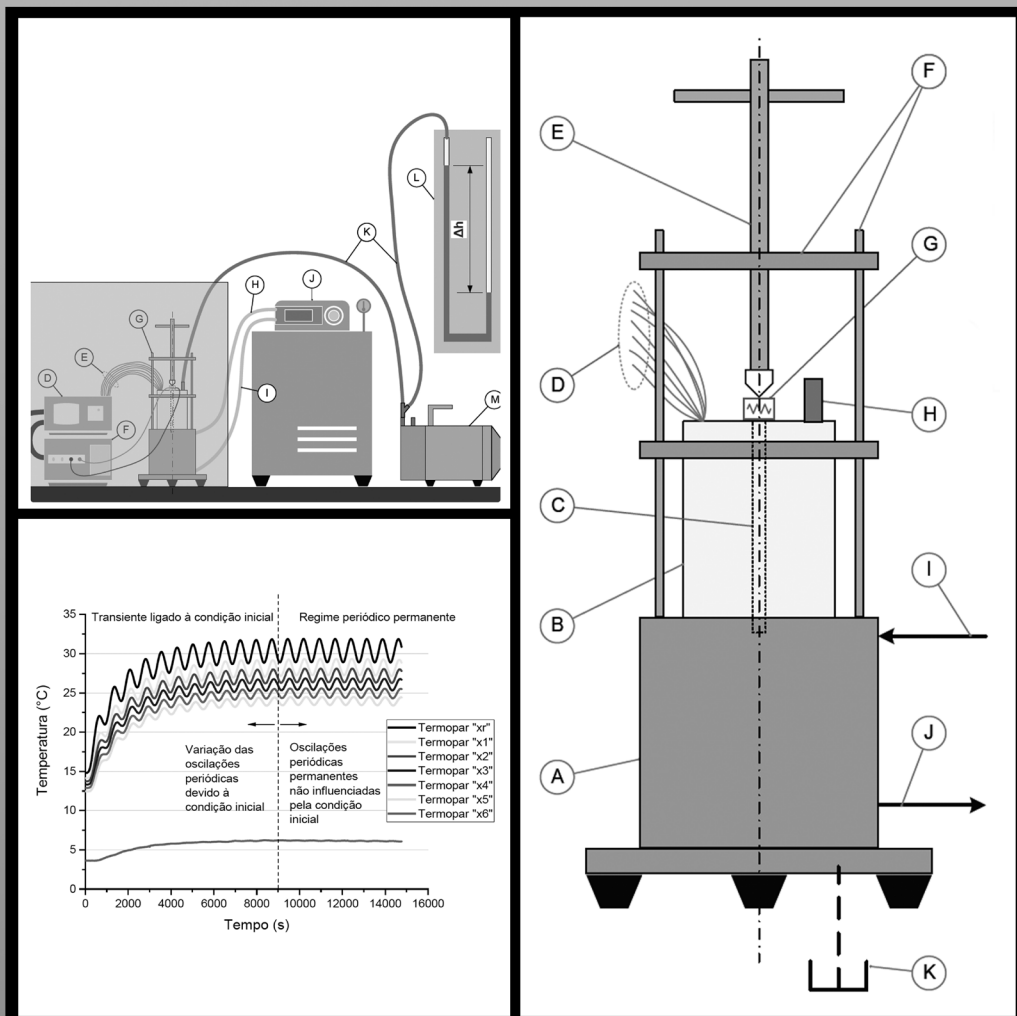


ESTIMATIVA DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE LIGAS METÁLICAS UTILIZANDO UM CAMPO DE TEMPERATURA PERIÓDICO

José Ricardo Ferreira Oliveira
 Luiz Roberto Rocha de Lucena
 Rômulo Pierre Batista dos Reis
 Carlos José de Araújo
 Celso Rosendo Bezerra Filho



ESTIMATIVA DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE LIGAS METÁLICAS UTILIZANDO UM CAMPO DE TEMPERATURA PERIÓDICO

José Ricardo Ferreira Oliveira
 Luiz Roberto Rocha de Lucena
 Rômulo Pierre Batista dos Reis
 Carlos José de Araújo
 Celso Rosendo Bezerra Filho

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Elói Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federacl do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalves de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miraniide Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Me. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa

Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFGA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenología & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lúvia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos

Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Estimativa da difusividade térmica de ligas metálicas utilizando um campo de temperatura periódico

Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E81 Estimativa da difusividade térmica de ligas metálicas utilizando um campo de temperatura periódico / José Ricardo Ferreira Oliveira, Luiz Roberto Rocha de Lucena, Rômulo Pierre Batista dos Reis - PR: Atena, 2021.

Outros autores
Carlos José de Araújo
Celso Rosendo Bezerra Filho

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5983-112-8
DOI 10.22533/at.ed.128212705

1. Difusividade térmica. 2. Propriedades termofísicas.
3. Campo de temperatura periódico. 4. Método de Angstrom.
5. Dispositivo experimental. I. Oliveira, José Ricardo Ferreira.
II. Lucena, Luiz Roberto Rocha de. III. Reis, Rômulo Pierre
Batista dos. IV. Título.

CDD 536

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos - CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antônio Almeida Silva, atual coordenador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, pela dedicação e aos discentes do programa.

Ao LaMMEA (Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas), por todo apoio dado a este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para realização deste trabalho.

APRESENTAÇÃO

Estimativa da Difusividade Térmica de Ligas Metálicas utilizando um Campo de Temperatura Periódico detalha o uso do método de Angstrom para estimar a difusividade térmica de materiais metálicos, especificamente para aços inoxidáveis comerciais AISI 304 e AISI 316. Nesta técnica, a amostra é submetida a aquecimento periódico a uma determinada frequência térmica. A amplitude e a fase da onda térmica são medidas em determinados pontos do domínio físico, quando o campo de temperatura atinge o regime permanente periódico. Esses parâmetros são inseridos em um modelo matemático, para então determinar a difusividade térmica do material em análise. O sistema de medição construído para este trabalho foi projetado com base nos requisitos fundamentais do método de Angstrom. Este dispositivo é versátil, pois com algumas modificações também pode determinar a difusividade térmica de materiais não metálicos, como os polímeros. Além disso, o sistema de medição permite duas alternativas de configurações experimentais. Em uma delas, o lado da amostra é exposto ao vácuo e no outro é isolado termicamente. Ambas as configurações têm como objetivo minimizar as perdas transversais de calor, garantindo que a transferência de energia térmica seja unidimensional, no sentido axial da amostra. A difusividade térmica estimada em ambas as situações está de acordo com a literatura, com desvios absolutos inferiores a 12.0 %.

A grande contribuição deste trabalho é o projeto e validação de um sistema de medição multifuncional e robusto, feito com materiais de baixo custo, para estimativa da difusividade térmica, baseado no método de Angstrom. Esta técnica é de grande interesse pela clareza de seu tratamento matemático e eficácia experimental, o que a torna uma boa ferramenta para identificar a difusividade térmica de novas ligas metálicas fabricadas em laboratórios de pesquisa.

José Aguiar dos Santos Junior

*Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Sergipe*

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	3
LISTA DE SÍMBOLOS.....	4
INTRODUÇÃO.....	6
EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DA CONDUÇÃO DE CALOR E PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.....	8
MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA	11
O MODELO MATEMÁTICO.....	15
DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	18
CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	24
RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS	41
APÊNDICE A - SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	43
SOBRE OS AUTORES	48

RESUMO

A caracterização termofísica dos materiais utilizados na Engenharia é de grande importância para realização de projetos nas mais diversas áreas de conhecimento onde os fenômenos ligados aos processos de transferência de calor exercem um papel fundamental. A difusividade térmica é uma propriedade termofísica importantíssima na análise de problemas de difusão de energia térmica. Este trabalho teve como proposta a determinação desta propriedade utilizando um campo de temperatura periódico. Para isto, foi construído um dispositivo experimental com princípio de funcionamento no método de Angstrom, o qual faz uso de um fluxo de calor periódico de uma fonte controlada, gerando assim, um campo de temperatura periódico na amostra em teste. Termopares foram instalados nas amostras para captar os sinais de temperatura gerados pelo fluxo de calor periódico. A amplitude e a fase destes sinais foram obtidas por meio de um *software* de análise gráfica. O termopar mais próximo da fonte de calor foi adotado como referência, ao passo que a razão de amplitudes e a defasagem, entre os sinais térmicos registrados pelos demais termopares em relação ao registrado por àquele termopar, foram calculadas. Estes resultados foram utilizados em modelos matemáticos para determinar a difusividade térmica, que pode ser identificada ou através da razão de amplitudes ou através da defasagem entre os perfis de temperatura. As amostras utilizadas neste trabalho foram de aço inox AISI 304 e aço inox AISI 316. Os valores de difusividade térmica identificados para estes materiais, quando foram comparados com valores disponíveis na literatura, obtiveram uma boa concordância, tendo em vista a faixa de incerteza apresentada.

PALAVRAS-CHAVE: Difusividade Térmica. Propriedades Termofísicas. Campo de Temperatura Periódico. Método de Angstrom. Dispositivo Experimental.

ABSTRACT

Thermophysical characterization of materials used in engineering is very important for realization of projects in the most diverse areas of knowledge where the phenomena related to the process of heat transfer play an important role. Thermal diffusivity is a very important thermal property on the analysis of problems of diffusion of thermal energy. This work proposes the determination of this property using a periodic temperature field. For this, an experimental device was built with principle of operation in Angstrom's method, which makes use of a periodic heat flow from a controlled source, thereby generating a periodic temperature field in the test sample. Thermocouples were installed on the samples for capture of signals generated by the periodic heat flow. Amplitude and phase of these signals were obtained by means of graphic analysis software. The thermocouple closest to the heat source was adopted as reference, and the ratio and phase lag, between the thermal signals registered by other thermocouples in relation to that registered by that thermocouple, were calculated. These results were utilized in mathematical models to determine the thermal diffusivity, whose identification can be performed either through the amplitude ratio or through the phase lag between the temperature profiles. Samples utilized in this work were stainless steel AISI 304 and stainless steel AISI 316. Thermal diffusivity estimative, when compared whit values available in literature obtained a good agreement, considering the range of uncertainty presented.

KEYWORDS: Thermal Diffusivity. Thermophysical Properties. Periodic Temperature Field. Angstrom's Method. Experimental Device.

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

<i>AISI</i>	<i>American Iron and Steel Institute</i>
<i>BIPM</i>	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
<i>CA</i>	Câmara da Amostra
<i>CATT</i>	<i>Computer Aided Thermodynamic Tables</i>
<i>Cu</i>	Cobre
<i>DSC</i>	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
<i>GUM</i>	<i>Guide to Expression. of Uncertainty in Measurements</i>
<i>JCGM</i>	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
<i>mmHg</i>	Milímetros de mercúrio
<i>Mn</i>	Manganês
<i>RPE</i>	Regime Periódico Estabelecido
<i>RTC</i>	Resistência Térmica de Contato
<i>SI</i>	Sistema internacional de unidades

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

A	Amplitude do modelo ou razão de amplitudes	(-)
A_i	Amplitude identificada	°C
c_p	Calor específico à pressão constante	J/(kg.K)
e	Exponencial	(-)
G	Taxa na qual a energia gerada por unidade de volume	W/m ³
i	Número complexo	(-)
k	Condutividade térmica	W/(m.K)
k_{el}	Componente elétrica da condutividade térmica em sólidos	W/(m.K)
k_r	Componente da condutividade térmica referente à rede cristalina	W/(m.K)
L	Comprimento da amostra	mm
P	Potência	W
P_m	Potência média	W
q''	Fluxo de calor	W/m ²
$t_{1/2}$	Tempo para 50% da variação de temperatura adimensional	s
t	Tempo	s
T	Temperatura	°C ou K
T_m	Temperatura média	°C
$T_{máx}$	Temperatura máxima de determinado termopar	°C
T_o	Temperatura inicial	°C
V	Tensão	Volts
V_m	Tensão média	Volts
x	Componente cartesiana	m
y	Componente cartesiana	m
z	Componente cartesiana	m

Letras gregas

α	Difusividade térmica; valor médio de difusividade térmica	m ² /s
α_A	Difusividade térmica identificada através da amplitude	m ² /s
α_ψ	Difusividade térmica identificada através da amplitude	m ² /s
ε	Referencial adotado para o ângulo de fase do sinal térmico	rad
Ψ	Fase do modelo ou defasagem entre sinais térmicos	rad
Ψ_i	Fase identificada	rad
θ	Campo de temperatura adimensional	(-)
$u(\alpha)$	Incerteza-padrão dos valores médios de difusividade térmica	m ² /s
ρ	Massa específica	kg/m ³
ρ_{el}	Resistividade elétrica	Ohm.m
σ_A	Desvio da literatura do valor de α identificado pela amplitude	%
σ_ψ	Desvio da literatura do valor de α identificado pela fase	%
ω	Frequência térmica	rad/s

INTRODUÇÃO

O processo de avanço tecnológico nos diversos campos da ciência é perene e vem ocorrendo de forma bastante rápida. Uma das consequências disto é o surgimento de novos materiais para aplicação em vários ramos da Engenharia. Muitas destas aplicações envolvem problemas de transferência de calor, fazendo com que as técnicas de caracterização térmica se tornem cada vez mais importantes. O fato de uma boa caracterização térmica dos materiais tornar-se um fator crítico de sucesso nos projetos de Engenharia justifica o número crescente de pesquisas e desenvolvimento de novas técnicas para determinação de propriedades termofísicas. Carollo *et al.* (2015) atribuem à globalização a necessidade de desenvolver novas técnicas para determinar de forma rápida, confiável e precisa as propriedades termofísicas dos materiais.

As propriedades térmicas de um material podem ter valores controversos entre fontes de literatura, têm dependência significativa da temperatura e dependem do método de determinação (CHIRDON e PATIL, 2011). A determinação de propriedades termofísicas não é uma tarefa evidente, sendo os problemas divididos em dois grupos: concepção e solução do modelo térmico e montagem experimental (BORGES, 2008).

