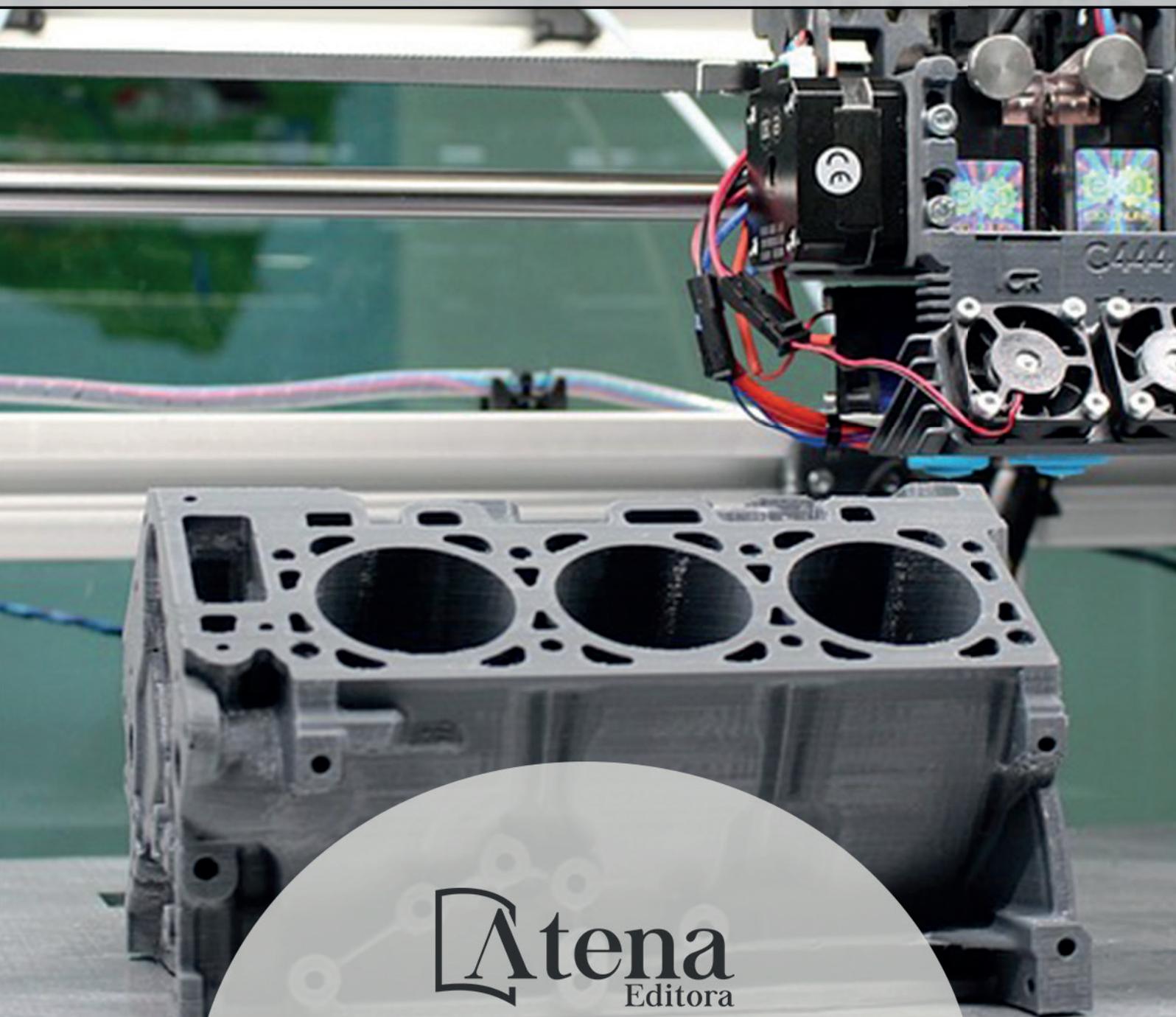


# Engenharias Mecânica e Industrial: Projetos e Fabricação

Franciele Bonatto  
Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)



 **Atena**  
Editora

Ano 2018

**Franciele Bonatto**  
**Henrique Ajuz Holzmann**  
**João Dallamuta**  
(Organizadores)

# **Engenharias Mecânica e Industrial: Projetos e Fabricação**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

### Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias mecânica e industrial [recurso eletrônico] : projetos e fabricação / Organizadores Franciele Bonatto, Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
ISBN 978-85-85107-76-5  
DOI 10.22533/at.ed.765180511

1. Automação industrial. 2. Engenharia mecânica.  
3. Produtividade industrial. I. Bonatto, Franciele. II. Holzmann, Henrique Ajuz. III. Dallamuta, João.

CDD 670.427

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

Surgida durante a Revolução Industrial na Europa no século XVIII, a Engenharia Mecânica de maneira sucinta, pode ser definida como o ramo da engenharia que se dedica a projetos, produção e manutenção de máquinas.

Nesta obra é conciliado estes dois fundamentos que são pilares na profissão de engenheiro mecânico; Projetos e fabricação. Felizmente é possível perceber que estes dois fundamentos da engenharia mecânica e industrial continuam sendo pontos fortes da formação de profissionais nesta área e dos docentes pesquisadores envolvidos neste processo.

Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e vários resultados práticos de diferentes formas de aplicação e abordagens de projetos e fabricação no âmbito da engenharia.

Trabalhos envolvendo caracterização de materiais são importantes para a execução de projetos dentro de premissas de desempenho e econômicas adequadas. Eles continuam a ser a base da formação do engenheiro projetista cujo ofício se fundamenta na correta escolha de materiais para o design do produto em concepção.

Dentro deste livro também são contemplados temas eminentemente práticos emissão de motores de combustão interna, bancadas didáticas de bombeamento, tuneis de vento além de problemas clássicos da indústria como tubulações e lubrificação.

Um compendio de temas e abordagens que constituem a base de conhecimento de profissionais que se dedicam a projetar e fabricar sistemas mecânicos e industriais.

