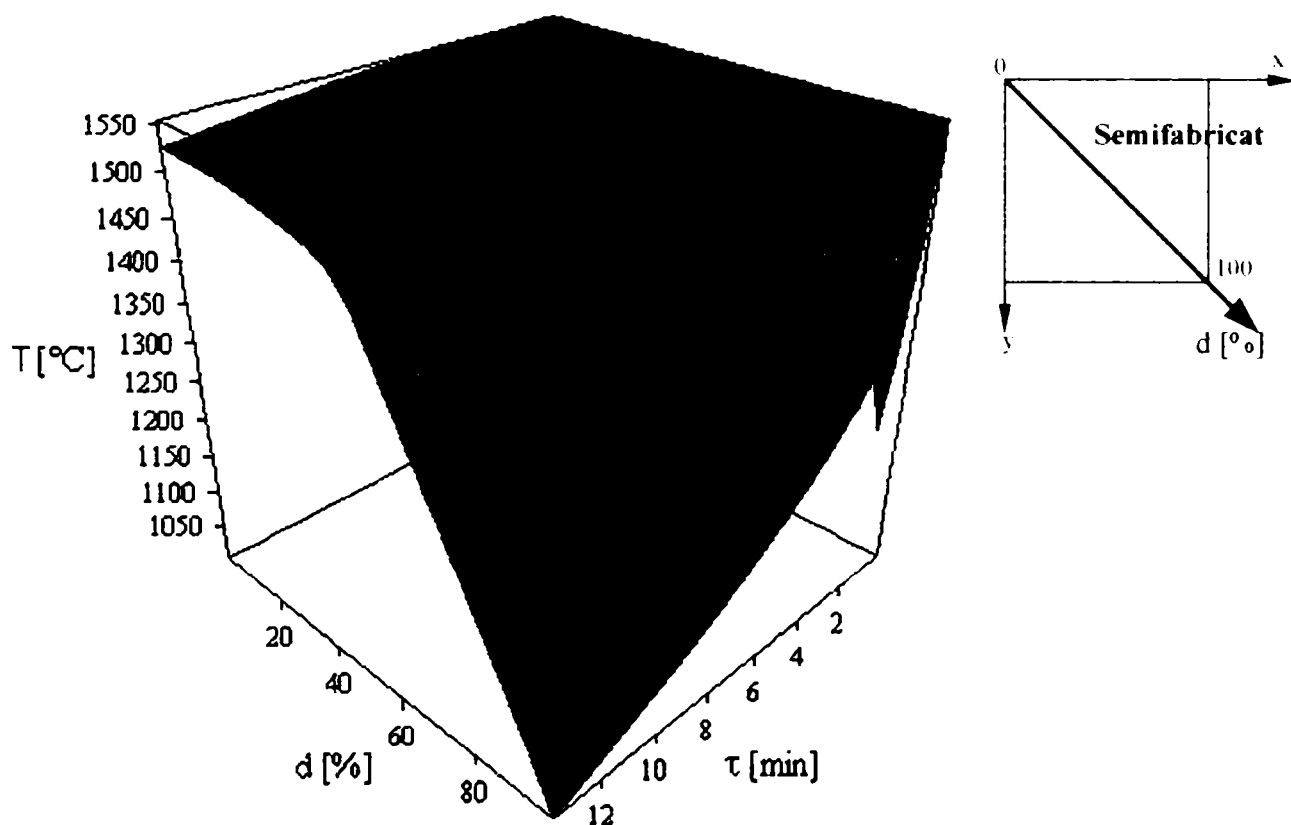


Fig. 3.36. Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul diagonalei, în funcție de timp

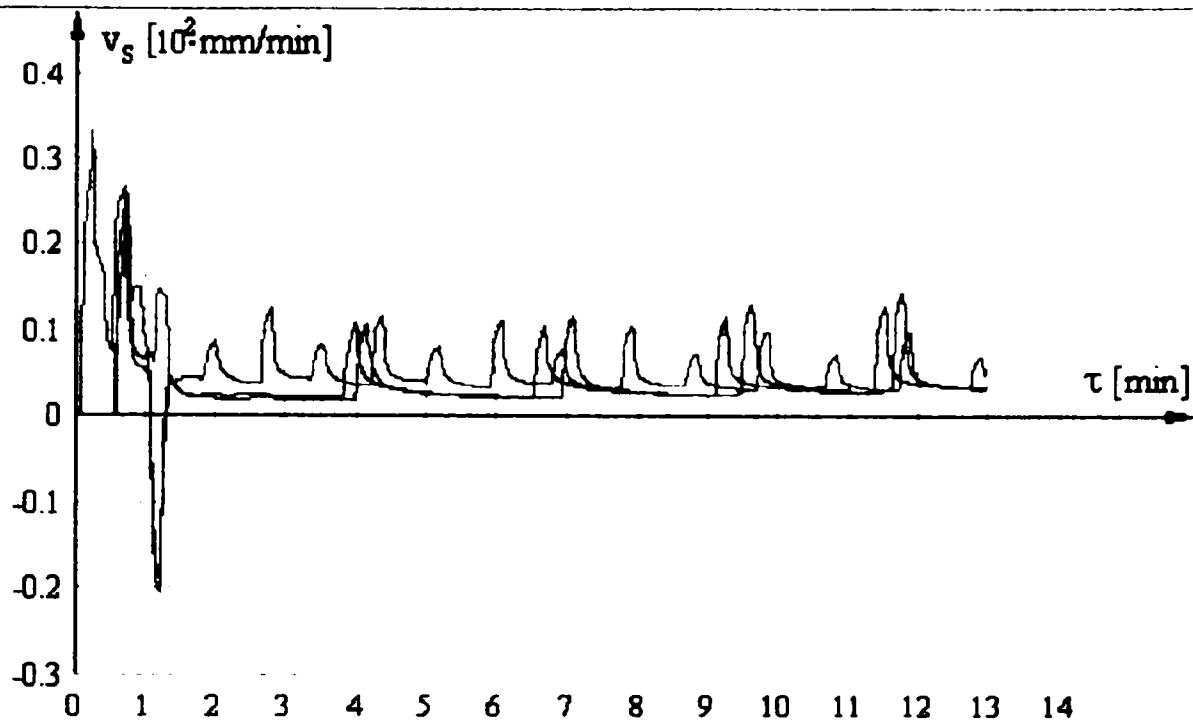


Fig.3.37. Variația în timp a vitezei de solidificare

Regimul oscilant, poate fi explicat pe de altă parte și datorită mișcării de oscilație a cristalizorului. Se poate observa o valoare negativă, la 1,07min de la începutul turnării, când, datorită întreruperii răcirii la ieșirea din cristalizor până la contactul cu rola „de picior”, o porțiune din stratul interior al crustei este retopit, după care se revine la valori pozitive pentru acest parametru.

Cu ajutorul vitezei de solidificare și a celorlalți parametri utilizați de program, interfața principală a permis și obținerea variației crustei de oțel solidificată în timp pentru punctele aflate în straturile superioare. De fapt se poate spune că variațiile obținute (curbele prezentate în fig.3.38) reprezintă forma frontului de solidificare pentru punctele considerate.

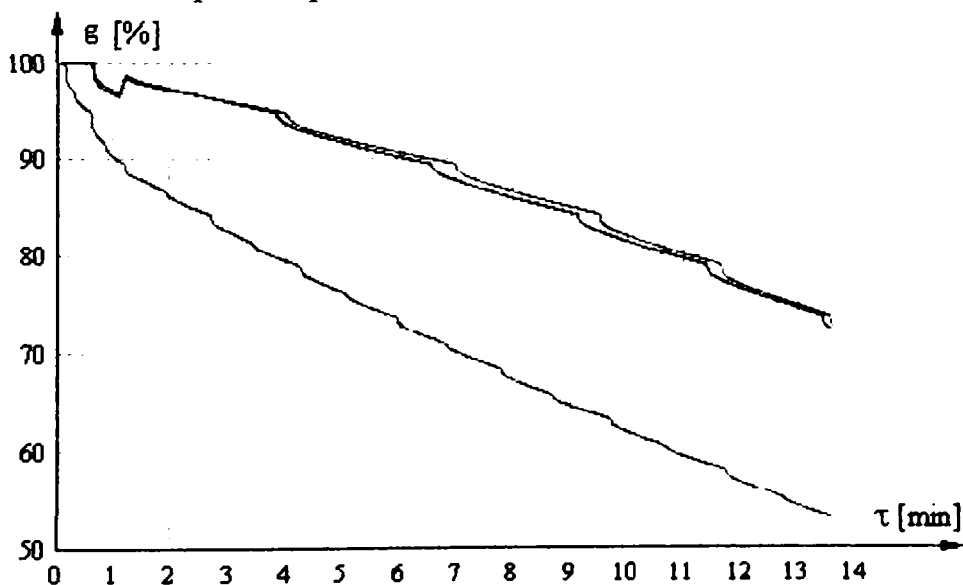


Fig.3.38. Variația grosimii crustei solidificate în timp

Variația este de tip procentual, reprezentată de la margine (exterior) către centrul semifabricatului (al secțiunii considerate).

III.6. Concluzii

Analizând dependențele grafice rezultate din cercetările efectuate pe baza datelor din literatura de specialitate și a experimentărilor proprii rezultă următoarele concluzii:

1. Grosimea crustei este dependentă de timpul de solidificare și de condițiile de răcire;

2. În cazul în care pentru determinarea grosimii crustei s-au adoptat prea multe ipoteze simplificatoare, s-a putut obține o formă aproximativă a formei conului de solidificare și abateri semnificative de la timpul real de solidificare;

3. Referitor la forma conului de solidificare, se observă că există concordanță între determinările teoretice și cele practice, motiv pentru care propunem utilizarea pentru un calcul orientativ a relațiilor simplificate (de ex. a relației (2.1.));

4. Obținerea unei forme cât mai apropiate de cea reală a conului de solidificare poate fi obținută utilizând relația (3.17);

5. Din determinările efectuate a rezultat că, pe instalația de turnare continuă a unui semifabricat cu secțiunea de 240x270mm, lungimea conului de solidificare poate ajunge la 19m iar timpul total de solidificare la 21min (la o viteză medie de turnare de 0,92m/min).

Pe baza modelului matematic care a stat la baza realizării simulării și a dependențelor grafice prezentate, rezultă concluziile:

6. Rezultatele obținute în urma simulării cu programul prezentat fiind similare cu datele practice (tab.3.4) demonstrează că ipotezele simplificatoare adoptate sunt bine justificate;

7. În toate diagramele se observă un salt al temperaturii sau a vitezei de solidificare după circa 1,07min de la începutul turnării, respectiv imediat ce secțiunea considerată a ieșit din cristalizor, salt datorat lipsei răcirii pe o lungime de aproximativ 2m sub cristalizor și a imposibilității eliminării unui flux de căldură din interiorul semifabricatului;

8. Modificând o serie de parametrii (numărul de puncte discretizate, căldura disipată în cristalizor și răcire secundară, date ce țin de marca de oțel) se pot obține valori mult mai corecte, aplicabile și pentru alte mărci de oțeluri.

CAPITOLUL IV

CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI INDUSTRIALE REFERITOARE LA FACTORII DE INFLUENȚĂ ASUPRA CALITĂȚII SEMIFABRICATELOR TURNATE CONTINUU

Pentru a se obține o calitate corespunzătoare la semifabricatele turnate continuu, trebuie avuți în vedere factorii de influență, începând de materiile prime și materialele utilizate la elaborarea oțelului și continuând cu elaborarea propriu zisă, tratamentul secundar al oțelului după evacuarea acestuia din cuptor și în final, turnarea continuă a oțelului [41].

Scopul acestui capitol îl reprezintă prezentarea cercetărilor industriale asupra diferiților factori care intervin în procesul de turnare continuă și modul în care aceștia influențează calitatea semifabricatelor turnate continuu.

Trebuie menționat faptul că studiul a fost realizat în anul 2002, la S.C Siderurgica S.A Hunedoara, șarjele studiate fiind elaborate în 2 cuptoare electrice cu arc de 100t capacitate și turnate continuu pe mașina de turnare din cadrul societății. În scopul obținerii unor rezultate concludente referitoare la obiectivele propuse, s-a considerat necesar studierea mai multor mărci de oțel turnate sub formă de semifabricate cu diferite dimensiuni permise de instalația de turnare continuă.

Astfel, cercetările s-au efectuat pe următoarele mărci de oțeluri și categorii de dimensiuni [44]:

- 51 șarje, marca OL 37-2k (STAS 500/2-80) sau conform noii simbolizări SR EN 10025: S 235 JRG2, turnate sub formă de blum cu secțiunea 240x270mm;

- 52 șarje, marca OLT 45k (P 265GH conform MN 1028/2) (și 52 șarje marca OLT 35k – P 235GH) - STAS 8184-87, turnate continuu sub formă de țagă cu diametrul $\varnothing 150\text{mm}$;
- 20 șarje, marca 31VMn 12 (și 20 șarje marca OLT 65) - STAS 8185-88, turnate sub formă de țagă cu diametrul $\varnothing 180\text{mm}$.

Numărul redus al șarjelor turnate sub formă de țagă cu diametrul $\varnothing 180\text{mm}$ este explicat prin faptul că s-au făcut încercări în scopul turnării continue a acestor semifabricate, dar, datorită reglării necorespunzătoare a instalației, calitatea țagelor rezultate nu a fost corespunzătoare, evidențiindu-se în primul rând o instabilitate dimensională a profilului. Din aceste motive, s-a trecut la turnarea țagelor cu diametrul de $\varnothing 150\text{mm}$, urmând ca, în momentul în care societatea să primească comenzi și pentru profilul cu diametrul de $\varnothing 180\text{mm}$, instalația să intre în probe până la funcționarea corespunzătoare și obținerea de rezultate bune.

IV.1. Influența elaborării și a tratamentului secundar

Este cunoscut faptul că calitatea produsului finit este în primul rând dependentă de compoziția chimică a acestuia și deci de modul de elaborare și tratament secundar la care a fost supus oțelul. În plus, atât literatura de specialitate [15] cât și producătorii cu tradiție [15,41] insistă pe încadrarea compoziției oțelului turnat continuu în limite cât mai restrânse (abateri mult mai mici decât în cazul turnării oțelului sub formă de lingouri) în special în cazul turnării secvențiale a oțelului (situație recomandată datorită multiplelor avantaje).

Carbonul din oțel, într-un domeniu restrâns de analiză de 0,08 - 0,12%, intensifică tendința de fisurare a firelor rotunde. Acest fenomen poate fi explicat prin reducerea volumului în timpul transformării cristalelor de la structura fier- δ la fier- γ în timpul răcirii. Această reducere bruscă a volumului în stare solidă cauzează tensiuni care pot duce la formarea de fisuri [42].

Fosforul care nu depășește cantități obișnuite la elaborarea oțelului, nu are influență directă asupra capacității de turnare și are un efect relativ mic asupra calității semifabricatelor turnate. Conținuturile de fosfor mai mici de 0,030% nu ridică nici o problemă la turnarea continuă și sunt permise dacă nu se cer valori mai scăzute ale fosforului pentru prelucrarea ulterioară sau aplicarea mai târziu a unor tratamente termice.

Sulfurul, exercită o influență asupra calității firului, în special a formării de fisuri interne. În acest context trebuie menționat raportul C/Mn, deoarece tendința de fisurare a sulfurului este intensificată de un raport ridicat de C/Mn în oțel.

De obicei, conținuturile de sulf mai scăzute de 0,020% nu afectează turnarea continuă a profilelor rotunde. Din motive independente de turnarea continuă dar legate de prelucrarea ulterioară, compoziția chimică necesită uneori și limitarea conținutului de P și S; de exemplu $P + S \leq 0,040\%$.

Elementele însoțitoare nu afectează capacitatea de turnare a oțelurilor într-o mașină de turnare continuă, dar cantități mai ridicate din astfel de elemente influențează temperatura lichidus a oțelului. În general, pentru oțelurile carbon nealiat sunt recomandate următoarele conținuturi maxime (pentru a permite prelucrarea ulterioară a semifabricatului turnat).

Cu, Cr, Ni	fiecare $\leq 0,25\%$; suma $\leq 0,50\%$
Mo.....	$\leq 0,10\%$
As.....	$\leq 0,030\%$
Sn.....	$\leq 0,025\%$

Ca în cazul fosforului și sulfurii, sumele acestor procentaje sunt uneori limitate în vederea prelucrării viitoare, dar acesta nu are nimic de-a face cu procesul de turnare continuă.

Conținuturile mărite de *Cu, Cr, Ni și Mo* (de asemenea *V, Nb, Ti*, etc) nu ridică probleme la turnare.

Hidrogenul nu joacă un rol semnificativ în turnarea continuă a semifabricatelor rotunde pentru țevi; în general nu are loc exfolierea.

Azotul în oțelul nu trebuie să depășească 90 ppm când nu se specifică nici un procentaj. În cazul în care se adaugă azot ca și element de aliere, conținutul său nu trebuie să depășească 180 ppm pentru a preveni suflurile.

Oxigenul activ care este în oțelul lichid după dezoxidare, poate afecta semnificativ atât calitatea firului turnat cât și procesul de turnare. O cantitate mare de oxigen activ în oțelul lichid are ca rezultat apariția porozității în firul turnat. Produsele de dezoxidare, în funcție de unde și când au avut loc reacțiile, nu mai pot să se ridice la suprafața băii de oțel dar pot să rămână în fir ca impurități de oxizi și blochează tuburile de imersie astfel încât trebuie întreruptă turnarea.

O grijă deosebită se acordă conținutului de *aluminu*, știut fiind faptul că, în cantități mai mari, formează alumina care se depune pe tuburile de imersie utilizate la turnarea continuă, obturându-le parțial sau total. Din acest motiv se recomandă ca dezoxidarea oțelului turnat continuu să nu se realizeze cu aluminu [43].

Șarjele studiate au fost elaborate în cuptoarele nr.1 și nr.2 a secției OE2, S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, cuptoarele electrice clasice de 100t capacitate.

Elaborarea a decurs corespunzător, parcurgându-se etapele clasice în acest caz. După evacuare, oțelul a fost barbotat la cuptor cu gaz inert (Ar) timp de 5-10min după care a fost transportat la instalația de tratament secundar, secția fiind dotată cu o instalație de tip LF (Ladle Furnance). În această instalație, are loc corecția compoziției chimice a oțelului, decarburarea, dezoxidarea și desulfurarea avansată, decantarea avansată a incluziunilor nemetalice precum și reglarea temperaturii oțelului lichid [43,45,46].

Ca o confirmare a celor prezentate anterior, în anexa IV.1 sunt prezentate tabelar, compozițiile chimice pentru șarjele urmărite precum și temperaturile de turnare obținute.

S-au prezentat de asemenea și compozițiile chimice conform standardelor pentru mărcile studiate, evidențiind, sub formă grafică, variația principalelor elemente.

Astfel, în fig.4.1. și 4.2. sunt redată variațiile C, Si, Mn și respectiv a S, P, Al pentru marca OL 37-2k, un oțel de uz general pentru construcții. Se remarcă o distribuție uniformă a valorilor, variația în intervale foarte restrânse a elementelor și încadrarea în limitele impuse de standard.

Se poate observa de exemplu pentru C că puține valori (3,85%) sunt în intervalul considerat „critic” pentru apariția fisurilor, tehnologii încadrând majoritatea șarjelor sub 0,08%C (50%) sau la limită (46,15%).

Pentru Si și Mn, deși prin standard domeniul de variație este relativ mare: max. 0,4%Si și max. 0,8%Mn, cele două elemente variază într-un interval de valori cuprins între 0,21-0,32%Si și respectiv 0,32-0,49%Mn (fig.4.1.)

În ceea ce privește un alt element important pentru turnarea continuă, Al, se poate considera ca un element rezidual, cu o variație sub 0,006%. În schimb, S și P admit variații în limite mult mai mari, înscriindu-se însă în limitele impuse: max. 0,05% pentru fiecare în parte (fig.4.2.).

Pentru marca OLT 45k, dependențele grafice din fig.4.3. și 4.4. prezintă variația compoziției chimice (tot pentru cele mai importante elemente).

În acest caz, avându-se în vedere și intervalul mai mare de încadrare pentru C (max. 0,23%), compoziția a variat între 0,13-0,18%C, evitându-se și de această dată valorile critice pentru carbon.

Siliciul s-a încadrat în jumătatea superioară a intervalului de variație: conform STAS 8184-87 [44], Si trebuie să varieze între 0,15-0,35% iar pentru șarjele studiate, acesta s-a încadrat între 0,25-0,35%Si. Manganul în schimb s-a

încadrat spre limita inferioară prevăzută de standard: între 0,46-0,64%Mn față de 0,4-1,2%Mn conform STAS-ului. (fig.4.3.).

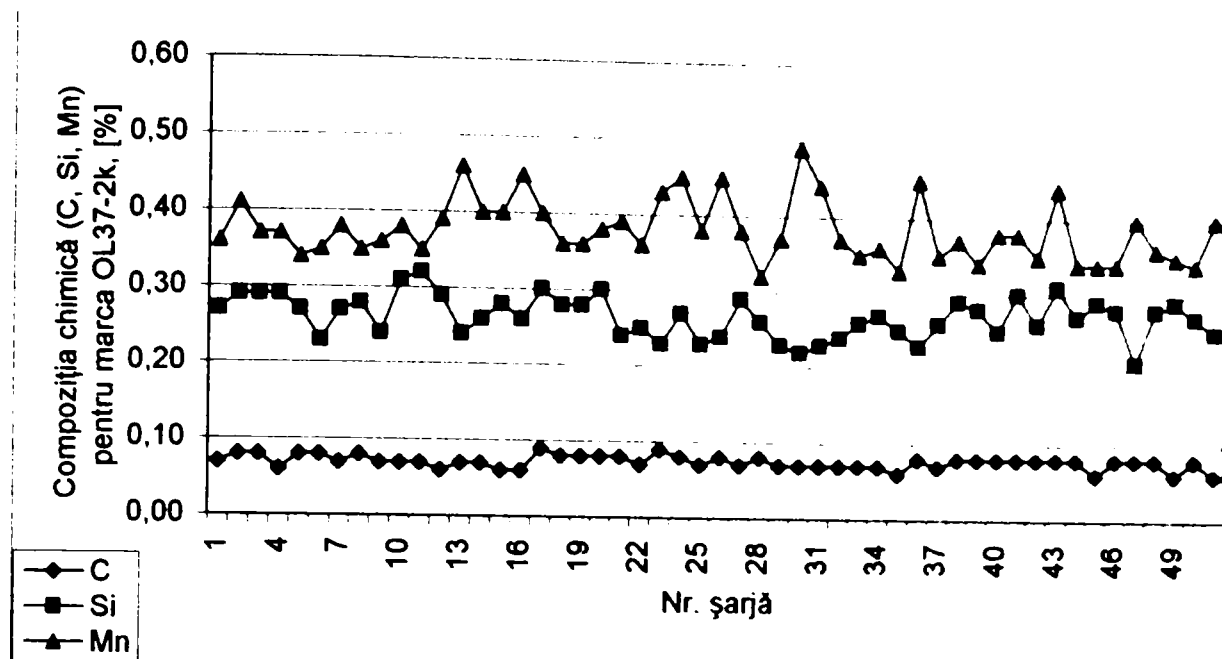


Fig.4.1. Variația C, Mn, Si pentru oțelul OL 37-2k

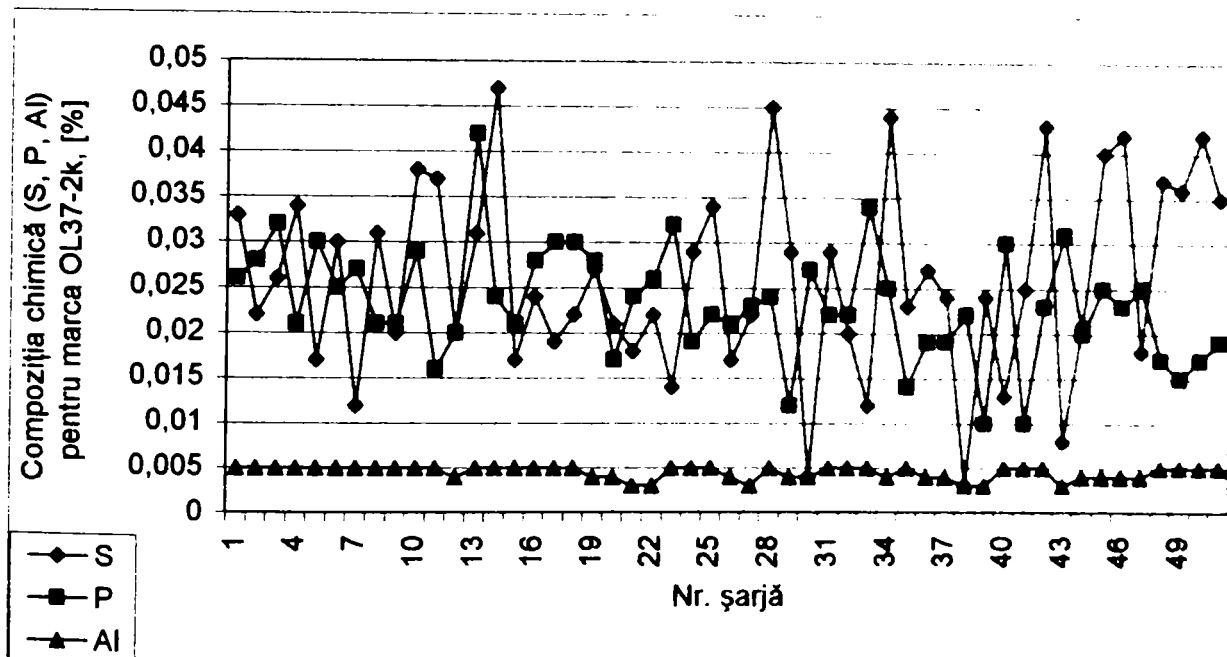


Fig.4.2. Variația S, P, Al pentru oțelul OL 37-2k

Respectiv la a doua grupă de elemente studiată (elemente nedorite), acestea s-au încadrat în limitele prevăzute de standard; se observă însă valori mult mai ridicate în ceea ce privește conținutul de Al din oțel, acesta variind în limitele 0,02-0,038%. Cantitățile relativ mari de aluminiu ar putea explica în parte și valorile ridicate ale pierderilor de oțel în distribuitor: prin obturarea parțială a tuburilor de imersie, viteza de turnare a trebuit redusă timp în care temperatura oțelului din distribuitor a scăzut mai mult decât în cazul unei funcționări corespunzătoare (fig.4.4.).

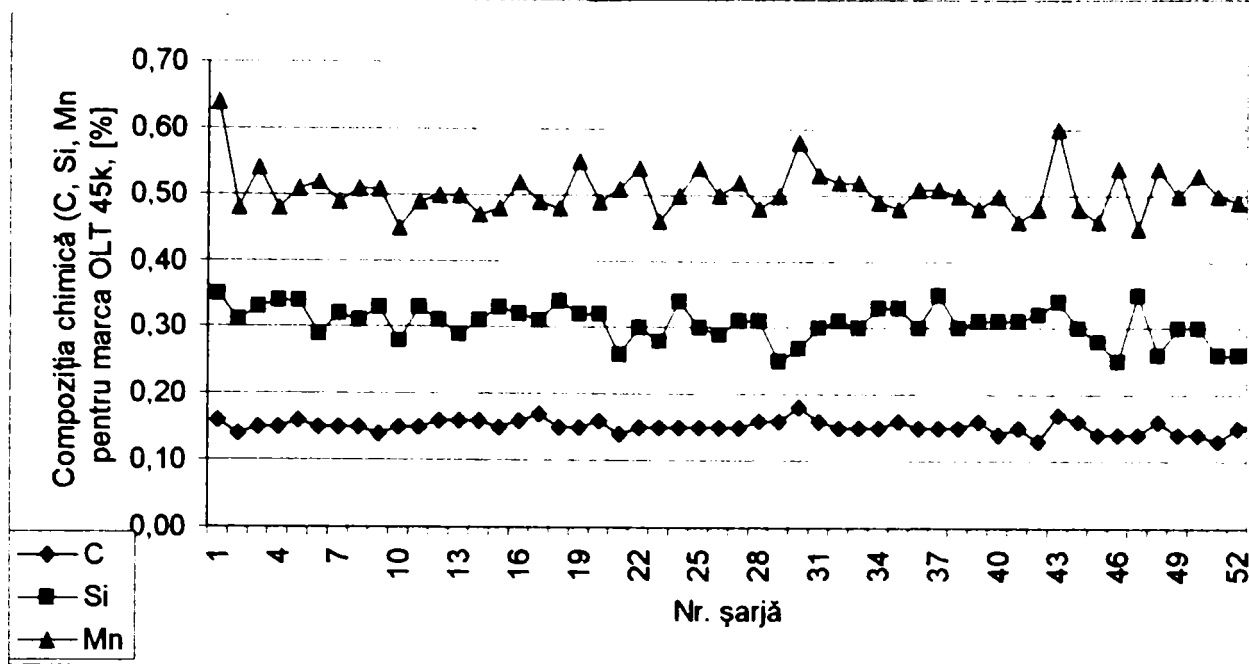


Fig.4.3. Variația C, Mn, Si pentru oțelul OLT 45k

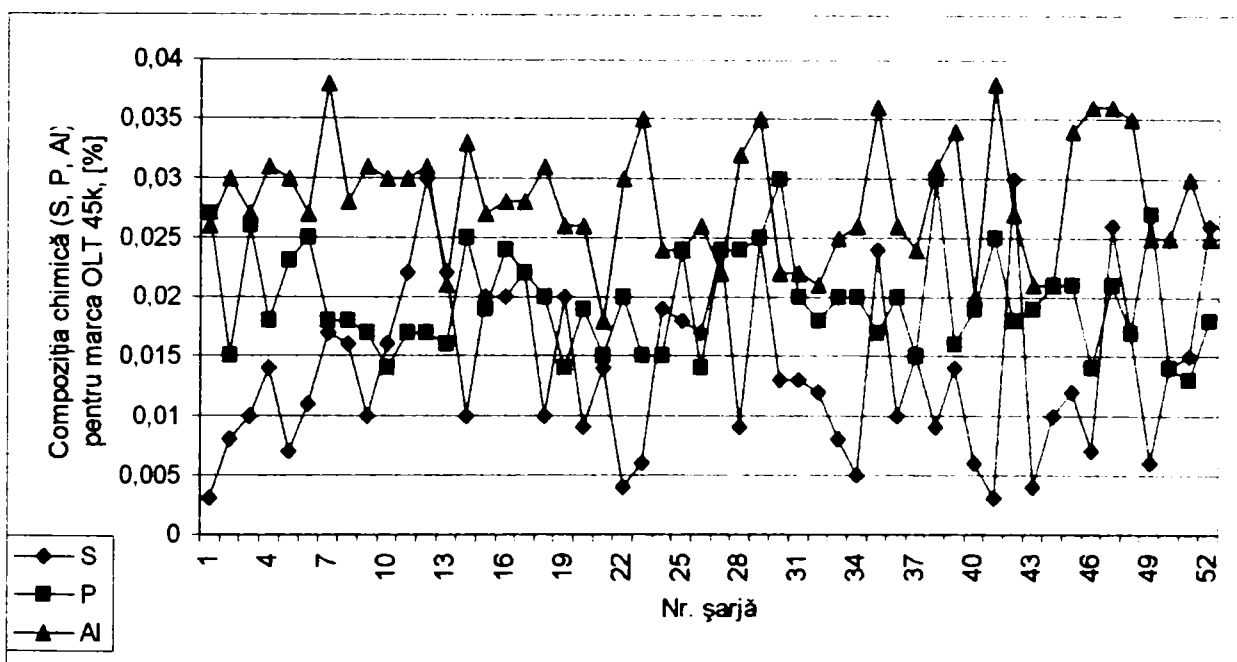


Fig.4.4. Variația S, P, Al pentru oțelul OLT 45k

Aceleași concluzii se pot trage și în urma analizei dependențelor realizate pentru cea de-a doua marcă de oțel turnată sub formă de țagă cu diametrul $\varnothing 150\text{mm}$, tot un oțel pentru țevi utilizate la temperaturi ridicate: OLT 35k. Exceptând valorile pentru carbon, mult mai reduse decât în cazul anterior, variația celorlalte elemente se păstrează. Graficele sunt prezentate în anexa IV.8.

Pentru profilul $\varnothing 180\text{mm}$, prima marcă studiată 31VMn12 are compoziția chimică prezentată în fig.4.5. și respectiv 4.6.

Conținuturile elementelor studiate admit valori mult mai crescute față de celelalte mărci de oțeluri analizate anterior. Astfel, C variază în intervalul 0,28-0,34% impus de STAS 8185-88 [44], limite destul de restrânse față de alte

lemente. În schimb, în cazul Si și Mn, la șarjele studiate acestea se încadrează pre limitele minime impuse, adică 0,22-0,27%Si respectiv 1,13-1,2%Mn – fig.4.5.

Nici celelalte elemente analizate nu se abat din limitele standardului, observându-se însă valori ușor ridicate în ceea ce privește conținutul de Al (max.0,01%) – fig.4.6.

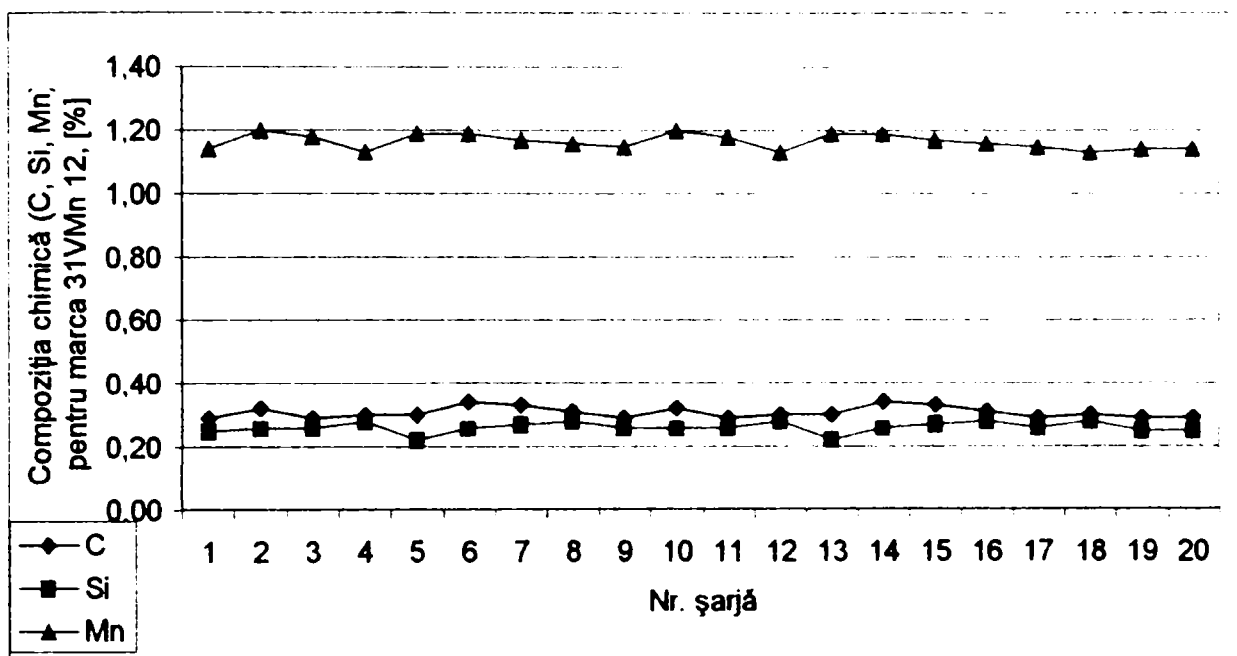


Fig.4.5. Variația C, Mn, Si pentru oțelul 31VMn 12

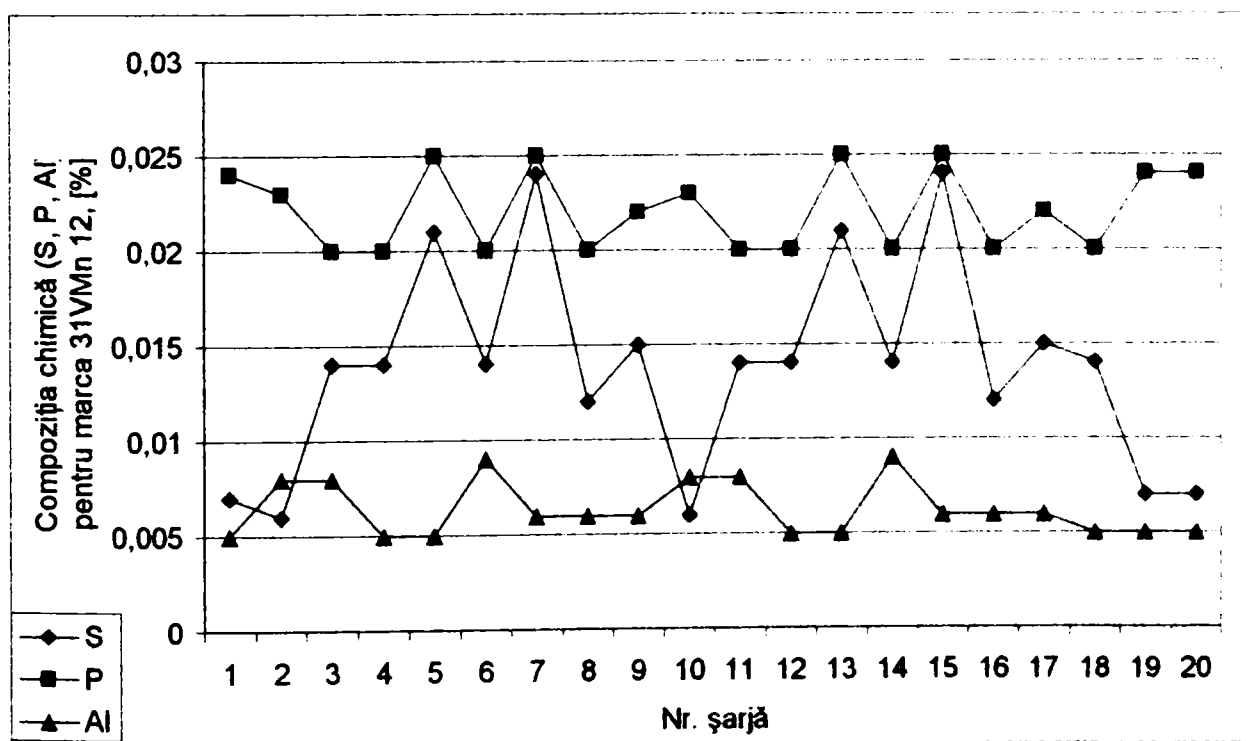


Fig.4.6. Variația S, P, Al pentru oțelul 31VMn 12

În cel de-al doilea caz analizat pentru acest profil, tot o marcă de oțel pentru țevi fără sudură destinat industriei petroliere, modul de variație al principalelor elemente din compoziția chimică este prezentat în anexa IV.9. Ca și la marca

precedentă, C și Mn variază, în marea majoritate a valorilor, spre limitele inferioare ale intervalelor de variație: 0,4-0,5%C și respectiv 0,7-1%Mn, observându-se în schimb valori spre limitele superioare pentru Si: 0,17-0,35%. Sulfur, fosforul și aluminiu admit valori minime.

Se poate concluziona deci că, în ceea ce privește compoziția chimică a șarjelor studiate, aceste se încadrează în limitele standardelor și respectă, în mare parte, și cerințele care trebuie îndeplinite pentru turnarea continuă a oțelului.

IV.2. Temperatura de turnare

Un alt factor foarte important în ceea ce privește turnarea continuă și implicit calitatea semifabricatelor obținute îl constituie temperatura de turnare a oțelului.

Soluția ideală ar fi ca oțelul să ajungă la cristalizor la o temperatură constantă în timp, puțin superioară temperaturii de solidificare a oțelului respectiv. Acest lucru nu se poate realiza integral, deoarece pierderile termice în timpul turnării ating valori importante, ceea ce impune o supraîncălzire a oțelului la topire, asigurându-se astfel o temperatură suficientă pe întreaga perioadă a turnării continue. Ținând seama de specificul procesului tehnologic, temperatura oțelului la sfârșitul elaborării este mai ridicată decât în cazul turnării în lingouri [15,31].

În majoritatea cazurilor în care tratamentul secundar se realizează într-o instalație unde este posibil un aport suplimentar de căldură pentru încălzirea oțelului, condiția anterioară nu mai este necesară. Șarjele studiate se înscriu în această categorie, având în vedere faptul că instalația LF poate reîncălzi oțelul în timpul tratamentului prin intermediul arcului electric obținut cu ajutorul a trei electrozi din grafit.

Temperatura oțelului în diverse faze ale procesului tehnologic de turnare continuă depinde de următorii factori: calitatea oțelului (temperatura lichidus și solidus), mărimea șarjei și condițiile de amplasare a halei de turnare continuă în fluxul tehnologic (care determină pierderile de căldură a metalului din oala de turnare, până la poziționarea acesteia deasupra instalației de turnare continuă).

Temperatura lichidus la orice marcă de oțel este baza calculului temperaturii de turnare adecvate. Toate celelalte temperaturi care sunt necesare în anumite faze de elaborare și tratament al oțelului trebuie să se bazeze pe temperatura lichidus.

Există formule numeroase cu care este posibil să se calculeze temperaturile lichidus și care iau în considerare conținutul de elemente de aliere din oțel. O examinare critică a acestor formule relevă că unele din ele nu sunt aplicabile în

eneral, ci se referă doar la domeniul destul de restrâns de analiză a oțelului.

Temperatura oțelului la începutul evacuării din cuptorul de elaborare sau din gregatul de tratament secundar poate varia în limite largi (1600 – 1700°C), în funcție de factorii menționați anterior; la majoritatea instalațiilor moderne, această temperatură este însă cuprinsă între 1620 – 1650°C.

Viteza de răcire a oțelului în oala de turnare depinde de mărimea șarjei, respectiv de capacitatea oalei de turnare. În tab.4.1 sunt prezentate câteva valori ale vitezei de răcire (am evidențiat cazul oalelor de turnare folosite la Hunedoara).

Tab.4.1. Variația vitezei de răcire a oțelului, funcție de capacitatea oalei de turnare

Viteza de răcire a oțelului, [°C/min.]	Capacitatea oalei de turnare, [t]
0,1	230
0,3	100
0,75	60
1,00	30

Temperatura din oala de turnare a oțelului în timpul turnării continue trebuie să fie pe toată perioada cu 30 – 60°C peste temperatura de topire, fiind cuprinsă în general între 1570 și 1620°C iar temperatura din distribuitor trebuie să fie cu 15 – 40°C deasupra temperaturii de topire, fiind în general cuprinsă între 1550 – 1580°C (viteza de răcire a oțelului în distribuitor variază la instalațiile de mare capacitate între 2 și 5°C/min, timpul de staționare fiind de câteva minute iar scăderea temperaturii în distribuitor este mică (10 – 20°C). Pentru oțelurile carbon nealiate, temperatura oțelului în distribuitor este reglată cât mai scăzută posibil. Motivele sunt siguranța funcțională mărită și calitatea profilelor (eliminarea perforărilor, îmbunătățirea structurii interne și prevenirea fisurării interne) [47].

Faptul că diferitele mărci de oțel se comportă diferit cu privire la vâscozitate și solidificate, trebuie de asemenea, luat în considerație. Oțelurile cu conținut scăzut de carbon, în special cu conținut ridicat de aluminiu, încep să devină vâscoase deja mult peste temperatura lichidus și tind să blocheze orificiile. Spre deosebire de acestea, oțelurile cu conținut ridicat de carbon sau conținut ridicat de siliciu rămân fluide sub temperatura lichidus și devin solide la acea temperatură sau chiar mai mică, dar apoi se înmoaie brusc.

În sensul celor prezentate anterior, în fig.4.7. sunt prezentate variațiile temperaturii oțelului (marca OL37-2k) în oala de turnare, în distribuitor, ambele comparate cu temperatura lichidus (prezentată de asemenea în figură). Se observă

intervale de variații mai mari decât cele recomandate anterior, încadrându-se pentru temperatura în oală cu maxim 100°C peste temperatura lichidus și respectiv cu 60°C peste temperatura lichidus pentru temperatura oțelului în distribuitor.

La turnare profilelor rotunde, de obicei temperatura de turnare în distribuitor este reglată până la $15\text{-}30^{\circ}\text{C}$ deasupra temperaturii lichidus. Trebuie luați în considerare mulți factori de influență, cum ar fi timpul de turnare și debitul de turnare (viteza), numărul de fire, dimensiunea firului, capacitatea distribuitorului, marca oțelului, etc [15].

Pentru șarjele studiate însă, s-au remarcat tendințe similare (cu cele de la Blum) de mărire a intervalului de variație a unei temperaturi relativ la temperatura lichidus, atât la oțelurile turnate sub formă de țagă (OLT 45k pentru semifabricatul cu diametrul $\Phi 150\text{mm}$ – fig.4.8.- cât și 31VMn12 pentru semifabricatul cu diametrul $\Phi 180\text{mm}$ – fig.4.9). O explicație a acestui fapt ar fi necorelarea corespunzătoare a tuturor operațiilor la mașina de turnare continuu, fapt care a dus la necesitatea creșterii temperaturii oțelului încă din agregatul de tratament în vid.

Consecințele acestei creșteri de temperatură se răsfrâng apoi asupra parametrilor ulteriori de influență: viteză de turnare, condiții de răcire primară și secundară (în general în sensul creșterii valorilor pentru acești parametrii).

Pentru o funcționare corectă a instalației de turnare continuă, trebuie asigurat un control riguros asupra temperaturii oțelului și mai departe, în fluxul tehnologic. Astfel, precizia necesară față de temperatura prescrisă la intrarea în cristalizor trebuie să fie de $\pm 5\text{...}10^{\circ}\text{C}$.

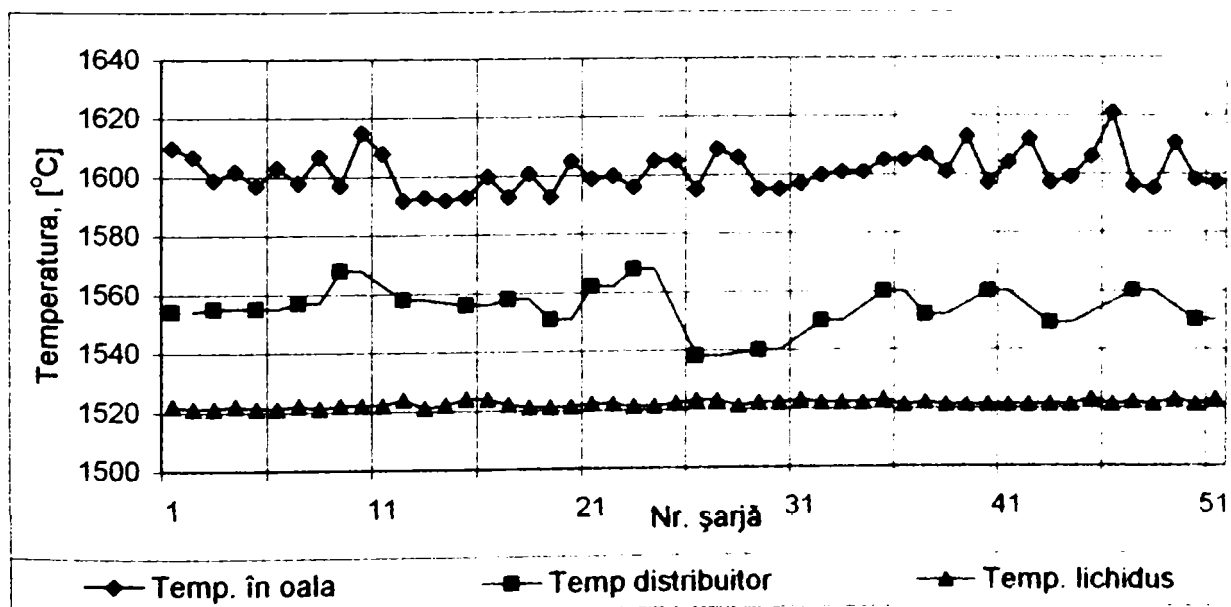


Fig.4.7. Variația temperaturilor pentru blumul cu secțiune $240 \times 270\text{mm}$

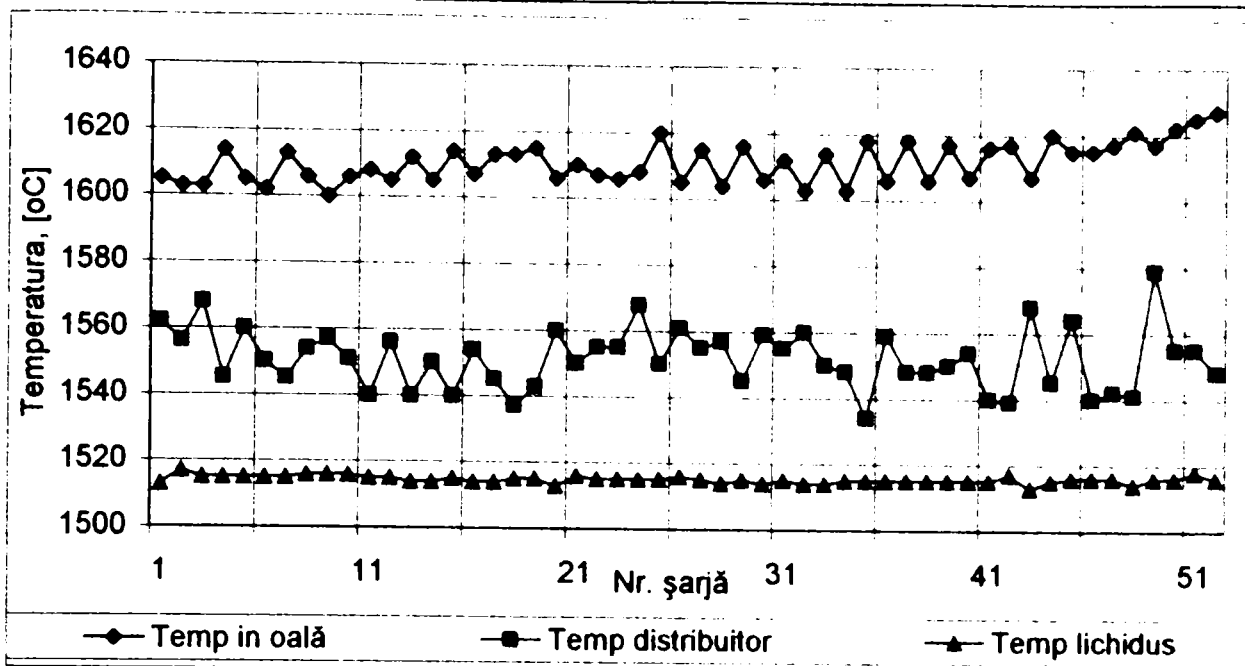


Fig.4.8. Variația temperaturilor pentru țagla cu secțiune $\Phi 150\text{mm}$ (OLT 45k)

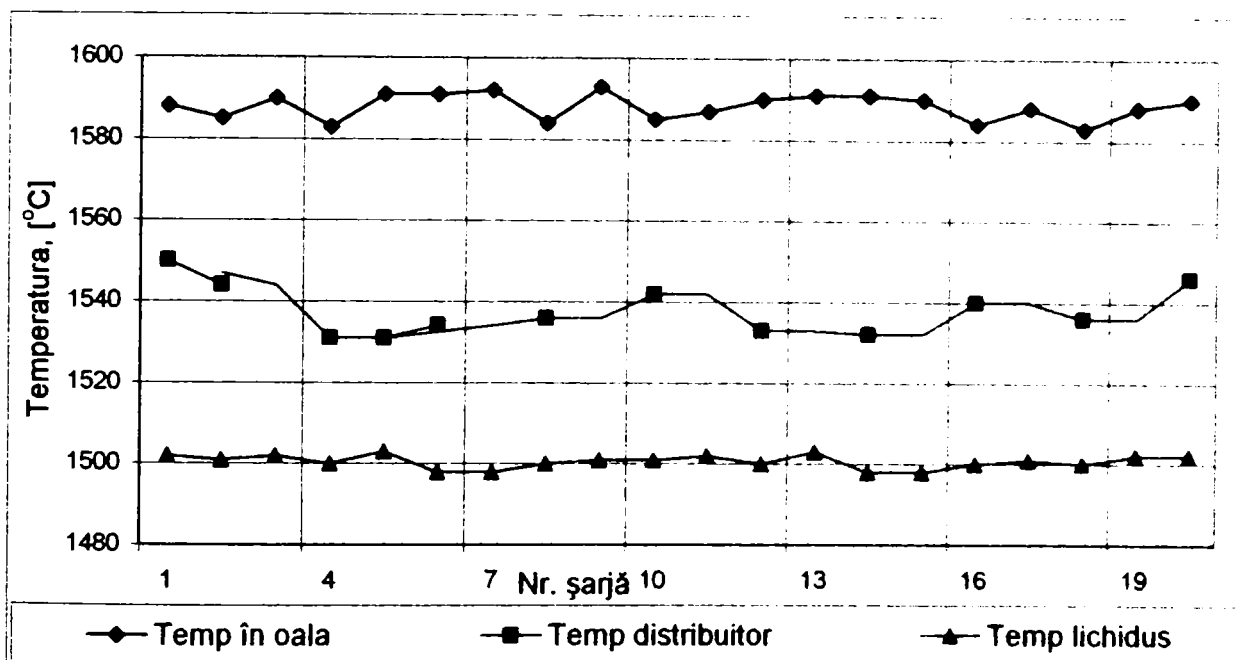


Fig.4.9. Variația temperaturilor pentru țagla cu secțiune $\Phi 180\text{mm}$ (31VMn12)

Dacă temperatura de turnare este prea ridicată, este necesară micșorarea sensibilă a vitezei de turnare și o răcire secundară foarte intensă, având ca și consecință defecte interne și de suprafață, datorate tensiunilor termice; de asemenea, o temperatură prea înaltă a oțelului mărește pericolul străpungerii firului sub cristalizor. O temperatură de turnare prea scăzută poate duce la astuparea orificiilor de turnare ale distribuitorului, în special în cazul sleburilor subțiri sau a țaglelor de secțiune mică, precum și la defecte de suprafață.

IV.3. Timpul de turnare

Timpul de turnare a unei șarje rezultă din capacitatea oalei și viteza de turnare. Timpul maxim de turnare depinde în primul rând de scăderea maxim

admisă de temperatură, deoarece, după cum s-a arătat anterior, considerente metalurgice impun menținerea temperaturii de turnare între limite precise, în scopul obținerii unei calități corespunzătoare a produselor și al unei funcționări sigure a instalației [48].

În acest sens, pentru marca OL 37-2k s-a prezentat în fig.4.10 variația timpului de turnare în funcție de temperatura oțelului în distribuitor pentru toate cazurile întâlnite în studiu, respectiv pentru secvențe de turnare de două, trei și patru șarje, considerând întotdeauna temperatura din distribuitor pentru prima șarjă a secvenței.

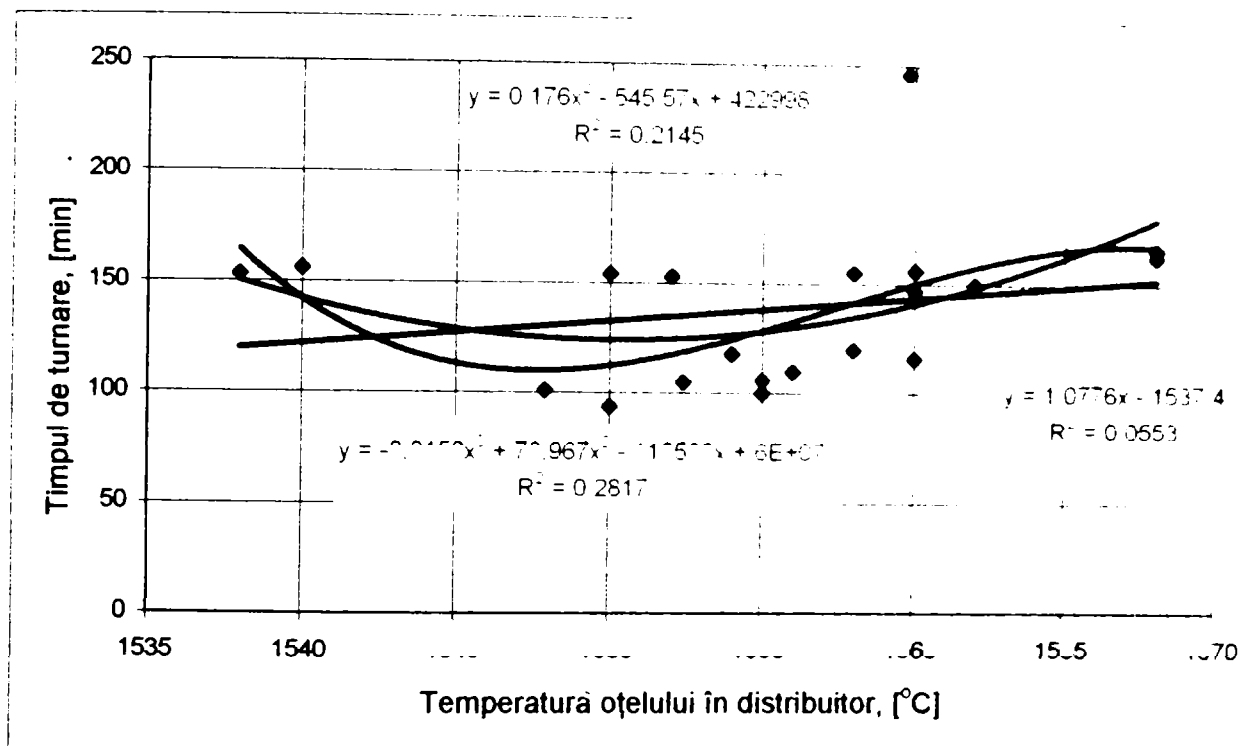


Fig.4.10. Variația timpului de turnare în funcție de temperatura inițială a oțelului din distribuitor, pentru marca OL 37-2k

Având în vedere gradul mare de dispersie al datelor, s-a considerat necesară o analiza a acestei variații pe clase de secvențe. Astfel, în fig.4.11 este prezentată variația timpului de turnare în funcție de temperatura oțelului din distribuitor pentru secvențele formate din două șarje. Se remarcă creșterea timpului de turnare peste 120min în cazul unor temperaturi mai mari de 1560°C, în condițiile menținerii unei viteze de turnare relativ constante. Dacă însă se urmărește scăderea timpului de turnare se poate mări viteza de turnare a semifabricatelor, modificându-se totodată și programul de răcire (în sensul intensificării răcirii primare și secundare a semifabricatului). Se poate însă considera, pentru acest caz, un timp optim de turnare de cca. 110min (palierul obținut pe curba de variație polinomială de gradul 3).

În cazul secvențelor formate din trei șarje (fig.4.12), palierul de variație a timpului de turnare este aproximativ în jurul valorilor de 154-155min pentru temperaturi sub 1560°C.

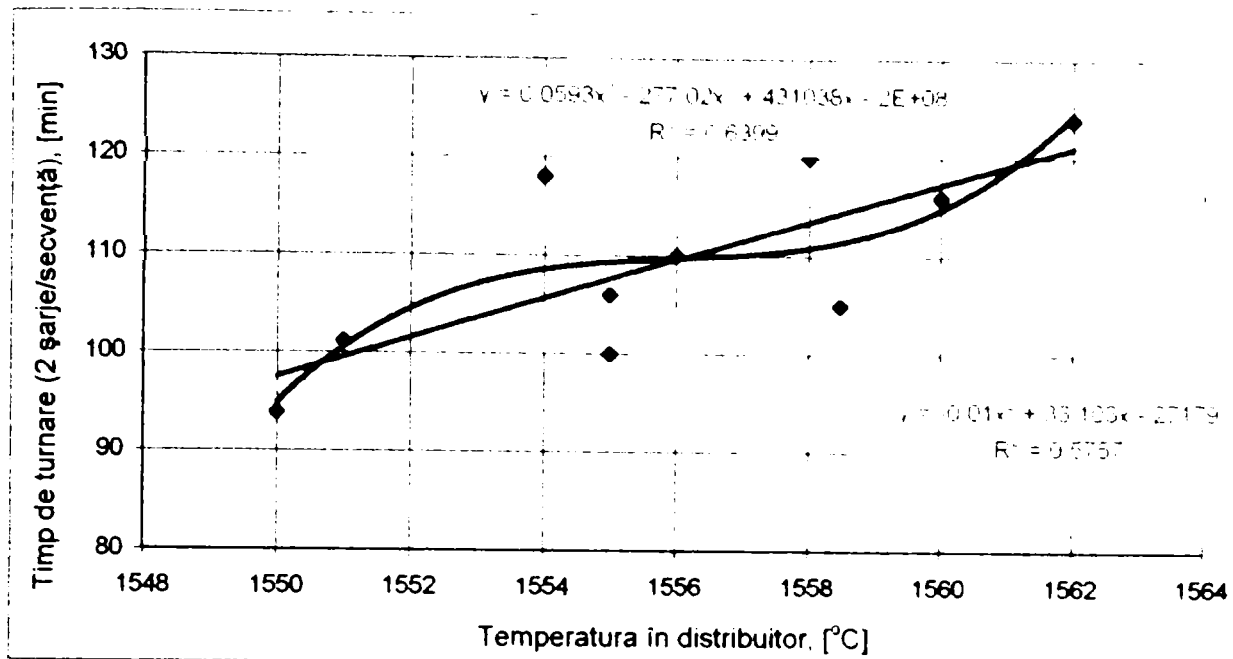


Fig.4.11. Variația timpului de turnare în funcție de temperatura inițială a oțelului din distribuitor, pentru secvențele formate din 2 șarje

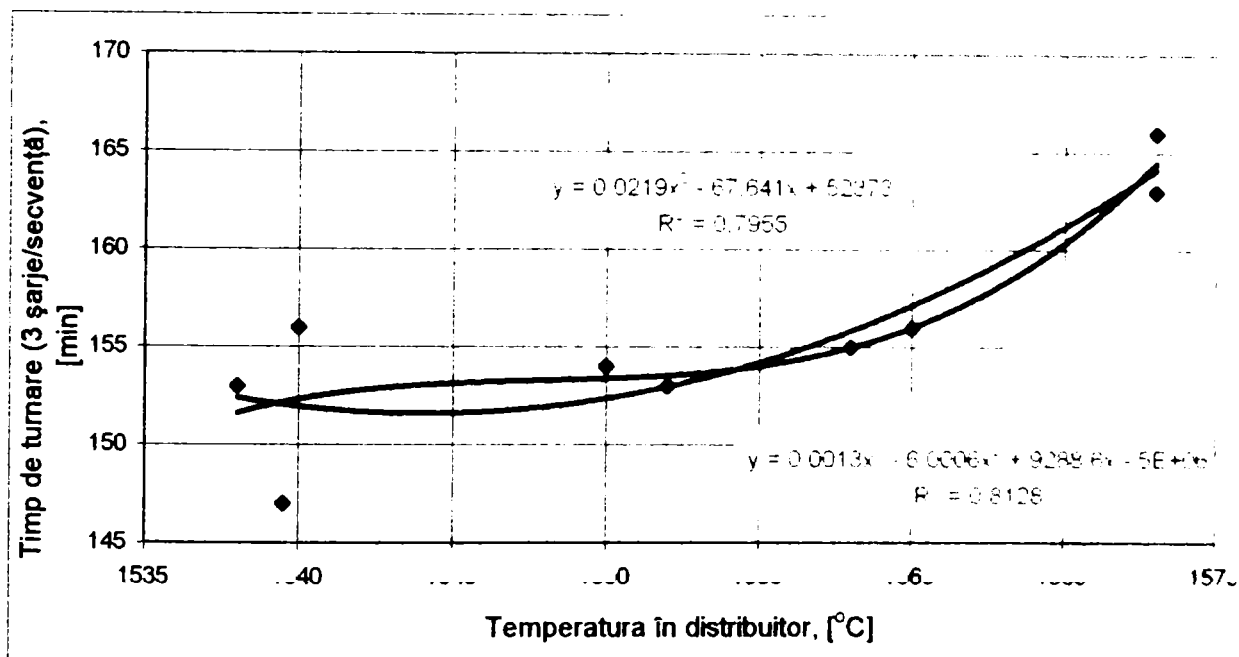


Fig.4.12. Variația timpului de turnare în funcție de temperatura inițială a oțelului din distribuitor, pentru secvențele formate din 3 șarje

Pentru profilul rotund cu diametrul $\Phi 150\text{mm}$, într-o primă fază s-a observat o distribuție la fel de variabilă (haotică) ca și în primul caz – fig.4.13. Trebuie avut în vedere că pentru acest profil, studiul a fost realizat pentru șarje turnate individual și secvențe din două respectiv trei șarje. O analiză mai corectă este făcută în fig.4.14. analiză referitoare la variația timpului de turnare tot pentru

temperatura oțelului din distribuitor în cazul secvențelor formate din două șarje (20 secvențe).

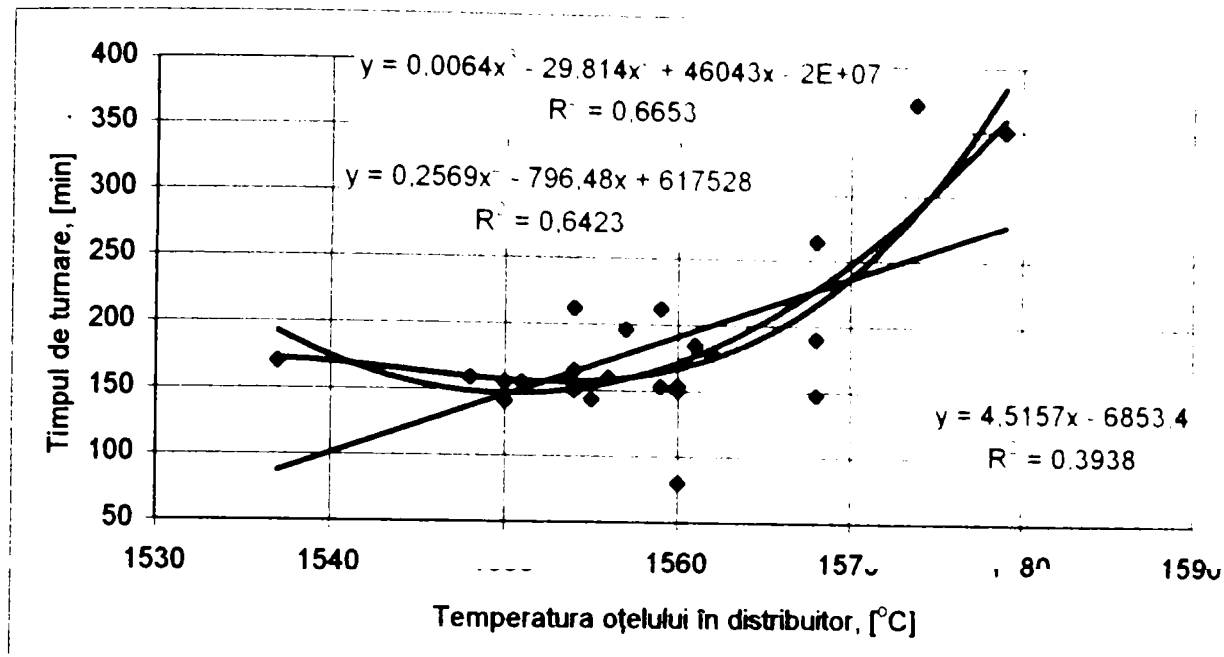


Fig.4.13. Variația timpului de turnare în funcție de temperatura inițială a oțelului din distribuitor, pentru marca OLT 45k

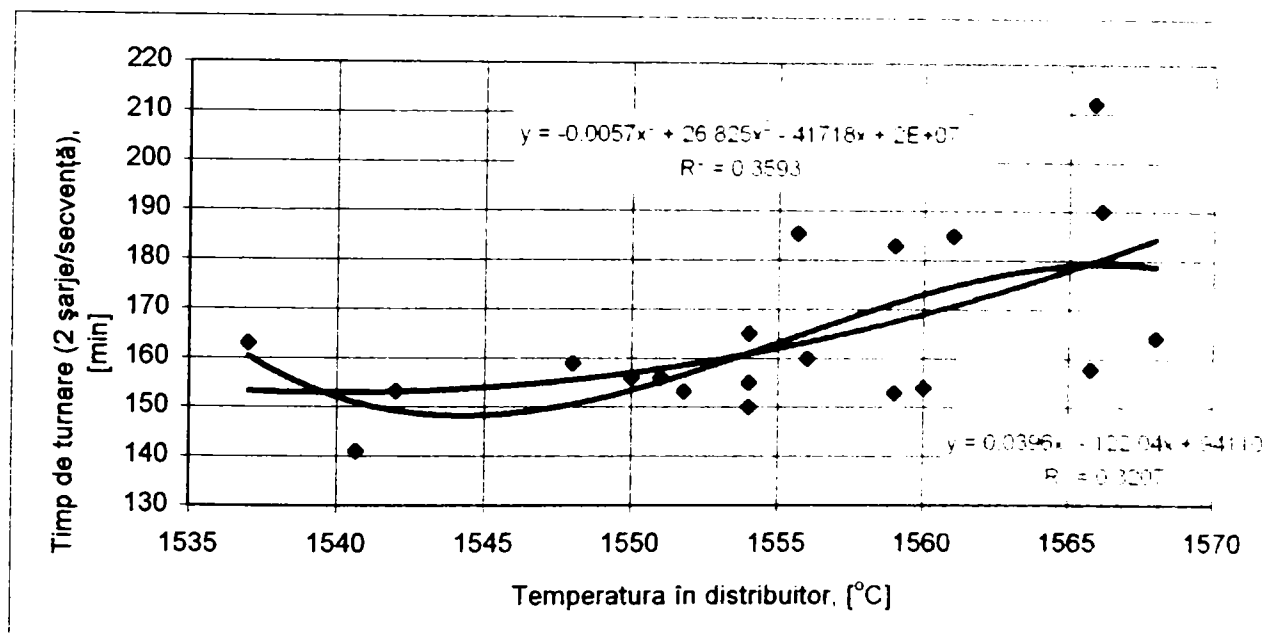


Fig.4.14. Variația timpului de turnare în funcție de temperatura inițială a oțelului din distribuitor, pentru secvențele formate din 2 șarje

Se observă că pentru 70% din datele studiate, timpul de turnare a variat între 150-168min într-un interval de temperaturi mult mai larg de această dată (1537-1567°C), fapt care evidențiază și o viteză de turnare mult mai variabilă precum și condiții de răcire modificate pe parcursul turnărilor.

Pentru profilul țagă cu diametrul cu $\Phi 180\text{mm}$, într-o primă etapă s-a remarcat o variație diferită de cele de până acum (o dependență invers proporțională dintre timpul de turnare și temperatura din distribuitor) – fig.4.15.

aceasta se explică însă prin prezența în studiul efectuat a două șarje turnate individual și la care temperatura din distribuitor a fost mai mare decât în cazul turnării secvențiale (pentru marca 31VMn12 șarjele 1 și 20).

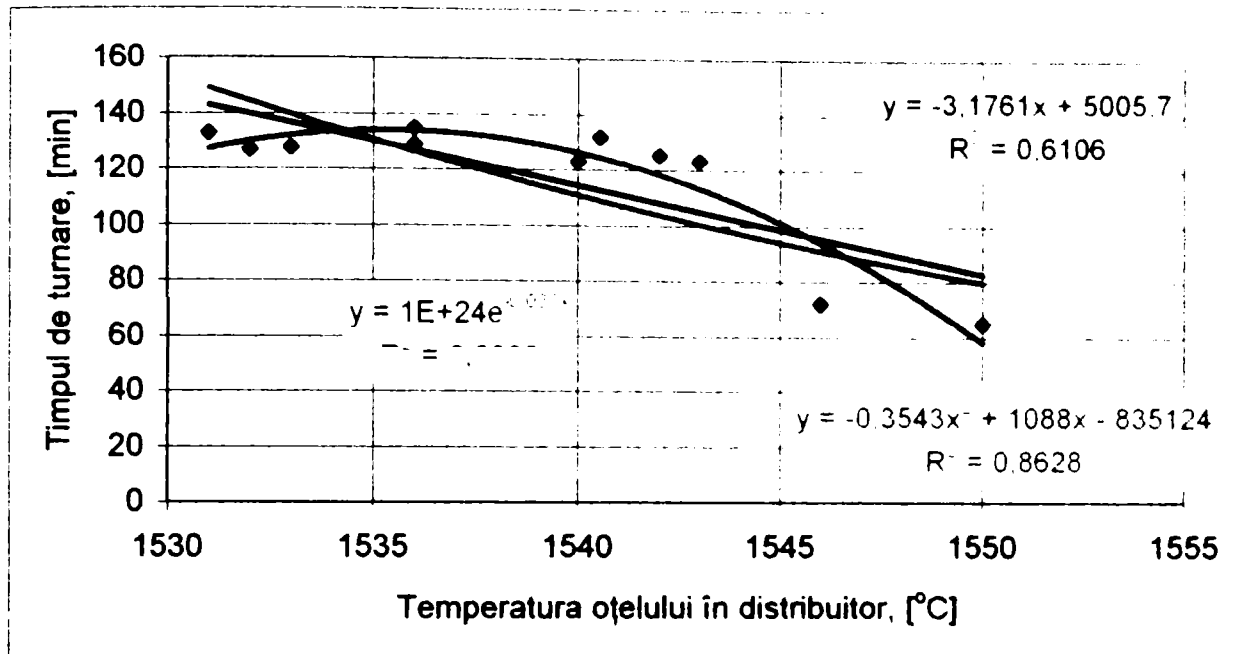


Fig.4.15. Variația timpului de turnare în funcție de temperatura inițială a oțelului din distribuitor, pentru marca 31VMn12

Eliminând cele două șarje din studiu – fig.4.16, se poate concluziona că pentru secvențele formate din două șarje, pentru acest profil, timpul optim este de 28-133min într-un interval foarte restrâns de temperaturi (un gradient de maxim 10°C).

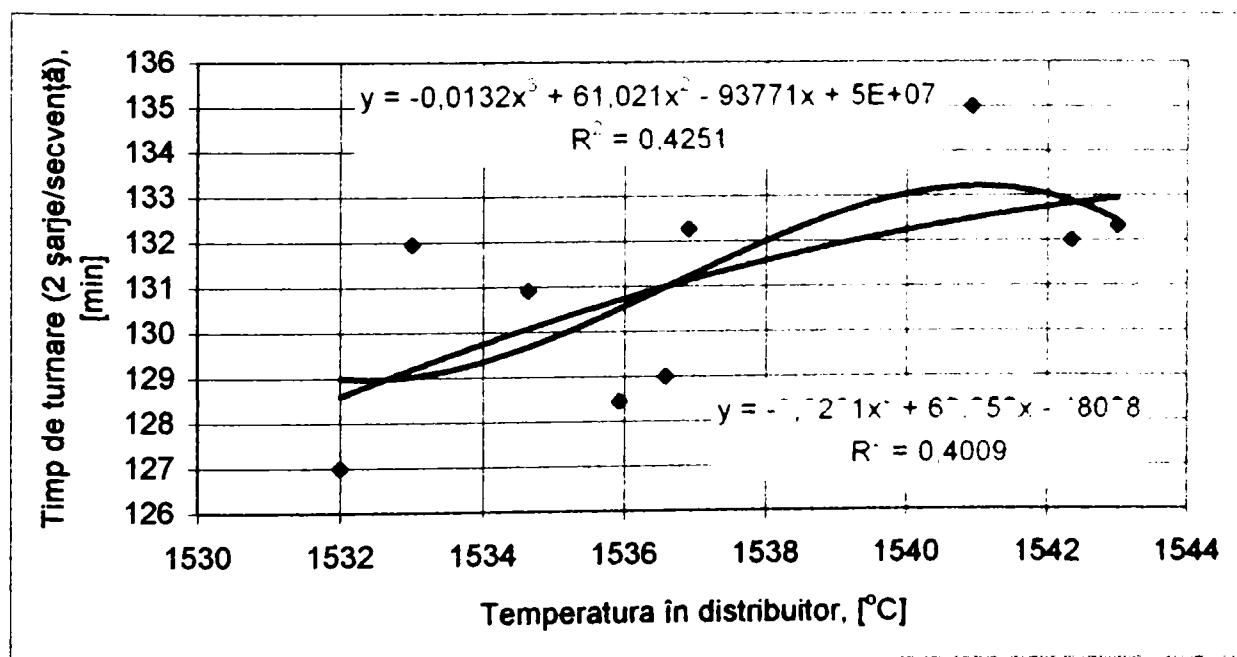


Fig.4.16. Variația timpului de turnare în funcție de temperatura inițială a oțelului din distribuitor, pentru secvențele formate din 2 șarje

Tot un factor limitativ pentru timpul maxim de turnare al unei șarje îl constituie și durabilitatea materialelor refractare, în special pentru orificiile și opurile de turnare. În ultimul timp s-au făcut progrese importante în ceea ce privește durabilitatea, iar sisteme noi (cum ar fi sisteme de închidere cu clapă, încălzirea cu aer a dopurilor, etc), permit perioade lungi de turnare fără întrerupere (turnare secvențială).

În practica curentă se urmărește turnarea cu viteză maxim admisă de calitate a oțelului și dimensiunile semifabricatului, ceea ce impune siguranță în exploatare (în special evitarea străpungerilor), respectarea distanței rezultată din proiectare dintre cristalizor și dispozitivul de tăiere, ținând seama că tăierea nu se poate efectua numai după solidificarea completă.

Limitarea dictată de capacitatea oalei de turnare provine de la faptul că la instalațiile moderne se preferă turnarea întregii șarje provenită de la un cuptor de laborare într-o singură oală și timpul de golire a oalei nu poate depăși o anumită valoare maximă fără ca temperatura să scadă sub limita minim admisă.

Ținând seama de cele arătate mai sus, timpul maxim de turnare depinde de calitatea oțelului, metodele adoptate pentru micșorarea pierderilor de căldură în oală, capacitatea oalei și domeniul admis de temperatură pentru o funcționare sigură și o calitate bună a semifabricatelor.