Há diversas técnicas para medição das propriedades termofísicas dos materiais. Existem aquelas que estimam as propriedades de forma isolada e outras onde a estimativa é realizada de forma simultânea. Neste contexto, Carslaw e Jaeger (1959) atribuem às *técnicas periódicas* uma grande importância em medições a baixas temperaturas. Dentre as técnicas periódicas, destaca-se a proposta em 1861 pelo físico sueco Anders Jonas Angstrom (1814 - 1874), que imprime um fluxo de calor periódico sobre a amostra teste, provocando nesta um campo de temperatura também periódico.

Uma propriedade termofísica extremamente importante é a difusividade térmica. Ela reflete a razão entre a energia que determinado meio pode transportar pelo processo de difusão e a energia que este pode armazenar, ou seja, a difusividade térmica mostra a rapidez com que o calor pode se propagar em determinado material.

Diante do exposto, esta pesquisa, cuja temática aborda a difusividade térmica de determinados materiais, propõe-se a responder o seguinte questionamento: *É possível estimar a difusividade térmica de determinados materiais metálicos, utilizando um método baseado na técnica de Angstrom, e dentro de uma faixa de incerteza aceitável?* Para tal questão, devem ser admitidas as hipóteses de que, na amostra, o fluxo de calor será unidimensional e que não haverá geração de energia. O objetivo deste trabalho é *estudar teórica e experimentalmente a difusividade térmica de ligas metálicas, limitando-se aos aços inox AISI 304 e AISI 316*. Em termos específicos, esta pesquisa visa: a) Realizar a modelagem matemática do problema físico que reflete o objetivo deste trabalho; b) Construir um dispositivo experimental baseado na técnica de Angstrom, de modo a viabilizar o objetivo deste trabalho; c) Realizar a calibração dos termopares, no intuito de minimizar erros nos valores de temperatura a serem medidos; d) Identificar as temperaturas médias, amplitudes e fases dos sinais de temperatura captados pelos termopares.

O presente trabalho foi organizado em 8 capítulos, a contar deste. O capítulo 2 versa sobre as equações fundamentais da transferência de calor por condução, a *lei de Fourier* e a *equação da difusão de calor*, assim como a influência que a propriedade objeto desta

pesquisa exerce nestas expressões. O capítulo 3 apresenta uma revisão sobre métodos de determinação das propriedades termofísicas, com ênfase aos métodos periódicos. O capítulo 4 explana a modelagem matemática do problema físico desta pesquisa. O capítulo 5 discorre sobre o dispositivo experimental construído para assegurar o objetivo deste trabalho. O capítulo 6 aborda o procedimento de calibração realizado nos termopares soldados nas amostras. No capítulo 7, os resultados encontrados são interpretados, analisados, e comparados com valores disponíveis na literatura. No capítulo 8, a conclusão do trabalho, explicita-se a resposta à pergunta levantada no capítulo 1, bem como possíveis limitações e propostas de futuros trabalhos.

EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DA CONDUÇÃO DE CALOR E PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

A análise das equações que regem os fenômenos da transferência de calor por condução requer o conhecimento de diversas propriedades da matéria, geralmente conhecidas como *propriedades termofísicas*. Estas, por sua vez, encontram-se divididas em duas categorias: *propriedades de transporte* e *propriedades termodinâmicas*. As propriedades de transporte dizem respeito aos coeficientes de taxa de difusão, enquanto as propriedades termodinâmicas estão relacionadas ao equilíbrio e mudanças de estado de um sistema. Este capítulo trata da influência que as propriedades termofísicas de transporte exercem nas equações fundamentais da condução de calor: a lei de Fourier e a equação da difusão de calor.

1 | LEI DE FOURIER E A CONDUTIVIDADE TÉRMICA

De acordo com Özişik (1993), a lei básica que relaciona o fluxo de calor e o gradiente de temperatura, baseada em observações experimentais, ficou conhecida como *Lei de Fourier* após o cientista francês Joseph Fourier a utilizar no seu trabalho, *Theorie Analytic de la Chaleur*, publicada em Paris, no ano de 1822. Incropera e De Witt (2003) enfatizam que a Lei de Fourier é a base da transferência de calor por condução e trata-se de uma expressão vetorial, indicando que o fluxo de calor é normal a uma superfície isoterma e na direção decrescente da temperatura. Aplica-se a todas as substâncias, independentemente de seu estado (sólido, líquido ou gasoso). A Lei de Fourier é dada pela Equação 1.

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

onde q'' é o fluxo de calor (W/m^2), k é a condutividade térmica ($W/m.K$) e $\partial T/\partial n$ é o gradiente de temperatura na direção normal às isotermas (K/m).

O uso da lei de Fourier só será possível mediante o conhecimento da condutividade térmica. Tal propriedade indica a taxa pela qual a energia é transferida pelo processo de difusão. A magnitude da condutividade térmica varia conforme o tipo e a composição química do material, sua estrutura física e seu estado. Além disso, depende também da temperatura do material. A Figura 1 mostra a condutividade térmica como uma função da temperatura para várias substâncias.

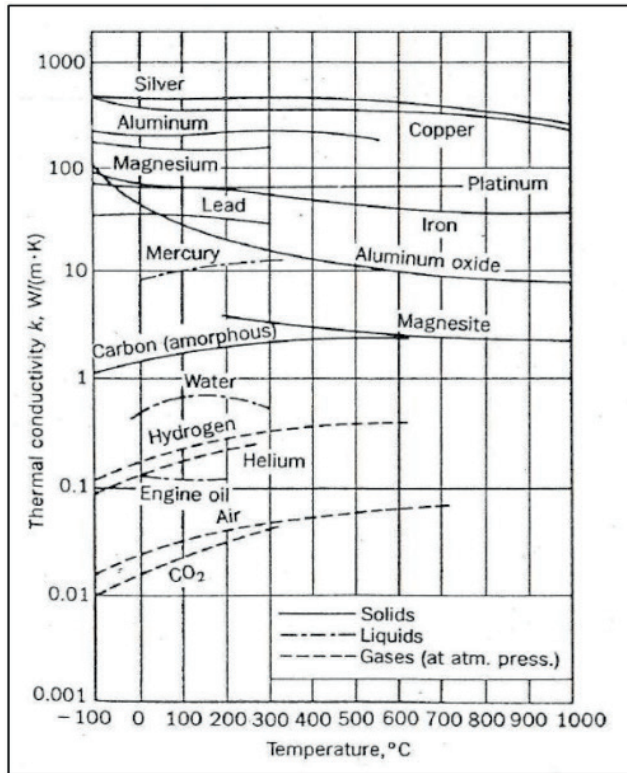


Figura 1 - Condutividade térmica de várias substâncias *versus* temperatura.

Fonte: Kakaç e Yener (1993)

Nota-se, da Figura 1, que o valor da condutividade térmica de um sólido metálico possui, em média, uma ordem de grandeza 4 vezes maior do que a dos gases. Os sólidos metálicos normalmente são chamados de condutores, por possuírem um valor elevado de k , enquanto materiais com baixo k são chamados de isolantes. Ainda conforme a Figura 1, nota-se que os valores de k para sólidos metálicos, de maneira geral, decrescem com o aumento da temperatura. Obviamente, a variação da condutividade térmica com a temperatura pode ser negligenciada quando a faixa de temperatura em consideração não é tão elevada ou a dependência da condutividade térmica em relação à temperatura não é considerável.

Tratando especificamente de materiais no estado sólido, Incropera e De Witt (2003) comentam que, para tal estado da matéria, o transporte de energia térmica é composto por dois efeitos: a migração de elétrons livres e através das ondas vibracionais da rede cristalina do material. Desta maneira, a condutividade térmica é a soma entre o componente eletrônico k_{el} e o componente da rede k_r . De forma aproximada, k_{el} é inversamente proporcional à resistividade elétrica ρ_{el} . Em metais puros, cujos valores de ρ_{el} são baixos, o valor de k_{el} é muito maior que k_r . Já para o caso das ligas metálicas, cujos valores de ρ_{el} são consideravelmente mais elevados, a contribuição de k_r para o valor de k não pode mais ser desprezada.

2 I DIFUSIVIDADE TÉRMICA E A EQUAÇÃO DA DIFUSÃO DE CALOR

A condutividade térmica reflete a quantidade de energia térmica que o meio pode transportar através do processo de difusão. Quando o transporte térmico ocorre de forma transiente, parte da energia difundida no meio é acumulada internamente na matéria e o restante é transferida na direção do gradiente térmico. Nessa condição, outra propriedade térmica se torna importante para avaliar o fenômeno, a capacidade calorífica volumétrica. Definida pelo produto entre duas propriedades termodinâmicas, massa específica (ρ) e calor específico (c_p), seu valor representa a capacidade de um material armazenar energia térmica.

A razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica define uma propriedade importante chamada difusividade térmica, α , cuja unidade no SI é m^2/s . A difusividade térmica representa a razão entre a capacidade do material conduzir energia térmica e sua habilidade de armazená-la. Em outras palavras, ela representa a relação entre a energia que o meio pode transportar (representada pela condutividade térmica) e a quantidade de energia que ele pode armazenar (representada pela capacidade calorífica volumétrica). Materiais com α elevados respondem rapidamente a mudanças nas condições térmicas impostas, enquanto materiais com valores reduzidos de α respondem mais lentamente, levando um tempo maior para atingir uma nova condição de equilíbrio. A difusividade térmica exerce papel fundamental em problemas condutivos no regime transiente.

De maneira geral, o processo de condução de calor é fundamentado na 1ª Lei da Termodinâmica ou equação da conservação de energia. Considerando, um volume de controle infinitesimal num meio homogêneo, sem advecção, onde há um campo de temperatura, ou seja, um gradiente de temperatura, que não há geração interna de calor e que o meio é isotrópico e com propriedades constantes, a *equação da difusão de calor*, cuja forma geral é dada pela Equação 2¹, reduz-se à Equação 3, em coordenadas cartesianas.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

A Equação 3 é uma equação diferencial cuja solução, para condições de contorno especificadas, revela a distribuição de temperatura do meio. Sua aparente complexidade não deve obscurecer o fato de que ela descreve uma condição física importante, ou seja, a conservação da energia. A equação da difusão de calor constitui a base para a solução do modelo matemático proposto para a presente pesquisa.

1 A dedução da equação 2 está disponível em Incropera e De Witt (2003).

MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA

Segundo Carslaw e Jaeger (1959), existe um elevado número de métodos utilizados para identificação de propriedades termofísicas. Esses métodos podem ser classificados essencialmente em três grupos: *permanentes*, *transientes* e *de aquecimento periódico*, estando o presente trabalho situado neste último. Neste capítulo, deu-se um maior destaque aos métodos periódicos. Ele subdivide-se em três partes. Na primeira, discutem-se métodos considerados clássicos, por conta do vasto uso destes em pesquisas; na segunda, realiza-se uma revisão dos métodos periódicos, dentre eles, a técnica de Angstrom, base desta pesquisa; na terceira, têm-se outros métodos desenvolvidos em diversos trabalhos, para estimativa de propriedades termofísicas.

1 | MÉTODOS CLÁSSICOS

De acordo com Santos (2005) e Gravena *et al.* (2010), dois métodos frequentemente empregados em laboratórios e centros de pesquisa para determinação de propriedades termofísicas são o método do fio quente e o método *flash*. Nas subseções seguintes, estes métodos dois métodos são brevemente descritos.

1.1 Método do fio quente

No tocante ao *método do fio quente*, pode-se afirmar que se trata de um método absoluto, direto e não estacionário (GRAVENA *et al.*, 2010). De acordo com Gravena *et al.* (2010), o procedimento de realização do método do fio quente inicia-se com a inserção de uma sonda cilíndrica, no centro axial da amostra que se deseja medir. A sonda tem a função de dissipar calor por efeito Joule e medir a temperatura no interior da amostra. Teoricamente, o fio quente é considerado como uma fonte de calor ideal, infinitamente longo e fino, o qual é circundado infinitamente pelo material cujas propriedades térmicas se deseja determinar. Ao passar uma corrente elétrica pelo fio, uma taxa constante de calor no tempo e no comprimento da amostra será liberada e se propagará pelo material. Essa propagação num meio infinito gera, no material, um campo transiente de temperaturas.

Conforme Santos *et al.* (2004), o método do fio quente possui duas limitações: materiais condutores elétricos e materiais de alta condutividade térmica. Esta segunda limitação também é mencionada como uma limitação do método em Gravena *et al.* (2010), pelo motivo de existir uma alta resistência térmica de contato entre a sonda e a amostra, visto que é muito difícil eliminar os interstícios de ar presentes na montagem.

1.2 Método *flash*

O método *flash* trata-se de um método transiente, cujo princípio de funcionamento encontra-se descrito em Santos (2005): “[...] um pulso de energia de curta duração incide na face frontal da amostra a ser ensaiada, e a difusividade térmica é calculada a partir do registro do histórico de temperatura na face posterior da amostra”. Com o valor da difusividade térmica estimado experimentalmente, e conhecendo-se a magnitude do calor específico e da massa específica do material, determina-se então a condutividade

térmica. O método *flash* é direto na determinação da difusividade térmica, porém indireto na estimativa da condutividade térmica. Maiores detalhes sobre o princípio de funcionamento do método *flash* pode ser verificado em Ryu *et al.* (2013) e Parker *et al.* (1961).

O método *flash* é largamente utilizado na determinação da difusividade térmica de materiais metálicos, cerâmicos, compósitos, metais líquidos, materiais poliméricos e determinados alimentos. De acordo com Reif-Acherman (2014), a vantagem mais importante associada a este método é a facilidade de preparação da amostra devido ao seu tamanho reduzido, além da eliminação do problema da resistência térmica de contato e a redução nas perdas de calor.

2 | MÉTODOS PERIÓDICOS

De acordo com Carslaw e Jaeger (1959), o conjunto de técnicas denominadas *técnicas periódicas* assumem um papel fundamental na identificação de propriedades termofísicas dos materiais quando as medições são realizadas em baixas temperaturas. Dentre estas técnicas, destaca-se a que foi desenvolvida, em 1861, pelo físico sueco Anders Jonas Angstrom (1814 - 1874).