Boa leitura

Franciele Bonatto  
Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO AÇO SAE 1020	
<i>Amadeu Santos Nunes Junior</i>	
<i>Rodrigo da Silva Miranda</i>	
<i>Adilto Pereira Andrade Cunha</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>8</b>
AJUSTE DE CURVAS DOS PARÂMETROS DE SOLIDIFICAÇÃO PARA AÇOS PRODUZIDOS POR LINGOTAMENTO CONTÍNUO	
<i>Lisiane Trevisan</i>	
<i>Juliane Donadel</i>	
<i>Bianca Rodrigues de Castro</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DEFINIÇÃO DO PERCENTUAL DE CARBONO DE UM AÇO POR MEIO DA METALOGRAFIA QUANTITATIVA	
<i>Felipe Gomes dos Santos</i>	
<i>Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>37</b>
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE COMPÓSITOS SANDUÍCHE COM NÚCLEO DE MADEIRA Balsa MEDIANTE ENSAIO DE DOBRAMENTO TRÊS PONTOS	
<i>Denilson Pablo Cruz de Oliveira</i>	
<i>Renata Portela de Abreu</i>	
<i>Pedro Augusto Silva de Sousa</i>	
<i>Abimael Lopes de Melo</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>46</b>
AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA PELO MÉTODO DE PLACA QUENTE	
<i>Wênio Fhará Alencar Borges</i>	
<i>Eduardo Corte Real Fernandes</i>	
<i>Oyama Douglas Queiroz de Oliveira Filho</i>	
<i>Alex Maurício Araújo</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>55</b>
ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA A PARTIR DA VARIAÇÃO NA REGULAGEM DAS VÁLVULAS DE ADMISSÃO E EXAUSTÃO	
<i>Fernanda de Souza Silva</i>	
<i>Adriano Sitônio Rumão</i>	
<i>Marcos da Silva Gonçalves Júnior</i>	
<i>Daniel Lira da Silva Figueiredo</i>	
<i>Bráulio Alexandre Alves de Lima</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>66</b>
ANÁLISE DE EMISSÃO DE GASES DO MOTOR HORIZONTAL BRIGGS AND STRATTON INTEK 10 HP BAJA SAE	
<i>Bruno Silvano da Silva</i>	
<i>Daniel Willemam Trindade</i>	
<i>Elias Rocha Gonçalves Júnior</i>	
<i>Virgínia Siqueira Gonçalves</i>	
<i>Claudio Luiz Melo de Souza</i>	

**CAPÍTULO 8 ..... 79**

ROTEIRO TÉCNICO PARA CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA EM CÂMARAS FRIGORÍFICAS UTILIZADAS EM ESTABELECIMENTOS COMERCIAIS

*Ismael de Marchi Neto*  
*Rodrigo Corrêa da Silva*  
*Mateus de Souza Goulart*  
*Rafael Sene de Lima*  
*Ricardo de Vasconcelos Salvo*

**CAPÍTULO 9 ..... 97**

UTILIZAÇÃO DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA REFRIGERAÇÃO DE PARADAS DE ÔNIBUS EM TERESINA-PI

*Wênio Fhará Alencar Borges*  
*Armystron Gonçalves Ferreira Araújo*  
*Alexsione Costa Sousa*  
*Luciane Norberto Menezes de Araújo*  
*Maria Onaira Gonçalves Ferreira*

**CAPÍTULO 10 ..... 108**

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DE CURVA DE CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBA CENTRÍFUGA

*Janio Marreiros Gomes,*  
*Ighor Caetano Silva Ferreira,*  
*Adriano do Amor Divino Guilhon Serra,*  
*Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho,*  
*Wellington de Jesus Sousa Varella,*  
*Thymisson Sousa da Paixão,*

**CAPÍTULO 11 ..... 120**

*Rafael Costa Da Silva*  
*Luiz Carlos Cordeiro Junior*  
INTRODUÇÃO À ANÁLISES HIDRÁULICAS ATRAVÉS DO ESTUDO DO COMPRIMENTO CARACTERÍSTICO EM TUBULAÇÕES

**CAPÍTULO 12 ..... 132**

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MINI TUNEL DE VENTO DIDÁTICO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS AERODINÂMICOS

*Diógenes Leite Souza*  
*Fernando Lima de Oliveira*

**CAPÍTULO 13 ..... 151**

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS NO MOTOR DO CARRO ARRANCADA

*Paulo Rutenberg Madeira Santos*  
*Higor Leandro Veiga da Silva*

**CAPÍTULO 14 ..... 158**

ANÁLISE DO ESCOAMENTO DO ÓLEO BASE DE UMA GRAXA MINERAL EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONTAMINAÇÃO

*Ana Cláudia Marques*  
*Bruno Henrique Viana Mendes*  
*Jorge Nei Brito*

**CAPÍTULO 15 ..... 167**

MEDIDOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM MEIOS LÍQUIDOS NA OBTENÇÃO DE SOLUÇÕES EM ENGENHARIA

*Vagner dos Anjos Costa*  
*Cochiran Pereira dos Santos*

*Antonio Cardoso Ferreira  
Jubiraí José Galliza Júnior  
Fabrício Oliveira Silva  
Fabio Santos de Oliveira  
Silvio Leonardo Valença*

**CAPÍTULO 16..... 179**

ESTUDO EXPERIMENTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE ONDAS E CORRENTES MARÍTIMAS

*Reginaldo Nunes da Silva  
Patrícia do Nascimento Pereira  
Fernando Lima de Oliveira*

**CAPÍTULO 17 ..... 186**

USO DO SENSOR HC – SR04 COM O ARDUINO UNO: UMA ANÁLISE DE ERROS DE MEDIÇÃO ENVOLVENDO AS BIBLIOTECAS ULTRASONIC E NEW PING

*Lucas Santin Bianchin  
Rogério Bido  
Vanessa Carina Dal Mago  
Alexsander Furtado Carneiro*

**CAPÍTULO 18..... 198**

MODERNIZAÇÃO E ADEQUAÇÃO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA ATRAVES DA IMPLANTAÇÃO DE REDE INDUSTRIAL E SISTEMA SCADA EM WINCC RT

*Fabrício Roosevelt Melo da Silva  
Diego Antônio de Moura Fonseca  
Andrés Ortiz Salazar*