Schoeffmann R. [16] indică următoarea relație pentru determinarea timpului maxim admis de turnare în funcție de capacitatea și calitatea oțelului:

$$\tau = f \frac{\log G - 0,2}{0,3}, [\text{min}] \quad (4.1.)$$

în care G – reprezintă capacitatea oalei de turnare, [t];

f – coeficient ce depinde de calitatea oțelului;

f = 10 pentru oțelurile cele mai pretențioase

f = 16 pentru oțelurile obișnuite.

Pe baza acestei relații, timpul maxim de turnare este de 50 – 80min pentru oale de 100t și 60 – 100min pentru cele de 300t. În practică, deseori se consideră că pentru majoritatea sortimentelor uzuale de oțeluri și oale de capacitate mai mare de 100t, se poate adopta un timp maxim de turnare de 60min [15].

De exemplu, la mașina de turnare continuă țagle de la Huta Katowice, s-au obținut timpii de turnare, din oală de 330t, prezentați în tab.4.2.[7]

Se poate observa din fig.4.17 că timpul de turnare scade odată cu creșterea secțiunii semifabricatului turnat continuu.

Tab.4.2. Timpi de turnare

Mărimea formatului, [mm]	Timp de turnare din oala de 330t, [min]
□ 105	125
□ 140	96
□ 160	88
190 x 220	78

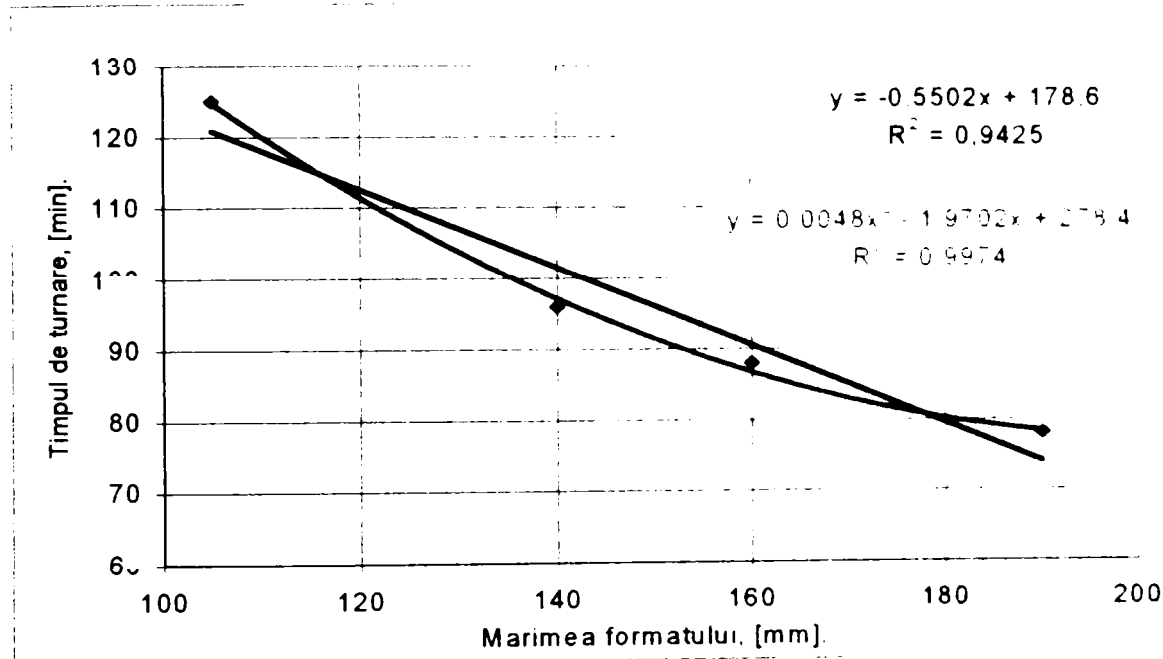


Fig.4.17. Variația timpului de turnare în funcție de mărimea formatului turnat continuu

Conform cu performanțele obținute pe plan mondial, pentru secțiunile studiate, timpii de turnare ar trebui să se încadreze în limitele:

- 39-82min pentru semifabricatul cu secțiune 240x270mm;
- 90-96min pentru semifabricatul cu $\Phi 150$ mm;
- aproximativ 79min pentru semifabricatul cu $\Phi 180$ mm.

În cazurile studiate, având în vedere că șarjele au fost selecționate și tabelate pe secvențe de turnare (anexa IV.2), se poate concluziona că timpii de turnare au variat spre limita inferioară stabilită anterior, fapt logic dacă amintim că unul din avantajele turnării continue este acela de a scurta timpii de turnare la turnarea secvențială. În fig.4.18 am prezentat sintetizat, pe secvențe de turnare și profile turnate, modul de variație a timpului de turnare. Pe baza ecuațiilor prezentate pe grafic, se pot deduce, cu o precizie relativ bună (coeficienții de corelație variind între 0,89-0,97), timpii de turnare și în cazul măririi secvenței de turnare (situație de dorit în practica industrială).

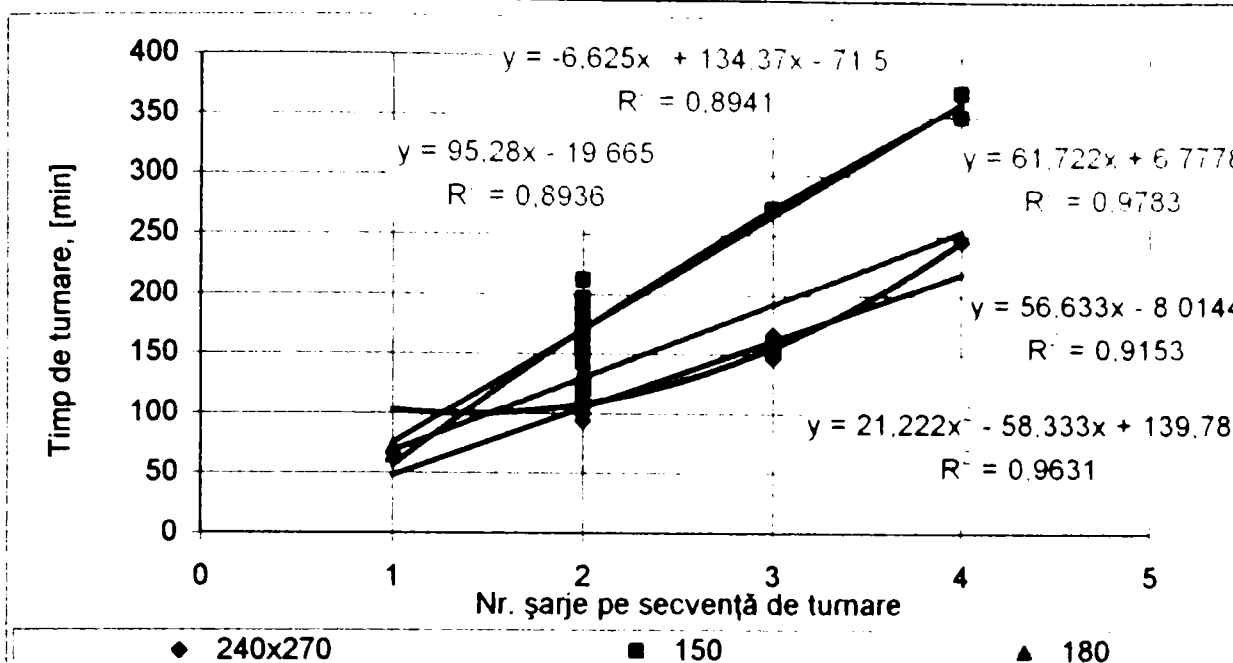


Fig.4.18. Distribuția timpului de turnare pentru cazurile studiate

Luând în considerare un alt indicator foarte important pentru turnarea continuă (și unul dintre motivele pentru care acest procedeu s-a impus pe plan mondial): scoaterea de oțel la turnare (calculată ca și raport procentual între cantitatea de oțel turnată efectiv prin instalație și cantitatea de oțel din distribuitor), s-a analizat în cele ce urmează influența timpului de turnare asupra acestuia. Trebuie menționat că s-a luat în calcul scoaterea de oțel pe secvența de turnare indiferent dacă secvența a fost compusă din una, două, trei sau patru șarje) [49,50].

Astfel, în ceea ce privește turnarea profilului cu secțiunea 240x270mm, în fig.4.19 este redată variația scoaterii în funcție de timpul de turnare pentru toate șarjele studiate. S-au remarcat trei grupuri bine definite, atât prin valorile timpilor de turnare cât și a valorilor pentru scoatere și de asemenea, coeficienți de corelație relativ reduși, fapt datorat neuniformității compunerii secvențelor de turnare:

- pentru secvențele compuse din 2 șarje, timpul a variat între 94-118min și o scoatere totală cuprinsă între 99,19-99,47%, ceea ce reprezintă pentru ambii indicatori, valori bune din punct de vedere tehnologic. O mai bună variație pentru acest tronson de date este prezentat în fig.4.20. Se remarcă un interval optim de variație a timpului de turnare astfel încât scoaterea de oțel să fie maximă, cuprins între 100-112min.

- pentru secvențele formate din trei șarje (fig.4.21), se poate de asemenea remarca un interval optim de variație a timpului de turnare, cuprins între 153-163min. Analizând însă valorile pentru scoatere, se remarcă valori superioare în mare parte celor obținute la turnare a două șarje pe secvență, conturându-se astfel

concluzia că odată cu creșterea numărului de șarje turnate secvențial, scaderile de oțel și deci crește scoaterea la turnarea continuă.

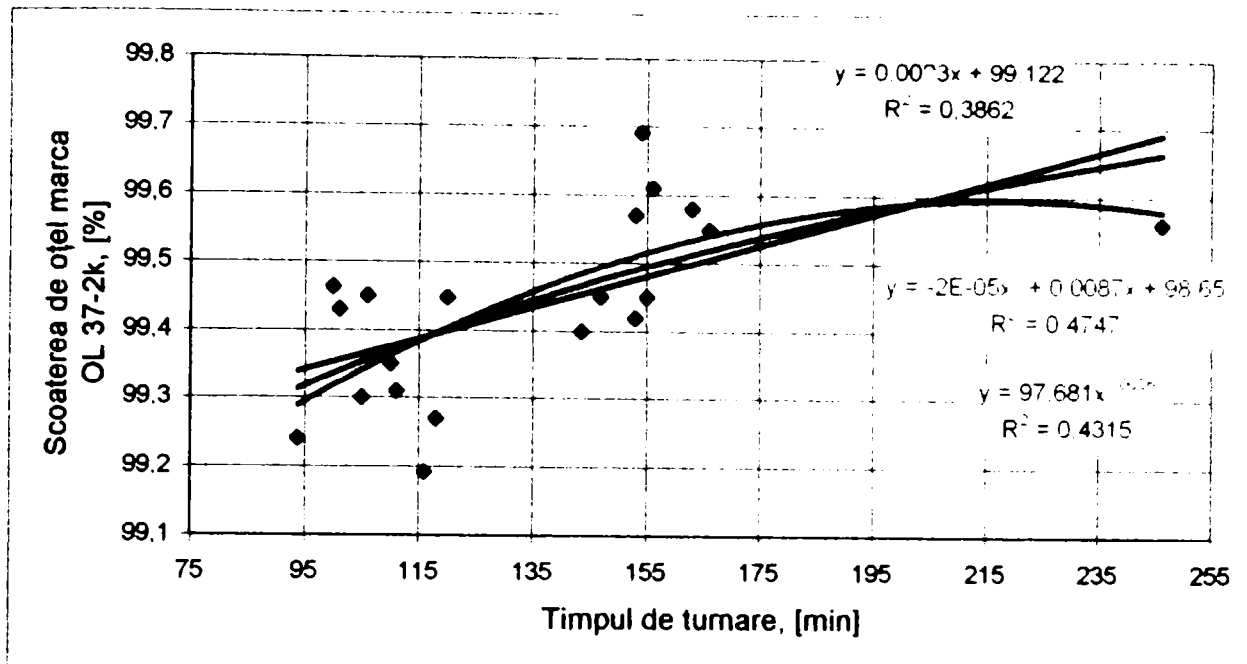


Fig.4.19. Variația scoaterii de oțel la turnarea secțiunii 240x270mm

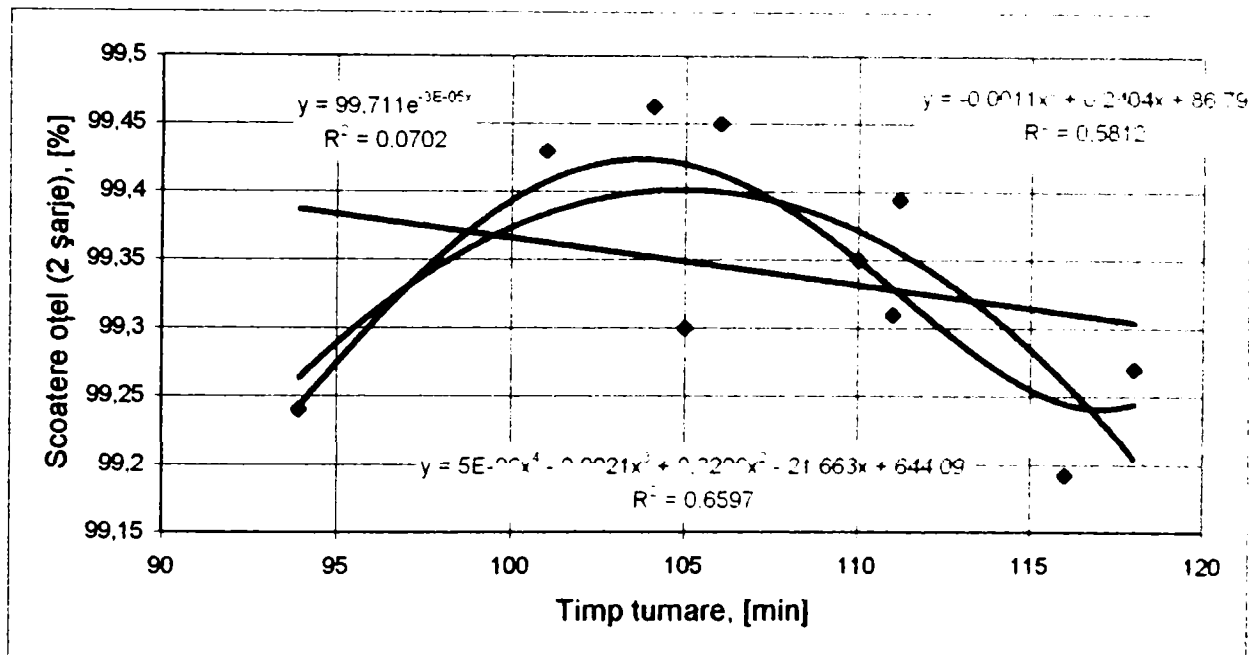


Fig.4.20. Variația scoaterii de oțel (pentru secvența din 2 șarje) în funcție de timp

În ceea ce privește turnarea profilului cu secțiunea $\Phi 150\text{mm}$, au fost puține cazurile în care secvența nu a fost formată din 2 șarje (1 secvență cu o șarjă, 1 secvență cu 3 șarje și 2 secvențe cu 4 șarje). O imagine globală a variației scoaterii în funcție de timpul de turnare este prezentată în fig.4.22.

Exceptând cazurile particulare, în fig.4.23. este prezentată aceeași variație doar pentru secvențele formate din două șarje. Pentru acest profil se remarcă valori mai scăzute ale indicatorului scoatere în special pentru secvențele din prima parte a intervalului studiat.

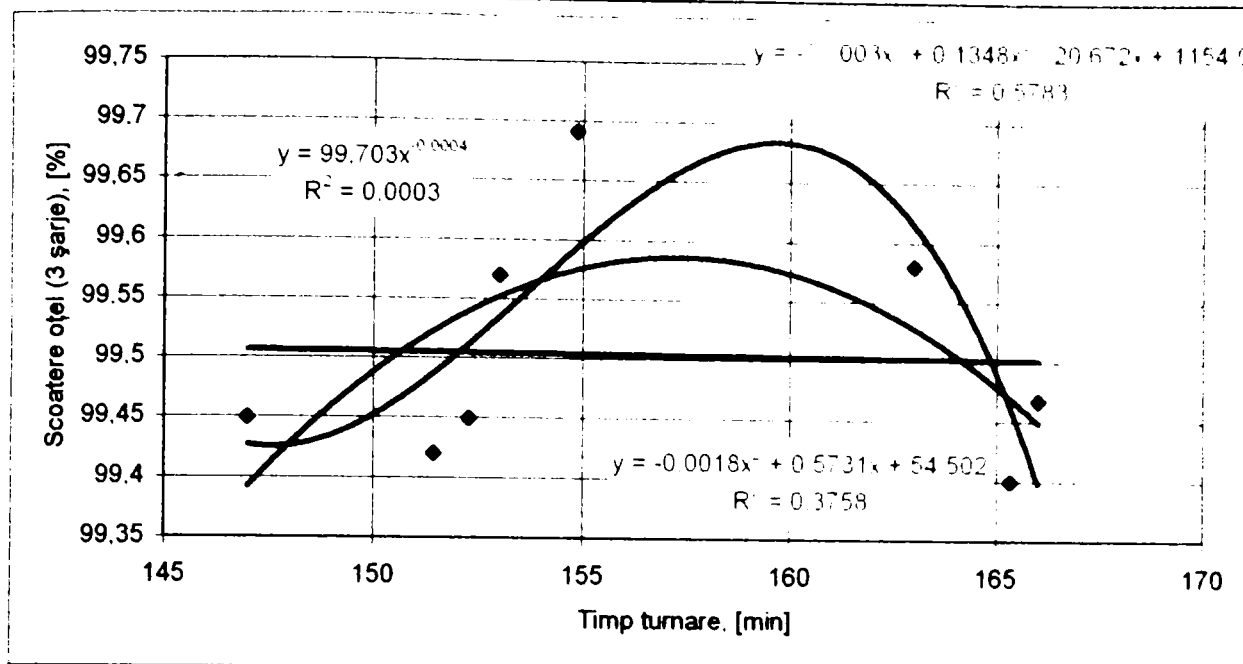


Fig.4.21. Variația scoaterii de oțel (pentru secvența din 3 șarje) în funcție de timp

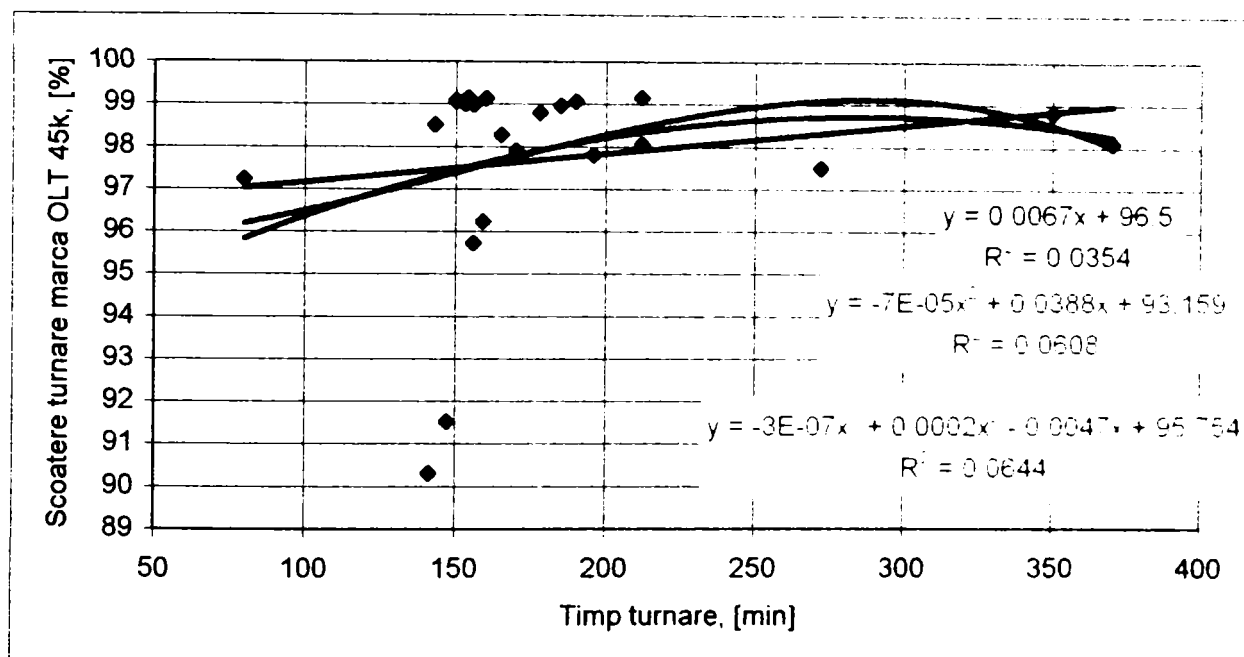


Fig.4.22. Variația scoaterii de oțel la turnarea secțiunii $\Phi 150\text{mm}$

Acest lucru este datorat unei reglări necorespunzătoare a instalației de turnare continuă pentru turnarea acestui tip de profil (pierderi de 9,5t, 19,8t, 21,5t la începutul campaniei de turnare). Dar, după ajustările corespunzătoare, se remarcă valori bune și pentru acest profil (de regulă peste 98%).

Concluzii asemănătoare se obțin și din analiza datelor pentru turnarea profilului cu secțiunea $\Phi 180\text{mm}$. În acest caz, au existat secvențe formate dintr-o șarjă (2) și majoritatea din 2 șarje. Datele sunt prezentate grafic în fig.4.24. Însă, numărul relativ redus de șarje luat în considerare (profilul nu a prezentat stabilitate dimensională corespunzătoare, fapt care a condus la întreruperea campaniei de turnare a profilului) pot duce la obținerea de rezultate ușor eronate.

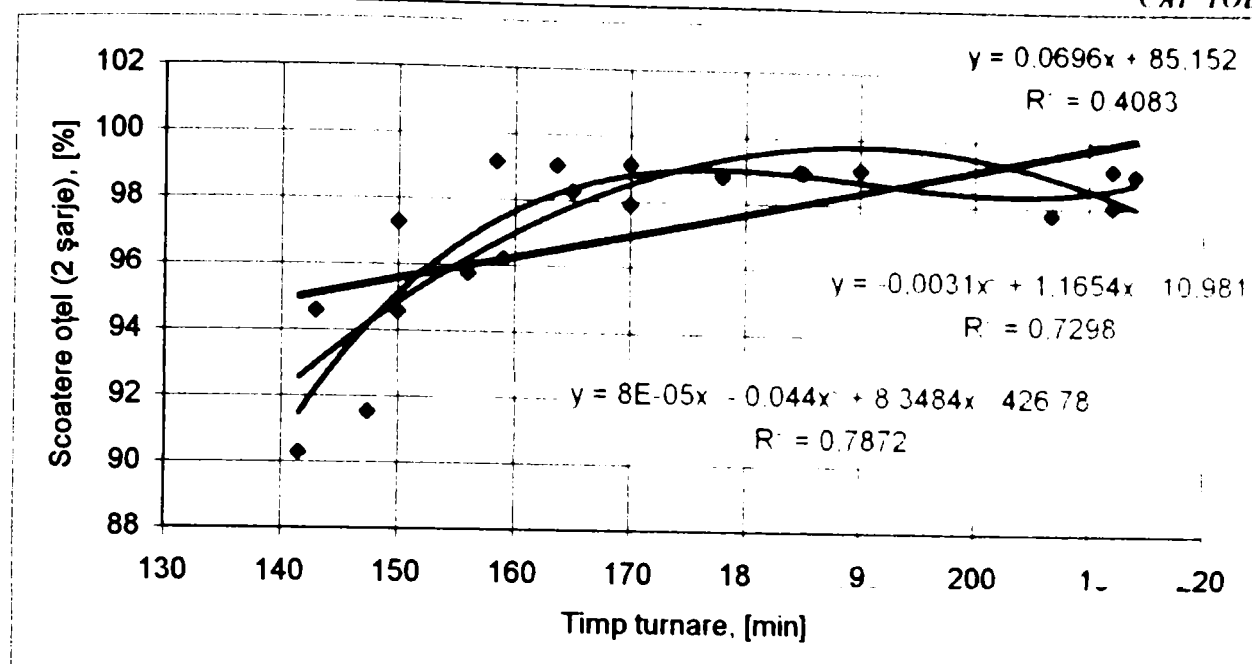


Fig.4.23. Variația scoaterii de oțel (pentru secvența din 2 șarje) în funcție de timp

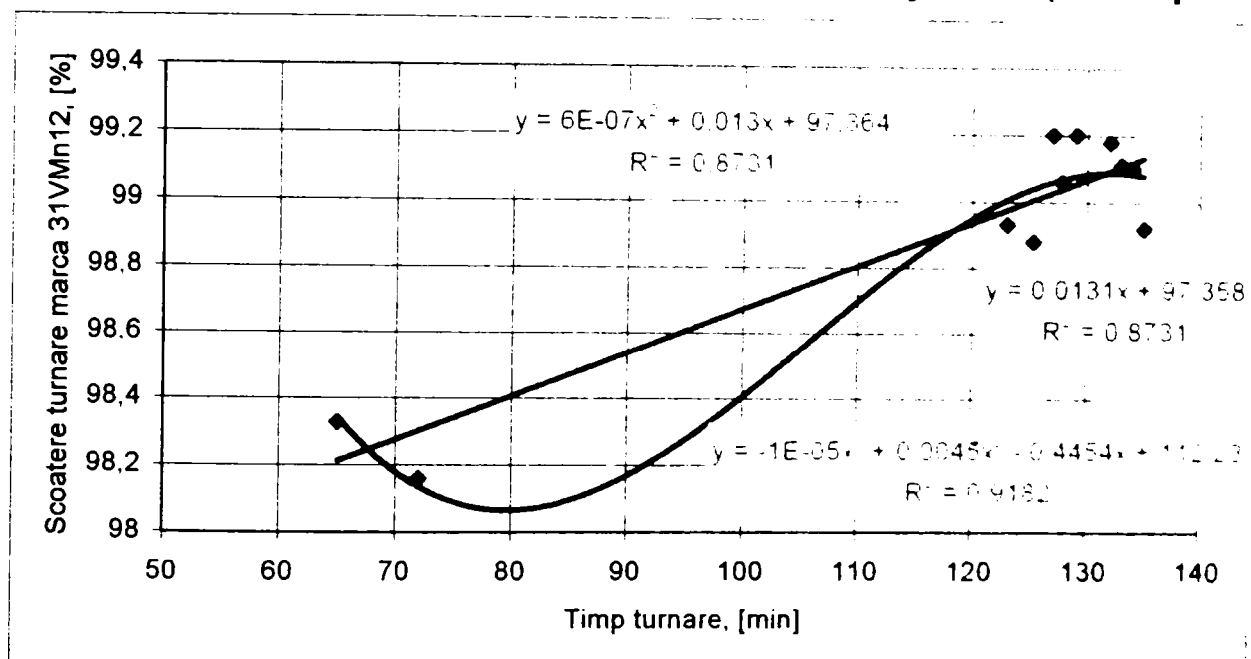


Fig.4.24. Variația scoaterii de oțel la turnarea secțiunii $\Phi 180\text{mm}$

Eliminând și în acest caz secvențele formate dintr-o șarjă, se obține un interval optim tehnologic de variație a timpului de turnare în scopul maximizării indicatorului studiat, interval cuprins între 127-134min (fig.4.25).

Din analiza graficelor anterioare a rezultat o variație relativ bună dacă se adoptă ecuații de corelație polinomială (grad 2 sau mai mare). În schimb, dacă se preferă o variație liniară, exponențială sau putere, se remarcă coeficienți de corelație mai reduși și un grad de dispersie mare ale punctelor relativ la curbele prezentate.

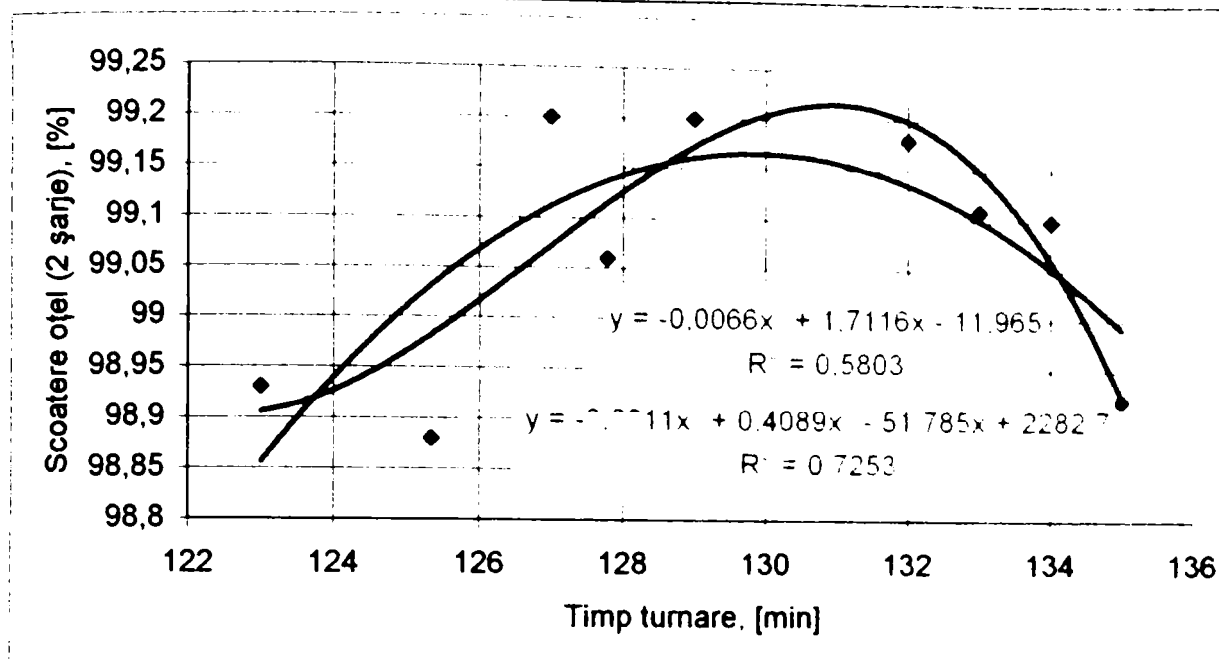


Fig.4.25. Variația scoaterii de oțel (pentru secvența din 2 șarje) în funcție de timp

IV.4. Viteza de turnare

Viteza de turnare este factorul determinant pentru dimensionarea instalației de turnare continuă, deoarece influențează sensibil productivitatea, numărul necesar de fire (pentru a putea goli în timpul maxim admisibil oala de turnare de o anumită capacitate la turnarea unui semifabricat de secțiune dată) și secțiunea minimă a semifabricatului turnat.

În practică se alege viteza maximă admisă de turnare, în funcție de calitatea oțelului, secțiunea semifabricatului (și în special raportul dintre suprafața de cedare a căldurii și volum), timpul de solidificare și distanța dintre cristalizor și dispozitivul de debitare.

O valoare prea mare a vitezei de turnare conduce la formarea unei cruste prea subțiri în cristalizor, fără o rezistență suficientă la presiunea ferostatică a miezului lichid, ceea ce are ca efect pericolul străpungerilor. De asemenea, viteza prea mare mărește porozitatea axială, facilitează formarea fisurilor longitudinale și necesită o înălțime mare a instalației datorită creșterii adâncimii zonei lichide, respectiv a lungimii metalurgice [15,22,41].

O valoare prea mică a vitezei de turnare influențează negativ structura semifabricatului, produce suduri reci și alte defecte de suprafață, poate duce la răcirea excesivă a oțelului în oala de turnare și limitează debitul de metal care la rândul lui determină productivitatea instalației. De asemenea, vitezele mici de turnare limitează capacitatea oalei de turnare sau secțiunea minimă a semifabricatului și necesită un număr mărit de fire [72].

Vitezele de turnare cele mai mari se aplică la oțelurile carbon calmate.

Ţelurile necalmate se toarnă cu viteze considerabil mai reduse, pentru a permite completarea fierberii oţelului în cristalizor şi degajarea gazelor. De asemenea, Ţelurile aliate trebuie turnate cu viteze mai scăzute din cauza sensibilităţii mai ridicate la porozitate centrală şi la formarea fisurilor.

Datorită progreselor realizate în timp, vitezele de turnare au fost considerabil mărite la instalaţiile noi, în special la instalaţiile de turnare continuă a sleburilor. Astfel, dacă la primele instalaţii de turnare a sleburilor mari, viteza de turnare era în general de 0,5m/min şi nu depăşea 0,7m/min, la instalaţiile mai recente, vitezele de turnare pentru sleburile de aceeaşi grosime sunt de circa 2,0–2,5m/min, cu tendinţa de a se mări şi mai mult.

În acest sens, tot pentru maşina de turnare continuă de la Huta Katowice [7], s-au obţinut şi viteze de turnare mult superioare celor amintite anterior, valori prezentate în tab.4.3 şi fig.4.26 (viteza de turnare scade odată cu creşterea mărimii formatului pentru semifabricatul turnat continuu).

Tab.4.3. Viteze practicate la turnarea continuă pe plan mondial

Mărimea formatului, [mm]	Viteza de turnare, [m/min]
□ 105	5,2
□ 140	3,8
□ 160	3,2
190 x 220	2,2

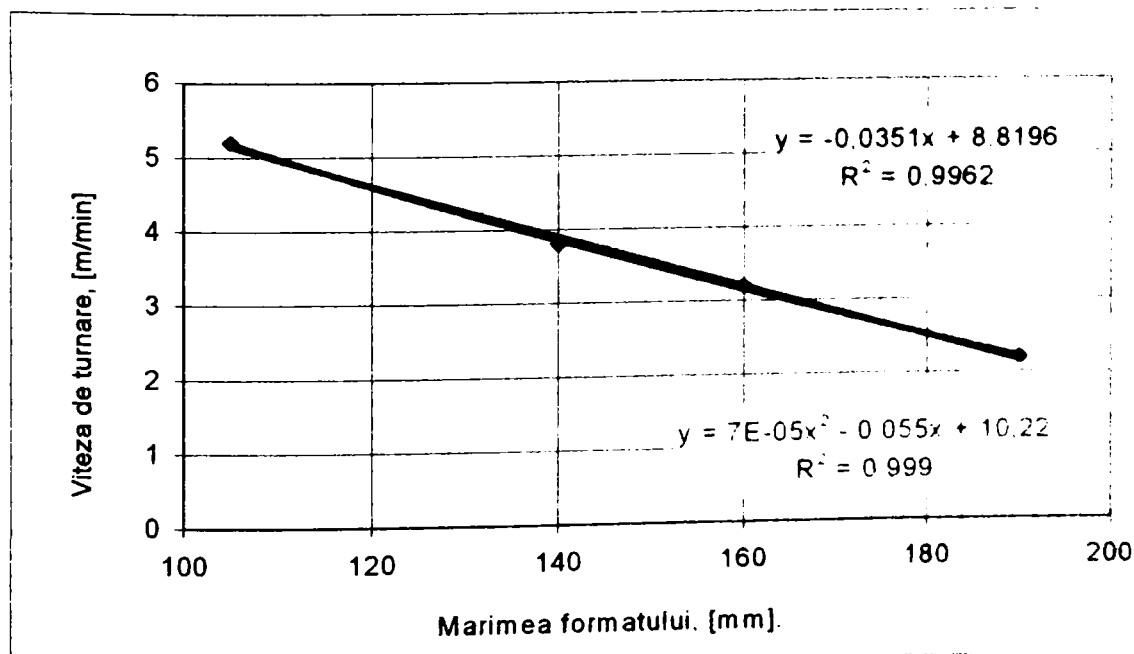


Fig.4.26. Variaţia vitezei de turnare în funcţie de mărimea formatului semifabricatului turnat continuu

În literatura de specialitate [5,7] , pe baza unor experimentări mai speciale, s-a ajuns la concluzia că vitezele optime de turnare, atât pentru semifabricatele de secțiune pătrată cât și pentru cele de secțiune dreptunghiulară, sunt cele apropiate de valoarea 1m/min (fapt evidențiat și în fig.4.27).

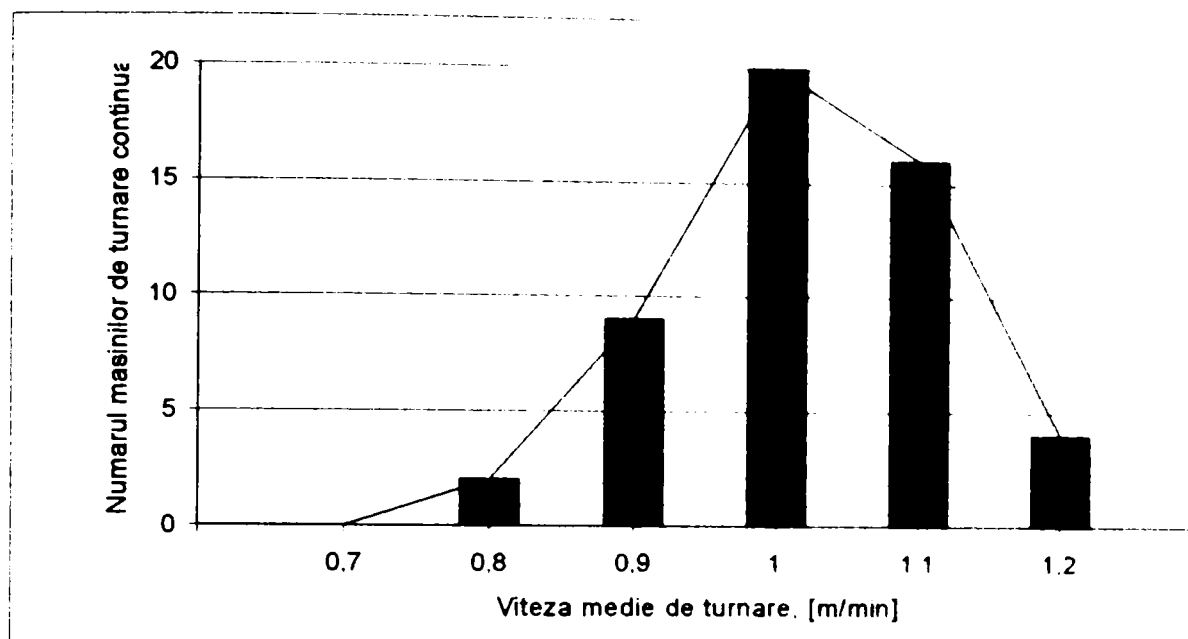


Fig.4.27. Viteza medie de turnare în Europa, 2000

La șarjele studiate această viteză se respectă numai în cazul blumului cu secțiunea 240x270mm fiind valoarea maxim admisă la șarjele studiate. Odată cu căderea însă a secțiunii turnate, crește valoarea vitezei de turnare. În fig.4.28 s-a prezentat o distribuție a modului de turnare pentru cele trei profile studiate, în funcție de viteza de turnare. Astfel, pentru:

- blumul cu secțiunea 240x270mm, viteza a variat între 0,6-1,05m/min în condiții de regim normal de lucru, având în vedere că viteza de început de turnare este mult mai mică (de 0,3m/min) în acest caz. Viteza medie de turnare este de asemenea prezentată de această dată sub formă de funcție polinomială de gradul III, rezultând un coeficient de abatere medie pătratică de 0,93;

- țagla cu diametrul $\Phi 180$ mm, viteza de început de turnare a fost de 1,1m/min în timp ce viteza de regim de lucru a variat cuprinsă între 1,6-1,9m/min. Viteza medie de turnare pentru această secțiune este de 1,75m/min;

- țagla cu diametrul $\Phi 150$ mm a admis viteze de turnate ce au variat între 1,5 și 2,7m/min, cu o viteză de început de turnare de 1,2m/min și o viteză medie mult mai oscilantă, cu valori peste 2m/min. Acest fapt este evidențiat și de coeficientul de abatere medie pătratică mai redus decât în celelalte două cazuri: 0,89.

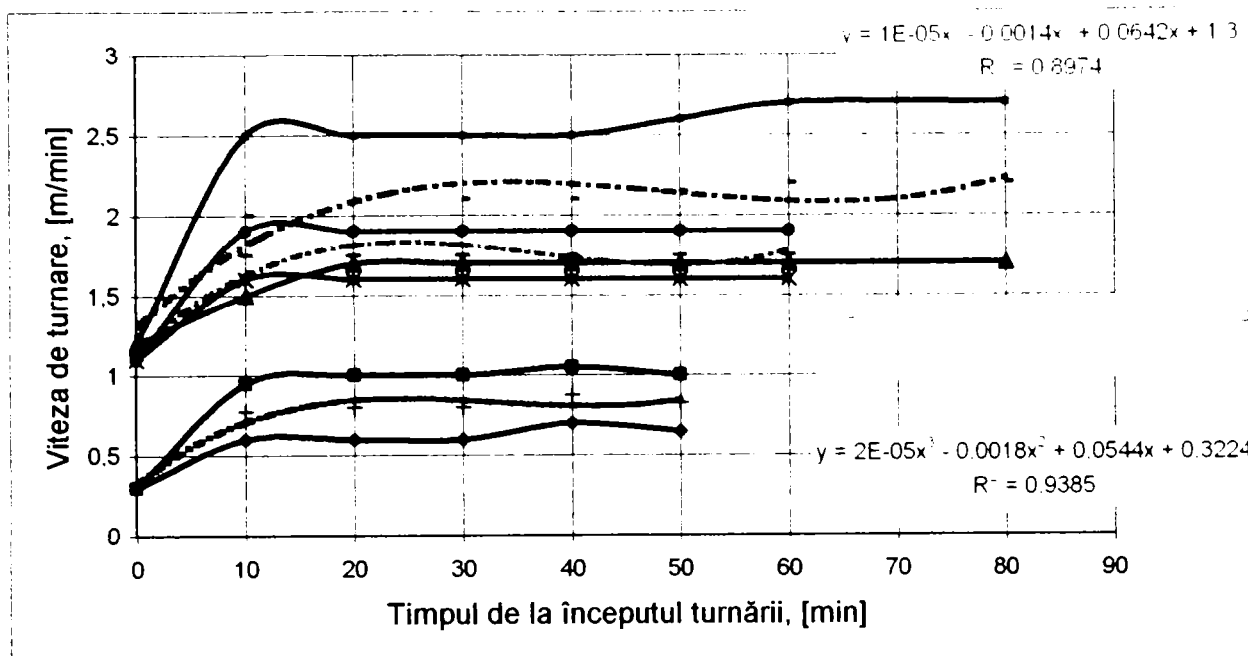


Fig.4.28. Domeniile de variație ale vitezelor de turnare pentru cele trei profile studiate

La stabilirea regimului de turnare a oțelului, pe lângă secțiunea profilului turnat, trebuie avută în vedere marca de oțel turnată (compoziția chimică și temperatura lichidus pentru oțelul respectiv) [22]. La o simplă prezentare, grafic în fig.4.29, vitezele de turnare se înscriu în aceleași valori pentru același profil, indiferent de marca de oțel turnată.

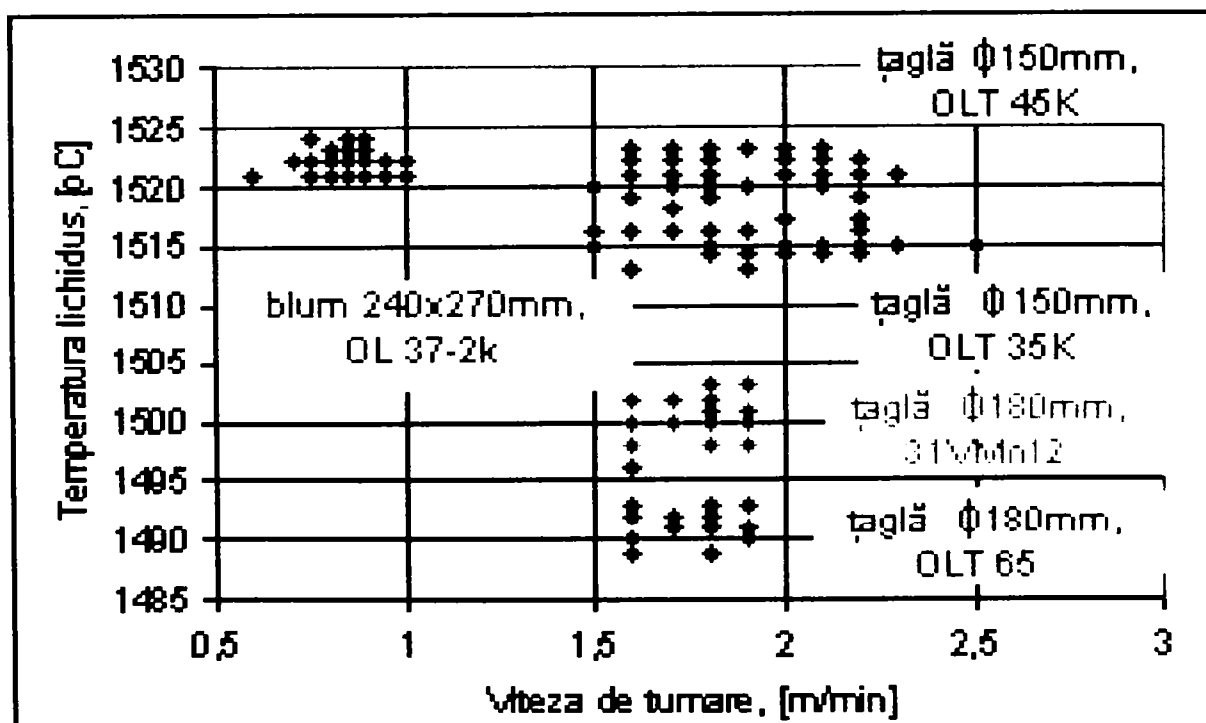


Fig.4.29. Vitezele de turnare în funcție de temperatura lichidus, pentru diferite mărci de oțel

În urma analizei figurii anterioare, datorită gradului de dispersie mare și al influenței secțiunii semifabricatului, este necesară o analiză mult mai amănunțită, în care trebuie ținut seama de mai mulți factori de influență, în același timp. Pentru

aceasta, s-a utilizat produsul software Matlab, în care s-a realizat un program de construire a unor suprafețe de corelație între trei parametri [52]. În urma rulării programului cu datele din anexa IV.1.-IV.7. au rezultat pentru suprafețele de regresie, ecuațiile corespunzătoare și coeficienții de corelație parțiali și globali, iar unde este cazul, punctele de minim, maxim sau puncte șea. Ecuațiile de corelație au forma generală de tipul:

$$z = b_1 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot y + b_4 \cdot x \cdot y + b_5 \cdot x^2 + b_6 \cdot y^2 \quad (4.2.)$$

Astfel, ținând seama de factorii de influență prezentați până în acest moment, o dependență se poate obține între viteza de turnare, temperatura oțelului din distribuitor și diferența de temperatură (între temperatura din distribuitor și temperatura lichidus). Analiza a fost realizată la două perioade de timp diferite de la începutul turnării, în funcție de tipul semifabricatului, pentru firul F1.

Pentru toate secțiunile, dependențele sunt calculate pentru date prelevate la 10min respectiv 40min de la începutul turnării iar datele sunt prezentate ținând seama de factorii de influență prezentați până în prezent, urmând ca pe măsură ce sunt prezentați noi factori de influență, să fie specificată și dependența de ceilalți factori.

Pentru blumul cu secțiune 240x270mm, la 10min după începutul turnării, între viteza de turnare (v), temperatura oțelului în distribuitor ($T_{OL \text{ dist}}$) și diferența dintre temperatura din distribuitor și temperatura lichidus (ΔT) exista variația prezentată în fig.4.30 (suprafața de regresie și curbele de nivel aferente suprafeței). Ecuația care descrie suprafața prezentată este:

$$v = 3,76 \cdot 10^3 - 4,85 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}} + 0,20 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T - 0,07 \cdot 10^{-5} \cdot T_{OL \text{ dist}} \cdot \Delta T + 0,15 \cdot 10^{-5} \cdot T_{OL \text{ dist}}^2 - 0,15 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T^2 \quad (4.3.)$$

iar coeficienții de corelație parțiali și global sunt:

$$r_{yx1} = -0.6905 ;$$

$$r_{yx2} = -0.6832 ;$$

$$r_{x1x2} = 0.9922 ;$$

$$r_{yx1x2} = 0.7907$$

Valorile negative corespund unor dependențe invers proporționale.

Suprafața de regresie obținută admite existența unui punct șea conturându-se în jurul lui domeniul optim tehnologic: viteze de turnare de 0,8-0,9m/min, $T_{OL \text{ dist}}$ de 1545-1560°C și ΔT de 25-33°C.

Aceeași dependență este prezentată în anexa IV.10 la 40min de la începutul turnării. Se remarcă o scădere a vitezei la temperaturi mari ale oțelului în distribuitor și gradient de temperatură crescut.

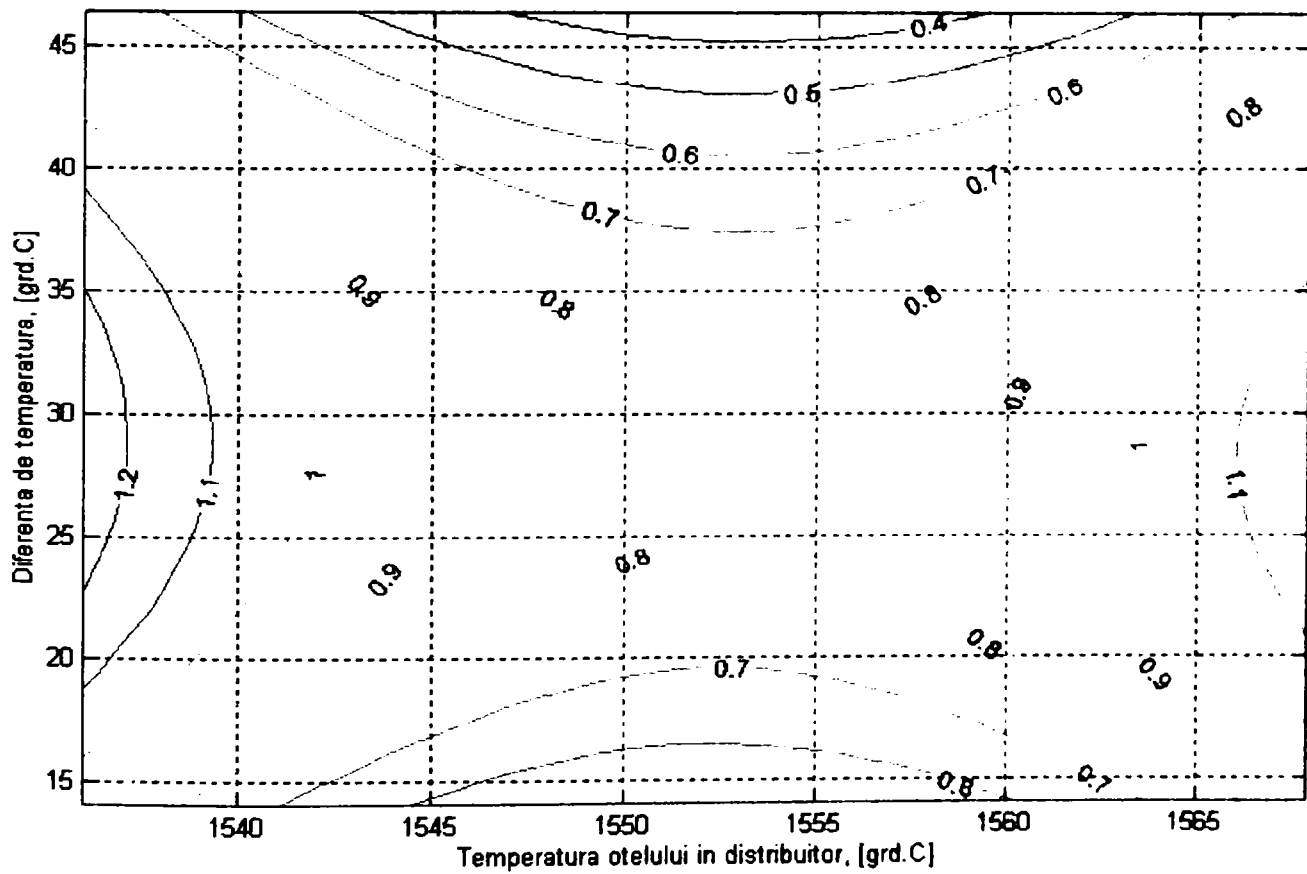
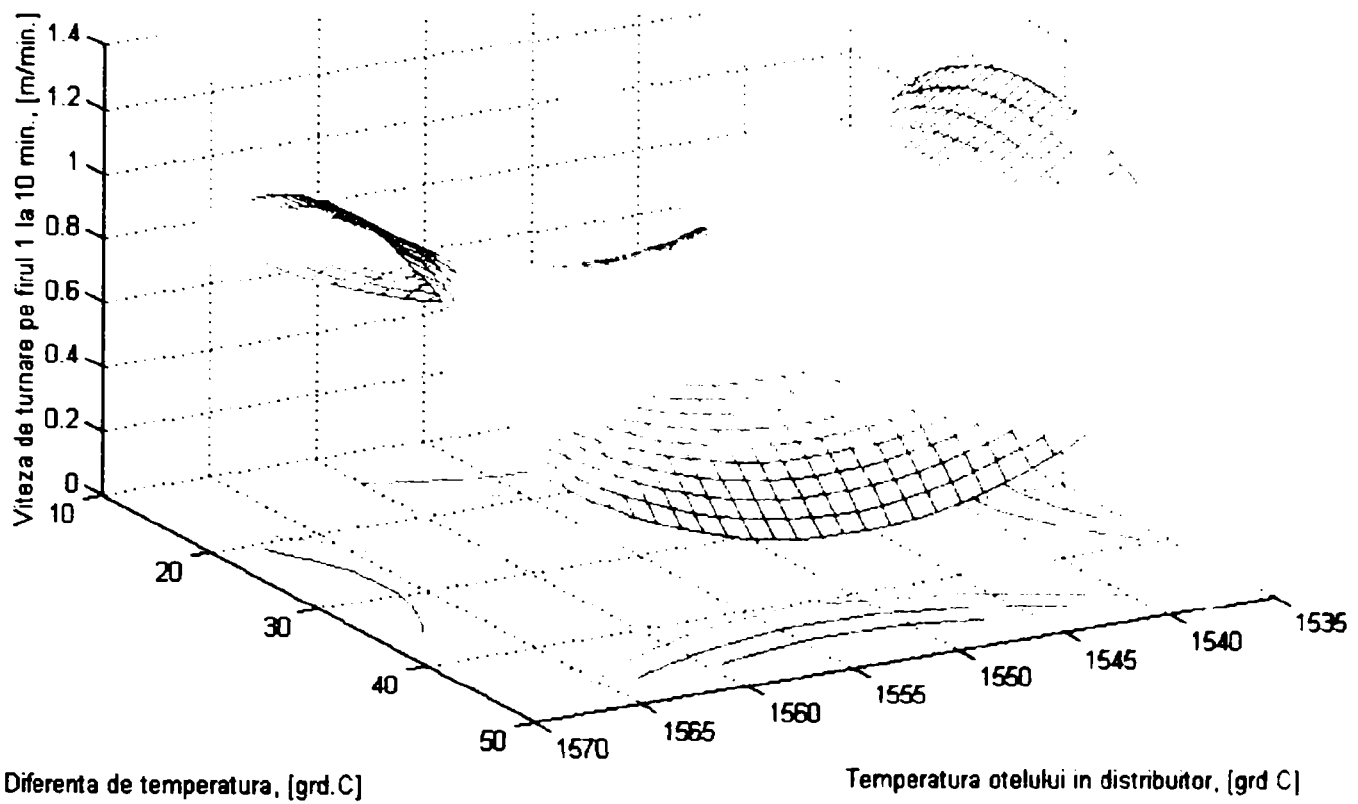


Fig.4.30. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura oțelului în distribuitor și gradientul de temperatură (raportat la temperatura lichidus) pentru blumul 240x270mm la 10min de la începutul turnării

Pentru blumul cu secțiunea $\Phi 150\text{mm}$, variația dintre v , $T_{\text{Ol. dist}}$ și ΔT este rezentată în fig.4.31.

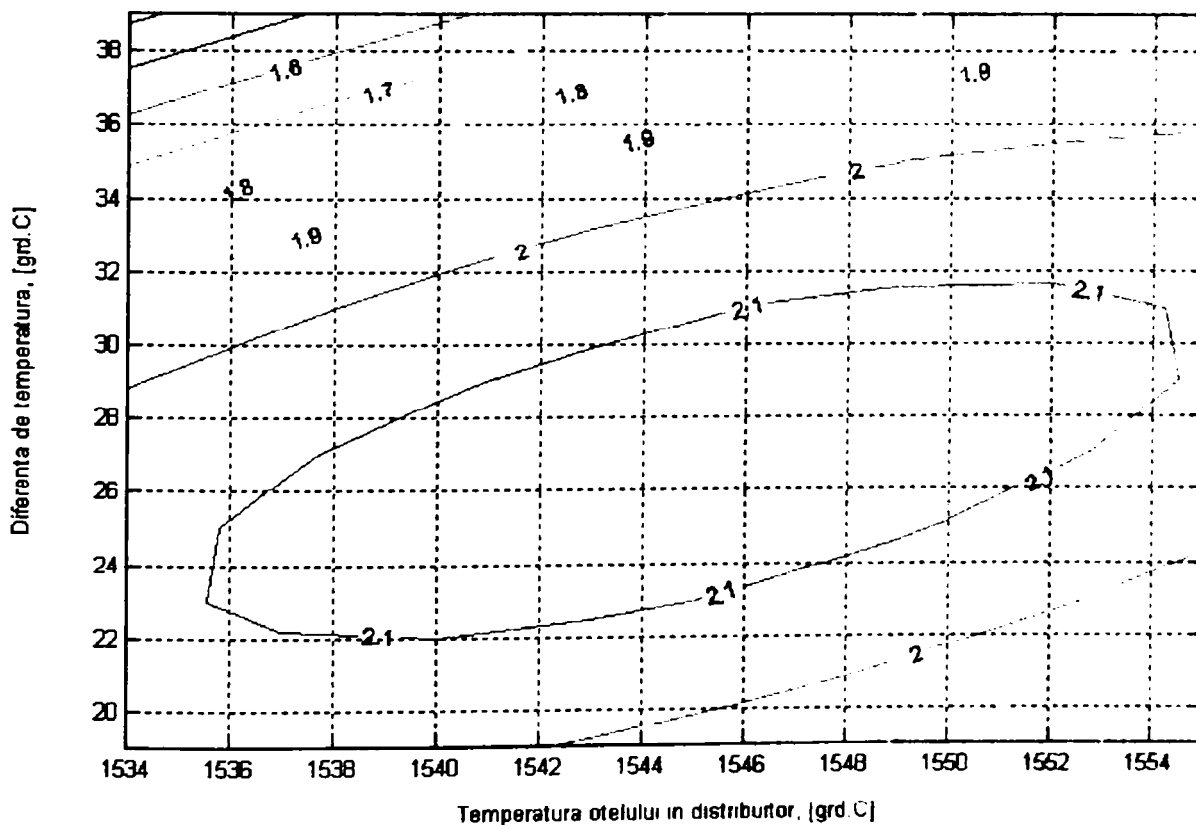
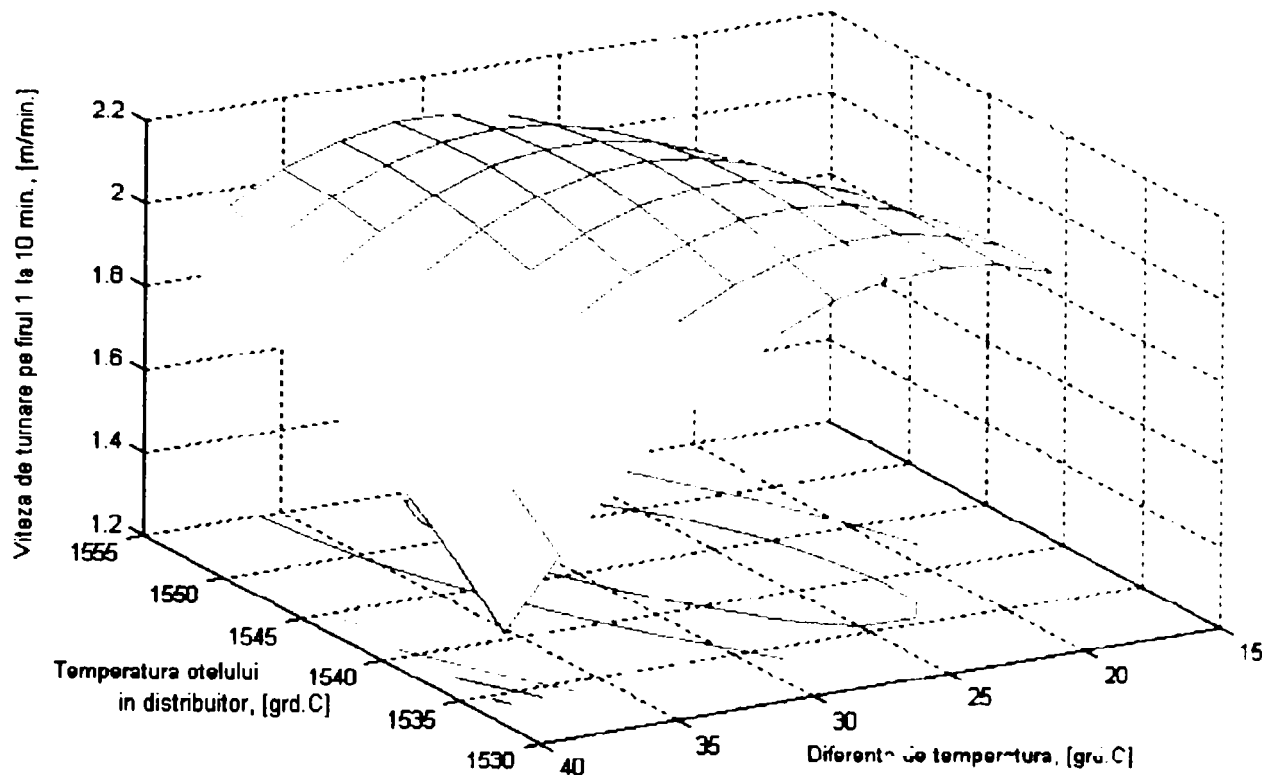


Fig.4.31. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura oțelului în distribuitor și gradientul de temperatură (raportat la temperatura lichidus) pentru țagla $\Phi 150\text{mm}$ la 10min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața prezentată este:

$$v = -1,72 \cdot 10^3 - 2,28 \cdot T_{OL \text{ dist}} - 2,71 \cdot \Delta T - 1,85 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}} \cdot \Delta T - 0,75 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}}^2 - 2,89 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T^2 \quad (4.4.)$$

iar coeficienții de corelație parțiali și global sunt:

$$r_{yx1} = -0.4456;$$

$$r_{yx2} = -0.4565 ;$$

$$r_{x1x2} = 0.9899 ;$$

$$r_{yx1x2} = 0.6586$$

Dependența admite un punct de maxim pentru viteza de turnare (2,1-2,2m/min) tot în domeniul tehnologic pentru un interval mare de variație a temperaturilor oțelului în distribuitor dar pentru un gradient de temperatură raportat la temperatura lichidus de maxim 32°C. În cazul în care gradientul de temperatură este mai mare, se adoptă o viteză de turnare mai mică (pentru a se putea asigura condițiile optime de răcire ale semifabricatului).

La o perioadă de 40min de la începutul turnării, se obține variația din anexa IV.11.

Pentru profilul cu secțiunea $\Phi 180\text{mm}$, aceeași dependență are forma din figura 4.32. Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -5,074 \cdot 10^3 + 6,81 \cdot T_{OL \text{ dist}} - 9,57 \cdot \Delta T + 6,53 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}} \cdot \Delta T - 2,28 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}}^2 - 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T^2 \quad (4.5.)$$

iar coeficienții de corelație parțiali și global sunt:

$$r_{yx1} = -0.4102;$$

$$r_{yx2} = -0.4076;$$

$$r_{x1x2} = 0.9795 ;$$

$$r_{yx1x2} = 0.6112$$

Variația rezultată este similară cu cea obținută pentru cealaltă secțiune rotundă, cu modificările caracteristice secțiunii (viteză de turnare mai scăzută în cazul secțiunii cu diametrul mai mare, temperaturi adaptate pentru mărcile de oțeluri studiate). Și în acest caz se admite un maxim în domeniul tehnologic pentru viteza maximă de turnare de 1,8m/min, viteză adoptată în funcție de ceilalți parametri studiați, respectiv temperatura oțelului din distribuitor și gradientul de temperatură raportat la temperatura lichidus.

La un interval de timp de 40min de la începutul turnării, se poate considera că între parametrii studiați se stabilește un echilibru (anexa IV.12), viteza de regim fiind de 1,7-1,8m/min. Se pot adopta însă viteze de turnare ridicate pentru temperaturi mari ale oțelului în distribuitor dar gradient de temperatură scăzut; cu cât crește și gradientul de temperatură, viteza de turnare trebuie scăzută.

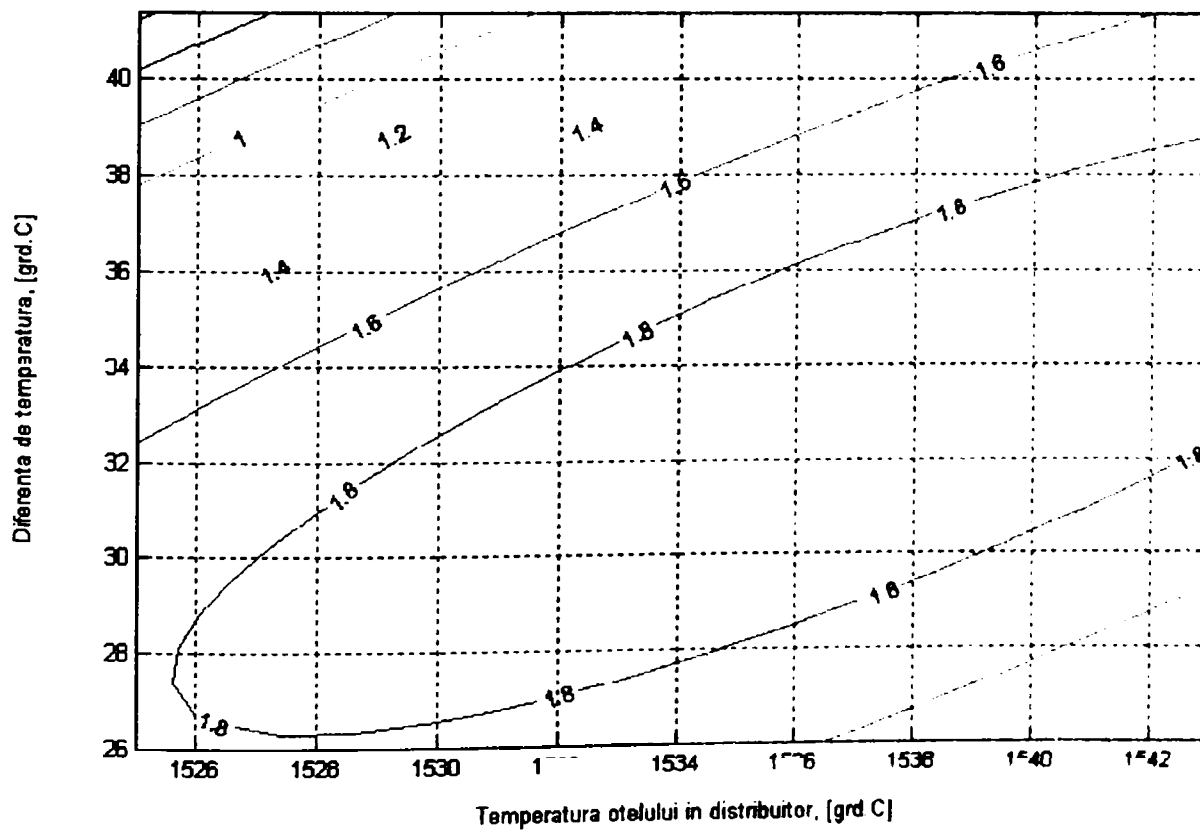
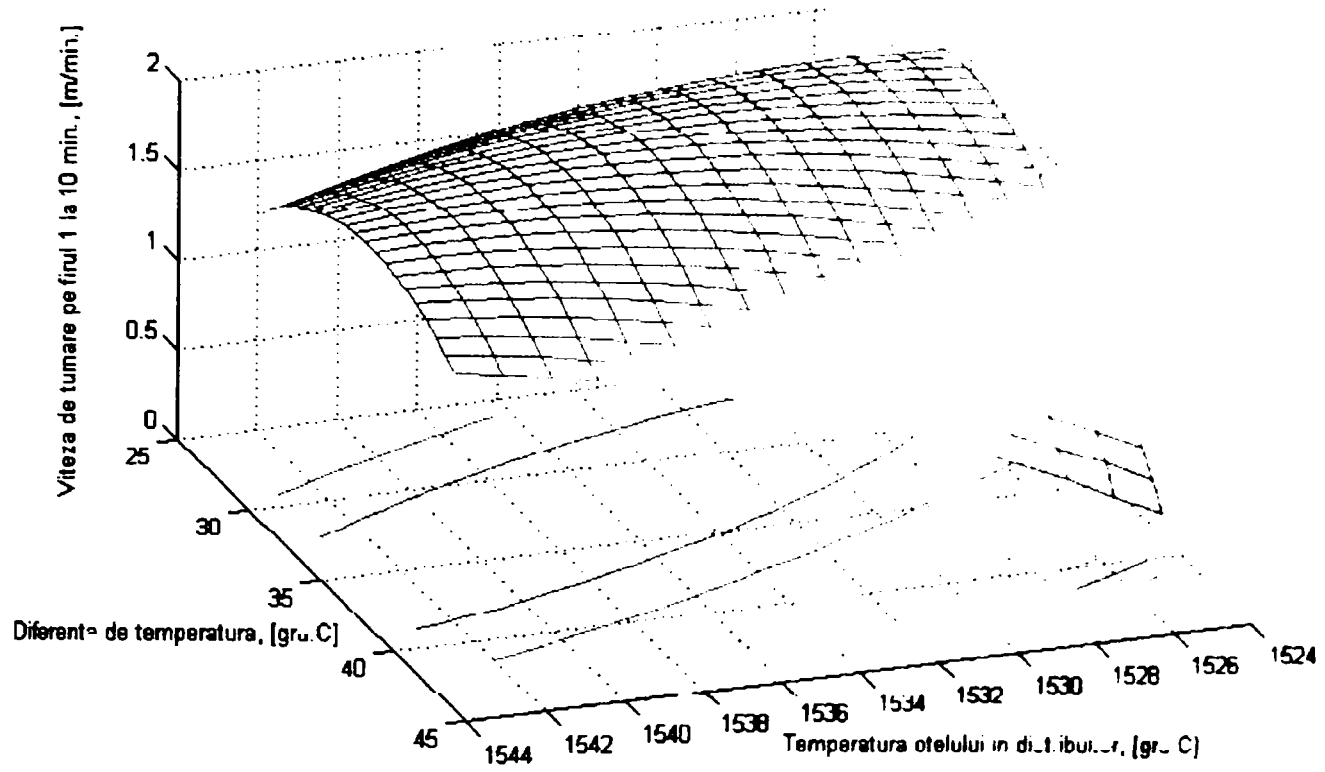


Fig.4.32. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura oțelului în distribuitor și gradientul de temperatură pentru țaga $\Phi 180\text{mm}$ la 10min de la începutul turnării

IV.5. Răcirea primară

Grosimea crustei solidificate depinde direct de cantitatea de căldură îndepărtată pe durata parcurgerii cristalizorului. Parametrii care influențează cantitatea de căldură îndepărtată depinde de debitul de apă de răcire al cristalizorului, presiunea, temperatura apei de răcire dar și supraîncălzirea oțelului.

Viteza apei trebuie să fie menținută la valori ridicate pentru a se reduce efectul de deformare a cristalizorului la minim. Dacă se funcționează la viteze și presiuni scăzute, fluxul termic din cristalizor este instabil și apar fluctuații ale peretelui cristalizorului în timp, ceea ce cauzează deformări semnificative ale cristalizorului și are efecte negative asupra calității semifabricatului odată cu creșterea rugozității suprafeței și adâncimea semnelor în urma oscilațiilor [41,53].

Datele referitoare la presiunea și debitul apei de răcire în cristalizor sunt prezentate în anexa IV.5. iar în anexa IV.6. este redată temperatura de intrare a apei în cristalizor și gradientul de temperatură la ieșirea din cristalizor (gradient calculat ca diferență între temperatura de ieșire și cea de intrare a apei), la diferite momente de timp, date de la începutul turnării.

Pentru profilul cu secțiunea 240x270mm, având în vedere debitul diferit al apei de răcire pe cele două laturi ale cristalizorului, între viteza de turnare și debitul respectiv presiunea apei de răcire s-au obținut dependențele din fig.4.33 respectiv 4.34 al căror ecuații și coeficienți de corelație sunt prezentați mai jos:

$$v = -103,45 + 0,21 \cdot d_{lat} - 2,46 \cdot p_{apa} - 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot d_{lat} \cdot p_{apa} - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{lat}^2 + 0,29 \cdot p_{apa}^2 \quad (4.6.)$$

$$r_{yx1x2} = 0,7984$$

$$v = 299,73 - 0,50 \cdot d_{long} - 15 \cdot p_{apa} - 7,3 \cdot 10^{-3} \cdot d_{long} \cdot p_{apa} - 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot d_{long}^2 + 0,55 \cdot p_{apa}^2 \quad (4.7.)$$

$$r_{yx1x2} = 0,8163$$

Exceptând diferențele normale ale debitului pentru cele două laturi, în primul caz se observă existența unui punct șea pentru care se obține o valoare optimă a vitezei de turnare de 0,84m/min pentru o presiune a apei de maxim 7,3bari și un debit pentru latura mare a cristalizorului de 1075-1095 l/min.

Pentru latura mică, creșterea vitezei de turnare implică fie valori mari ale presiunii și debitului, fie este suficient creșterea unuia dintre parametrii, în defavoarea celuilalt (suprafața admițând un punct de minim).

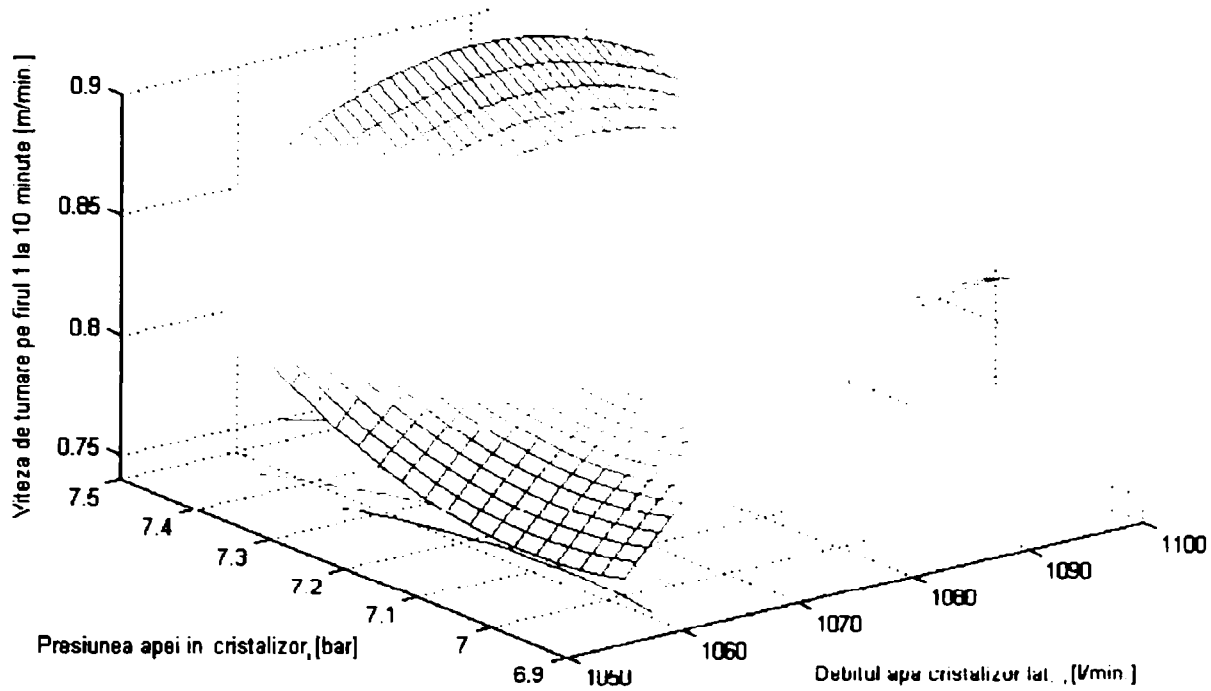


Fig.4.33. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei de răcire (latura de 270mm) din cristalizor

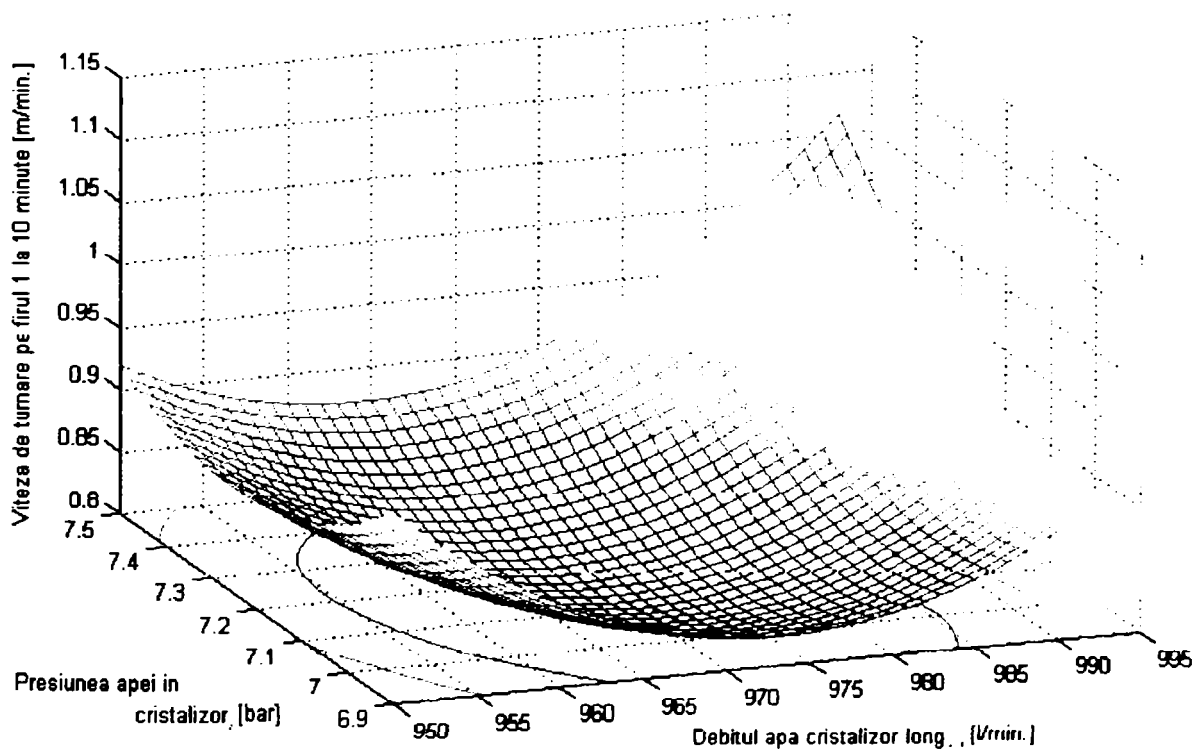


Fig.4.34. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei de răcire (latura de 240mm) din cristalizor

Pentru o analiză mai amănunțită, în fig.4.35 este prezentată variația vitezei de turnare în funcție de debitul apei de răcire din cristalizor pe cele două laturi, de

unde rezultă valorile optime de variație pentru parametrii studiați: la o viteză de turnare de 0,85m/min se obțin debitele pentru latura mică de 960-975 l/min iar pentru latura mare de 1065-1090 l/min.