Nas subseções a seguir, detalha-se o princípio de funcionamento do método desenvolvido por Angstrom, além de outras técnicas periódicas que foram baseadas neste método.

2.1 Método de Angstrom

Em 1861, Angstrom propôs uma técnica experimental para determinação da condutividade térmica do cobre e do ferro. Ao contrário de outros métodos disponíveis à época, os quais necessitavam de um regime permanente de temperatura e conseqüentemente um fluxo de calor permanente, no método de Angstrom uma extremidade de uma barra longa com seção transversal pequena, porém uniforme, foi sujeita a uma variação periódica na temperatura, sendo alternadamente aquecida e resfriada, em intervalos de tempos iguais, enquanto a outra extremidade era exposta à temperatura do ambiente. Na Figura 2 verifica-se a montagem básica do aparato experimental desenvolvido por Angstrom.

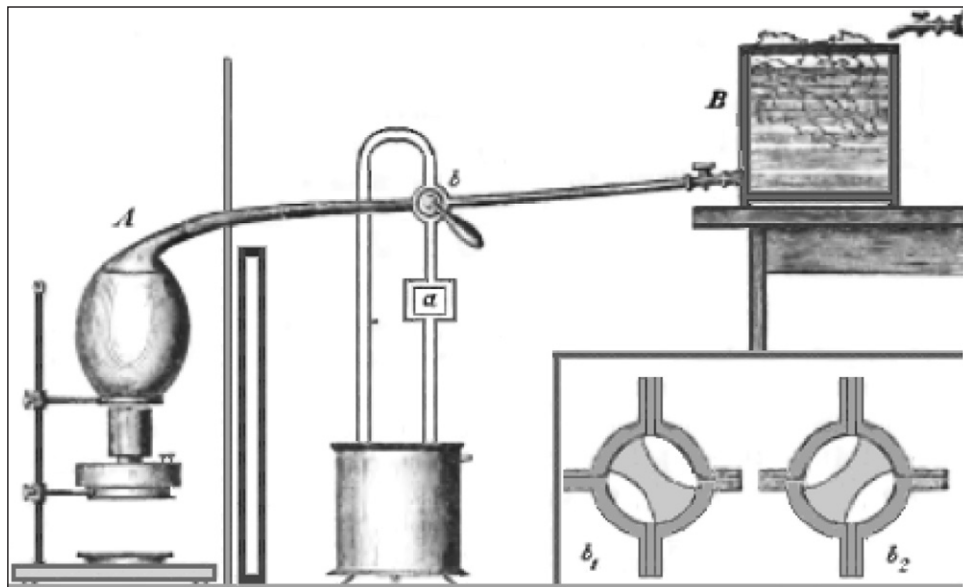


Figura 2 - Aparato experimental desenvolvido por Angstrom.

Fonte - Reif-Acherman (2014)

Na Figura 2, a válvula indicada por b pode assumir a posição b_1 ou a posição b_2 . Isto determina quando a amostra, cuja seção transversal identifica-se por a , pode ser submetida ao vapor quente vindo do gerador de vapor A ou à água resfriada proveniente do vaso B . A temperatura flutua periodicamente em cada ponto ao longo da barra. Devido aos efeitos da radiação e da convecção na superfície, as ondas térmicas que se deslocam ao longo do comprimento da barra são atenuadas, e se propagam com uma diferença de fase. Após alguns ciclos, atinge-se o regime periódico, independente das condições iniciais. A variação da temperatura ao longo da barra torna-se uma função com a mesma frequência da fonte de calor, sendo, então, mensurada em dois pontos ao longo da barra, através de um termômetro.

2.2 Métodos periódicos fundamentados na técnica de Angstrom

Em Haji-Sheikh *et al.* (1998) reporta-se uma técnica baseada no método de Angstrom para determinação simultânea da condutividade térmica e da difusividade térmica. Inicialmente realizou-se uma análise de sensibilidade para determinar-se a melhor faixa de frequência para este tipo de investigação experimental. Os materiais utilizados foram o Delrim [um tipo de polímero] e o aço inox AISI 304. Os resultados obtidos para a condutividade térmica do aço inox AISI 304 e para o Delrim, quando comparados aos valores disponíveis na literatura, tiveram erros de 9% e 20%, respectivamente.

Bezerra Filho *et al.* (1999) apresentaram uma técnica que utiliza o sinal periódico para determinar a difusividade térmica. Um dispositivo experimental foi construído, a fim de realizar medidas precisas da difusividade térmica utilizando um sinal térmico periódico de frequência elevada, entre 0,01 Hz e 0,25 Hz. A amostra utilizada foi feita de cobre, com

42 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A face da amostra em contato com o aquecedor ficou submetida a uma fonte de calor periódica, enquanto isso, a face inferior foi mantida a uma temperatura aproximadamente constante, mediante interação com um fluido térmico. A evolução da temperatura na amostra foi acompanhada por 7 termopares nela soldados. Estes termopares são do tipo K com diâmetro de 80 μm e foram soldados através de descarga capacitiva. Dessa forma, a difusividade térmica foi obtida, ora utilizando-se a razão das amplitudes dos sinais térmicos obtidos pelos termopares, ora utilizando-se a defasagem com relação a um ponto de referência. Devido ao vácuo gerado pelo dispositivo, o número de Biot é muito menor que 1 e, dessa forma, a temperatura em cada seção transversal da peça é uniforme. O modelo matemático pôde então ser formalizado como unidimensional. Os resultados obtidos por Bezerra Filho *et al.* (1999) quando comparados com resultados obtidos através do método *flash* para o mesmo material apresentaram um desvio de 15%.

Lahoucine e Khellaf (2004) utilizaram um método periódico para determinação simultânea e precisa da difusividade e da condutividade térmicas, considerando nos cálculos os efeitos da presença dos termopares. A difusividade térmica foi obtida similarmente ao trabalho de Haji-Sheikh *et al.* (1998), com o uso da defasagem do sinal térmico. Por outro lado, na determinação da condutividade térmica foram considerados fatores de correção devido aos efeitos gerados pelos termopares. Essa condição foi negligenciada por Haji-Sheikh *et al.* (1998) e que, segundo Lahoucine e Khellaf (2004), pode ter sido a causa dos elevados erros experimentais encontrados naquele trabalho. A presença dos termopares provoca distúrbios localizados em torno do ponto de medição, cuja importância destes distúrbios vai depender tanto da natureza do contato térmico quanto das propriedades termofísicas do sensor de temperatura e do material sólido onde os termopares estão fixados. A solução do modelo matemático aplicado a este método foi obtida através do teorema de Duhamel.

Santos *et al.* (2010) utilizaram uma variação simples e de baixo custo do método de Angstrom em procedimentos experimentais para determinação da difusividade térmica de determinados polímeros. Os resultados alcançados através destes procedimentos atingiram uma boa precisão, entre 0,1 e 1%, quando comparados aos valores identificados através dos métodos do fio-quente e *flash*.

O MODELO MATEMÁTICO

Na Figura 3 pode ser visualizado o sistema físico que representa o problema apresentado neste trabalho.

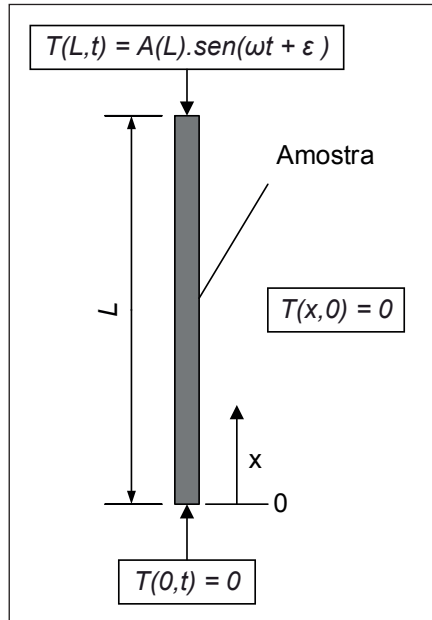


Figura 3 - Sistema físico do problema.

Fonte - Autoria própria (2017)

Para chegar-se ao modelo matemático que representa o sistema físico da Figura 3 admite-se que os experimentos seriam ora realizados no vácuo, reduzindo desta maneira o coeficiente de convecção e conseqüentemente aumentado a resistência térmica convectiva na direção radial, e ora com o uso de isolante térmico em contato com a área lateral da amostra, aumentando assim a resistência térmica radial, garantindo que o fluxo de calor ocorresse na direção axial. Desta feita, tem-se que o número de Biot [cuja definição pode ser encontrada em Incropera e De Witt (2003, p.172)] assumiria valores menores que 0,1 para as condições experimentais em questão, implicando, portanto, que a temperatura em cada seção da amostra seria uniforme durante o transporte de energia, condição para que a transferência de calor por condução, ao longo da amostra, ocorresse de maneira unidimensional. Supõe-se ainda que a variação da difusividade térmica com a temperatura é desprezível e que o meio é isotrópico com propriedades constantes. Isto posto, considerando uma amostra de comprimento L (m), a Equação 3 reduz-se à Equação (4.1).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

onde $T(x,t)$ é o campo térmico ($^{\circ}\text{C}$), x é a componente espacial (m), α é a difusividade térmica (m^2/s) e t é o tempo (s), com $0 < x < L$ e $t > 0$. A Equação (4.1) é uma equação

diferencial parcial de segunda ordem e, para resolvê-la, faz-se necessário uma condição inicial e duas condições de contorno. A condição inicial que reflete o problema físico é dada pela Equação (4.2.a). As duas condições de contorno foram obtidas nas extremidades da amostra. Sobre a parte superior, foi imposto um fluxo de calor periódico com uma dada frequência. A extremidade inferior foi mantida a uma temperatura constante, por ter ficado em contato com um fluido cuja temperatura é controlada através de um banho termorregulável. As expressões que representam as condições nas faces superior e inferior da amostra são dadas respectivamente pelas Equações (4.2.b) e (4.2.c).

$$T(x, 0) = 0; \quad 0 \leq x \leq L \quad (4.2.a)$$

$$T(L, t) = A(x_r) \sin(\omega t + \varepsilon) \quad (4.2.b)$$

$$T(0, t) = 0 \quad (4.2.c)$$

onde $A(x_r) = 1$ é a amplitude do modelo na posição $x = L$, e ω é a frequência do sinal térmico (rad/s). A Equação 5 mostra o campo de temperatura solução deste modelo, na forma adimensional, obtida por Carslaw e Jaeger (1959, p.105).

$$T(x, t) = A \sin(\omega t + \varepsilon + \Psi) + 2\pi\alpha \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(-1)^n [an^2\pi^2 \sin(\varepsilon) - \omega L^2 \cos(\varepsilon)]}{\alpha^2 n^4 \pi^4 + \omega^2 L^4} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) e^{-\left(\frac{an^2\pi^2 t}{L^2}\right)} \quad (5)$$

onde T é o campo de temperatura adimensional, A e Ψ são respectivamente a amplitude e a fase, do modelo, do sinal térmico captado em determinado ponto ao longo da amostra, e α é a difusividade térmica (m^2/s). As expressões que definem A e Ψ são dadas, respectivamente, pelas Equações 5.1 e 5.1. A dedução destas expressões pode ser verificada no Apêndice A.

$$A = \left| \frac{\sinh[x\beta(1+i)]}{\sinh[L\beta(1+i)]} \right| = \left[\frac{\cosh(2\beta x) - \cos(2\beta x)}{\cosh(2\beta L) - \cos(2\beta L)} \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

$$\Psi = \text{arg} \left\{ \frac{\sinh[x\beta(1+i)]}{\sinh[L\beta(1+i)]} \right\} \quad (5.2)$$

Onde

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$$

Na Equação 5, a perturbação transiente ligada à condição inicial tende para zero, conforme mostrado por Carslaw e Jaeger (1959), e o campo de temperatura passa a ser permanente periódico. Pode-se obter, de forma alternativa, uma solução do campo de temperatura permanente periódico quando este regime for alcançado. Para isto, considera-se que as variações transitórias do campo de temperatura cessam quando o tempo cresce (o termo transitório da Equação 5 desaparece quando $t \rightarrow \infty$) de tal maneira que em tempos longos atinge-se a condição de regime periódico permanente. Esta solução é dada pela

Equação 5.

$$T(x, t) = A \operatorname{sen}(\omega t + \varepsilon + \Psi) \quad (5)$$

onde A , ω , ε , e Ψ já foram definidos anteriormente.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Este capítulo trata dos sistemas e seus componentes, que constituem o dispositivo experimental usado na pesquisa além, dos procedimentos de operação deste dispositivo.

O dispositivo experimental ilustrado na Figura 4, concebido para identificação da difusividade térmica utilizando um campo de temperatura periódico, é constituído pelos sistemas de aquisição de dados, de aquecimento, de resfriamento, de vácuo, do cabeçote de ensaio e da amostra.

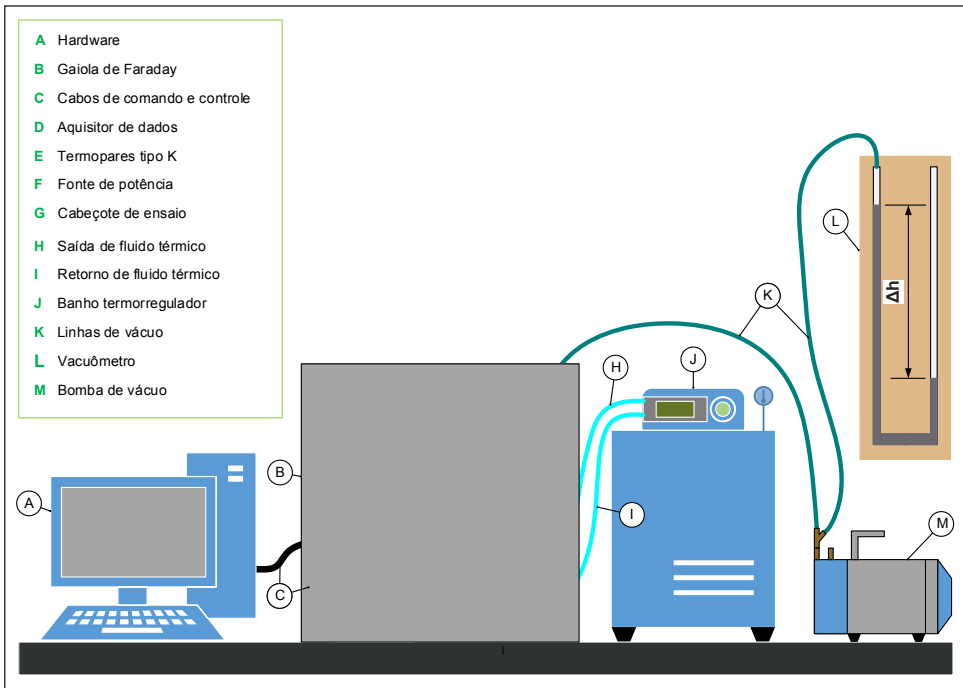


Figura 4 - Dispositivo Experimental.