**SOBRE O ORGANIZADORES..... 213**

## AJUSTE DE CURVAS DOS PARÂMETROS DE SOLIDIFICAÇÃO PARA AÇOS PRODUZIDOS POR LINGOTAMENTO CONTÍNUO

### Lisiane Trevisan

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha

lisiane.trevisan@farroupilha.ifrs.edu.br

### Juliane Donadel

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha

### Bianca Rodrigues de Castro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha

**RESUMO:** A microestrutura do material metálico resultante do processo de fabricação depende fundamentalmente do histórico da variação dos parâmetros de solidificação ocorridas durante o processo de solidificação. Dentro do processo de lingotamento contínuo, os parâmetros de solidificação são calculados com base no monitoramento do resfriamento do material metálico quando submetido a diferentes zonas de resfriamento: resfriamento primário, secundário e terciário. Rotinas numéricas utilizadas na forma de software possibilitaram o cálculo dos seguintes parâmetros de solidificação: gradiente térmico, velocidade de deslocamento das isothermas liquidus/solidus e taxa de solidificação. Este artigo tem como

objetivo realizar o ajuste de curvas através do método dos mínimos quadrados, para valores de parâmetros de solidificação calculados para coordenadas específicas da seção transversal de um lingote metálico para os aços SAE 1141 e SAE 8620. Os resultados mostram as curvas que melhor se ajustam aos dados baseadas no melhor coeficiente de determinação. Assim, é possível mapear o comportamento dos parâmetros analisados, nos intervalos de tempo que não foram medidos experimentalmente, e conseqüentemente, estimar o comportamento da curva liquidus/solidus. Futuramente, sugere-se realizar este estudo com outras qualidades de aço para a comparação entre equações representativas dos parâmetros de solidificação estudados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Parâmetros de solidificação, Lingotamento Contínuo, Método de Mínimo Quadrados

**ABSTRACT:** The microstructure of the metallic material resulting from the manufacturing process fundamentally depends on the history of the variation in solidification parameters occurring during the solidification process. Within the continuous casting process, solidification parameters are calculated based on the cooling of the monitoring of the metal material when subjected to different cooling

zones: primary, secondary and tertiary cooling. Numerical routines used in the form of software allowed the calculation of the following solidification parameters: temperature gradient, displacement speed of isotherms liquidus / solidus and solidification rate. This article aims to accomplish the curve fitting by the method of minimum squares, for solidification parameter values calculated for specific coordinates of the cross section of a metal ingot for the SAE 1141 and SAE 8620 steels. The results show the curves that best fit the data based on the best coefficient of determination. Thereby, it is possible to map the behavior of the parameters analyzed in time intervals that were not measured experimentally, and thus estimate the behavior of the liquidus / solidus curve. In the future, it is suggested to perform this study with other steel qualities for comparison between equations representative of the studied parameters solidification.

**KEYWORDS:** Solidification parameters, Continuous Casting, Square Minimum Method

## INTRODUÇÃO

Conforme descrito por Janik *et.al.* (2004) o processo de lingotamento contínuo é um método primário de produção de lingote e placas. Neste processo, o aço líquido é transformado em estado sólido através de um molde de cobre resfriado com água, submetido a diferentes zonas de resfriamento: molde, zona de resfriamento com jato de água (zona de resfriamento secundário) e zona de resfriamento terciário.

O desempenho do sistema de lingotamento contínuo em termos de qualidade e produtividade depende do controle dos vários estágios envolvidos no processo, como são medidos estes parâmetros e a interação entre si. No entanto, são três os principais módulos de controle: determinação das propriedades dos materiais trabalhados, medição das tensões existentes na casca solidificada e otimização da velocidade de lingotamento (Kulkarni, 2005).

Os problemas de transferência de calor com a mudança de fase, particularmente na solidificação, caracterizam-se por possuírem uma fronteira móvel que se desloca com o tempo: isothermas *liquidus/solidus*. Existem algumas dificuldades na medição de temperaturas de transformação líquido - sólido devido a altas temperaturas e a indisponibilidade de equipamentos, assim, é possível estimar os valores de transformação pelo uso de equações empíricas que correlacionam matematicamente as temperaturas em função da composição química. A solidificação é um caso de fronteira livre, onde os processos de transferência de calor, massa e quantidade de movimento determinam a evolução das isothermas ao longo do tempo e conseqüentemente a microestrutura resultante (Shi, 2003).

Devido a presença de alguns elementos de liga, os valores da temperatura solidus e liquidus foram descritas por diferentes equações (Kulkarni, 2005), (Janik, 2004). No entanto serão utilizados, nesse trabalho, as equações descritas por Thomas (1987) por se tratar de equações empíricas, conforme descrito na Eq. (1) e na Eq. (2), que relaciona a composição química do material metálico com a temperatura liquidus

(TL(°C)) e temperatura solidus (TS(°C)).

$$TL (^\circ\text{C}) = 1537 - 88(\%C) - 25(\%S) - 5(\%Cu) - 8(\%Si) - 5(\%Mn) - 2(\%Mo) - 4(\%Ni) - 1,5(\%Cr) - 18(\%Ti) - 30(\%P) - 2(\%V) \quad (1)$$

$$TS (^\circ\text{C}) = 1535 - 200(\%C) - 183,9(\%S) - 12,3(\%Si) - 6,8(\%Mn) - 4,3(\%Ni) - 1,4(\%Cr) - 4,1(\%Al) - 124,5(\%P) \quad (2)$$

O objetivo principal deste artigo é, partindo de duas qualidades distintas de aço lingotado, calcular três parâmetros de solidificação como gradiente térmico existente à frente da isoterma *liquidus* e a velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* e taxa de resfriamento baseados nas curvas de resfriamento obtidas por software verificado em planta industrial. Com base nos valores dos parâmetros de solidificação pontuais serão estimadas as curvas que melhor se ajustam a esses parâmetros.

Os dados obtidos experimentalmente formam um diagrama de dispersão, onde dificilmente passará uma curva em cada ponto que descreva fielmente o sistema. Isso porque dados experimentais possuem erro inerentes ao processo, além de alterações que algumas variáveis podem sofrer durante a experiência. Nesse sentido, o método dos mínimos quadrados é aplicado para ajustar uma curva de dados, minimizando os resíduos, ou seja, a menor diferença entre o valor estimado pela função e o medido experimentalmente. Uma das vantagens do ajuste de curvas é que, além de prever valores entre os pontos medidos, pode-se prever valores da função que estão fora do intervalo fornecido, ou seja, é possível fazer uma extrapolação.

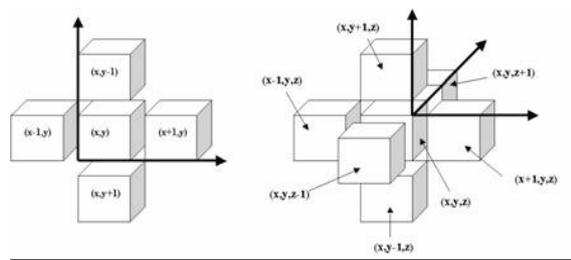
## METODOLOGIA

Neste trabalho, o processo matemático de solidificação está baseado na descrição matemática na análise de circuitos elétricos (Spim, 2003). Para Garcia (2005) a análise do processo de solidificação pode ser muito útil na quantificação dos modos de transferência de calor atuantes e significativos utilizando a analogia entre o circuito elétrico e o circuito térmico. A taxa de transferência de calor por unidade de área pode ser considerada como um fluxo de corrente, fazendo-se uma combinação entre condutividade térmica e espessura solidificada, associada a uma resistência para a passagem desse fluxo. A temperatura é a força motriz para o fluxo de calor.