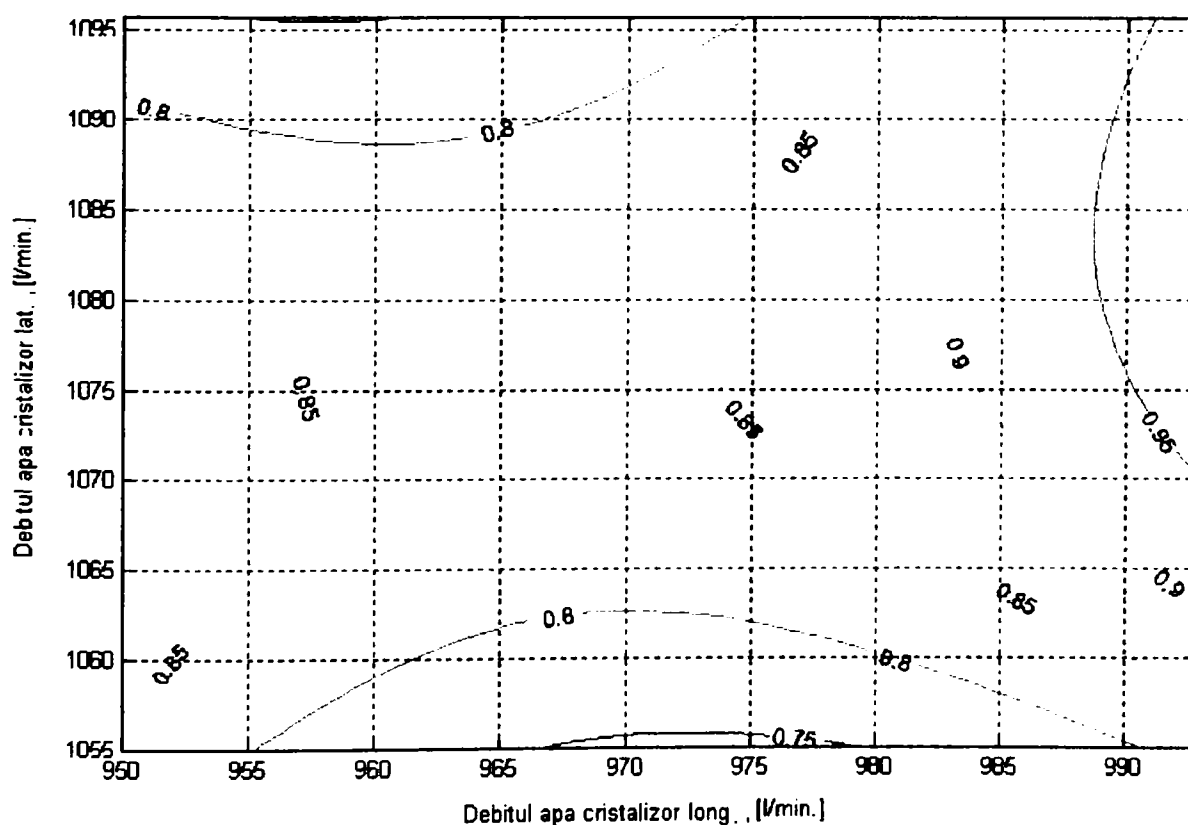
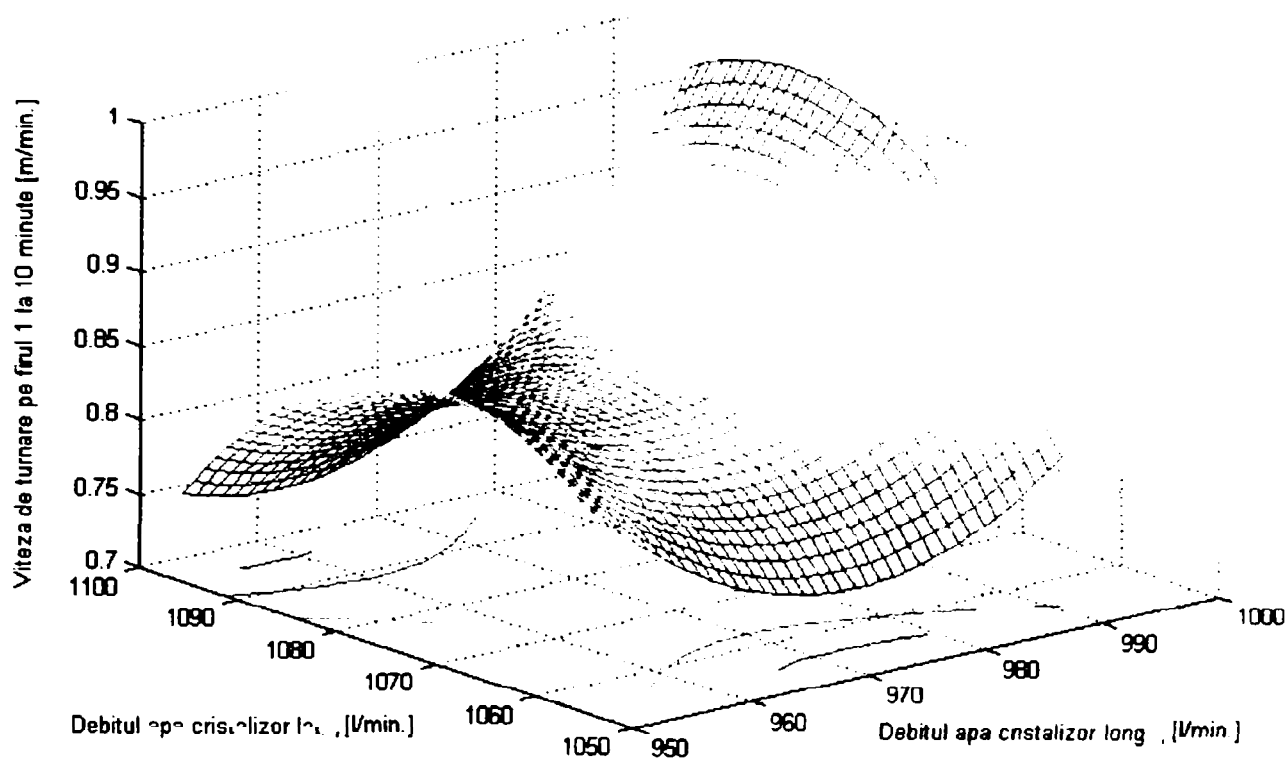


Fig.4.35. Variația vitezei de turnare în funcție de debitul apei de răcire pe cele două laturi din cristalizor la 10min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața are coeficientul global de corelație de 0,7325 și are forma:

$$v = 83,09 - 0,49 \cdot d_{\text{long}} + 0,29 \cdot d_{\text{lat}} + 0,135 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{long}} \cdot d_{\text{lat}} + 0,182 \cdot d_{\text{long}}^2 - 0,197 \cdot d_{\text{lat}}^2 \quad (4.8.)$$

Aceleași dependențe sunt prezentate în anexa IV.13 la 40min de la începutul turnării, când, exceptând variația diferită a vitezei în funcție de presiune și debit pe latura mare (suprafața obținută admite un maxim în afara domeniului tehnologic și se poate admite că are o comportare similară ca și în cazul în care ar admite un minim), modul și valorile de variație nu suferă modificări prea mari (în minus cu 5 l/min pe ambele fețe ale semifabricatului).

O analiză similară se poate face și în cazul țagelor studiate cu observația că în aceste cazuri, debitul apei de răcire nu variază pe secțiune, valorile fiind adaptate la tipurile de semifabricate turnate.

Astfel, dacă pentru țagla cu diametrul de 150mm suprafața obținută admite un minim în afara domeniului tehnologic (fig.4.36) iar viteza de turnare crește odată cu parametrii de răcire ai cristalizorului, pentru țagla cu diametrul de 180mm (fig.4.37) care admite un minim la limita domeniului tehnologic, se pot obține domeniile dorite de variație, selectate în funcție de viteza de turnare adoptată.

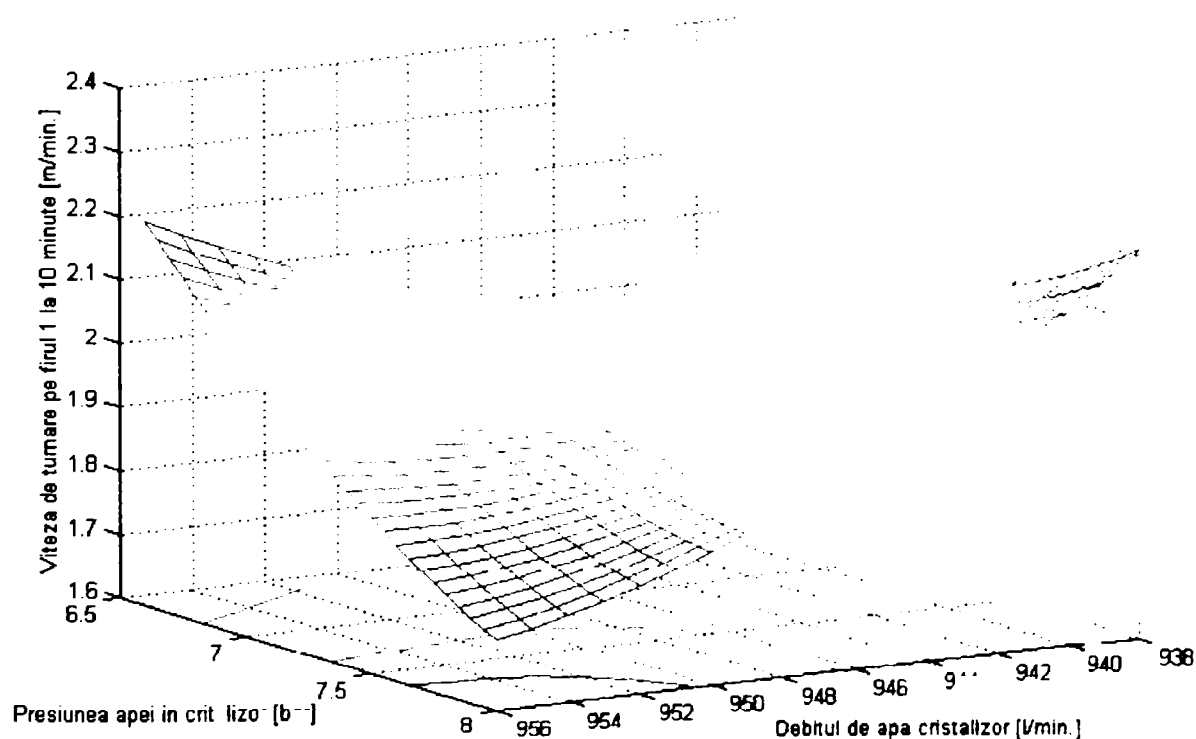


Fig.4.36. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei de răcire din cristalizor pentru secțiunea $\Phi 150\text{mm}$

Ecuția suprafeței de regresie din fig.4.36. este:

$$v = 2,23 \cdot 10^3 - 4,9 \cdot d_{\text{apa}} + 23,7 \cdot p_{\text{apa}} - 0,5 \cdot p_{\text{apa}}^2 \quad (4.9.)$$

iar coeficientul de corelație este: $r_{yx1x2} = 0,8430$

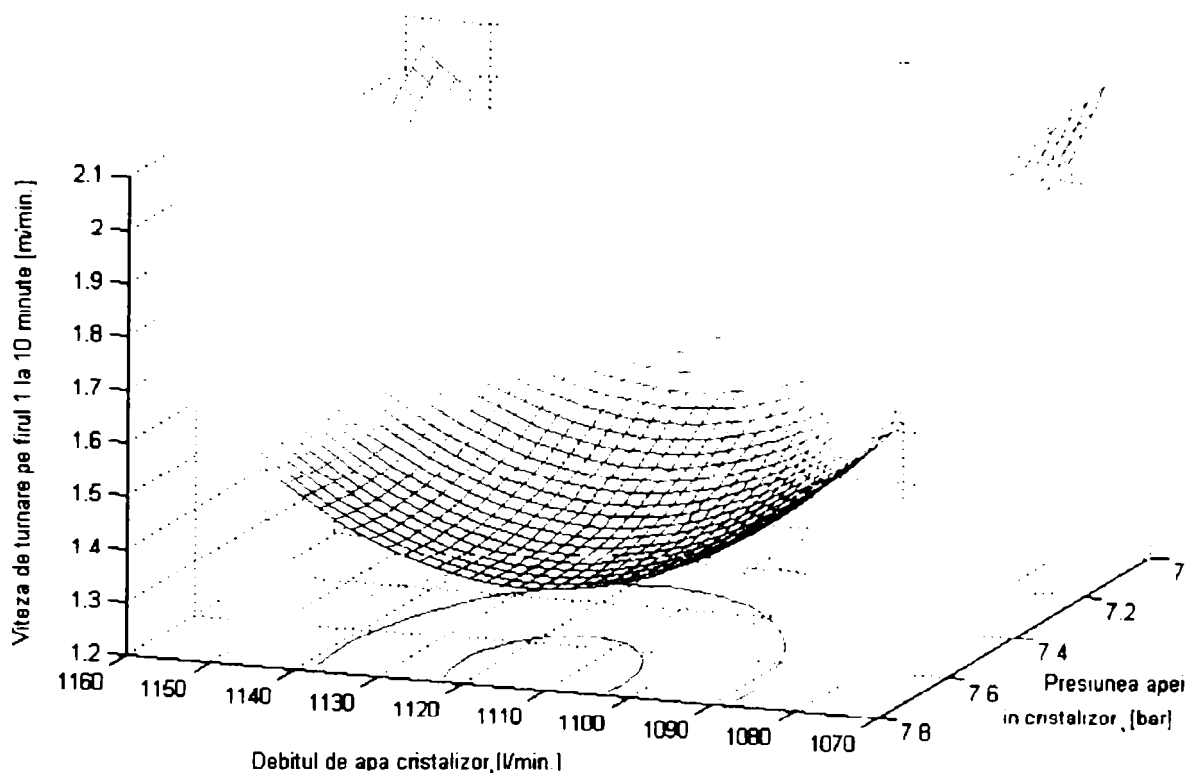


Fig.4.37. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei de răcire din cristalizor pentru secțiunea $\Phi 180\text{mm}$

Ecuția suprafeței și coeficientul de corelație sunt:

$$v = 298,52 - 0,43 \cdot d_{\text{apa}} - 13,78 \cdot p_{\text{apa}} + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{apa}} \cdot p_{\text{apa}} + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{apa}}^2 + 0,71 \cdot p_{\text{apa}}^2 \quad (4.10.)$$

$$r_{yx1x2} = 0,7635$$

Aceste variații nu se modifică nici la 40min de la începutul turnării, când turnarea continuă este în regim staționar, dependențele fiind prezentate în anexa IV.14.

Pentru un studiu mai amănunțit al proceselor care au loc la răcirea primară, s-a considerat necesar și studiul temperaturii apei de răcire din cristalizor și modul în care aceasta influențează parametrii turnării continue (respectiv viteza de turnare) și în mod inevitabil condițiile în care se realizează formarea crustei din cristalizor. Datele prelevate sunt prezentate tabelar în anexa 4.6.

S-a avut în vedere și creșterea temperaturii apei de răcire la ieșirea din cristalizor, acesta fiind de fapt unul din parametrii considerați în studiu.

Pentru semifabricatul cu secțiunea $240 \times 270\text{mm}$, s-au putut remarca temperaturi ale apei la intrarea în cristalizor cu valori variind între $18,7-43^\circ\text{C}$

fig.4.38) și creșteri ale temperaturii apei la ieșirea din circuitul de răcire al cristalizorului de $2-5^{\circ}\text{C}$ – la 10min de la începutul turnării.

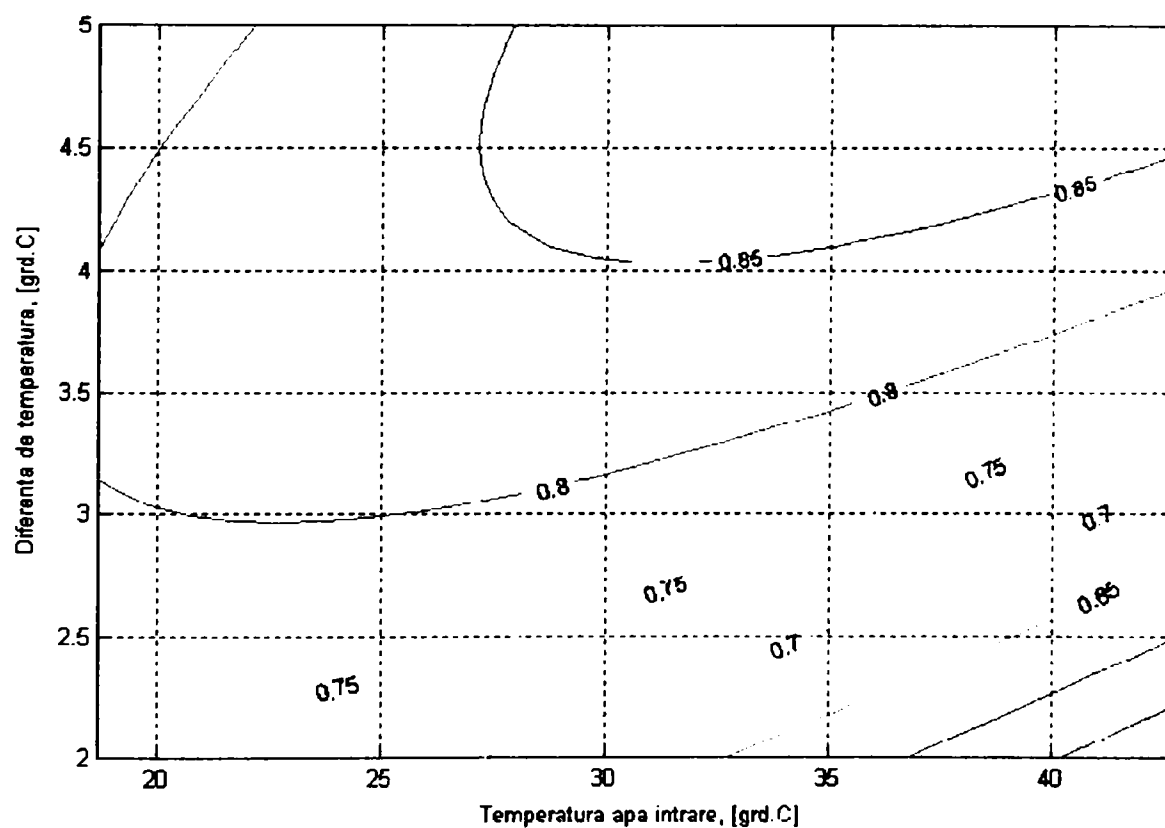
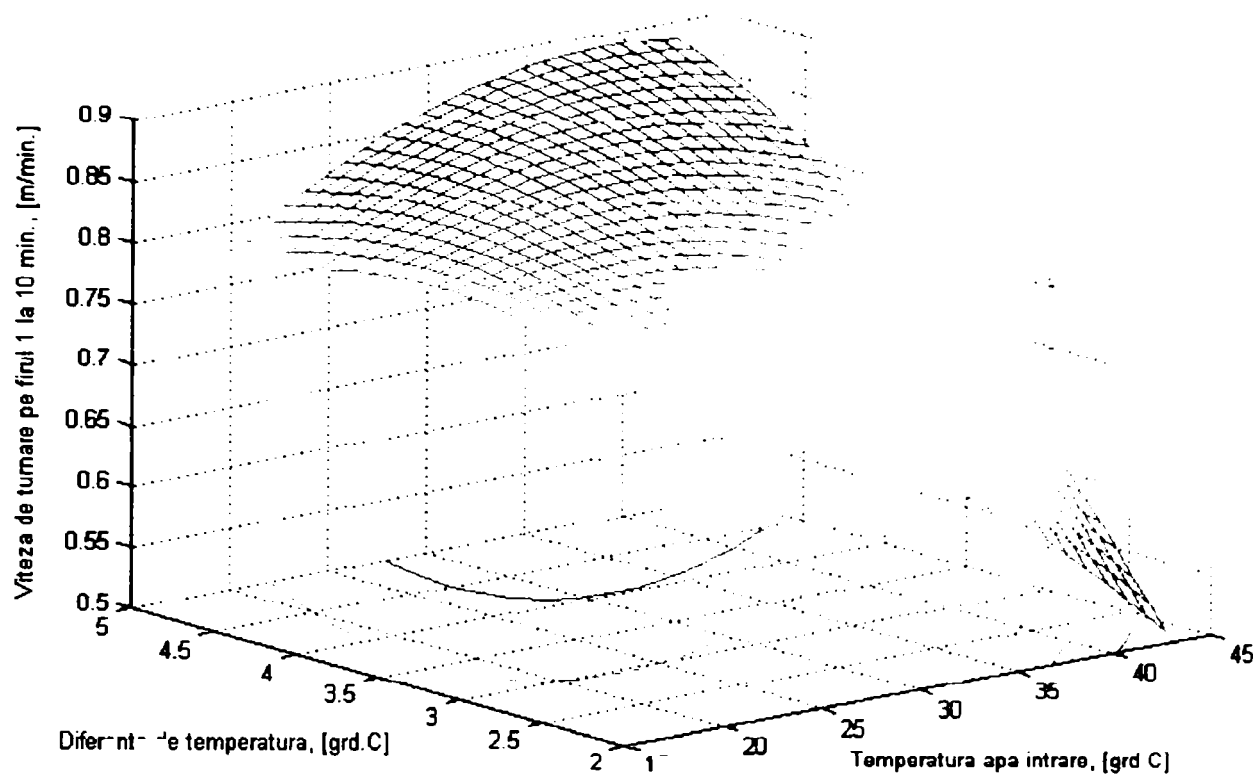


Fig.4.38. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura apei și variația acesteia la ieșirea din cristalizor (secțiunea 240x270mm) la 10min de la începutul turnării

Pe parcurs, s-a remarcat o creștere a temperaturii de intrare de circa 1°C la 10min (nu este suficient timp pentru răcirea corespunzătoare a apei) și o stabilizare a creșterii temperaturii la ieșire de circa $4-5^{\circ}\text{C}$, stabilizare datorată menținerii relativ constante a presiunii și debitului apei de răcire. Trebuie de asemenea menționat că valorile temperaturii de intrare a apei în cristalizor aflate spre limita superioară (43°C) au fost prelevate la șarjele din ultima parte a secvenței de turnare (șarjele 3 sau 4 ale secvenței).

Se observă că odată cu creșterea vitezei de turnare crește temperatura de intrare a apei de răcire iar gradientul de temperatură rezultat tinde spre 4°C .

Ecuția de variație dintre cei trei parametri este:

$$v = 0,62 - 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}} + 0,077 \cdot \Delta t + 5 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}} \cdot \Delta t - 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}}^2 - 23,6 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t^2 \quad (4.11.)$$

iar coeficientul global de corelație este de 0,8589.

După 40min de la începutul turnării, temperatura de intrare a variat între $25-43,5^{\circ}\text{C}$ și aceeași variație a creșterii temperaturii de ieșire de $4-5^{\circ}\text{C}$. (anexa IV.15).

În ceea ce privește țagtele cu secțiunea $\Phi 150\text{mm}$, temperatura de intrare a apei a fost mai scăzută decât în primul caz și, datorită vitezei mari de turnare, a crescut cantitatea de căldură care trebuie îndepărtată în timp scurt, respectiv temperatura de ieșire a apei cristalizorului cu $4-8^{\circ}\text{C}$ la 10min de la începutul turnării (fig.4.39) și cu $7-9^{\circ}\text{C}$ la 40min de la începutul turnării (anexa IV.16).

Suprafața de regresie admite un punct de inflexiune de tip șea la limita domeniului tehnologic, majoritatea punctelor situându-se însă în partea crescătoare a suprafeței unde, cu creșterea vitezei de turnare crește atât temperatura apei la intrare (pe tot parcursul turnării) cât și cea de ieșire.

Ecuția suprafeței de regresie pentru acest caz este:

$$v = 1 + 0,13 \cdot T_{\text{apa}} - 0,396 \cdot \Delta t - 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}} \cdot \Delta t - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}}^2 - 51,7 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t^2 \quad (4.12.)$$

iar coeficientul global de corelație este de 0,9059.

Când turnarea continuă a intrat în regim staționar (la 40min de la începutul turnării) s-au modificat și modul de variație a celor trei parametri, rezultând o dependență direct proporțională între aceștia.

Pentru țagtele cu diametrul de 180mm, forma suprafețelor de regresie este similară exceptând modificările care apar ca urmare a valorilor diferite pentru parametrii. Astfel, cu datele prelevate la 10min de la începutul turnării și prelucrate în Matlab s-a obținut o suprafață de regresie care admite un punct șea în domeniul tehnologic (fig.4.40) iar variația vitezei de turnare rezultă din analiza graficului.

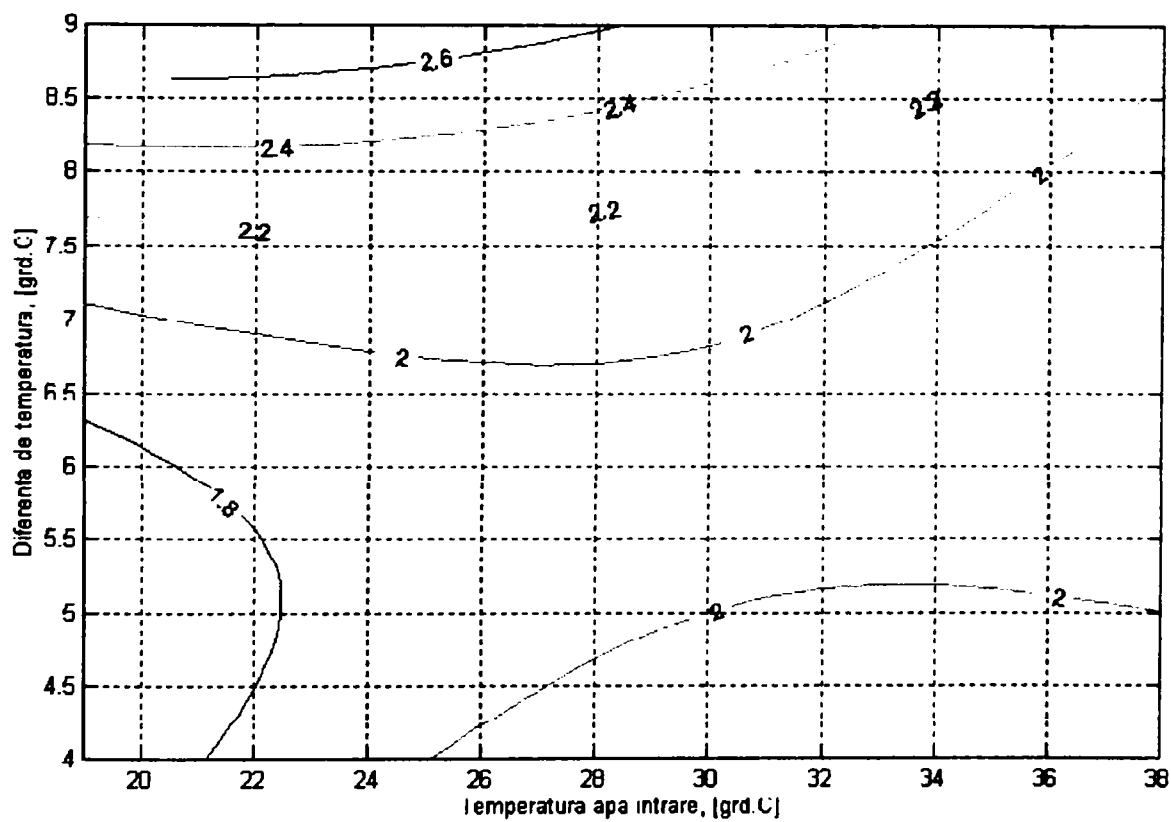
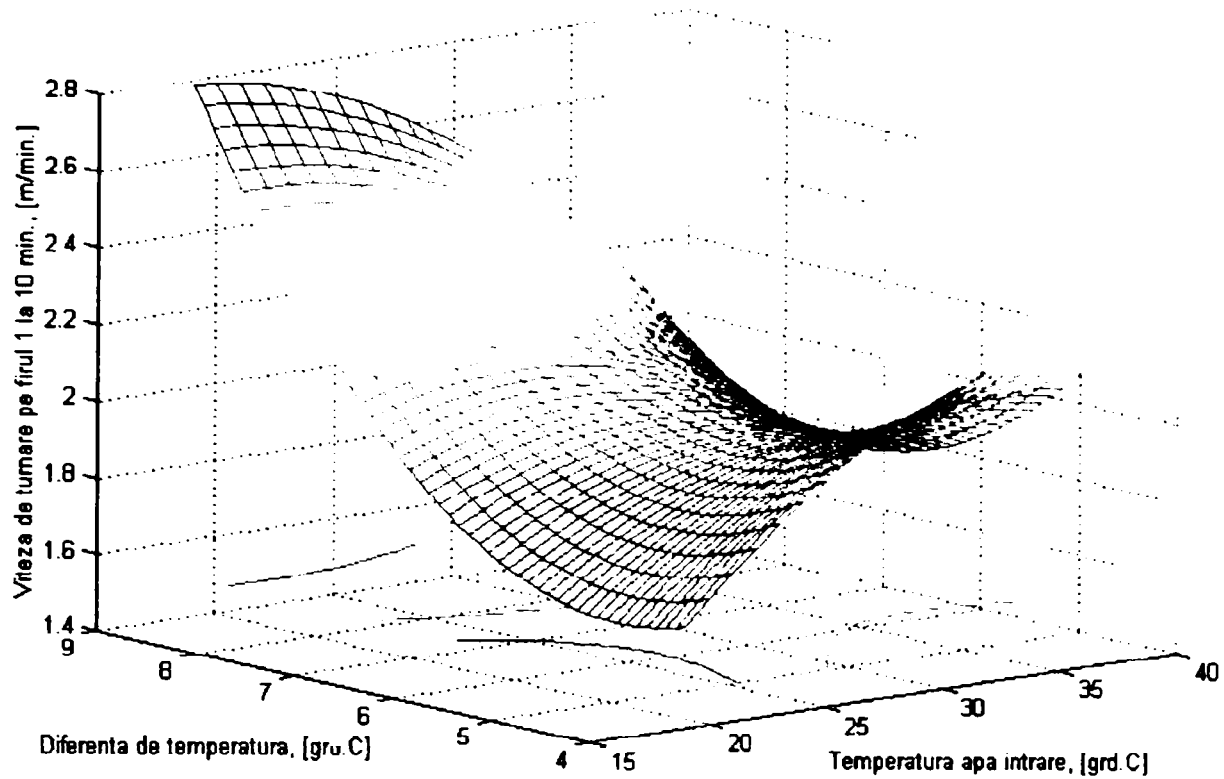


Fig.4.39. Variația vitezei de turare în funcție de temperatura apei și variația acesteia la ieșirea din cristalizor (secțiunea $\Phi 150\text{mm}$)

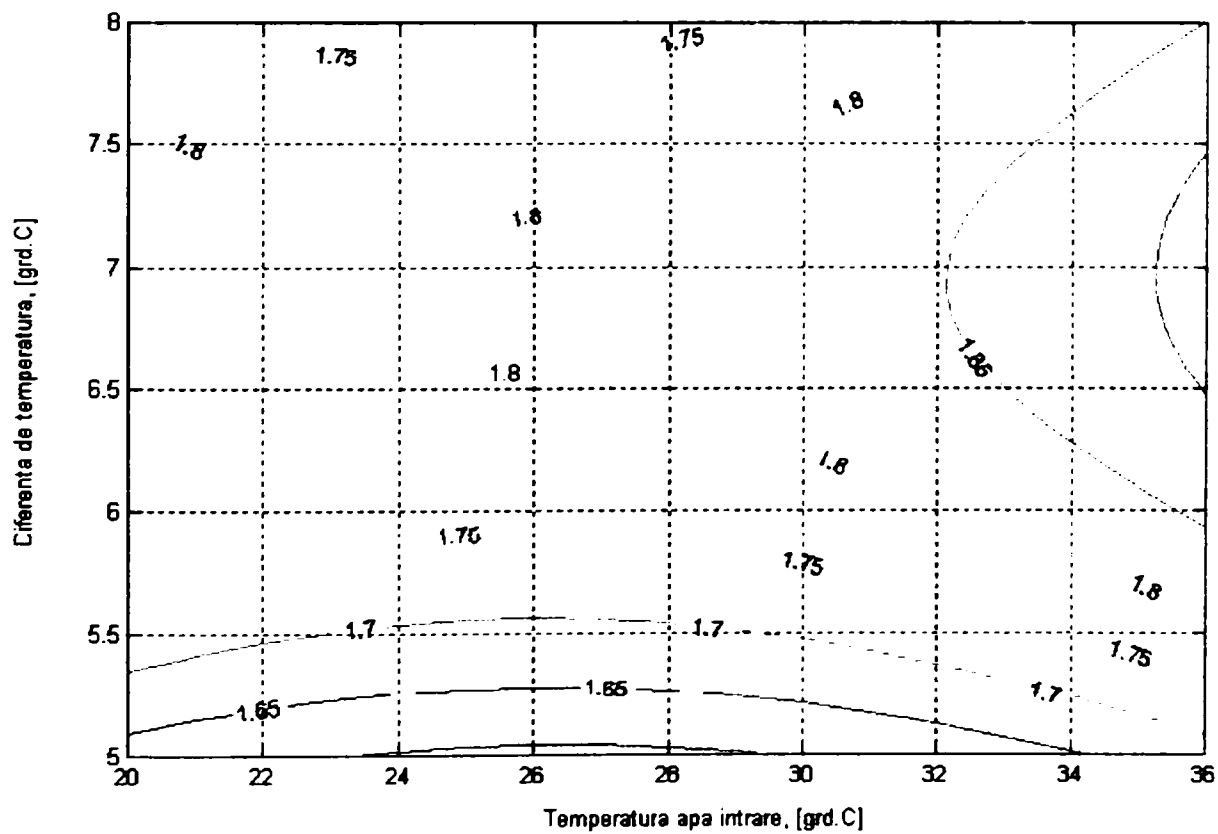
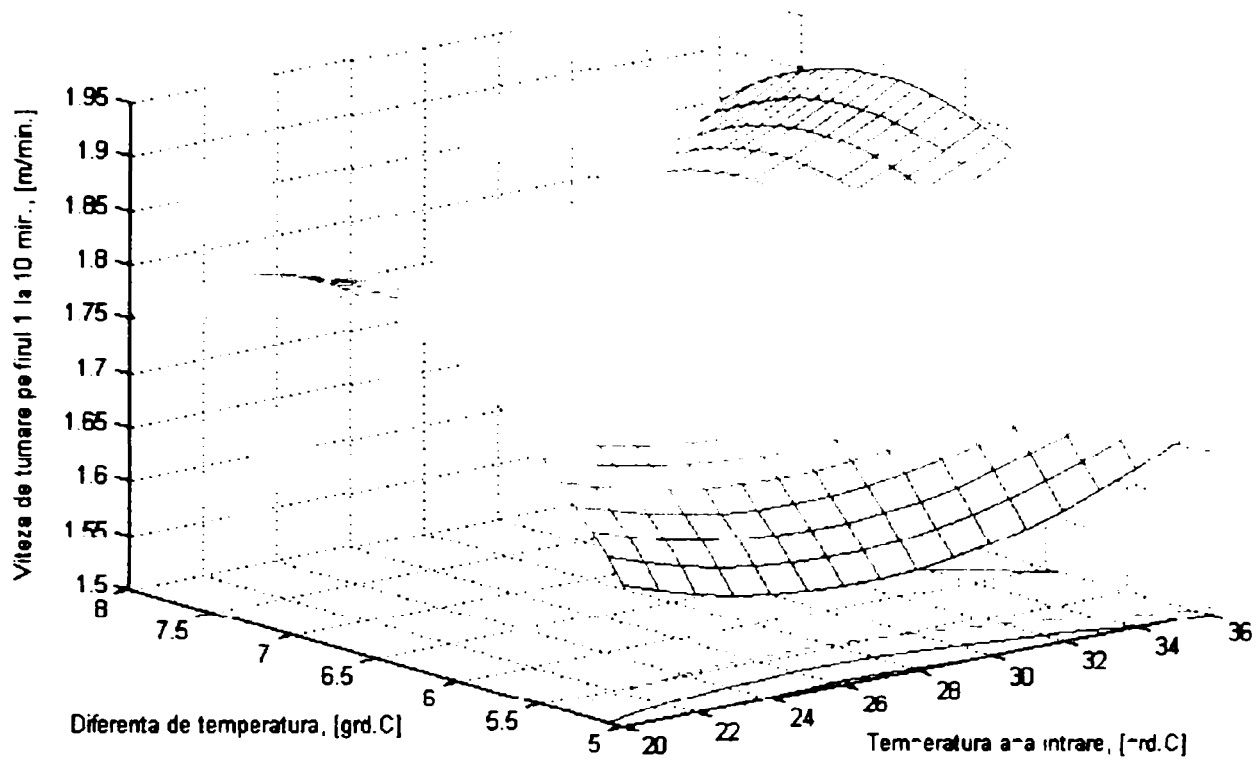


Fig.4.40. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura apei și variația acesteia la ieșirea din cristalizor (secțiunea $\Phi 180\text{mm}$)

Ecuția care generează suprafața de regresie are coeficientul de corelație de ,6473 și are forma:

$$v = -0,264 - 0,05 \cdot T_{\text{apa}} + 0,80 \cdot \Delta t + 1 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}} \cdot \Delta t + 1 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}}^2 - 60,5 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t^2 \quad (4.13.)$$

În ceea ce privește variația parametrilor în regim normal de lucru, aceasta este prezentată în anexa IV.17, suprafața rezultată admitând un punct de maxim la limita domeniului tehnologic, ceea ce presupune adoptarea unei viteze de turnare în funcție de parametrii procesului la un anumit moment de timp.

Un alt factor care trebuie analizat la răcirea primară cu influențe asupra calității semifabricatelor turnate continuu îl reprezintă oscilația cristalizorului. O oscilație corectă permite prevenirea formării defectelor de suprafață cum ar fi fisurile transversale și semnele adânci în urma oscilației.

Pentru o anumită fracțiune din perioada de oscilație, cristalizorul execută o mișcare în aceeași direcție cu mișcarea de înaintare a semifabricatului dar la o viteză mai mare. Acest interval de timp este denumit „bandă negativă de timp” [41]. Pe durata acestui interval, peretele cristalizorului solicită suprafața firului prin compresie în timp ce în mișcarea de urcare, firul este solicitat prin tracțiune. În această ultimă perioadă pot apare unele rupturi ale crustei firului (datorate și de fragilitatea oțelului și grosimea relativ mică a crustei de oțel din cristalizor), concretizate chiar și prin scurgerea oțelului lichid (adică defecte de suprafață, ruperi sau întreruperi ale turnării dacă rupturile nu se închid în cristalizor).

Se concretizează astfel necesitatea de a avea un interval de timp destul de lung pe durata căruia suprafața firului să fie solicitată la compresie (bandă negativă de timp). În acest fel rupturile crustei sunt închise iar grosimea crustei este suficient de mare și cu o rezistență mecanică bună. Există însă și o limită superioară a benzii negative de timp datorită pe de o parte creșterii adâncimii semnelor datorate oscilațiilor odată cu creșterea benzii negative de timp și pe de altă parte condițiilor care se creează în interiorul cristalizorului (rupturile crustei putând favoriza lipirea oțelului de peretele interior).

Un factor care completează și îmbunătățește comportarea oțelului în cristalizor este și praful (pulberea) de ungere utilizată. La șarjele studiate s-a utilizat în general praf de turnare de tip Scorialitt sau/și Accutherm în cantități variabile (20-60kg), consumul de praf de turnare scăzând odată cu creșterea vitezei de turnare. De regulă, prafurile de turnare sunt selectate pe baza parametrilor mașinii de turnare continuă (mărimea secțiunii de turnare, viteza de tragere și mișcarea oscilantă a cristalizorului determină viteza de topire și vâscozitatea prafului) și pe baza proprietăților oțelului turnat (compoziția oțelului, temperatura

lichidus și solidus determină temperatura de topire și compoziția chimică a prafului), etc [54,55,56,57,58].

IV.6. Răcirea secundară

Scopul răcirii secundare este de a continua îndepărtarea căldurii pentru a permite semifabricatului să se solidifice până la miez. Răcirea secundară se realizează prin intermediul pulverizărilor de apă, deopotrivă sub formă de con complet sau lamelară. În loc de numai apă se poate pulveriza și un amestec de aer-apă pe suprafața firului, realizându-se o răcire mai uniformă și fină și un consum mai redus de apă (care de altfel variază și în funcție de calitatea oțelului turnat continuu) [7,41].

Sistemul de răcire este divizat în subzone, cea mai importantă din punct de vedere calitativ fiind prima zonă (cea care conține și rolele de picior). Distribuția apei de răcire pe subzone trebuie astfel realizată încât coeficientul de transmitere a căldurii la suprafața semifabricatului (firului) din interiorul acestuia să scadă gradat. În aceste condiții este posibilă evitarea reîncălzirilor după zona de pulverizare precum și subrăcirea suprafeței sub jeturi (ambele ducând la formarea unor eforturi mecanice în oțelul solidificat).

În sensul celor arătate anterior, o primă cercetare s-a realizat prin măsurarea temperaturii suprafeței semifabricatului în trei puncte (în dreptul a trei inele de răcire în camera de ceață). Datele precum și amplasarea punctelor în care s-au realizat măsurătorile au fost prezentate în capitolul III, respectiv tab.3.1. și fig.3.16. Corespunzător măsurărilor, la aceleași momente de timp au fost înregistrate debitele apei de răcire pe cele trei inele ale zonei 1 de răcire, variația temperaturii apei la ieșirea din circuit, presiunea apei de răcire și vitezele de turnare. Cu aceste date s-au realizat corelațiile de mai jos [49].

Astfel, în fig.4.41 este prezentată variația temperaturii suprafeței firului cu secțiunea 240x270mm în funcție de viteza de turnare. Prelucrarea datelor măsurate în camera de ceață, în trei puncte, a scos în evidență o creștere a temperaturii suprafeței semifabricatului cu creșterea vitezei de turnare (în intervalul tehnologic), în aceleași condiții de răcire (debit, presiune, temperatură a apei de răcire). De menționat că, datorită condițiilor foarte grele, impropriei, de determinare a temperaturii și a erorilor date de aparatul utilizat (temperatura mediului în care a fost amplasat aparatul), rezultatele măsurărilor pot fi influențate într-o anumită măsură. Aceste cauze au determinat intervalul relativ mare de variație a temperaturii într-un punct.

Din fig.4.42. se observă o creștere a debitului apei de răcire, pe toate cele trei zone ale răcirii secundare, odată cu creșterea vitezei de turnare.

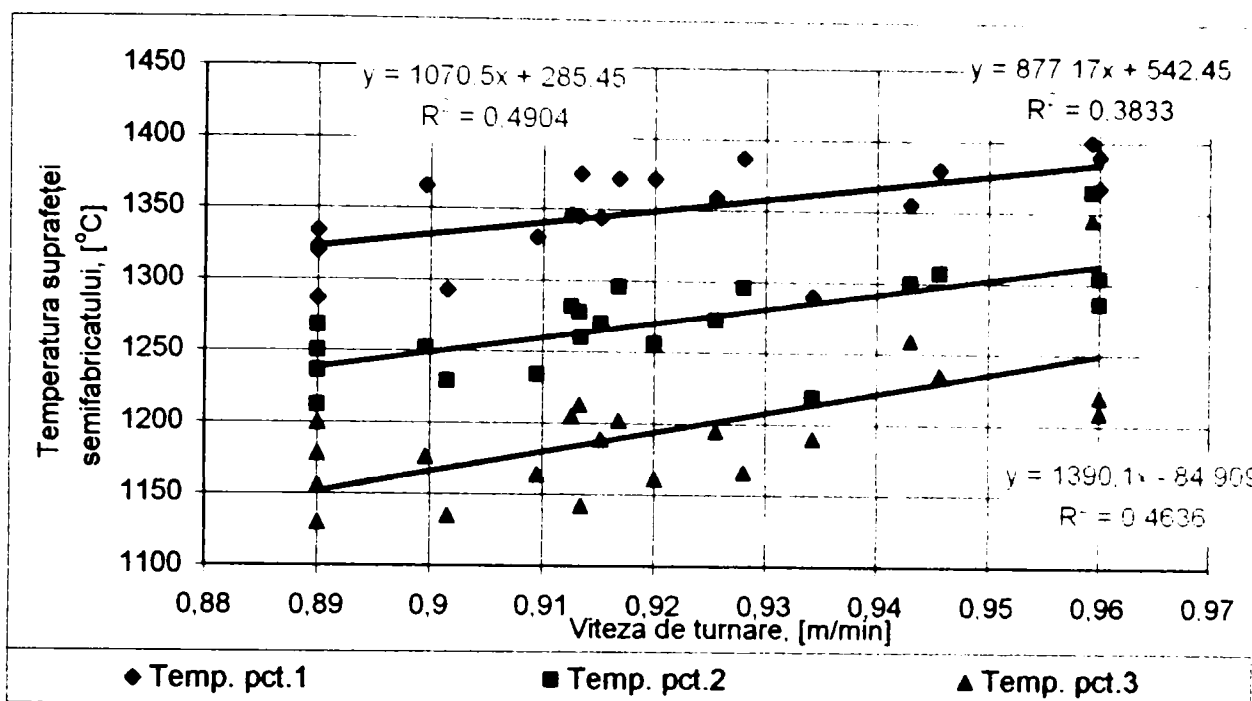


Fig.4.41. Variația temperaturii suprafeței semifabricatului în zona 1, determinată în trei puncte, în funcție de viteza de turnare

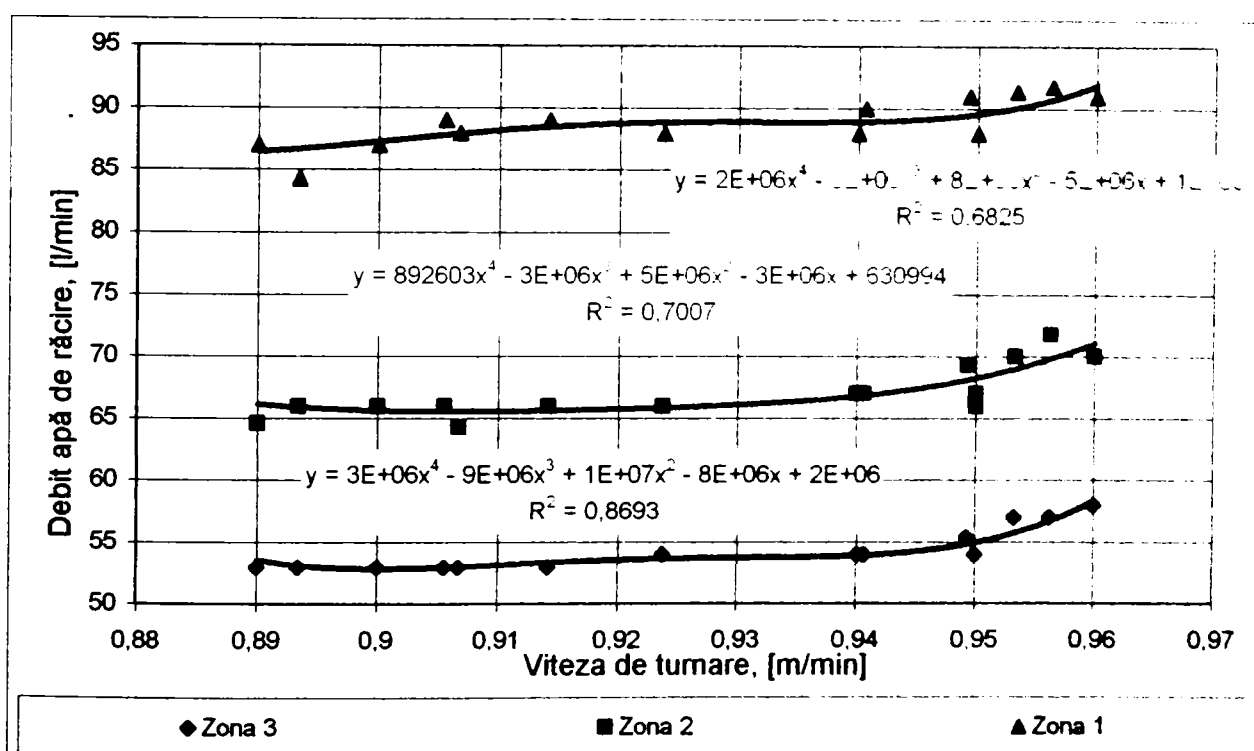


Fig.4.42. Variația debitului apei de răcire, în partea de răcire secundară, în funcție de viteza de turnare

Pentru un studiu mai aprofundat al condițiilor de răcire secundară la șarjele și profilele studiate, în anexa IV.7. am prezentat datele prelevate, respectiv presiunea apei de răcire secundară și debitele (în l/min) pentru toate cele cinci fire și respectiv cele trei zone ale răcirii secundare [59,60].

Datele prezentate au fost prelucrate tot în programul de calcul Matlab, obținându-se atât suprafețe de regresie cât și ecuațiile și coeficienții de corelație aferenți iar dependențele au fost obținute între viteza de turnare și presiunea respectiv debitul apei de răcire pe cele trei zone ale instalației la diferite momente de timp de la începutul turnării (la 10min respectiv 40min).

Variațiile au fost similare cu mici modificări și anume:

- pentru blumul cu secțiunea 240x270mm (fig.4.43, 4.44, 4.45) cu creșterea vitezei de turnare crește atât presiunea cât și debitul pentru apă în zona de răcire secundară;
- de regulă, variația curbelor obținute este crescătoare, valorile între care variază principalii parametri sunt: 8-10,7bar pentru presiunea apei iar pentru cele trei zone de răcire: 45-81 l/min pentru z_1 , 60-100 l/min pentru z_2 și 67-112 l/min pentru zona z_3 (debitele apei cresc pe măsură ce semifabricatul înaintează prin instalație);
- după ce turnarea continuă intră în regim staționar, când viteza de turnare nu mai variază în limite foarte largi, se păstrează aceleași valori pentru debite și presiuni ale apei de răcire (anexa IV.18). Trebuie menționat că, în cazul apariției unor avarii sau ale modificării relativ mari ale vitezei față de viteza de regim, are loc și modificarea parametrilor apei de răcire secundară. Aceste modificări însă, de regulă, nu sunt consemnate în fișele de șarjă;
- pentru țagla cu secțiune $\Phi 150$ mm, dependența direct proporțională între parametrii se păstrează, lucrându-se cu următoarele valori pentru parametrii: pentru presiune 8,2-8,6bari iar debitele sunt pentru z_1 39-60 l/min, z_2 de 53-84 l/min și z_3 de 43-73 l/min (fig.4.46, 4.47, 4.48);
- se remarcă valorile maxime ale debitelor apei de răcire în zona a doua, respectiv zona din mijlocul răcirii secundare (grosimea stratului solidificat crește cu o viteză mai mare, datorată cantității de căldură mai mare îndepărtată);
- aceleași observații sunt valabile și pentru țagle cu diametrul $\Phi 180$ mm, modificându-se intervalele de variație, corespunzător cu modificarea secțiunii semifabricatului, respectiv: 8,2-8,7bari pentru presiune, 39-48 l/min pentru z_1 , 50-67 l/min pentru z_2 și 45-56 l/min pentru z_3 ;
- pentru acest profil, curbele de variație admit valori de maxim, de regulă situat în intervalul tehnologic (fig.4.49, 4.50, 4.51).

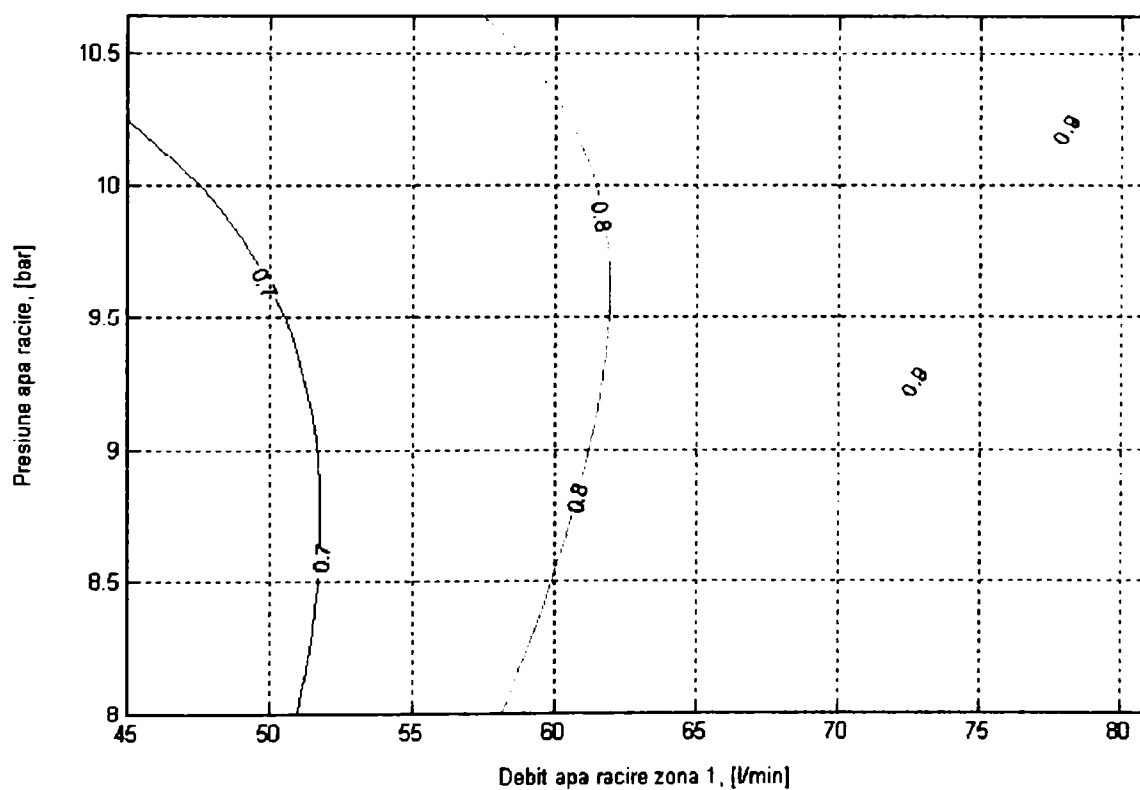
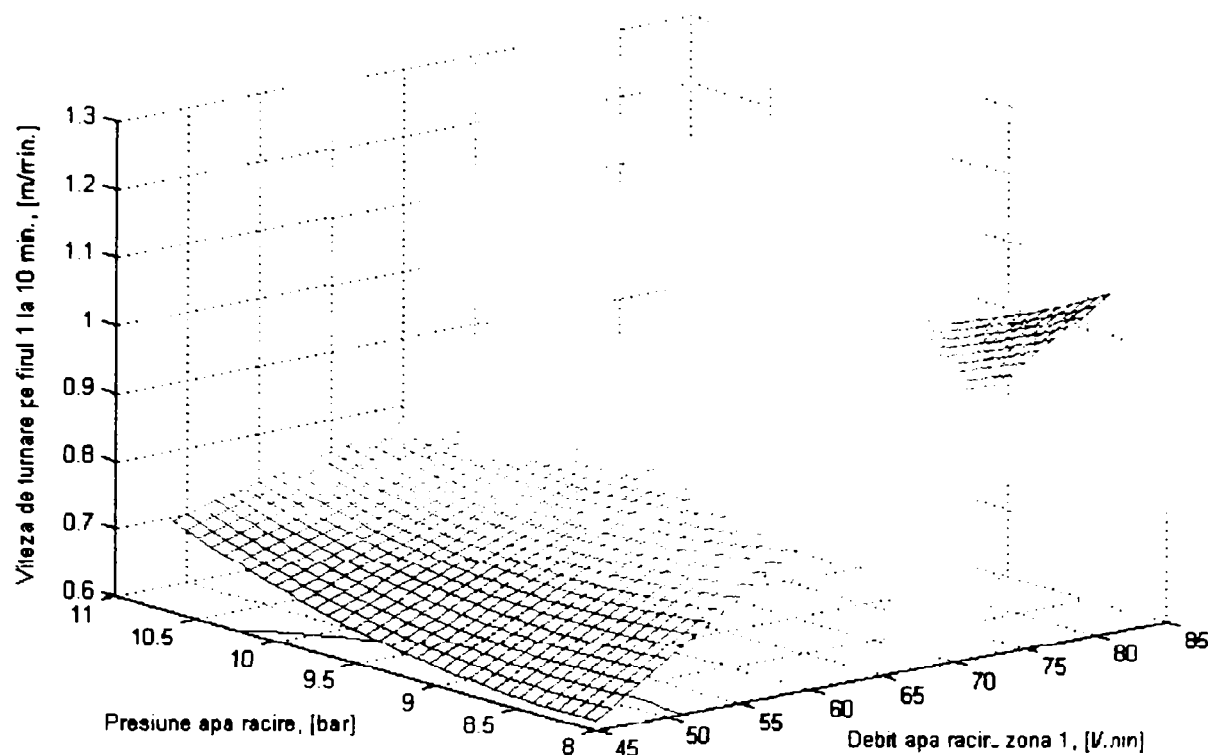


Fig.4.43. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 1 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea 240x270mm

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 0,041 + 0,04 \cdot d_{z1} - 0,17 \cdot p_{as} - 0,003 \cdot d_{z1} \cdot p_{as} - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z1}^2 + 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot p_{as}^2 \quad (4.14)$$

$$r_{yx1x2} = 0.6779$$

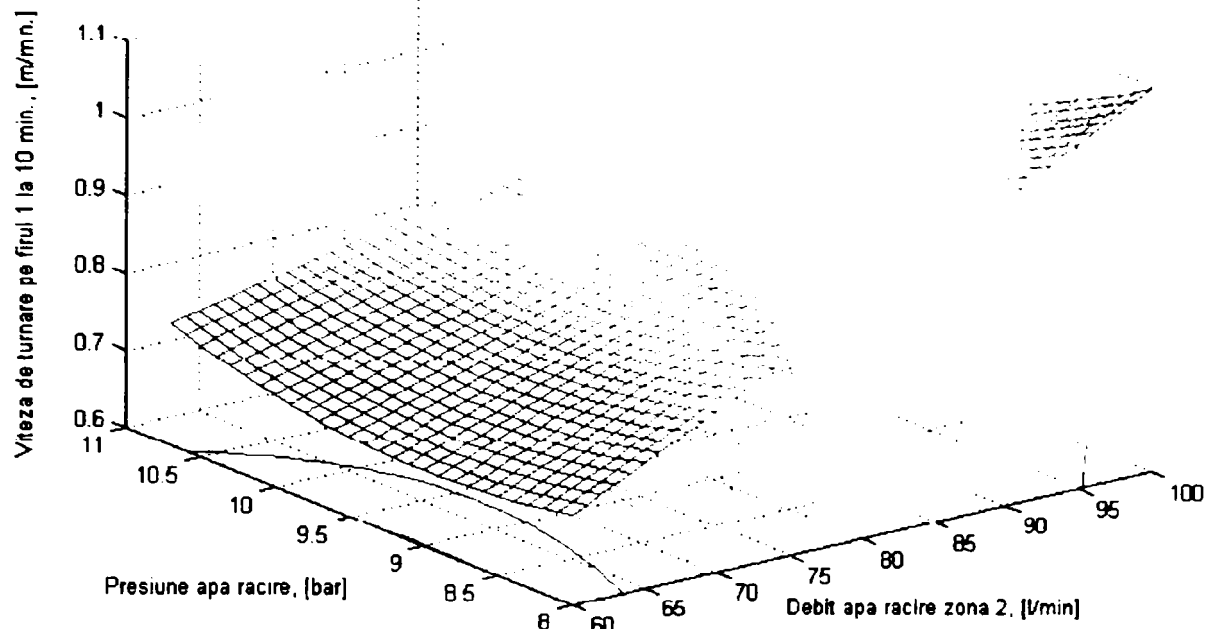


Fig.4.44. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 2 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea 240x270mm

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 0,89 + 0,023 \cdot d_{z2} - 0,24 \cdot p_{as} - 0,0019 \cdot d_{z2} \cdot p_{as} - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z2}^2 + 0,02 \cdot p_{as}^2 \quad (4.15)$$

$$r_{yx1x2} = 0.6757$$

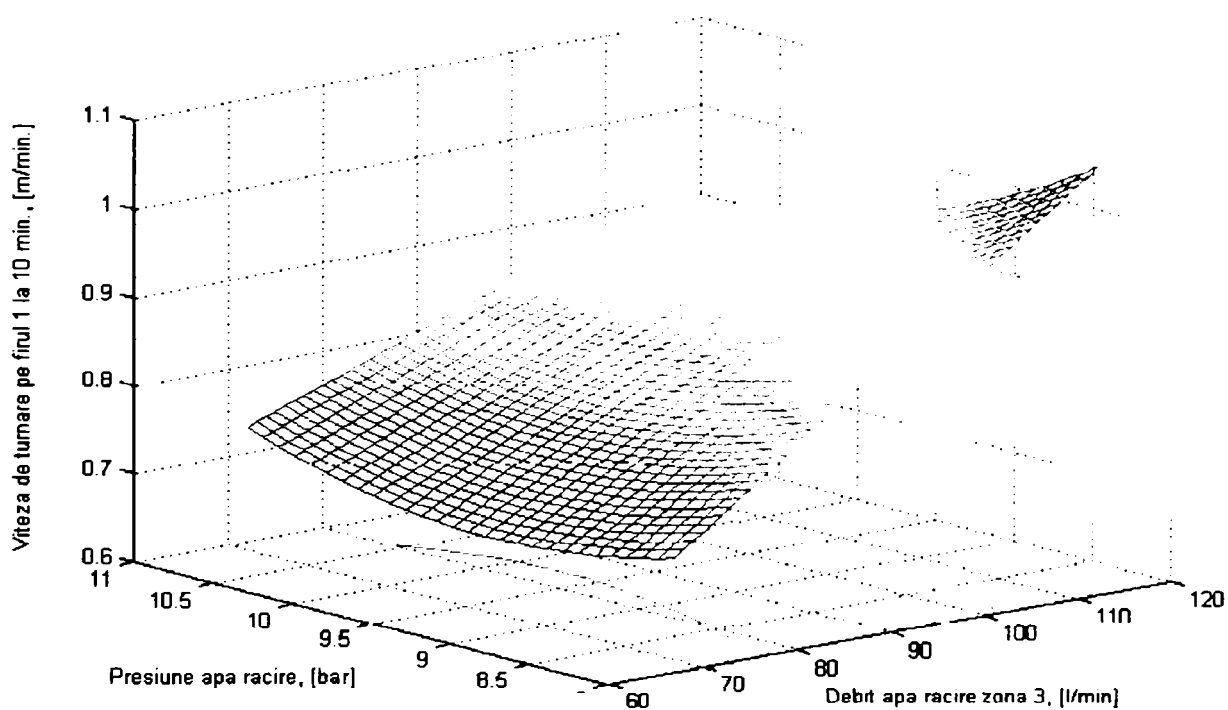


Fig.4.45. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 3 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea 240x270mm

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 1,27 + 0,019 \cdot d_{z3} - 0,311 \cdot p_{as} - 0,0014 \cdot d_{z3} \cdot p_{as} - 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z3}^2 + 0,022 \cdot p_{as}^2 \quad (4.16)$$

$$r_{yx1x2} = 0.6518$$

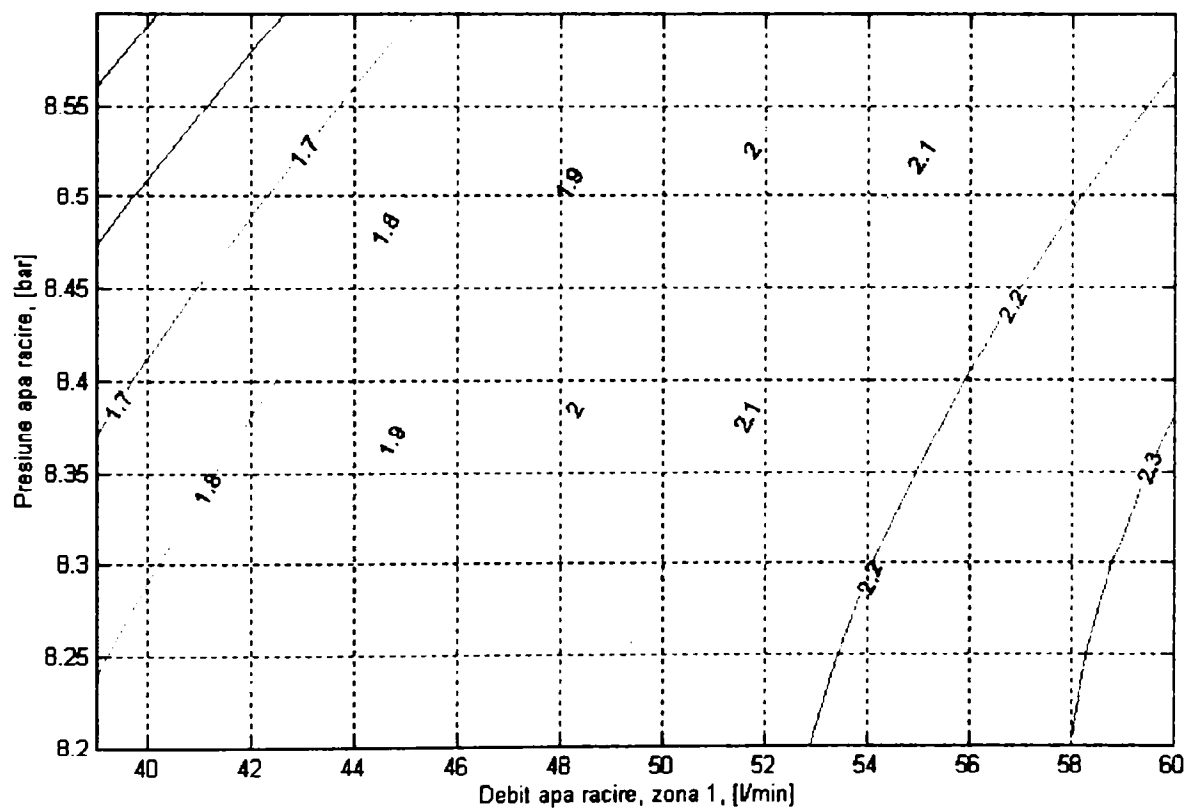
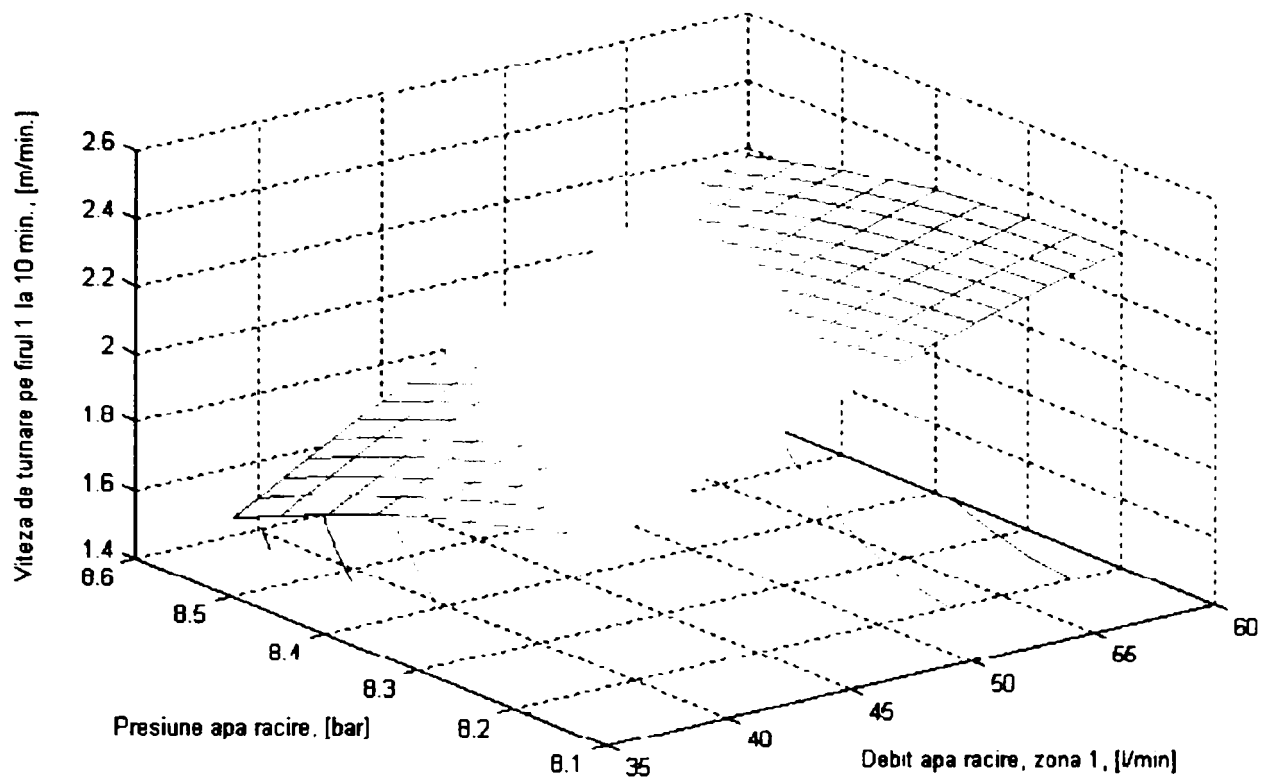


Fig.4.46. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 1 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 150\text{mm}$

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 111,34 - 1,31 \cdot d_{z1} - 17,29 \cdot p_{as} + 0,21 \cdot d_{z1} \cdot p_{as} - 4 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z1}^2 + 0,35 \cdot p_{as}^2 \quad (4.17)$$

$$r_{yx1x2} = 0.7224$$

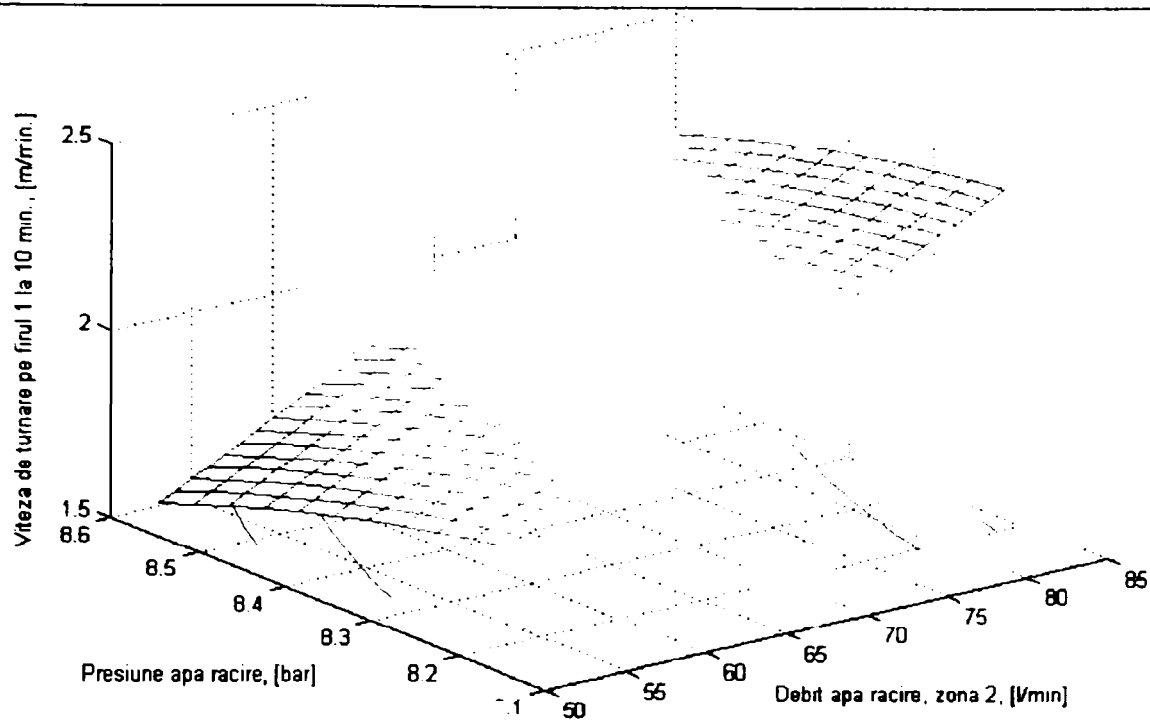


Fig.4.47. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 2 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 150\text{mm}$

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 82,09 - 0,12 \cdot d_{z2} - 17,35 \cdot p_{as} + 0,049 \cdot d_{z2} \cdot p_{as} - 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z2}^2 + 0,788 \cdot p_{as}^2 \quad (4.18)$$

$$r_{yx1x2} = 0.8127$$

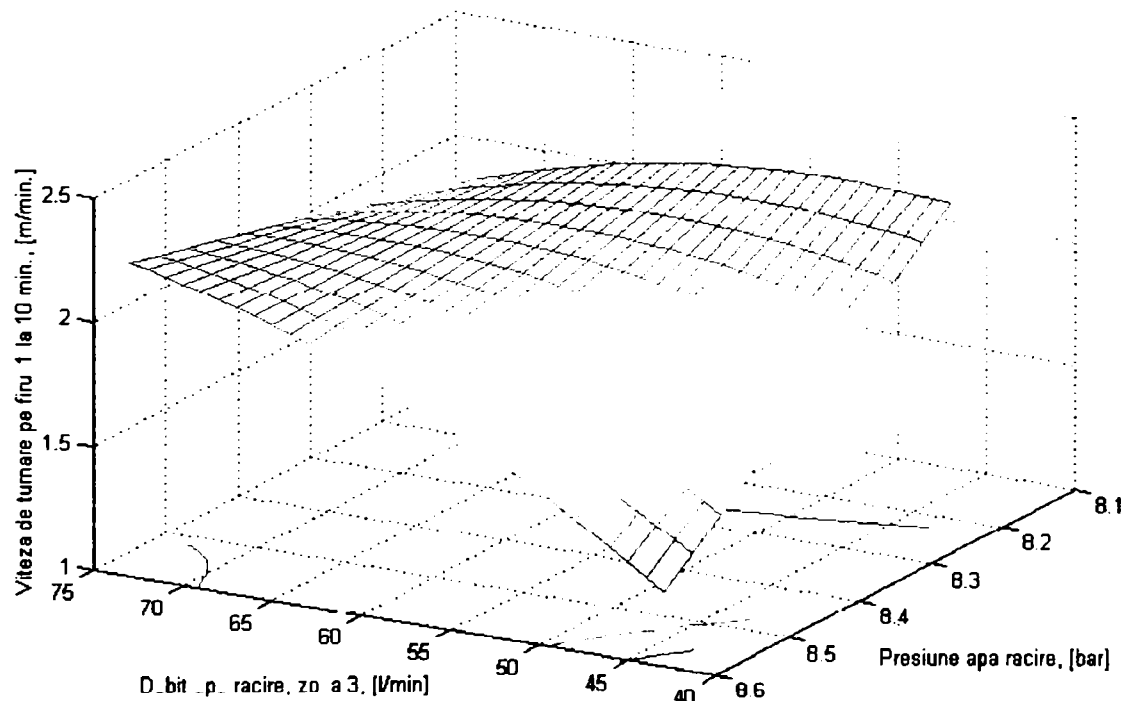


Fig.4.48. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 3 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 150\text{mm}$