Fonte - Autoria própria (2017)

1 | SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O papel fundamental do sistema de aquisição de dados é a coleta e o armazenamento dos dados dos sinais de temperatura gerados no decorrer dos experimentos. Este sistema é constituído por um aquisitor de dados 34970 da Agilent, o qual possui um componente interno que dispensa a utilização da chamada junção de referência ou junção fria no uso de termopares, e por um microcomputador, no qual há uma rotina, em Visual Basic, que realiza a aquisição dos dados e estabelece o número total de ciclos do experimento

2 | SISTEMA DE AQUECIMENTO

O sistema de aquecimento compreende uma resistência elétrica de $0,26 \Omega$ e uma fonte de potência E3633A da Agilent, comandada pela mesma rotina que controla a aquisição de dados. O papel da fonte de potência é estabelecer um fluxo de calor periódico para a amostra. Entre outras palavras, o objetivo da fonte é produzir um sinal de tensão retificado na resistência elétrica, conforme Equação 7.

$$V = V_m \left| \sin\left(\frac{\omega}{2} t\right) \right| \quad (7)$$

onde V é a tensão gerada pela fonte (volts), V_m é a tensão média (volts), ω é a frequência térmica (rad/s) comandada pelo sistema que controla o aquecimento e t é o tempo (s). Desta maneira, a resistência elétrica gera uma potência dada pela Equação 8.

$$P = P_m [1 - \cos(\omega t)] \quad (8)$$

onde P é a potência gerada (W) e P_m é a potência média (W).

3 | SISTEMA DE RESFRIAMENTO

O sistema de resfriamento é composto pelo fluido térmico 47V10 da Siliplus e por um banho termostático 12101-56 da Cole-Parmer. Este possui internamente um reservatório onde o fluido térmico é armazenado e onde há uma bomba centrífuga, responsável pela circulação do fluido, entre o banho termostático e o cabeçote de ensaio. A função deste sistema é garantir que, durante a realização do experimento, a temperatura da face inferior da amostra esteja à 0°C , condição estabelecida no modelo matemático.

4 | SISTEMA DE VÁCUO

O sistema de vácuo é composto por uma bomba de vácuo Speedvac 2 da Edwards, com capacidade de gerar uma pressão negativa de 710 mmHg no sistema, e um vacuômetro com coluna de mercúrio. A função deste sistema é gerar vácuo no interior da câmara da amostra numa intensidade suficiente para manter o número de Biot neste local menor que 0,1, condição necessária para assegurar a hipótese de transferência de calor por condução unidimensional, adotada na solução do modelo matemático. Este sistema deve ser desativado em experimentos que utilizarem isolante térmico ao invés do vácuo.

5 | AMOSTRAS

Foram estudadas duas amostras de formato cilíndrico, constituídas de três materiais diferentes, respectivamente, aço inox AISI 304 (amostra 1) e aço inox AISI 316 (amostra 2). Os processos de fabricação das amostras e o processo de instalação dos termopares são descritos nas subseções seguintes.

5.1 Fabricação das amostras

As amostras de aço inox AISI 304 e aço inox AISI 316, respectivamente, foram confeccionadas pelo processo de torneamento, a partir de tarugos comerciais trefilados com 12,7 mm de diâmetro e 170 mm de altura, de tal maneira que a dimensão definitiva de cada amostra, após o torneamento, foi de 12,7 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Em seguida, as faces superiores e inferiores foram lixadas. A face superior de cada amostra também foi polida, com o objetivo de reduzir a RTC (Resistência Térmica de Contato) entre esta face e a resistência elétrica.

5.2 Instalação dos termopares

Em cada amostra deste trabalho foram instalados 14 termopares do tipo K (Cromel-Alumel) com 100 μm de diâmetro e 1 m de comprimento. A opção por este tipo de termopar deve-se ao fato deste apresentar um comportamento linear em sua curva característica tensão *versus* temperatura numa ampla faixa, quando comparado aos outros tipos de termopares.

A fixação dos termopares nas amostras se deu através do processo de soldagem por descarga capacitiva. Esta técnica tem a vantagem de assegurar um contato perfeito entre os termopares e os pontos onde deseja-se medir as temperaturas e de reduzir o tempo de resposta que poderia provir de uma resistência térmica de contato entre os termopares e o corpo-de-prova (BEZERRA FILHO *et al.*, 1999). A Figura 5 ilustra o processo de soldagem dos termopares.

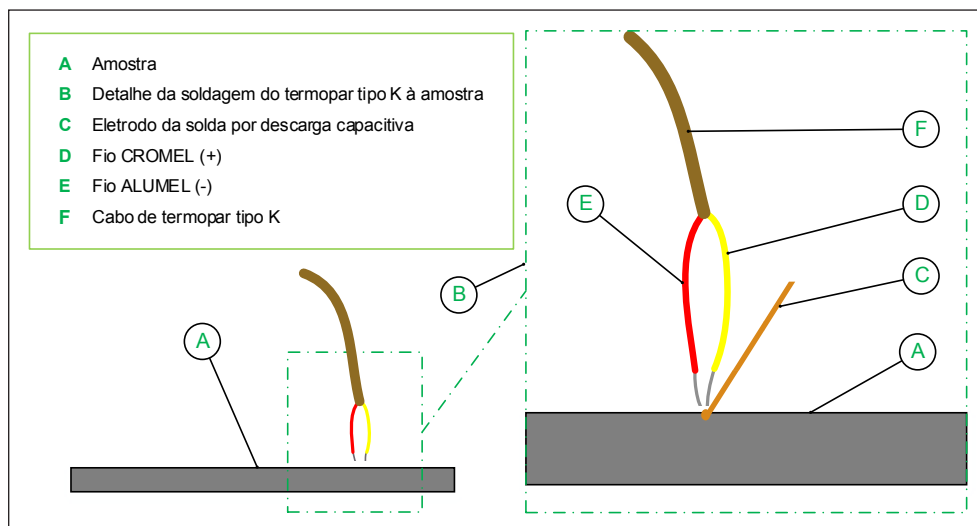


Figura 5 Soldagem de Termopar.

Fonte - Autoria própria (2017)

5.2.1 Identificação e posição de soldagem dos termopares na amostra

Buscando acelerar a montagem dos termopares no aquisitor de dados, além de facilitar a apresentação dos resultados das razões de amplitude e defasagem entre os sinais de temperatura, é adotada uma nomenclatura sequencial para identificação dos termopares, conforme visualizado na Figura 6.

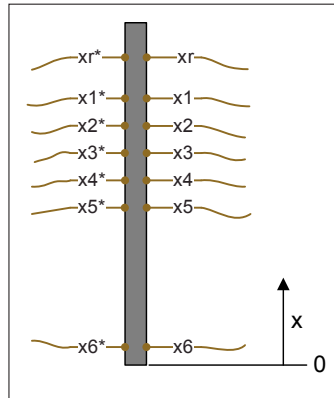


Figura 6 - Identificação dos termopares.

Fonte - Autoria própria (2017)

Como pode ser visto na Figura 6, foram soldados 14 termopares em cada amostra. Para identificação da razão de amplitudes e da defasagem e, conseqüentemente, da difusividade térmica, foram utilizados os termopares “xr” e os termopares “x1” até “x5”, sendo o termopar “x6” utilizado apenas para observar o comportamento da atenuação da amplitude das oscilações periódicas de temperatura. Os termopares marcados com (*) são os termopares de reserva, e seriam utilizados caso o respectivo termopar titular apresentasse algum defeito durante o experimento. As distâncias dos locais de fixação dos termopares, ditos titulares, para as faces da amostra é a mesma para os respectivos termopares de reserva.

Vale salientar que, para evitar possíveis efeitos bidimensionais de transferência de calor decorrente da proximidade da resistência elétrica, o termopar de referência (xr) e seu substituto (xr*) foram instalados a uma certa distância daquele componente. Com isso, o local onde o termopar de referência está instalado foi considerado como sendo o final da amostra. O termopar de referência nas amostras de aço inox AISI 304 e de aço inox AISI 316 foi instalado a uma distância de 20 mm da resistência elétrica.

Com isso, nos modelos matemáticos utilizados para identificar A , Ψ e α , o comprimento das duas primeiras amostras foi considerado como sendo 130 mm. A Tabela 1 apresenta a posição de cada termopar em relação ao termopar de referência, para as amostras em estudo neste trabalho.

Termopar	Amostra 1	Amostra 2
xr	130	130
x1	120	110
x2	115	105
x3	110	100
x4	105	95
x5	100	90
x6	5	5

Tabela 1 - Posição (mm) dos termopares em relação ao termopar de referência “xr”.

Fonte - Autoria própria (2017)

6 I CABEÇOTE DE ENSAIO

O cabeçote de ensaio é um dispositivo em formato cilíndrico. É o local onde a amostra fica durante o experimento. Pode ser visto em detalhes na Figura 7.

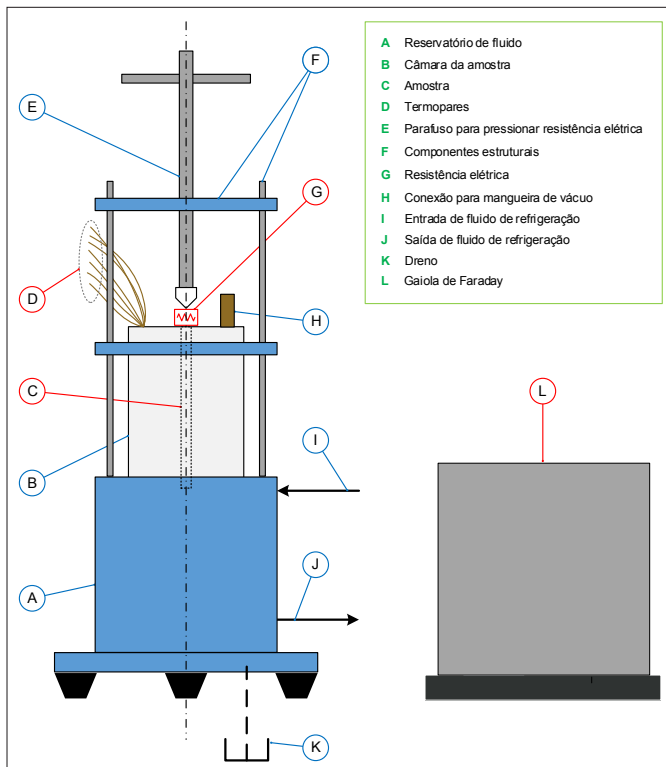


Figura 7 - Cabeçote de ensaio.

Fonte - Autoria própria (2017)

Conforme a Figura 7, os componentes cujos balões de identificação estão na cor azul são aqueles que integram o cabeçote de ensaio, dentre os quais destaca-se o componente B, denominado câmara da amostra.

A câmara da amostra é constituída por um tubo de parede fina de aço inox com 123 mm de altura e cujo valor do diâmetro, 100 mm, foi dimensionado a partir do conceito de raio crítico de isolamento. Isto se deve ao fato de existir a possibilidade do experimento ser realizado ou com vácuo, ou com isolante térmico (neste trabalho utilizou-se isopor) no interior da câmara. Desta maneira, o diâmetro dimensionado foi aquele para o qual a perda de calor radial pelo isolamento térmico apresentou um valor desprezível.

Ainda compõem a câmara da amostra duas tampas para fechamento, feitas em PVC, que possuem um furo centralizado de 12,7 mm, mesmo diâmetro da amostra. Na tampa superior há mais dois furos: um com 3 mm de diâmetro, por onde serão passados os termopares e outro com 10 mm de diâmetro, para instalação de uma conexão para realização de vácuo no interior da câmara. Na tampa inferior, em contato com a face inferior da amostra e com o fluido de refrigeração, há um disco de cobre de 2 mm de espessura, instalado para evitar a entrada deste fluido na câmara da amostra por capilaridade. Admitiu-se que este disco, por conta da alta condutividade térmica do cobre, é isotérmico em relação ao fluido de refrigeração. A câmara com a amostra em seu interior, é montada sobre o reservatório de fluido, local por onde circula o fluido de refrigeração, a 0°C.

Vale destacar, que o cabeçote de ensaio, o aquisitor de dados e a fonte de potência, durante os experimentos, ficaram no interior de uma gaiola metálica, baseada no princípio da Gaiola de Faraday. Esta gaiola foi utilizada para minimizar os efeitos das perturbações causadas pelas interferências eletromagnéticas decorrentes de correntes parasitas, conhecidas como Correntes de Foucault.

CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

No intuito de minimizar os erros dos valores de temperatura a serem medidos, realizou-se procedimentos de calibração dos termopares instalados nas amostras. Estes procedimentos consistem no levantamento de curvas de calibração, as quais foram utilizadas para corrigir os valores de temperatura obtidos [nos experimentos para identificação de α] em valores reais de temperatura. Neste capítulo, detalha-se como os termopares foram calibrados. Além disto, apresentam-se as curvas de calibração levantadas para os termopares das duas amostras utilizadas.