A máquina de lingotamento contínuo estudada opera com três tipos de moldes de cobre refrigerados, com seções de 150x150 mm, 180x180 mm e 240x240 mm, com comprimento de 801 mm, podendo também ser dividido em moldes retos ou lineares e moldes parabólicos. Neste artigo foi utilizado o molde com seção de 150x150 mm parabólico, assim no estudo comparativo entre parâmetros de solidificação. Os fatores de forma foram desprezados.

Para o monitoramento das temperaturas da planta, moldes de seções 150x150mm, os termopares foram todos posicionados a uma distância de 4,4 mm da face quente do molde (interface metal/molde), sendo que um termopar foi posicionado à 15 mm acima do menisco e outro partindo do menisco.

Conforme descrito por Santos (2003) o número de elementos do volume da malha unidimensional foi definido em função da convergência dos resultados, de forma que se encontrou um valor para  $\Delta x = \Delta y = 1$  mm. Para este artigo foram obtidos os mapeamentos de temperatura para as cinco diferentes posições dos termopares do metal a partir da interface metal/molde, para uma seção, considerando simetria para seção transversal.



**Figura 1.** Referência de coordenadas utilizadas no Método de Diferenças Finita (MDF) (Trevisan, 2009)

O Método de Diferenças Finitas (MDF) baseia-se na divisão do sistema metal/molde em pequenos intervalos de distâncias iguais de modo a estabelecer uma malha volumétrica. Baseado nesta malha, são descritas equações diferenciais de transferência de calor para resolver o problema. O MDF tem sido utilizado na modelagem de solidificação em processo de lingotamento contínuo de blocos, tarugos e placas, devido as características geométricas simples destes produtos. A equação diferencial de transferência de calor expressa em função de variáveis de processo é substituída por uma equação em função de variáveis  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$  – diferencial de volume, simulado em função do tempo.

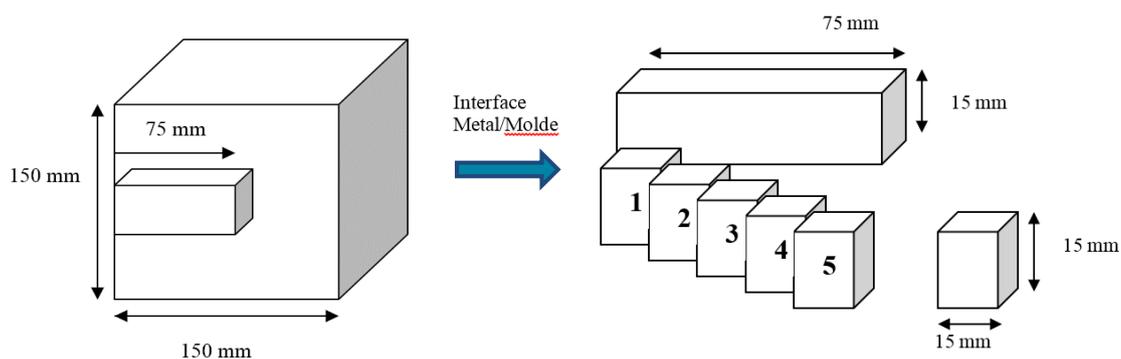
Os parâmetros de simulação utilizados dependem da qualidade do aço estudada. Estes parâmetros são descritos inicialmente pelo usuário através de telas de interface, os quais seguem descritos na Tab. 1.

Propriedades do metal no estado			
Temperatura de lingotamento	SAE 1141 – 1505,7°C SAE 8620 – 1536,8°C	Condutividade térmica	29 [W/m.K]
Calor latente de fusão	272.000 [J/kg]	Densidade	7800[kg/m³]
Coefficiente de partição	0,2	Calor específico	490 [J/kg.K]
Propriedades do metal no estado líquido			
Condutividade térmica	29[W/m.K]	Temperatura <i>solidus</i>	SAE 1141 – 1424,5°C SAE 8620 – 1474,8°C
Densidade	7800[kg/m³]	Temperatura <i>liquidus</i>	SAE 1141 – 1484,9°C SAE 8620 – 1507,5°C
Calor específico	490 [J/kg.K]	Molde	Seção 150 - Parabólico

**Tabela 1.** Propriedades térmicas do metal

As propriedades descritas na Tab.1 são fundamentais para que possa obter valores repetitivos para distintas simulações. Os valores foram obtidos a partir da literatura e do tutorial do InalC+. É importante ressaltar que a temperatura *liquidus* e *solidus* foram obtidos com base na Eq. (1) e na Eq. (2).

Com base nas propriedades e equações que descrevem o resfriamento do material (baseado no Método de diferenças finitas), foram simulados o resfriamento de cinco coordenadas ao longo de uma seção transversal escolhida aleatoriamente: (15 mm; 75mm), (30 mm; 75mm), (45 mm; 75mm), (60 mm; 75mm) e (75 mm; 75mm), distante suficientemente das seções de início e fim do lingotamento. As coordenadas foram distribuídas igualmente com distância constante entre si (15 mm), conforme descrito na Fig. (2).



**Figura 2.** Referencial utilizado na determinação das regiões de estudo

Com base no monitoramento do resfriamento das coordenadas escolhidas para os dois tipos de aço, foram calculadas a taxa de resfriamento, a velocidade das isothermas *liquidus/solidus* e o gradiente térmico para cada uma das coordenadas. A próxima etapa é o ajuste de curvas com base nos pontos monitorados. O ajuste de curvas auxilia a estimar os parâmetros de solidificação para os pontos não monitorados. Industrialmente, além de problemas com a etapa experimental, há uma limitação física

para a instrumentação dos lingotes durante o resfriamento.

Segundo Chapra & Raymond (2008), a estratégia é minimizar soma dos quadrados dos resíduos entre o valor medido da variável dependente e o valor calculado pelo modelo linear. Isso fornece um único conjunto de dados.