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 194,17 - 1,27 \cdot d_{z3} - 35,28 \cdot p_{as} + 0,18 \cdot d_{z3} \cdot p_{as} - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z3}^2 + 1,36 \cdot p_{as}^2 \quad (4.19)$$

$$r_{yx1x2} = 0.7786$$

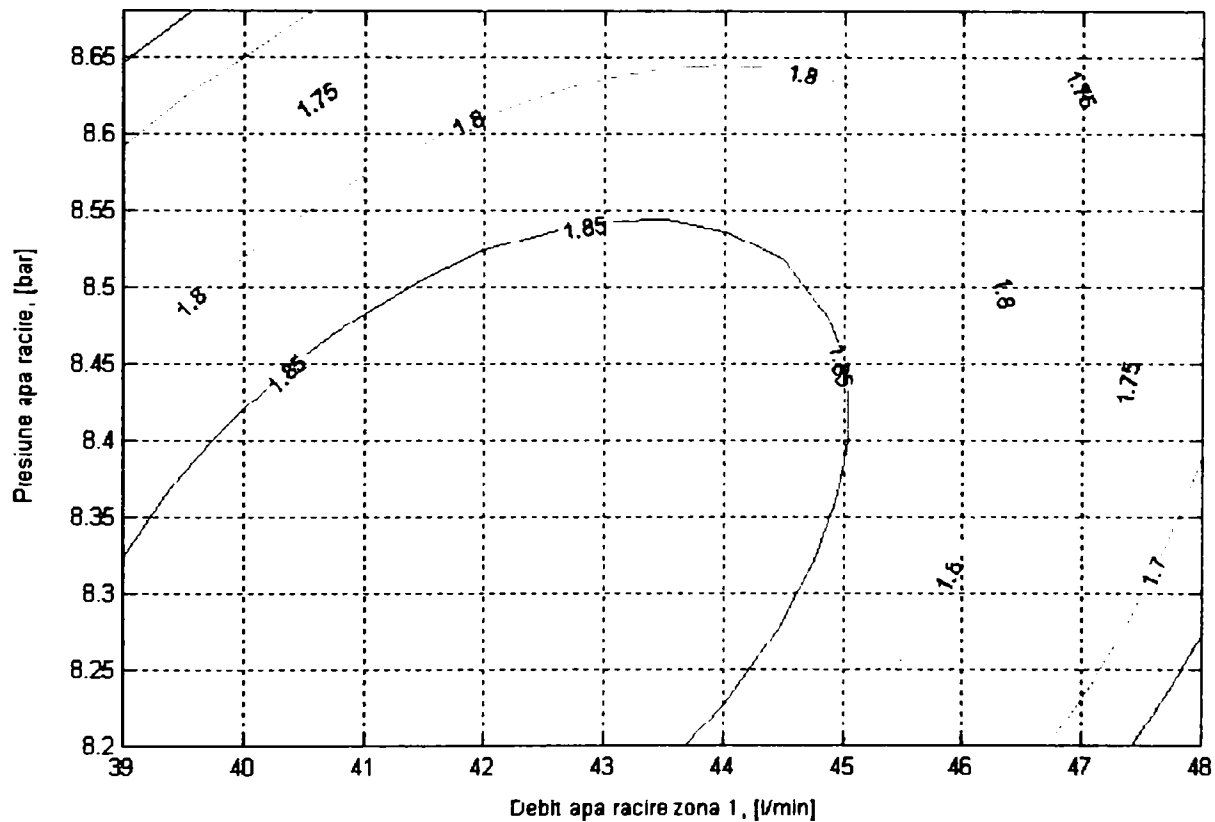
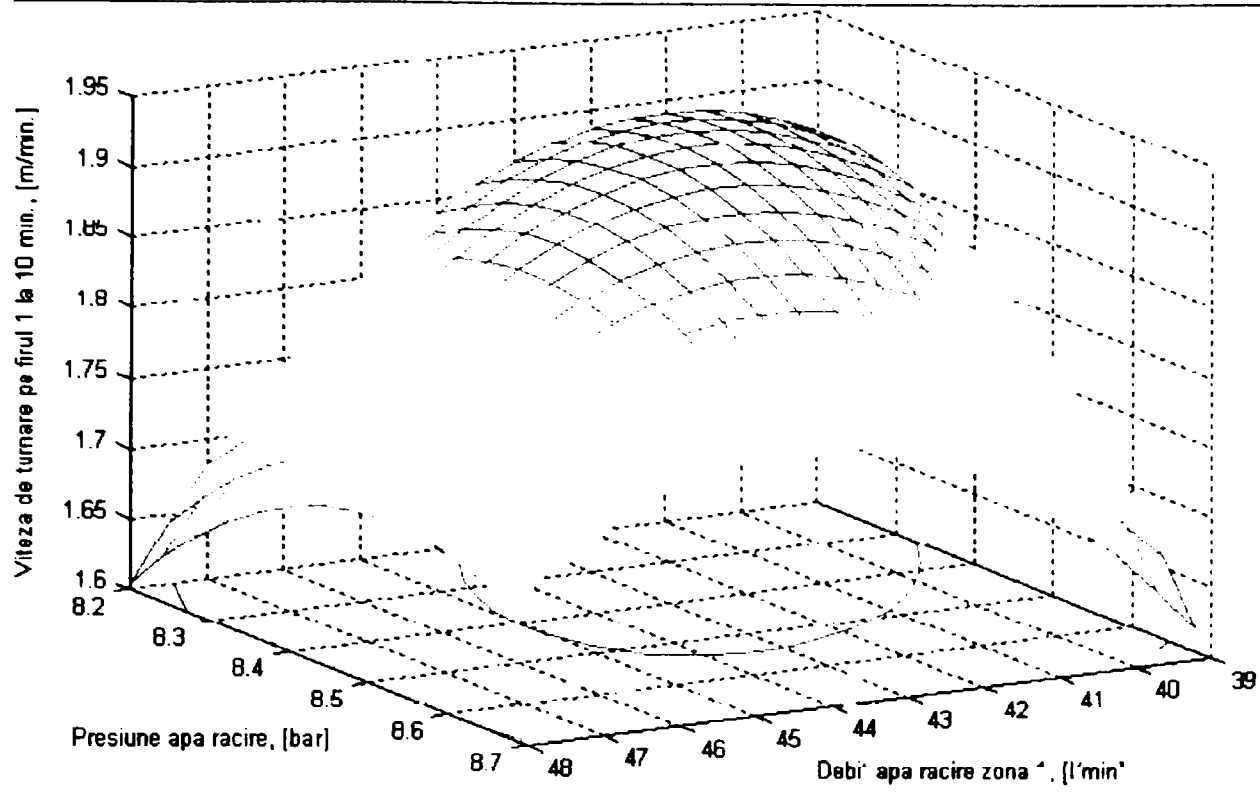


Fig.4.49. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 1 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 180\text{mm}$

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -57,64 - 0,15 \cdot d_{z1} + 15,10 \cdot p_{as} + 0,078 \cdot d_{z1} \cdot p_{as} - 6 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z1}^2 - 1,106 \cdot p_{as}^2 \quad (4.20)$$

$$r_{yx1x2} = 0.7264$$

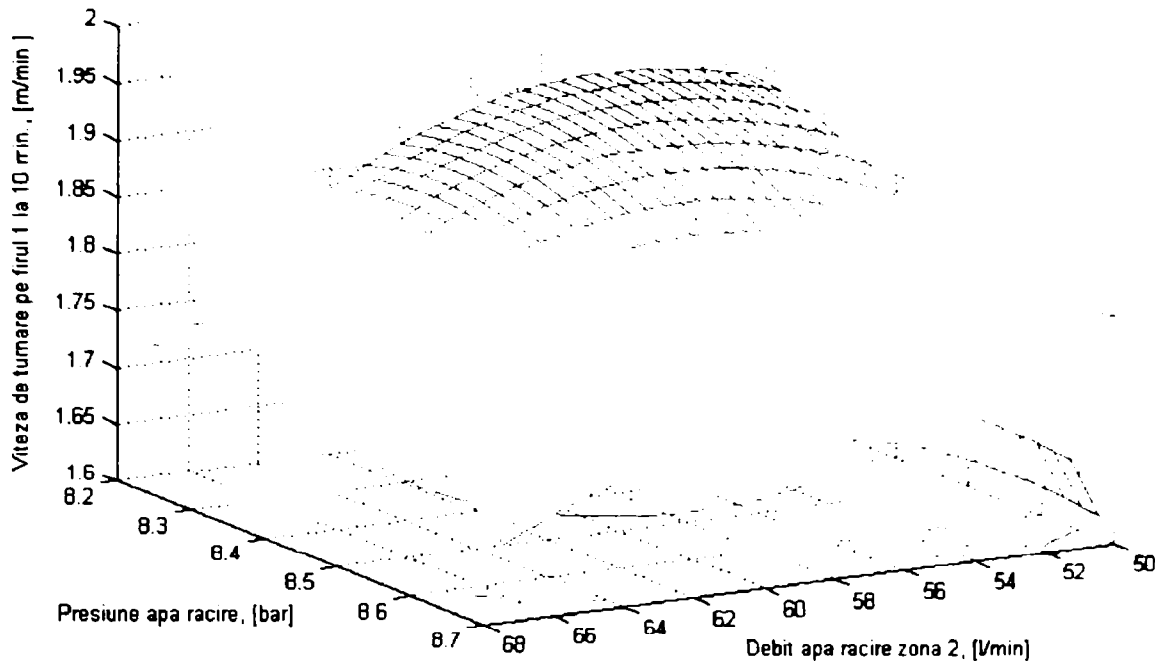


Fig.4.50. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 2 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 180\text{mm}$

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -52,52 - 0,09 \cdot d_{z2} + 15,09 \cdot p_{as} + 0,026 \cdot d_{z2} \cdot p_{as} - 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z2}^2 - 1,005 \cdot p_{as}^2 \quad (4.21)$$

$$r_{yx1x2} = 0.8179$$

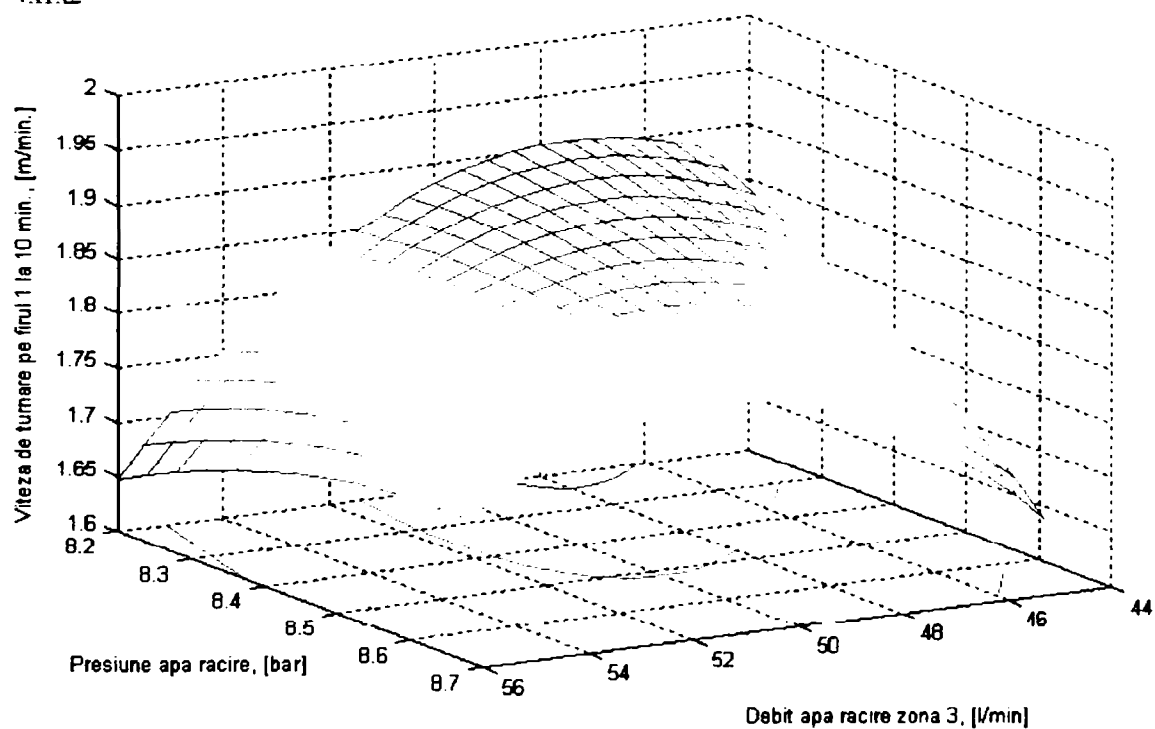


Fig.4.51. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 3 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 180\text{mm}$

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -10,25 - 0,14 \cdot d_{z3} + 3,89 \cdot p_{as} + 0,057 \cdot d_{z3} \cdot p_{as} - 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z3}^2 - 0,41 \cdot p_{as}^2 \quad (4.22)$$

$$r_{yx1x2} = 0.7117$$

Programele de calcul utilizate până în acest moment nu permit obținerea dependenței între debitele apei pentru cele trei zone și viteza de turnare (în total 4 parametri), fapt pentru care s-a utilizat un alt produs software specializat în prelucrarea statistică a datelor (STATISTICA 5.5). Cu ajutorul acestui mediu de prelucrare a datelor am obținut diagramele ternare de tipul celor prezentate mai jos (un parametru în funcție de alți trei parametri) [61,62].

Astfel, pentru secțiunea 240x270mm, o dependență între viteza de turnare și debitele pe cele trei zone este redată în fig.4.52.

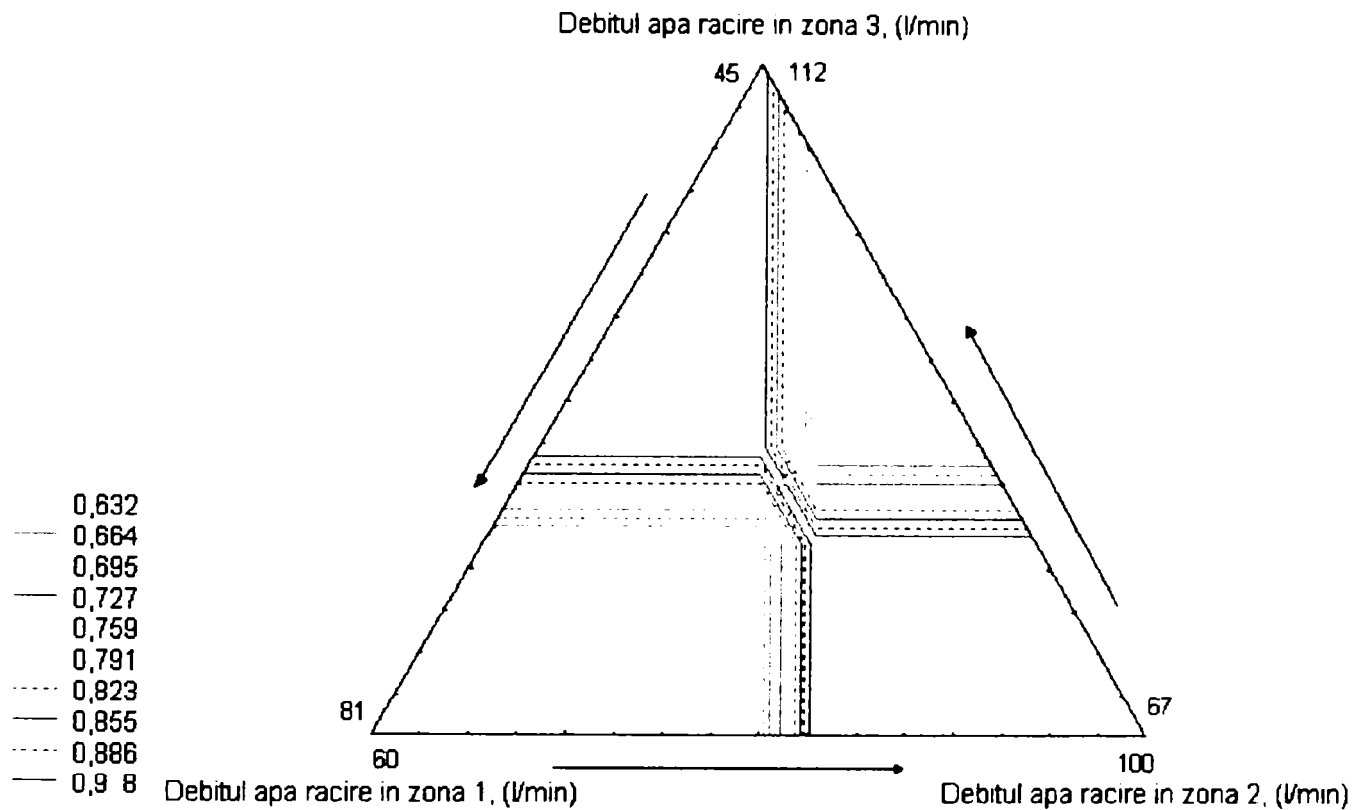


Fig.4.52. Diagrama ternară pentru secțiunea 240x270mm

Cu ajutorul acestor diagrame, în funcție de viteza de turnare a semifabricatului la un anumit moment de timp se pot determina debitele apei. Datele statistice pentru parametrii studiați sunt prezentați în tab.4.4.

Tab.4.4. Date statistice pentru secțiunea 240x270mm

Nr. crt.	Variabila	minim	mediu	maxim
1	viteza de turnare (v)	0,60	0,83	0,95
2	debit apă zona 1 (d_{z1})	45	64,94	81
3	debit apă zona 2 (d_{z2})	60	78,74	100
4	debit apă zona 3 (d_{z3})	67	88,31	112

Pentru secțiunea semifabricatului cu diametrul de $\Phi 150\text{mm}$, având în vedere și variația diferită a debitelor pe lungimea firului, de obține o curbă de variație și respectiv o diagramă ternară de tipul celor prezentate în fig.4.53. Pentru acest caz, valorile rezultate din program sunt prezentate în tab.4.5.

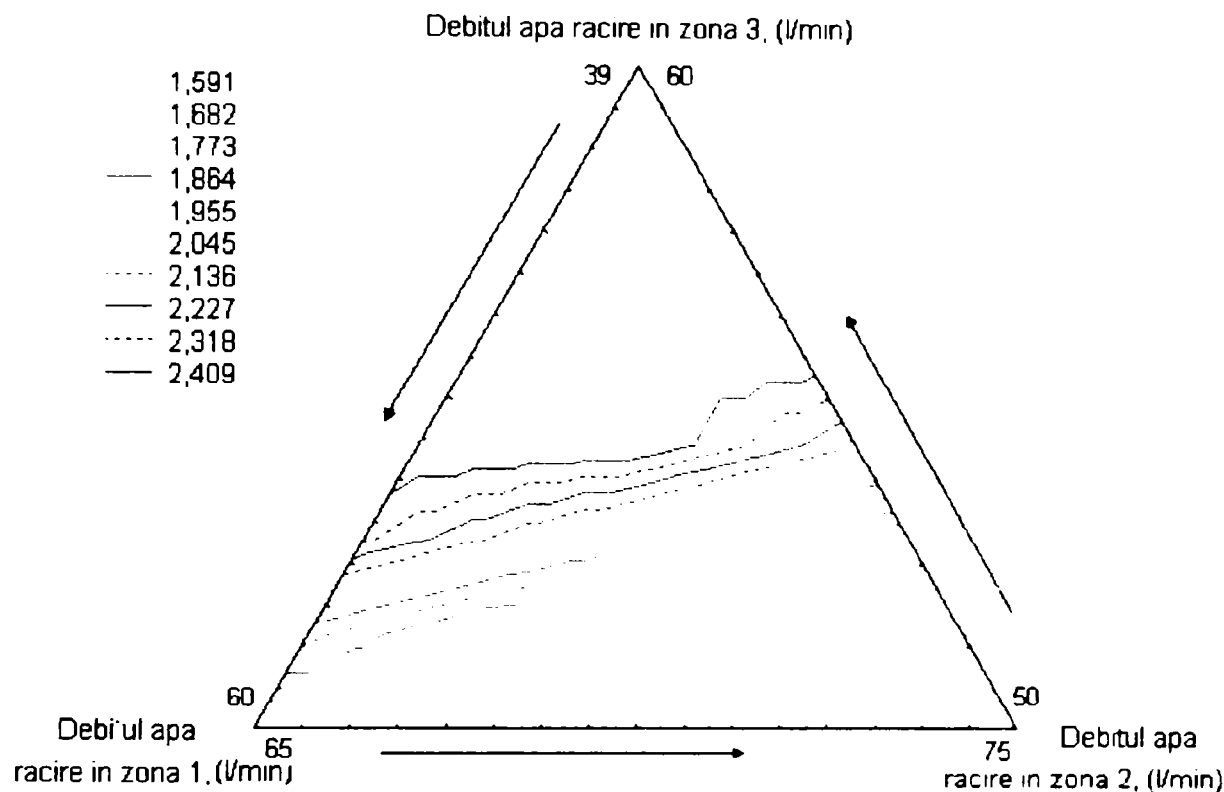


Fig.4.53. Diagrama ternară pentru secțiunea $\Phi 150\text{mm}$

Tab.4.5. Date statistice pentru secțiunea $\Phi 150\text{mm}$

Nr. crt.	Variabila	minim	mediu	maxim
1	viteza de turnare (v)	1,5	1,98	2,5
2	debit apă zona 1 (d_{z1})	39	50,64	60
3	debit apă zona 2 (d_{z2})	53	70,78	84
4	debit apă zona 3 (d_{z3})	43	58,79	73

Pentru semifabricatele cu secțiunea $\Phi 180\text{mm}$ (fig.4.54), datele prelucrate cu programul STATISTICA au valorile prezentate în tab.4.6.

Tab.4.6. Date statistice pentru secțiunea $\Phi 180\text{mm}$

Nr. crt.	Variabila	minim	mediu	maxim
1	viteza de turnare (v)	1,6	1,78	1,9
2	debit apă zona 1 (d_{z1})	39	42,15	48
3	debit apă zona 2 (d_{z2})	50	57,75	67
4	debit apă zona 3 (d_{z3})	45	49	56

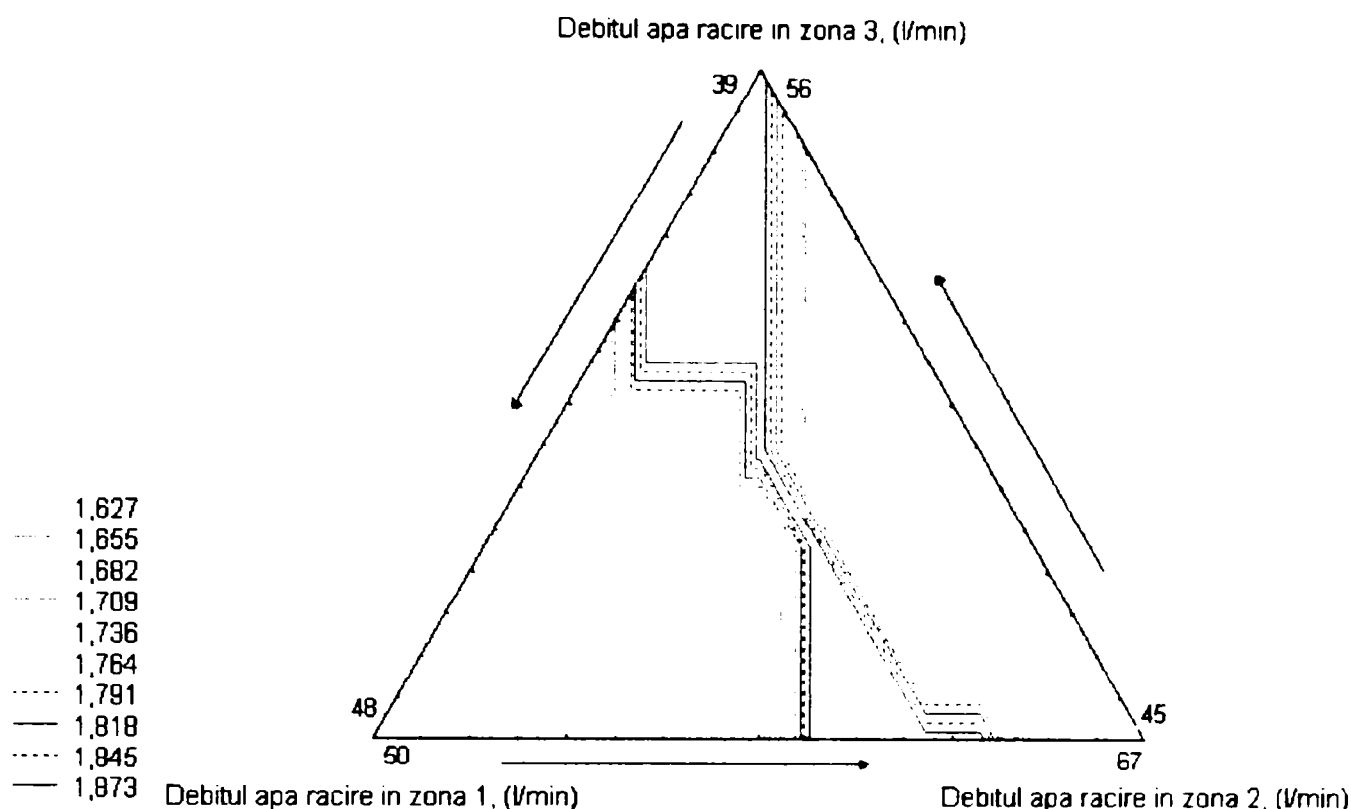


Fig.4.54. Diagrama spațială ternară pentru secțiunea $\Phi 180\text{mm}$

IV.7. Concluzii

Din analiza factorilor tehnologici, a dependențelor și corelațiilor obținute, se desprind următoarele concluzii:

1. Un prim factor de care depinde calitatea semifabricatului turnat continuu și deci și a produsului finit îl reprezintă compoziția chimică a oțelului turnat. Procesul de turnare continuă necesită o calitate superioară pentru oțel, ceea ce impune obligativitatea tratamentului secundar al oțelului, în afara agregatului de elaborare. În urma tratamentului, compoziția chimică trebuie să se încadreze în limite mult mai restrânse (limite date de standardul mărcii elaborate), în special la secvențele de turnare formate din mai multe șarje. Trebuie astfel limitat conținutul de S și P la valori cumulate sub 0,04%, conținutul de gaze în cantități cât mai reduse.

2. O atenție deosebită trebuie acordată conținutului de C, evitându-se valorile de 0,08-0,12%C, care duc la apariția fisurilor în semifabricatele turnate continuu.

3. O reglementare specială o constituie faptul că, la mărcile de oțel turnate continuu, trebuie evitată dezoxidarea cu aluminiu (se evită formarea aluminei care se depune pe suprafața interioară a tuburilor de imersie).

4. Șarjele studiate, turnate corespunzător celor trei profile, au respectat reglementările de calitate impuse cu o excepție: variația relativ mare a conținutului de S (dar în limitele standardelor). Pentru corecția acestei variații, trebuie realizată o mai bună desulfurare a oțelurilor.

5. Temperatura de turnare a oțelului depinde de o serie de factori cum sunt: calitatea oțelului (temperatura lichidus și solidus), mărimea șarjei și condițiile de amplasare a halei de turnare continuă în fluxul tehnologic, viteza de răcire a oțelului în oala de turnare, etc. Din aceste considerente, pentru turnarea continuă, valorile temperaturii de turnare sunt strict delimitate astfel încât oțelul să nu fie nici supraîncălzit (ceea ce presupune condiții de răcire mai intense) și nici prea rece (pierderi mari de oțel la turnare). Astfel sunt recomandate următoarele limite tehnologice: pentru temperatura oțelului din oala de turnare valorile trebuie să fie cu 30 – 60°C peste temperatura de topire, fiind cuprinse în general între 1570 și 1620°C iar temperatura din distribuitor trebuie să fie cu 15 – 40°C deasupra temperaturii de topire, fiind în general cuprinsă între 1550 – 1580°C.

6. La șarjele studiate, gradul de supraîncălzire este mai mare decât cel recomandat, oțelul fiind ușor supraîncălzit în instalația de tratament LF. Condițiile de răcire însă sunt astfel corelate și aplicate încât să suplinească această supraîncălzire.

7. În ceea ce privește timpul de turnare, cu cât numărul șarjelor turnate secvențial este mai mare cu atât este mai redus timpul afectat turnării. Se remarcă astfel valori medii de circa 55min pentru turnarea profilului cu secțiunea 240x270mm, 75-84min pentru 70% din șarjele cu secțiunea rotund cu $\Phi 150$ mm și respectiv de circa 65min pentru o șarjă turnată continuu cu secțiunea rotund cu $\Phi 180$ mm.

8. Între timpul de turnare și temperatura de turnare a oțelului se stabilește o dependență direct proporțională pentru toate cele trei profile studiate, respectiv cu creșterea temperaturii crește și timpul de turnare.

9. Luând în considerare un indicator important al turnării: scoaterea de oțel la turnare (calculat ca raport procentual dintre cantitatea de oțel turnată și cantitatea de oțel elaborată) și studiind dependența dintre acest indicator și timpul de turnare s-au obținut intervalele optime de variație în scopul reducerii pierderilor. Astfel:

- la profilul 240x270mm, pentru secvența formată din 2 șarje, timpul optim a variat între 100-112min;
- la profilul 240x270mm, pentru secvența formată din 3 șarje, timpul optim a variat între 153-163min;

- pentru secțiunea $\Phi 150\text{mm}$, majoritatea secvențelor au fost formate din 2 șarje iar timpul a variat într-un interval mult mai mare: 158-190min;
- pentru secțiunea $\Phi 180\text{mm}$ o maximizare a scoaterii de oțel s-a obținut în interval cuprins între 127-134min.

10. Viteza de turnare a trebuit adoptată în funcție de secțiunea semifabricatului turnat, de marca de oțel turnată, de timpul și temperatura de turnare, etc. O valoare prea mare ar duce la formarea unei cruste de oțel solidificat cu grosime insuficientă, a unei structuri interne necorespunzătoare și ar determina totodată creșterea lungimii conului de solidificare. În schimb, o valoare prea redusă a vitezei ar determina producerea atât a defectelor interne cât și de suprafață, ducând de asemenea la creșterea pierderilor de oțel la turnare.

11. Deși tendința pe plan mondial este de a crește cât mai mult posibil viteza de turnare, la secțiunile studiate s-au utilizat următoarele viteze de turnare:

- la blumul cu secțiunea 240x270mm, viteza în condiții normale de lucru variază între 0,6-1,05m/min;
- la țagla cu diametrul $\Phi 150\text{mm}$ se admit viteze de turnate ce variază între 1,5 și 2,7m/min (o viteză medie cu valori peste 2m/min);
- la țagla cu diametrul $\Phi 180\text{mm}$, viteza este cuprinsă între 1,6-1,9m/min. (viteza medie de turnare pentru această secțiune este de 1,75m/min).

12. Pentru analiza variației vitezei de turnare funcție de temperatura oțelului din distribuitor și diferența până la temperatura lichidus, am apelat la produsul software Matlab, obținând atât dependențe grafice sub forma unor suprafețe de regresie cât și ecuațiile de corelație aferente. Astfel:

- pentru blumul cu secțiunea 240x270mm, se conturează domeniul optim tehnologic pentru viteze de turnare de 0,8-0,9m/min, temperaturi de turnare pentru oțel de 1545-1560°C și diferențe de temperatură ($T_{OL\text{ distr}} - T_L$) de 25-33°C;
- în cazul țaglelor, suprafețele de regresie admit puncte de maxim în domeniul tehnologic, rezultând totodată și valori optime ale vitezei de turnare de 2,1m/min pentru semifabricatul cu diametrul $\Phi 150\text{mm}$ și respectiv 1,8m/min la semifabricatul cu diametrul $\Phi 180\text{mm}$.

13. Introducând un alt factor de influență la turnarea continuă: răcirea primară, au fost analizați parametrii care intervin în proces astfel încât turnarea să decurgă fără probleme iar influența variației acestor parametrii să nu aibă efect negativ asupra calității semifabricatelor. Este cunoscut faptul că în cristalizor se formează crusta de oțel a cărei grosime poate fi influențată, într-o primă fază, de parametrii de răcire primară. Pentru aceasta s-au studiat debitele, presiunea și variația temperaturii apei de răcire din cristalizor, toate corelate cu viteza de turnare:

- la blumul cu secțiunea 240x270mm, s-au obținut ca valori optime pentru o viteză medie de turnare de 0,85m/min debite ale apei de răcire pe latura mică a cristalizorului de 960-975 l/min iar pentru latura mare a cristalizorului 1065-1090 l/min, în condițiile unei presiuni de 7,3 bari;
- pentru secțiunile rotunde nu s-a conturat un anumit domeniu optim pentru parametrii studiați, recomandându-se valori astfel adoptate astfel încât să nu fie afectată calitatea semifabricatului (de preferat o viteză medie de 2,1m/min și respectiv 1,8m/min pentru a nu crea condiții favorabile apariției crăpăturilor de suprafață și a fisurilor interne);

14. Variația temperaturii de ieșire a apei din cristalizor s-a încadrat în limitele a 4-5°C pentru blum în timp ce pentru țagle a variat în intervalul 6-8°C. Se poate spune că s-a efectuat o răcire mult mai intensă la țagtele rotunde față de blum, cu consecințe asupra calității;

15. Continuarea solidificării și deci a creșterii grosimii crustei solidificate are loc și în zona de răcire secundară pentru care s-au studiat debitele și presiunea apei pe cele trei subzone. De regulă, pentru această parte, debitele sunt selectate din programele de răcire existente de către calculatorul de proces, în funcție de modul în care a decurs turnarea până în momentul respectiv. Valorile aproximative pentru debite se pot adopta atât din diagramele realizate în Matlab cât și din diagramele ternare (în funcție de viteza de turnare la un moment dat).

CAPITOLUL V

CONSIDERAȚII REFERITOARE LA CALITATEA SEMIFABRICATELOR TURNATE CONTINUU ȘI DEFORMATE PLASTIC

În comparație cu procedeele clasice (turnarea lingourilor și laminarea lor la bloominguri sau slebinguri), turnarea continuă se prezintă ca o soluție net superioară din punct de vedere al consumului de metal, fapt care este ilustrat în fig.5.1 [50,63] .

Avantajele turnării continue rezidă din următoarele:

- calitatea bună a suprafeței și structura, care printr-un corioaj mic permite atingerea unor caracteristici mecanice superioare;

- reducerea prețului de cost comparativ cu semifabricatele de secțiune egală obținute prin turnare clasică (în laminoarele degrosisoare);

- micșorarea cheltuielilor de investiție, față de fluxul clasic, până la o limită superioară de capacitate;

- eliminarea operațiilor de turnare în lingotiere, stripare, reîncălzire, degroșare la blooming sau slebing plus laminor de țagle, gospodărirea parcului de lingotiere care consuma spațiu, timp și forță de muncă;

- îmbunătățirea scoaterii de metal printr-o reducere a consumului acestuia.

Deși pierderile de metal variază în funcție de unitatea producătoare, valorile lor se situează pentru oțelurile carbon obișnuite în următoarele limite:

- resturi în oală 0,5%;
- resturi în distribuitor 1%;
- șutaj capete (început și sfârșit turnare) 1 - 2%;
- oxid (țunder) 0,5%;

- pierderi de debitare 0,5 - 1%;
- alte pierderi 0,5 - 1%,

rezultând un total de pierderi de metal cuprins între 3 și 6%.

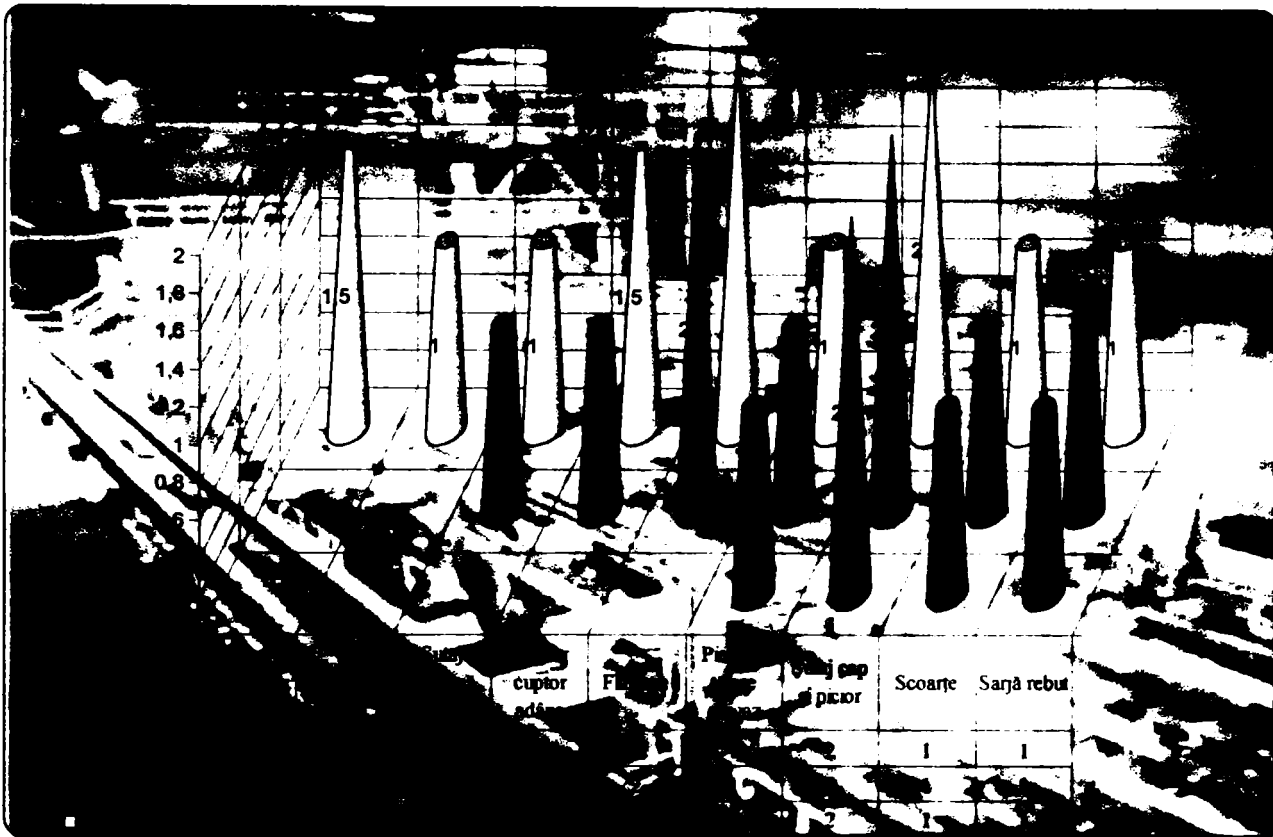


Fig.5.1. Structură comparativă a pierderilor de metal la turnarea continuă (a) și turnarea în lingouri (b).

Pierderile de oțel la turnarea continuă scad odată cu scăderea numărului de fire și cu creșterea secțiunii semifabricatului. La oțelurile cu conținut de carbon 0,17-0,25%, precum și la oțelurile dezoxidate cu aluminiu, pierderile înregistrate sunt mai mari.

Mergând mai departe cu această analiză, s-au luat în considerare trei fluxuri de producție din cadrul SC Siderurgica SA Hunedoara:

- oțelărie electrică – turnare clasică (sub formă de lingou) – deformare plastică la cald (pe laminorul degrositor de 1300mm pentru obținerea blumului de 240x270mm) – deformare plastică la cald (pe laminorul de profile grele $\phi 650$ mm pentru obținerea țaglei cu $\phi 150$ mm);
- oțelărie electrică – turnare continuă (sub formă de blum cu secțiunea 240x270mm) – deformare plastică la cald (pe laminorul de profile grele $\phi 650$ mm pentru obținerea țaglei cu $\phi 150$ mm);
- oțelărie electrică – turnare continuă (sub formă de țaglă cu $\phi 150$ mm).

În primul caz, în urma procesului de laminare, au rezultat următoarele valori medii ale pierderilor:

- rebut laminare: 6 kg/t;
- șutaj: 165 kg/t;
- ardere sau țunder: 25 kg/t.

Rezultă deci, că pentru a obține o tonă de blum este necesară o cantitate de 1,196 t. oțel lingou [64,65]. Grafic, această situație este prezentată în fig.5.2.

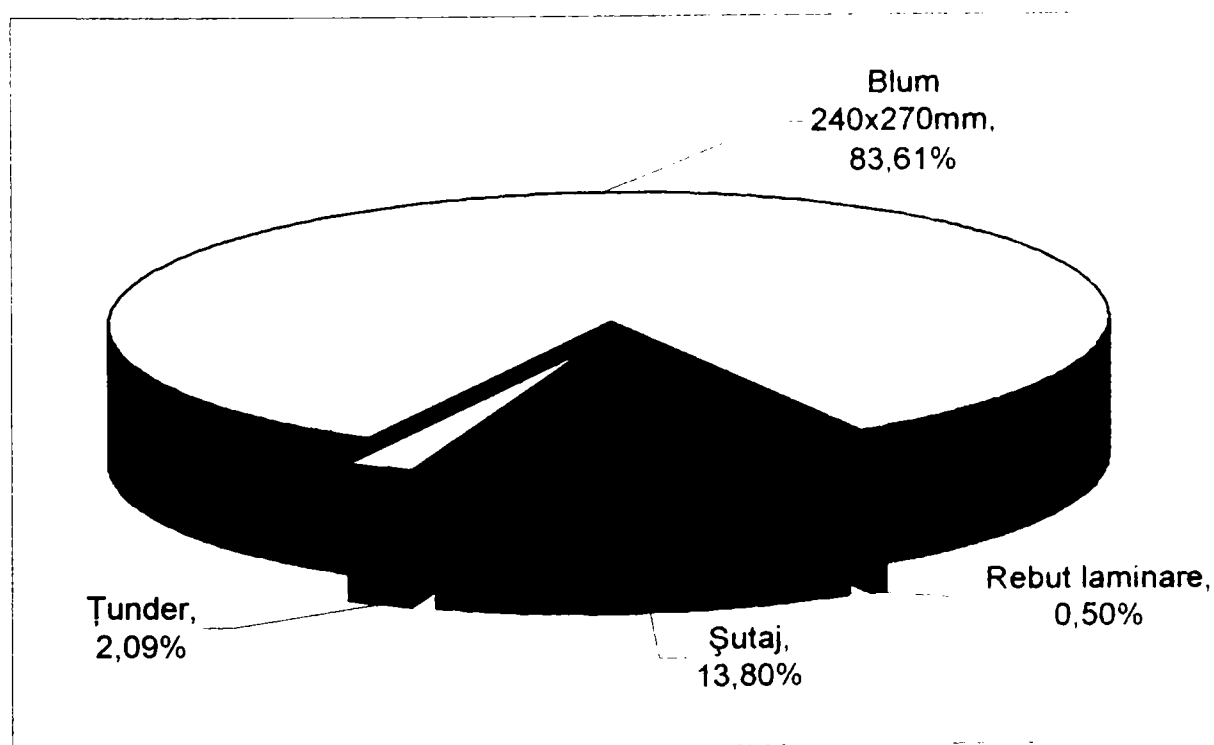


Fig.5.2. Analiza pierderilor la laminarea lingourilor pe laminorul degrositor de 1300mm

După laminorul degrositor, a urmat în flux laminorul de profile grele $\phi 650\text{mm}$, destinat prelucrării prin deformare plastică la cald a semifabricatelor sub formă de blumuri în produse finite sub formă de profile simple, fasonate și speciale precum și în semifabricate sub formă de oțel rotund, pătrat destinate relaminării, forjării sau prelucrării prin așchiere [66,67].

Și în acest caz s-a realizat un studiu asupra pierderilor care rezultă în urma laminării; astfel au rezultat următoarele valori medii:

- rebut laminare: 2 kg/t;
- șutaj: 17 kg/t;
- ardere sau țunder: 18 kg/t.

Rezultă deci, că pentru a obține o tonă de țagă $\phi 150\text{mm}$ este necesară o cantitate de 1,037 t. blum. Grafic, această situație este prezentată în fig.5.3.

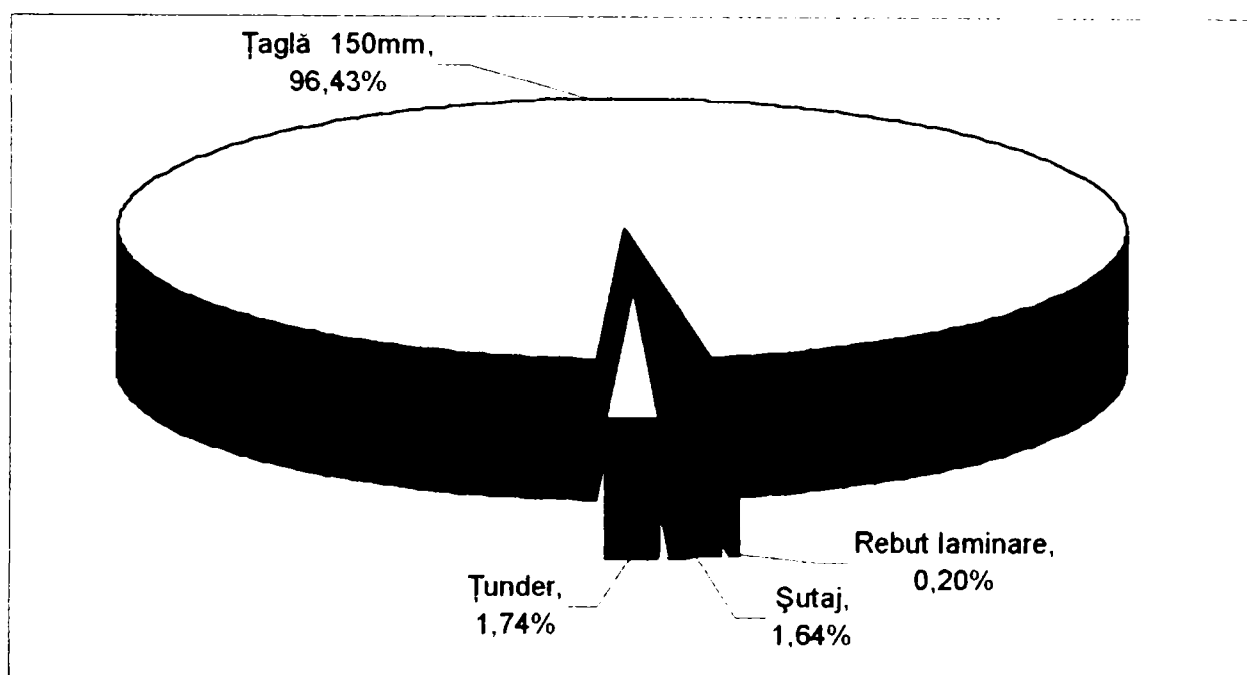


Fig.5.3. Analiza pierderilor la laminarea blumurilor 240x270mm pe laminorul de profile grele $\phi 650\text{mm}$

Realizând un bilanț al întregului flux rezultă o scoatere de 81,10% țagă cu diametrul de 150mm, obținută prin laminarea unui lingou de oțel (fig.5.4.). Nu s-au luat în calcul eventualele pierderi neprevăzute care duc la valori mult mai scăzute pentru indicatorul considerat.

În al doilea caz, s-a considerat situația: oțel elaborat în cuptoarele electrice cu arc de 100t din cadrul OE2, SC Siderurgica SA Hunedoara și turnate continuu sub formă de blum 240x270mm, laminat ulterior sub formă de țagă $\phi 150\text{mm}$.

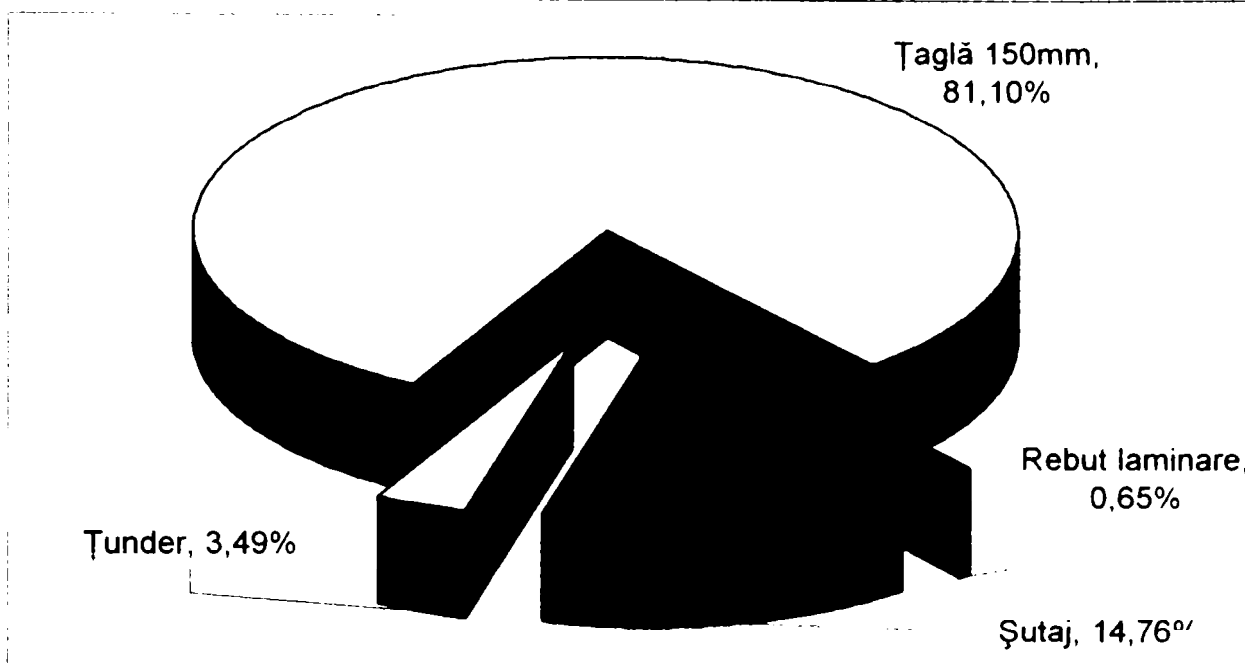


Fig.5.4. Analiza pierderilor pe fluxul lingou-blum240x270mm-țaglă ϕ 150mm

Și în acest caz am realizat un studiu asupra pierderilor care rezultă în urma laminării; astfel au rezultat următoarele valori medii:

- rebut laminare: 3 kg/t;
- șutaj: 28 kg/t;
- ardere sau tunder: 18 kg/t;
- șpan: 8 kg/t.

Rezultă deci că, pentru a obține o tonă de țaglă ϕ 150mm, este necesară o cantitate de 1,057 t. semifabricat 240x270mm. Grafic, această situație este prezentată în fig.5.5.

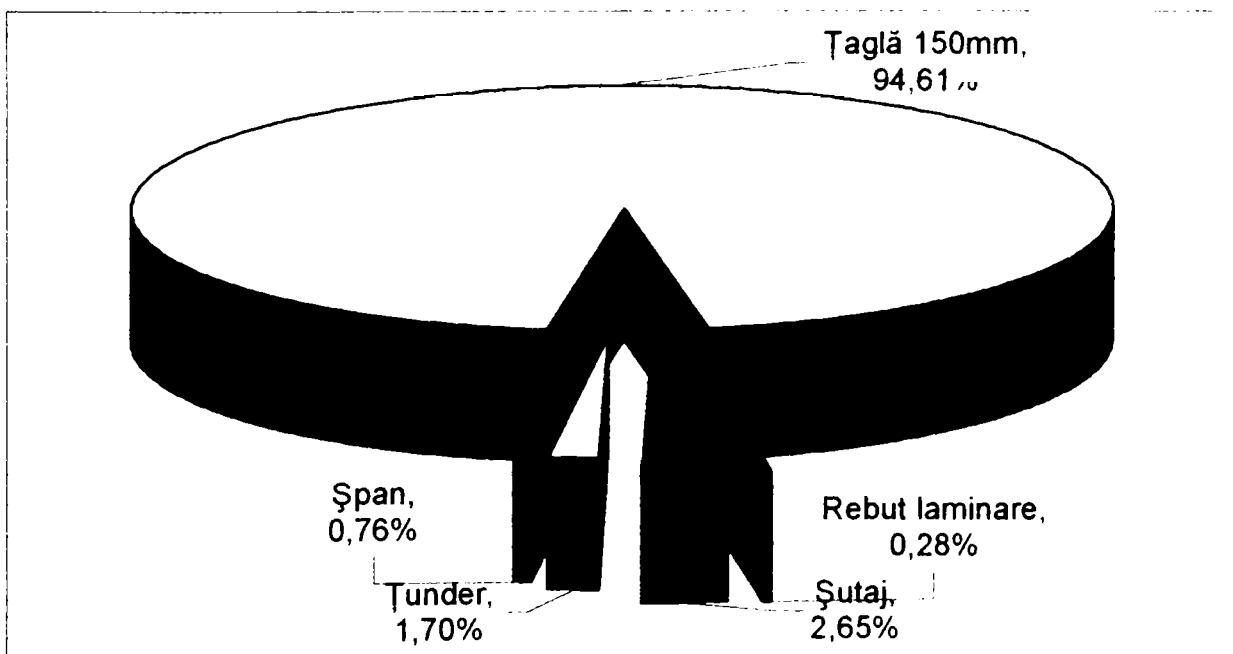


Fig.5.5. Date privind analiza pierderilor pentru fluxul blum 240x270mm turnat continuu și țaglă ϕ 150mm

Pentru cel de-al treilea caz considerat, practic turnarea continuă se realizează direct sub formă de țagă cu diametrul $\phi 150\text{mm.}$, caz în care scoaterea de semifabricat este de peste 96,5% (la șarjele studiate).

Comparând cele trei cazuri prezentate, concluzia care se desprinde subliniază cele menționate în prima parte a acestui capitol: pierderile de metal sunt mult reduse în cazul turnării continue, cu atât mai mult cu cât profilul semifabricatului se apropie de dimensiunile finale ale produsului (fig.5.6) [68].

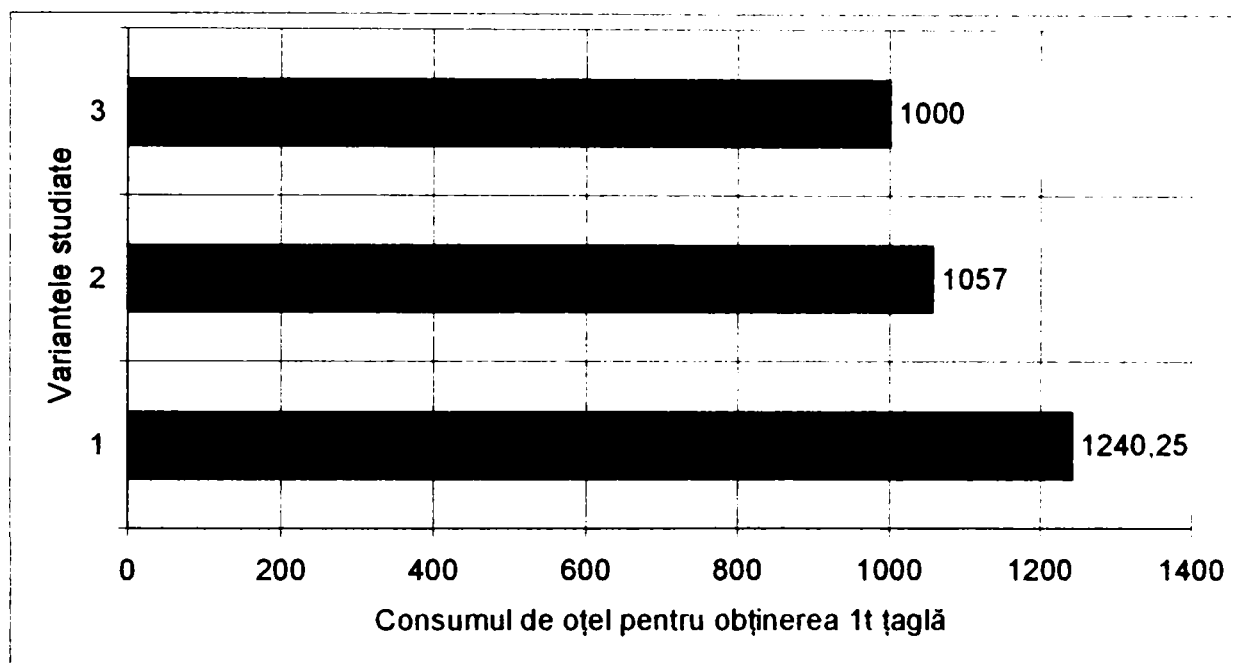


Fig.5.6. Analiza consumurilor de metal pentru obținerea unei tone de țagă

Toate aceste pierderi evidențiate se reflectă și în prețul de cost al produsului (cel mai scăzut înregistrându-se în ultimul caz).

În ceea ce privește calitatea semifabricatelor turnate continuu, controlul acesteia este necesar nu numai pentru a întruni cerințele mereu crescânde privind calitatea produsului, dar este și un mijloc efectiv de obținere a informațiilor despre starea mașinii de turnare. De altfel, un număr mare de defecte rezultă și din întreținerea și repararea necorespunzătoare a mașinii de turnare.

Nu este o regulă acceptată general pentru domeniul și metoda de control a calității. Se practică în general un control al suprafețelor curățate de țunder, precum și examinări ale calității interne (în funcție de marca oțelului și utilizarea semifabricatului turnat continuu, sunt prelevate diferite probe transversale și longitudinale din fir pentru pregătirea amprentelor de sulf și/sau a atacurilor chimice).

V.1. Controlul defectelor de suprafață

Defectele de suprafață care apar în produsele turnate continuu sunt fisuri, sufluri și incluziuni de zgură. Incluziunile de zgură și suflurile pot fi reduse apreciabil prin metode adecvate ale procesului. Fisurile sunt aproape exclusiv longitudinale, fisurile transversale fiind rare [22].

Controlul suprafeței se realizează vizual sau prin sisteme automate de detectare a defectelor.

Suflurile și incluziunile de zgură ar trebui evitate prin utilizarea metodelor proprii procesului, cum ar fi tratamentul oțelului cu Ca și protecția împotriva reoxidării. Ele abia sunt detectabile pe suprafețe cu țunder, dacă nu s-a curățat cu flacăra pentru îndepărtarea țunderului [15].

În funcție de marca oțelului și de sensibilitatea la fisuri, îndepărtarea țunderului cu flacăra se poate face la temperatura mediului sau trebuie să fie realizată la temperatură de peste 100°C. Aceasta se aplică la curățirea cu flacăra a firelor la lungimile laminorului.

Semifabricatele curățate cu flacăra pentru îndepărtarea țunderului trebuie să fie periate pentru a expune clar defectele existente ca și craterele mai mult sau mai puțin distincte. După acesta, sunt clasificate și sunt trecute la prelucrarea următoare dacă defectele sunt mici sau de dimensiuni medii și sunt debitate la lungime mai mică sau chiar declasate la fier vechi dacă numărul și mărimea defectelor este mare.

Fisurile pot fi văzute pe un fir la care nu s-a îndepărtat țunderul. Fisurile longitudinale apar rar ca defecte izolate dar ele se extind de obicei pe lungimi mai mari. Semifabricatele cu fisuri sunt fie reintroduse în circuitul economic ca fier vechi fie tăiate cel puțin mai scurt. Doar fisurile foarte mici pot fi îndepărtate prin tăiere cu flacăra pentru îndepărtarea țunderului [69].

La șarjele și mărcile studiate au fost întâlnite următoarele defecte (menționând totodată și cauzele producerii) [70]:

- *Fisurile longitudinale* se formează, în general în cristalizor, iar în zona de răcire secundară ele se pot deschide în continuare, putând rezulta chiar rupturi. Tendința de apariție a fisurilor longitudinale crește odată cu creșterea vitezelor de turnare și a temperaturilor de turnare dar și odată cu scăderea a raportului [Mn/C] și a creșterii conținutului de sulf deci implicit cu scăderea valorii raportului [Mn/S]. Ca aspect, fisurile longitudinale apar rar ca defectele izolate, ele putându-se extinde pe lungimi mari ale profilului și frecvent și în adâncime. Nu sunt întotdeauna drepte, ci deseori sunt întrerupte și continuă în zig-zag.

Cauzele acestor defecte rezidă într-o răcire neuniformă (o îndepărtare neuniformă a căldurii) creșterea neuniformă a crustei care se solidifică pe circumferința profilului cu diferențe în grosime de mai mulți milimetrii. Aceasta cauzează tensiunile transversale, având ca rezultat fisuri longitudinale atunci când crusta semifabricatului nu este suficient de tare.

Fisuri longitudinale sunt defecte care pot fi prevenite atunci când se are în vedere o geometrie exactă a cristalizorului, fără deformare și cu aliniere corectă a acestuia cu segmentul cilindrului iar suprafața interioară a cristalizorului nu trebuie să aibă creștături adâncite sau altceva care ar putea cauza defectarea mecanică a crustei profilului. Debitul apei de răcire (constanța acestuia) este de asemenea foarte important. În privința practicii turnării este foarte important ca tuburile de imersie să fie corect centrate în cristalizoare, evitând astfel o curgere neuniformă a oțelului pe una din laturi și prin urmare se asigură o distribuție neuniformă a căldurii sau chiar eroziunea crustei profilului. Prafurile de turnare trebuie să fie potrivite pentru marca oțelului și viteza cu care se toarnă acesta astfel încât să se creeze un strat uniform, topit, între crusta profilului și peretele cristalizorului ceea ce înseamnă atât izolare termică dar și o reducere a frecării.

Aceste defecte au apărut la un număr de 34 șarje, dar nu pe totalitatea semifabricatelor, ceea ce conduce la concluzia că în afara faptului că valorile rapoartelor Mn/C și Mn/S a fost sub valorile 4,7 respectiv 12, au concurat și alți factori și anume debitul apei de răcire nu s-a menținut constant pe durata turnării semifabricatelor cu defecte.

- *Fisuri datorită tensiunilor termice* sunt fisuri fine în forma de stea, și pot fi vizibile pe toată suprafața curățată de țunder, iar cauza ce le generează constă într-o suprarăcire locală, aceste defecte putând fi prevenite printr-o reglare corectă a orificiilor duzelor de pulverizare a apei și printr-o distribuție uniformă a pulverizării.

S-a constatat că în timpul răcirii au apărut pe suprafața semifabricatului unele zone mai întunecate, fapt datorat variației debitului apei de răcire.

- *Fisurile transversale* pe suprafața profilului sunt cauzate de tensiunea pe direcție longitudinală a profilului. Tensiunile longitudinale pot avea mai multe cauze: tensiunea termică datorită solidificării neuniforme, frecarea profilului în cristalizor sau în segmentele cilindrului și deformarea crustei profilului în timpul îndoirii sau îndreptării acestuia.

Efectul creștăturii semnelor de oscilație pe profil, pot favoriza de asemenea fisurarea transversală. În general fisurile transversale nu sunt obișnuite la profilele

rotunde, ele găsindu-se mai frecvent la profilele pătrate și dreptunghiulare [71].

Aceste defecte au apărut ca urmare a răcirii neuniforme (la 25 șarje) precum și ca urmare a unei dozări necorespunzătoare prafului de turnare (menisc neacoperit în totalitate de zgura rezultată din topirea prafului) – la 19 șarje.

- *Sufluri și incluziuni de zgură* apar frecvent împreună pe suprafețele profilelor turnate continuu atât la cele rotunde cât și la cele pătrate sau dreptunghiulare. Acest defect a fost cauzat de formarea unei zguri de lubrifiere cu vâscozitate mai mare (defect prezent la un număr de 46 șarje).

- *Suprapunerile ușoare* au aspectul de suprapunere circumferențială ușoară și cauza o constituie o scurtă întrerupere a turnării ceea ce înseamnă că acestea constituie defecte care pot fi preîntâmpinate. În cadrul experimentărilor efectuate, am întâlnit acest tip de defect la 4 șarje, datorită opririi de durată foarte scurtă a turnării pe un fir.

- *Suprapunerile accentuate* au aspectul unor creștături adânci circulare iar cauza apariției este ca urmare a opririi a mai mult timp a turnării (firului) și repornirea sau schimbarea distribuitorului. În cadrul studiului efectuat, defectul a fost întâlnit în 6 cazuri.

V.2. Controlul defectelor interne

În ceea ce privește defectele interne, la șarjele studiate (51 șarje pentru blumul cu secțiunea 240x270mm, 52 șarje pentru țagla cu diametrul de 150mm și 20 șarje pentru țagle cu diametrul de 180mm) au fost întâlnite următoarele defecte interne:

- *Fisuri transversale interne* care se datorează tensiunilor transversale față de direcția de turnare și se formează în crusta solidificată a profilului. Cauza acestora o constituie suprarăcirea locală a profilului care se solidifică precum și grosimea excesivă de contact a cilindrilor de acționare când miezul semifabricatului este încă lichid. S-a constatat la un număr de 26 șarje la care, pe baza diferenței de temperatură a apei de răcire (intrare – ieșire), considerăm că răcirea nu a fost corespunzătoare și miezul lichid a avut o întindere prea mare în secțiune transversală [22,73].

- *Fisuri longitudinale interne* pot fi considerate ca separații interdendritice și sunt de două tipuri: de suprafață și centrale.

Primele sunt scurte și situate aproape de suprafață și se datorează tensiunii de contracție în zona de trecere de la cristalizor la răcirea secundară atunci când oțelul este supraîncălzit sau viteza de turnare este mare. La șarjele la care s-au

constatat fisuri transversale s-au constatat și fisuri longitudinale interne aproape de suprafață, cauzele fiind cele amintite anterior.

Cele din a doua categorie se extind în miezul profilului. Aceste fisuri se formează la suprafața de separație solid-lichid și au tendința de a se extinde spre exterior. În acest caz, temperatura de turnare are o mare influență, însă acestea apar și dacă presiunea de contact a cilindrilor este prea mare când profilul nu este complet solidificat. De asemenea, aceste defecte sunt cauzate și de valoarea mică a raportului Mn/S sau pur și simplu de conținutul mare de sulf.

Această categorie de defecte a apărut la 17 din șarjele la care au apărut și defectele anterior prezentate, la aceste șarje, raportul Mn/S fiind sub 10.

- *Structura necorespunzătoare a miezului* are aspect de porozitate mai mult sau mai puțin pronunțată în miezul profilului dar poate apare și ca goluri deschise. Defectele apar ca urmare a formării retasurii în timpul solidificării finale și, de regulă, se datorează temperaturii mari de turnare. O atenuare a acestui tip de defect are loc prin respectarea parametrilor vidării (presiune argon, durată vidare, etc) sau, dacă nu este posibilă vidarea, efectuarea unei barbotări corespunzătoare.

- *Segregația centrală* apare, de regulă, datorită segregării sulfului și poate fi prevenită sau diminuată, dacă structura echiaxială ocupă o mare suprafață în aria secțiunii transversale a profilului. Aceasta se poate realiza dacă se respectă o temperatură scăzută de turnare astfel încât să nu fie nevoie de o răcire secundară intensă [74].

La oțelurile obișnuite, segregațiile nu deranjează și nu pot fi întinse în lungul profilului printr-un corioaj mai mare decât normal [75,76].

- *Incluziunile nemetalice* din semifabricatele turnate continuu, sunt, în principal, de origine endogenă și reprezintă oxizi, silicați, nitruri; pot fi însă și de origine exogenă provenind din prafurile de turnare sau căptușeala refractară a oalei, distribuitorului sau a tuburilor de imersie.

- *Incluziunile nemetalice exogene (din prafurile de turnare)* au o formă sferică și o distribuție neuniformă din punct de vedere cantitativ în semifabricatul turnat continuu. Apar ca urmare a antrenării prafului de turnare datorită turbulenței excesive a nivelului oțelului în cristalizor, iar apariția lor datorită acestei cauze poate fi evitată dacă se respectă adâncimea de pătrundere a tubului de imersie sub nivelul oțelului și dacă praful de turnare utilizat este corespunzător.

- *Incluziunile nemetalice endogene (tip pată)* constau în incluziuni sub formă de pată datorită silicaților și oxizilor complecși, mai ales în oțeluri cu conținut ridicat de siliciu și mangan. Cauzele apariției lor se datorează reacțiilor oțelului cu

materialul refractar dar și ca urmare a unei dezoxidări necorespunzătoare sau a procesului de reoxidare a oțelului. Prevenirea acestora se poate realiza utilizând tuburi de imersie din material refractar corespunzător, îmbunătățind metoda de dezoxidare prin tratare în oală cu calciu, și protejând jetul împotriva reoxidării.

- *Incluziunile aglomerate (de tip nori)* sunt distribuite sub formă de nori și apar în special la oțelurile calmate cu aluminiu. Ele sunt incluziuni de alumină și cresc odată cu creșterea conținutului de oxigen rezidual din oțel. Sunt reduse sau nu apar deloc la oțelurile calmate cu Si și Al.

- *Incluziuni de suprafață* sunt de mărime mică și apar la cca. 10-15mm sub suprafața profilului turnat continuu. Ele se formează ca urmare a antrenării prafurilor de turnare sau a unor oxizi care se ridică în cristalizor și se lipesc de crusta profilului din interior. Apariția lor poate fi stopată printr-o corectă acoperire a oțelului în distribuitor, protejarea jetului atât de la oala de turnare la distribuitor cât și din distribuitor în cristalizor, precum și prin tratarea oțelului cu calciu în oală.

La studiul defectelor am analizat în special defectele care apar la turnarea continuă (și se datorează fie unei elaborări necorespunzătoare fie necorelării factorilor tehnologici de la turnarea continuă) și sunt transmise mai departe produsului finit.

Pentru acest studiu s-au avut în vedere următoarele considerente:

- procesul de deformare plastică la cald a semifabricatelor turnate continuu este corespunzător și din acest motiv nu am luat în considerare eventualele defecte care apar la produsul finit datorate laminării [66];
- defectele de suprafață sunt înlăturate în totalitate înainte ca semifabricatele să fie încălzite în vederea laminării.

O primă analiză a constatat în studiul defectelor interne pe amprente Baumann pentru semifabricatele turnate continuu la SC Siderurgica SA Hunedoara, la un număr de 15 șarje. Cele mai reprezentative (din punct de vedere a frecvenței de apariție a defectelor) au fost:

- în fig.5.7 sunt puse în evidență structuri de turnare cu grăunți columnari alungiți de la margine până la centul blumurilor, retasură, porozitate generală, fisuri de fragilitate intercolumnare și în planele de transcristalizare, fisuri termice la suprafața laterală a blumului;

- pentru această probă (fig.5.8), amprenta Baumann a scos în evidență o segregatie mai accentuată dar uniformă a sulfului, iar analizele macroscopice au

evidențiat o porozitate sub formă de rețea, o segregare dendritică puternică, fisuri termice și, în zona centrală, grăunți aproximativ echiaxi;



Fig.5.7. Structuri de turnare la blmurile 240x270mm



Fig.5.8. Segregație a sulfului și porozitate centrală

- la proba din fig.5.9 se poate observa foarte bine retasura pronunțată precum și fisuri termice centrale. Se mai remarcă de asemenea în zona centrală grăunți aproximativ echiaxi;

- la probele din fig.5.10, amprenta Baumann prezintă o segregare accentuată cu repartitie interdendritică. Analiza macroscopică a evidențiat la prima șarjă o porozitate extinsă și fisuri termice în zona centrală, structură cu dendrite foarte accentuate și delimitarea zonei marginale cu sulfuri de restul printr-un pătrat de segregare ușor conturat. Pentru a doua șarjă, se remarcă grăunți columnari alungiți care se întind pe mai mult de 1/4 din latură iar în zona centrală o porozitate sub formă de rețea iar în mijloc retasură.



Fig.5.9. Retasură și fisuri termice centrale

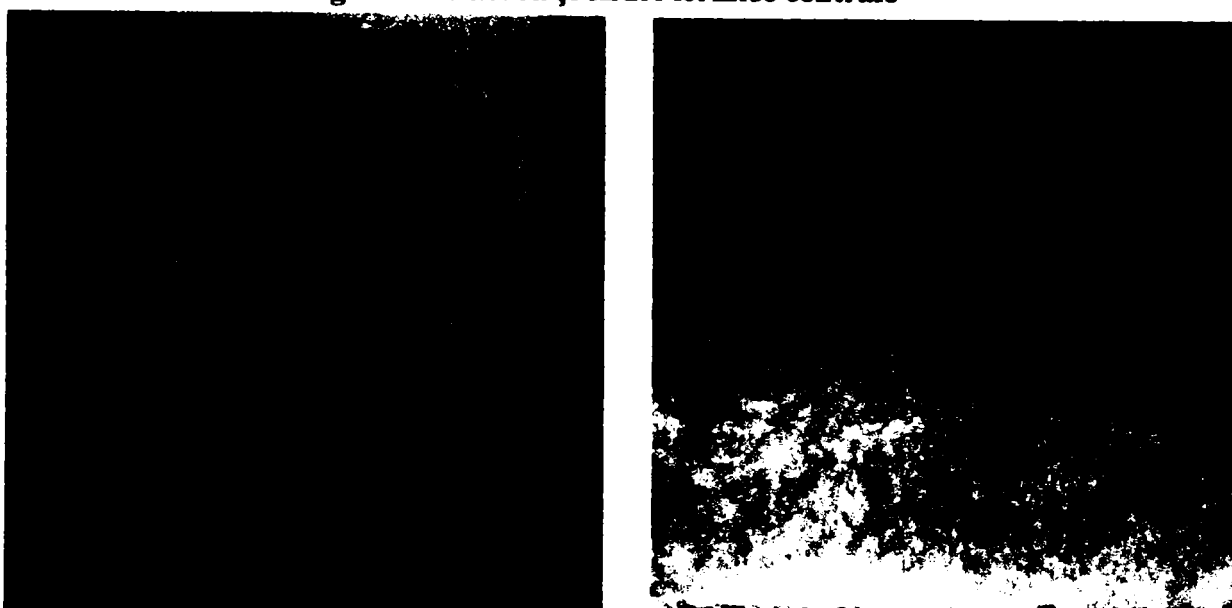


Fig.5.10. Segregație accentuată cu fisuri termice centrale (a) și grăunți columnari alungiți (b)

Având în vedere cele prezentate anterior, au fost efectuate ulterior amprentele Baumann pentru 25 șarje (câte o probă din fiecare șarjă) pentru semifabricatele turnate continuu și apoi amprentele Baumann pentru produsul finit obținut din acel semifabricat (profil cornier cu aripi egale, profil U și profil SG 18), în vederea studierii modului de transmitere a defectelor de la semifabricat la produsul finit.