1 | PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO

A curva da tensão termoelétrica em função da temperatura para o tipo de termopar utilizado neste trabalho, tipo K, apresenta um comportamento linear para uma ampla faixa de temperatura (-200 até 1250°C). Diante disto, foi necessário o levantamento de dois pontos, no plano coordenado, para obtenção da curva de calibração de cada termopar, em cada amostra. Estes pontos foram as temperaturas de fusão do gelo e de ebulição da água para a cidade de Campina Grande, Paraíba, Brasil. Vale salientar que a água utilizada em ambos os casos foi do tipo destilada. Para cada uma das três amostras foram realizados, então, dois procedimentos de calibração.

A temperatura de fusão do gelo, para a referida cidade é de aproximadamente 0,0°C, valor obtido a partir da equação de Clapeyron para o equilíbrio de fase sólido-líquido. Por sua vez, a temperatura de ebulição da água, por ser dependente da pressão atmosférica, foi obtida da seguinte maneira: por meio de um barômetro, aferiu-se a pressão atmosférica no instante da realização do procedimento de calibração. Esta pressão foi inserida no *software* CATT (*Computer Aided Thermodynamic Tables*), onde obteve-se a temperatura de vapor saturado da água em função de tais condições de pressão. Para o caso das 2 amostras em análise, essa temperatura foi de aproximadamente 98,0°C.

Vale salientar que, em ambos os procedimentos de calibração, no ponto de fusão do gelo e no ponto de ebulição da água, as amostras ficaram na posição horizontal, evitando que possíveis efeitos de convecção natural interferissem nas medidas dos termopares

Ao final dos procedimentos de calibração, foram plotadas as curvas de calibração, de cada termopar para cada amostra. As equações destas curvas são listadas na Tabela 2.

Amostra	Termopar	Curva de calibração
Aço inox AISI 304	xr	$T_{REAL} = -0,8091 + 1,0114 \times T_{MEDIDA}$
Aço inox AISI 304	x1, x2	$T_{REAL} = -0,9102 + 1,0114 \times T_{MEDIDA}$
Aço inox AISI 304	x3, x4, x5	$T_{REAL} = -0,9093 + 1,0103 \times T_{MEDIDA}$
Aço inox AISI 316	xr, x4	$T_{REAL} = -0,9121 + 1,0134 \times T_{MEDIDA}$
Aço inox AISI 316	x1, x2, x3	$T_{REAL} = -0,9112 + 1,0124 \times T_{MEDIDA}$
Aço inox AISI 316	x5	$T_{REAL} = -0,8099 + 1,0124 \times T_{MEDIDA}$

Tabela 2 - Curvas de calibração dos termopares para cada amostra.

Fonte - Autoria própria (2017)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados 9 experimentos, visando identificar os valores de α (difusividade térmica) das amostras estudadas, a partir dos valores de A (amplitude do modelo ou razão de amplitudes) ou de Ψ (fase do modelo ou defasagem) dos sinais térmicos captados pelos termopares instalados nas amostras.

Na amostra de aço inox AISI 304 realizou-se seis experimentos, sendo que em três deles utilizou-se vácuo na câmara da amostra e nos demais utilizou-se isolante térmico. Na amostra de aço inox AISI 316 realizou-se três experimentos, todos com isolante térmico na câmara da amostra.

Os valores de ω adotados para os experimentos nas amostras de aço inox AISI 304 e de aço inox AISI 316 foram $4,5 \times 10^{-3}$, $8,5 \times 10^{-3}$ e $15,3 \times 10^{-3}$ rad/s, sendo estes equivalentes, em termos de período, a 1396,3, 739,2 e 410,7 s, respectivamente. Na Figura 8 pode-se visualizar o resultado do perfil de temperatura, decorrente do fluxo de calor periódico, para o experimento realizado na amostra de aço inox AISI 304, com $\omega = 8,5 \times 10^{-3}$ rad/s.

Comprova-se desta maneira, o que foi mostrado por Carslaw e Jaeger (1959), para o campo de temperatura resultante numa amostra submetida a um fluxo de calor periódico: à medida que o tempo aumenta, a perturbação transiente é dissipada, e o campo térmico torna-se um campo com oscilações periódicas permanentes. Constitui-se, dessa maneira, o “regime periódico estabelecido”.

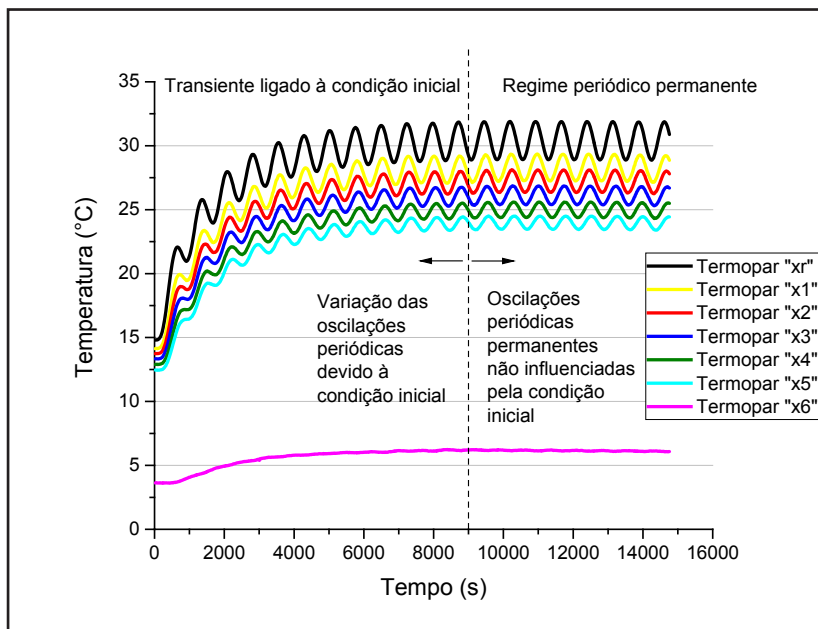


Figura 8 - Perfil de temperatura na amostra de aço inox AISI 304 submetida a um fluxo de calor periódico.

Fonte - Autoria própria (2017)

A amplitude térmica registrada pelo termopar “x6” — termopar que fica mais próximo da face inferior da amostra, e conseqüentemente do fluido refrigerante — é praticamente nula no regime periódico estabelecido. Isto mostra que, a onda térmica gerada pelo fluxo de calor periódico dissipa-se ao longo do comprimento da amostra, à medida que se aproxima da face inferior desta. Os sinais de temperatura registrados pelo termopar “x6” não foram utilizados para determinação de A e Ψ .

Os valores de A e Ψ foram identificados a partir dos sinais de temperatura obtidos no regime periódico estabelecido, ou seja, obtêm-se estes parâmetros a partir do instante no qual a perturbação transiente ligada à condição inicial encontra-se dissipada. Tal instante foi denominado como sendo o instante inicial ($t = 0$ s) do regime periódico estabelecido. Da Figura 9 até a Figura 17 podem ser vistas as curvas ajustadas (através do algoritmo de Levenberg-Marquardt) dos perfis de temperatura no regime periódico estabelecido (RPE), para todos os experimentos realizados.

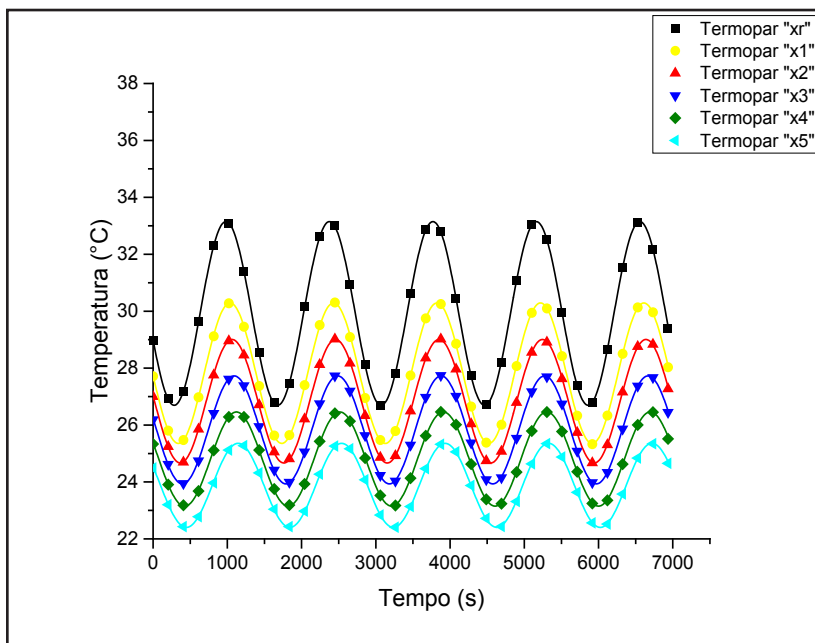


Figura 9 - Regime periódico permanente: aço inox AISI 304; $\omega = 4,5 \times 10^{-3}$ rad/s (vácuo).

Fonte: Autoria própria (2017)

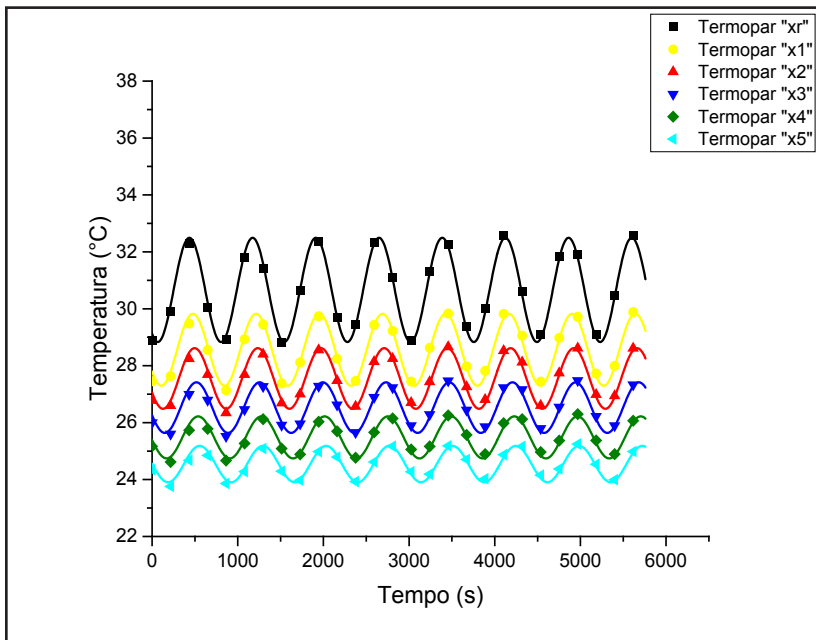


Figura 10 - Regime periódico permanente: aço inox AISI 304; $\omega = 8,5 \times 10^{-3}$ rad/s (vácuo).

Fonte - Autoria própria (2017)

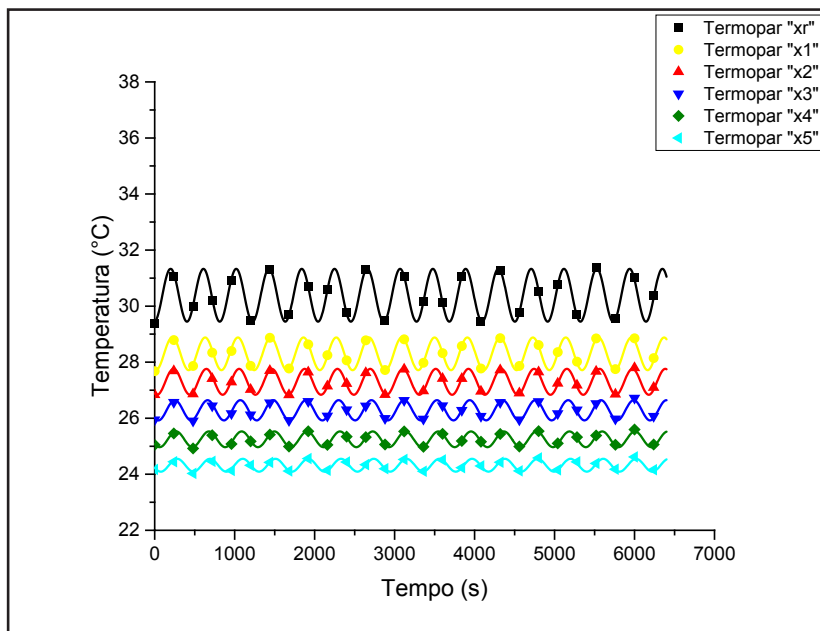


Figura 11 - Regime periódico permanente: aço inox AISI 304; $\omega = 15,3 \times 10^{-3}$ rad/s (vácuo).

Fonte - Autoria própria (2017)

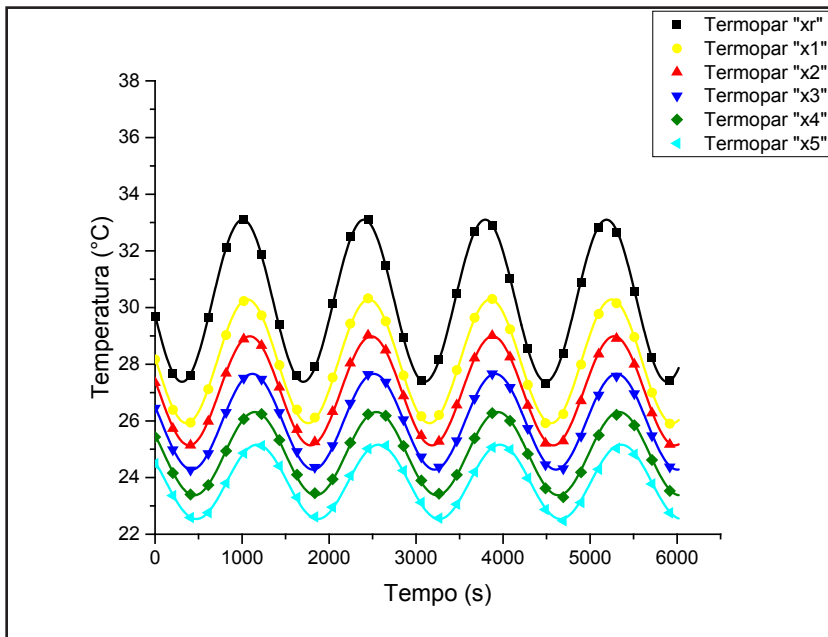


Figura 12 - Regime periódico permanente: aço inox AISI 304; $\omega = 4,5 \times 10^{-3}$ rad/s.