A Equação (3) apresenta a forma geral dos mínimos quadrados em que “e” representa a diferença entre o y medido experimentalmente e o estimado com o modelo linear conforme indicado pela Eq. (4) em que  $a_0$  e  $b_0$  são parâmetros a ser estimados levando em conta a minimização do erro.

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i \text{ medido}} - \hat{y}_{i \text{ estimado}})^2 \quad (3)$$

$$y = a_0 + b_0 x \quad (4)$$

Considerando que a minimização do erro se dá através do cálculo dos pontos críticos da função por diferenciação, chegamos nas seguintes fórmulas para estimativa dos coeficientes da reta na Eq. (5), sendo que  $x_i$  e  $y_i$  são valores medidos (Ruggiero & Lopes, 1996):

$$a_0 = \frac{\sum y_i - b_1 \sum x_i}{n} \quad \text{e} \quad b_0 = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum (x_i y_i)}{(\sum x_i)^2 - n \sum (x_i^2)} \quad (5)$$

Para os casos não lineares, é feita uma linearização das funções para aplicação do Método dos mínimos quadrados conforme Tab. 2.

Tipo de linearização	Função	Função parametrizada
Exponencial	$y = a \cdot b^x$	$\ln y = \ln(a) + x \cdot \ln(b)$
Logarítmica	$y = \log_a x$	$a^y = x$
Geométrica	$y = \frac{1}{a + b \cdot x}$	$\frac{1}{y} = a + b \cdot x$

**Tabela 2.** Linearização de funções

O ajuste polinomial não segue a linearização como as demais funções. Para esse caso é feito ajuste polinomial linear múltiplo conforme a equação Eq. (6).

$$y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x^3 + b_4 \cdot x^4 \quad (6)$$

Depois de feita a regressão é possível calcular a soma dos quadrados dos resíduos em torno da reta de regressão, isso se caracteriza pelo erro residual,  $S_r$ , utilizado para quantificar a qualidade da regressão através do coeficiente de determinação,  $R^2$ . Para um ajuste perfeito o erro residual seria nulo e o coeficiente de determinação seria um. Isso significa que a curva determinada através da regressão por quadrados mínimos

abrange cem por cento dos pontos dos dados analisados (Barroso *et. al.*, 1987).

A Equação (7) apresenta o cálculo do coeficiente de determinação  $R^2$ :

$$R^2 = \frac{(\sum x_i y_i - \frac{1}{n} \sum x_i \cdot \sum y_i)^2}{[\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2] \cdot [\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2]} \quad \text{sendo } 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (7)$$

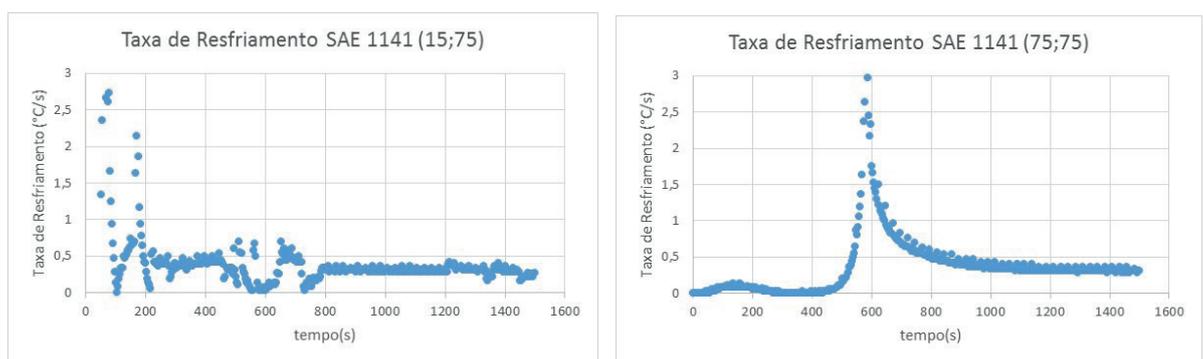
Os testes para encontrar a curva que melhor se ajusta aos dados foram realizados todos em planilha eletrônica, e a comparação dos resultados é apresentada a seguir.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a apresentação dos resultados, os parâmetros de solidificação foram divididos em três seções: taxa de resfriamento, gradiente térmico e velocidade de deslocamento das isothermas *solidus/liquidus*, onde em cada seção é apresentada uma tabela com todos os coeficientes de determinação testados e logo após, a função que melhor se ajusta aos dados baseado no coeficiente de determinação mais próximo de 1, ou seja, no método dos mínimos quadrados.

### Taxa de Resfriamento

A taxa de resfriamento é descrita como a variação da temperatura com o tempo. A temperatura inicial será de 1000°C, representativa da região de resfriamento terciário, pois a partir da temperatura de 1000°C é que ocorrem as transformações de fase importantes como a formação de perlita/ferrita.



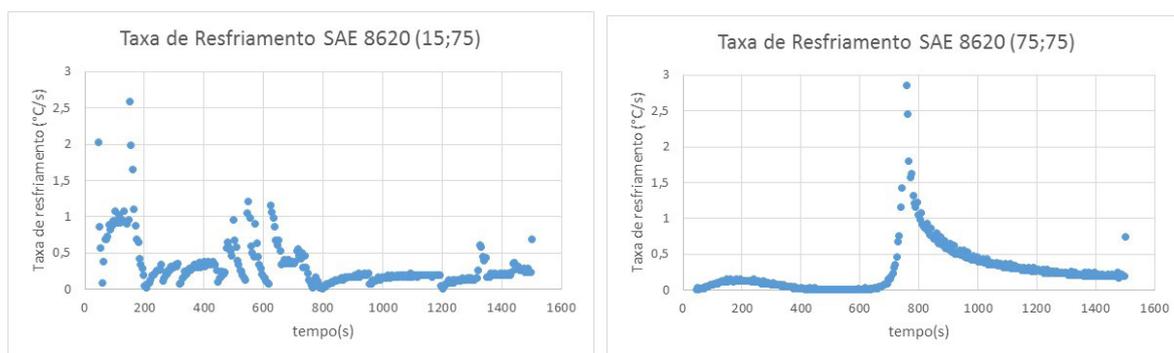
**Figura 3.** Taxa de resfriamento calculado para cada duas coordenadas para SAE 1141.