Cele mai reprezentative defecte întâlnite sunt:

- pentru semifabricat: o aglomerare masivă a incluziunilor nemetalice pe o latură a blumului, la o distanță de 15mm de margine, o urmă de retasură și de fisuri interne centrale cu orientare perpendiculară pe fețele blumului, cu lungimi de 4-6mm (fig.5.11.a) și respectiv pentru produsul finit o aglomerare (pe ambele aripi) de incluziuni nemetalice (fig.5.11.b);

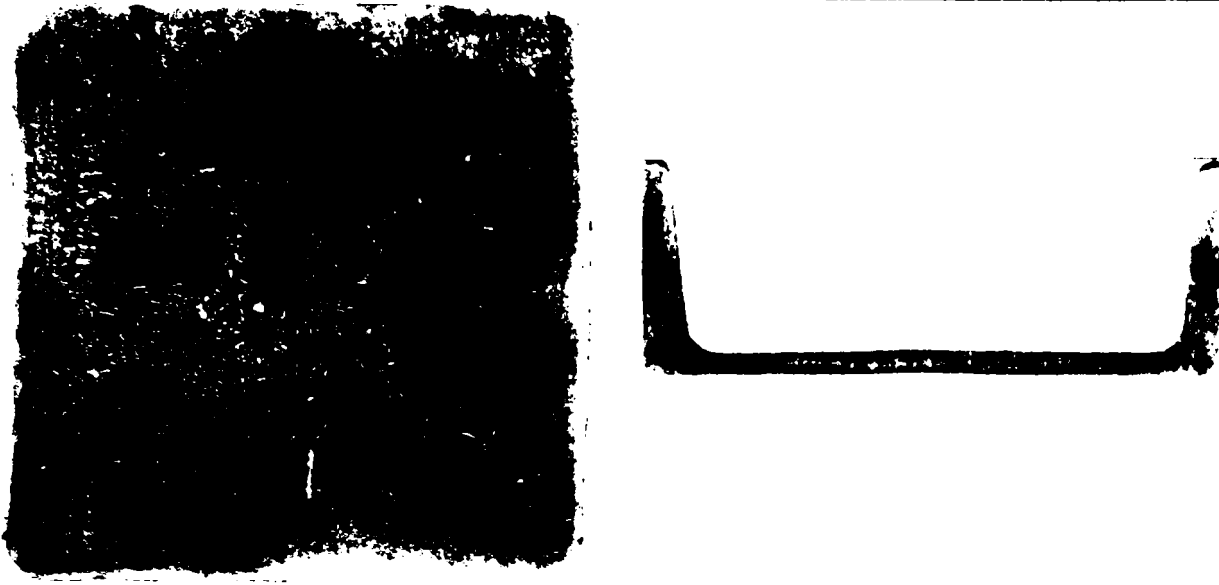


Fig.5.11. Fisuri interne centrale și aglomerări de incluziuni la blumul de 240x270mm (a) și incluziuni pe produsul finit (b)

- la semifabricat analiza a evidențiat o aglomerare masivă a incluziunilor nemetalice pe o parte a probei (la o distanță de circa 15mm de margine – fig.5.12.a) precum și o fisură internă cu orientare perpendiculară pe fața blumului cu lungimea de 38mm. Incluziunile au fost transmise produsului finit, în special în colț și pe talpă (fig.5.12.b), remarcându-se și sufluri (închise și deschise);



Fig.5.12. Incluziuni localizate pe o parte a blumului și fisură centrală (a) și incluziuni și sufluri la produsul finit (b)

- la semifabricat s-a evidențiat o aglomerare de incluziuni distribuite pe o parte a probei la 10mm (fig.5.13.a) și respectiv 12mm de margine (fig.5.14.a) și fisuri centrale tip stea. Analiza macroscopică asupra produsului finit a prezentat o structură fără defecte, exceptând distribuția

uniformă și ușoară a incluziunilor nemetalice (fig.5.13.b și 5.14.b);

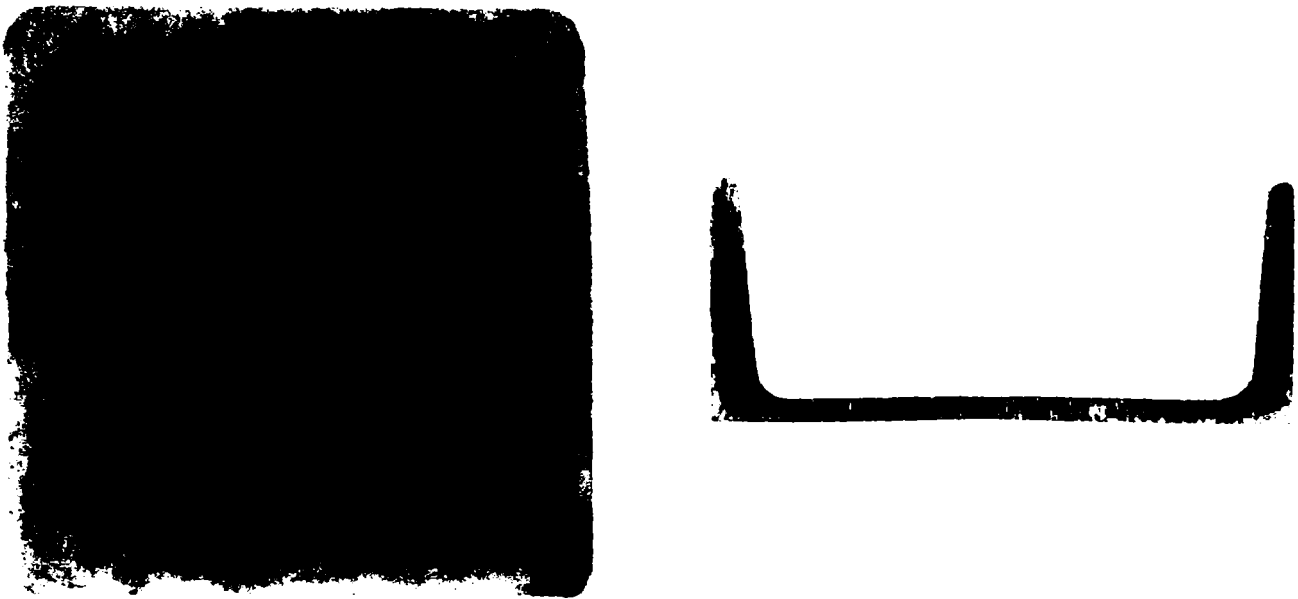


Fig.5.13. Urmă de retasură, aglomerare de incluziuni nemetalice și fisură tip stea pe semifabricat (a) și distribuție ușoară a incluziunilor la produsul finit (b)

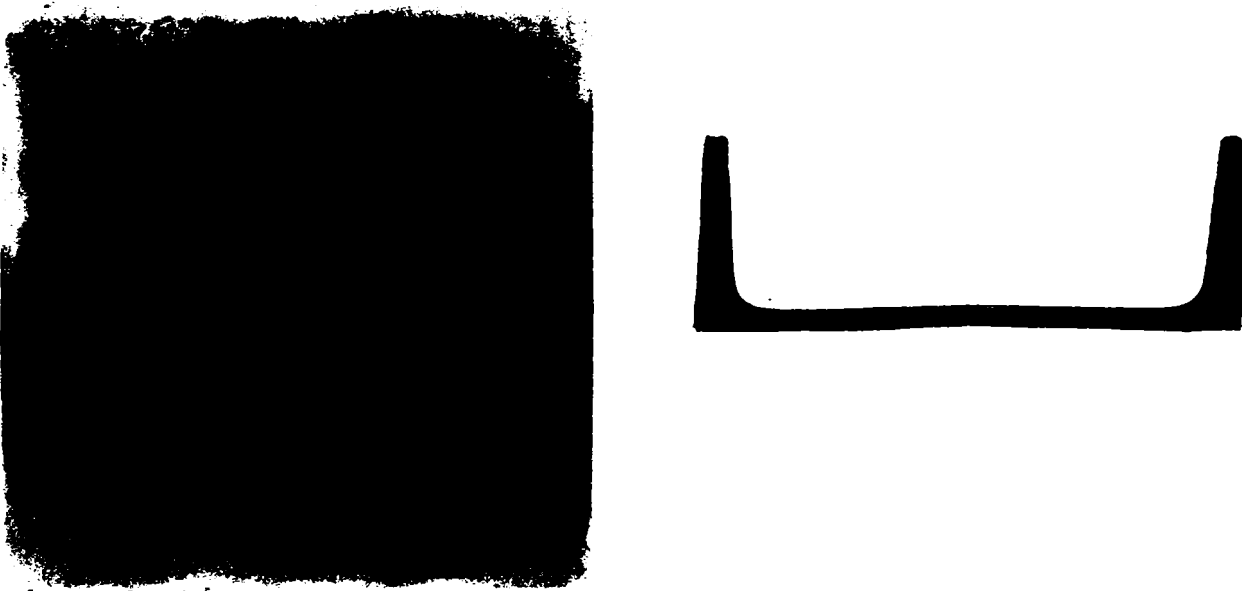


Fig.5.14. Coroană marginală de incluziuni și fisuri interne centrale la blum (a) și distribuție ușoară a incluziunilor la produsul finit (b)

- semifabricatul nu prezintă nici segregatie a sulfului și nici incluziuni nemetalice iar la macrostructură s-a evidențiat o urmă de retasură și fisuri interne centrale cu orientare perpendiculară pe fețele blumului cu lungime de 5-10mm (fig.5.15.a). Produsul finit nu prezintă defecte (fig.5.15.b);
- în ceea ce privește țagtele rotunde, s-au observat mai puține incluziuni dar o tendință mai accentuată de formare a fisurilor (fig.5.16) datorate unor condiții de răcire prea puternice. Fisurile pot fi amplasate și foarte aproape de suprafață (cazul macrografiei din fig.5.16) sau pot avea dimensiuni mult mai mari, fiind orientate radial pe secțiune până spre

centrul acesteia (fig.5.17);



Fig.5.15. Fisuri interne pe toată lungimea secțiunii și urmă de retasură la semifabricat (a) produsul finit nu prezintă defecte (b)



Fig.5.16. Fisuri aproape de suprafață la țagla de $\Phi 150\text{mm}$

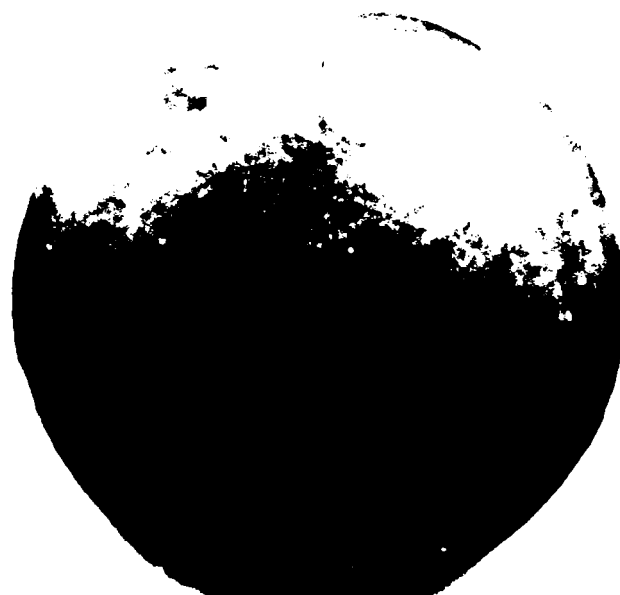


Fig.5.17. Fisuri radiale la țagla de $\Phi 180\text{mm}$

- la câteva șarje s-a constatat pe secțiunea analizată prezența unor fulgi datorati unei insuficiente degazări ale oțelului (fig.5.18);



Fig.5.18. Defect sub formă de fulgi în țagla cu Φ 180mm

- prezența, la 45% din țagtele (cu diametrul Φ 180mm) analizate a unei retasuri sau a unei porozități centrale (fig.5.19);

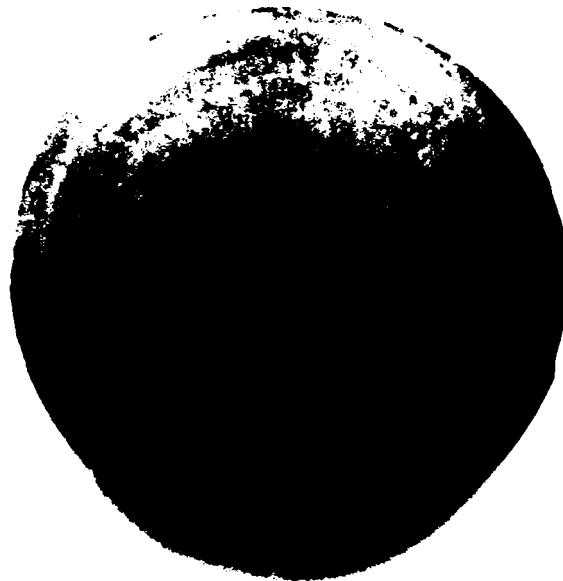


Fig.5.19. Retasă centrală la țagla cu diametrul Φ 180mm

Pentru un studiu mai aprofundat, s-a efectuat analiza microscopică pe un număr de 25 șarje (din cele trei mărci de oțeluri). Astfel:

- s-a pus în evidență o structură ferito-perlitică, cu punctaj cuprins între 7-8, cu grăunți uniformi, câteva incluziuni nemetalice (fig.5.20);
- câteva din analizele efectuate au pus în evidență prezența microfisurilor precum și a silicaților fragili cu punctaj de 4-5 și a silicaților nedeformabili (fig.5.21a și b);
- în fig.5.22 sunt prezentate două microstructuri care prezintă aspectul metalografic al unei fisuri interne de fragilitate;

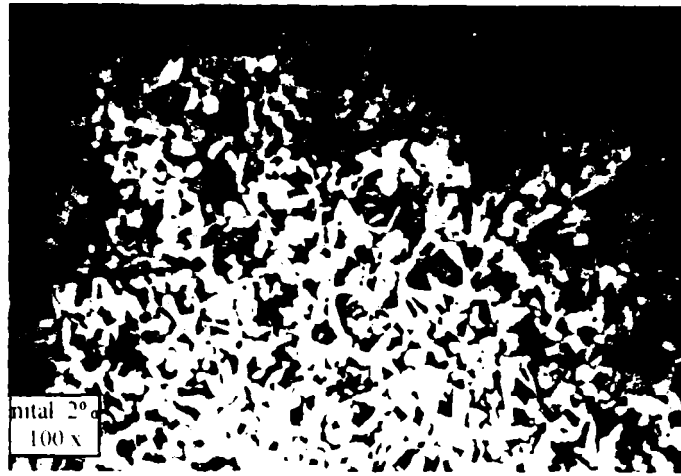


Fig.5.20. Structura ferito-perlitică a semifabricatelor turnate continuu

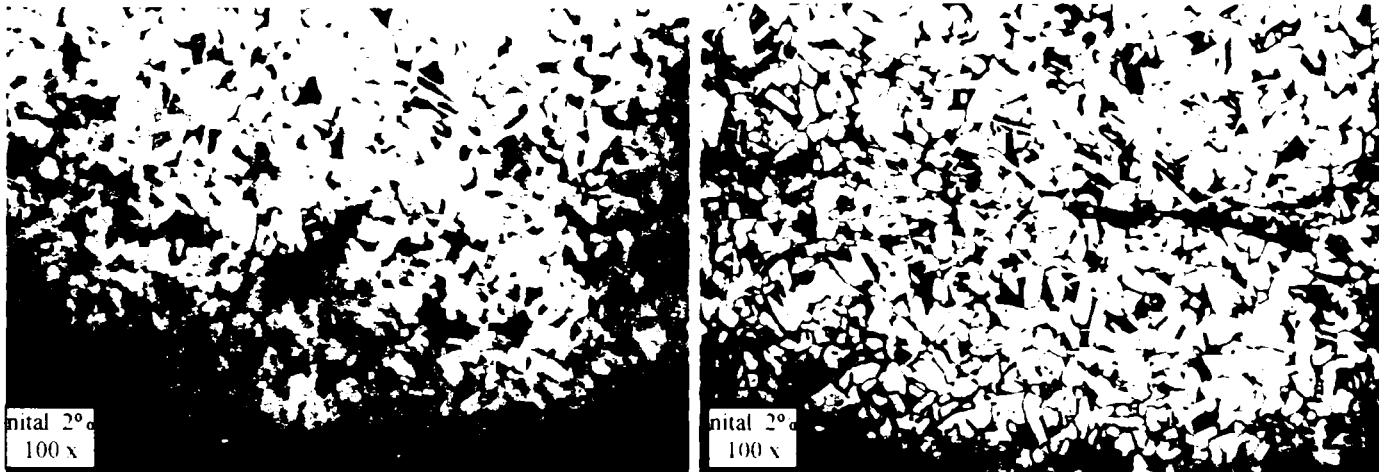


Fig.5.21. Microfisuri și silicați prezenți în structura semifabricatelor

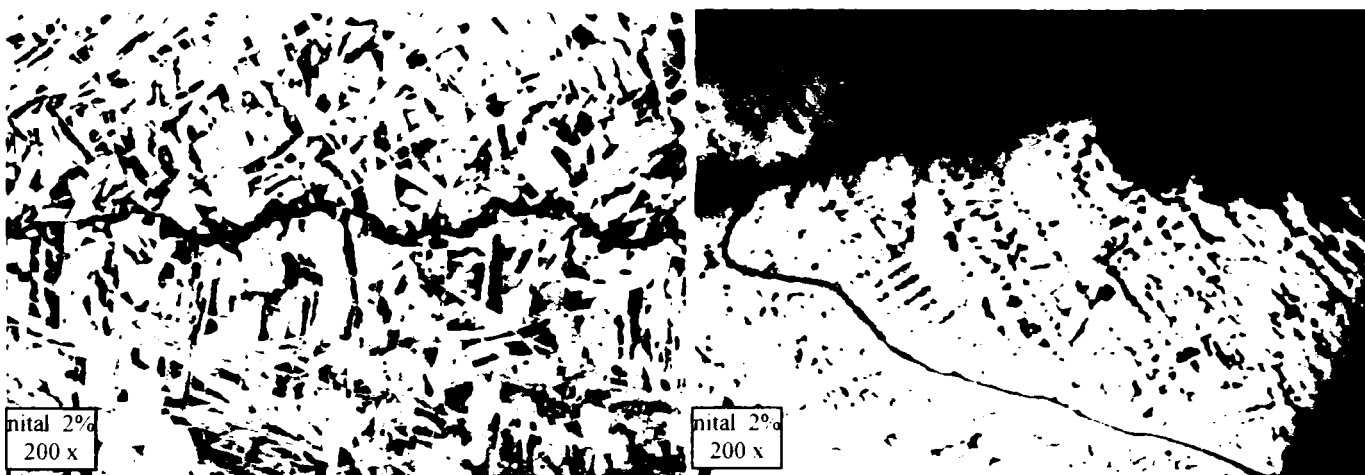


Fig.5.22. Fisuri interne de fragilitate

- s-a evidențiat de asemenea porozitatea care însoțește retasura (sub formă de rețea) – fig.5.23a și ușoara segregare a carbonului – fig.5.23.b.
- analiza microscopică a pus în evidență și situații de tipul celei din fig.5.23: aspectul unui por situat interdendritic care, fiind însoțit de o “insulă” de decarburare pe care sunt precipitate incluziuni endogene, are caracteristicile unei sufluri.

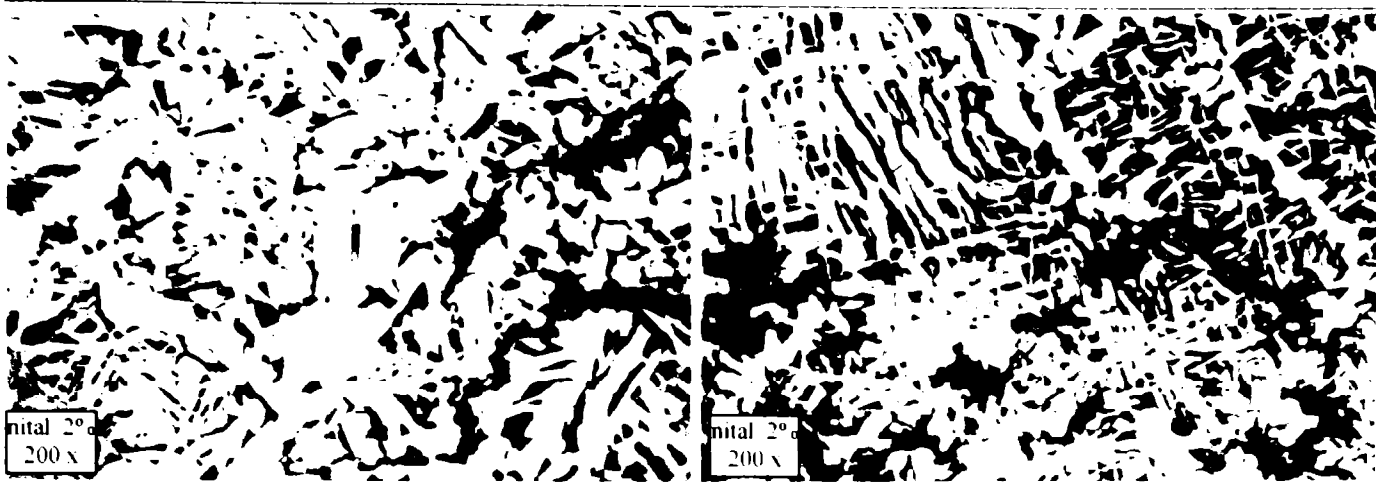


Fig.5.22. Porozitatea care însoțește retasura (a) și ușoara segregatie a carbonului (b)



Fig.5.23. Por situat interdendritic, în structura semifabricatelor

V.3. Concluzii

Din studiul defectelor prezentate pe probele din semifabricatele turnate continuu cât și pe probele din produsul finit, se desprind concluziile:

1. Se observă pe unele dintre amprentele Baumann o segregatie slabă a sulfurii ;
2. O mare parte a probelor admit o aglomerare masivă de incluziuni nemetalice pe o parte a probei, la o distanță de cca. 15-20mm de margine, cu o distribuție slabă, dar uniformă. Aceste incluziuni nemetalice se regăsesc și în produsul finit;
3. Prezența pe semifabricatul turnat continuu a unor fisuri interne cu orientare diagonală de colț și cu lungimi de 5-15mm, a fisurilor interne mediane cu orientare perpendiculară pe fața blumului, cu lungimi de 5-17mm și respectiv a unor fisuri interne centrate, cu orientare perpendiculară pe fețele blumului, cu lungimi de 4-35mm;
4. Existența unor retasuri interne sau respectiv a unor urme de retasură.

5. Posibilitatea prezenței pe produsul finit a unor fisuri mici (de circa 1mm lungime);

6. Specific țăgurilor rotunde sunt crăpăturile interne datorate în special vitezelor mari de răcire. La aceste profile nu s-au întâlnit numai ocazional incluziuni nemetalice în structură;

7. Analiza microstructurilor au evidențiat că structura de bază este de tip ferito-perlitică, cu punctajul cuprins între 7-8, cu grăunți uniformi și care nu prezintă structură în șiruri și, în unele cazuri, prezența incluziunilor nemetalice, a silicaților fragili cu punctajul 4-5, și silicați nedeformați. Aceste incluziuni sunt grosolane și apar alături de alte incluziuni mai mici, în grupe de șiruri, uneori paralele sau sfărâmate.

CAPITOLUL VI

CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Prezenta teză de doctorat cu titlul „Cercetări privind îmbunătățirea comportării la deformare a semifabricatelor turnate continuu”, abordează sub forma cercetării fundamentale și aplicative posibilitățile de îmbunătățire a calității produselor finite prin creșterea calității semifabricatelor turnate continuu.

Scopul tezei constă în îmbunătățirea calității semifabricatelor turnate continuu, studiind și corelând factorii și parametrii care intervin în procesul de turnare continuă cu influență asupra calității.

Pentru fundamentarea obiectivelor tezei au fost analizate studiile și cercetările existente în literatura de specialitate referitoare la turnarea și solidificarea semifabricatelor turnate continuu precum și a factorilor care intervin în proces cu influențe asupra calității.

Atât din acestea cât și din experimentările proprii efectuate, rezultă următoarele concluzii:

1. Cu toate realizările obținute până în prezent, potențialul de dezvoltare a procedurii de turnare continuă spre deosebire de alte procedee metalurgice, este în continuare ridicat, avându-se în vedere continua perfecționare și modernizare a acestor instalații.

2. Principalele direcții ale dezvoltării tehnologice determinate nemijlocit de exigențele de competitivitate ale producătorilor sunt legate de creșterea productivității pe utilaj și aducerea cât mai aproape a dimensiunii semifabricatelor turnate continuu de dimensiunea produsului finit (în condiții de menținere sau

creștere calitativă).

3. Presiunea pieței asupra costurilor de fabricație și a acestora asupra progresului în concepție și management tehnologic sunt evidente și reprezintă substratul majorității lucrărilor recent publicate.

4. Solidificarea oțelului la turnarea continuă este mult mai complexă decât în cazul turnării clasice (sub formă de lingouri), având în vedere complexitatea procesului, respectiv modificarea condițiilor de schimb de căldură de la răcirea primară la răcirea secundară și în final răcirea în aer.

5. Structura semifabricatelor turnate continuu este similară cu cea a lingourilor, distingându-se trei zone de cristalizare:

- o zonă de suprafață omogenă și cu cristale fine, formată imediat după turnare (la interfața oțel – cristalizor);
- o a doua zonă de solidificare cu cristale dendritice perpendiculare pe axa longitudinală a semifabricatului;
- o zonă cu cristale echiaxiale, mai mari ca dimensiune și mai impură din punct de vedere chimic.

6. Parametrul pe baza căruia trebuie corelați toți factorii de influență îl reprezintă crusta de oțel solidificat, respectiv viteza de creștere a grosimii acesteia. O crustă prea subțire poate duce la ruperea firului în timp ce o viteză de creștere a crustei prea mare duce la apariția tensiunilor termice în interiorul semifabricatului, determinând apariția fisurilor.

7. Determinarea practică a grosimii crustei solidificate este mai dificilă, presupunând lucrul cu surse radioactive și în condiții greu de aplicat. Există însă o serie de relații empirice, formulate pe baza unor ipoteze simplificatoare, relații pe baza cărora se poate calcula grosimea aproximativă a stratului solidificat la un anumit moment de timp de la începutul turnării.

8. În scopul reducerii acțiunii forțelor care acționează asupra crustei solidificate (pentru a nu se permite perforarea sau ruperea firului), în practica industrială se adoptă o serie de măsuri de ordin tehnologic, cum ar fi: corelarea parametrilor de răcire primară și secundară cu viteza, temperatura și timpul de turnare în scopul micșorării presiunii ferostatice; utilizarea diferitelor prafuri unguente în cristalizor cu scopul atât de a reduce frecarea dintre crustă și cristalizor cât și de a nu modifica condițiile de schimb de căldură în zona primară de răcire; montarea și alinierea corespunzătoare (față de cristalizor) a roților de tragere.

9. Analizând dependențele grafice rezultate pe baza modelului matematic adaptat din literatura de specialitate și a experimentărilor proprii au rezultat următoarele:

- grosimea crustei este dependentă de timpul de solidificare și de condițiile de răcire;

- în cazul în care pentru determinarea grosimii crustei s-au adoptat prea multe ipoteze simplificatoare, s-a putut obține o formă aproximativă a formei conului de solidificare și abateri semnificative de la timpul real de solidificare;

- referitor la forma conului de solidificare, se observă că există concordanță între determinările teoretice și cele practice, motiv pentru care propunem utilizarea pentru un calcul orientativ a relațiilor simplificate (de ex. a relației (2.1.));

- obținerea unei forme cât mai apropiate de cea reală a conului de solidificare poate fi obținută utilizând relația (3.17);

- din determinările efectuate a rezultat că, pe instalația de turnare continuă a unui semifabricat cu secțiunea de 240x270mm, lungimea conului de solidificare poate ajunge la 19m iar timpul total de solidificare la 21min (la o viteză medie de turnare de 0,92m/min).

10. Necesitatea clarificării condițiilor de răcire primară și secundară au avut finalitate realizarea pe baza unui alt model matematic și a unor ipoteze simplificatoare, a simulării solidificării (program denumit TURNCON).

11. Pe baza programului amintit, s-au obținut diferite dependențe grafice, din analiza cărora rezultă concluziile:

- în toate diagramele se observă un salt al temperaturii sau a vitezei de solidificare după circa 1,07min de la începutul turnării, respectiv imediat ce secțiunea considerată a ieșit din cristalizor, salt datorat imposibilității eliminării fluxului de căldură din interiorul semifabricatului într-un interval foarte scurt de timp (până în dreptul primului inel de răcire);

- modificând o serie de parametrii (numărul de puncte discretizate, căldura disipată în cristalizor și răcire secundară, datele ce țin de marca de oțel) se pot obține valori mult mai corecte, aplicabile și pentru alte mărci de oțeluri.

12. Verificarea practică (industrială) a modelului propus prin simulare a fost posibilă doar pentru punctele considerate la suprafața semifabricatului (respectiv pentru trei puncte). Rezultatele obținute în urma simulării au fost similare cu datele practice, ceea ce demonstrează că ipotezele simplificatoare adoptate în scopul ușurării calculului sunt bine justificate.

În urma analizei factorilor tehnologici anteriori, a dependențelor și a

corelațiilor obținute, rezultă de asemenea:

13. Un prim factor de care depinde calitatea semifabricatului turnat continuu și deci și a produsului finit îl reprezintă compoziția chimică a oțelului turnat. Procesul de turnare continuă necesită o calitate superioară pentru oțel, ceea ce impune obligativitatea tratamentului secundar al oțelului, în afara agregatului de elaborare. În urma tratamentului, compoziția chimică trebuie să se încadreze în limite mult mai restrânse (limite date de standardul mărcii elaborate), în special la secvențele de turnare formate din mai multe șarje. Trebuie astfel limitat conținutul de S și P la valori cumulate sub 0,04%, conținutul de gaze în cantități cât mai reduse. O atenție deosebită trebuie acordată conținutului de C, evitându-se intervalul valorilor de 0,08-0,12%C, care duc la apariția fisurilor în semifabricatele turnate continuu.

14. O reglementare specială o constituie faptul că, la mărcile de oțel turnate continuu trebuie evitată dezoxidarea cu aluminiu (se evită formarea aluminei care se depune pe suprafața interioară a tuburilor de imersie).

15. Șarjele studiate, turnate corespunzător celor trei profile, au respectat reglementările de calitate impuse cu o excepție: variația relativ mare a conținutului de S (dar în limitele standardelor). Pentru corecția acestei variații, trebuie realizată o mai bună desulfurare a oțelurilor.

16. Temperatura de turnare a oțelului depinde de o serie de factori cum sunt: calitatea oțelului (temperatura lichidus și solidus), mărimea șarjei și condițiile de amplasare a halei de turnare continuă în fluxul tehnologic, viteza de răcire a oțelului în oala de turnare, etc. Din aceste considerente, pentru turnarea continuă, valorile temperaturi de turnare sunt strict delimitate astfel încât oțelul să nu fie nici supraîncălzit (ceea ce presupune condiții de răcire mai intense) și nici prea rece (pierderi mari de oțel la turnare). Astfel sunt recomandate următoarele limite tehnologice: pentru temperatura oțelului din oala de turnare valorile trebuie să fie cu 30–60°C peste temperatura de topire, fiind cuprinse în general între 1570 și 1620°C iar temperatura din distribuitor trebuie să fie cu 15–40°C deasupra temperaturii de topire, fiind în general cuprinsă între 1550–1580°C.

17. La șarjele studiate, gradul de supraîncălzire este mai mare decât cel recomandat, oțelul fiind ușor supraîncălzit în instalația de tratament LF. Condițiile de răcire însă sunt astfel corelate și aplicate, încât să suplinească această supraîncălzire.

18. În ceea ce privește timpul de turnare, cu cât numărul șarjelor turnate secvențial este mai mare cu atât este mai redus timpul afectat turnării. Se remarcă

astfel valori medii de circa 55min pentru turnarea profilului cu secțiunea 240x270mm, 75-84min pentru 70% din șarjele cu secțiunea rotund cu $\Phi 150\text{mm}$ și respectiv de circa 65min pentru o șarjă turnată continuu cu secțiunea rotund cu $\Phi 180\text{mm}$.

19. Între timpul de turnare și temperatura de turnare a oțelului se stabilește o dependență direct proporțională pentru toate cele trei profile studiate, respectiv cu creșterea temperaturii crește și timpul de turnare.

20. Luând în considerare un indicator important al turnării: scoaterea de oțel la turnare (calculat ca raport procentual dintre cantitatea de oțel turnată și cantitatea de oțel elaborată) și studiind dependența dintre acest indicator și timpul de turnare s-au obținut intervalele optime de variație în scopul reducerii pierderilor. Astfel:

- la profilul 240x270mm, pentru secvența formată din 2 șarje, timpul optim a variat între 100-112min;
- la profilul 240x270mm, pentru secvența formată din 3 șarje, timpul optim a variat între 153-163min;
- pentru secțiunea $\Phi 150\text{mm}$, majoritatea secvențelor au fost formate din 2 șarje iar timpul a variat într-un interval mult mai mare: 158-190min;
- pentru secțiunea $\Phi 180\text{mm}$ o maximizare a scoaterii de oțel s-a obținut în interval cuprins între 127-134min.

21. Viteza de turnare a fost stabilită în funcție de secțiunea semifabricatului turnat, de marca de oțel turnată, de timpul și temperatura de turnare, etc. S-a constatat că o valoare prea mare duce la formarea unei cruste de oțel solidificat cu grosime insuficientă, a unei structuri interne necorespunzătoare și determină totodată creșterea lungimii conului de solidificare. În schimb, o valoare prea redusă a vitezei, determină producerea atât a defectelor interne cât și de suprafață, ducând de asemenea la creșterea pierderilor de oțel la turnare.

22. Deși tendința pe plan mondial este de a crește cât mai mult posibil viteza de turnare, la secțiunile studiate au rezultat ca optime următoarele viteze de turnare:

- la blumul cu secțiunea 240x270mm, viteza în condiții normale de lucru variază între 0,6-1,05m/min;
- la țagla cu diametrul $\Phi 150\text{mm}$ se admit viteze de turnate ce variază între 1,5 și 2,7m/min (o viteză medie cu valori peste 2m/min);
- la țagla cu diametrul $\Phi 180\text{mm}$, viteza este cuprinsă între 1,6-

1,9m/min. (viteza medie de turnare este de 1,75m/min).

23. Pentru analiza variației vitezei de turnare funcție de temperatura oțelului din distribuitor și diferența până la temperatura lichidus, s-a apelat la produsul software Matlab (programele SIDHD1 și SIDHD2), obținând atât dependențe grafice sub forma unor suprafețe de regresie cât și ecuațiile de corelație aferente.

24. Pentru blumul cu secțiunea 240x270mm, se conturează domeniul optim tehnologic pentru viteze de turnare de 0,8-0,9m/min, temperaturi de turnare pentru oțel de 1545-1560°C și diferențe de temperatură ($T_{OL\ dist} - T_L$) de 25-33°C.

25. În cazul țagelilor, suprafețele de regresie admit puncte de maxim în domeniul tehnologic, rezultând totodată și valori optime ale vitezei de turnare de 2,1m/min pentru semifabricatul cu diametrul $\Phi 150$ mm și respectiv 1,8m/min la semifabricatul cu diametrul $\Phi 180$ mm.

26. Introducând un alt factor de influență la turnarea continuă: răcirea primară, au fost analizați parametrii care intervin în proces astfel încât turnarea să decurgă fără probleme iar influența variației acestor parametrii să nu aibă efect negativ asupra calității semifabricatelor. Pentru aceasta s-au cercetat condițiile de răcire din cristalizor corelate cu viteza de turnare:

- la blumul cu secțiunea 240x270mm, s-au obținut ca valori optime pentru o viteză medie de turnare de 0,85m/min debite ale apei de răcire pe latura mică a cristalizorului de 960-975 l/min iar pentru latura mare a cristalizorului 1065-1090 l/min, în condițiile unei presiuni de 7,3 bari;
- pentru secțiunile rotunde nu s-a conturat un anumit domeniu optim pentru parametrii studiați, recomandându-se valori astfel adoptate încât să nu fie afectată calitatea semifabricatului (de preferat o viteză medie de 2,1m/min și respectiv 1,8m/min pentru a nu crea condiții favorabile apariției crăpăturilor de suprafață și a fisurilor interne).

27. Variația temperaturii de ieșire a apei din cristalizor s-a încadrat în limitele a 4-5°C pentru blum în timp ce pentru țagle a variat în intervalul 6-8°C. Se poate spune că s-a efectuat o răcire mult mai intensă la țagelile rotunde față de blum, cu consecințe asupra calității.

28. Continuarea solidificării și deci a creșterii grosimii crustei solidificate continuă și în zona de răcire secundară pentru care s-au studiat debitele și presiunea apei pe cele trei subzone. De regulă, pentru această parte, debitele sunt selectate din programele de răcire existente de către calculatorul de proces, în

funcție de modul în care a decurs turnarea până în momentul respectiv. Valorile aproximative pentru debite se pot adopta atât din diagramele realizate în Matlab cât și din diagramele ternare (în funcție de viteza de turnare la un moment dat).

29. Defectele de suprafață sunt cauzate în general de o instalație de turnare continuă necorespunzătoare și de procesul de turnare condus incorect. Dacă totuși pe semifabricatele turnate apar defecte de suprafață (fisuri longitudinale și transversale, fisuri stea, incluziuni de zgură distribuite la suprafață sau suprapuneri), înainte de transportul semifabricatelor în vederea deformării plastice la cald are loc curățarea suprafeței de aceste defecte.

30. În urma deformării plastice la cald a blumului (s-a obținut profil cornier cu aripi egale, profil U și profil SG 18) și a analizei atât a semifabricatului cât și a produsului finit, s-a observat că, urmele de retasuri și fisurile interne s-au sudat în urma procesului de laminare. Totuși, pentru a reduce frecvența de apariție a fisurilor în special, trebuie stabilită o viteză de turnare corespunzătoare și reducerea temperaturii de turnare. Din studiul factorilor tehnologici a rezultat pentru acest profil o viteză optimă de turnare de 0,8-0,9m/min (respectiv o viteză medie de 0,85m/min) și un interval a temperaturilor de turnare de 1545-1560°C. Aplicând aceste valori s-a obținut o reducere a rebuturilor datorate fisurilor cu peste 45% față de cazurile considerate inițial.

31. S-a avut în vedere și corelarea vitezei și a temperaturii de turnare cu parametrii răcirii primare și secundare. În acest scop, pentru valorile recomandate ale debitelor apei din cristalizor de 960-975 l/min pentru latura mică și 1065-1090 l/min pentru latura mare a cristalizorului, în condițiile unei presiuni de 7,3bari și pentru o răcire secundară treptată, crescătoare pe cele trei zone, respectiv 60-65 l/min pentru zona 1, 75-80 l/min pentru zona 2 și 85-90 l/min pentru zona 3 (valori obținute din studiul realizat în capitolul IV) a rezultat o reducere a rebuturilor datorate fisurilor cu încă 18%.

32. Referitor la structura necorespunzătoare a miezului și a segregăției centrale, prin adoptarea valorilor recomandate mai sus, s-a obținut o reducere a acestor defecte cu 25%. Pentru a scădea ponderea acestor defecte este necesară și recomandată dotarea mașinii de turnare continuă cu o instalație de agitare electromagnetică.

33. Incluziunile nemetalice din semifabricat au fost transmise produsului finit sub formă de distribuție uniformă și ușoară, impunând aplicarea unor măsuri tehnologice atât pe partea de elaborare și tratament secundar (îmbunătățirea metodei de dezoxidare a oțelului cu calciu, decantarea avansată a incluziunilor și

eliminarea gazelor din oțel) cât și pe partea de turnare continuă (evitarea pătrunderii compusului de acoperire și a prafului de lubrifiere în oțelul lichid, folosirea opritoarelor în distribuitor și a tuburilor de imersie în cristalizor, asigurarea configurației adecvate a tuburilor de imersie, etc). Folosind o tehnologie corect aplicată și condusă, se obține o reducere a conținutului de incluziuni cu până la 75% față de șarjele studiate.

34. Țagtele, prelucrate la Petrotub S.A Roman sub formă de țevi (pe laminorul de 16'') au fost de asemenea analizate în privința defectelor. Trebuie menționat că pentru produsul finit în acest caz (respectiv țevă), nu se face amprenta Baumann ci doar o analiză microstructurală (la cerere). Controlul constă dintr-o verificare vizuală a defectelor de suprafață și o defectoscopie nedistructivă pe o instalație de control de tip AMALOG (pentru detectarea defectelor interne), evidențiindu-se în special:

- prezența retasurii centrale sau a porozității centrale ajută la perforarea semifabricatului pe laminorul de țevi;
- fisurile aflate în zona centrală, care se oxidează în timpul încălzirii semifabricatelor în cuptoare cu vatră rotativă, provoacă suprapuneri la interiorul țevi;
- fisurile formate foarte aproape de suprafața (zona crustei exterioare) a țagtelor provoacă fisuri și suprapuneri la exteriorul țevi. În plus, are loc propagarea fisurilor (în special a celor longitudinale) rezultând rebutarea țevi.

35. În scopul reducerii proporției de defecte interne (în special a fisurilor), din analiza prelucrărilor de date s-au obținut următoarele valori optime:

- pentru țagla cu $\Phi 150\text{mm}$: viteza de turnare recomandată este de 2,1m/min pentru o temperatură a oțelului în distribuitor de 1540-1550°C (pentru marca considerată). În ceea ce privește răcirea semifabricatelor pentru acest profil s-au obținut pentru apa din cristalizor o presiune de 7bari pentru debite de 944-948 l/min iar pentru răcirea secundară la o presiune de 8,4bari, au rezultat ca optime debitele pentru zona 1 de 49-57 l/min, zona 2 de 65-75 l/min de 50-60 l/min pentru zona 3.
- pentru țagla cu $\Phi 180\text{mm}$: viteza de turnare recomandată este de 1,8m/min în cazul în care intervalul de variație a temperaturii de turnare este de 1530-1540°C iar pentru apa de răcire: din cristalizor de 1100-1120 l/min la o presiune de 7,4bari iar răcirea

secundară de 44-46 l/min pentru zona 1, 56-60 l/min pentru zona 2 și 46-50 l/min pentru zona 3 la o presiune de 8,5bari.

Utilizând valorile indicate pentru parametrii specificați, s-a redus rebutul datorat fisurilor cu 46% pentru secțiunea $\Phi 150\text{mm}$ și cu 53% pentru secțiunea $\Phi 180\text{mm}$.

Principalele **contribuții personale** pot fi sintetizate astfel:

1. Studiul pe baza unui număr mare de lucrări din literatura de specialitate, a proceselor și factorilor care intervin la turnarea continuă a oțelului; în urma studiului monografic a rezultat material bibliografic util studiilor și cercetărilor ulterioare în domeniul amintit.

2. Realizarea unei sinteze referitoare la solidificarea oțelului turnat continuu, a posibilităților de studiu a conului de solidificare și a principalilor parametri de influență.

3. Adaptarea, după literatura de specialitate, a unui model matematic al solidificării corespunzător condițiilor considerate și verificarea practică a rezultatelor obținute (relația 3.17) cu alte relații utilizate în industrie (relații simplificate de tipul relației 2.1).

4. Realizarea programului de simulare TURNCON (a condițiilor de răcire primară și secundară la turnarea continuă pentru un blum cu secțiunea 240x270mm).

5. Modelarea matematică concepută și comparată cu valorile practice confirmă concluzia că programul realizat poate fi utilizat în întreprinderile metalurgice în scopul cunoașterii variației parametrilor tehnologici la turnarea continuă a semifabricatelor din oțeluri nealiate și slab aliate.

6. Studiul variațiilor între diferiți parametri cu influență asupra calității semifabricatelor turnate continuu, pentru un număr de 123 șarje, în programele de software EXCEL, MATLAB, STATISTICA 5.5, realizând dependențe originale cu privire la variația condițiilor de răcire secundară în funcție de viteza de turnare (fig.4.52, 4.53 și respectiv 4.54).

7. Studiul defectelor evidențiate pe semifabricatele turnate continuu și apoi transmise produsului finit. Având în vedere numărul mare de analize efectuate (amprente Baumann și microstructuri pentru aproximativ 20% din cele 123 șarje studiate), este posibilă realizarea unui catalog cu defectele obținute, cauzele care au dus la apariția lor și eventual posibilitățile de remediere.

8. Obținerea unor valori optime pentru parametrii de influență în scopul reducerii frecvenței de apariție a defectelor. Astfel:

- pentru blumul cu secțiunea 240x270mm, au rezultat ca optime valorile: o viteză de turnare de 0,8-0,9m/min, temperaturi de turnare de 1545-1560°C, debite ale apei de răcire pe latura mică a cristalizorului de 960-975 l/min iar pentru latura mare a cristalizorului 1065- 1090 l/min, în condițiile unei presiuni de 7,3bari și o răcire secundară crescătoare pe cele trei zone, respectiv 60-65 l/min pentru zona 1, 75-80 l/min pentru zona 2 și 85- 90 l/min pentru zona 3;
- pentru țagla cu diametrul 150mm, a rezultat ca optimă o viteză optimă de 2,1m/min, pentru o temperatură a oțelului în distribuitor de 1540-1550°C, o răcire primară cu debit de 944-948 l/min, presiune 7bari și o răcire secundară la o presiune de 8,4bari, cu debitele pentru zona 1 de 49-57 l/min, zona 2 de 65-75 l/min și de 50-60 l/min pentru zona 3;
- pentru țagla cu diametrul de 180mm, viteza optimă este de 1,8m/min, în condițiile unei temperaturi de turnare de 1530-1540°C și un regim termic pentru răcirea primară de 1100-1120 l/min la o presiune de 7,4bari respectiv răcire secundară de 44-46 l/min pentru zona 1, 56-60 l/min pentru zona 2 și 46-50 l/min pentru zona 3 la o presiune de 8,5bari.

9. Pe baza recomandărilor rezultate din prezenta cercetare s-a obținut o reducere cu 18-75% a rebuturilor datorate defectelor studiate.

Cunoștințele teoretice și practice dobândite pe parcursul perioadei de elaborare a tezei, au fost valorificate parțial în cursuri de specialitate, articole publicate în reviste de specialitate sau prezentate în cadrul conferințelor de profil și un contract de cercetare de tip ORIZONT, ale căror titluri sunt cuprinse în bibliografie.

Pe baza rezultatelor și a concluziilor obținute, se conturează câteva direcții de cercetare în continuare:

- realizarea unui program de simulare a solidificării și pentru alte tipodimensiuni de profilele, unde variază condițiile de solidificare pe suprafață;
- analiza mai multor mărci de oțeluri pentru același profil turnat continuu, cu evidențierea modificărilor care pot să apară ca parametrii de influență;
- urmărirea mai departe în practică a procesului de turnate continuă, în special pe baza recomandărilor rezultate din prezenta cercetare pentru diferite mărci de oțeluri.

BIBLIOGRAFIE

1. I. Butnariu, V. Geantă, ș.a. – Turnarea continuă a semifabricatelor de oțel, Editura Tehnică, București, 2000.
2. E. Herman – Handbook on continuous casting, aluminium verlag, Düsseldorf, 1980.
3. *** - Continuous casting of steel 1985 – A second Study, International Iron and Steel Institute, Committee on Technology, Brussels, 1986.
4. *** - Casting and solidification of steel, IPC Science and Technology Press Ltd., Guilford, Luxembourg, 1977.
5. *** - Buletin Statistic, Informații Externe, UniRomSider, colecția 2003-2004.
6. *** - Manualul inginerului metalurg, vol.I, Editura Tehnică, București, 1978.
7. Gh. Iorga, A. Iancu, – Studiu în practica de exploatare a procedeului de turnare continuă, în Metalurgia, nr.7, 1999, pag. 26-41.
8. G. Abbel, , W.R.L. Moonen – New developments in continuous casting in Europa, Proceedings of 3^{rds} European Conference in Continuous Casting, Madrid 20-23 oct., 1998.
9. S. Wilmotte – Research driven recent developments in continuous casting, Proceedings of 3^{rds} European Conference in Continuous Casting, Madrid 20-23 oct., 1998.
10. W. Henning, ș.a. – C.P.S. - The status and latest innovation of the thin slab casting technology, Proceedings of 3^{rds} European Conference in Continuous Casting, Madrid 20-23 oct., 1998.
11. J. Schonbeck, ș.a. – Current status of ISP technology, Proceedings of 3^{rds} European Conference in Continuous Casting, Madrid 20-23 oct., 1998.
12. H. Klein, ș.a. – The new combination caster of PROFILARBED-ESCH-BELVAL, Proceedings of 3^{rds} European Conference in Continuous Casting, Madrid 20-23 oct., 1998.
13. M. Schuster - Perfecționări în tehnica turnării continue cu implicații privind calitatea semifabricatelor, reducerea consumului de metal și creșterea productivității instalațiilor, în Gazeta Tehnico-Științifică, I.C.E.M., nr. 3/1980, pag.16.
14. B.G. Thomas, ș.a. – Heat flow model of the continuous slab casting mould, interface and shall, în Metallurgical Transactions, 1993, suport electronic.

15. *** - Documentația tehnică a firmei Mannesmann, 1998.
16. *** - Stadiul tehnologic actual și tendințe de viitor în turnarea continuă, în Sinteze - Documentare, 1973.
17. *** - Turnarea continuă. Limitele calitative ale extinderii procedurii, Studiu de sinteză, Oficiul de Documentare și Publicații Tehnice al Industriei Metalurgice, 1972.
18. I.I. Granat - Principalii factori determinanți ai tehnologiei de turnare continuă a oțelului cu alunecarea crustei, în Turnarea continuă a oțelului, Traduceri din literatura sovietică de specialitate și articole românești, Seria Tehnică, nr. 61-62, 1958.
19. B. Varga, I. Varga – Studiu asupra formei conului de solidificare la turnarea continuă, în Metalurgia, nr. 4/1982, pag.195.
20. V. Bratu – Cercetări experimentale privind optimizarea turnării continue a oțelului, în Metalurgia, nr.12/2003, pag.18-23.
21. V. Bratu – Cercetări experimentale privind simularea turnării continue a oțelului, în Metalurgia, nr. 10/2003, pag.5-11.
22. E. Ardelean, T. Hepuț, M. Ardelean – Turnarea continuă a oțelului, Editura Politehnica Timișoara, 2001.
- 23.*** - Prospect, Concast AG, Zurich, 2001.
24. A. Luca – Considerații teoretice asupra prafurilor pentru turnarea continuă a oțelurilor, în Metalurgia, nr.5/1979, pag.225.
25. T. Hepuț, Șt. Maksay, E. Ardelean, ș.a. - Researches on the quality of lubricating powders used in steel continuous casting, în Meridian Ingineresc, nr.2/2001, pag.43-48.
26. T. Hepuț, D. Petre, E. Ardelean, ș.a. - Researches on the viscosity of synthetic slags used in steel continuous casting, în Metalurgia Internațional, nr.2/2003, 6-10.
27. M. Guțu, O. Takacs – Turnarea continuă și semicontinuă a materialelor metalice, Editura Tehnică, București, 1977.
28. V.S. Rutes, D.P. Evteev – Cercetarea procesului de turnare continuă a oțelului, în Turnarea continuă a oțelului, Traduceri din literatura sovietică de specialitate și articole românești, Seria Tehnică, nr. 61-62, 1958.
29. J.K. Park, ș.a. – Analysis of thermal and mechanical behavior of cooper mould during the slab casting, 83rd Steelmaking Conference Proceedings, Pittsburg, march 26-29, 2000, pag.9-21.

30. B.G. Thomas – Continuous casting, în *The Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier Science Ltd, vol.2, Oxford, U.K., 2001, pag.1595-1599.
31. Al. Ivănescu, I. Albu - Model matematic al distribuției temperaturilor la produsele calde obținute prin turnare continuă, în *Metalurgia*, nr.9/1983, pag.422.
32. E. Ardelean, I. Ilca, T. Hepuț - Cercetări privind procesul de solidificare a oțelului turnat continuu, Conferința Națională de Metalurgie și Știința Materialelor, 20-21 sept., București, 2001, pag.186-192.
33. T. Hepuț, E. Ardelean, E. Popa, M. Ardelean - Research and experiments regarding the quality of continuous casting steel, Scientific Conference research and Development of Machine Elements and Systems Sarajevo- Iahorina IREMES, 2002, pag.349-354.
34. V.A. Efimov - Turnarea și cristalizarea oțelurilor, Editura Tehnică, București, 1986.
35. L. Sofroni, V. Brabie, C. Bratu - Bazele teoretice ale turnării, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980.
36. I. Tripșa, M. Sălcuceanu, M. Costescu – Optimizarea proceselor de turnare și solidificare a oțelului, Editura Tehnică, București, 1975.
37. M. Hyman – BORLAND C++ pentru toți, Editura Teora, București, 1996.
38. B.G.Thomas, ș.a. – Validation of fluid flow and solidification simulation of a continuous thin-slab caster, M.C.W.A.SP IX, Shakes Verlag, GmbH, Aachen, Germany, 2000, pag.769-776.
39. B.G.Thomas – The importance of computational models for further improvements of the continuous casting proces, Voest Alpine Conference on Continuous Casting, Linz, 5-7 June, Austria, 2000, suport electronic.
40. C. Li, ș.a. – Thermo-mechanical finite element model of shell behaviour in the continuous casting of steel, Sixth Asia-Pacific Symposium on Engineering Plasticity and its Applications, 2-6 decembrie, Sydney, Australia, 2002, pag.827-834.
41. *** - Documentație firma Danieli, 2001.
42. F. Sabin, T. Hepuț - Tehnologia elaborării oțelului, vol. I, II, III, curs litografiat, Timișoara, 1987.
43. Ghe. Nica, A. Socalici, E. Ardelean, T. Hepuț - Tehnologii pentru îmbunătățirea calității oțelului, Editura Mirton, Timișoara, 2003.

44. *** - Culegere de standarde pentru uz intern, SC Siderurgica SA Hunedoara, 1997.
45. T. Hepuț, E. Ardelean - Researches regarding the influence of the refining process the purity of the steel, Buletinul Științific al U.P Timișoara, tom 42(56), fascicola 2, 1997, pag..218-223.
46. T. Hepuț, E. Karşai –Cercetări privind tratarea oțelului cu zguri sintetice, în Buletinul UTT, tom 39(53), fascicola 1, 1994, pag.159-166.
47. E. Ardelean – Cercetări privind influența temperaturii de turnare asupra scoaterii de oțel, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, tom.I, fascicola I, Hunedoara, 1999, pag.119-124.
48. E. Ardelean, M. Ardelean – Cercetări privind influența timpului de turnare asupra scoaterii de oțel la turnarea continuă, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, tom.II, fascicola I, 2000, pag.214-217.
49. T. Hepuț, M. Moldovan, N. Oargă, E. Ardelean - Cercetări privind interdependența dintre parametrii tehnologici la turnarea continuă a oțelului Conferința Națională de Metalurgie și Știința Materialelor, 20-21 septembrie București, 2001, pag.194-199.
50. T. Hepuț, E. Ardelean, A. Bleoca, M. Ardelean – Researches on the factors that influence the metal output in continuous casting, Buletinul Științific al U.P Timișoara, tom 46(60), fascicola 2, 2001, pag.141-146.
51. I. Ilca, E. Ardelean – The influence of the solidifying speed in continuous casting upon the quality of the semiproducts, Buletinul Științific al U.P Timișoara, tom 46(60), fascicola 2, 2001, pag.153-158.
52. M. Ghinea, V. Firețeanu – MATLAB; calcul numeric, grafică, aplicații, Editura Teora, București, 1998.
53. E. Ardelean, M. Ardelean, A. Socalici – The influence of the technological parameters on the primary cooling at the continuous casting, V-th International Symposium of Interdisciplinary Regional Research, Hunedoara, 2003, suport electronic.
54. T. Hepuț, E. Ardelean, A. Socalici, E. Popa - Experimentări și rezultate cu privire la lubrifierea la interfața cristalizor – semifabricatelor turnate continuu, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, tom. III, fascicola 1, Hunedoara, 2001, pag.102-105.
55. D. Petre, T. Hepuț, A. Bleoca, E. Ardelean, A. Socalici - Possibilites of Using Steel Works Powder in Siderurgy, Buletinul Științific al U.P Timșoara, tom 42(56), fascicola 2, 1997, pag.234-241.

56. T. Hepuț, E. Ardelean, A. Socalici, I. Kiss, S. Rațiu, M. Ardelean - Lubricating Powders Obtained out of Industrial Wastes on Steel Continuous Casting, Buletinul Științific al U.P.T., tom 46(60), fascicola 2, 2001, pag.109-112.
57. T. Hepuț, A. Socalici, E. Ardelean, E. Zudor – Cercetări privind utilizarea deșeurilor industriale pentru producerea prafurilor de turnare continuă a oțelului, Simpozionul Internațional Universitaria ROPET, 18-20octombrie, Petroșani, 2001, pag.157-162.
58. *** - Asimilarea în fabricație a prafurilor de turnare, folosite la turnarea continuă a oțelului, contract nr. 1455 din 01.08.2000/2001, Program CD ORIZONT 2000.
59. M. Ardelean, E. Ardelean - The influence of the technological parameters on the secondary cooling at the continuous casting, V-th International Symposium of Interdisciplinary Regional Research, Hunedoara, 2003, suport electronic.
60. E. Ardelean, M. Ardelean, T. Hepuț - Cercetări privind solidificarea oțelului în zona de răcire secundară la turnarea continuă, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, fascicola1, 2000, pag.210-215.
61. M. Țarcă – Tratat de statistică aplicată, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1998.
62. T. Baron, ș.a. – Statistică, Editura Economică, București, 1996.
63. I. Ilca, T. Hepuț, E. Karșai, N. Oargă -Researches on the metal consumption, with continuons casting, Buletinul Științific al U.P Timișoara, tom 42(56), 1997, pag.149-154.
64. T. Hepuț, E. Ardelean, A. Socalici, Ghe. Nica, Șt. Maksay – Turnarea și solidificarea oțelului sub formă de lingouri, Editura Destin, Deva, 2000.
65. T. Hepuț, A. Socalici, Ghe. Nica, E. Ardelean – Defectele lingourilor din oțel, Editura Politehnica Timișoara, 2001.
66. I. Ilca, I. Drăgan, S. Badea, E. Cazimirovici - Tehnologia deformării plastice, Editura Didactica și Pedagogică, București, 1979.
67. I. Ilca, S. Samoilescu - Tehnologia deformărilor plastice, vol. I, II, curs litografiat, Institutul de Subingineri Hunedoara, 1975.
68. I. Ilca, E. Ardelean, T. Hepuț - Cercetări cu privire la factori de influență la deformarea semifabricatelor turnate continuu, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, tom I, fascicola 1, 1999, pag.79-84.
69. I. Mitelea, ș.a. – Știința materialelor în construcția de mașini, Editura Sudura, Timișoara, 1999.

70. N. Oargă, T. Hepuț, E. Ardelean, E. Popa - Studiu privind defectele de suprafață a semifabricatelor turnate continuu, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, fascicola 1, 2001, pag.159-166.
71. S. Sivaramakrishnan, B.G. Thomas – Transient flow structures in continuous casting of steel, 83rd Steelmaking Conference Proceedings, 26-29 March, Pittsburgh, 2000, pag.541-557.
72. G. Li, B.G. Thomas – Maximum casting speed for continuous cast steel billets based on sub-mold bulging computation, 85th Steelmaking Conference Proceedings, ISS, Warrendale, 10-13 March, Nashville, 2002, pag.109-130.
73. N. Oargă, T. Hepuț, E. Ardelean, E. Popa - Studiu privind defectele interne a semifabricatelor turnate continuu, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, fascicola 1, 2001, pag.165-172.
74. Y.M. Won, B.G. Thomas – Simple model of microsegregation during solidification of steels, in *Metallurgical and Materials Transactions*, vol.32A, July, 2001, pag.1755-1767.
75. V. Budău, ș.a. – *Studiul materialelor*, Editura Mirton, Timișoara, 1998.
76. I. Ilca, ș.a. – *Metalografie și proprietățile metalelor*, Litografia Timișoara, 1988.
77. M. Manfred, M. Wolf – Near net shape casting in minimills, *Iron & Steel International*, 1996, pag.44.
78. *** - “Controlul procesului prin utilizarea unui cristalizor pentru turnarea continuă a bramelor, dotat cu aparatura de măsurare”, *Stahl und Eisen*, Germania, nr.2/ 1996, pag.103.
79. G. Lessel, H. Grober – Near net shape casting for production of wide flange beams, in *Iron & Steel International*, 1995, pag.42.
80. B.G. Thomas, R.O’Malley, D. Stone – Measurement of temperature, solidification and microstructure in a continuous cast thin slab, suport electronic.
81. C. Stanciu, ș.a. – Corelarea parametrilor tehnologici de răcire secundară a semifabricatelor turnate continuu pe baza măsurării temperaturii suprafeței, *Metalurgia*, nr.4/2000, pag.74-79.
82. K. Harste, ș.a. – Modele termice și mecanice ale turnării continue, în *Stahl und Eisen*, Germania, nr.4/1995, pag.111.
83. *** - Procedee de îmbunătățire a calității structurii interne a semifabricatului, prin acțiunea asupra cristalizării acestuia la turnarea continuă, *Sinteză Informstal*, nr.6, 1990.

84. H. Preißl, ș.a. – Optimizarea procesului pentru realizarea unei fiabilități maxime în turnarea continuă, în MPT International, Germania, nr.5, 1994, pag.53.
85. B.G.Thomas – Modeling of the continuous casting of steel – past, present and future, 59th Electric Furnace Conference, Phoenix, AZ, 2001, pag.3-30.

ANEXE

Anexa III

```

#include "MetalDataFile.h"
#include "HeatFlowCalculator.h"

class HeatFlowCalculator {
    friend class MetalDataFile;
    friend class CProgressDialog;
private:
    MetalDataFile *mdf;
    HeatFlowCalculator *prev;
    double time;
    double tmin, tmed, tmax;
    double tcrymin, tcrymed, tcrymax;
    DoubleArray daf, dat, dah;
    BOOL stripped;
private:
    HeatFlowCalculator *spawn();
    void init();
    void initCry();
    void finalize();
private:
    double calculateWir();
    double calculateCry();
    void normWir(double dtime);
    void normCry(double dtime);
    double calculateMldCorner();
    double calculateMldBottom();
    double calculateMldRight();
    void calculateCryFull();
public:
    HeatFlowCalculator(HeatFlowCalculator&
    hfc);
    HeatFlowCalculator(MetalDataFile
    *mdf,
    HeatFlowCalculator *prev, BOOL
    calcStrip = TRUE);
    static double transfer(double t1,
    double t2);
    static double flowWir(double t);
    static double flowCry(double t);
    void writeToFile();
    void calculate();
};

HeatFlowCalculator::HeatFlowCalculator(
    MetalDataFile *mdf,
    HeatFlowCalculator *prev, BOOL
    calcStrip) {
    HeatFlowCalculator::mdf = mdf;
    HeatFlowCalculator::prev = prev;
    int n = mdf->nwir + mdf->ncry;
    int m = mdf->mwir + mdf->mcry;

```

```

    dat.alloc(n, m);
    daf.alloc(n, m);
    dah.alloc(n, m);
    if (calcStrip) {
        stripped = mdf->calcFogged &&
        (prev != NULL);
        if (!stripped)
            mdf->calcFogged = stripped =
            mdf->shouldFog(prev);
        } else stripped = FALSE;
    }
    HeatFlowCalculator
    *HeatFlowCalculator::spawn() {
        HeatFlowCalculator *hfc = new
        HeatFlowCalculator(mdf, this, FALSE);
        hfc->stripped = stripped;
        int i, n = mdf->nwir + mdf->ncry;
        int j, m = mdf->mwir + mdf->mcry;
        for (i = 0; i < n; i++) for (j = 0; j
        < m; j++) {
            hfc->dat.copy(dat.getBuffer());
            hfc->daf.copy(daf.getBuffer());
            hfc->dah.copy(dah.getBuffer());
        }
        return hfc;
    }
    void HeatFlowCalculator::writeToFile() {
        mdf->data.writeDouble(time);
        mdf->data.writeDouble(tmin);
        mdf->data.writeDouble(tmed);
        mdf->data.writeDouble(tmax);
        mdf->data.writeDouble(tcrymin);
        mdf->data.writeDouble(tcrymed);
        mdf->data.writeDouble(tcrymax);
        dat.writeToFileAsFloatArray(&mdf-
        >data);
    }
    double
    HeatFlowCalculator::transfer(double t1,
    double t2) {
        int sign = (t1 - t2 < 0) ? -1 : 1;
        return sign*15*pow(fabs(t1 - t2),
        1.5);
    }
    double
    HeatFlowCalculator::flowWir(double t) {
        return ipwr(t, 4);
    }
    double
    HeatFlowCalculator::flowCry(double t) {
        return flowWir(t);
    }
    double
    HeatFlowCalculator::calculateWir() {
        int i, j;
        double max_dhdt = 0, t;
        double ddfix, ddfiy;
        double pfix1, pfix2, pfiy1, pfiy2;
        double W, tamb = 0;
        int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf-
        >mwir;
        double x = mdf->wirX / (1*nwir), y =
        mdf->wirY / (1*mwir);
        Material *mats = &mdf->matSteel;
        Material *matc = &mdf->matCopper;

        DoubleVector wx, wy;

```

```

wx.alloc(nwir); wy.alloc(mwir);
for (i = 0; i < nwir; i++) {
    wx[i] = flowWir(prev->dat(i, mwir
- i));
}
for (j = 0; j < mwir; j++) {
    wy[j] = flowWir(prev->dat(nwir -
i, j));
}
W = wx.sum() / nwir + wy.sum() /
mwir;
wx.multiply(mdf->wirHeatFlow() / W);
wy.multiply(mdf->wirHeatFlow() / W);

for (i = 0; i < nwir; i++) {
    for (j = 0; j < mwir; j++) {
        if (i == 0) {
            pfix1 = pfix2 = prev->daf(-,
j);
        } else if (i < nwir - 1) {
            pfix1 = prev->daf(i+1, j);
            pfix2 = prev->daf(i-1, j);
        } else {
            t = prev->dat(i, j);
            if (stripped) {
                W = wx[i];
                pfix1 = - W * (2*x /
mats->lambda_0());
                pfix2 = 2*prev->daf(i-1,
j);
            } else {
                W = transfer(t, prev-
>dat(i+1, j));
                pfix1 = - W * (2*x /
mats->lambda_0());
                pfix2 = 2*prev->daf(i-1,
j);
            }
        }
        if (j == 0) {
            pfiy1 = pfiy2 = prev->daf(i,
1);
        } else if (j < mwir - 1) {
            pfiy1 = prev->daf(i, j+1);
            pfiy2 = prev->daf(i, j-1);
        } else {
            t = prev->dat(i, j);
            if (stripped) {
                W = wy[j];
                pfiy1 = - W * (2*y /
mats->lambda_0());
                pfiy2 = 2*prev->daf(i, j-
1);
            } else {
                W = transfer(t, prev-
>dat(i, j+1));
                pfiy1 = - W * (2*y /
mats->lambda_0());
                pfiy2 = 2*prev->daf(i, j-
1);
            }
        }
        ddfix = (1/(x*x)) * (pfix1 +
pfix2 - 2*prev->daf(i, j));
        ddfiy = (1/(y*y)) * (pfiy1 +
pfiy2 - 2*prev->daf(i, j));
        daf(i, j) = t = (mats-
>lambda_0()/mats->ro())*(ddfix + ddfiy);

```

```

t = fabs(t); if (max_dhdt < t)
max_dhdt = t;
}
return max_dhdt;
}

double
HeatFlowCalculator::calculateCry() {
    int i, j;
    double max_dhdt = 0, t;
    double ddfix, ddfiy, x, y;
    double pfix1, pfix2, pfiy1, pfiy2;
    double W = mdf->cryHeatFlow(), tamb =
;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf-
>mwir;
    int ncry = mdf->ncry, mcry = mdf-
>mcry;
    int nfull = nwir + ncry, mfull = mwir
+ mcry;
    int jini;
    Material *mats = &mdf->matSteel;
    Material *matc = &mdf->matCopper;
    if (stripped) {
        for (i = 0; i < nfull; i++) {
            jini = (i < nwir) ? mwir : 0;
            for (j = jini; j < mfull; j++)
            {
                dat(i, j) = tamb; daf(i, j)
= dah(i, j) = 0;
            }
        }
        return 0;
    }
    DoubleVector wx, wy;
    wx.alloc(nfull); wy.alloc(mfull);
    for (i = 0; i < nfull; i++) {
        wx[i] = flowCry(prev->dat(i, mwir
- i));
    }
    for (j = 0; j < mfull; j++) {
        wy[j] = flowCry(prev->dat(nwir -
1, j));
    }
    W = wx.sum() / nfull + wy.sum() /
mfull;
    wx.multiply(mdf->cryHeatFlow() / W);
    wy.multiply(mdf->cryHeatFlow() / W);
    for (i = 0; i < nfull; i++) {
        jini = (i < nwir) ? mwir : 0;
        x = (i < nwir) ? (mdf->wirX /
(2*nwir)) : (mdf->cryThick / ncry);
        for (j = jini; j < mfull; j++) {
            y = (j < mwir) ? (mdf->wirY /
(2*mwir)) : (mdf->cryThick / mcry);
            if (i == 0) {
                pfix1 = pfix2 = prev->daf(i,
j);
            } else if (i < nwir) {
                pfix1 = prev->daf(i+1, j);
                pfix2 = prev->daf(i-1, j);
            } else if (i == nwir) {
                W = transfer(prev->dat(i-1,
j), prev->dat(i, j));
                pfix1 = 2*prev->daf(i+1, j);
                pfix2 = W * (2*x / matc-
>lambda_0());

```

```

    } else if (i < nwir + ncry - 1)
    {
        pfix1 = prev->daf(i+1, j);
        pfix2 = prev->daf(i-1, j);
    } else {
        W = wx[i];
        pfix1 = - W * (1*x / matc-
>lambda_0());
        pfix2 = 1*prev->daf(i-1, j);
    }
    if (j == 0) {
        pfiy1 = pfiy2 = prev->daf(i,
i);
    } else if (j < mwir) {
        pfiy1 = prev->daf(i, j+1);
        pfiy2 = prev->daf(i, j-1);
    } else if (j == mwir) {
        W = transfer(prev->dat(i, j-
i), prev->dat(i, j));
        pfiy1 = 1*prev->daf(i, j+1);
        pfiy2 = W * (1*y / matc-
>lambda_0());
    } else if (j < mwir + mcry - 1)
    {
        pfiy1 = prev->daf(i, j+1);
        pfiy2 = prev->daf(i, j-1);
    } else {
        W = wy[j];
        pfiy1 = - W * (1*y / matc-
>lambda_0());
        pfiy2 = 1*prev->daf(i, j-1);
    }
    ddfix = (1/(x*x)) * (pfix1 +
pfix2 - 1*prev->daf(i, j));
    ddfiy = (1/(y*y)) * (pfiy1 +
pfiy2 - 1*prev->daf(i, j));
    daf(i, j) = t = (matc-
>lambda_0()/matc->ro())*(ddfix + ddfiy);
    t = fabs(t);
    if (max_dhdt < t) max_dhdt = t;
}
}
return max_dhdt;
}
void HeatFlowCalculator::normCry(double
dtime) {
    int i, j; double t;
    int npoints = 0; tcrymed = 0;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf-
>mwir;
    int ncry = mdf->ncry, mcry = mdf-
>mcry;
    Material *matc = &mdf->matCopper;
    bool first = true;
    for (i = 0; i < daf.nsize(); i++) {
        for (j = mwir; j < daf.msize();
j++) {
            dah(i, j) = t = dtime*daf(i, j)
+ prev->dah(i, j);
            dat(i, j) = t = matc->t_h(t);
            ASSERT(t >= -10);
            daf(i, j) = matc->fi_t(t);
            if (first) {
                first = false;
                tcrymin = tcrymax = t;
            }
            if (tcrymin > t) tcrymin = t;
            if (tcrymax < t) tcrymax = t;
            tcrymed += t; npoints++;
        }
    }
    tcrymed /= npoints;
}
void HeatFlowCalculator::normWir(double
dtime) {
    int i, nwir = mdf->nwir;
    int j, mwir = mdf->mwir;
    double t;
    Material *mats = &mdf->matSteel;
    for (i = 0; i < nwir; i++) for (j =
0; j < mwir; j++) {
        dah(i, j) = t = dtime*daf(i, j) +
prev->dah(i, j);
        dat(i, j) = t = mats->t_h(t);
        daf(i, j) = mats->fi_t(t);
    }
}
void HeatFlowCalculator::init() {
    int i, j;
    double max_dhdt = 0, t = mdf->tini;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf-
>mwir;
    int ncry = mdf->ncry, mcry = mdf-
>mcry;
    Material *m = &mdf->matSteel;
    for (i = 0; i < nwir; i++) {
        for (j = 0; j < mwir; j++) {
            dat(i, j) = t; daf(i, j) = m-
>fi_t(t); dah(i, j) = m->h_t(t);
        }
    }
    initCry();
    tmin = tmax = tmed = mdf->tini;
    time = 0;
}
void HeatFlowCalculator::initCry() {
    int i, j;
    double t;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf-
>mwir;
    int ncry = mdf->ncry, mcry = mdf-
>mcry;
    Material *m = &mdf->matCopper;
    if (stripped || mdf->fogImmediate) t
= mdf->tcryini;
    else t = mdf->tini / 3;
    for (i = 0; i < daf.nsize(); i++) {
        for (j = mwir; j < daf.msize();
j++) {
            dat(i, j) = t; daf(i, j) = m-
>fi_t(t); dah(i, j) = m->h_t(t);
        }
    }
}

```

```

    for (i = nwir; i < daf.nsize(); i++)
    {
        for (j = 0; j < mwir; j++) {
            dat(i, j) = t; daf(i, j) = m-
>fi_t(t); dah(i, j) = m->h_t(t);
        }
        tcrymin = tcrymed = tcrymax = mdf-
>tcryini;
    }
    void
HeatFlowCalculator::calculateCryFull() {
    if (mdf->fogImmediate) return;
    double dt, max_dhdt;
    HeatFlowCalculator *hfc = spawn();
#ifdef LOGFILE
    FILE *logfile;
#endif
    while (true) {
        if (calcul_signal_stop) break;
        max_dhdt = hfc->calculateCry();
        dt = 1 / max_dhdt;
        hfc->normCry(dt);
#ifdef LOGFILE
        logfile = fopen(LOGFILE, "a+t");
        if (logfile) {
            fprintf(logfile,
"lg\t%lg\t%lg\t%lg\n",
            hfc->tcrymin, hfc->tcrymax,
            hfc->tcrymed, max_dhdt);
            fclose(logfile);
        }
#endif
        if (hfc->prev != this) delete hfc-
>prev;
        hfc = hfc->spawn();
    }
    int i, j, jini;
    for (i = 0; i < daf.nsize(); i++) {
        jini = (i < mdf->nwir) ? mdf->mwir
: 0;
        for (j = jini; j < daf.msize();
j++) {
            dah(i, j) = hfc->dah(i, j);
            dat(i, j) = hfc->dat(i, j);
            daf(i, j) = hfc->daf(i, j);
        }
    }
    delete hfc;
}
void HeatFlowCalculator::calculate() {
    double max_dhdt = 0, dt;
    if (!prev) {
        init();
        calculateCryFull();
        finalize();
        return;
    }
    max_dhdt = calculateWir();
    dt = mdf->max_dh / max_dhdt;
    time = prev->time + dt;
    normWir(dt);
    if (!isire cristalizor) {
        calculateCry();
        normCry(dt);
        calculateCryFull();
    } else initCry();
    finalize();
}
void HeatFlowCalculator::finalize() {
    int i, j, npml; double t;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf-
>mwir;
    int ncry = mdf->ncry, mcry = mdf-
>mcry;
    tmed = 0; tmin = tmax = dat(0, 0);
    npml = 0; tcrymin = tcrymax =
dat(nwir, 0); tcrymed = 0;
    for (i = 0; i < daf.nsize(); i++) for
(j = 0; j < daf.msize(); j++) {
        t = dat(i, j);
        if (mdf->inWire(i, j)) {
            tmed += t;
            if (tmin > t) tmin = t;
            if (tmax < t) tmax = t;
        } else {
            npml++; tcrymed += t;
            if (tcrymin > t) tcrymin = t;
            if (tcrymax < t) tcrymax = t;
        }
    }
    tcrymed /= npml;
    tmed /= nwir * mwir;
}
#ifdef __MATERIAL__
#define MATERIAL_H
#define MATERIAL_VERSION 1
#define MATERIAL_COPYRIGHT "2014"

class Material {
    int type;
    double a, b, c, tpr;

    double lpr, tpr2, tpr3, fipr;
    FloatBuffer ht, hh;
    double _ro;
    double tsol, tlich;

    void precalc();
public:
    Material();
    Material(Material& mat);
    void clone(Material *mat);
    void defaults(int type =
MATERIAL_OL37-2k);
    void writeToFile(DataFile* df);
    void readFromFile(DataFile* df);

    double ro() {return _ro;}
}

```

```

double lambda_0() {return c;}
double solidus() {return tsol;}
double lichidus() {return tlich;}
double lambda_t(double t);
double fi_t(double t);
double t_fi(double fi);
double h_t(double t);
double t_h(double h);
};

*enum MATERIAL_H
    MATERIAL_COPPER;
    MATERIAL_OL37-2k;

#include "stdmain.h"
#include "headers.h"

Material::Material() {
    defaults();
}
Material::Material(Material& mat) {
    mat.clone(this);
}
void Material::clone(Material *mat) {
    mat->_ro = _ro;
    mat->a = a; mat->b = b; mat->c = c;
    mat->tpr = tpr;
    mat->tsol = tsol; mat->tlich = tlich;
    mat->ht.fromFloatBuffer(ht);
    mat->hh.fromFloatBuffer(hh);
    mat->precalc();
}
void Material::defaults(int type) {
    Material::type = type;
    switch (type) {
        case MATERIAL_COPPER:
            a = b = 0;
            c = 393.86;
            tpr = 3899;
            ht.fromString("0 100");
            hh.fromString("0 38550");
            _ro = 3960;
            tsol = tlich = 0;
            break;
        case MATERIAL_OL37-2k:
            // coef. pentru calculul temperaturii
            // de solidificare a lichidului
            // la temperatura de solidificare
            // a materialului
            // tpr = temperatura de solidificare
            // a materialului
            // constanta
            // pentru calculul temperaturii
            // de solidificare a lichidului
            // la temperatura de solidificare
            // a materialului
            a = -3.3253477562769E-05;
            b = -8.5239455272352E-03;
            c = 9.09236185768560E+01;
            tpr = 733;
            // solidus & lichidus
            tsol = 1440; tlich = 1500;
            // variabile pentru calculul
            // diverse temperaturi
            ht.fromString(
                "100 200 300 400 500 600 "
                "700 800 900 1000 1100 1200 "
                "1300 1440 1500 1600");
            hh.fromString(
                "11.2 22.6 36.2 49.9 64.3 82.0

```

```

"11.2 22.6 36.2 49.9 64.3 82.0
19.1
"
);
hh.multiply(J_KCAL);
_ro = 0;
break;
}
precalc();
}
void Material::precalc() {
    tpr2 = tpr*tpr; tpr3 = tpr2*tpr;
    lpr = a*tpr2 + b*tpr + c;
    fipr = tpr + (tpr2/c)*(tpr*a/3 +
b/2);
}
void Material::writeToFile(DataFile *df)
{
    df->writeInt(type);
    df->writeDouble(a);
    df->writeDouble(b);
    df->writeDouble(c);
    df->writeDouble(tpr);
    df->writeDouble(_ro);
    df->writeDouble(tsol);
    df->writeDouble(tlich);
    ht.writeToFile(df);
    hh.writeToFile(df);
}
void Material::readFromFile(DataFile
*df) {
    type = df->readInt();
    a = df->readDouble();
    b = df->readDouble();
    c = df->readDouble();
    tpr = df->readDouble();
    _ro = df->readDouble();
    tsol = df->readDouble();
    tlich = df->readDouble();
    ht.readFromFile(df);
    hh.readFromFile(df);
}
double Material::lambda_t(double t) {
    if (type && (t < tpr)) return a*t*t +
b*t + c;
    else return lpr;
}
double Material::fi_t(double t) {
    if (t < tpr) return t +
(t*t/c)*(t*a/3 + b/2);
    return fipr + (t - tpr)*lpr/c;
}
double Material::t_fi(double fi) {
    if (fi >= fipr) return tpr +
(c/lpr)*(fi - fipr);
    double fit, dfidt, t;
    t = tpr*fi/fipr;
    while (true) {
        fit = t + (t*t/c)*(t*a/3 + b/2);
        if (fabs(fi - fit) < 1e-6) return
t;
        dfidt = (t/c)*(a*t + b) + 1;
        t += (fi - fit)/dfidt;
    }
}

```

```

}
double Material::h_t(double t) {
    int n = ht.binarySearch(t);
    float t1 = ht[n], t2 = ht[n+1];
    return ((t-t1)*hh[n+1] + (t2-
t)*hh[n])/(t2-t1);
}
double Material::t_h(double h) {
    int n = hh.binarySearch(h);
    float h1 = hh[n], h2 = hh[n+1];
    return ((h-h1)*ht[n+1] + (h2-
h)*ht[n])/(h2-h1);
}

...

#ifdef __METAL_DATA_FILE__
#define METAL_DATA_FILE_H
#include "HeatFlowCalculator.h"
#include "SequenceInterpolator.h"

typedef BOOL (*ProgressCallback)(LPVOID,
HeatFlowCalculator*);

class MetalDataFile {
    friend class HeatFlowCalculator;
    friend class SequenceInterpolator;
    friend class CProgressDialog;
    friend class CMetalDialog;

public:
    LPCTSTR fileSignature;
    int headerSize, seqSize;
    int nwire, mwir;
    int ncry, mcry;
    double tini;
    double tcryini;
    double wirX, wirY;
    double cryThick;
    double flowSpeed;
    double cryLength;
    double fogLength;
    double cryPt, fogPt;
    BOOL fogImmediate;
    double max_dh;
    Material matSteel, matCopper;
    double max_time;

    int steps;
    int fogSequence;

private:
    DataFile data;

    LPVOID progress_callback_param;
    ProgressCallback progressCallback;
    int iterations;
    BOOL calcFogged;
    FloatBuffer timeBuffer;
    float currentTime;
    int currentTimeStep;
    SequenceInterpolator *seqInt1,
*seqInt2;
    BOOL candraw, fileIsTemp;

private:
    BOOL shouldFog(HeatFlowCalculator
*hfc);
    BOOL inWire(int i, int j);
    BOOL inCrystallizer(int i, int j);
    BOOL inWireInterior(int i, int j);
    void seekSequence(int nseq);
    void seekTime(float time);
    void clearInterpolators();
    int calculateSeqSize();

public:
    MetalDataFile();
    ~MetalDataFile();

public:
    void close();
    void assign(LPCTSTR filename);
    void open();
    BOOL isOpen() {return data.isOpen();}
    CString getFileName() {return
data.getName();}
    static void defaults(MetalDataFile
*target);
    BOOL writeHeader(DataFile *df =
NULL);
    BOOL readHeader(DataFile *df = NULL);
    BOOL isTemp() {return fileIsTemp;}
    BOOL copy(LPCTSTR name);
    void setProgressCallback(
    ProgressCallback pc = NULL, LPVOID
param = NULL);
    void calculate();
    BOOL canDraw() {return candraw;}
    float getFogTime();
    float getValue(float x, float y,
float time);
    float getValueWire(float x, float y,
float time);
    float getValueCrystallizerAxis(float
z, float y, float time);
    float findTemperatureD(float th,
float time);
    float findTemperatureX(float th,
float time);
    float findTemperatureY(float th,
float time);
    float findSolidusD(float time);
    float findSolidusX(float time);
    float findSolidusY(float time);