Fonte - Autoria própria (2017)

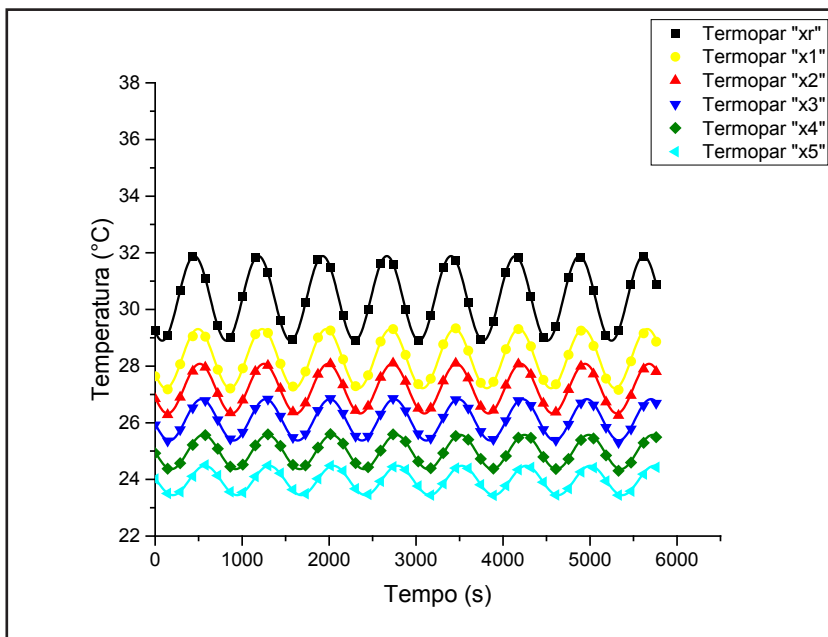


Figura 13 - Regime periódico permanente: aço inox AISI 304; $\omega = 8,5 \times 10^{-3}$ rad/s.

Fonte - Autoria própria (2017)

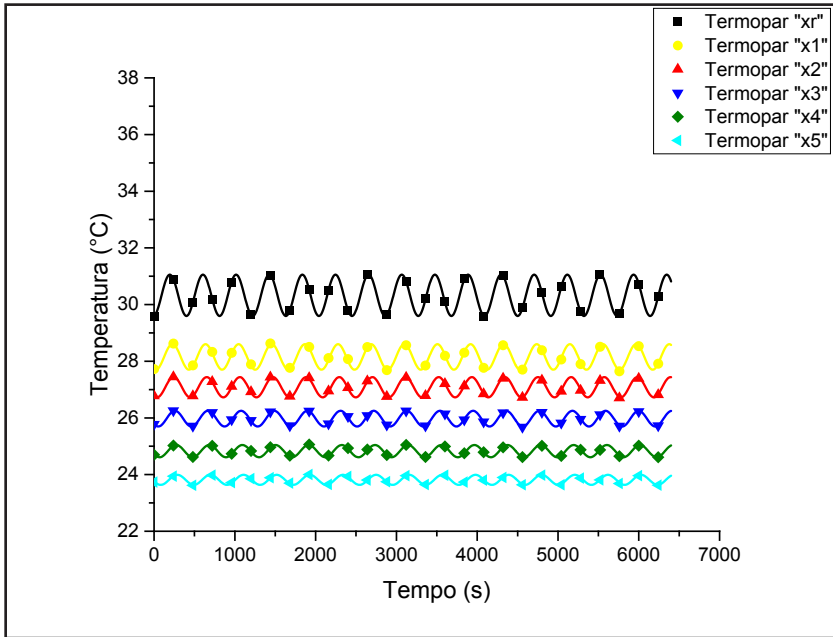


Figura 14 - Regime periódico permanente: aço inox AISI 304; $\omega = 15,3 \times 10^{-3}$ rad/s.

Fonte - Autoria própria (2017)

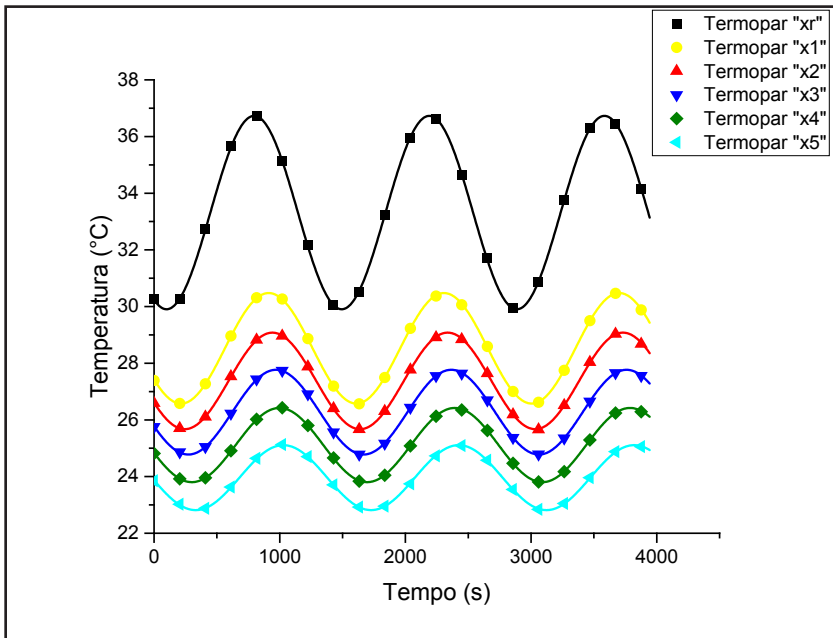


Figura 15 - Regime periódico permanente: aço inox AISI 316; $\omega = 4,5 \times 10^{-3}$ rad/s.

Fonte - Autoria própria (2017)

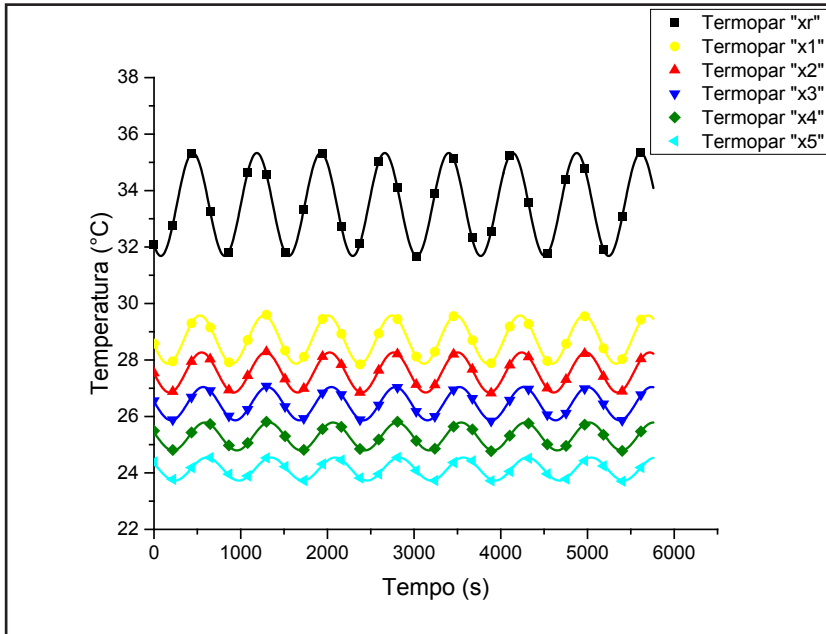


Figura 16 - Regime periódico permanente: aço inox AISI 316; $\omega = 8,5 \times 10^{-3}$ rad/s.

Fonte - Autoria própria (2017)

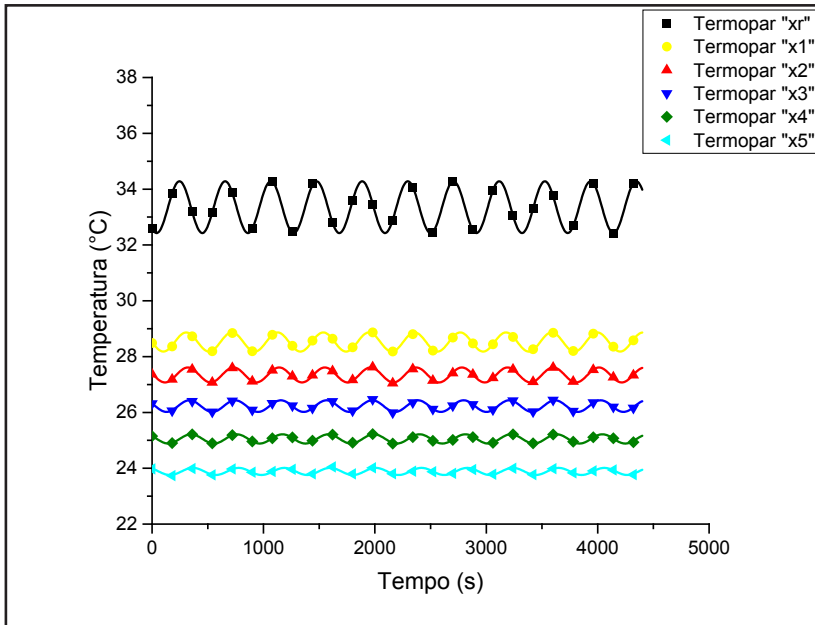


Figura 17 - Regime periódico permanente: aço inox AISI 316; $\omega = 15,3 \times 10^{-3}$ rad/s.

Fonte - Autoria própria (2017)

Das Figuras 9 - 17, identificam-se $A_i(x)$, amplitude térmica, $\Psi_i(x)$, fase, e $T_m(x)$, temperatura média, através dos perfis de temperatura. Estipula-se $T(x,t)$, $A(x)$ e $\Psi(x)$ a partir das Equações 9.

$$T(x, t) = T_m(x) + A_i(x) \text{sen}[\omega t + \Psi_i(x)] \quad (9.1)$$

$$A(x) = A_i(x)/A_i(x_r) \quad (9.2)$$

$$\Psi(x) = \Psi_i(x) - \varepsilon \quad (9.3)$$

As Figuras 18- 26 apresentam a temperatura média, a razão de amplitudes fases da temperatura, em função do posicionamento do termopar.

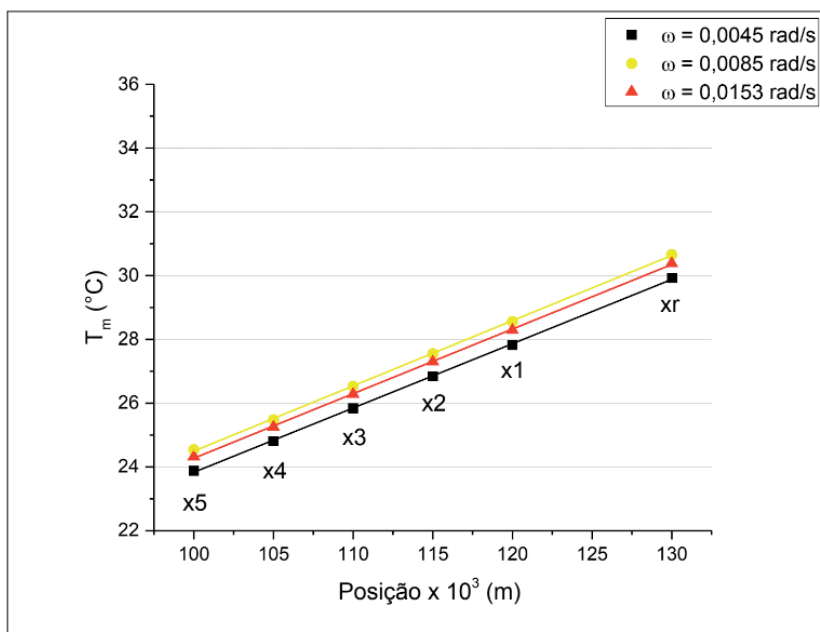


Figura 18 - Temperatura média vs posição do termopar para o aço inox AISI 304 (vácuo).

Fonte - Autoria própria (2017)

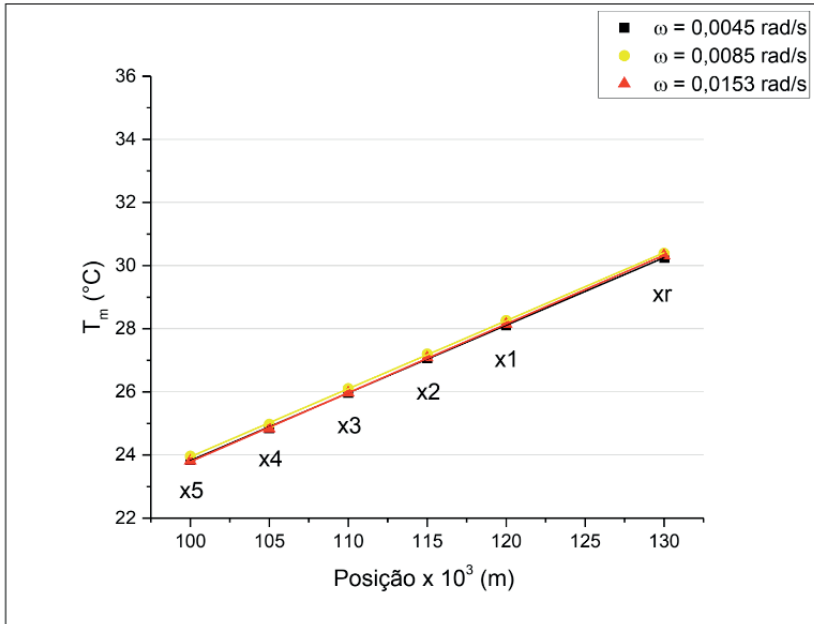


Figura 19 - Temperatura média vs posição do termopar para o aço inox AISI 304.