A Figura 3 mostra a taxa de resfriamento das coordenadas (15 mm; 75 mm), partindo do tempo inicial ocorre uma oscilação no valor da taxa de resfriamento, devido a influência sofrida do calor existente no centro do lingote (representado pela coordenada (75 mm; 75 mm)) que sofre convecção, no entanto, a partir do tempo 200 segundos, ocorre a estabilização e o valor da taxa de resfriamento médio é de 0,27 °C/s. Considerando o diagrama CCT (*Continuous Cooling Temperature*), a microestrutura

formada é perlita/ferrita para este valor de taxa de resfriamento (Trevisan, 2009).

Ainda em relação a Fig. (3), a taxa de resfriamento da coordenada (75; 75), coordenada representativa do centro geométrico, mostra um comportamento característico. Até aproximadamente 600 segundos, o valor da taxa de resfriamento é zero, ou seja, a frente de solidificação não atingiu o centro geométrico até o tempo de 600 segundos. Posterior a isso, o valor da taxa de resfriamento também se estabiliza, com valor próximo a 0,25 °C/s. Este valor de taxa de resfriamento também descreve a microestrutura por perlita/ferrita.

Para o aço SAE 8620, temos os valores de taxa de resfriamento descritos para as coordenadas descritas anteriormente na Fig. (4).



**Figura 4.** Taxa de resfriamento calculado para cada duas coordenadas para SAE 8620.

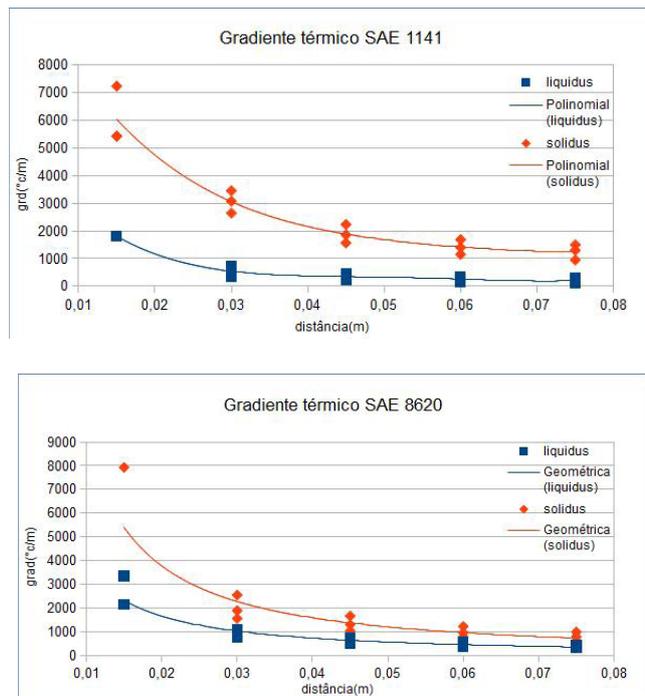
A Figura 4 mostra a taxa de resfriamento para as duas coordenadas (15;75) e (75;75), da mesma forma que o aço SAE 1141, a taxa de resfriamento do SAE 8620 para a coordenada (15;75) ocorre uma oscilação do valor da taxa devido a transferência de calor sofrida por esse ponto, devido as fronteiras aos quais ocorrem a transferência de calor. Para essa coordenada, o SAE 8620 necessita de maior tempo para a estabilização da taxa de resfriamento quando comparada ao SAE 1141, e o valor médio é de 0,32 °C/s.

Já para a coordenada (75;75), a frente de solidificação leva o tempo de aproximadamente 800 s (segundos) para atingir a coordenada. O SAE 8620 apresenta tempo maior para o deslocamento da isoterma *solidus* quando comparado ao SAE 1141. Isso provavelmente ocorra devido as diferenças entre as composições químicas dos materiais estudados, o que conseqüentemente, alteram os valores das temperaturas *solidus* e *liquidus*.

## Gradiente Térmico

O gradiente térmico é descrito pela variação de temperatura em função da distância percorrida em (°C/cm) ou (°C/m). O problema de transferência de calor o qual descreve a solidificação é complexo porque o sistema libera calor na frente de solidificação, ao qual a fronteira *solidus/liquidus* movimenta-se ao longo do tempo (Muller, 2002). O gradiente térmico dos aços estudados é descrito na Fig. (5) para

cada uma das coordenadas determinadas inicialmente.



**Figura 5.** Gradiente térmico calculado para cada qualidade de aço estudado

A Figura 5 é um gráfico feito através dos dados obtidos experimentalmente e das curvas ajustadas para obter o comportamento da gradiente térmico *liquidus* e *solidus* dos materiais utilizados. O gradiente térmico tem valores decrescentes à medida que seu valor é calculado para as coordenadas próximas ao centro geométrico do lingote. Como o valor calculado é positivo, significa que todo o calor que entra pela interface solido/líquido é conduzido para o molde. (Muller, 2002)

A Tabela 3 demonstra todas as possibilidades estudadas para a aproximação de uma função analítica para determinar o comportamento do gradiente térmico do SAE 1141, tendo como critério de escolha o coeficiente de determinação, que deve ser próximo de 1.

Tipo de aproximação	Coeficiente de determinação – <i>liquidus</i>	Coeficiente de determinação – <i>solidus</i>
Exponencial	0,7781	0,8705
Linear	0,6628	0,7543
Geométrica	0,8757	0,9329
Polinomial (4º grau)	0,9760	0,9393
Logarítmica	0,8421	0,8911

**Tabela 3.** Possibilidades de aproximação para o gradiente térmico do SAE 1141

As Equações (8) e (9) apresentam as funções analíticas escolhidas para determinar o comportamento do gradiente térmico *liquidus* e *solidus*, respectivamente, do metal SAE 1141, calculada a partir do método de regressão por mínimos quadrados.

A função que melhor se ajustou aos dados foi o polinômio de quarto grau, baseando-se nos coeficientes de determinação apresentados na Tab. 7.

$$f(x)=732876085,9625x^4 - 157393689,9863x^3 + 12419135,8025x^2 - 432512,3457x + 5997,4815 \quad (8)$$

$$f(x)=5819844553,5896x^4 - 141673525,3773x^3 + 134802446,9136x^2 - 611160,4938x + 12616,3704 \quad (9)$$

Em que “ $f(x)$ ” representa o gradiente térmico *liquidus* e *solidus*, respectivamente, medidos em graus Celsius por metros ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) e “ $x$ ” é distância percorrida medida em metros (m).

A Tabela 4 demonstra todas as possibilidades estudadas para a aproximação de uma função analítica para determinar o comportamento do gradiente térmico SAE 8620, tendo como critério de escolha o erro residual.