```



```

    double cryHeatFlow() {
        return cryPt / (2*cryLength*(wirX
+ wirY + 2*cryThick));
    }
    double wirHeatFlow() {
        if (max_time * flowSpeed >
cryLength)
            return fogPt /
(2*fogLength*(wirX + wirY));
        else
            return cryPt /
(2*cryLength*(wirX + wirY +
2*cryThick));
    }
};

MetalDataFile *getMDF();

#DEFINE METAL_DATA_FILE_H

#define METAL_DATA_FILE_H

#include "std.h"
#include "headers.h"
MetalDataFile metalDataFile;
MetalDataFile *getMDF() {return
&metalDataFile;}
MetalDataFile::MetalDataFile() {
    fileSignature= "MetalDataFile";
    defaults(this);
    calcFogged = FALSE;
    progressCallback = NULL;
    seqInt1 = seqInt2 = NULL;
    candraw = fileIsTemp = FALSE;
    fogSequence = -1;
}
MetalDataFile::~MetalDataFile() {
    close();
    if (fileIsTemp) data.remove();
}
void
MetalDataFile::defaults(MetalDataFile
*target) {
    target->nwir = target->mwir = 0;
    target->ncry = target->mcry = 0;
    target->tini = 1000;
    target->tcryini = 0;
    target->wirX = 0.070;
    target->wirY = 0.040;
    target->cryThick = 0.05;
    target->flowSpeed = 0.8 / 50;
    target->cryLength = 0.5;
    target->fogLength = 2;
    target->cryPt = 1000000;
    target->fogPt = 2050000;
    target-
>matSteel.defaults(MATERIAL_OL37-2k);
    target-
>matCopper.defaults(MATERIAL_COPPER);
    target->fogImmediate = FALSE;
    target->max_dh = 100;
    target->max_time = target->steps = 0;
}
void MetalDataFile::close() {
    if (data.canWrite()) writeHeader();
    candraw = FALSE;
    clearInterpolators();
    data.close();
}
void MetalDataFile::assign(LPCTSTR
filename) {
    fileIsTemp = !filename;
    data.assign(filename);
}
BOOL MetalDataFile::writeHeader(DataFile
*df) {
    bool full = (df == NULL);
    if (full) df =
&(MetalDataFile::data);
    if (!df->isOpen()) df->openCreate();
    if (!df->isOpen()) return FALSE;
    df->seek(0);
    df->writeString(fileSignature);
    long sizepos = df->tell();
    df->writeInt(0);

    seqSize = calculateSeqSize();
    df->writeInt(seqSize);
    df->writeInt(nwir);
    df->writeInt(mwir);
    df->writeInt(ncry);
    df->writeInt(mcry);
    df->writeDouble(tini);
    df->writeDouble(tcryini);
    df->writeDouble(wirX);
    df->writeDouble(wirY);
    df->writeDouble(cryThick);
    df->writeDouble(flowSpeed);
    df->writeDouble(cryLength);
    df->writeDouble(fogLength);
    df->writeDouble(cryPt);
    df->writeDouble(fogPt);
    df->writeDouble(max_dh);
    df->writeDouble(full ? max_time : 0);
    df->writeInt(full ? steps : 0);
    df->writeInt(full ? fogSequence : -
1);
    matSteel.writeToFile(df);
    matCopper.writeToFile(df);
    headerSize = df->tell();
    df->seek(sizepos);
    df->writeInt(headerSize);
    df->seek(headerSize);
    df->flush(); return TRUE;
}
BOOL MetalDataFile::readHeader(DataFile
*df) {
    if (!df) df = &(MetalDataFile::data);
    if (!df->isOpen()) df->openRead();
    if (!df->isOpen()) return FALSE;
    df->seek(0);
    CString signature = df->readString();
    if (signature != fileSignature)
return FALSE;
    headerSize = df->readInt(); seqSize =
df->readInt();
    nwir = df->readInt(); mwir = df-
>readInt();
    ncry = df->readInt(); mcry = df-
>readInt();
    tini = df->readDouble();
    tcryini = df->readDouble();
    wirX = df->readDouble();
    wirY = df->readDouble();
    cryThick = df->readDouble();
}

```



```

flowSpeed = df->readDouble();
cryLength = df->readDouble();
fogLength = df->readDouble();
cryPt = df->readDouble();
fogPt = df->readDouble();
max_dh = df->readDouble();
max_time = df->readDouble();
steps = df->readInt();
fogSequence = df->readInt();
matSteel.readFromFile(df);
matCopper.readFromFile(df);
if ((headerSize != df->tell()) ||
    (seqSize != calculateSeqSize()) ||
    (df->size() != headerSize +
seqSize*steps)) {
    candraw = FALSE;
    df->close(); return FALSE;
}
candraw = (steps > 0);
return TRUE;
}
void MetalDataFile::setProgressCallback(
    ProgressCallback pc, LPVOID param) {
    progressCallback = pc;
    progress_callback_param = param;
}
void MetalDataFile::open() {
    close();
    data.openRead(); if (!data.isOpen())
return;
    if (!readHeader()) {data.close();
return;}
    timeBuffer.empty();
timeBuffer.setSize(steps);
    int k;
    for (k = 0; k < steps; k++) {
        data.seek(headerSize + k*seqSize);
        timeBuffer[k] = data.readDouble();
    }
}
void MetalDataFile::clearInterpolators()
{
    currentTime = -1; currentTimeStep = -
1;
    DEL(seqInt1); DEL(seqInt2);
}
void MetalDataFile::seekTime(float time)
{
    if (time == currentTime) return;
    int ts = currentTimeStep;
timeBuffer.binarySearch(time);
    if (ts == currentTimeStep) return;
    clearInterpolators();
    seqInt1 = new
SequenceInterpolator(this, ts);
    seqInt2 = new
SequenceInterpolator(this, ts+1);
    currentTimeStep = ts;
}
BOOL
MetalDataFile::shouldFog(HeatFlowCalcula
tor *hfc) {
    if (!hfc) return FALSE;
    return fogImmediate || (hfc->time *
flowSpeed > cryLength);
}
BOOL MetalDataFile::inWire(int i, int j)
{
    return (i < nwir) && (j < mwir);
}
}
BOOL MetalDataFile::inCrystallizer(int
i, int j) {
    return (i >= nwir) && (j >= mwir) &&
(i < nwir + ncry) && (j < mwir +
mcry);
}
}
BOOL MetalDataFile::inWireInterior(int
i, int j) {
    return i && j && inWire(i+, j+);
}
}
int MetalDataFile::calculateSeqSize() {
    return (*sizeof(double) +
*sizeof(int) +
(nwir+ncry)*(mwir+mcry)*sizeof(float);
}
}
void MetalDataFile::seekSequence(int
nseq) {
    data.seek(headerSize + nseq*seqSize);
}
}
BOOL MetalDataFile::copy(LPCTSTR name) {
    close();
    return data.copy(name);
}
}
void MetalDataFile::calculate() {
    iterations = 0; fogSequence = -1;
    candraw = FALSE;
    clearInterpolators();
    close(); if (fileIsTemp)
data.remove();
    data.assign(NULL); data.openCreate();
    fileIsTemp = TRUE;
    writeHeader();
    HeatFlowCalculator *oldhfc, *hfc;
    hfc = new HeatFlowCalculator(this,
NULL);
    hfc->calculate(); hfc->writeToFile();
    if (progressCallback)
progressCallback(progress_callback_param
, hfc);
    oldhfc = hfc;
    double savedTime = 0;
    BOOL cont = TRUE;
    steps = 0;
    for (; cont; iterations++) {
        hfc = new HeatFlowCalculator(this,
oldhfc);
        hfc->calculate();
        if (hfc->time - savedTime > 1) {
            steps++;
            hfc->writeToFile();
            max_time = savedTime = hfc-
>time;
            cont = (hfc->time * flowSpeed <
cryLength + fogLength);
            if (progressCallback)
                if
(!progressCallback(progress_callback_par
am, hfc))
                    cont = FALSE;
        }
        delete oldhfc; oldhfc = hfc;
    }
    delete hfc;
    open();
}

```

```

    if (progressCallback)
progressCallback(progress_callback_param
, NULL);
}
float MetalDataFile::getFogTime() {
    return cryLength / flowSpeed;
}
float MetalDataFile::getValue(float x,
float y, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    float th1 = seqInt1->get(x, y), th2 =
seqInt2->get(x, y);
    float t1 = timeBuffer[currentTimeStep];
    float t2 = timeBuffer[currentTimeStep+1];
    return ((time - t1)*th2 + (t2 -
time)*th1)/(t2 - t1);
}
float MetalDataFile::getValueWire(float
x, float y, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    float th1 = seqInt1->getWire1(x, y);
    float th2 = seqInt2->getWire1(x, y);
    float t1 = timeBuffer[currentTimeStep];
    float t2 = timeBuffer[currentTimeStep+1];
    return ((time - t1)*th2 + (t2 -
time)*th1)/(t2 - t1);
}
float
MetalDataFile::getValueCrystallizerAxis(
float x, float y, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    float th1 = seqInt1->getCrystallizerAxis1(x, y);
    float th2 = seqInt2->getCrystallizerAxis1(x, y);
    float t1 = timeBuffer[currentTimeStep];
    float t2 = timeBuffer[currentTimeStep+1];
    return ((time - t1)*th2 + (t2 -
time)*th1)/(t2 - t1);
}
float
MetalDataFile::findTemperatureD(float
th, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    float a, b, c;
    float ta, tb, tc;
    a = 0; b = 1;
    float ix = wirX / 2, iy = wirY / 2;
    ta = getValue(a*ix, a*iy, time);
    tb = getValue(b*ix, b*iy, time);
    if (th > ta) return 0; if (th < tb)
return 1;
    c = (a + b) / 2; tc = getValue(c*ix,
c*iy, time);
    do {
        if (th > tc) {b = c; tb = tc;}
        else {a = c; ta = tc;}
        c = (a + b) / 2;
    } while ((c != a) && (c != b));
    return c;
}
float
MetalDataFile::findTemperatureX(float
th, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    float a, b, c;
    float ta, tb, tc;
    a = 0; b = wirX / 2;
    ta = getValue(a, a, time);
    tb = getValue(b, b, time);
    if (th > ta) return 0; if (th < tb)
return 1;
    c = (a + b) / 2; tc = getValue(c, c,
time);
    do {
        if (th > tc) {b = c; tb = tc;}
        else {a = c; ta = tc;}
        c = (a + b) / 2;
    } while ((c != a) && (c != b));
    return c / (wirX / 2);
}
float
MetalDataFile::findTemperatureY(float
th, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    float a, b, c;
    float ta, tb, tc;
    a = 0; b = wirY / 2;
    ta = getValue(a, a, time);
    tb = getValue(b, b, time);
    if (th > ta) return 0; if (th < tb)
return 1;
    c = (a + b) / 2; tc = getValue(c, c,
time);
    do {
        if (th > tc) {b = c; tb = tc;}
        else {a = c; ta = tc;}
        c = (a + b) / 2;
    } while ((c != a) && (c != b));
    return c / (wirY / 2);
}
float MetalDataFile::findSolidusD(float
time) {
    return
findTemperatureD(matSteel.solidus(),
time);
}
float MetalDataFile::findSolidusX(float
time) {
    return
findTemperatureX(matSteel.solidus(),
time);
}
float MetalDataFile::findSolidusY(float
time) {
    return
findTemperatureY(matSteel.solidus(),
time);
}

```

Anexa IV.1.1. Compoziția chimică pentru OL 37-2k (secțiunea 240x270mm)

Nr.crt.	Temp in oală [°C]	Temp lichidus [°C]	Compoziție chimică. [%]								
			C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mo	Al
1	1610	1522	0,07	0,27	0,36	0,033	0,026	0,3	0,09	0,02	0,005
2	1607	1521	0,08	0,29	0,41	0,022	0,028	0,26	0,09	0,02	0,005
3	1599	1521	0,08	0,29	0,37	0,026	0,032	0,32	0,1	0,02	0,005
4	1602	1522	0,06	0,29	0,37	0,034	0,021	0,3	0,09	0,02	0,005
5	1597	1521	0,08	0,27	0,34	0,017	0,03	0,34	0,1	0,02	0,005
6	1603	1521	0,08	0,23	0,35	0,03	0,025	0,26	0,14	0,03	0,005
7	1598	1522	0,07	0,27	0,38	0,012	0,027	0,39	0,1	0,02	0,005
8	1607	1521	0,08	0,28	0,35	0,031	0,021	0,3	0,1	0,08	0,005
9	1597	1522	0,07	0,24	0,36	0,02	0,021	0,32	0,09	0,02	0,005
10	1615	1522	0,07	0,31	0,38	0,038	0,029	0,3	0,1	0,02	0,005
11	1608	1522	0,07	0,32	0,35	0,037	0,016	0,03	0,14	0,02	0,005
12	1592	1524	0,06	0,29	0,39	0,02	0,02	0,27	0,11	0,02	0,004
13	1593	1521	0,07	0,24	0,46	0,031	0,042	0,27	0,1	0,02	0,005
14	1592	1522	0,07	0,26	0,4	0,047	0,024	0,29	0,14	0,02	0,005
15	1593	1524	0,06	0,28	0,4	0,017	0,021	0,3	0,07	0,02	0,005
16	1600	1524	0,06	0,26	0,45	0,024	0,028	0,3	0,15	0,03	0,005
17	1593	1522	0,09	0,3	0,4	0,019	0,03	0,34	0,07	0,02	0,005
18	1601	1521	0,08	0,28	0,36	0,022	0,03	0,26	0,09	0,02	0,005
19	1593	1521	0,08	0,28	0,36	0,027	0,028	0,28	0,1	0,02	0,004
20	1605	1521	0,08	0,3	0,38	0,021	0,017	0,33	0,1	0,03	0,004
21	1599	1522	0,08	0,24	0,39	0,018	0,024	0,26	0,1	0,02	0,003
22	1600	1522	0,07	0,25	0,36	0,022	0,026	0,34	0,08	0,02	0,003
23	1596	1521	0,09	0,23	0,43	0,014	0,032	0,3	0,1	0,03	0,005
24	1605	1521	0,08	0,27	0,45	0,029	0,019	0,33	0,11	0,03	0,005
25	1605	1522	0,07	0,23	0,38	0,034	0,022	0,3	0,1	0,02	0,005
26	1595	1523	0,08	0,24	0,45	0,017	0,021	0,35	0,09	0,02	0,004
27	1609	1523	0,07	0,29	0,38	0,022	0,023	0,32	0,13	0,03	0,003
28	1606	1521	0,08	0,26	0,32	0,045	0,024	0,29	0,08	0,03	0,005
29	1595	1522	0,07	0,23	0,37	0,029	0,012	0,26	0,05	0,02	0,004
30	1595	1522	0,07	0,22	0,49	0,004	0,027	0,28	0,07	0,02	0,004
31	1597	1523	0,07	0,23	0,44	0,029	0,022	0,31	0,07	0,02	0,005
32	1600	1522	0,07	0,24	0,37	0,02	0,022	0,27	0,08	0,02	0,005
33	1601	1522	0,07	0,26	0,35	0,012	0,034	0,34	0,07	0,02	0,005
34	1601	1522	0,07	0,27	0,36	0,044	0,025	0,27	0,05	0,02	0,004
35	1605	1523	0,06	0,25	0,33	0,023	0,014	0,28	0,07	0,02	0,005
36	1605	1521	0,08	0,23	0,45	0,027	0,019	0,28	0,07	0,02	0,004
37	1607	1522	0,07	0,26	0,35	0,024	0,019	0,36	0,1	0,02	0,004
38	1601	1521	0,08	0,29	0,37	0,003	0,022	0,39	0,07	0,02	0,003
39	1613	1521	0,08	0,28	0,34	0,024	0,01	0,25	0,01	0,03	0,003
40	1597	1521	0,08	0,25	0,38	0,013	0,03	0,32	0,09	0,02	0,005
41	1604	1521	0,08	0,3	0,38	0,025	0,01	0,3	0,09	0,03	0,005
42	1612	1521	0,08	0,26	0,35	0,043	0,023	0,3	0,08	0,03	0,005
43	1597	1521	0,08	0,31	0,44	0,008	0,031	0,35	0,11	0,02	0,003
44	1599	1521	0,08	0,27	0,34	0,021	0,02	0,29	0,08	0,02	0,004
45	1606	1523	0,06	0,29	0,34	0,04	0,025	0,26	0,1	0,02	0,004
46	1621	1521	0,08	0,28	0,34	0,042	0,023	0,26	0,08	0,04	0,004
47	1596	1522	0,08	0,21	0,4	0,018	0,025	0,32	0,08	0,02	0,004
48	1595	1521	0,08	0,28	0,36	0,037	0,017	0,29	0,08	0,02	0,005
49	1611	1523	0,06	0,29	0,35	0,036	0,015	0,3	0,09	0,02	0,005
50	1598	1521	0,08	0,27	0,34	0,042	0,017	0,37	0,12	0,02	0,005
51	1597	1523	0,06	0,25	0,4	0,035	0,019	0,24	0,11	0,02	0,005
Compoziția chimică conform STAS 500/2-80 (val. max)			0,18	0,4	0,8	0,05	0,05	0,3	0,3	0,1	0,006

Anexa IV.1.2. Compoziția chimică pentru OLT 45k (secțiunea $\phi 150\text{mm}$)

Nr. crt.	Temp oțel în oală [°C]	Temp lichidus [°C]	Compoziție chimică, [%]								
			C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mo	Al
1	1605	1513	0,16	0,35	0,64	0,003	0,027	0,29	0,1	0,02	0,026
2	1603	1517	0,14	0,31	0,48	0,008	0,015	0,3	0,07	0,03	0,03
3	1603	1515	0,15	0,33	0,54	0,01	0,026	0,3	0,08	0,02	0,027
4	1614	1515	0,15	0,34	0,48	0,014	0,018	0,31	0,07	0,03	0,031
5	1605	1515	0,16	0,34	0,51	0,007	0,023	0,22	0,12	0,05	0,03
6	1602	1515	0,15	0,29	0,52	0,011	0,025	0,32	0,09	0,03	0,027
7	1613	1515	0,15	0,32	0,49	0,017	0,018	0,3	0,09	0,02	0,038
8	1606	1516	0,15	0,31	0,51	0,016	0,018	0,3	0,09	0,03	0,028
9	1600	1516	0,14	0,33	0,51	0,01	0,017	0,26	0,09	0,03	0,031
10	1606	1516	0,15	0,28	0,45	0,016	0,014	0,12	0,09	0,03	0,03
11	1608	1515	0,15	0,33	0,49	0,022	0,017	0,3	0,12	0,03	0,03
12	1605	1515	0,16	0,31	0,5	0,03	0,017	0,3	0,12	0,02	0,031
13	1612	1514	0,16	0,29	0,5	0,022	0,016	0,29	0,07	0,03	0,021
14	1605	1514	0,16	0,31	0,47	0,01	0,025	0,27	0,08	0,03	0,033
15	1614	1515	0,15	0,33	0,48	0,02	0,019	0,3	0,09	0,02	0,027
16	1607	1514	0,16	0,32	0,52	0,02	0,024	0,28	0,11	0,02	0,028
17	1613	1514	0,17	0,31	0,49	0,022	0,022	0,28	0,09	0,02	0,028
18	1613	1515	0,15	0,34	0,48	0,01	0,02	0,29	0,11	0,02	0,031
19	1615	1515	0,15	0,32	0,55	0,02	0,014	0,27	0,06	0,03	0,026
20	1606	1513	0,16	0,32	0,49	0,009	0,019	0,25	0,08	0,03	0,026
21	1610	1516	0,14	0,26	0,51	0,014	0,015	0,21	0,07	0,02	0,018
22	1607	1515	0,15	0,3	0,54	0,004	0,02	0,29	0,15	0,03	0,03
23	1606	1515	0,15	0,28	0,46	0,006	0,015	0,24	0,14	0,03	0,035
24	1608	1515	0,15	0,34	0,5	0,019	0,015	0,18	0,05	0,03	0,024
25	1620	1515	0,15	0,3	0,54	0,018	0,024	0,22	0,1	0,02	0,024
26	1605	1516	0,15	0,29	0,5	0,017	0,014	0,26	0,09	0,03	0,026
27	1615	1515	0,15	0,31	0,52	0,024	0,024	0,22	0,09	0,02	0,022
28	1604	1514	0,16	0,31	0,48	0,009	0,024	0,28	0,22	0,02	0,032
29	1616	1515	0,16	0,25	0,5	0,025	0,025	0,32	0,17	0,02	0,035
30	1606	1514	0,18	0,27	0,58	0,013	0,03	0,33	0,1	0,03	0,022
31	1612	1515	0,16	0,3	0,53	0,013	0,02	0,32	0,08	0,03	0,022
32	1603	1514	0,15	0,31	0,52	0,012	0,018	0,33	0,1	0,02	0,021
33	1614	1514	0,15	0,3	0,52	0,008	0,02	0,3	0,09	0,02	0,025
34	1603	1515	0,15	0,33	0,49	0,005	0,02	0,35	0,07	0,03	0,026
35	1618	1515	0,16	0,33	0,48	0,024	0,017	0,34	0,08	0,03	0,036
36	1606	1515	0,15	0,3	0,51	0,01	0,02	0,25	0,13	0,02	0,026
37	1618	1515	0,15	0,35	0,51	0,015	0,015	0,26	0,1	0,02	0,024
38	1606	1515	0,15	0,3	0,5	0,009	0,03	0,28	0,16	0,02	0,031
39	1617	1515	0,16	0,31	0,48	0,014	0,016	0,29	0,11	0,03	0,034
40	1607	1515	0,14	0,31	0,5	0,006	0,019	0,26	0,09	0,03	0,02
41	1616	1515	0,15	0,31	0,46	0,003	0,025	0,3	0,11	0,02	0,038
42	1617	1517	0,13	0,32	0,48	0,03	0,018	0,29	0,2	0,03	0,027
43	1607	1513	0,17	0,34	0,6	0,004	0,019	0,29	0,15	0,03	0,021
44	1620	1515	0,16	0,3	0,48	0,01	0,021	0,28	0,16	0,03	0,021
45	1615	1516	0,14	0,28	0,46	0,012	0,021	0,28	0,1	0,02	0,034
46	1615	1516	0,14	0,25	0,54	0,007	0,014	0,19	0,06	0,02	0,036
47	1617	1516	0,14	0,35	0,45	0,026	0,021	0,28	0,08	0,03	0,036
48	1621	1514	0,16	0,26	0,54	0,017	0,017	0,27	0,08	0,03	0,035
49	1617	1516	0,14	0,3	0,5	0,006	0,027	0,28	0,13	0,03	0,025
50	1622	1516	0,14	0,3	0,53	0,014	0,014	0,3	0,06	0,02	0,025
51	1625	1518	0,13	0,26	0,5	0,015	0,013	0,25	0,06	0,02	0,03
52	1627	1516	0,15	0,26	0,49	0,026	0,018	0,29	0,1	0,02	0,025
<i>Compoziția chimică a mărcii OLT 45k, STAS 8184-87</i>			<i>max. 0,23</i>	<i>0,15-0,35</i>	<i>0,4-1,2</i>	<i>max. 0,04</i>	<i>max. 0,04</i>	<i>max. 0,3</i>	<i>max. 0,3</i>	<i>max. 0,04</i>	<i>0,02-0,045</i>

Anexa IV.1.3. Compoziția chimică pentru OLT 35k (secțiunea $\phi 150\text{mm}$)

Nr. crt.	Temp oțel în oală [°C]	Temp lichidus [°C]	Compoziție chimică, [%]								
			C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mo	Al
1	1605	1522	0,07	0,29	0,46	0,004	0,017	0,27	0,08	0,03	0,028
2	1600	1521	0,09	0,25	0,42	0,015	0,021	0,33	0,09	0,02	0,023
3	1596	1521	0,10	0,29	0,46	0,002	0,02	0,34	0,11	0,03	0,028
4	1612	1519	0,11	0,33	0,5	0,01	0,02	0,22	0,1	0,02	0,029
5	1608	1522	0,07	0,29	0,5	0,015	0,017	0,3	0,07	0,03	0,026
6	1613	1521	0,08	0,3	0,52	0,026	0,024	0,3	0,11	0,04	0,023
7	1609	1520	0,10	0,3	0,44	0,017	0,017	0,24	0,06	0,02	0,026
8	1610	1522	0,07	0,34	0,46	0,004	0,016	0,24	0,07	0,02	0,034
9	1610	1521	0,08	0,31	0,5	0,01	0,018	0,25	0,09	0,02	0,023
10	1605	1520	0,09	0,33	0,46	0,02	0,016	0,3	0,1	0,03	0,025
11	1617	1519	0,10	0,27	0,51	0,017	0,024	0,3	0,08	0,02	0,025
12	1612	1520	0,09	0,31	0,5	0,009	0,015	0,3	0,07	0,03	0,022
13	1619	1520	0,10	0,29	0,48	0,019	0,015	0,3	0,11	0,03	0,024
14	1610	1522	0,07	0,28	0,49	0,019	0,016	0,23	0,06	0,02	0,028
15	1613	1520	0,10	0,3	0,47	0,011	0,017	0,23	0,07	0,02	0,028
16	1608	1520	0,10	0,29	0,45	0,004	0,017	0,22	0,1	0,03	0,025
17	1617	1520	0,09	0,29	0,46	0,024	0,016	0,24	0,07	0,02	0,024
18	1610	1522	0,06	0,35	0,55	0,005	0,012	0,27	0,06	0,03	0,018
19	1618	1522	0,07	0,31	0,47	0,019	0,016	0,27	0,08	0,04	0,026
20	1609	1522	0,07	0,29	0,49	0,005	0,013	0,29	0,08	0,03	0,028
21	1612	1523	0,08	0,33	0,49	0,005	0,01	0,24	0,03	0,03	0,014
22	1611	1522	0,09	0,28	0,49	0,019	0,021	0,3	0,1	0,03	0,024
23	1615	1521	0,08	0,28	0,57	0,025	0,022	0,3	0,08	0,03	0,015
24	1612	1523	0,06	0,32	0,49	0,018	0,014	0,27	0,14	0,03	0,026
25	1621	1522	0,07	0,32	0,48	0,017	0,019	0,3	0,13	0,03	0,027
26	1615	1519	0,11	0,26	0,64	0,009	0,032	0,25	0,1	0,02	0,014
27	1614	1521	0,09	0,3	0,44	0,013	0,014	0,28	0,09	0,02	0,019
28	1614	1523	0,06	0,31	0,47	0,003	0,014	0,21	0,08	0,02	0,023
29	1617	1521	0,08	0,31	0,55	0,007	0,023	0,29	0,1	0,03	0,029
30	1630	1520	0,09	0,31	0,49	0,027	0,016	0,33	0,1	0,02	0,029
31	1610	1521	0,07	0,3	0,6	0,006	0,025	0,35	0,14	0,03	0,029
32	1618	1522	0,06	0,28	0,59	0,025	0,026	0,28	0,13	0,02	0,023
33	1616	1520	0,09	0,3	0,45	0,009	0,023	0,24	0,13	0,02	0,023
34	1617	1521	0,08	0,33	0,51	0,009	0,018	0,26	0,07	0,02	0,029
35	1622	1520	0,09	0,29	0,65	0,003	0,03	0,32	0,13	0,03	0,027
36	1621	1522	0,07	0,32	0,5	0,005	0,021	0,32	0,1	0,03	0,023
37	1615	1523	0,06	0,33	0,46	0,003	0,013	0,25	0,1	0,03	0,03
38	1620	1523	0,06	0,25	0,56	0,034	0,019	0,3	0,1	0,02	0,033
39	1621	1521	0,07	0,31	0,61	0,01	0,028	0,29	0,09	0,02	0,031
40	1624	1522	0,07	0,29	0,45	0,02	0,013	0,27	0,07	0,03	0,028
41	1624	1523	0,06	0,35	0,62	0,009	0,018	0,22	0,12	0,02	0,023
42	1625	1522	0,07	0,31	0,52	0,02	0,016	0,24	0,009	0,02	0,032
43	1627	1520	0,09	0,32	0,54	0,005	0,013	0,26	0,11	0,03	0,026
44	1629	1519	0,10	0,3	0,54	0,003	0,013	0,3	0,08	0,03	0,025
45	1620	1522	0,07	0,26	0,46	0,005	0,019	0,27	0,07	0,02	0,025
46	1620	1521	0,08	0,34	0,48	0,003	0,015	0,26	0,1	0,02	0,031
47	1617	1521	0,08	0,32	0,5	0,004	0,014	0,3	0,09	0,02	0,032
48	1623	1523	0,06	0,22	0,75	0,025	0,025	0,3	0,11	0,02	0,026
49	1618	1522	0,07	0,33	0,49	0,013	0,012	0,34	0,1	0,03	0,03
50	1623	1523	0,07	0,29	0,42	0,03	0,014	0,34	0,08	0,03	0,032
51	1620	1520	0,08	0,3	0,52	0,003	0,017	0,23	0,09	0,02	0,032
52	1626	1521	0,06	0,31	0,5	0,018	0,02	0,24	0,07	0,02	0,025
<i>Compoziția chimică a mărcii OLT 35k, STAS 8184-87</i>			<i>max. 0,17</i>	<i>0,15-0,35</i>	<i>0,4-0,9</i>	<i>max. 0,04</i>	<i>max. 0,04</i>	<i>max. 0,3</i>	<i>max. 0,3</i>	<i>max. 0,04</i>	<i>0,02-0,045</i>

Anexa IV.1.4. Compoziția chimică pentru 31VMn12 (secțiunea $\phi 180\text{mm}$)

Nr. crt.	Temp oțel în oală [°C]	Temp lichidus [°C]	Compoziție chimică, [%]									
			C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mo	Al	V
1	1588	1502	0,29	0,25	1,14	0,007	0,024	0,3	0,15	0,02	0,005	0,15
2	1585	1501	0,32	0,26	1,2	0,006	0,023	0,25	0,12	0,02	0,008	0,14
3	1590	1502	0,29	0,26	1,18	0,014	0,02	0,3	0,13	0,02	0,008	0,14
4	1583	1500	0,30	0,28	1,13	0,014	0,02	0,26	0,15	0,02	0,005	0,14
5	1591	1503	0,30	0,22	1,19	0,021	0,025	0,25	0,09	0,02	0,005	0,12
6	1591	1498	0,34	0,26	1,19	0,014	0,02	0,26	0,1	0,03	0,009	0,11
7	1592	1498	0,33	0,27	1,17	0,024	0,025	0,25	0,24	0,04	0,006	0,12
8	1584	1500	0,31	0,28	1,16	0,012	0,02	0,26	0,1	0,02	0,006	0,12
9	1593	1501	0,29	0,26	1,15	0,015	0,022	0,28	0,11	0,03	0,006	0,11
10	1585	1501	0,32	0,26	1,2	0,006	0,023	0,25	0,12	0,02	0,008	0,14
11	1587	1502	0,29	0,26	1,18	0,014	0,02	0,3	0,13	0,02	0,008	0,14
12	1590	1500	0,30	0,28	1,13	0,014	0,02	0,26	0,15	0,02	0,005	0,14
13	1591	1503	0,30	0,22	1,19	0,021	0,025	0,25	0,09	0,02	0,005	0,12
14	1591	1498	0,34	0,26	1,19	0,014	0,02	0,26	0,1	0,03	0,009	0,11
15	1590	1498	0,33	0,27	1,17	0,024	0,025	0,25	0,24	0,04	0,006	0,12
16	1584	1500	0,31	0,28	1,16	0,012	0,02	0,26	0,1	0,02	0,006	0,12
17	1588	1501	0,29	0,26	1,15	0,015	0,022	0,28	0,11	0,03	0,006	0,11
18	1583	1500	0,30	0,28	1,13	0,014	0,02	0,26	0,15	0,02	0,005	0,14
19	1588	1502	0,29	0,25	1,14	0,007	0,024	0,3	0,15	0,02	0,005	0,15
20	1590	1502	0,29	0,25	1,14	0,007	0,024	0,3	0,15	0,02	0,005	0,15
<i>Compoziția chimică a mării 31VMn12, STAS 8185-88</i>			0,28-0,34	0,17-0,37	1,1-1,4	max. 0,035	max. 0,035	max. 0,3	max. 0,3	max. 0,06	max. 0,01	0,10-0,2

Anexa IV.1.5. Compoziția chimică pentru OLT65 (secțiunea $\phi 180\text{mm}$)

Nr. crt.	Temp oțel în oală [°C]	Temp lichidus [°C]	Compoziție chimică, [%]									
			C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mo	Al	Ca
1	1580	1493	0,44	0,27	0,73	0,01	0,019	0,29	0,09	0,03	0,005	0,0023
2	1576	1496	0,40	0,27	0,77	0,01	0,022	0,3	0,1	0,03	0,004	0,002
3	1576	1489	0,47	0,28	0,73	0,012	0,03	0,25	0,15	0,02	0,003	0,0025
4	1586	1493	0,42	0,27	0,75	0,018	0,021	0,23	0,07	0,03	0,003	0,003
5	1580	1492	0,42	0,29	0,76	0,017	0,026	0,28	0,1	0,03	0,026	0,0022
6	1578	1493	0,41	0,3	0,76	0,02	0,024	0,19	0,07	0,02	0,005	0,003
7	1588	1491	0,43	0,3	0,75	0,022	0,018	0,25	0,09	0,02	0,026	0,002
8	1579	1492	0,41	0,33	0,76	0,012	0,019	0,3	0,16	0,03	0,005	0,0027
9	1584	1491	0,42	0,31	0,75	0,019	0,024	0,23	0,12	0,03	0,027	0,0038
10	1575	1492	0,43	0,31	0,76	0,008	0,017	0,32	0,11	0,03	0,022	0,0011
11	1585	1489	0,45	0,26	0,82	0,016	0,03	0,23	0,13	0,04	0,016	0,0014
12	1576	1493	0,41	0,3	0,76	0,02	0,024	0,19	0,07	0,02	0,005	0,0019
13	1588	1491	0,43	0,3	0,75	0,022	0,018	0,25	0,09	0,02	0,026	0,002
14	1576	1490	0,42	0,29	0,76	0,017	0,026	0,28	0,1	0,03	0,026	0,0022
15	1574	1492	0,42	0,31	0,76	0,008	0,017	0,32	0,11	0,03	0,022	0,0011
16	1580	1489	0,47	0,26	0,82	0,016	0,03	0,23	0,13	0,04	0,016	0,0014
17	1590	1489	0,47	0,28	0,73	0,012	0,03	0,25	0,15	0,02	0,003	0,0021
18	1586	1490	0,42	0,27	0,75	0,018	0,021	0,23	0,07	0,03	0,003	0,0023
19	1574	1493	0,41	0,3	0,76	0,02	0,024	0,19	0,07	0,02	0,005	0,0021
20	1580	1491	0,43	0,3	0,75	0,022	0,018	0,25	0,09	0,02	0,026	0,002
<i>Compoziția chimică a mării OLT 65, STAS 8185-88</i>			0,4-0,5	0,17-0,35	0,7-1,0	max. 0,045	max. 0,04	max. 0,3	max. 0,3	max. 0,06	max. 0,006	max. 0,006

Anexa IV.2.1. Date generale privind turnarea continuă (secțiunea 240x270mm)

Nr.crt.	Greutate inițială [t]	Greutate oală [t]	Greutate finală [t]	Otel distrib [t]	Rest în distrib [t]	Timp turnare [min]	Lungime turnare. [m]						
							F1	F2	F3	F4	F5	total	
1	176,2	67,7	108,5	108,5	0	118						0	
2	170,8	60,7	108,5	110,1	1,6		90,83	91,4	90,76	78,59	93,34	444,92	
3	169,8	64,3	105,5	105,5	0	106						0	
4	174,9	62,1	111,6	112,8	1,2		87,01	88,1	87,98	89,19	89,7	441,98	
5	181	69,6	111,4	111,4	0	100						0	
6	177,7	63,7	113	114	1		90,52	91,6	90,88	92,16	92,97	458,13	
7	170,7	64	106,7	106,7	0	105						0	
8	171,3	64,3	105,5	107	1,5		85,91	86,79	86,45	87,6	88,31	435,06	
9	174,4	63,6	110,8	110,8	0	163						0	
10	177	62	115	115	0								0
11	180	68	110,6	112	1,4		130,61	135,22	134,14	135,74	136,46	672,17	
12	171,7	68	103,7	103,7	0	155						0	
13	182,1	68,9	113,2	113,2	0								0
14	174,4	65,8	107,1	108,9	1,8		128,06	132,18	128,76	133,08	134,62	656,7	
15	171,2	64,4	106,8	106,8	0	110						0	
16	175,9	67,2	107,3	108,7	1,4		85,42	86,8	85,99	88,04	88,63	434,88	
17	169,7	65,4	104,3	104,3	0	120						0	
18	172,5	65	106,5	107,5	1		85,83	86,89	85,16	88,82	89,36	436,06	
19	180	67,2	112,8	112,8	0	94						0	
20	165,4	66,4	97,8	99	1,2		84,12	85,03	84,85	86,11	86,43	426,54	
21	176,3	66,5	109,8	109,8	0	111						0	
22	173,6	65,2	106,4	107,9	1,5		86,19	87,38	87,61	88,28	89,8	439,26	
23	177,1	62,8	114,3	114,3	0	166						0	
24	175,2	66,1	109,1	109,1	0								0
25	182	68	112,5	114	1,5		134,83	134,95	134,63	137,47	138,44	680,32	
26	170	64	106	106	0	153						0	
27	181	68,2	112,8	112,8	0								0
28	176	67,6	107	108,4	1,4		130,57	130,97	130,9	133,55	134,12	660,11	
29	175,7	65,7	110	110	0	156						0	
30	176,9	66,5	110,4	110,4	0								0
31	186,9	71,8	113,1	115,1	2		136,34	128,72	136,26	136,74	138,1	676,16	
32	180,1	69,5	110,6	110,6	0	154						0	
33	173	65	108	108	0								0
34	169	59	109,4	110	0,6		131,65	132,48	132,08	134,34	136,06	666,61	
35	171,7	61,8	109,9	109,9	0	116						0	
36	186,8	72	112,9	114,8	1,9		89,07	89,84	89,5	91,37	91,57	451,35	
37	161,7	65,7	96	96	0	153						0	
38	166,5	66,8	99,7	99,7	0								0
39	179,2	65,2	112,2	114	1,8		116,82	125,66	124,51	124,51	128,37	619,87	
40	178,3	66,3	112	112	0	147						0	
41	175	60,2	108,8	108,8	0								0
42	178	68,4	101,8	109,6	1,8		132,04	132,09	131,97	133,69	134,6	664,39	
43	175,6	68,3	107,3	107,3	0	246						0	
44	174,2	69,4	104,8	104,8	0								0
45	180,6	68,6	112	112	0								0
46	171,6	63,6	106	108	2		147,41	179,56	177,92	181,71	183,94	870,54	
47	165,7	65,3	100,4	100,4	0	156						0	
48	174,9	69,4	105,5	105	0								0
49	166,3	61,1	104	105,2	1,2		122,1	123,11	122,89	124,49	125,95	618,54	
50	167,5	66,2	101,3	101,3	0	100						0	
51	175,1	165,7	107,8	109,4	1,6		83,11	83,57	83,82	85,24	85,62	421,36	

Anexa IV.2.2. Date generale privind turnarea continuă (secțiunea $\phi 150\text{mm}$)

Nr. crt.	Greutate inițială [t]	Greutate oală [t]	Greutate finală [t]	Otel distrib [t]	Rest în distrib [t]	Timp turnare [min]	Lungime turnare.[m]					
							F1	F2	F3	F4	F5	total
1	164,2	68,6	95,6	95,6	0	178						
2	181,3	67,3	111,5	114	2,5		364,5	361,8	254	194,4	371,6	1546,3
3	188,5	68,1	120,3	120,4	0	163						
4	179,2	64,6	94,8	114,6	19,8		361,3	224,57	342,59	367,21	341,29	1636,96
5	177,6	69,1	105,5	108,5	3	80	161,21	157,99	160,68	165,17	166,8	811,85
6	178,9	69,7	110,2	110,2	0	197						
7	180,4	68,8	90,1	111,6	21,5		436,61	432,41	395,4	0	228,21	1492,63
8	178,8	65,8	111	113	2	165						
9	179,1	65,6	111,6	113,5	1,9		345	347,6	353,4	356,7	299,6	1702,3
10	182	65,8	116,2	116,2	0	156						
11	169,8	62,8	97,5	107	9,5		319,79	281,87	339,3	339,49	348,8	1629,25
12	186,7	62	124,7	124,7	0	160						
13	174,5	65,5	107	109	2		351,13	349,54	353,26	351,81	352,95	1758,69
14	171,1	65,4	105,7	105,7	0	156						
15	172,8	62	108,6	110,8	2,2		323,18	322,84	323,61	329,69	332,57	1631,89
16	173,2	67,6	105,6	105,6	0	150						
17	175,7	65,1	108,6	110,6	2		328,63	328,66	331,29	311,49	336	1636,07
18	178,5	66,9	111,6	111,6	0	170						
19	170,9	62,8	103,5	108,1	4,6		391,55	390,62	193,55	390,12	262,1	1627,94
20	173,4	68,7	104,7	104,7	0	154						
21	171,1	62,8	106,5	108,3	1,8		319,61	322,83	323,66	324,77	322,48	1613,35
22	178	70,2	106,2	107,8	1,6	143						
23	171,8	64,3	105,9	107,5	1,6		300,3	310,2	309,7	317,6	315,2	1553
24	173,3	69,4	103,9	103,9	0	190						
25	177,9	65,6	110,3	112,3	2		407,39	400,65	406,45	412,59	0	1627,08
26	179	67,5	111,5	111,5	0	185						
27	178,5	67	109,2	111,5	2,3		347,29	231,33	362,32	365,65	371,53	1678,12
28	179,6	70,6	109	109	0	196						
29	185,3	67,3	113	118	5		375,06	344,44	344,4	241,24	382,01	1687,15
30	175,3	70,5	104,8	104,8	0	212						
31	173,8	66,7	105,3	107,1	1,8		321,35	319,59	319,17	321,78	328,12	1610,01
32	173,7	62,2	111,5	111,5	0	150						
33	161	64,8	94,3	96,2	1,9		311,9	308,34	309,1	311,66	314,87	1555,87
34	168,4	63,4	105	105	0	159						
35	167,7	60,7	99	107	8		286,54	297,71	351,59	326,76	293,77	1556,37
36	171,9	71,2	100,7	100,7	0	153						
37	166,6	64,7	99,9	101,9	2		305,46	302,56	304,98	300,79	307,64	1521,43
38	175	64,4	110,6	110,6	0	212						
39	174	63	106,7	111	4,3		426,12	418,7	379,61	0	432,85	1657,28
40	161,2	67,3	93,9	93,9	0	272						
41	173,5	61,7	111,8	111,8	0							
42	160,7	57,6	95,4	103,1	7,7		593,88	585,74	499,34	26,63	586,63	2292,22
43	157	59,7	97,3	97,3	0	155						0
44	180,3	65	113,3	115,3	2		319,75	312,26	319,47	322	324,63	1598,11
45	163,8	59,6	104,2	104,2	0	370						
46	163,9	65,1	98,8	98,8	0							
47	177,4	66,2	111,2	111,2	0							
48	165,8	92,1	66,3	73,7	7,4		703,94	491,82	692,55	268,95	742,4	2899,66
49	177,5	66,5	111	111	0	350						
50	168,9	65,3	103,6	103,6	0							
51	166,7	65	101,7	101,7	0							
52	167,4	59	103,4	108,4	5		639	640,13	631,45	641,51	642,33	3194,42

Anexa IV.2.3. Date generale privind turnarea continuă (secțiunea $\phi 180\text{mm}$)

Nr. crt.	Greutate inițială [t]	Greutate oală [t]	Otel distrib [t]	Greutate finală [t]	Rest în distrib [t]	Timp turnare [min]	Lungime turnare. [m]					
							F1	F2	F3	F4	F5	total
1	172,8	65,1	107,7	105,9	1,8	65	111,76	111,52	111,51	113,57	113,43	561,79
2	170,4	63,9	106,5	106,5	0	123						0
3	173,5	65,5	108	105,7	2,3		224,53	223,73	227,21	227,47	205,36	1108,3
4	178,7	67,7	111	111	0	133						0
5	179,4	66,6	112,8	110,8	2		230,23	226,57	233,25	234,82	234,95	1159,8
6	172,7	63,5	109,2	109,2	0	134						0
7	179,5	65,8	113,7	111,7	2		234,17	232,17	233,51	235,87	235,19	1170,9
8	185,8	65,3	120,5	120,5	0	129						0
9	180,1	63,2	116,9	115	1,9		248,58	248	249,58	248,06	252,29	1246,5
10	170,5	63,9	106,6	106,6	0	130						0
11	174	65,5	108,5	106,1	2,4		225,6	222,84	226,58	229,43	210	1114,5
12	179	67,7	111,3	111,3	0	129						0
13	179,4	68	111,4	109,3	2,1		232,47	225,8	220,6	236,8	240,4	1156,1
14	175	63,5	111,5	111,5	0	127						0
15	178	65	113	111,2	1,8		230,54	223,5	240,8	225,6	238,4	1158,8
16	179	65,3	113,7	113,7	0	132						0
17	180	63	117	115,1	1,9		250	237,5	245,6	220,7	231,5	1185,3
18	178,7	67,7	111	111	0	135						0
19	176	65,1	110,9	108,5	2,4		247,3	228,6	235,9	225,6	237,4	1174,8
20	174	65,1	108,9	106,9	2	72	113,9	112,5	110,9	112,9	113,43	563,63

Nr.crt.	Viteza de turnare la inceput, [m/min]					Viteza de turnare, [m/min]					t ₁	Viteza de turnare, [m/min]					t ₂	Viteza de turnare, [m/min]											
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5		t	F1	F2	F3	F4		F5	t	F1	F2	F3	F4	F5					
																									t	t	t		
35	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	10	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	30	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	40	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	50
36						0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	60	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	70	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	90	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	100
37	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	10	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	20	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	40	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	50
38						0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	55	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	65	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	85	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	95
39						0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	100	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	110	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	130	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	140
40	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	10	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	20	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	30	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	50
41						0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	60	1	1	1	1	1	70	1	1	1	1	1	80	1	1	1	1	1	100
42						0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	110	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	120	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	130	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	150
43	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	10	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	20	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	30	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
44						0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	50	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	60	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	70	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	90
45						0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	100	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	115	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	130	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	150
46						0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	160	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	170	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	185	NU	0.6	0.6	0.6	0.6	215
47	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	10	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	20	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	30	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
48						0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	60	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	70	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	80	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
49						0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	110	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	120	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	130	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	150
50	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	10	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	20	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	30	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	
51						0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	50	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	60	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	70	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	100

Anexa IV.3.2. Date privind viteza de turnare (secțiunea φ150mm)

Nr.crt.	Viteza de turnare la inceput, [m/min]					Viteza de turnare, [m/min]					t ₁	Viteza de turnare, [m/min]					t ₂	Viteza de turnare, [m/min]											
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5		t	F1	F2	F3	F4		F5	t	F1	F2	F3	F4	F5					
																									t	t	t		
1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	10	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	20	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	30	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	80
2						2	2	2	2	2	20	2	2	2	2	2	30	2	2	2	2	2	45	2	2	2	2	2	70
3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	10	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	20	2	2	2	2	2	30	2	2	2	2	2	60
4						2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	80	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	100	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	110	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	140
5	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	10	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	20	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	30	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	60
6	1.2	1.2	1.2	0	1.2	2	2	2	2	2	10	2.4	2.4	2.4	0	2.4	25	2.4	2.4	2.4	2.4	0	40	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	75
7						2.3	2.3	2.3	0	2.3	90	2.3	2.3	2.3	0	0	105	2.3	2.3	2.3	0	0	130	2.4	2.4	2.4	0	0	200
8	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	10	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	20	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	30	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	80
9						2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	10	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	20	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	30	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	60
10	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	10	2	2	2	2	2	20	2	2	2	2	2	35	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	65
11						2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	75	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	90	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	105	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	135

Nr. crt.	Viteza de turnare la început. [m/min]					Viteza de turnare . [m/min]					Viteza de turnare . [m/min]					Viteza de turnare , [m/min]											
	[m/min]					[m/min]					[m/min]					[m/min]											
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5							
46						1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
47						1,8	1,8	1,8	0	2	1,8	0	2	1,8	0	2	1,8	0	2	1,8	0	2	1,8	0	2	1,8	0
48						1,8	0	1,8	0	1,8	0	1,8	0	1,8	0	2	0	1,8	0	2	0	1,8	0	2	0	1,8	0
49	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
50						1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
51						1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
52						1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Anexa IV.3.3. Date privind viteza de turnare (secțiunea $\phi 180\text{mm}$)

Nr. crt.	Viteza de turnare la început. [m/min]					Viteza de turnare . [m/min]					Viteza de turnare . [m/min]					Viteza de turnare , [m/min]									
	[m/min]					[m/min]					[m/min]					[m/min]									
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5					
1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
3						1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7
4	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
5						1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
6	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
7						1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
8	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
9						1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
10	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
11						1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
12	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
13						1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
14	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
15						1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
16	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
17						1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
18	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
19						1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
20	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

Anexa IV.4.1. Date privind răcirea primară (secțiunea 240x270mm)

Nr.crt.	Praf acoperire distrib. / greutate		Inițial		Temperatura în distribuitor [°C], la											
			T0	dT	T1	dT	-	T2	dT	-	T3	dT	-	T4	dT	
1	A	40	1554	32	1555	33	10	1552	30	20			30			40
2	A	60			1549	28	60	1556	35	70	1555	34	80	1557	36	90
3	A	70	1555	34	1550	29	10	1551	30	20	1550	29	30			40
4	A	60			1542	20	60	1548	26	70	1550	28	80	1551	29	90
5	A	40	1555		1552	31	10	1554	33	20	1549	28	30			40
6	A	40			1543	22	50	1541	20	60	1548	27	70			80
7	A	60	1557	35	1556	34	10	1558	36	20			30			40
8	A	80			1549	28	60	1546	25	70	1547	26	80	1543	22	90
9	A	40	1568		1566	44	10	1562	42	20			30	1555	33	40
10	A	40			1546	24	60	1549	27	70	1546	24	80			90
11	A	40			1547	25	120	1547	25	130	1546	24	140	1546	24	150
12	A	60	1558	34	1554	30	10	1557	33	20	1559	35	30			40
13	A	80			1543	22	60	1543	22	70	1547	26	80	1545	24	90
14	A	80			1547	25	110	1547	25	120	1549	27	130	1546	24	140
15	A	60	1556	32	1559	35	10	1554	30	20	1552	28	30			40
16	A	60			1544	20	60	1548	24	70	1550	26	80	1550	26	90
17	A	70	1558	36	155	33	10	1556	34	20			30			40
18	A	60			1553	32	60	1555	34	70			80	1556	35	95
19	A	40	1551	30	1544	23	10			20	1546	25	30			40
20	A	40			1549	28	55	1549	28	65	1549	28	75	1547	16	85
21	A	60	1562	40	1557	35	10			20	1555	33	30			40
22	A	60			1555	35	60	1556	34	70	1556	34	80			90
23	A	60	1568	47	1565	44	10	1564	43	20	1559	38	30	1553	32	40
24	A	60			1541	20	60	1550	29	70	1550	29	80	1548	27	90
25	A	60			1536	14	100	1533	11	110	1536	14	120	1539	17	130
26	A	60	1538	15	1545	22	10	1543	20	20	1546	23	30	1547	24	40
27	A	60			1543	20	60	1541	18	70	1543	20	80	1545	22	90
28	A	80			1537	16	110	1537	16	120	1539	18	130			140
29	A	100	1540	18	1545	23	10	1543	21	20	1548	26	30			40
30	A	60			1548	26	50	1549	27	60	1554	32	70	1552	30	80
31	A	60			1541	18	95	1537	14	105	1538	15	115	1540	17	125
32	A	60	1550		1546	24	10	1543	21	20	1543	21	30	1545	23	40
33	A	60			1552	30	50	1555	33	60	1554	33	70	1554	32	80
34	A	120			1542	20	110	1537	15	120	1543	21	130	1543	21	140
35	A	140	1560	37	1562	39	10	1558	35	20	1556	33	30	1563	40	40
36	A	80			1549	28	60	1553	32	70	1553	32	80	1550	29	90
37	A	50	1552	30	1550	28	10	1553	31	20			30			40
38	A	60			1553	32	55	1555	34	65	1555	34	75	1556	35	85
39	A	60			1545	24	100	1547	26	110	1545	24	120	1560	29	130
40	A	50	1560	39	1555	34	10	1553	37	20			30			40
41	A	70			1543	22	60	1542	21	70	1543	22	80			90
42	A	60			1551	30	110	1551	30	120	1551	30	130	1551	30	140
43	A	50	1549	28	1550	29	10			20			30			40
44	A	50			1556	35	50	1556	35	60	1555	34	70	1553	32	80
45	A	80			1548	25	100	1548	25	115	1551	28	130			140
46	A	60			1568	47	160	1569	48	170			185			200
47	A	60	1560	38	1561	39	10			20			30	1563	41	40
48	A	80			1536	15	60	1537	11	70	1540	19	80			90
49	A	60			1550	27	110	1551	28	120	1553	30	130	1553	30	140
50	A	80	1550	29	1553	32	10	1545	24	20	1551	34	30	1554	33	40
51	A	100			1542	19	50	1540	17	60	1539	18	70	1540	17	85

Anexa IV.4.2. Date privind răciră primară (secțiunea $\phi 150\text{mm}$)

Nr. crt.	Praf acoperire distrib/greutate		Inițial		Temperatura în distribuitor [$^{\circ}\text{C}$] la														
			T0	dT	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ	T5	dT	τ
1	A	100	1562	49	1550	37	10	1545	32	20	1546	33	30	1548	35	50			80
2	A	100	1556	39	1552	35	10	1552	35	20	1553	36	35	1548	31	55	1539	22	70
3	A	110	1568	53	1564	49	10	1560	45	20	1558	43	30	1556	41	45	1552	37	60
4	A	120	1545	30	1548	33	80	1552	37	100	1551	36	110	1546	31	120	1547	32	140
5	A	80	1560	45	1549	34	10	1554	39	20	1547	32	30	1546	31	40			60
6	A	100	1550	35	1535	20	10	1539	24	25	1540	25	40	1538	23	55	1545	30	75
7	A	150	1545		1543	28	90	1546	31	105	1541	26	120	1540	25	150	1544	29	200
8	A	60	1554	38	1543	27	10	1543	27	20	1547	31	30	1542	26	50			80
9	A	60	1557	41	1546	30	10	1546	30	20	1552	36	30	1552	36	40	1551	35	60
10	A	60	1551	35	1551	35	10	1550	34	20	1551	35	35	1547	31	50			65
11	A	80	1540		1537	22	75	1537	22	90	1542	27	105	1549	34	120			135
12	A	50	1556	41	1555	40	10	1551	36	20	1551	36	30	1543	28	40			50
13	A	100	1540		1536	22	60	1530	16	70	1537	23	80	1543	29	90			100
14	A	100	1550	18	1541	27	15	1538	24	30	1543	29	40	1540	26	50			60
15	A	100	1540		1530	15	80	1532	17	90	1543	28	100	1537	22	120	1536	21	150
16	A	100	1554	40	1548	34	10	1547	33	20	1543	29	30	1533	19	40	1540	26	50
17	A	100	1545		1543	29	70	1548	34	80	1536	22	90	1533	19	110			125
18	A	100	1537	22	1526	11	10	1546	31	20	1546	31	30	1546	31	40			60
19	A	50	1543		1537	22	70	1546	31	80	1545	30	90	1541	26	105	1531	15	130
20	A	80	1560	47	1549	36	10	1545	32	20			35	1541	28	45			60
21	A	60	1550		1545	29	70	1545	29	80	1552	36	100	1549	33	110	1542	26	130
22	A	80	1555	40	1548	33	10	1545	30	20			40			50			60
23	A	80	1555	39	1550	34	10	1550	34	20	1546	30	35			45			65
24	A	100	1568	53	1552	37	10	1546	31	25	1546	31	45			60			70
25	A	80	1550		1549	34	85	1545	30	100	1543	28	120	1541	26	145	1548	33	170
26	A	60	1561	45	1551	35	10	1555	39	20	1551	35	30	1555	39	45	1548	32	60
27	A	80	1555		1553	38	80	1555	40	90	1556	41	110	1555	40	130	1547	32	160
28	A	80	1557	43	1551	37	10	1550	36	20	1546	32	35			50			65
29	A	80	1545		1542	27	85	1548	33	95	1554	39	115	1542	27	135	1547	32	170
30	A	80	1559	45	1554	40	10	1547	33	20			30			45			75
31	A	80	1555		1550	23	80	1544	29	87	1538	23	100			125			150
32	A	80	1560	46	1546	32	10	1544	30	20	1541	27	30			45			60
33	A	80	1550		1544	30	70	1545	31	80			90	1546	32	115			150
34	A	90	1548	33	1549	34	10	1546	31	30			45			55			65
35	A	120	1534		1526	11	80	1524	9	95	1534	19	110	1536	21	125	1536	21	135
36	A	100	1559	44	1542	27	10	1545	30	20	1544	29	30			40			50
37	A	80	1548		1543	28	60	1547	32	70			90	1552	37	120			140
38	A	120	1548	33	1537	22	10	1537	22	25	1539	24	40	1531	16	60	1531	16	80
39	A	120	1550		1544	29	100	1545	30	120	1547	32	135	1546	31	150			165
40	A	100	1554	39	1545	30	10	1538	23	20	1539	24	30	1534	19	40			60
41	A	100	1540		1534	19	70	1532	17	80	1542	27	100	1543	28	120	1546	31	145
42	A	100	1539		1538	21	160	1539	22	180	1537	20	200	1536	19	220			240
43	A	60	1568	55	1558	45	10	1549	36	25	1548	35	35			45			60
44	A	100	1545		1537	22	70	1538	23	85	1542	27	105	1540	25	125			145
45	A	80	1564	48	1549	33	10	1554	38	20			30	1546	30	50	1547	31	70
46	A	120	1540		1536	20	90	1537	21	100	1537	21	110	1535	19	130	1541	25	150
47	A	100	1542		1539	23	160	1538	22	180			200	1535	19	220			260
48	A	250	1541		1540	26	280	1540	26	300	1535	21	315	1535	21	340	1518	4	360
49	A	80	1579	63	1569	53	10	1558	42	20	1554	38	35	1558	42	50	1556	40	65
50	A	80	1555		1553	37	85	1554	38	100	1560	44	115	1563	47	130	1560	44	145
51	A	80	1555		1554	36	180	1550	32	195	1555	37	210	1559	41	225	1555	37	240
52	A	100	1548		1545	29	260	1538	22	275	1538	22	290	1537	21	305	1542	26	320

Anexa IV.4.3. Date privind răcirea primară (secțiunea $\phi 180\text{mm}$)

Nr. crt.	Praf acoperire distrib/greutate		Inițial		Temperatura în distribuitor la														
			T	dT	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	A	60	1550	48	1544	42	10	1543	41	20	1543	41	30	1542	40	45	1542	40	60
2	A	100	1540	39	1537	36	10	1538	37	20	1533	32	30	1532	31	40	1534	33	50
3	A	130			1540	38	60	1531	29	70	1522	20	80	1530	28	90	1538	36	100
4	A	80	1531	31	1538	38	10	1538	38	20	1540	40	30	1542	42	40	1540	30	50
5	A	80	1531	28	1529	26	60	1528	25	70	1527	24	80	1527	24	90	1526	23	100
6	A	60	1543	45	1544	46	10	1541	43	20	1532	34	30	1530	32	40	1529	31	50
7	A	60			1525	27	60	1525	27	70	1529	31	80	1522	24	90	1520	22	100
8	A	70	1536	36	1533	33	10	1529	29	20	1529	29	30	1527	27	40	1524	24	60
9	A	80			1528	27	70	1525	24	80	1528	27	90	1526	25	105	1520	19	115
10	A	80	1542	41	1538	37	10	1537	36	20	1537	36	30	1537	36	40	1536	35	50
11	A	60			1542	40	60	1540	38	70	1539	37	80	1538	36	90	1538	36	100
12	A	80	1533	33	1526	26	10	1525	25	20	1524	24	30	1524	24	40	1522	22	50
13	A	70			1530	27	60	1529	26	70	1529	26	80	1528	25	90	1526	23	100
14	A	60	1532	34	1526	28	10	1526	28	20	1525	27	30	1524	26	40	1520	22	50
15	A	80			1535	37	60	1533	35	70	1530	32	80	1528	30	90	1528	30	100
16	A	70	1540	40	1537	37	10	1535	35	20	1533	33	30	1532	32	40	1532	32	50
17	A	80			1540	39	60	1531	30	70	1530	29	80	1530	29	90	1528	27	100
18	A	80	1536	36	1533	33	10	1532	32	20	1531	31	30	1531	31	40	1530	30	50
19	A	70			1528	26	60	1534	32	70	1533	31	80	1532	30	90	1530	28	100
20	A	70	1546	44	1540	38	10	1536	34	20	1535	33	30	1530	28	40	1530	28	50

Anexa IV.5.1. Temperatura oțelului din distribuitor (secțiunea 240x270mm)

Nr.crt.	Presiune apă în cristalizor [bar]	Debit apă crist. F1, [l/min]		Debit apă crist. F2, [l/min]		Debit apă crist. F3, [l/min]		Debit apă crist. F4, [l/min]		Debit apă crist. F5, [l/min]		Praf acoperire cristalizor / greutate	
		lat	long	lat	long	lat	long	lat	long	lat	long		
1	7,3	1055	980	1060	960	1070	960	1090	950	1075	955	S	60
2	7,3	1060	980	1055	965	1070	960	1080	960	1075	960	S	60
3	7,3	1085	977	1089	990	1094	977	1079	934	1098	973	S	60
4	7,2	1092	979	1088	989	1099	985	1071	923	1095	980	S	60
5	7,3	1085	980	1080	980	1070	970	1080	925	1065	975	S	60
6	7,3	1090	993	1088	980	1083	984	1084	924	1066	988	S	60
7	7,2	1065	961	1062	963	1059	960	1060	962	1057	963	S	60
8	7,1	1070	972	1065	970	1062	966	1060	970	1064	964	S	60
9	7,3	1061	961	1065	962	1067	970	1063	974	1080	971	S	60
10	7,3	1060	950	1060	960	1060	980	1070	980	1080	980	S	60
11	7,2	1081	962	1080	970	1070	975	1072	960	1093	970	S	60
12	7,3	1069	975	1068	960	1069	995	1062	968	1067	957	S	60
13	7,3	1078	983	1071	961	1067	990	1065	960	1072	951	S	60
14	7,3	1081	970	1065	961	1073	969	1032	944	1073	958	S	60
15	7,2	1078	963	1086	962	1085	966	1079	968	1086	976	S	60
16	7,1	1074	964	1089	969	1095	950	1076	975	1089	988	S	60
17	7,2	1080	962	1079	962	1079	961	1071	962	1085	977	S	60
18	7,2	1083	962	1082	969	1092	965	1075	970	1091	985	S	60
19	7,2	1060	950	1060	955	1060	990	1080	950	1070	960	S	60
20	7,1	1070	954	1071	980	1073	991	1078	960	1070	961	S	60
21	7,1	1072	960	1067	966	1076	967	1063	970	1063	970	S	60
22	7,3	1071	960	1065	973	1080	966	1061	975	1061	972	S	60
23	7,3	1070	967	1080	972	1075	970	1071	967	1051	967	S	50
24	7,4	1065	964	1087	975	1072	962	1067	967	1062	940	S	60
25	7,4	1070	970	1089	978	1080	970	1067	970	1090	950	S	60
26	7,2	1076	964	1089	967	1093	971	1086	972	1093	957	S	60
27	7,4	1089	969	1095	968	1099	967	1094	969	1091	960	S	60
28	7,4	1082	970	1090	970	1095	973	1086	976	1090	961	S	60
29	7,3	1091	977	1088	962	1088	965	1083	959	1088	950	S	60
30	7,1	1096	980	1095	977	1096	967	1096	967	1090	964	S	60
31	7,2	1095	980	1091	971	1094	967	1080	970	1088	964	S	60
32	7,4	1073	967	1082	957	1081	969	1083	977	1075	962	S	60
33	7,3	1080	970	1080	960	1080	970	1080	970	1080	960	S	60
34	7,2	1076	964	1086	950	1084	968	1085	973	1082	964	S	60
35	7,2	1076	954	1079	964	1088	964	1086	955	1089	952	S	60
36	7,2	1089	965	1089	974	1087	971	1083	967	1095	960	S	60
37	7,3	1063	970	1079	956	1082	954	1082	957	1076	968	S	60
38	7,5	1088	967	1076	966	1082	971	1076	969	1082	966	S	60
39	7,4	1089	971	1077	969	1086	974	1082	976	1086	969	S	50
40	7,3	1067	965	1097	958	1066	959	1064	961	1065	953	S	50
41	7,3	1070	970	1060	960	1070	960	1060	960	1070	960	S	60
42	7,3	1070	970	1080	970	1080	970	1070	970	1080	970	S	60
43	7,3	1057	963	1076	975	1065	967	1070	970	1065	954	S	60
44	7,3	1060	970	1060	980	1060	970	1060	970	1070	960	S	60
45	6,9	1065	965	1062	980	1067	967	1059	973	1065	963	S	60
46	7,3	1060	970	1070	970	1060	960	1070	960	1070	960	S	60
47	7,3	1066	967	1066	967	1067	974	1066	970	1063	962	S	60
48	7,2	1067	971	1066	973	1094	980	1067	975	1068	968	S	60
49	7	1068	968	1064	978	1076	978	1066	980	1071	966	S	60
50	7,2	1076	960	1079	965	1078	963	1072	964	1090	963	S	60
51	7,1	1076	961	1081	971	1081	969	1084	969	1091	961	S	60

Anexa IV.5.2. Temperatura oțelului din distribuitor (secțiunea $\phi 150\text{mm}$)

Nr. crt.	Presiune apă în cristalizor [bar]	Debit apă crist. F1 [l/min]	Debit apă crist. F2 [l/min]	Debit apă crist. F3 [l/min]	Debit apă crist. F4 [l/min]	Debit apă crist. F5 [l/min]	Praf acopenre cristalizor / greutate	
1	7,6	944	944	951	943	950	S	20
2	7,6	943	940	936	938	938	S	35
3	7,5	940	935	937	937	937	A	50
4	7,5	943	940	944	941	945	A	30
5	7,6	945	944	949	945	948	S	60
6	7,8	940	940	949	0	948	S	20
7	7,8	940	946	950	0	952	S	20
8	8	956	931	948	948	956	S	30
9	7,1	945	956	953	957	944	A	30
10	7,5	946	938	931	945	934	S	60
11	7,5	944	946	946	943	937	S	60
12	7	947	941	943	944	940	S	50
13	7,3	950	948	955	951	950	A	50
14	7,5	940	945	950	945	940	A	30
15	7,5	940	950	950	950	945	A	30
16	7,2	940	935	940	940	940	A	30
17	7	938	940	945	944	940	A	30
18	7,6	944	947	945	940	941	A	30
19	7,4	945	944	947	941	942	A	50
20	7,7	945	940	946	941	944	A	30
21	7,8	940	945	940	943	942	A	30
22	7,5	940	946	945	940	945	AS	30
23	7,8	942	940	945	945	946	AS	40
24	7,4	943	941	944	945	0	AS	35
25	7,5	940	942	946	941	0	AS	40
26	7,8	943	941	943	941	940	AS	45
27	7,8	941	942	947	945	944	AS	45
28	7,5	940	951	948	940	940	AS	45
29	7,4	943	950	948	940	950	AS	45
30	7,7	942	944	942	947	940	S	50
31	7,5	940	942	942	945	940	S	50
32	6,8	956	955	958	952	957	A	50
33	6,6	955	960	958	952	957	A	60
34	7,2	948	953	954	948	957	A	50
35	6,9	951	950	950	952	957	A	40
36	7,3	951	947	942	942	945	A	40
37	7,3	955	950	944	945	945	A	40
38	7	940	941	946	0	947	A	30
39	7	942	944	954	0	944	A	30
40	7	948	945	946	948	940	A	50
41	7	945	948	948	0	945	A	60
42	7,5	940	948	950	0	940	A	50
43	7,5	941	943	945	945	940	A	50
44	7,6	940	945	944	943	945	A	40
45	7	945	950	945	940	945	A	50
46	7	945	950	951	954	953	A	50
47	7	945	951	960	0	950	A	50
48	7	945	0	940	0	940	A	40
49	7,5	945	943	946	948	947	A	35
50	7,4	944	946	944	949	950	A	35
51	7,4	945	950	948	940	950	A	35
52	7,4	946	950	948	945	947	A	35

Anexa IV.5.3. Temperatura oțelului din distribuitor (secțiunea $\phi 180\text{mm}$)

Nr. crt.	Presiune apă în cristaliz. [bar]	Debit apă crist. F1 [l/min]	Debit apă crist. F2 [l/min]	Debit apă crist. F3 [l/min]	Debit apă crist. F4 [l/min]	Debit apă crist. F5 [l/min]	Praf acoperire cristalizor / greutate	
1	7.8	1076	1065	1061	1052	1050	S	40
2	7.2	1154	1151	1155	1154	1151	S	60
3	7.2	1158	1150	1156	1157	1153	S	60
4	7.2	1148	1148	1152	1150	1151	S	40
5	7	1145	1148	1144	1146	1147	A	30
6	7.3	1148	1148	1149	1153	1148	AS	30
7	7.3	1153	1163	1157	1154	1152	AS	30
8	7.2	1155	1151	1155	1151	1152	S	25
9	7.2	1151	1159	1162	1152	1154	AS	25
10	7.2	1154	1151	1155	1154	1151	S	60
11	7.3	1158	1150	1156	1157	1153	S	60
12	7.2	1148	1148	1152	1150	1151	S	40
13	7.1	1145	1148	1144	1146	1147	A	60
14	7.2	1148	1148	1149	1153	1148	S	30
15	7.3	1153	1163	1157	1154	1152	S	40
16	7.3	1155	1151	1155	1151	1152	S	50
17	7.1	1151	1159	1162	1152	1154	S	60
18	7.2	1148	1148	1152	1150	1151	S	40
19	7.3	1076	1065	1061	1052	1050	S	50
20	7.7	1076	1065	1061	1052	1050	S	40

Anexa IV.6.1.1. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F1), secțiunea 240x270mm

Nr.crt.	Diferența de temperatură [°C] în cristalizor pe firul 1 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	26	4	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40			0
2	33,6	4	60	35,5	4	70	37,5	4	80	39,4	4	90	40,8	4	100
3	26	3	10	28	4	20	29	4	30	31	4	40	32	4	50
4	34	4	60	35	4	70	37	4	80	38	4	90			0
5	22	4	10	23	4	20	24	4	30	25	4	40			0
6	31	4	50	32	4	60	33	4	70	35	4	80	35	4	90
7	23	4	10	25	4	20	27	4	30	28	4	40			0
8	32	4	60	33	4	70	35	4	80	36	4	90			0
9	25	4	10	26	4	20	28	4	30	29	4	40	29	4	50
10	32	4	60	33	4	70	35	4	80	36	4	90	37	5	105
11	38	4	120	39	4	130	40	4	140	41	5	150	41	5	160
12	22	4	10	23	4	20	26	4	30	27	4	40			0
13	29	4	60	33	5	70	35	4	80	37	4	90			0
14	39	4	110	40	4	120	41	4	130	42	4	140	43	4	150
15	25	2	10	26	3	20	27	4	30	29	4	40	30	4	50
16	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	90	38	4	100
17	26	3	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40	30	4	50
18	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	95	39	4	120
19	21	4	10	23	4	20	24	4	30	26	4	40			0
20	29	4	55	31	4	65	32	4	75	34	4	85	35	4	90
21	22,5	4	10	23,9	4	20	25	4	30	27	4	40			0
22	31	4	60	32	4	70	33,8	4	80	35	4	90	36,3	4	100
23	22,3	4	10	23,8	4	20	25,3	4	30	27,3	4	40			0
24	32	4	60	33	4	70	34	4	80	36	4	90			0
25	39	4	100	40	4	110	42	4	120	43	4	130	44	4	140
26	24	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40	27	4	50
27	31	4	60	32	4	70	34	4	80	34	4	90			0
28	39	4	110	41	4	120	42	4	130	42,5	4	140			0
29	18,7	4	10	20,9	4	20	22,9	4	30	25,5	4	40			0
30	28,7	4	50	30,5	4	60	32,1	4	70	34,1	4	80	35,7	4	85
31	36,7	4	95	37,6	4	105	38,5	4	115	39,8	4	125	41,4	5	138
32	23	4	10	24	4	20	27	4	30	29	4	40			0
33	31	5	50	33	5	60	35	5	70	37	5	80	38	5	90
34	38	4	110	39	4	120	40	4	130	41	4	140	42	4	150
35	22	3	10	23	4	20	24	4	30	25	4	40	26	4	50
36	31	4	60	32	4	70	33	4	80	34	4	90	35	4	100
37	23	3	10	24	4	20	25	4	30	26	4	40	27	4	50
38	31	4	55	32	4	65	34	4	75	35	4	85	37	4	95
39	39	4	100	40	4	110	41	4	120	42	4	130	43	4	140
40	22	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40			50
41	31	5	60	33	5	70	35	5	80	36	5	90	37	5	100
42	40	5	110	40	5	120	42	5	130	43	5	140	44	5	150
43	21	4	10	23	4	20	25	5	30	27	5	40			0
44	29	5	50	32	5	60	33	5	70	35	5	80	37	5	90
45	38	4	100	39	4	115	40	4	130	41	4	140	42	4	150
46	43	4	160	43	4	170	43	4	185	0	0	200	0	0	215
47	27	4	10	28,1	4	20	29,3	4	30	30,6	4	40			0
48	34,5	4	60	36,2	4	70	38	4	80	39,2	4	90			0
49	41,5	4	110	41,9	4	120	42,6	4	130	43,4	4	140	44,7	4	150
50	25	4	10	26	4	20	28	4	30	30	4	40			0
51	32	4	50	33	4	60	35	5	70	36	5	85	38	5	100

Anexa IV.6.1.2. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F2), secțiunea 240x270mm

Nr.crt.	Diferența de temperatură [°C] în cristalizor pe firul 2 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	26	3	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40			0
2	33,6	4	60	35,5	4	70	37,5	4	80	39,4	4	90	40,8	4	100
3	26	4	10	28	4	20	29	4	30	31	4	40	32	4	50
4	34	4	60	35	4	70	37	4	80	38	4	90	0	0	0
5	22	4	10	23	4	20	24	4	30	25	5	40			0
6	31	4	50	32	4	60	33	4	70	35	4	80	35	4	90
7	23	4	10	25	4	20	27	4	30	28	4	40			0
8	32	4	60	33	4	70	35	4	80	36	4	90			0
9	25	4	10	26	4	20	28	4	30	29	4	40	29	5	50
10	32	4	60	33	4	70	35	4	80	36	4	90	37	5	105
11	38	4	120	39	4	130	40	4	140	41	5	150	41	5	160
12	22	4	10	23	4	20	26	4	30	27	4	40			0
13	29	4	60	33	5	70	35	5	80	37	4	90			0
14	39	4	110	40	4	120	41	4	130	42	4	140	43	4	150
15	25	2	10	26	3	20	27	4	30	29	4	40	30	4	50
16	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	90	38	4	100
17	26	3	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40	30	4	50
18	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	95	39	4	120
19	21	4	10	23	4	20	24	4	30	26	4	40	0	0	0
20	29	5	55	31	4	65	32	4	75	34	4	85	35	4	90
21	22,5	4	10	23,9	4	20	25	4	30	27	4	40	0	0	0
22	31	4	60	32	4	70	33,8	4	80	35	4	90	36,3	4	100
23	22,3	4	10	23,8	4	20	25,3	4	30	27,3	4	40	0	0	0
24	32	4	60	33	4	70	34	4	80	36	4	90	0	0	0
25	39	4	100	40	4	110	42	4	120	43	4	130	44	4	140
26	24	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40	27	4	50
27	31	5	60	32	4	70	34	4	80	34	4	90	0	0	0
28	39	4	110	41	4	120	42	4	130	42,5	4	140	0	0	0
29	18,7	4	10	20,9	4	20	22,9	4	30	25,5	4	40	0	0	0
30	28,7	4	50	30,5	4	60	32,1	4	70	34,1	4	80	35,7	4	85
31	36,7	4	95	37,6	4	105	38,5	4	115	39,8	4	125	41,4	5	138
32	23	4	10	24	4	20	27	4	30	29	4	40	0	0	0
33	31	5	50	33	5	60	35	5	70	37	5	80	38	5	90
34	38	4	110	39	4	120	40	4	130	41	4	140	42	4	150
35	22	3	10	23	4	20	24	4	30	25	4	40	26	4	50
36	31	4	60	32	4	70	33	4	80	34	4	90	35	4	100
37	23	3	10	24	4	20	25	4	30	26	4	40	27	4	50
38	31	4	55	32	4	65	34	4	75	35	4	85	37	4	95
39	39	4	100	40	4	110	41	4	120	42	4	130	43	4	140
40	22	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40	0	0	50
41	31	5	60	33	5	70	35	5	80	36	5	90	37	5	100
42	40	5	110	40	5	120	42	5	130	43	5	140	44	5	150
43	21	4	10	23	4	20	25	5	30	27	5	40	0	0	0
44	29	5	50	32	5	60	33	5	70	35	5	80	37	5	90
45	38	4	100	39	4	115	40	4	130	41	4	140	42	4	150
46	43	4	160	43	4	170	43	4	185	42	4	200	42	4	215
47	27	4	10	28,1	4	20	29,3	4	30	30,6	4	40	0	0	0
48	34,5	4	60	36,2	4	70	38	4	80	39,2	4	90	0	0	0
49	41,5	4	110	41,9	4	120	42,6	4	130	43,4	4	140	44,7	4	150
50	25	4	10	26	4	20	28	4	30	30	4	40	0	0	0
51	32	4	50	33	5	60	35	5	70	36	5	85	38	5	100