Fonte - Autoria própria (2017)

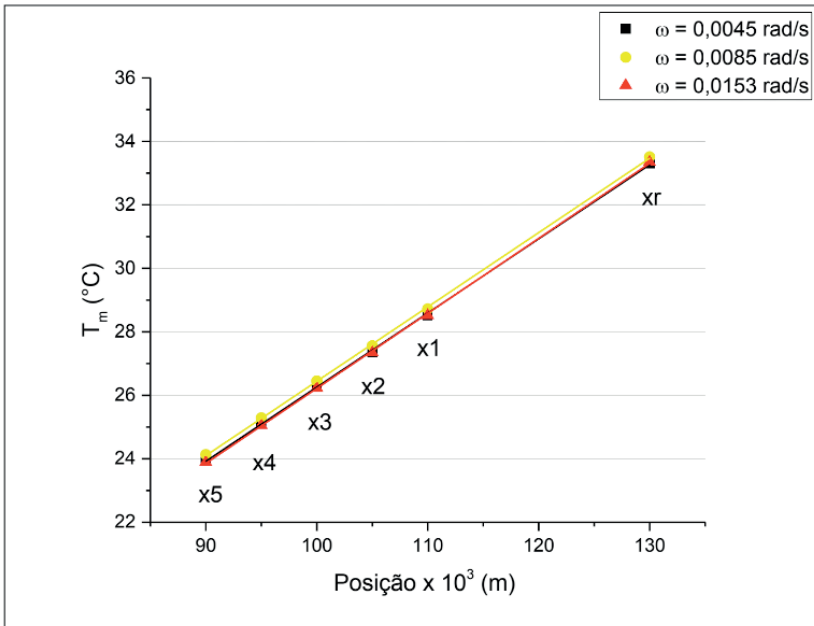


Figura 20 - Temperatura média vs posição do termopar para o aço inox AISI 316.

Fonte - Autoria própria (2017)

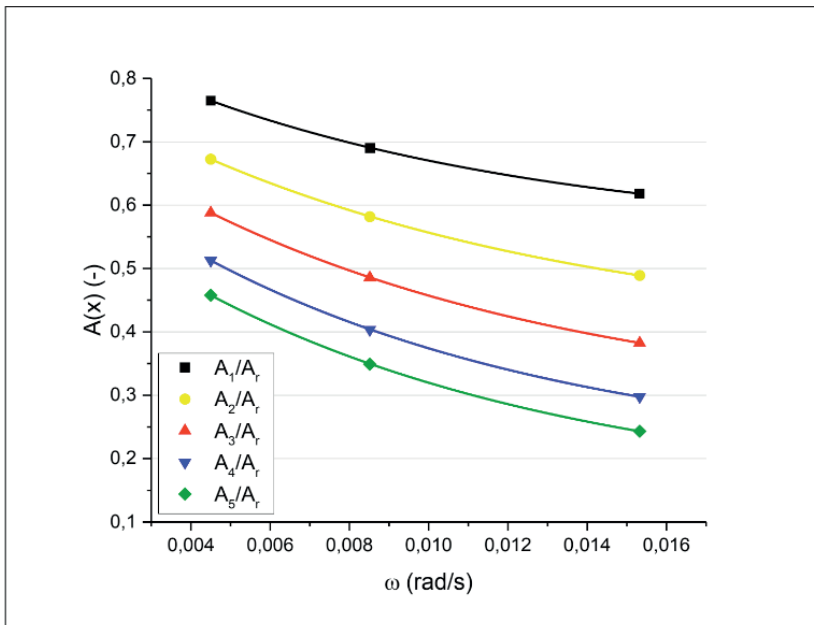


Figura 21 - Razão de amplitudes vs frequência térmica para o aço inox AISI 304 (vácuo).

Fonte - Autoria própria (2017)

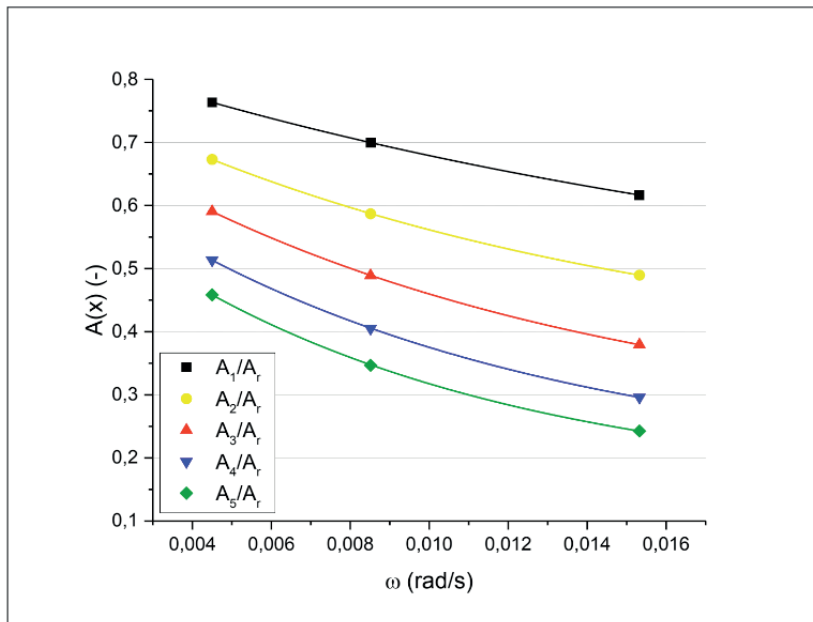


Figura 22 - Razão de amplitudes vs frequência térmica para o aço inox AISI 304.

Fonte - Autoria própria (2017)

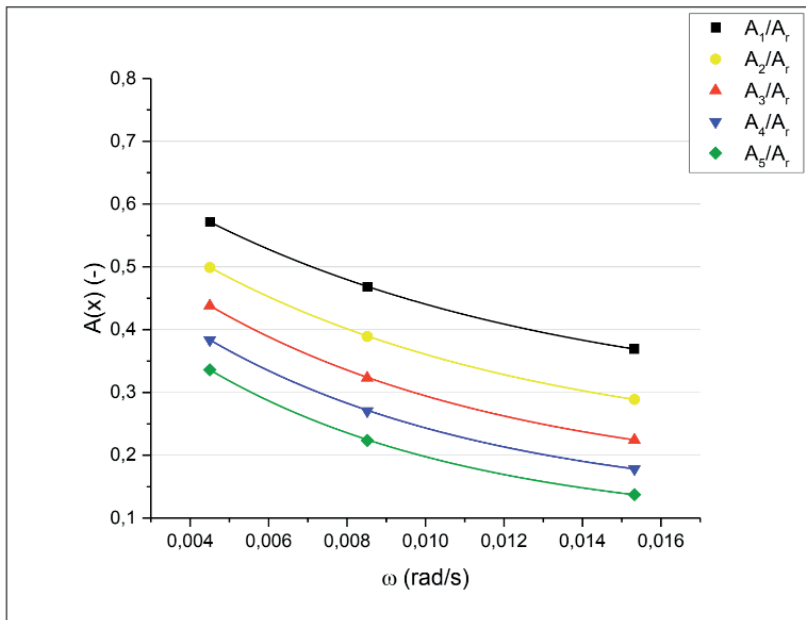


Figura 23 - Razão de amplitudes vs frequência térmica para o aço inox AISI 316.

Fonte - Autoria própria (2017)

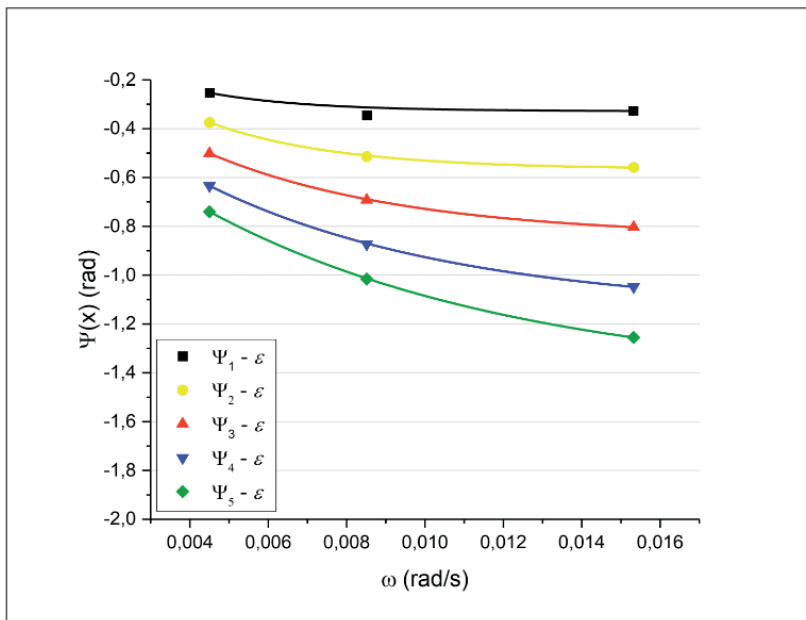


Figura 24 - Defasagem vs frequência térmica para o aço inox AISI 304 (vácuo).

Fonte - Autoria própria (2017)

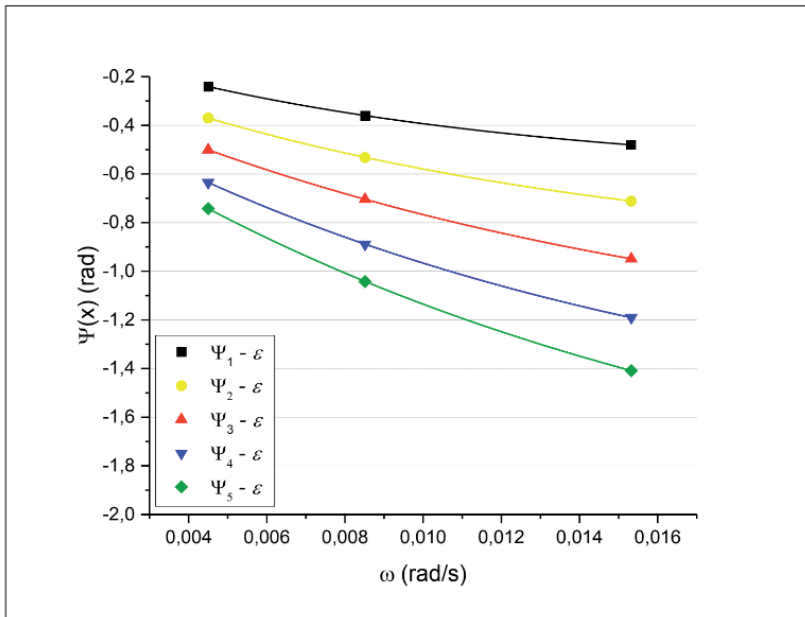


Figura 25 - Defasagem vs frequência térmica para o aço inox AISI 304.

Fonte - Autoria própria (2017)

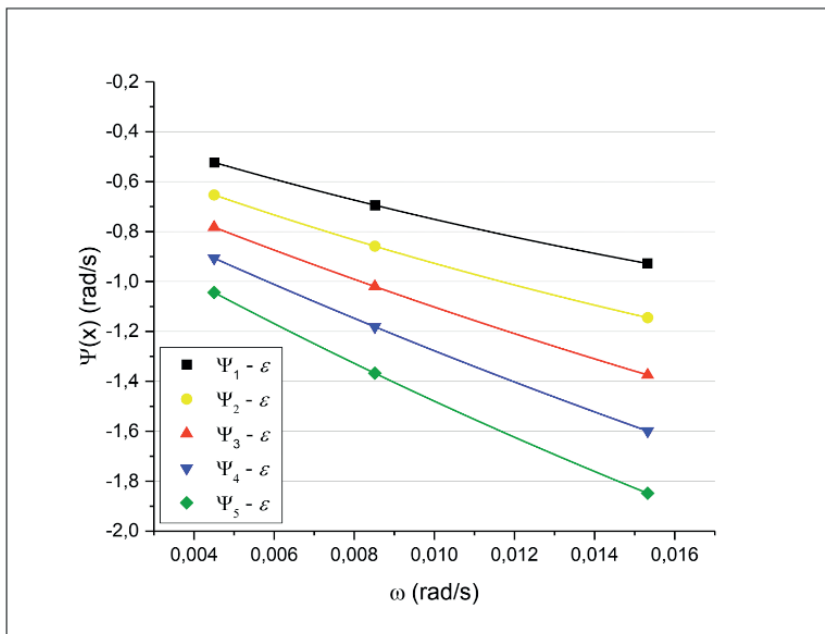


Figura 26 - Defasagem vs frequência térmica para o aço inox AISI 316.

Fonte - Autoria própria (2017)

No tocante aos gráficos de T_m versus posição, verifica-se um comportamento

linear crescente de T_m conforme o termopar se distancia da origem, com excelente ajuste de curva. Isto mostra que os valores considerados realmente encontram-se no regime periódico permanente.

Quanto aos gráficos de A (amplitude do modelo) em função de ω , verifica-se que os valores de A diminuem de forma exponencial com o aumento de ω . Por sua vez, os gráficos de Ψ (fase do modelo) em função de ω , indicam que os valores de Ψ aumentam de maneira exponencial conforme cresce o valor de ω .

Para cada experimento, foram identificados 5 valores de α através da Equação 5.1 e 5 valores através da Equação 5.2. A partir destes valores, conforme o *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*, do BIPM (2008), foi obtido o valor médio de α e a incerteza-padrão $u(\alpha)$. As Figuras 27 - 29 mostram os valores médios de α identificados para cada material em função de ω , assim como as incertezas-padrão, na parte superior de cada amostra.