Tipo de aproximação	Coefficiente de determinação – <i>liquidus</i>	Coefficiente de determinação – <i>solidus</i>
Exponencial	0,8485	0,7855
Linear	0,6484	0,5572
Geométrica	0,9328	0,8770
Polinomial	0,8999	0,8151
Logarítmica	0,8034	0,7057

**Tabela 4.** Possibilidades de aproximação para o gradiente térmico do SAE 8620

As Equações (10) e (11) apresentam as funções analíticas escolhidas para determinar o comportamento do gradiente térmico *liquidus* e *solidus* do metal SAE 8620, respectivamente, calculada a partir do método de regressão por mínimos quadrados.

$$f(x) = \frac{16,5006}{x^{1,1785}} \quad (10)$$

$$f(x) = \frac{28,8445}{x^{1,2459}} \quad (11)$$

Conforme Tab. 8, o coeficiente de determinação indica que a função que melhor se ajusta aos dados é a geométrica, em que a variável dependente “ $f(x)$ ” representa o gradiente térmico *liquidus* e *solidus*, respectivamente, medido em graus Celsius por metros ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) e “ $x$ ” é distância percorrida medida em metros (m).

### Velocidade de Deslocamento das Isotermas *solidus/liquidus*

A velocidade de deslocamento das isotermas *solidus/liquidus* é descrito pela variação da posição das isotermas com o tempo. Inicialmente, as isotermas possuem velocidade maior o que decresce com o tempo. A Tabela 5 mostra o tempo de deslocamento das isotermas para cada tipo de aço. É importante ressaltar que os tempos foram determinados com base na instrumentação feita para medição do

sistema, cronômetro com maior precisão poderiam ser utilizados.

Coordenada	Tempo para deslocamento das isothermas <i>liquidus</i>	Velocidade de Deslocamento isothermas <i>liquidus</i>	Tempo para deslocamento das isothermas <i>solidus</i>	Velocidade de Deslocamento isothermas <i>solidus</i>
(15;75)	0,08	3,125	0,15	1,667
(30;75)	0,85	0,588	1,46	0,343
(45;75)	3,70	0,203	6,09	0,123
(60;75)	5,32	0,188	8,40	0,119
(75;75)	6,86	0,182	12,49	0,100

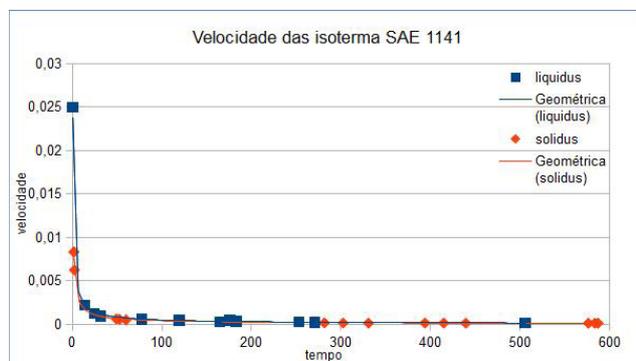
**Tabela 5.** Tempo de deslocamento para as isothermas do SAE 8620, em minutos. Velocidade de deslocamento das isothermas expressa em mm/s.

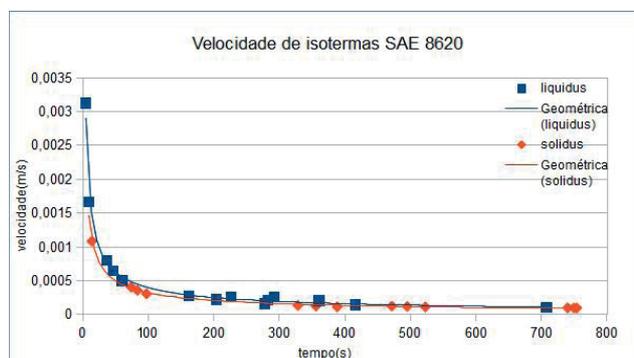
É possível verificar que a velocidade tanto das isothermas *liquidus* quanto da isothermas *solidus* tem seu valor decrescente ao longo das coordenadas, ou seja, a medida que ocorre a propagação para o centro geométrico do lingote. O tempo de deslocamento das isothermas para o aço SAE 1141 é descrito na Tab. 6.

Coordenada	Tempo para deslocamento das isothermas <i>liquidus</i>	Velocidade de Deslocamento isothermas <i>liquidus</i>	Tempo para deslocamento das isothermas <i>solidus</i>	Velocidade de Deslocamento isothermas <i>solidus</i>
(15;75)	0,06	4,160	0,18	1,389
(30;75)	0,41	1,219	0,82	0,610
(45;75)	2,05	0,366	4,98	0,151
(60;75)	3,34	0,299	6,85	0,146
(75;75)	4,86	0,257	9,66	0,129

**Tabela 6.** Tempo de deslocamento para as isothermas do SAE 1141, em minutos. Velocidade de deslocamento das isothermas expressa em mm/s.

As funções de aproximação das velocidades das isothermas para ambos os aços são descritas a seguir:





**Figura 6.** Velocidade das isothermas calculada para cada qualidade de aço estudado

A Figura 6 é um gráfico feito através dos dados obtidos experimentalmente e das curvas ajustadas para obter o comportamento da velocidade de isothermas *liquidus* e *solidus* dos materiais estudados. Podemos perceber que a velocidade das isothermas do aço SAE 1141 diminuem mais rapidamente que o SAE 8620, porém, ambas tendem a zero mais lentamente a medida que o aço se solidifica.

A Tabela 7 demonstra todas as possibilidades estudadas para a aproximação de uma função analítica para determinar o comportamento da velocidade das isothermas do SAE 1141, tendo como critério de escolha o coeficiente de determinação.

Tipo de aproximação	Coeficiente de determinação – <i>liquidus</i>	Coeficiente de determinação – <i>solidus</i>
Exponencial	0,5338	0,6769
Linear	0,2594	0,4182
Geométrica	0,9934	0,9935
Polinomial (4º grau)	0,8207	0,9744
Logarítmica	0,8681	0,8718

**Tabela 7.** Possibilidades de aproximação para a velocidade das isothermas do SAE 1141

As Equações (12) e (13) representam as funções analíticas escolhidas para determinar o comportamento da velocidade de isothermas *liquidus* e *solidus* do metal SAE 1141, respectivamente, calculada a partir do método de regressão por mínimos quadrados.

$$f(x) = \frac{0,0162}{x^{0,7570}} \quad (12)$$

$$f(x) = \frac{0,0118}{x^{0,7366}} \quad (13)$$

Conforme Tab. 11, o coeficiente de determinação indica que a função que melhor se ajusta aos dados é a geométrica, em que a variável dependente “ $f(x)$ ” representa velocidade de isothermas *liquidus* e *solidus*, respectivamente, medido em metros por segundos (m/s) e “ $x$ ” é tempo medido em segundos (s).