Anexa IV.6.1.3. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F3), secțiunea 240x270mm

Nr.crt.	Diferența de temperatura [°C]. în cristalizor pe firul 3 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	26	4	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40			0
2	33,6	4	60	35,5	4	70	37,5	4	80	39,4	4	90	40,8	4	100
3	26	4	10	28	4	20	29	4	30	31	4	40	32	4	50
4	34	4	60	35	4	70	37	4	80	38	4	90	0	0	0
5	22	4	10	23	4	20	24	5	30	25	5	40			0
6	31	5	50	32	5	60	33	5	70	35	5	80	35	4	90
7	23	4	10	25	4	20	27	4	30	28	4	40			0
8	32	4	60	33	4	70	35	4	80	36	4	90			0
9	25	4	10	26	4	20	28	4	30	29	4	40	29	4	50
10	32	4	60	33	5	70	35	4	80	36	5	90	37	5	105
11	38	5	120	39	5	130	40	5	140	41	5	150	41	4	160
12	22	4	10	23	4	20	26	4	30	27	4	40			0
13	29	4	60	33	5	70	35	4	80	37	4	90			0
14	39	4	110	40	4	120	41	4	130	42	4	140	43	4	150
15	25	2	10	26	3	20	27	4	30	29	4	40	30	4	50
16	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	90	38	4	100
17	26	3	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40	30	4	50
18	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	95	39	4	120
19	21	4	10	23	5	20	24	5	30	26	5	40	0	0	0
20	29	5	55	31	5	65	32	5	75	34	5	85	35	5	90
21	22,5	4	10	23,9	4	20	25	4	30	27	4	40	0	0	0
22	31	4	60	32	4	70	33,8	4	80	35	4	90	36,3	4	100
23	22,3	4	10	23,8	4	20	25,3	4	30	27,3	4	40	0	0	0
24	32	4	60	33	4	70	34	4	80	36	4	90	0	0	0
25	39	4	100	40	4	110	42	4	120	43	4	130	44	4	140
26	24	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40	27	4	50
27	31	4	60	32	4	70	34	4	80	34	4	90	0	0	0
28	39	4	110	41	4	120	42	4	130	42,5	4	140	0	0	0
29	18,7	4	10	20,9	5	20	22,9	5	30	25,5	4	40	0	0	0
30	28,7	5	50	30,5	5	60	32,1	5	70	34,1	4	80	35,7	4	85
31	36,7	4	95	37,6	4	105	38,5	5	115	39,8	5	125	41,4	5	138
32	23	4	10	24	4	20	27	5	30	29	5	40	0	0	0
33	31	5	50	33	5	60	35	5	70	37	5	80	38	5	90
34	38	4	110	39	5	120	40	5	130	41	5	140	42	4	150
35	22	3	10	23	4	20	24	4	30	25	4	40	26	4	50
36	31	4	60	32	4	70	33	4	80	34	4	90	35	4	100
37	23	3	10	24	4	20	25	4	30	26	4	40	27	4	50
38	31	4	55	32	4	65	34	4	75	35	4	85	37	4	95
39	39	4	100	40	4	110	41	4	120	42	4	130	43	4	140
40	22	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40	0	0	50
41	31	5	60	33	5	70	35	5	80	36	5	90	37	5	100
42	40	5	110	40	5	120	42	5	130	43	5	140	44	5	150
43	21	4	10	23	5	20	25	5	30	27	5	40	0	0	0
44	29	5	50	32	5	60	33	5	70	35	5	80	37	5	90
45	38	4	100	39	4	115	40	5	130	41	5	140	42	4	150
46	43	4	160	43	4	170	43	4	185	42	4	200	42	4	215
47	27	4	10	28,1	4	20	29,3	4	30	30,6	4	40	0	0	0
48	34,5	4	60	36,2	5	70	38	5	80	39,2	5	90	0	0	0
49	41,5	5	110	41,9	5	120	42,6	5	130	43,4	4	140	44,7	4	150
50	25	4	10	26	4	20	28	5	30	30	5	40	0	0	0
51	32	4	50	33	4	60	35	5	70	36	5	85	38	5	100

Anexa IV.6.1.4. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F4), secțiunea 240x270mm

Nr.crt.	Diferența de temperatura [°C], în cristalizor pe firul 4 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	26	4	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40			0
2	33,6	4	60	35,5	4	70	37,5	4	80	39,4	4	90	40,8	4	100
3	26	3	10	28	4	20	29	4	30	31	4	40	32	4	50
4	34	4	60	35	4	70	37	4	80	38	4	90	0	0	0
5	22	4	10	23	4	20	24	5	30	25	5	40			0
6	31	5	50	32	5	60	33	5	70	35	4	80	35	4	90
7	23	4	10	25	4	20	27	4	30	28	4	40			0
8	32	4	60	33	4	70	35	4	80	36	4	90			0
9	25	4	10	26	4	20	28	4	30	29	4	40	29	4	50
10	32	4	60	33	5	70	35	4	80	36	5	90	37	5	105
11	38	5	120	39	4	130	40	4	140	41	4	150	41	4	160
12	22	4	10	23	4	20	26	4	30	27	4	40			0
13	29	4	60	33	5	70	35	4	80	37	4	90			0
14	39	4	110	40	4	120	41	4	130	42	4	140	43	4	150
15	25	2	10	26	3	20	27	4	30	29	4	40	30	4	50
16	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	90	38	4	100
17	26	3	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40	30	4	50
18	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	95	39	4	120
19	21	4	10	23	5	20	24	5	30	26	5	40	0	0	0
20	29	5	55	31	5	65	32	5	75	34	5	85	35	4	90
21	22,5	4	10	23,9	4	20	25	4	30	27	4	40	0	0	0
22	31	4	60	32	4	70	33,8	4	80	35	4	90	36,3	4	100
23	22,3	4	10	23,8	4	20	25,3	4	30	27,3	4	40	0	0	0
24	32	4	60	33	4	70	34	4	80	36	4	90	0	0	0
25	39	4	100	40	4	110	42	4	120	43	4	130	44	4	140
26	24	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40	27	4	50
27	31	4	60	32	4	70	34	4	80	34	4	90	0	0	0
28	39	4	110	41	4	120	42	4	130	42,5	4	140	0	0	0
29	18,7	4	10	20,9	5	20	22,9	5	30	25,5	4	40	0	0	0
30	28,7	5	50	30,5	5	60	32,1	5	70	34,1	4	80	35,7	4	85
31	36,7	4	95	37,6	4	105	38,5	5	115	39,8	5	125	41,4	5	138
32	23	4	10	24	4	20	27	5	30	29	5	40	0	0	0
33	31	5	50	33	5	60	35	5	70	37	5	80	38	5	90
34	38	4	110	39	4	120	40	4	130	41	4	140	42	4	150
35	22	3	10	23	4	20	24	4	30	25	4	40	26	4	50
36	31	4	60	32	4	70	33	4	80	34	4	90	35	4	100
37	23	3	10	24	4	20	25	4	30	26	4	40	27	4	50
38	31	4	55	32	4	65	34	4	75	35	4	85	37	4	95
39	39	4	100	40	4	110	41	4	120	42	4	130	43	4	140
40	22	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40	0	0	50
41	31	5	60	33	5	70	35	5	80	36	5	90	37	5	100
42	40	5	110	40	5	120	42	5	130	43	5	140	44	5	150
43	21	5	10	23	5	20	25	5	30	27	5	40	0	0	0
44	29	5	50	32	5	60	33	5	70	35	5	80	37	5	90
45	38	4	100	39	4	115	40	4	130	41	4	140	42	4	150
46	43	4	160	43	4	170	43	4	185	42	4	200	42	4	215
47	27	4	10	28,1	4	20	29,3	4	30	30,6	4	40	0	0	0
48	34,5	4	60	36,2	5	70	38	5	80	39,2	5	90	0	0	0
49	41,5	4	110	41,9	4	120	42,6	4	130	43,4	4	140	44,7	4	150
50	25	5	10	26	5	20	28	5	30	30	4	40	0	0	0
51	32	4	50	33	4	60	35	5	70	36	5	85	38	5	100

Anexa IV.6.1.5. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F5), secțiunea 240x270mm

Nr.crt.	Diferența de temperatura [°C]. în cristalizor pe firul 5 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	26	4	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40			0
2	33,6	4	60	35,5	4	70	37,5	4	80	39,4	4	90	40,8	4	100
3	26	3	10	28	4	20	29	4	30	31	4	40	32	4	50
4	34	4	60	35	4	70	37	4	80	38	4	90	0	0	0
5	22	4	10	23	4	20	24	4	30	25	5	40			0
6	31	5	50	32	4	60	33	4	70	35	4	80	35	4	90
7	23	4	10	25	4	20	27	4	30	28	4	40			0
8	32	4	60	33	4	70	35	4	80	36	4	90			0
9	25	4	10	26	4	20	28	4	30	29	4	40	29	4	50
10	32	4	60	33	4	70	35	4	80	36	5	90	37	4	105
11	38	4	120	39	4	130	40	4	140	41	4	150	41	4	160
12	22	4	10	23	4	20	26	4	30	27	4	40			0
13	29	4	60	33	5	70	35	4	80	37	4	90			0
14	39	4	110	40	4	120	41	4	130	42	4	140	43	4	150
15	25	2	10	26	3	20	27	4	30	29	4	40	30	4	50
16	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	90	38	4	100
17	26	3	10	27	4	20	28	4	30	29	4	40	30	4	50
18	34	4	60	35	4	70	36	4	80	37	4	95	39	4	120
19	21	4	10	23	4	20	24	5	30	26	4	40	0	0	0
20	29	4	55	31	4	65	32	4	75	34	4	85	35	4	90
21	22,5	4	10	23,9	4	20	25	4	30	27	4	40	0	0	0
22	31	4	60	32	4	70	33,8	4	80	35	4	90	36,3	4	100
23	22,3	4	10	23,8	4	20	25,3	4	30	27,3	4	40	0	0	0
24	32	4	60	33	4	70	34	4	80	36	4	90	0	0	0
25	39	4	100	40	4	110	42	4	120	43	4	130	44	4	140
26	24	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40	27	4	50
27	31	4	60	32	4	70	34	4	80	34	4	90	0	0	0
28	39	4	110	41	4	120	42	4	130	42,5	4	140	0	0	0
29	18,7	4	10	20,9	5	20	22,9	5	30	25,5	4	40	0	0	0
30	28,7	5	50	30,5	5	60	32,1	5	70	34,1	4	80	35,7	4	85
31	36,7	4	95	37,6	4	105	38,5	5	115	39,8	5	125	41,4	5	138
32	23	4	10	24	4	20	27	5	30	29	5	40	0	0	0
33	31	5	50	33	5	60	35	5	70	37	5	80	38	5	90
34	38	4	110	39	4	120	40	4	130	41	4	140	42	4	150
35	22	3	10	23	4	20	24	4	30	25	4	40	26	4	50
36	31	4	60	32	4	70	33	4	80	34	4	90	35	4	100
37	23	3	10	24	4	20	25	4	30	26	4	40	27	4	50
38	31	4	55	32	4	65	34	4	75	35	4	85	37	4	95
39	39	4	100	40	4	110	41	4	120	42	4	130	43	4	140
40	22	4	10	24	4	20	25	4	30	27	4	40	0	0	50
41	31	5	60	33	5	70	35	5	80	36	5	90	37	5	100
42	40	5	110	40	5	120	42	5	130	43	5	140	44	5	150
43	21	5	10	23	4	20	25	5	30	27	5	40	0	0	0
44	29	5	50	32	5	60	33	5	70	35	5	80	37	5	90
45	38	4	100	39	4	115	40	4	130	41	4	140	42	4	150
46	43	4	160	43	4	170	43	4	185	42	4	200	42	4	215
47	27	4	10	28,1	4	20	29,3	4	30	30,6	4	40	0	0	0
48	34,5	4	60	36,2	5	70	38	5	80	39,2	5	90	0	0	0
49	41,5	4	110	41,9	4	120	42,6	4	130	43,4	4	140	44,7	4	150
50	25	4	10	26	5	20	28	5	30	30	4	40	0	0	0
51	32	4	50	33	4	60	35	5	70	36	5	85	38	5	100

Anexa IV.6.2.1. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F1), secțiunea $\phi 150\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul I la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	20	7	10	20	8	20	22	8	30	24	8	50	28	8	80
2	22	7	10	23	7	20	25	7	35	28	7	55	29	7	70
3	20	4	10	21	6	20	22	7	30	26	7	45	28	7	60
4	30	7	80	33	8	100	34	7	110	35	7	120	36	7	140
5	20,5	7	10	21,9	8	20	24,1	7	30	25,1	7	40	26	7	60
6	24	6	10	25	9	25	27	9	40	29	9	55	31	9	75
7	33	9	90	34	9	105	35	9	120	35	9	150	34	9	200
8	21	6	10	21	7	20	23	7	30	26	7	50	29	8	80
9	23,1	7	10	23,9	8	20	24,5	8	30	26,2	7	40	28,6	7	60
10	21	6	10	21	7	20	22	7	35	25	8	50	25	8	65
11	30	8	75	31	8	90	33	8	105	34	8	120	36	8	135
12	19	4	10	19	7	20	21	7	30	24	7	40	26	7	50
13	32	7	60	33	7	70	34	7	80	35	8	90	36	8	100
14	24	7	15	26	8	30	28	8	40	30	8	50	32	8	60
15	33	8	80	35	8	90	36	8	100	37	8	120	39	8	150
16	25	7	10	26,8	7	20	28,2	7	30	29,8	7	40	31,1	7	50
17	33,7	8	70	34,7	8	80	35,3	8	90	36	8	110	36,9	8	125
18	21,7	7	10	22,9	8	20	24,6	8	30	25,9	8	40	28,3	8	60
19	29,5	8	70	30,2	8	80	32	8	90	32	8	105	34	8	130
20	20	7	10	21	7	20	24	7	35	25	8	45	27	7	60
21	29	7	70	31	8	80	33	7	100	34	7	110	35	7	130
22	23	6	10	25	7	20	28	7	40	29	7	50	30	7	60
23	23	7	10	25	7	20	28	7	35	29	7	45	32	7	65
24	24	5	10	26	7	25	27	7	45	29	7	60	30	7	70
25	31	7	85	32	7	100	33	7	120	35	7	145	37	7	170
26	23	6	10	24	5	20	25	7	30	27	7	45	30	7	60
27	32	7	80	33	7	90	34	7	110	35	7	130	36	7	160
28	24	7	10	25	7	20	26	7	35	27	7	50	30	7	65
29	32	7	85	34	7	95	35	7	115	37	7	135	37	7	170
30	23	6	10	24	7	20	26	7	30	28	7	45	30	7	75
31	31	7	80	32	7	87	33	7	100	33	7	125	34	7	150
32	23	7	10	24	7	20	26	6	30	29	7	45	31	7	60
33	34	7	70	36	7	80	38	7	90	39	7	115	41	7	150
34	27	7	10	30	7	30	33	7	45	33	7	55	33	7	65
35	33	7	80	34	8	95	34	7	110	35	8	125	36	8	135
36	19	7	10	20	7	20	22	7	30	24	7	40	25	7	50
37	28	7	60	29	7	70	30	7	90	31	7	120	32	7	140
38	21	7	10	23	7	25	25,6	7	40	27,7	7	60	29,4	7	80
39	30,6	8	100	31,6	8	120	32,5	8	135	33	8	150	33,5	8	165
40	20	7	10	21	7	20	23	7	30	24	7	40	25	7	60
41	27	7	70	28	7	80	30	8	100	31	8	120	31	7	145
42	32	7	160	33	7	180	33	7	200	33	7	220	33	7	240
43	20	6	10	21	8	25	23	8	35	25	8	45	25	8	60
44	27	8	70	28	8	85	30	8	105	31	8	125	32	7	145
45	26	6	10	26	7	20	27	7	30	30	7	50	31	7	70
46	34	7	90	35	7	100	36	7	110	37	7	130	38	7	150
47	38	7	160	38	7	180	39	7	200	38	7	220	36	7	260
48	36	6	280	35	7	300	34	7	315	33	7	340	33	7	360
49	22,3	6	10	23,7	7	20	25,7	7	35	27,9	7	50	29,1	7	65
50	31,8	7	85	32,8	7	100	33,6	7	115	34,9	7	130	35,7	7	145
51	36,9	7	85	37,1	7	100	37,5	7	115	38	7	130	38,3	7	145
52	38,6	7	260	38,8	7	275	39,1	7	290	39	7	305	38,9	7	320

Anexa IV.6.2.2. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F2), secțiunea $\phi 150\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul 2 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	20	7	10	20	8	20	22	8	30	24	8	50	28	8	80
2	22	7	10	23	7	20	25	7	35	28	7	55	29	7	70
3	20	4	10	21	6	20	22	7	30	26	7	45	28	7	60
4	30	7	80	33	8	100	34	8	110	0	0	120	0	0	140
5	20,5	7	10	21,9	8	20	24,1	8	30	25,1	8	40	26	7	60
6	24	6	10	25	9	25	27	9	40	29	9	55	31	9	75
7	33	9	90	34	9	105	35	9	120	35	8	150	0	0	200
8	21	6	10	21	7	20	23	7	30	26	7	50	29	7	80
9	23,1	7	10	23,9	7	20	24,5	8	30	26,2	7	40	28,6	7	60
10	21	6	10	21	7	20	22	7	35	25	7	50	25	8	65
11	30	8	75	31	8	90	33	8	105	34	8	120	0	0	135
12	19	4	10	19	7	20	21	7	30	24	7	40	26	7	50
13	32	7	60	33	7	70	34	7	80	35	8	90	36	7	100
14	24	7	15	26	8	30	28	8	40	30	8	50	32	8	60
15	33	7	80	35	8	90	36	8	100	37	8	120	39	7	150
16	25	7	10	26,8	7	20	28,2	7	30	29,8	7	40	31,1	7	50
17	33,7	8	70	34,7	8	80	35,3	8	90	36	8	110	36,9	8	125
18	21,7	7	10	22,9	8	20	24,6	8	30	25,9	8	40	28,3	8	60
19	29,5	8	70	30,2	8	80	32	8	90	32	8	105	34	8	130
20	20	7	10	21	7	20	24	7	35	25	8	45	27	7	60
21	29	8	70	31	7	80	33	7	100	34	7	110	35	7	130
22	23	6	10	25	6	20	28	7	40	29	7	50	30	7	60
23	23	7	10	25	7	20	28	7	35	29	7	45	32	7	65
24	24	5	10	26	6	25	27	7	45	29	7	60	30	7	70
25	31	7	85	32	7	100	33	7	120	35	7	145	37	7	170
26	23	6	10	24	7	20	25	7	30	27	7	45	30	7	60
27	32	7	80	33	7	90	34	7	110	0	0	130	0	0	160
28	24	7	10	25	7	20	26	7	35	27	7	50	30	7	65
29	32	7	85	34	7	95	35	7	115	37	7	135	37	7	170
30	23	6	10	24	7	20	26	8	30	28	8	45	30	8	75
31	31	7	80	32	7	87	33	7	100	33	7	125	34	7	150
32	23	6	10	24	6	20	26	6	30	29	7	45	31	7	60
33	34	7	70	36	7	80	38	7	90	39	7	115	41	7	150
34	27	7	10	30	7	30	33	7	45	33	7	55	33	7	65
35	33	7	80	34	8	95	34	7	110	35	7	125	36	7	135
36	19	6	10	20	6	20	22	6	30	24	6	40	25	6	50
37	28	7	60	29	7	70	30	7	90	31	7	120	32	7	140
38	21	7	10	23	7	25	25,6	7	40	27,7	7	60	29,4	7	80
39	30,6	8	100	31,6	8	120	32,5	8	135	33	8	150	33,5	8	165
40	20	7	10	21	7	20	23	7	30	24	7	40	25	7	60
41	27	7	70	28	7	80	30	8	100	31	8	120	31	7	145
42	32	7	160	33	8	180	33	7	200	33	7	220	33	8	240
43	20	6	10	21	8	25	23	8	35	25	8	45	25	8	60
44	27	7	70	28	7	85	30	8	105	31	8	125	32	7	145
45	26	7	10	26	7	20	27	7	30	30	7	50	31	7	70
46	34	7	90	35	7	100	36	7	110	37	7	130	38	7	150
47	38	7	160	38	7	180	39	7	200	38	7	220	36	7	260
48	0	0	280	0	0	300	0	0	315	0	0	340	0	0	360
49	22,3	6	10	23,7	7	20	25,7	7	35	27,9	7	50	29,1	7	65
50	31,8	7	85	32,8	7	100	33,6	7	115	34,9	7	130	35,7	7	145
51	36,9	7	85	37,1	7	100	37,5	7	115	38	7	130	38,3	7	145
52	38,6	7	260	38,8	7	275	39,1	7	290	39	7	305	38,9	7	320

Anexa IV.6.2.3. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F3), secțiunea $\phi 150\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul 3 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	20	7	10	20	8	20	22	8	30	24	8	50	28	8	80
2	22	7	10	23	7	20	25	7	35	0	0	55	0	0	70
3	20	4	10	21	6	20	22	7	30	26	7	45	28	7	60
4	30	8	80	33	8	100	34	7	110	35	7	120	36	7	140
5	20,5	8	10	21,9	8	20	24,1	8	30	25,1	8	40	26	7	60
6	24	6	10	25	9	25	27	9	40	29	9	55	31	9	75
7	33	9	90	34	9	105	0	0	120	0	0	150	0	0	200
8	21	6	10	21	7	20	23	7	30	26	7	50	29	7	80
9	23,1	7	10	23,9	7	20	24,5	7	30	26,2	7	40	28,6	7	60
10	21	6	10	21	7	20	22	7	35	25	7	50	25	7	65
11	30	7	75	31	8	90	33	7	105	34	8	120	36	8	135
12	19	4	10	19	7	20	21	7	30	24	7	40	26	7	50
13	32	7	60	33	7	70	34	7	80	35	8	90	36	8	100
14	24	6	15	26	8	30	28	8	40	30	7	50	32	7	60
15	33	7	80	35	8	90	36	8	100	37	8	120	39	8	150
16	25	7	10	26,8	7	20	28,2	7	30	29,8	7	40	31,1	7	50
17	33,7	8	70	34,7	8	80	35,3	8	90	36	8	110	36,9	8	125
18	21,7	7	10	22,9	8	20	24,6	8	30	25,9	8	40	28,3	8	60
19	29,5	8	70	30,2	8	80	0	0	90	0	0	105	0	0	130
20	20	7	10	21	7	20	24	8	35	25	8	45	27	7	60
21	29	8	70	31	8	80	33	7	100	34	7	110	35	7	130
22	23	6	10	25	6	20	28	7	40	29	7	50	30	7	60
23	23	7	10	25	7	20	28	7	35	29	7	45	32	7	65
24	24	6	10	26	7	25	27	7	45	29	7	60	30	7	70
25	31	7	85	32	7	100	33	7	120	35	7	145	37	7	170
26	23	6	10	24	7	20	25	7	30	27	7	45	30	7	60
27	32	7	80	33	7	90	34	7	110	35	7	130	36	7	160
28	24	7	10	25	7	20	26	7	35	27	7	50	30	7	65
29	32	7	85	34	7	95	35	7	115	37	7	135	37	7	170
30	23	6	10	24	7	20	26	7	30	28	7	45	30	7	75
31	31	7	80	32	7	87	33	7	100	33	7	125	34	7	150
32	23	6	10	24	6	20	26	6	30	29	7	45	31	7	60
33	34	7	70	36	7	80	38	7	90	39	7	115	41	7	150
34	27	7	10	30	7	30	33	7	45	33	7	55	33	7	65
35	33	7	80	34	8	95	34	8	110	35	8	125	36	8	135
36	19	7	10	20	7	20	22	7	30	24	6	40	25	6	50
37	28	7	60	29	7	70	30	7	90	31	7	120	32	7	140
38	21	8	10	23	8	25	25,6	8	40	27,7	8	60	29,4	7	80
39	30,6	8	100	31,6	8	120	32,5	8	135	33	8	150	33,5	8	165
40	20	7	10	21	7	20	23	7	30	24	7	40	25	7	60
41	27	7	70	28	7	80	30	8	100	31	8	120	31	7	145
42	32	7	160	33	8	180	33	7	200	33	7	220	33	8	240
43	20	6	10	21	8	25	23	8	35	25	8	45	25	8	60
44	27	8	70	28	8	85	30	8	105	31	8	125	32	8	145
45	26	6	10	26	7	20	27	7	30	30	7	50	31	7	70
46	34	7	90	35	7	100	36	7	110	37	7	130	38	7	150
47	38	7	160	38	7	180	39	7	200	38	7	220	36	7	260
48	36	7	280	35	6	300	34	7	315	33	7	340	33	7	360
49	22,3	6	10	23,7	7	20	25,7	7	35	27,9	7	50	29,1	7	65
50	31,8	7	85	32,8	7	100	33,6	7	115	34,9	7	130	35,7	7	145
51	36,9	7	85	37,1	7	100	37,5	7	115	38	7	130	38,3	7	145
52	38,6	7	260	38,8	7	275	39,1	7	290	39	7	305	38,9	7	320

Anexa IV.6.2.4. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F4), secțiunea $\phi 150\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul 4 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	0	0	10	0	0	20	0	0	30	0	0	50	0	0	80
2	22	7	10	23	7	20	25	7	35	28	7	55	29	7	70
3	20	4	10	21	6	20	22	7	30	26	7	45	28	7	60
4	30	8	80	33	8	100	34	8	110	35	7	120	36	7	140
5	20,5	8	10	21,9	8	20	24,1	8	30	25,1	8	40	26	7	60
6	0	0	10	0	0	25	0	0	40	0	0	55	0	0	75
7	0	0	90	0	0	105	0	0	120	0	0	150	0	0	200
8	21	6	10	21	7	20	23	7	30	26	7	50	29	7	80
9	23,1	7	10	23,9	7	20	24,5	7	30	26,2	7	40	28,6	7	60
10	21	7	10	21	7	20	22	7	35	25	7	50	25	7	65
11	30	7	75	31	7	90	33	7	105	34	8	120	36	8	135
12	19	4	10	19	7	20	21	7	30	24	7	40	26	7	50
13	32	7	60	33	7	70	34	7	80	35	7	90	36	7	100
14	24	8	15	26	8	30	28	8	40	30	8	50	32	7	60
15	33	7	80	35	7	90	36	7	100	37	7	120	39	7	150
16	25	7	10	26,8	7	20	28,2	7	30	29,8	7	40	31,1	7	50
17	33,7	8	70	34,7	8	80	35,3	8	90	36	8	110	36,9	8	125
18	21,7	7	10	22,9	8	20	24,6	8	30	25,9	8	40	28,3	8	60
19	29,5	8	70	30,2	8	80	32	8	90	32	8	105	34	8	130
20	20	7	10	21	7	20	24	7	35	25	7	45	27	7	60
21	29	8	70	31	7	80	33	7	100	34	7	110	35	7	130
22	23	6	10	25	6	20	28	7	40	29	7	50	30	7	60
23	23	7	10	25	7	20	28	7	35	29	7	45	32	7	65
24	24	6	10	26	7	25	27	7	45	29	7	60	30	7	70
25	31	7	85	32	7	100	33	7	120	35	7	145	37	6	170
26	23	6	10	24	7	20	25	7	30	27	7	45	30	7	60
27	32	7	80	33	7	90	34	7	110	35	7	130	36	7	160
28	24	7	10	25	7	20	26	7	35	27	7	50	30	7	65
29	32	7	85	34	7	95	35	7	115	0	0	135	0	0	170
30	23	6	10	24	7	20	26	7	30	28	6	45	30	7	75
31	31	7	80	32	7	87	33	7	100	33	6	125	34	7	150
32	23	6	10	24	6	20	26	6	30	29	7	45	31	7	60
33	34	7	70	36	7	80	38	7	90	39	7	115	41	7	150
34	27	7	10	30	7	30	33	7	45	33	7	55	33	7	65
35	33	7	80	34	7	95	34	7	110	35	7	125	36	7	135
36	19	6	10	20	7	20	22	7	30	24	7	40	25	6	50
37	28	7	60	29	7	70	30	7	90	31	7	120	32	7	140
38	0	0	10	0	0	25	0	0	40	0	0	60	0	0	80
39	0	0	100	0	0	120	0	0	135	0	0	150	0	0	165
40	20	7	10	0	0	20	0	0	30	0	0	40	0	0	60
41	0	0	70	0	0	80	0	0	100	0	0	120	0	0	145
42	0	0	160	0	0	180	0	0	200	0	0	220	0	0	240
43	20	6	10	21	8	25	23	8	35	25	8	45	25	8	60
44	27	7	70	28	7	85	30	7	105	31	7	125	32	7	145
45	26	6	10	26	6	20	27	7	30	30	7	50	31	7	70
46	34	7	90	35	6	100	36	7	110	37	6	130	38	6	150
47	0	0	160	0	0	180	0	0	200	0	0	220	0	0	260
48	0	0	280	0	0	300	0	0	315	0	0	340	0	0	360
49	22,3	6	10	23,7	7	20	25,7	7	35	27,9	7	50	29,1	7	65
50	31,8	7	85	32,8	7	100	33,6	7	115	34,9	7	130	35,7	7	145
51	36,9	7	85	37,1	7	100	37,5	7	115	38	7	130	38,3	7	145
52	38,6	7	260	38,8	7	275	39,1	7	290	39	7	305	38,9	7	320

Anexa IV.6.2.5. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F5), secțiunea $\phi 150\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul 5 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	20	7	10	20	8	20	22	8	30	24	8	50	28	7	80
2	22	7	10	23	7	20	25	7	35	28	7	55	29	7	70
3	20	4	10	21	6	20	22	7	30	26	7	45	28	7	60
4	30	7	80	33	8	100	34	7	110	35	7	120	36	7	140
5	20,5	7	10	21,9	8	20	24,1	7	30	25,1	7	40	26	7	60
6	24	6	10	25	9	25	27	8	40	29	9	55	31	9	75
7	33	8	90	0	0	105	0	0	120	0	0	150	0	0	200
8	21	6	10	21	7	20	23	7	30	26	7	50	0	0	80
9	23,1	8	10	23,9	8	20	24,5	8	30	26,2	7	40	28,6	7	60
10	21	7	10	21	7	20	22	7	35	25	7	50	25	7	65
11	30	7	75	31	8	90	33	8	105	34	8	120	36	8	135
12	19	4	10	19	7	20	21	7	30	24	7	40	26	7	50
13	32	7	60	33	7	70	34	7	80	35	7	90	36	7	100
14	24	8	15	26	8	30	28	8	40	30	8	50	32	7	60
15	33	7	80	35	8	90	36	7	100	37	7	120	39	7	150
16	25	7	10	26,8	7	20	28,2	7	30	29,8	7	40	31,1	7	50
17	33,7	8	70	34,7	8	80	35,3	8	90	36	8	110	36,9	8	125
18	21,7	7	10	22,9	8	20	24,6	8	30	25,9	8	40	28,3	8	60
19	29,5	8	70	30,2	8	80	32	8	90	32	8	105	0	0	130
20	20	7	10	21	7	20	24	7	35	25	8	45	27	7	60
21	29	7	70	31	7	80	33	7	100	34	7	110	35	7	130
22	23	6	10	25	6	20	28	7	40	29	7	50	30	7	60
23	23	7	10	25	7	20	28	7	35	29	7	45	32	7	65
24	0	0	10	0	0	25	0	0	45	0	0	60	0	0	70
25	0	0	85	0	0	100	0	0	120	0	0	145	0	0	170
26	23	6	10	24	7	20	25	7	30	27	7	45	30	7	60
27	32	7	80	33	7	90	34	7	110	35	6	130	36	7	160
28	24	7	10	25	7	20	26	7	35	27	7	50	30	7	65
29	32	7	85	34	7	95	35	7	115	37	7	135	37	7	170
30	23	6	10	24	7	20	26	8	30	28	7	45	30	7	75
31	31	7	80	32	7	87	33	7	100	33	6	125	34	7	150
32	23	6	10	24	6	20	26	6	30	29	7	45	31	7	60
33	34	7	70	36	7	80	38	7	90	39	7	115	41	7	150
34	27	7	10	30	7	30	33	7	45	33	7	55	33	7	65
35	33	7	80	34	7	95	34	7	110	35	7	125	36	7	135
36	19	6	10	20	6	20	22	6	30	24	7	40	25	6	50
37	28	7	60	29	7	70	30	7	90	31	7	120	32	6	140
38	21	7	10	23	8	25	25,6	8	40	27,7	8	60	29,4	8	80
39	30,6	8	100	31,6	8	120	32,5	8	135	33	7	150	33,5	8	165
40	20	7	10	21	7	20	23	7	30	24	7	40	25	7	60
41	27	7	70	28	7	80	30	7	100	31	7	120	31	7	145
42	32	7	160	33	7	180	33	7	200	33	5	220	33	7	240
43	20	6	10	21	8	25	23	8	35	25	8	45	25	7	60
44	27	7	70	28	8	85	30	7	105	31	7	125	32	7	145
45	26	6	10	26	6	20	27	7	30	30	7	50	31	7	70
46	34	6	90	35	6	100	36	6	110	37	6	130	38	6	150
47	38	7	160	38	7	180	39	7	200	38	7	220	36	7	260
48	36	6	280	35	6	300	34	6	315	33	6	340	33	7	360
49	22,3	6	10	23,7	7	20	25,7	7	35	27,9	7	50	29,1	7	65
50	31,8	7	85	32,8	7	100	33,6	7	115	34,9	7	130	35,7	7	145
51	36,9	7	85	37,1	7	100	37,5	7	115	38	7	130	38,3	7	145
52	38,6	7	260	38,8	7	275	39,1	7	290	39	7	305	38,9	7	320

Anexa IV.6.3.1. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F1), secțiunea $\phi 180\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul 1 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	45	26	8	60
2	24,8	7,2	10	26,8	7,5	20	24	7,4	30	26	7,3	40	27	7,3	50
3	30	7,3	60	32	7,3	70	35	7,1	80	36	7,3	90	39	7	100
4	21	8	10	23	8	20	25	8	30	27	8	40	28	8	50
5	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
6	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
7	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
8	26	7	10	28	7	20	30	7	30	32	7	40	34	7	60
9	36	7	70	37	7	80	38	7	90	39	7	105	40	7	115
10	24,8	7,2	10	26,8	7,5	20	24	7,4	30	26	7,3	40	27	7,3	50
11	30	7,3	60	32	7,3	70	35	7,1	80	36	7,3	90	39	7	100
12	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
13	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
14	21	8	10	23	8	20	25	8	30	27	8	40	28	8	50
15	36	7	60	37	7	70	38	7	80	39	7	90	40	7	100
16	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
17	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
18	21	8	10	23	8	20	25	8	30	27	8	40	28	8	50
19	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
20	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	40	26	8	50

Anexa IV.6.3.2. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F2), secțiunea $\phi 180\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul 2 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	45	26	8	60
2	25	7,6	10	27,1	7,9	20	24	7,5	30	26	7,3	40	27	7,3	50
3	30	7,4	60	32	7,5	70	35	7,3	80	36	7,4	90	39	7	100
4	21	7	10	23	7	20	25	7	30	27	7	40	28	7	50
5	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
6	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
7	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
8	26	8	10	28	7	20	30	8	30	32	8	40	34	8	60
9	36	8	70	37	8	80	38	7	90	39	7	105	40	7	115
10	25	7,6	10	27,1	7,9	20	24	7,5	30	26	7,3	40	27	7,3	50
11	30	7,4	60	32	7,5	70	35	7,3	80	36	7,4	90	39	7	100
12	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
13	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
14	21	7	10	23	7	20	25	7	30	27	7	40	28	7	50
15	36	8	60	37	8	70	38	7	80	39	7	90	40	7	100
16	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
17	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
18	21	7	10	23	7	20	25	7	30	27	7	40	28	7	50
19	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
20	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	40	26	8	50

Anexa IV.6.3.3. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F3), secțiunea $\phi 180\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul 3 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	45	26	8	60
2	25	7,6	10	27,1	7,8	20	24	8,1	30	26	7,6	40	27	7,7	50
3	30	7,6	60	32	7,6	70	35	7,4	80	36	7,6	90	39	7,3	100
4	21	7	10	23	8	20	25	8	30	27	7	40	28	7	50
5	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
6	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
7	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
8	26	8	10	28	7	20	30	8	30	32	8	40	34	8	60
9	36	8	70	37	8	80	38	8	90	39	8	105	40	8	115
10	25	7,6	10	27,1	7,8	20	24	8,1	30	26	7,6	40	27	7,7	50
11	30	7,6	60	32	7,6	70	35	7,4	80	36	7,6	90	39	7,3	100
12	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
13	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
14	21	7	10	23	8	20	25	8	30	27	7	40	28	7	50
15	36	8	60	37	8	70	38	8	80	39	8	90	40	8	100
16	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
17	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
18	21	7	10	23	8	20	25	8	30	27	7	40	28	7	50
19	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
20	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	40	26	8	50

Anexa IV.6.3.4. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F4), secțiunea $\phi 180\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul 4 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	45	26	8	60
2	25,2	7,8	10	28	8,7	20	24	8,1	30	26	7,7	40	27	7,7	50
3	30	7,6	60	32	7,8	70	35	7,6	80	36	7,9	90	39	7,4	100
4	21	7	10	23	7	20	25	7	30	27	7	40	28	7	50
5	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
6	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
7	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
8	26	8	10	28	7	20	30	8	30	32	8	40	34	8	60
9	36	8	70	37	8	80	38	8	90	39	8	105	40	8	115
10	25,2	7,8	10	28	8,7	20	24	8,1	30	26	7,7	40	27	7,7	50
11	30	7,6	60	32	7,8	70	35	7,6	80	36	7,9	90	39	7,4	100
12	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
13	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
14	21	7	10	23	7	20	25	7	30	27	7	40	28	7	50
15	36	8	60	37	8	70	38	8	80	39	8	90	40	8	100
16	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
17	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
18	21	7	10	23	7	20	25	7	30	27	7	40	28	7	50
19	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
20	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	40	26	8	50

Anexa IV.6.3.5. Date privind temperatura apei de răcire din cristalizor (F5), secțiunea $\phi 180\text{mm}$

Nr. crt.	Diferența de temperatura [$^{\circ}\text{C}$], în cristalizor pe firul 5 la														
	T0	dT	τ	T1	dT	τ	T2	dT	τ	T3	dT	τ	T4	dT	τ
1	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	45	26	8	60
2	25,6	8,2	10	27,5	8,2	20	24	7,6	30	26	7,5	40	27	7,2	50
3	30	7	60	32	7,1	70	35	6,8	80	36	6,8	90	39	6,5	100
4	21	8	10	23	8	20	25	8	30	27	8	40	28	8	50
5	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
6	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
7	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
8	26	8	10	28	7	20	30	8	30	32	8	40	34	8	60
9	36	8	70	37	8	80	38	7	90	39	7	105	40	7	115
10	25,6	8,2	10	27,5	8,2	20	24	7,6	30	26	7,5	40	27	7,2	50
11	30	7	60	32	7,1	70	35	6,8	80	36	6,8	90	39	6,5	100
12	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
13	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
14	21	8	10	23	8	20	25	8	30	27	8	40	28	8	50
15	36	8	60	37	8	70	38	7	80	39	7	90	40	7	100
16	24,9	6	10	26,7	6	20	28,3	6	30	30,3	6	40	31,8	6	50
17	33,5	6	60	34,7	6	70	35,9	6	80	37,8	6	90	38,6	6	100
18	21	8	10	23	8	20	25	8	30	27	8	40	28	8	50
19	25	7	60	26,9	7	70	28,7	7	80	30,4	7	90	32,2	7	100
20	20	5	10	21	7	20	22	8	30	24	8	40	26	8	50

Anexa IV.7.1. Date referitoare la răcire secundară (secțiunea 240x270mm)

Nr.crt.	Presiune apă răcire secund. [bar]	Debit răcire secundară F1. [l/min]			Debit răcire secundară F2. [l/min]			Debit răcire secundară F3. [l/min]			Debit răcire secundară F4. [l/min]			Debit răcire secundară F5. [l/min]		
		z1	z2	z3	z1	z2	z3	z1	z2	z3	z1	z2	z3	z1	z2	z3
1	9,3	57	70	80	57	70	82	56	68	83	59	70	80	57	70	81
2	9,3	65	80	88	67	81	91	65	80	88	67	80	90	67	82	91
3	8,8	65	79	91	65	80	89	66	79	88	66	80	90	67	81	91
4	8,4	65	80	88	66	81	91	66	79	89	66	81	90	67	81	91
5	10,4	55	63	73	53	67	76	58	65	76	55	68	75	55	68	77
6	10,4	69	85	94	71	85	94	71	85	95	70	84	94	71	88	93
7	8,9	65	79	89	66	79	91	69	79	88	67	81	91	67	82	91
8	8,5	65	79	89	66	80	90	66	79	88	67	80	91	67	81	91
9	9,8	57	69	78	58	70	80	57	69	79	58	70	80	58	71	80
10	9,4	73	90	100	73	90	100	75	90	100	75	91	102	75	91	102
11	9,4	70	85	100	71	86	101	71	85	101	71	86	102	71	86	102
12	9,8	60	72	80	59	72	83	58	71	79	60	73	81	60	73	79
13	9,8	56	69	75	55	68	75	58	66	75	56	68	75	58	71	77
14	9,8	56	64	73	58	68	77	58	67	76	57	68	76	57	69	77
15	10,5	54	65	75	53	67	75	54	66	74	55	68	76	56	68	75
16	9,5	66	79	89	66	80	91	65	79	89	62	81	91	67	81	91
17	10,3	50	66	74	55	69	75	56	67	75	53	67	74	57	68	75
18	9,3	55	65	73	56	65	76	55	66	74	57	68	77	59	70	81
19	10,4	65	80	90	65	80	91	67	80	90	67	80	90	67	81	91
20	9,1	69	84	93	71	86	93	70	86	93	70	84	94	70	84	93
21	9,5	65	78	88	66	80	90	66	80	89	66	80	90	68	88	92
22	9	65	79	88	66	79	89	66	79	89	66	80	90	68	82	92
23	9,7	58	67	77	58	69	77	58	71	78	59	70	78	59	70	80
24	9,6	73	88	98	74	89	88	74	89	100	84	94	101	75	91	101
25	9,2	74	90	100	74	90	89	75	88	100	67	90	100	75	91	101
26	9,3	73	89	100	74	90	101	76	89	100	75	90	102	75	90	102
27	9,1	74	90	101	75	89	100	72	89	100	74	89	101	75	91	101
28	9,2	72	88	99	73	89	101	73	90	98	72	90	100	73	92	101
29	9,2	74	89	101	5	90	101	78	94	106	75	96	107	80	97	107
30	9,1	67	84	94	72	84	101	72	89	94	75	85	95	71	86	97
31	9,3	65	80	91	65	80	84	65	80	87	66	80	89	67	81	90
32	9,6	73	89	98	73	89	102	72	88	99	68	91	101	76	88	103
33	10,2	65	78	88	66	80	101	72	78	87	66	79	90	68	80	90
34	8	66	80	88	65	80	74	72	76	79	61	80	89	67	82	91
35	9,2	66	74	86	63	75	86	61	76	84	64	77	86	63	77	86
36	8,3	55	64	72	55	65	71	55	66	74	57	69	76	55	67	75
37	10,5	65	79	90	66	80	90	65	79	89	66	81	90	67	81	90
38	9,5	66	80	89	66	79	89	65	79	88	67	81	91	67	81	91
39	9,5	73	89	99	75	85	100	73	88	99	74	89	101	75	92	102
40	10,6	58	71	78	59	71	78	59	70	79	59	70	79	58	71	78
41	10,2	81	100	112	78	86	105	81	92	111	83	100	111	84	102	113
42	10,2	69	83	93	69	85	100	68	84	93	69	84	84	70	85	96
43	10,6	61	75	83	61	75	82	62	74	86	61	78	82	62	75	90
44	10,5	66	80	89	66	80	89	66	79	83	66	80	90	67	81	90
45	9,1	65	79	88	66	79	88	65	79	88	67	81	90	67	81	92
46	9,5	45	60	67	50	58	67	49	60	66	50	58	70	51	61	69
47	10	58	69	75	57	68	78	57	69	78	58	71	79	58	71	78
48	9,8	73	88	99	74	89	96	72	89	99	73	89	100	75	81	102
49	9,6	69	84	93	69	85	93	68	84	93	68	84	92	70	85	93
50	10,7	65	80	89	66	80	90	66	79	89	67	81	90	67	81	91
51	10,6	76	89	99	74	90	100	74	90	100	75	91	101	75	92	102

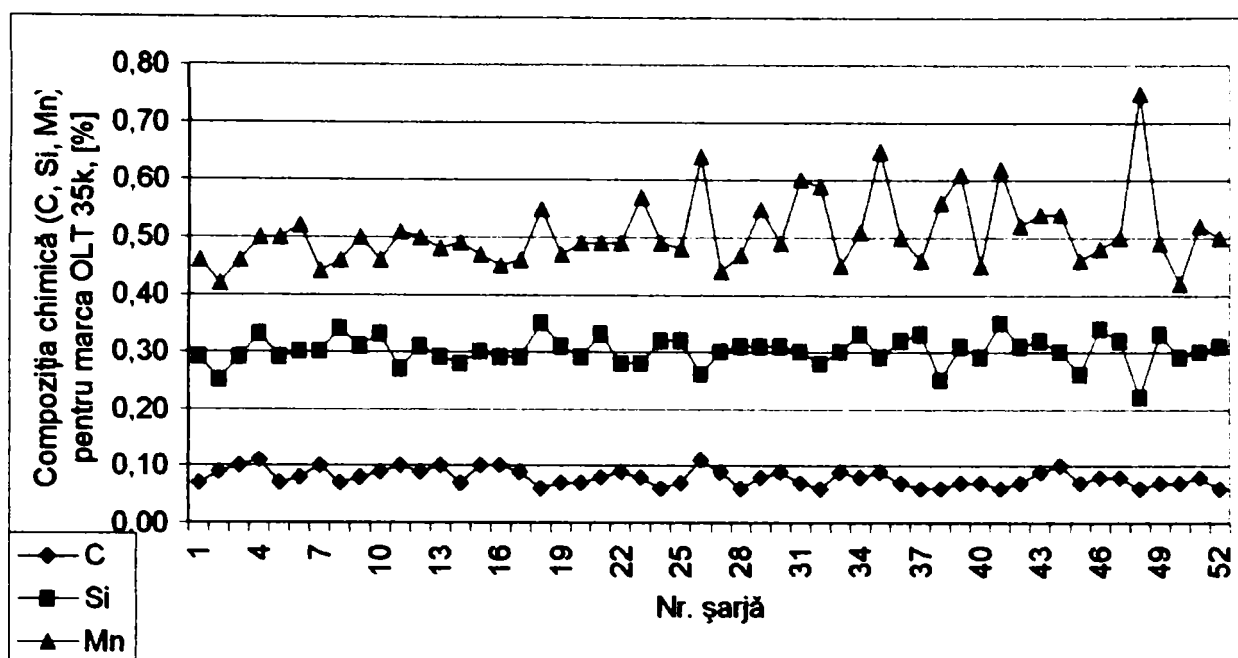
Anexa IV.7.2. Date referitoare la răcire secundară (secțiunea $\phi 150\text{mm}$)

Nr. crt.	Presiune apă răcire secund. [bar]	Debit răcire secundară F1, [l/min]			Debit răcire secundară F2, [l/min]			Debit răcire secundară F3, [l/min]			Debit răcire secundară F4, [l/min]			Debit răcire secundară F5, [l/min]		
		z1	z2	z3	z1	z2	z3	z1	z2	z3	z1	z2	z3	z1	z2	z3
1	8,5	49	70	62	51	71	61	52	72	60	0	0	0	52	70	62
2	8,5	50	71	58	49	70	57	50	70	58	48	70	60	50	70	58
3	8,5	51	70	52	50	71	52	71	70	52	50	70	50	50	70	52
4	8,5	51	71	62	51	70	60	52	71	60	52	72	61	52	72	61
5	8,5	52	73	61	52	71	61	52	71	61	53	71	63	53	72	61
6	8,5	57	80	67	57	80	68	58	81	68	0	0	0	60	83	78
7	8,5	55	80	64	57	77	66	56	78	67	0	0	0	57	81	66
8	8,5	51	72	44	50	70	60	51	72	61	50	72	63	52	72	62
9	8,5	54	75	66	54	75	64	55	77	65	55	75	64	54	78	64
10	8,5	51	70	54	48	70	52	49	70	58	50	71	52	50	70	58
11	8,5	54	75	64	54	76	64	51	76	64	55	74	64	54	75	64
12	8,5	50	71	50	50	70	63	50	60	52	50	70	40	50	70	35
13	8,5	57	78	67	56	77	80	55	79	67	56	78	59	56	79	67
14	8,5	52	72	61	53	71	61	52	71	61	53	73	61	52	73	61
15	8,5	51	71	62	51	72	61	52	71	62	51	72	61	52	72	61
16	8,5	52	71	64	53	71	60	52	71	60	50	71	61	51	74	61
17	8,6	57	78	65	56	79	66	57	79	66	58	78	66	57	79	66
18	8,4	51	71	60	52	70	62	53	72	61	52	72	61	52	72	60
19	8,2	51	72	64	51	73	61	51	72	63	52	73	64	51	73	62
20	8,5	50	70	57	50	69	56	50	70	56	50	70	55	50	72	56
21	8,5	54	73	62	54	75	63	56	75	63	56	73	64	56	77	62
22	8,5	50	70	49	51	69	50	50	70	50	49	70	52	50	69	52
23	8,5	60	84	73	61	84	73	61	85	74	60	84	74	60	85	74
24	8,5	50	70	58	50	70	59	50	70	59	50	70	58	0	0	0
25	8,4	54	76	65	54	74	64	54	75	64	54	75	64	0	0	0
26	8,5	50	71	50	50	72	51	50	70	50	50	70	50	49	69	53
27	8,5	51	71	60	50	70	62	51	71	60	51	70	60	51	72	61
28	8,6	50	71	54	51	70	54	49	70	55	50	70	54	50	70	54
29	8,5	50	70	55	49	70	57	49	69	57	50	70	55	49	70	56
30	8,5	60	83	71	61	83	72	60	84	72	61	84	71	61	84	72
31	8,5	50	71	55	51	71	54	51	71	54	51	70	55	50	70	54
32	8,5	48	69	71	51	71	55	50	75	55	50	70	61	50	70	61
33	8,5	52	72	60	52	73	60	52	72	60	51	72	61	51	72	62
34	8,5	50	70	68	50	71	64	50	70	64	49	70	58	50	70	54
35	8,5	50	70	55	49	71	53	50	70	59	51	70	57	49	70	58
36	8,5	50	69	60	50	71	60	50	70	58	50	70	61	50	70	58
37	8,5	50	69	58	51	69	59	50	70	58	50	71	57	51	70	59
38	8,5	50	70	58	51	71	58	50	70	58	0	0	0	50	70	57
39	8,4	53	74	64	54	74	64	54	75	64	0	0	0	54	76	64
40	8,5	50	70	58	49	69	57	50	70	58	51	70	58	50	69	57
41	8,5	53	76	65	54	75	64	55	75	64	0	0	0	55	76	65
42	8,5	50	70	58	49	69	57	50	70	58	51	70	58	50	69	57
43	8,5	50	70	46	50	70	46	50	73	45	49	70	45	50	70	48
44	8,5	52	73	62	50	71	60	51	71	60	52	72	60	52	72	61
45	8,5	39	53	43	40	50	44	40	50	42	40	55	50	40	50	40
46	8,5	46	65	55	41	57	49	41	58	47	47	65	60	46	65	55
47	8,5	44	62	52	43	64	53	43	61	49	0	0	0	50	69	59
48	8,5	44	60	55	0	0	0	44	61	51	0	0	0	45	60	55
49	8,5	41	58	48	41	57	50	42	58	50	42	57	49	43	59	48
50	8,5	44	62	52	43	63	52	44	61	61	44	61	52	44	62	53
51	8,6	44	59	53	43	64	52	44	61	51	44	61	52	44	62	51
52	8,5	44	62	53	42	57	49	42	58	52	44	61	52	45	61	51

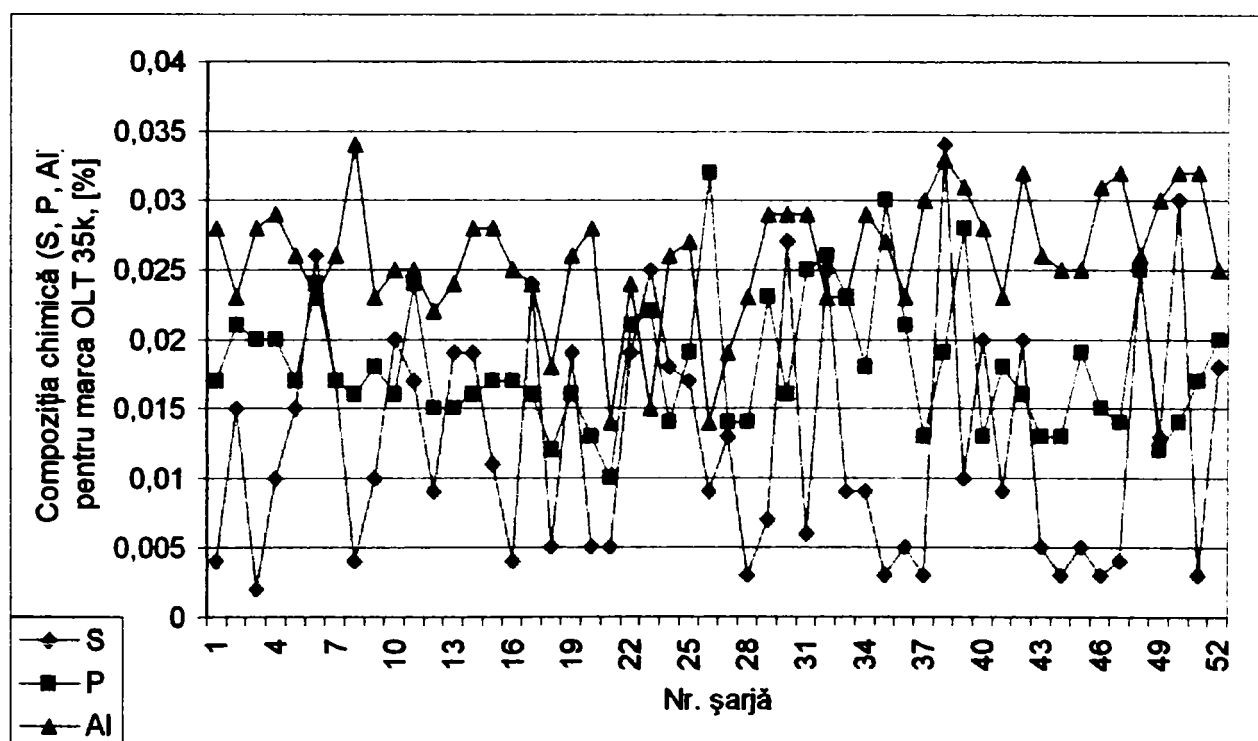
Anexa IV.7.3. Date referitoare la răcire secundară (secțiunea $\phi 180\text{mm}$)

Nr. crt.	Presiune apă răcire secund. [bar]	Debit răcire secundară F1. [l/min]			Debit răcire secundară F2. [l/min]			Debit răcire secundară F3. [l/min]			Debit răcire secundară F4. [l/min]			Debit răcire secundară F5. [l/min]		
		z1	z2	z3	z1	z2	z3	z1	z2	z3	z1	z2	z3	z1	z2	z3
1	8,5	48	67	56	48	66	56	48	66	56	48	66	55	49	66	57
2	8,5	39	50	45	40	53	45	41	53	46	40	50	50	44	61	53
3	8,5	40	56	48	45	61	53	44	61	52	43	61	50	42	58	49
4	8,7	41	58	46	42	57	49	41	58	49	40	59	48	41	58	48
5	8,4	46	64	54	44	67	55	46	64	55	47	65	56	46	65	56
6	8,5	40	51	46	41	51	48	40	54	46	40	51	47	40	49	46
7	8,5	40	54	46	42	55	46	40	60	46	40	54	44	40	54	47
8	8,5	41	57	49	41	55	50	41	57	48	43	57	48	42	57	49
9	8,2	42	58	49	41	58	49	41	58	49	41	58	48	41	58	48
10	8,5	39	50	45	40	53	45	41	53	46	40	50	50	44	61	53
11	8,5	40	56	48	45	61	53	44	61	52	43	61	50	42	58	49
12	8,7	41	58	46	42	57	49	41	58	49	40	59	48	41	58	48
13	8,6	46	64	54	44	67	55	46	64	55	47	65	56	46	65	56
14	8,5	40	51	46	41	51	48	40	54	46	40	51	47	40	49	46
15	8,6	40	54	46	42	55	46	40	60	46	40	54	44	40	54	47
16	8,4	41	57	49	41	55	50	41	57	48	43	57	48	42	57	49
17	8,4	42	58	49	41	58	49	41	58	49	41	58	48	41	58	48
18	8,7	41	58	46	42	57	49	41	58	49	40	59	48	41	58	48
19	8,6	48	67	56	48	66	56	48	66	56	48	66	55	49	66	57
20	8,5	48	67	56	48	66	56	48	66	56	48	66	55	49	66	57

Anexa IV.8

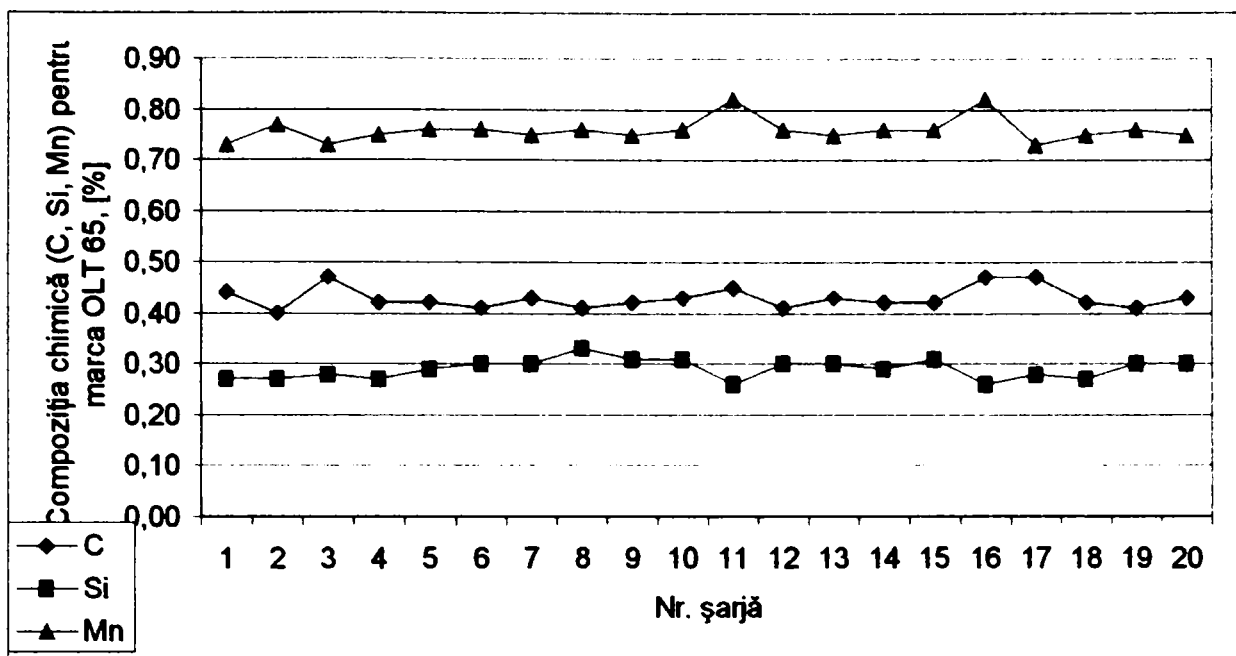


Anexa IV.8.1. Variația C, Mn, Si pentru oțelul OLT 35k

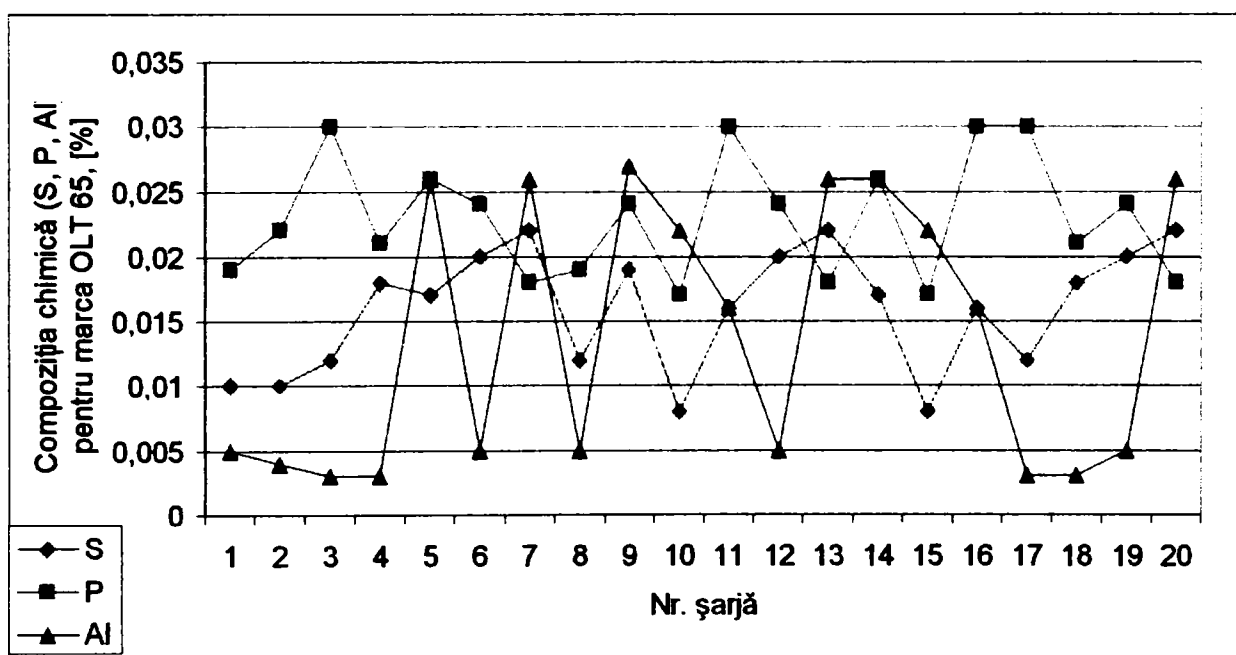


Anexa IV.8.2. Variația S, P, Al pentru oțelul OLT 35k

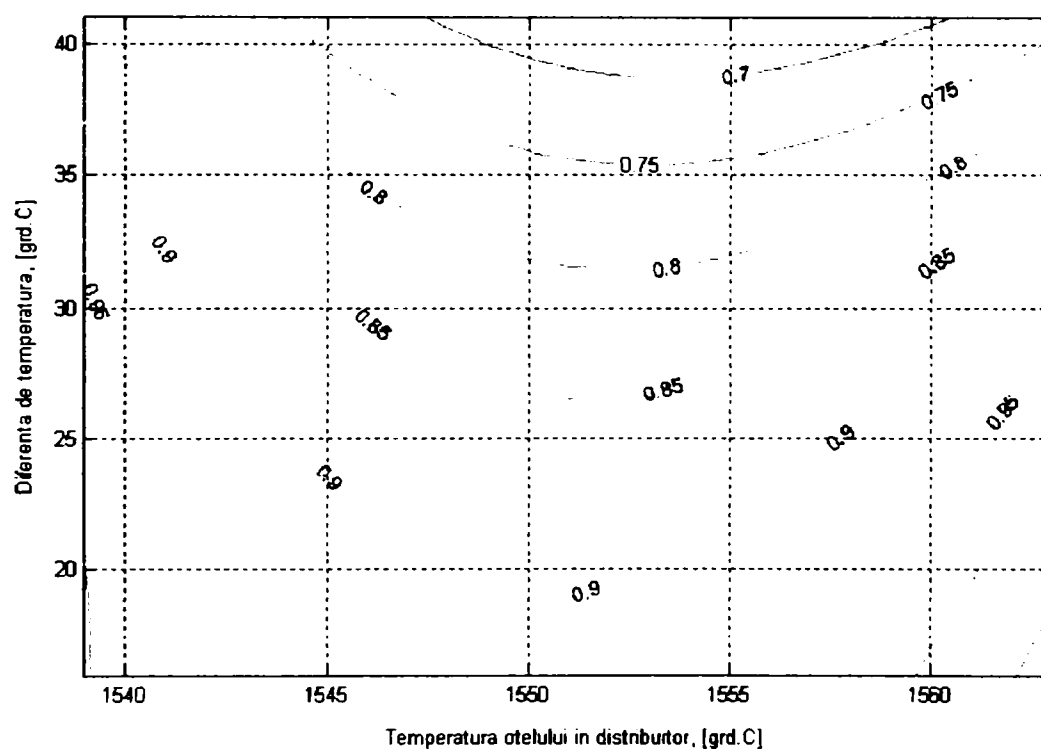
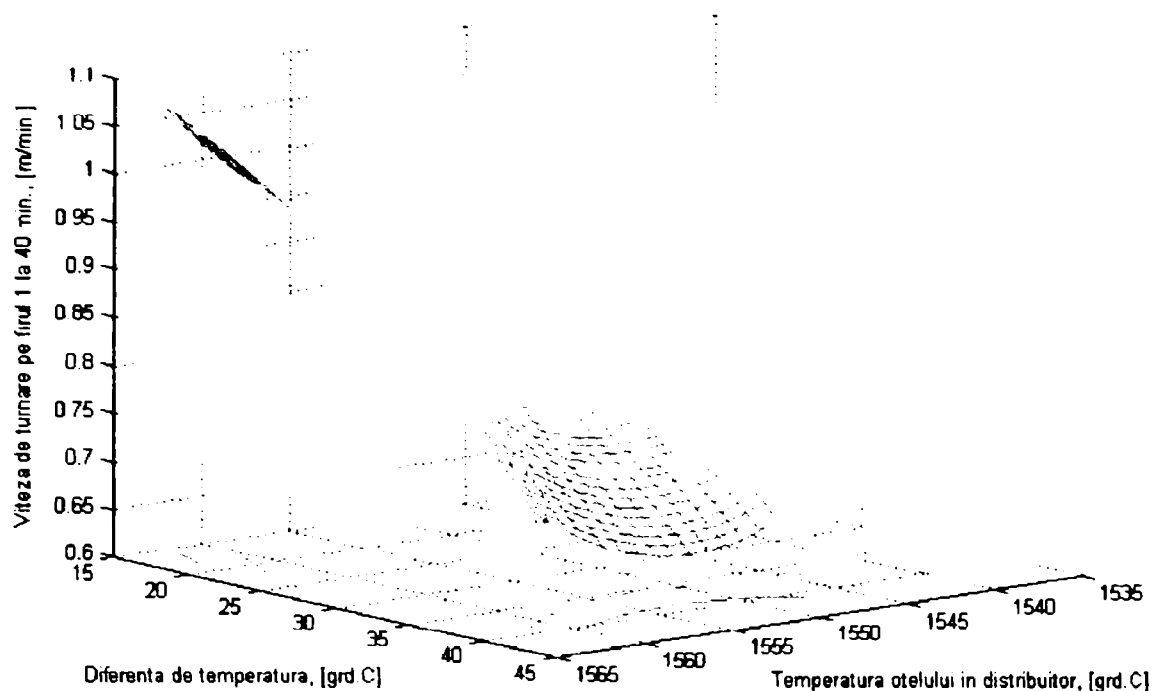
Anexa IV.9



Anexa IV.9.1. Variația C, Mn, Si pentru oțelul OLT 65



Anexa IV.9.2. Variația S, P, Al pentru oțelul OLT 65

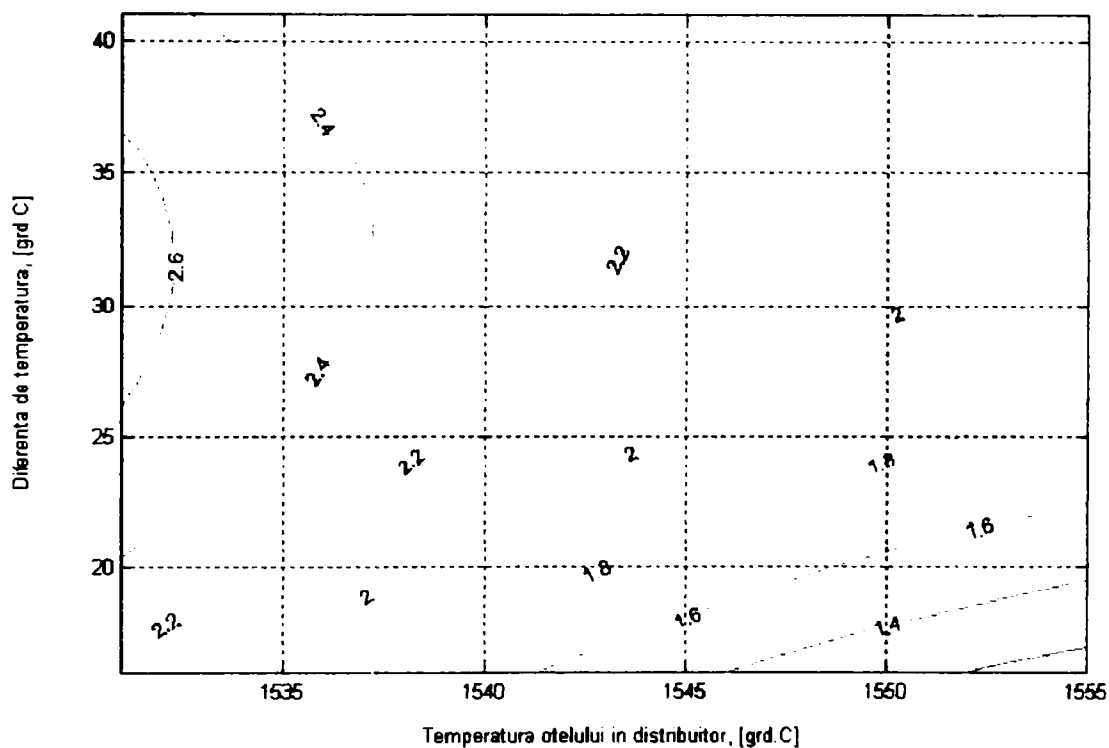
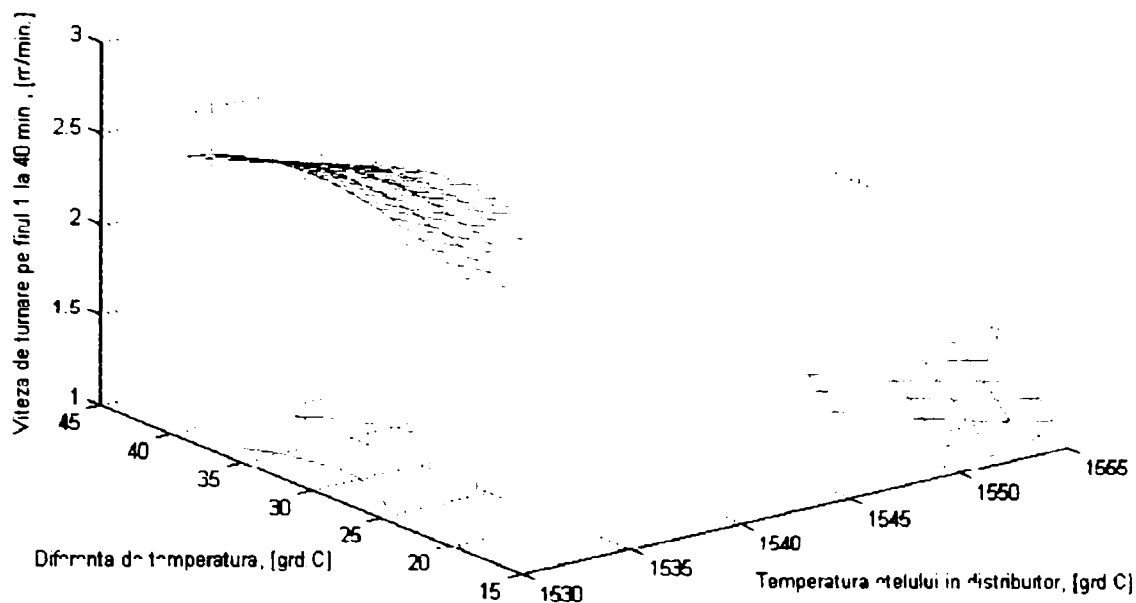


Anexa IV.10. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura oțelului în distribuitor și gradientul de temperatură (raportat la temperatura lichidus) pentru blumul 240x270mm la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 2 - 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}} + 2 \cdot \Delta T - 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot T_{OL \text{ dist}} \cdot \Delta T + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}}^2 + 0,125 \cdot \Delta T^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,7132$$

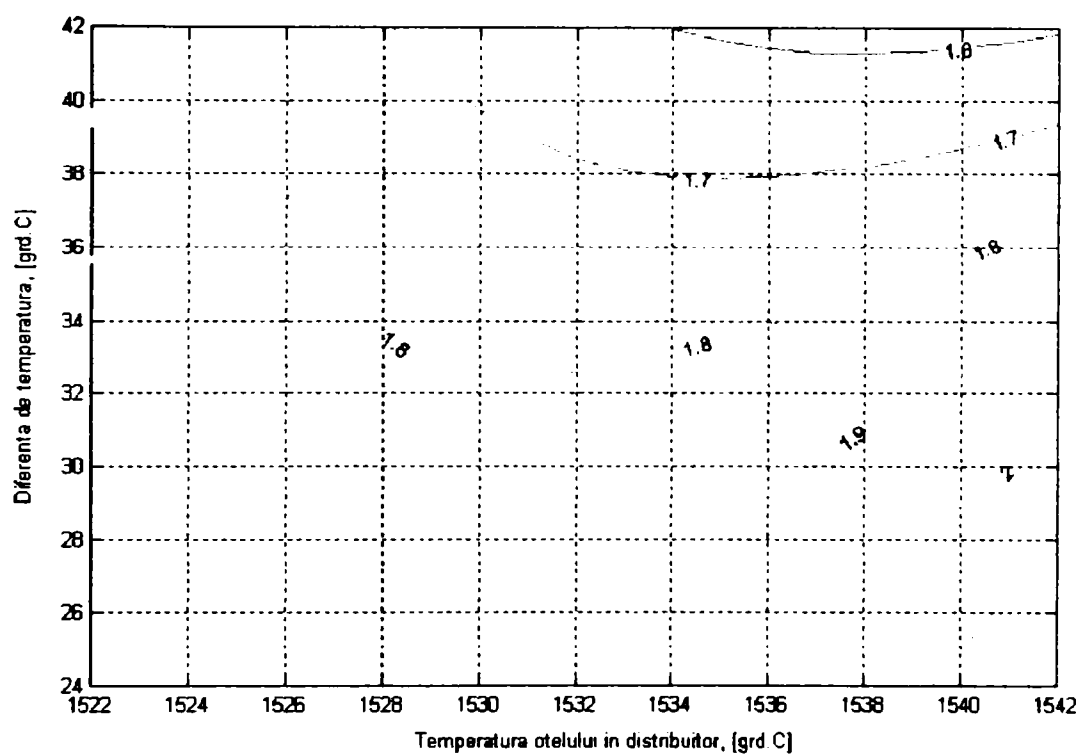
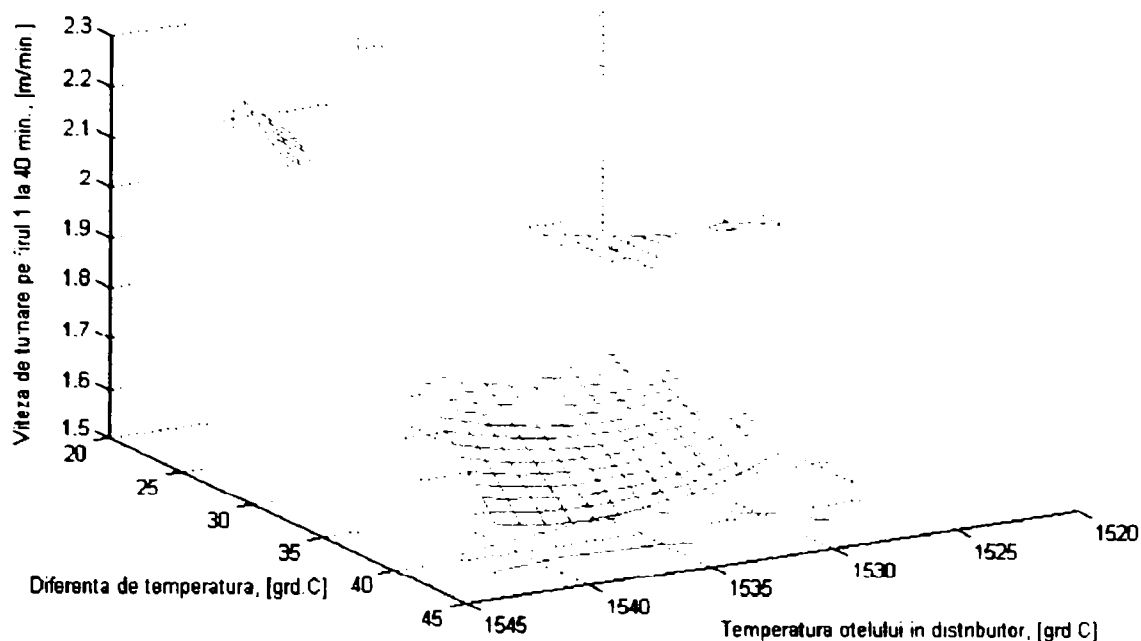


Anexa IV.11. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura oțelului în distribuitor și gradientul de temperatură pentru țagla $\Phi 150\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 1,93 \cdot 10^3 - 3,45 \cdot T_{OL \text{ dist}} - 1,31 \cdot \Delta T + 0,94 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}} \cdot \Delta T + 0,775 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}}^2 - 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,6799$$

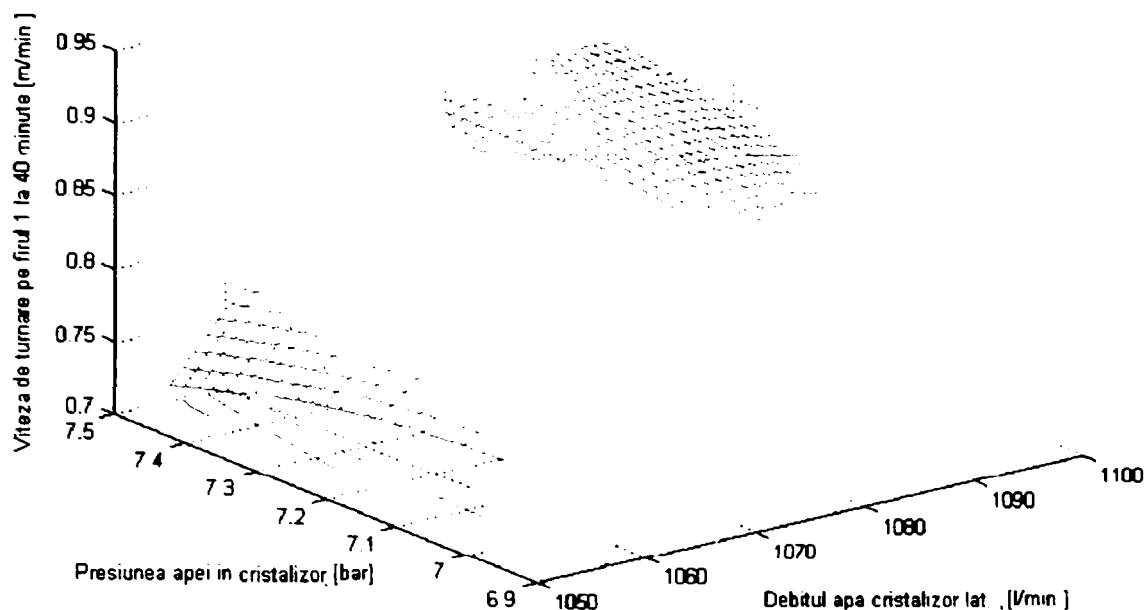


Anexa IV.12. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura oțelului în distribuitor și gradientul de temperatură pentru țagla $\Phi 180\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 2,69 \cdot 10^3 - 3,57 \cdot 10^{-3} \cdot T_{OL \text{ dist}} + 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T - 0,189 \cdot 10^{-5} \cdot T_{OL \text{ dist}} \cdot \Delta T + 0,11 \cdot 10^{-5} \cdot T_{OL \text{ dist}}^2 - 0,42 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T^2$$

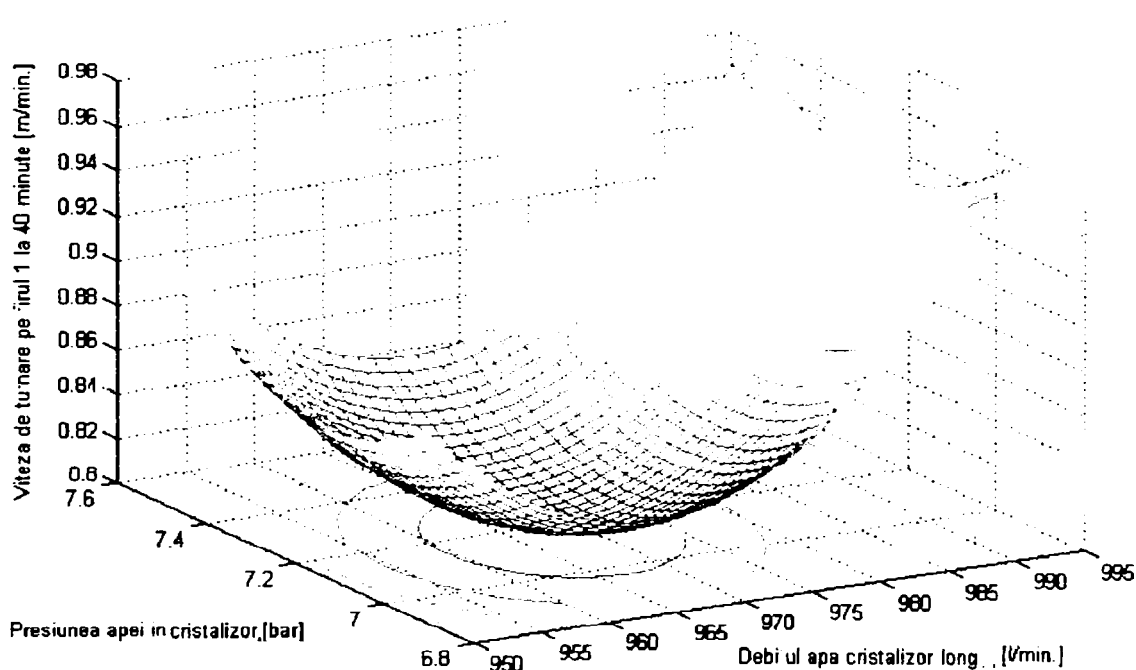
$$r_{yx1x2} = 0,6455$$



Anexa IV.13.1. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei de răcire (latura de 270mm) din cristalizor la 40min de la începutul turnării

$$v = -109,12 + 0,22 \cdot d_{lat} - 3,73 \cdot p_{apa} + 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot d_{lat} \cdot p_{apa} - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{lat}^2 - 0,15 \cdot p_{apa}^2$$

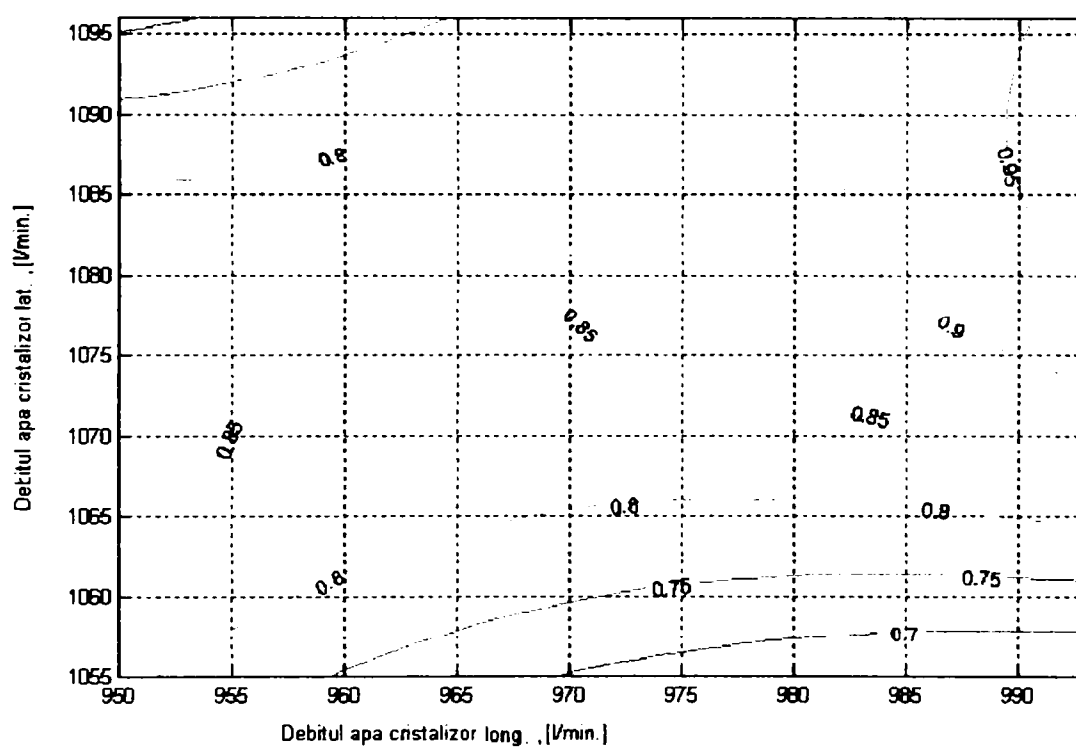
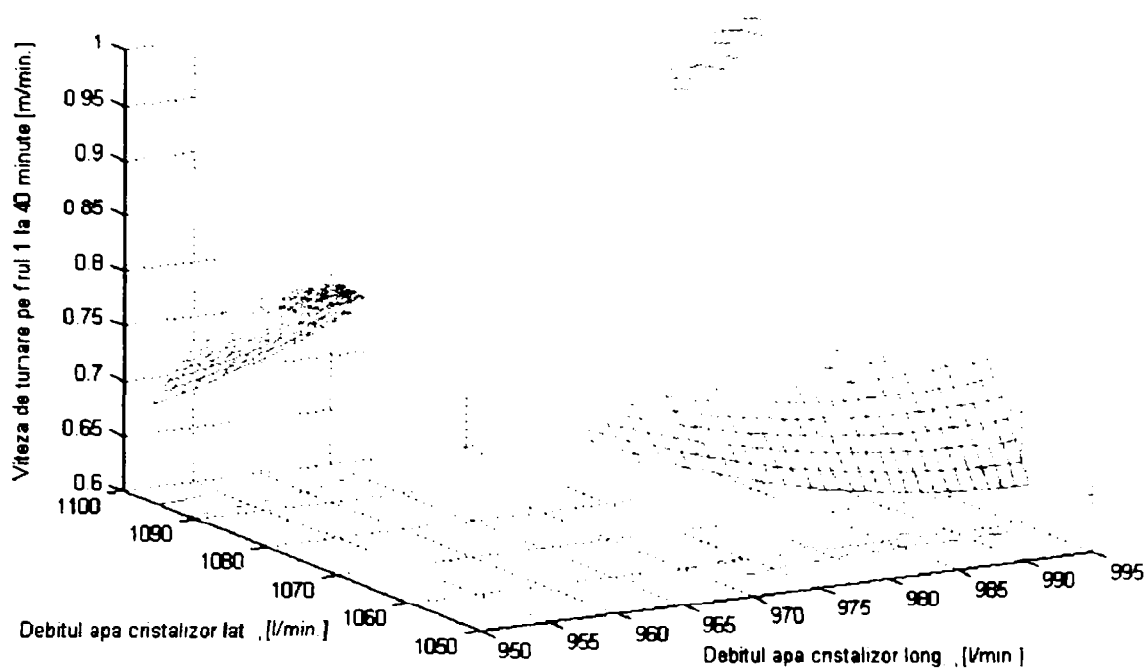
$$r_{yx1x2} = 0,6068$$



Anexa IV.13.2. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei de răcire (latura de 240mm) din cristalizor la 40min de la începutul turnării

$$v = 196,37 - 0,37 \cdot d_{long} - 4,02 \cdot p_{apa} - 1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{lat} \cdot p_{apa} + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot d_{lat}^2 + 0,35 \cdot p_{apa}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,5507$$

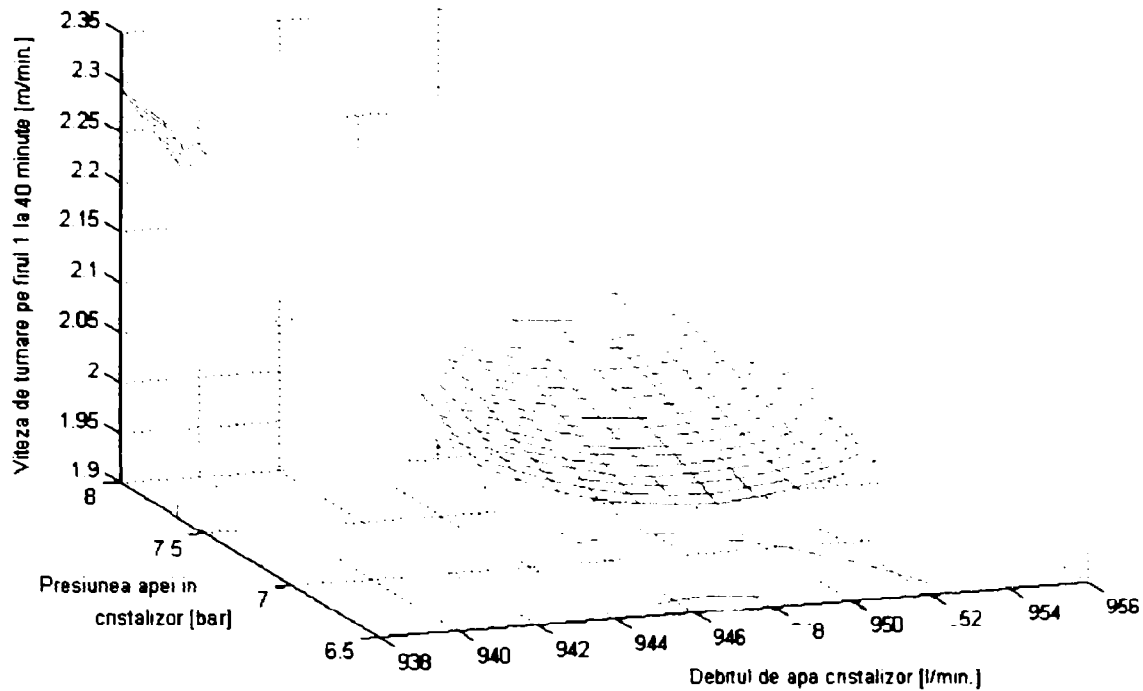


Anexa IV.13.3. Variația vitezei de turnare în funcție de debitul apei de răcire pe cele două laturi din cristalizor la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 48,49 - 0,43 \cdot d_{\text{long}} + 0,30 \cdot d_{\text{lat}} + 0,253 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{long}} \cdot d_{\text{lat}} + 8,5 \cdot 10^{-5} \cdot d_{\text{long}}^2 - 0,253 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{lat}}^2$$

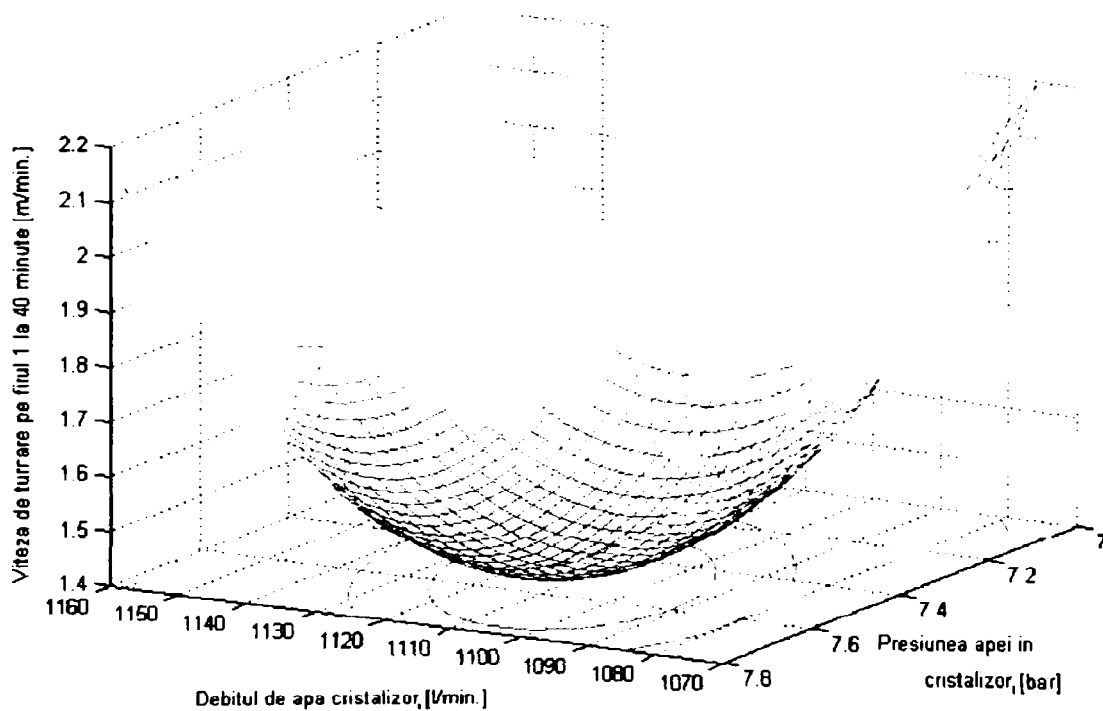
$$r_{yx1x2} = 0,6087$$



Anexa IV.14.1. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei de răcire din cristalizor pentru secțiunea $\Phi 150\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

$$v = 1,46 \cdot 10^3 - 3,1 \cdot d_{\text{apa}} + 3,24 \cdot p_{\text{apa}} - 3,37 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{apa}} \cdot p_{\text{apa}} + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{apa}}^2 + 2,82 \cdot 10^{-3} \cdot p_{\text{apa}}^2$$

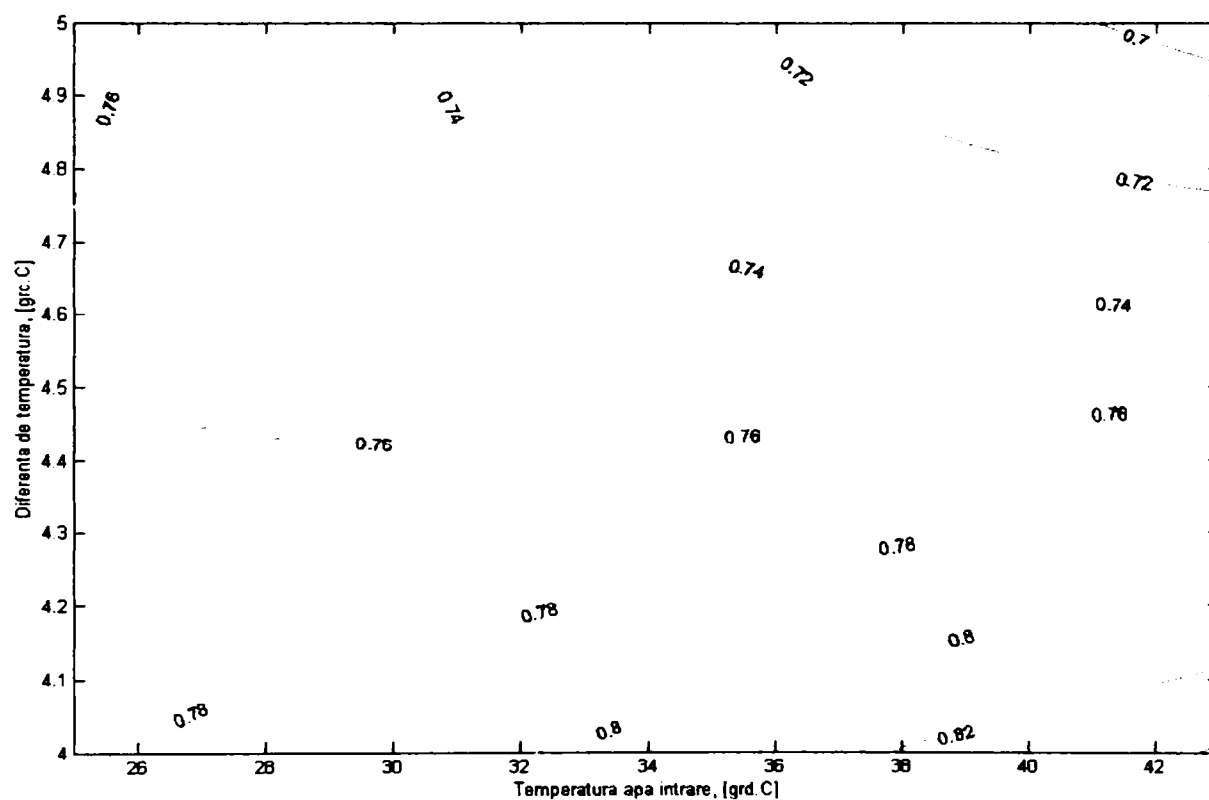
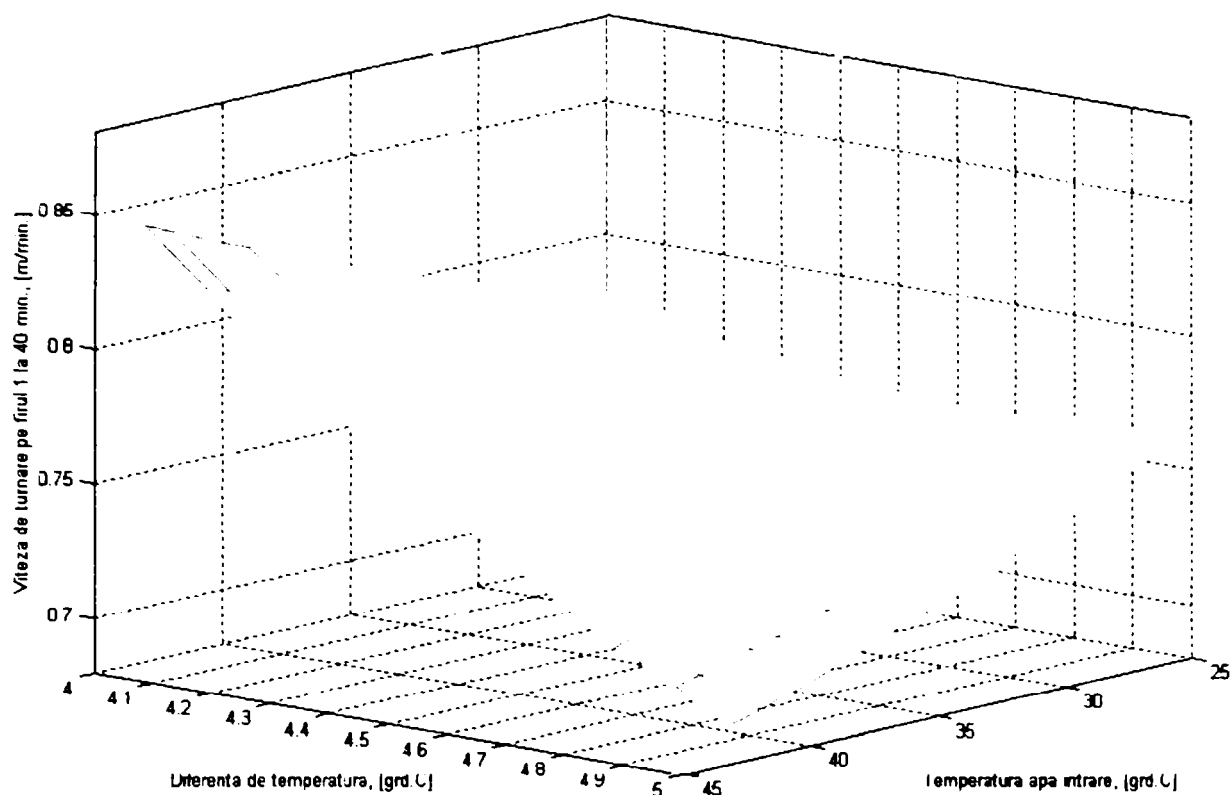
$$r_{yx1x2} = 0,5120$$



Anexa IV.14.2. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei de răcire din cristalizor pentru secțiunea $\Phi 180\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

$$v = 409,67 - 0,53 \cdot d_{\text{apa}} - 29,79 \cdot p_{\text{apa}} + 9 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{apa}} \cdot p_{\text{apa}} + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{apa}}^2 + 1,31 \cdot p_{\text{apa}}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,6848$$

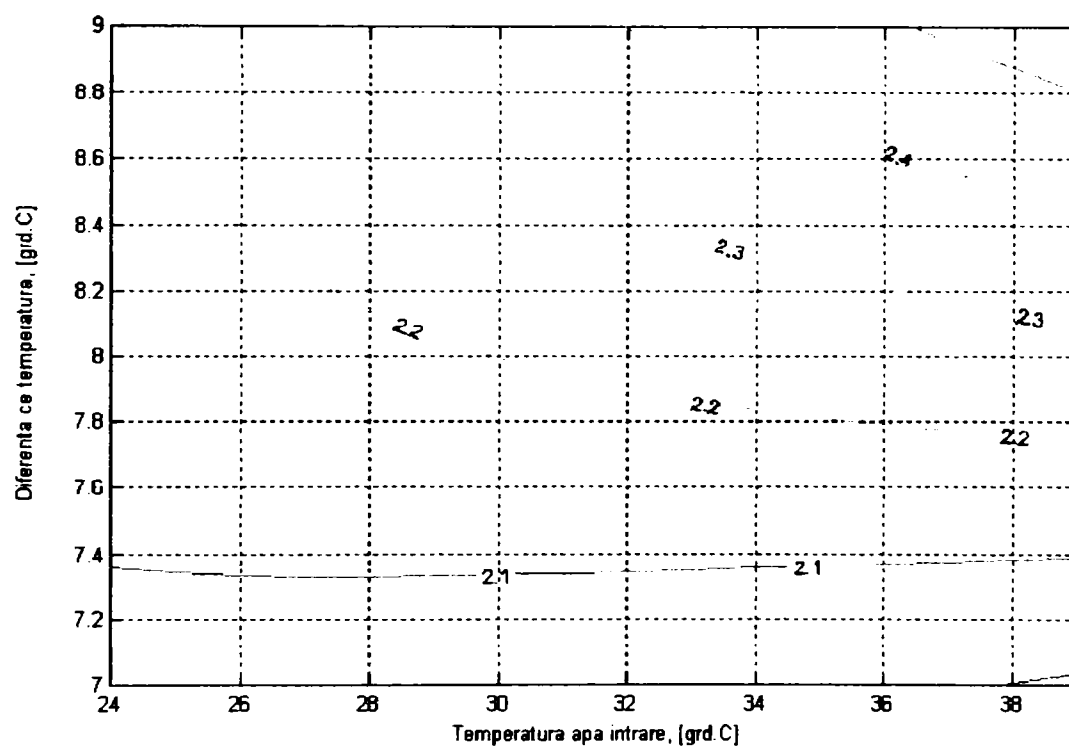
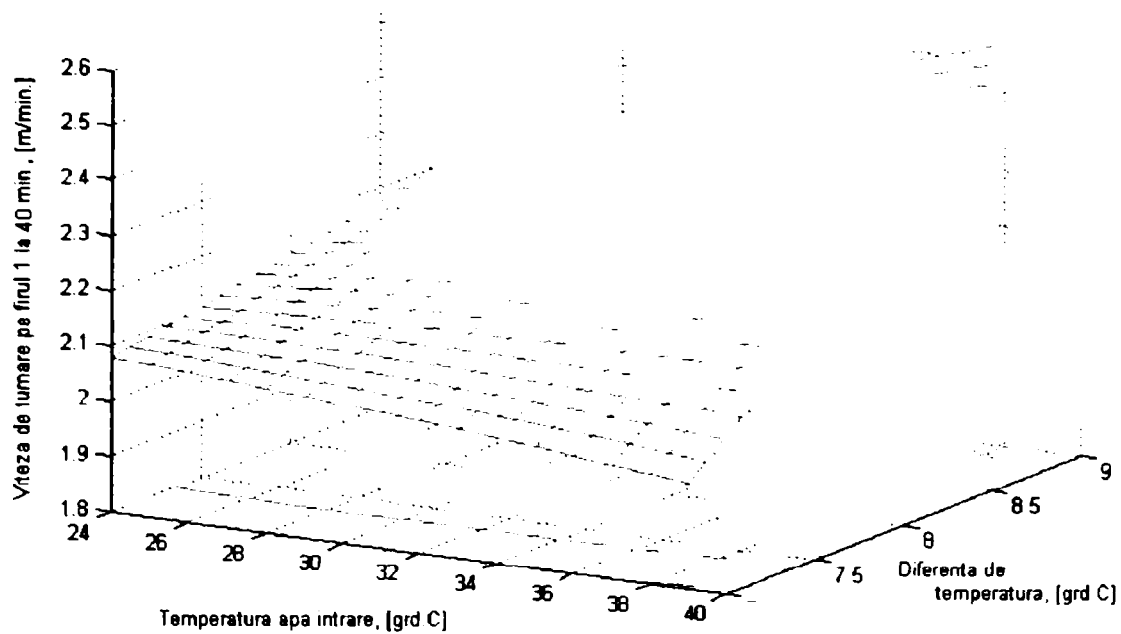


Anexa IV.15. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura apei și variația acesteia la ieșirea din cristalizor (secțiunea 240x270mm) la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 4,16 - 0,09 \cdot T_{\text{apa}} - 0,31 \cdot \Delta t + 0,014 \cdot T_{\text{apa}} \cdot \Delta t - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}}^2 + 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t^2$$

$$r_{yx1x2} = 0.6087$$

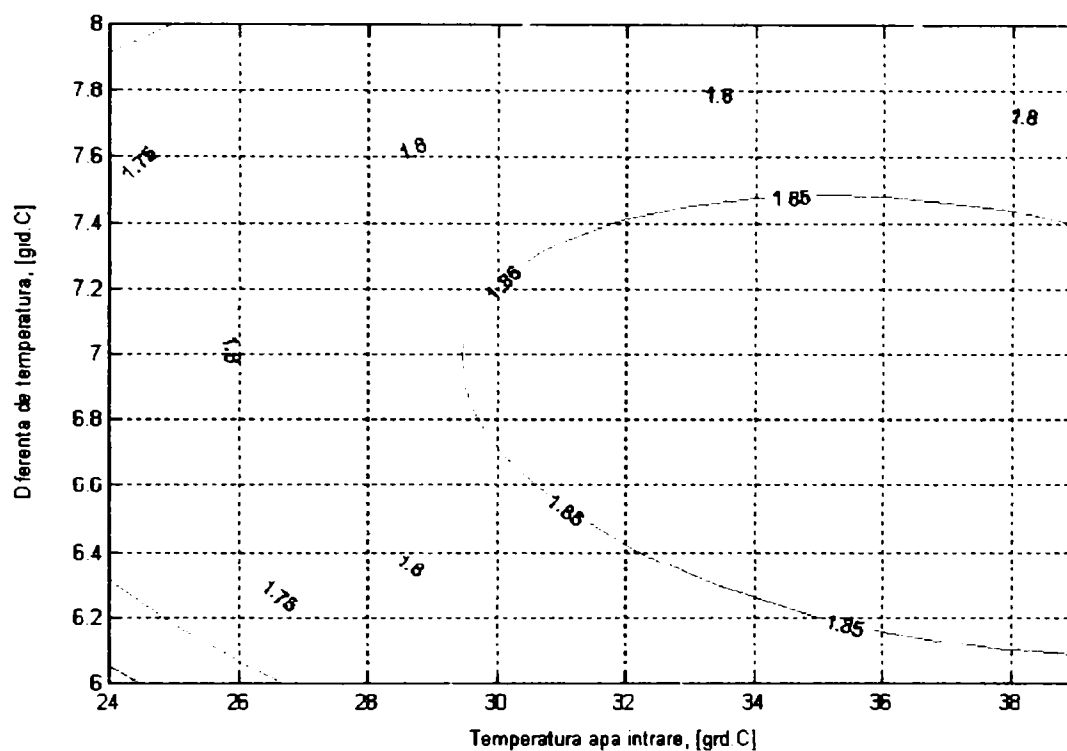
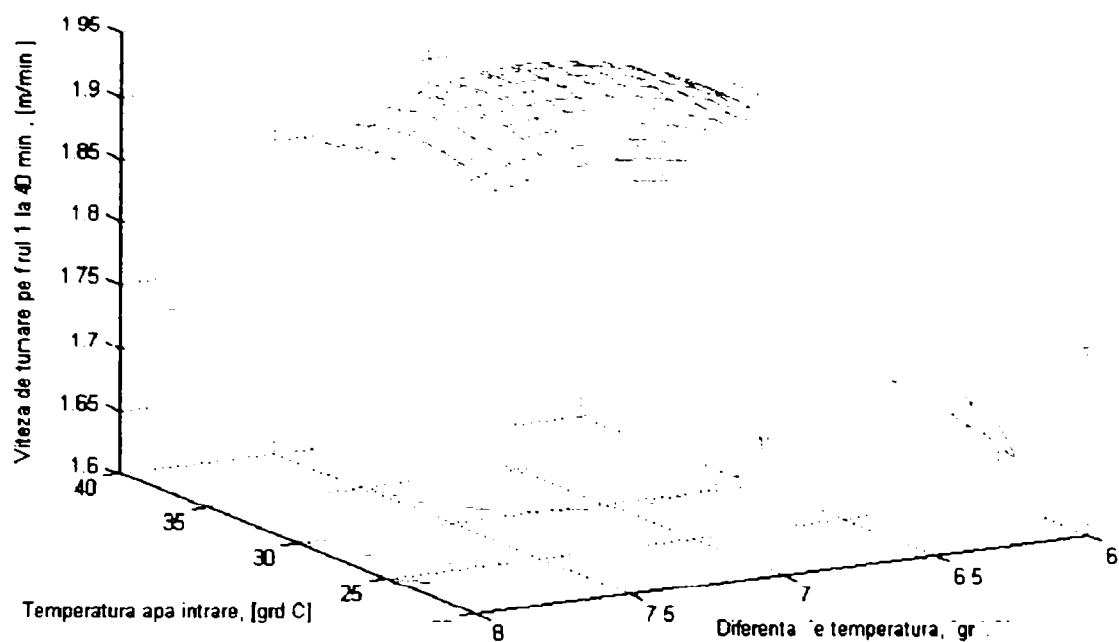


Anexa IV.16. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura apei și variația acesteia la ieșirea din cristalizor (secțiunea $\Phi 150\text{mm}$) la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 4,16 - 0,09 \cdot T_{\text{apa}} - 0,31 \cdot \Delta t + 0,014 \cdot T_{\text{apa}} \cdot \Delta t - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}}^2 + 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,5721$$

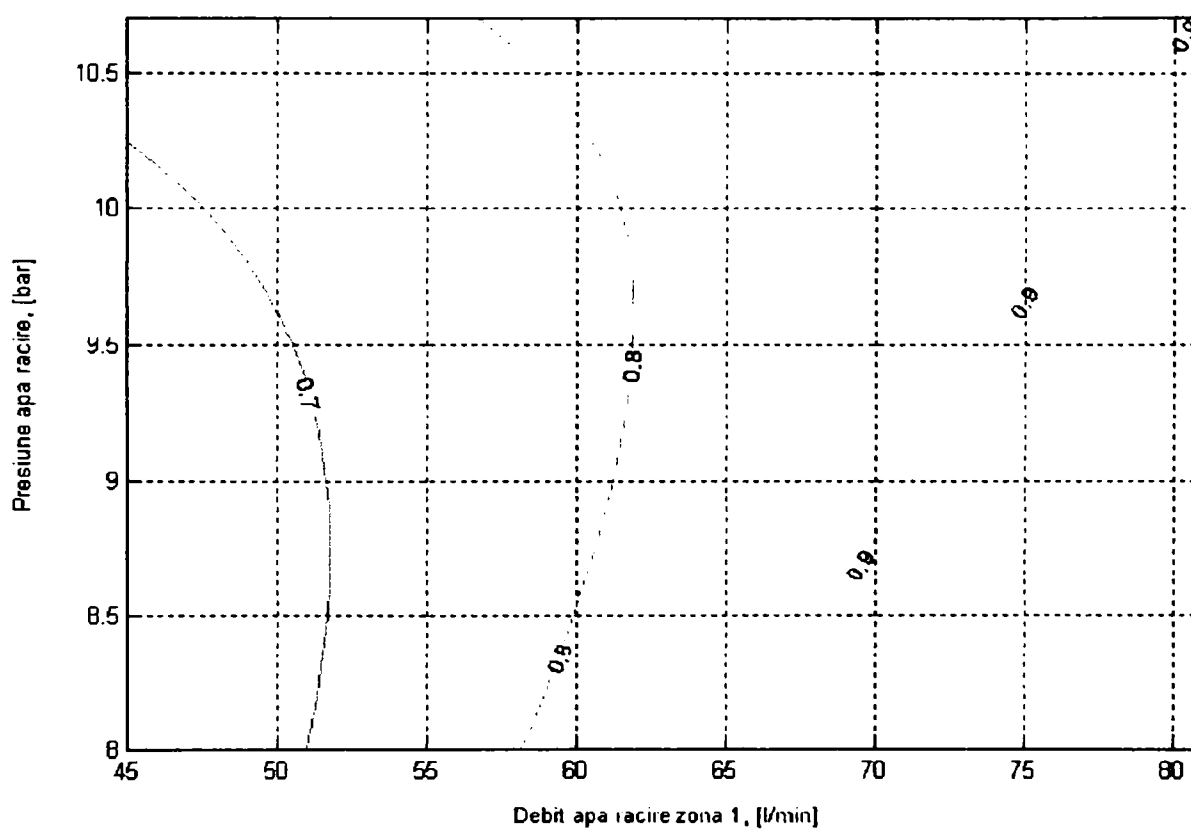
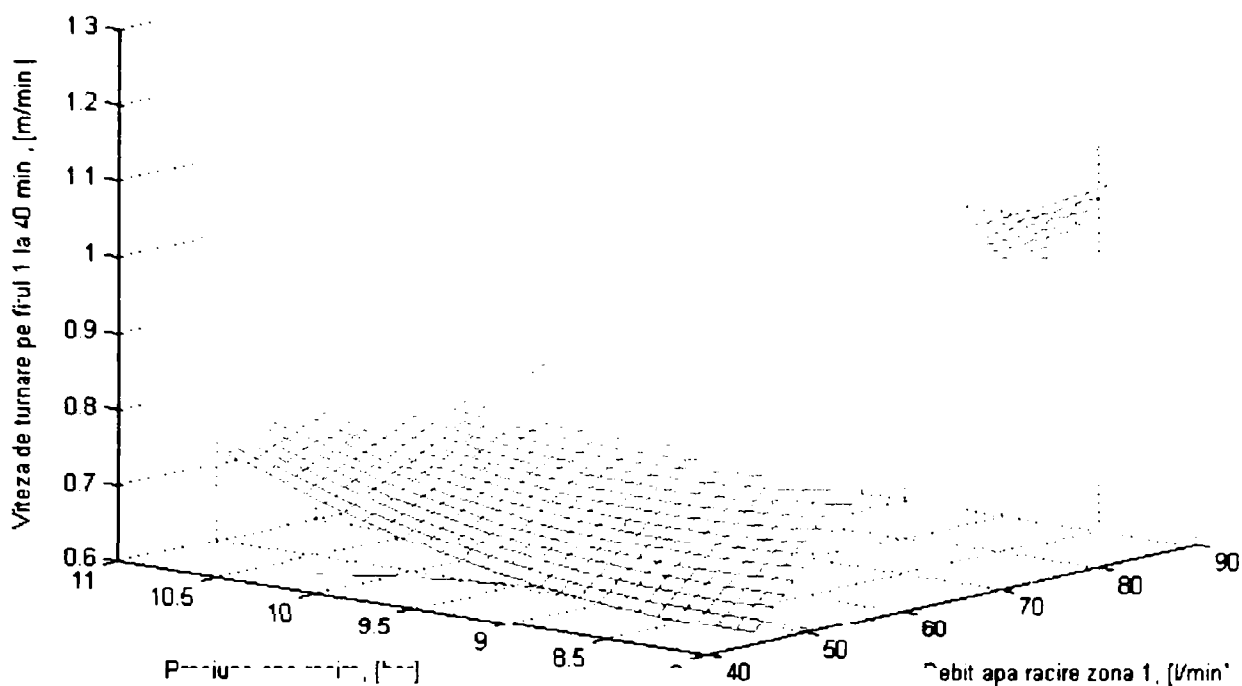


Anexa IV.17. Variația vitezei de turnare în funcție de temperatura apei și variația acesteia la ieșirea din cristalizor (secțiunea $\Phi 180\text{mm}$) la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -5,18 + 0,09 \cdot T_{\text{apa}} + 1,56 \cdot \Delta t - 5,1 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}} \cdot \Delta t - 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{apa}}^2 - 0,101 \cdot \Delta t^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,5621$$

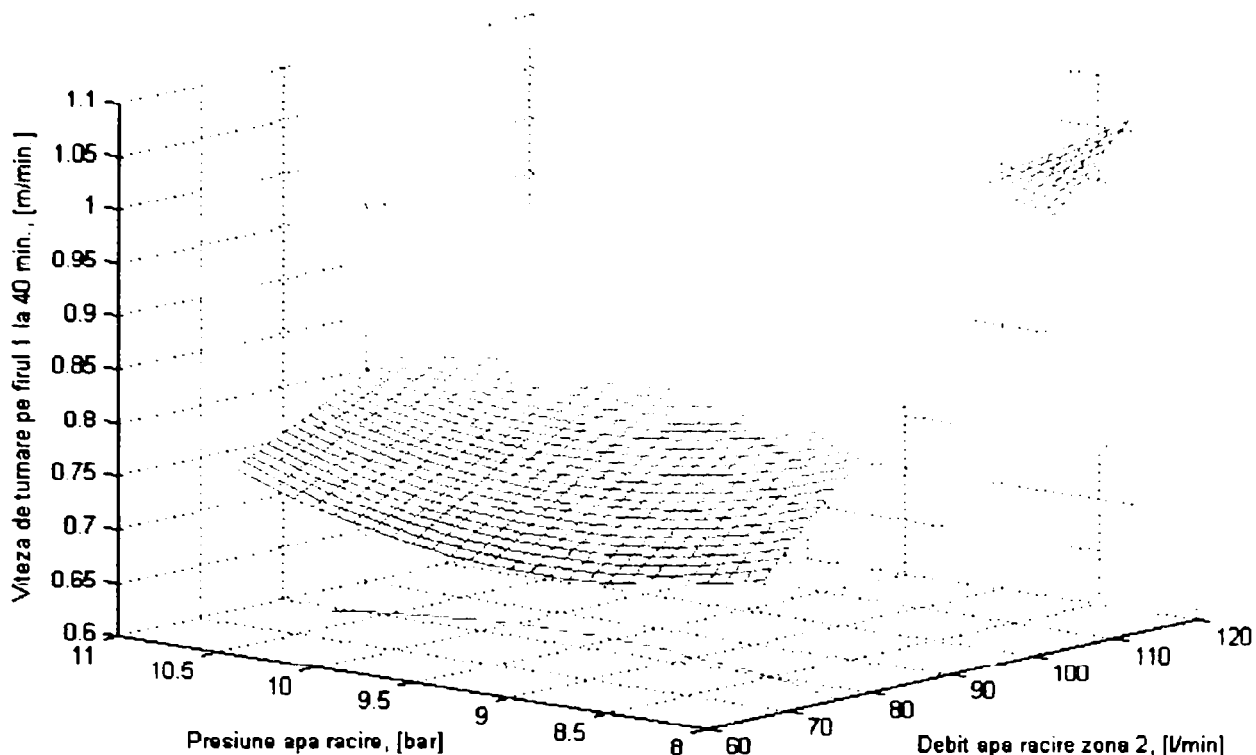


Anexa IV.18.1. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 1 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea 240x270mm la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 0,041 + 0,04 \cdot d_{z1} - 0,17 \cdot p_{as} - 0,003 \cdot d_{z1} \cdot p_{as} - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z1}^2 + 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot p_{as}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,6779$$

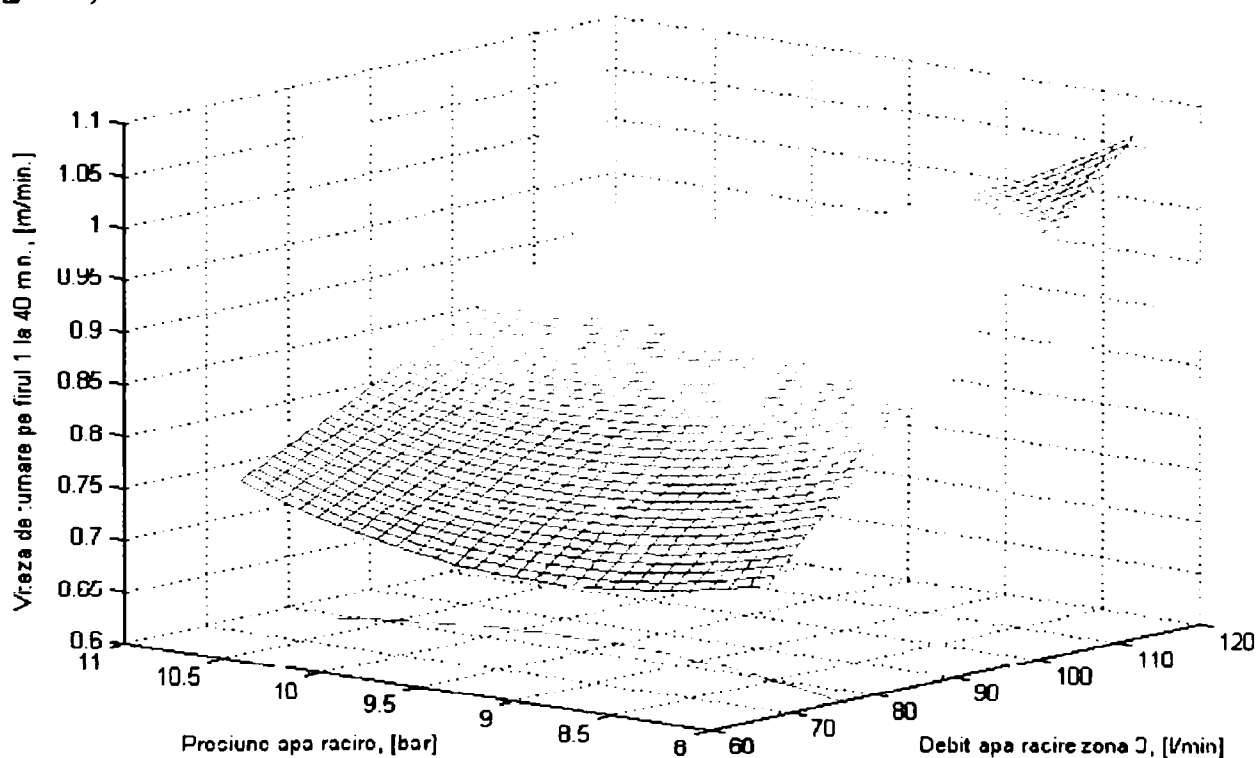


Anexa IV.18.2. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 2 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea 240x270mm la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 1,27 + 0,019 \cdot d_{z2} - 0,311 \cdot p_{as} - 0,0014 \cdot d_{z2} \cdot p_{as} - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z2}^2 + 0,223 \cdot p_{as}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,6518$$

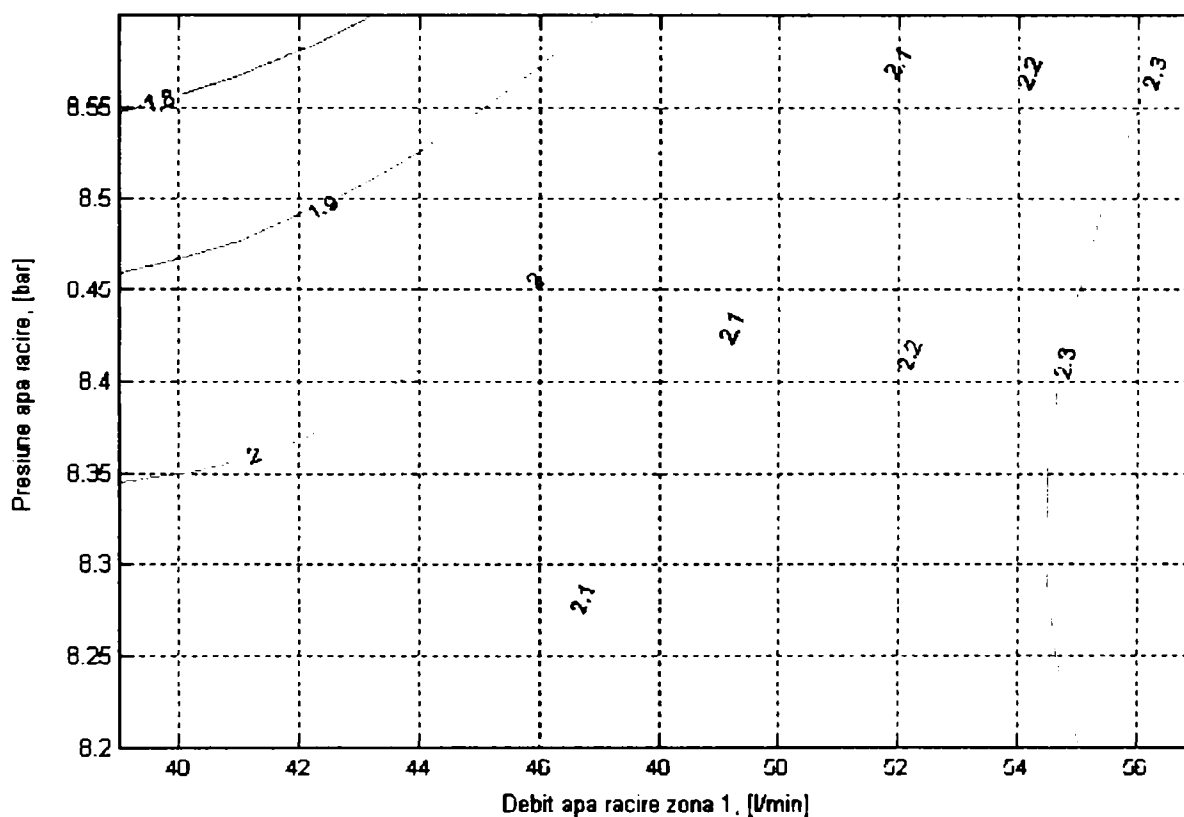
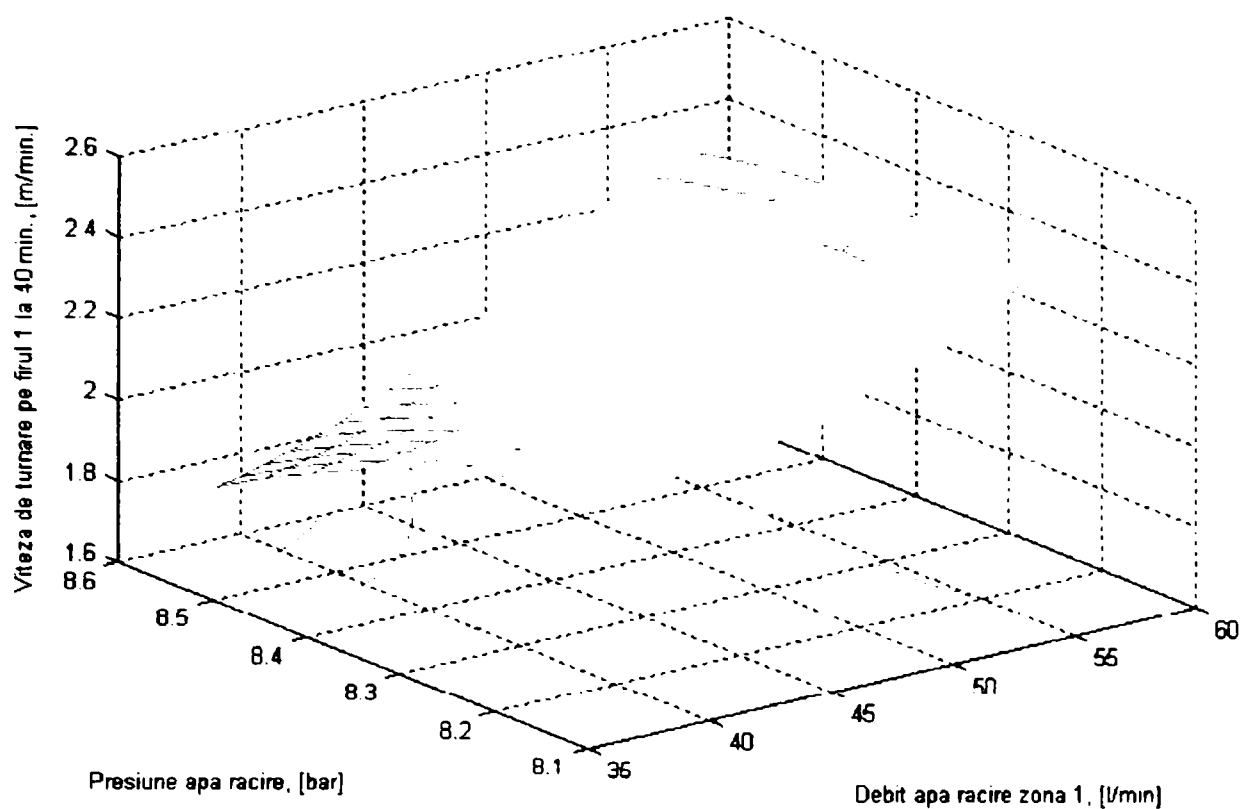


Anexa IV.18.3. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 3 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea 240x270mm la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 1,15 + 0,019 \cdot d_{z3} - 0,325 \cdot p_{as} - 0,0017 \cdot d_{z3} \cdot p_{as} - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z3}^2 + 0,313 \cdot p_{as}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,6534$$

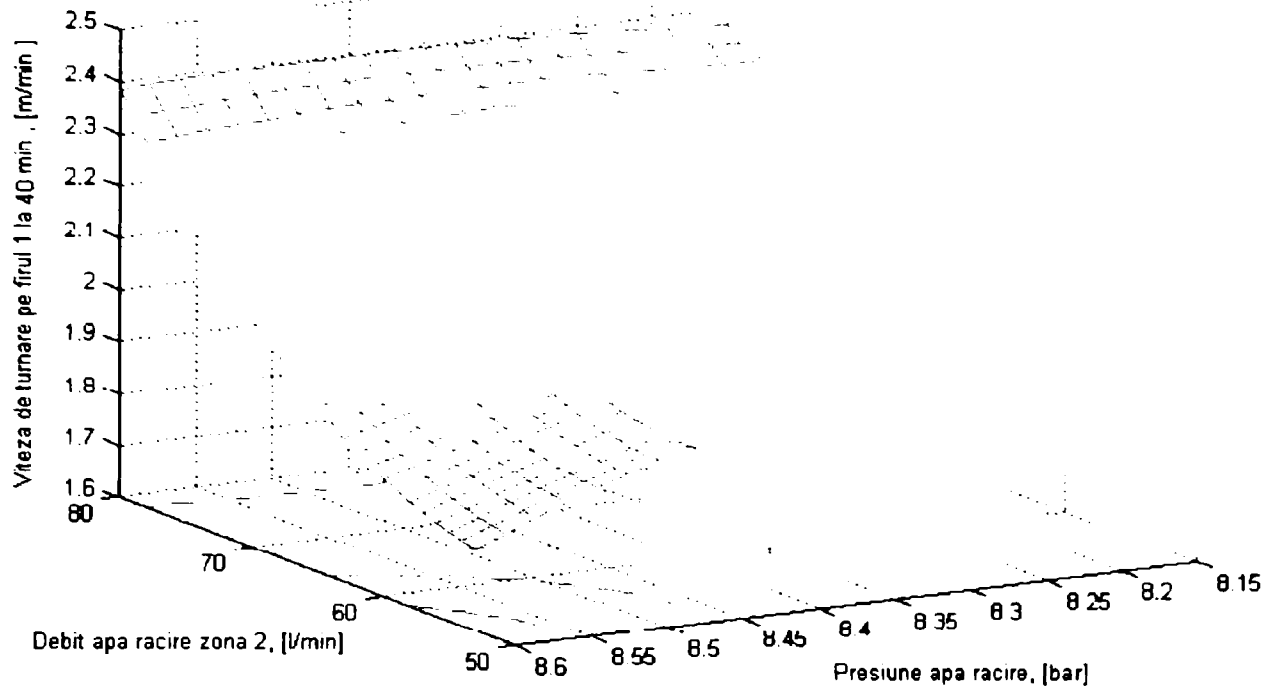


Anexa IV.19.1. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 1 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 150\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -72,07 - 0,43 \cdot d_{z1} + 20,49 \cdot p_{as} + 0,041 \cdot d_{z1} \cdot p_{as} - 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z1}^2 + 1,367 \cdot p_{as}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,7087$$

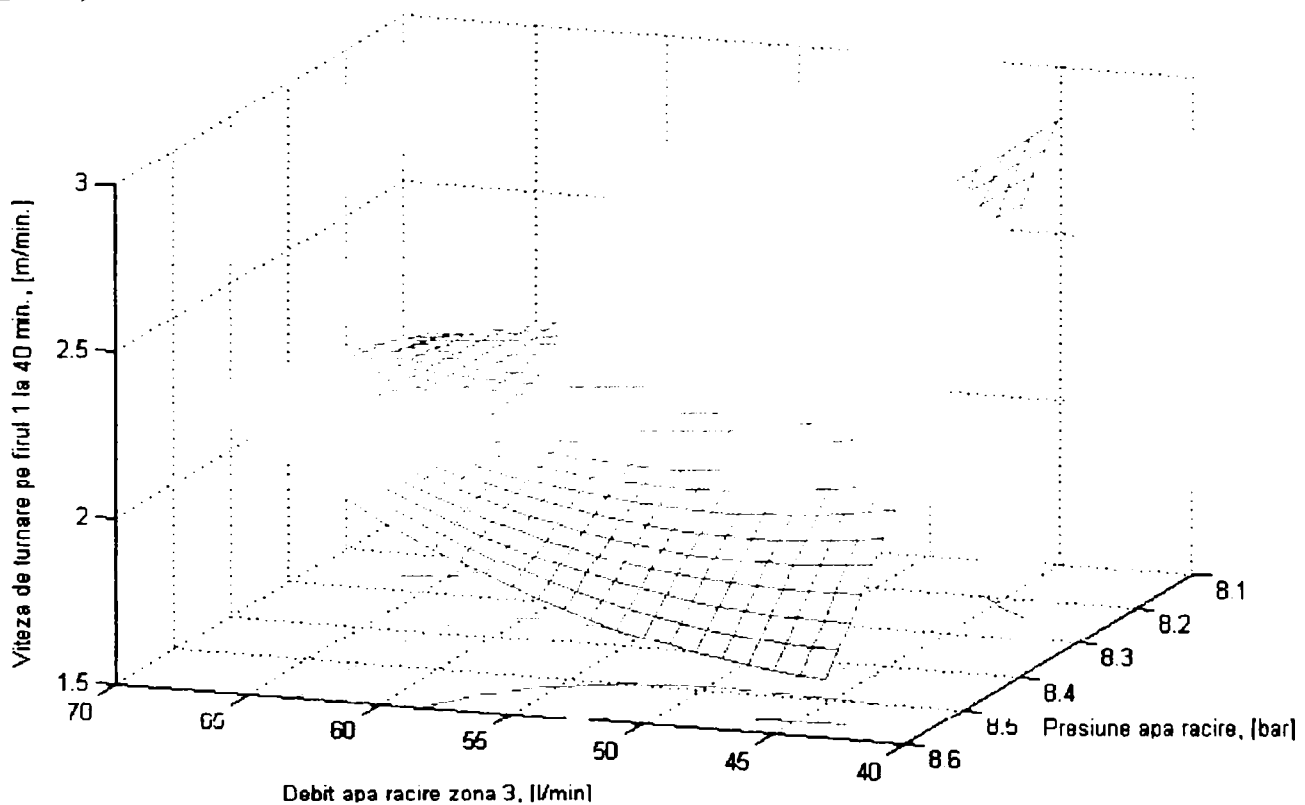


Anexa IV.19.2. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 2 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 150\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -9,27 - 0,37 \cdot d_{z2} + 5,98 \cdot p_{as} + 0,035 \cdot d_{z2} \cdot p_{as} + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z2}^2 - 0,52 \cdot p_{as}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,7070$$

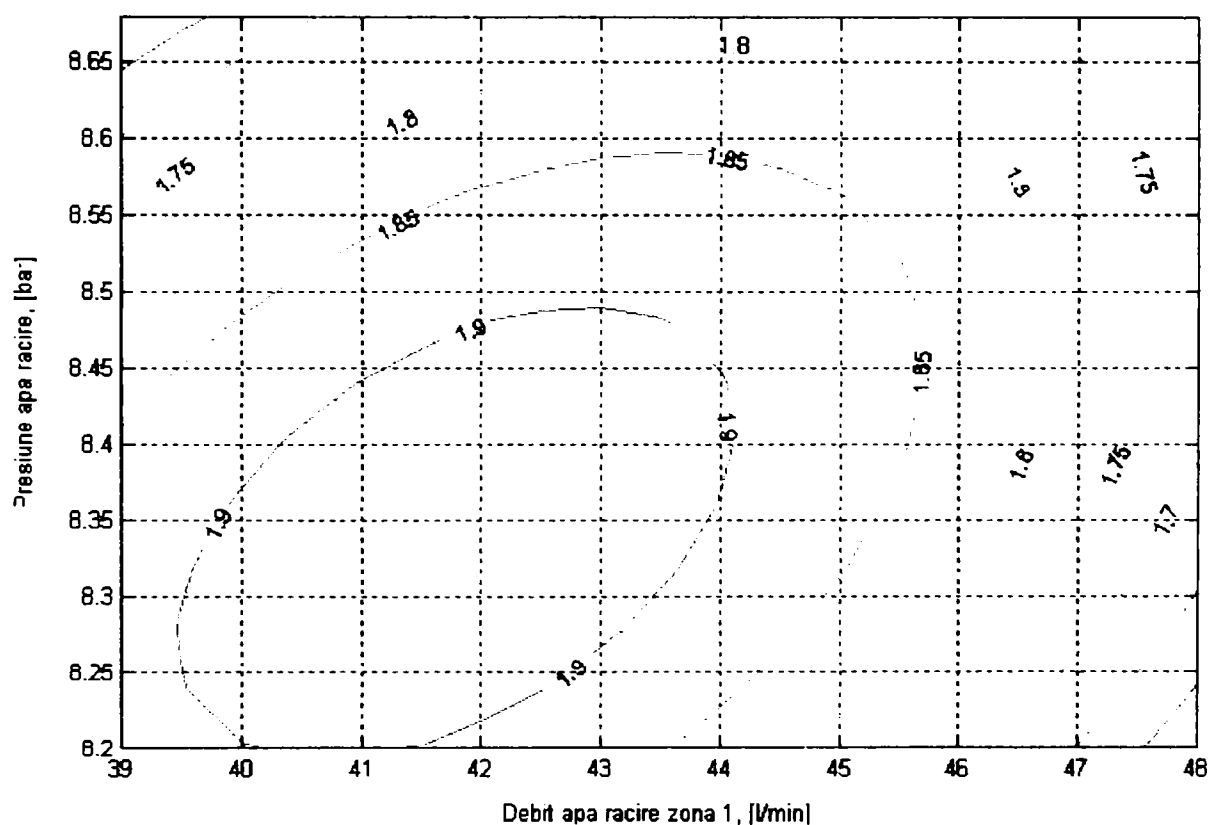
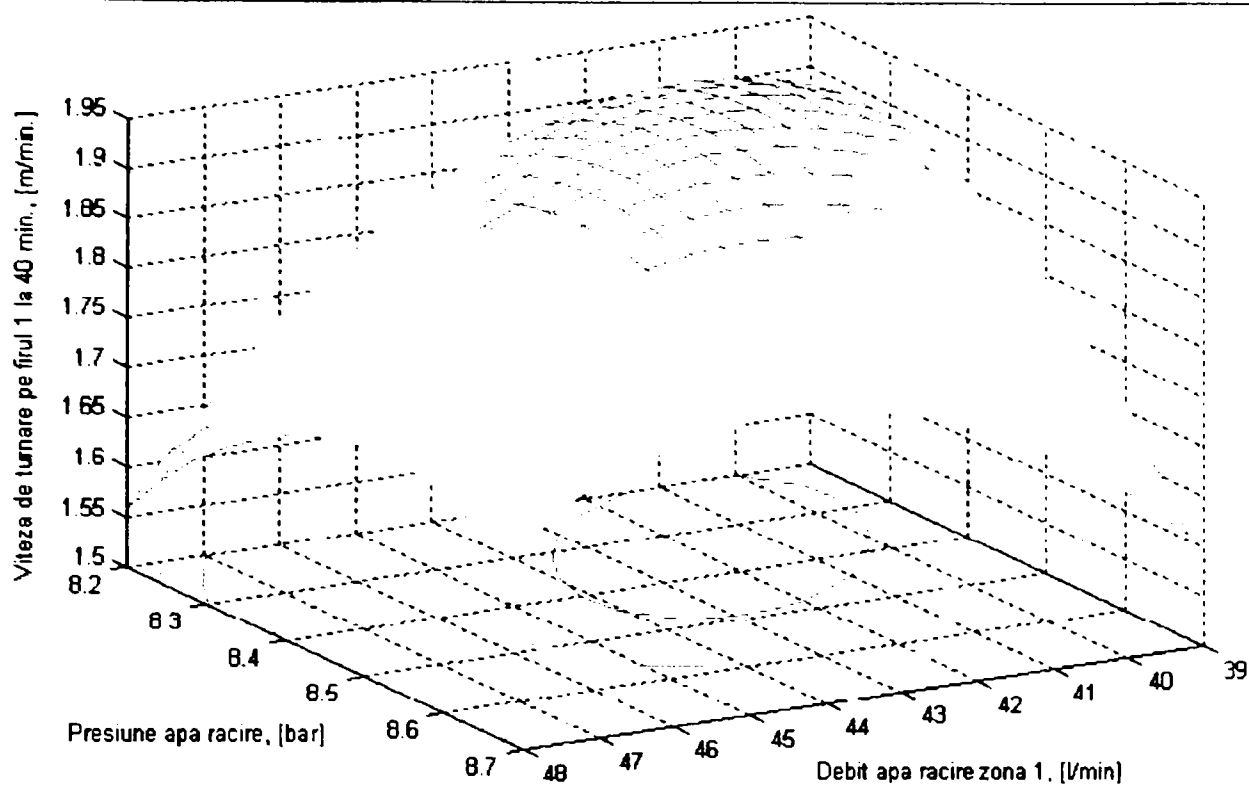


Anexa IV.19.3. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 3 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 150\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = 74,67 - 1,43 \cdot d_{z3} - 6,55 \cdot p_{as} + 0,156 \cdot d_{z3} \cdot p_{as} + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z3}^2 + 0,2 \cdot p_{as}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,5889$$

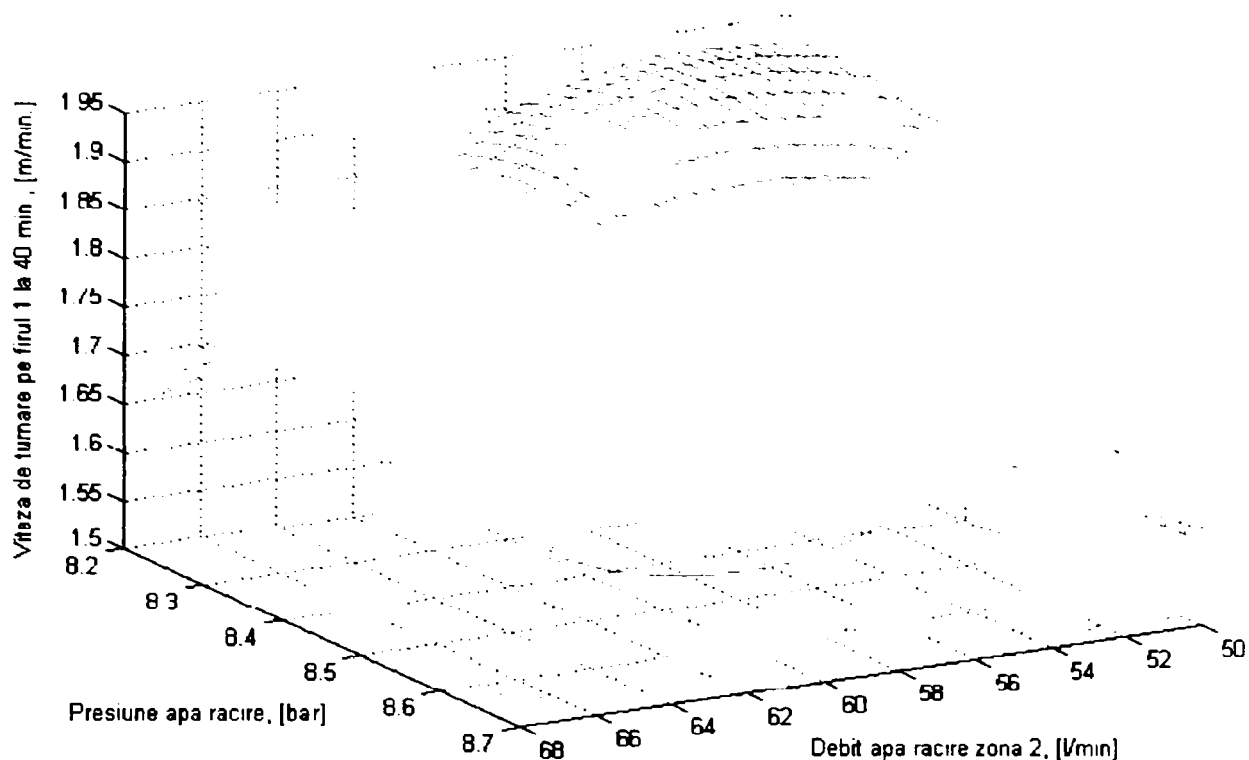


Anexa IV.20.1. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 1 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 180\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -87,19 - 0,25 \cdot d_{z1} + 22,62 \cdot p_{as} + 0,095 \cdot d_{z1} \cdot p_{as} - 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z1}^2 - 1,594 \cdot p_{as}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,67395$$

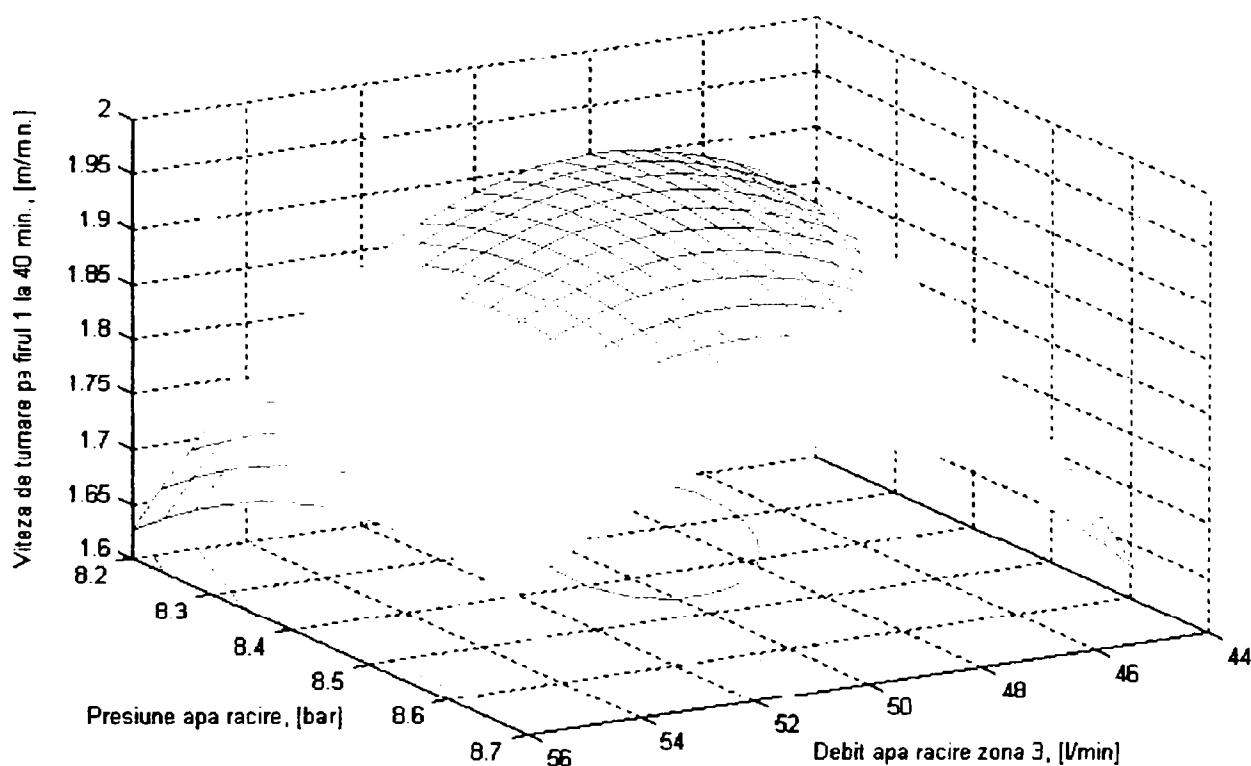


Anexa IV.20.2. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 2 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 180\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -91,98 - 0,197 \cdot d_{z2} + 23,98 \cdot p_{as} + 0,0418 \cdot d_{z2} \cdot p_{as} - 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z2}^2 - 1,58 \cdot p_{as}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,6285$$



Anexa IV.20.3. Variația vitezei de turnare în funcție de presiunea și debitul apei pe zona 3 a răcirii secundare, pentru semifabricatul cu secțiunea $\Phi 180\text{mm}$ la 40min de la începutul turnării

Ecuția care descrie suprafața este:

$$v = -42,21 - 0,056 \cdot d_{z3} + 12,62 \cdot p_{as} + 0,057 \cdot d_{z3} \cdot p_{as} - 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot d_{z3}^2 - 0,926 \cdot p_{as}^2$$

$$r_{yx1x2} = 0,6147$$

Programul SIDHD 1

```

clear
clc
x1 =
[1055,1060,1085,1092,1085,1090,1065,1070,1061,1060,1081,1069,1078,1081,1078,1074,1080,1083,1060,1070,1072,1071,1070
,1065,1070,1076,1089,1082,1091,1096,1095,1073,1080,1076,1076,1089,1063,1088,1089,1067,1070,1070,1057,1060,1065,1060
,1066,1067,1068,1076,1076]
x2 =
[7.3,7.3,7.3,7.2,7.3,7.3,7.2,7.1,7.3,7.3,7.2,7.3,7.3,7.3,7.2,7.1,7.2,7.2,7.2,7.1,7.1,7.3,7.3,7.4,7.4,7.2,7.4,7.4,7.3,7.1,7.2,7.4,7.3,7.2,7
.2,7.2,7.3,7.5,7.4,7.3,7.3,7.3,7.3,7.3,6.9,7.3,7.3,7.2,7.2,7.1]
y =
[0.8,0.8,0.8,0.9,0.9,0.9,0.8,0.9,0.8,0.9,0.9,0.8,0.9,0.85,0.75,0.85,0.75,0.7,0.9,0.9,0.8,0.8,0.75,0.8,1,0.9,0.9,0.9,0.75,0.75,1.05,0.95
,0.8,0.95,0.7,0.8,0.8,0.8,0.9,0.8,1,0.8,0.9,0.85,0.75,0.75,0.9,0.8,0.85,0.95]
echo off
x12 = x1.^2;
x22 = x2.^2;
x13 = x1.^3;
x23 = x2.^3;
echo on
echo off
clc
a11 = length(x1);
a12 = sum(x1);
a13 = sum(x2);
a14 = sum(x1.*x2);
a15 = sum(x1.^2);
a16 = sum(x2.^2);
a21 = sum(x1);
a22 = sum(x1.^2);
a23 = sum(x1.*x2);
a24 = sum(x12.*x2);
a25 = sum(x1.^3);
a26 = sum(x1.*x22);
a31 = sum(x2);
a32 = sum(x1.*x2);
a33 = sum(x2.^2);
a34 = sum(x1.*x22);
a35 = sum(x12.*x2);
a36 = sum(x2.^3);
a41 = sum(x1.*x2);
a42 = sum(x12.*x2);
a43 = sum(x1.*x22);
a44 = sum(x12.*x22);
a45 = sum(x13.*x2);
a46 = sum(x1.*x23);
a51 = sum(x1.^2);
a52 = sum(x1.^3);
a53 = sum(x12.*x2);
a54 = sum(x13.*x2);
a55 = sum(x1.^4);
a56 = sum(x12.*x22);
a61 = sum(x2.^2);
a62 = sum(x1.*x22);
a63 = sum(x2.^3);
a64 = sum(x1.*x23);
a65 = sum(x12.*x22);
a66 = sum(x2.^4);
z =
[a11,a12,a13,a14,a15,a16;a21,a22,a23,a24,a25,a26;a31,a32,a33,a34,a35,a36;a41,a42,a43,a44,a45,a46;a51,a52,a53,a54,a55,a56;a
61,a62,a63,a64,a65,a66]
x = inv(z)
echo on
echo off
clc
c1 = sum(y);

```



```

c2 = sum(y.*x1);
c3 = sum(y.*x2);
c4 = sum(y.*x1.*x2);
c5 = sum(y.*x1.^2);
c6 = sum(y.*x2.^2);
c = [c1;c2;c3;c4;c5;c6]
echo on
echo off
clc
b = x * c
echo on
echo off
clc
ryx1 = cor(y,x1)
ryx2 = cor(y,x2)
rx1x2 = cor(x1,x2)
ryx1x2 = sqrt((ryx1^2+ryx2^2-2*ryx1*ryx2*rx1x2)/(1-rx1x2^2))
echo on
% b) miza trasarea suprafetei spatiale si proiectia ei in plan
echo off
clc
mx =min(x1);
nx =max(x1);
sx =1;
my =min(x2);
ny =max(x2);
sy =0.01;
[u,v] = meshgrid(mx:sx:nx, my:sy:ny);
echo on
z = b(1) + b(2).*u + b(3).*v + b(4).*u.*v + b(5).*u.^2 + b(6).*v.^2;
echo off
figure
mesh(u,v,z);
xlabel('Debitul de apa cristalizor pe latime [l/min ]')
ylabel('Presiunea apei in cristalizor [bar]');
zlabel('Viteza de turnare pe firul 1 la 10 minute [m/min ]')
figure
[cs,h] = contourf(u,v,z);
clabel(cs,h)
xlabel('Debitul de apa cristalizor pe latime [l/min ]')
ylabel('Presiunea apei in cristalizor [bar]')

```

Subprogramul COR.m

```

function r = cor(x,y)
n = length(x);
r1 = n*sum(x.*y) - (sum(x) * sum(y));
r2 = sqrt((n*sum(x.^2) - (sum(x))^2)*(n*sum(y.^2) - (sum(y))^2));
r = r1 / r2;

```

Subprogramul CORMT3C.m

```

function ryx1x2x3 = cormt3c(x1,x2,x3,y)
ryx1 = cor(y,x1);
ryx2 = cor(y,x2);
ryx3 = cor(y,x3);
rx1x2 = cor(x1,x2);
rx1x3 = cor(x1,x3);
rx2x3 = cor(x2,x3);
p = [1,ryx1,ryx2,ryx3;ryx1,1,rx1x2,rx1x3;ryx2,rx1x2,1,rx2x3;ryx3,rx1x3,rx2x3,1]
p11 = [1,rx1x2,rx1x3;rx1x2,1,rx2x3;rx1x3,rx2x3,1];
ryx1x2x3 = sqrt(1 - (det(p)/det(p11)));

```