A Tabela 8 demonstra todas as possibilidades estudadas para a aproximação de

uma função analítica para determinar o comportamento da velocidade das isothermas SAE 8620, tendo como critério de escolha o erro residual.

Tipo de aproximação	Coefficiente de determinação – <i>liquidus</i>	Coefficiente de determinação – <i>solidus</i>
Exponencial	0,6834	0,7508
Linear	0,3804	0,5064
Geométrica	0,9849	0,9917
Polinomial	0,8786	0,9471
Logarítmica	0,8486	0,8723

**Tabela 8.** Possibilidades de aproximação para a velocidade das isothermas do SAE 8620

As Equações (14) e (15) apresentam as funções analíticas escolhidas para determinar o comportamento da velocidade de isothermas *liquidus* e *solidus*, respectivamente, do metal SAE 8620, calculada a partir do método de regressão por mínimos quadrados.

$$f(x) = \frac{0,0081}{x^{0,6530}} \quad (14)$$

$$f(x) = \frac{0,0059}{x^{0,6294}} \quad (15)$$

Novamente, a curva que melhor se ajustou foi a geométrica, conforme coeficiente de determinação indicado na Tab. 12, em que “ $f(x)$ ” representa a velocidade de isothermas *liquidus* e *solidus*, respectivamente, medido em metros por segundos (m/s) e “ $x$ ” é tempo medido em segundos (s).

## CONCLUSÃO

Analisando o ajuste de curvas aos dados obtidos experimentalmente, podemos concluir que existem curvas que se ajustam aos dados, com um valor do coeficiente de correlação muito próximo do valor um, ou seja, com baixo erro residual. Em particular, as funções geométricas que descrevem a velocidade das isothermas *solidus* e *liquidus* para os aços SAE 1141 e SAE 8620, mostram que ambas tendem a zero a medida que o tempo passa, porém, a curva do SAE 1141 tende a zero mais rapidamente quando comparado com o SAE 8620. Isso ocorre provavelmente devido a diferença entre os valores de intervalo de solidificação. O intervalo de solidificação é descrito pela diferença entre a temperatura *solidus* e *liquidus*. O SAE 1141 possui um intervalo de solidificação de 65,41°C, já o SAE 8620 apresenta um intervalo de solidificação de 33,05°C.

As funções que descrevem o gradiente térmico em função da distância para o SAE 8620 também são geométricas. No entanto, para SAE 1141 são polinômios

de quarto grau, ambos com quatro raízes complexas. As diferentes funções são escolhidas baseadas no coeficiente de determinação de cada uma. Apesar de estimarmos funções distintas para os diferentes aços, o comportamento gráfico das mesmas é muito semelhante no intervalo considerado, além disso, os coeficientes de determinação também possuem valores próximos, o que reforça a semelhança de ambas as funções. O gradiente térmico é fundamental no auxílio da descrição do balanço térmico da interface sólido/líquido, como ocorre a extração de calor na interface.

Finalmente, pode-se concluir que funções matemáticas de aproximação obtidas pelo método dos mínimos quadrados auxiliam na compreensão do comportamento dos parâmetros de solidificação dos dois aços analisados. A importância do ajuste de curvas está relacionada ao custo de instrumentação do material metálico produzido pelo processo de lingotamento contínuo, além de possíveis problemas experimentais na instrumentação do uso de vários termopares simultaneamente em uma seção transversal limitada a 150 mm.

## AGRADECIMENTOS

À Bolsa de Iniciação Científica e Tecnológica para Ensino Superior (BICTES) – fomento do IFRS – Campus Farroupilha. A Aços Favorit pelo fornecimento do material metálico utilizado neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

Barroso, L.C., et. al., 1987, “Cálculo Numérico com Aplicações”. 2 ed. Ed. Harbra, S.Paulo, Brasil, 384 p.

Chapra, S.C., Raymond, P.C., 2008, “Métodos numéricos para engenharia”, 5 ed. McGraw-Hill, S.Paulo, Brasil, 809 p.

Garcia, A.; Spim, J.A.; Santos, C.A.; Cheung, N. “Lingotamento Contínuo de Aços”. Associação Brasileira de Metalurgia, São Paulo, SP. (2006).

Janik, M., Dyja, H., 2004, “Modelling of three-dimensional temperature field inside the mould during continuous casting of steel”, Journal of Materials Processing Technology, Vol.157-158, pp. 177-182.

Kulkarni, M.S., Babu, Subash, 2005, “Managing quality in continuous casting process using product quality model and simulated annealing”, Journal of Materials Processing Technology, Vol.166, pp. 294-306.

Ruggiero, M.A.G., Lopes, V.L.R., 1996, “Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais”. 2ª ed. Ed. Pearson Makron Books, S.Paulo, Brasil, 406 p.

Santos, C. A.; Spim, J. A.; Garcia, A. “Mathematical modeling and optimization strategies (genetic algorithm and knowledge base) applied to the continuous casting of steel”. Engineering Applications of Artificial Intelligence, V.16, N° 5-6, pp. 511-527,(2003).

Shi, Z., Guo, Z.X., 2004, “Numerical heat transfer modelling for wire casting Materials Science and

Engineering A”, Vol.365, pp. 211-31.

Trevisan, L., 2009, “Estudo comparativo entre microestrutura e parâmetros de solidificação em aços produzidos por lingotamento contínuo”. Dissertação de Mestrado. Rio Grande do Sul, Brasil, 106 pp.

## **DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**Franciele Bonatto** Professora assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação e mestrado em engenharia de produção pela UTFPR e doutorado em andamento em Engenharia de Produção pela mesma universidade. Trabalha com os temas: gestão da qualidade, planejamento e controle da produção e cadeia de suprimentos.

**Henrique Ajuz Holzmann** Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**João Dallamuta** Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro de Telecomunicações pela UFPR. Especialista em Inteligência de Mercado pela FAE Business School. Mestre em Engenharia pela UEL. Trabalha com os temas: Inteligência de Mercado, Sistemas Eletrônicos e Gestão Institucional.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-76-5



9 788585 107765