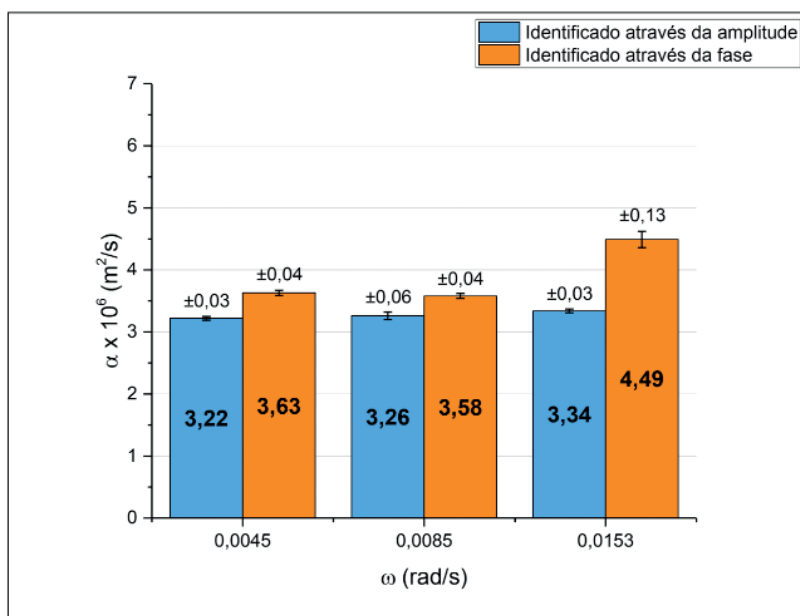


Figura 27 - Difusividade térmica do aço inox AISI 304 (vácuo).

Fonte - Autoria própria (2017)

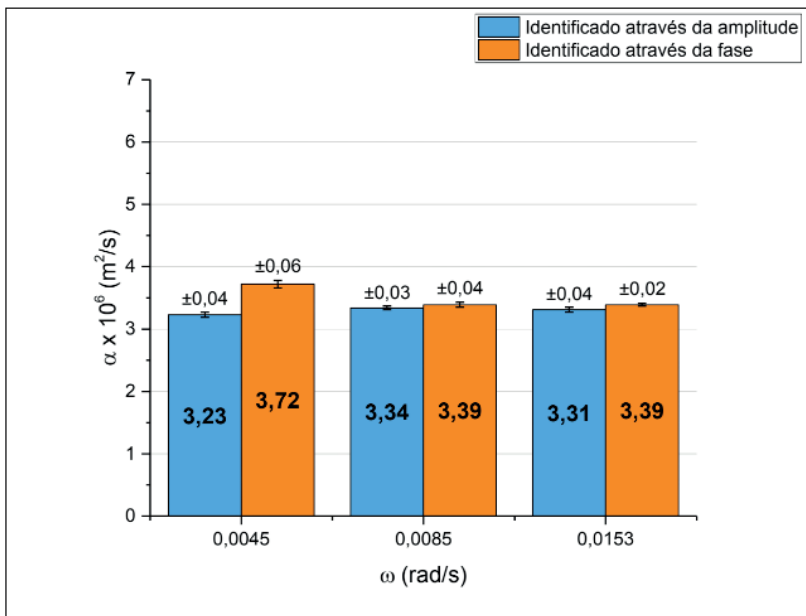


Figura 28 - Difusividade térmica do aço inox AISI 304.

Fonte - Autoria própria (2017)

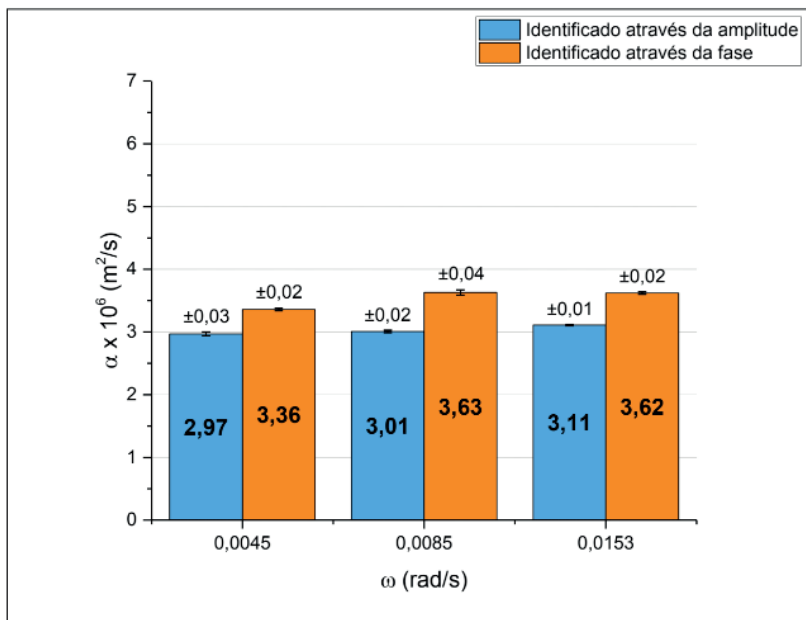


Figura 29 - Difusividade térmica do aço inox AISI 316.

Fonte - Autoria própria (2017)

A partir das figuras 27 - 29, constata-se que o isolante térmico é mais eficiente que

o vácuo nas condições em que os experimentos foram realizados. Vale salientar que os experimentos no aço inox AISI 316 foram executados apenas com o uso de isolante térmico na câmara da amostra.

Dentre os valores médios de α identificados nos aços inox AISI 304 e AISI 316, através da amplitude ou da fase, selecionou-se aqueles que mais se aproximaram dos valores de Carollo *et al.* (2012). Desta maneira, foram realizados estudos comparativos, que podem ser visualizados na Tabela 3.

Material	$[\alpha_A \pm u(\alpha)]$ $\times 10^6$ (m ² /s)	$[\alpha_\psi \pm u(\alpha)]$ $\times 10^6$ (m ² /s)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s) Carollo <i>et al.</i> (2012)	σ_A (%)	σ_ψ (%)
Aço inox 304	3,34 ± 0,03	3,72 ± 0,06	3,77	-11,41	-1,33
Aço inox 316	3,11 ± 0,01	3,36 ± 0,02	3,46	-10,12	-2,89

Tabela 3 - Comparação de valores de difusividade térmica dos aços inox AISI 304 e AISI 316.

Fonte - Autoria própria (2017)

De acordo com a Tabela 3, pode-se afirmar que os valores médios de α do presente trabalho, para os aços inox AISI 304 e AISI 316 apresentam desvios cerca de 10% quando comparados aos obtidos por Carollo *et al.* (2012).

A difusividade térmica trata-se de uma propriedade termofísica que depende da temperatura do material. Neste trabalho, pode-se desprezar a variação de α para pequenas variações de temperatura, haja visto que os valores de máxima variação de temperatura ocorrida em cada amostra são pequenos.

CONCLUSÕES

Este trabalho destinou-se à identificação da difusividade térmica do aço inox AISI 304 e do aço inox AISI 316, utilizando um campo de temperatura periódico. Para viabilizar tal estudo, utilizou-se um método baseado na técnica de Angstrom, na qual faz-se o uso de um fluxo de calor periódico na amostra, ocasionando nesta um campo de temperatura periódico. Um dispositivo experimental foi desenvolvido para suportar este método. Os parâmetros A (razão de amplitudes) e Ψ (defasagem) entre os perfis de temperatura medidos pelos termopares, quando determinados, foram inseridos em seus respectivos modelos matemáticos propiciando desta forma a identificação da difusividade térmica dos materiais em questão.

Os resultados obtidos, quando confrontados à literatura, podem ser considerados de boa precisão, tendo em vista que as diferenças percentuais ficaram cerca de 10%. Este patamar de precisão corrobora com a hipótese de fluxo de calor unidimensional, adotada para resolução do modelo matemático deste trabalho.

Como sugestões para trabalhos futuros, lista-se:

- a. Determinar a condutividade térmica utilizando o mesmo dispositivo experimental e/ou através do DSC (neste caso identifica-se o c_p e, através da definição da α , identifica-se o valor de k).
- b. Estimar a difusividade térmica [utilizando um campo de temperatura periódico] de ligas de memória de forma produzidas no LaMMEA cujas temperaturas de transformação de fase estejam dentro da faixa de trabalho do dispositivo experimental.
- c. Identificar a difusividade térmica [utilizando um campo de temperatura periódico] de polímeros.
- d. Submeter as amostras deste trabalho aos outros métodos de determinação de propriedade termofísicas, como o método flash, e comparar os resultados aos obtidos na presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

BEZERRA FILHO, C. R.; LIMA E SILVA, S. M. M.; LAURENT, M.; RAYNAUD, M. **Determinação da difusividade térmica utilizando um sinal periódico**. In: 15TH BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING. Águas de Lindóia-PR: 1999.

BORGES, V. L. **Desenvolvimento do Método de aquecimento plano parcial para determinação simultânea de propriedades térmicas sem o uso de transdutores de fluxo de calor**. Tese de Doutorado - Uberlândia-MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MEASURES (BIPM). **Evaluation of measurement data - Guide to expression of uncertainty in measurement**. JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections. 1. ed., 2008.

CAROLLO, L. F. S.; LIMA E SILVA, A. L. F.; LIMA E SILVA, S. M. M. **Applying different heat flux intensities to simultaneously estimate the thermal properties of metallic materials**. Measurement Science and Technology, n. 23, 2012.

CAROLLO, L. F. S.; LIMA E SILVA, A. L. F.; LIMA E SILVA, S. M. M. **Applying different heat flux intensities to estimate temperature-dependent thermal properties of metals**. In: 23RD ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING. Rio de Janeiro: 2015.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids**. 2. ed. Oxford: Clarendon press, 1959.

CHIRDON, W. M.; PATIL, A. P. **An oscillating boundary temperature method for the determination of transient thermal conductivity and internal generation with a comparison to a transient hot-wire method**. International Journal of Thermophysics, v. 32, 2011.

GRAVENA, D. A.; CAROLLO, L. F. S.; LIMA E SILVA, S. M. M. **Caracterização térmica de polímeros utilizando o método do fio-quente**. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. Campina Grande-PB: 2010

HAJI-SHEIKH, A; HONG, Y. S.; YOU, S. M.; BECK, J. V. **Sensitivity analysis for thermophysical property measurements using the periodic methods**. Journal of Heat Transfer, v. 120, 1998.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

KAKAÇ, S.; YENER, Y. **Heat Conduction**. 3. ed. Washington, DC: Taylor & Francis, 1993.

LAHOUCINE, C. O.; KHELLAF, A. **Periodic method: Correction for thermocouple and simultaneous estimation of thermal conductivity and thermal diffusivity**. Review of scientific instruments, v. 75, n. 7, 2004.

MYERS, G. E. **Analytical methods in conduction heat transfer**. 2. ed. [s.l.] AMCHT Publications, 1998.

ÖZİŞİK, M. N. **Heat Conduction**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

PARKER, W. J.; JEKINS, R. J.; BUTLER, C. P.; ABBOTT, G. L. **Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity**. Journal of Applied Physics, v. 32, 1961.

REIF-ACHERMAN, S. **Early and current experimental methods for determining thermal conductivities of metals**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 77, 2014.

RYU, W. S.; PARK, D. G.; SONG, U. S.; PARK, J. S.; AHN, S. B. **Effects of irradiation on thermal conductivity of alloy 690 at low neutron fluence.** Nuclear Engineering and Technology, v. 45, 2013.

SANTOS, W. N.; GREGÓRIO FILHO, R.; MUMMERY, P.; WALLWORK, A. **Método do fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 14, n. 5, 2004.

SANTOS, W. N. **Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: I - O método de pulso de energia.** Cerâmica, v. 51, 2005.

SANTOS, W. N.; SANTOS, J. N.; MUMMERY, P.; WALLWORK, A. **Thermal diffusivity of polymers by modified Angstrom method.** Polymer Testing, v. 29, 2010.

APÊNDICE A - SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático do problema desta pesquisa, a condição inicial e as condições de contorno são, respectivamente:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$T(x, 0) = 0$$

$$T(0, t) = 0$$

$$T(L, t) = \text{sen}(\omega t + \varepsilon)$$

As oscilações transitórias ligadas à condição inicial cessam quando o tempo cresce, como mostrado no gráfico da Figura 8 e também mostrado por Carslaw e Jaeger (1959). Para tempos longos, só as oscilações permanentes (“regime periódico permanente”) continuam. Quando o regime periódico permanente é atingido, o modelo passa a ser:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$T(0, t) = 0$$

$$T(L, t) = \text{sen}(\omega t + \varepsilon)$$

Para resolução deste modelo, segue-se o método apresentado por Myers (1998), que consiste em escrever um modelo defasado de 90°. Chamando a variável dependente de w no modelo defasado de 90°, tem-se:

$$\alpha \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial w}{\partial t}$$

$$w(0, t) = 0$$

$$w(L, t) = \text{cos}(\omega t + \varepsilon)$$

A partir destes dois modelos, constrói-se o modelo:

$$\theta(x, t) = w(x, t) + iT(x, t)$$

Desta forma, o novo modelo é dado por:

$$\alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{A.1}$$

$$\theta(0, t) = w(0, t) + iT(0, t) = 0$$

$$\theta(L, t) = w(L, t) + iT(L, t) = \text{cos}(\omega t + \varepsilon) + i \text{sen}(\omega t + \varepsilon) = e^{i(\omega t + \varepsilon)}$$

De acordo com Carslaw e Jaeger (1959) e Myers (1998), a solução do modelo é dada por:

$$\theta(x, t) = u(x)e^{i(\omega t + \varepsilon)} = u(x)[\text{cos}(\omega t + \varepsilon) + i \text{sen}(\omega t + \varepsilon)] \tag{A.2}$$

A parte real da Equação (A.2) é a solução do problema $w(x, t)$ e a parte imaginária é a solução do problema $T(x, t)$. Substituindo a Equação (A.1) na Equação (A.2), tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{du}{dx} e^{i(\omega t + \varepsilon)}$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{dx^2} = \frac{\partial^2 u}{dx^2} e^{i(\omega t + \varepsilon)}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = ui\omega e^{i(\omega t + \varepsilon)}$$

Com isso,

$$\alpha \frac{d^2 u}{dx^2} = ui\omega \Rightarrow \frac{d^2 u}{dx^2} - i \frac{\omega}{\alpha} u = 0$$

Retornando para a Equação (A.2), tem-se:

$$\theta(0, t) = u(0)e^{i(\omega t + \varepsilon)} = 0 \Rightarrow u(0) = 0$$

$$\theta(L, t) = u(L)e^{i(\omega t + \varepsilon)} = e^{i(\omega t + \varepsilon)} \Rightarrow u(L) = 1$$

Assim, determina-se $u(x)$ a partir da solução de:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - i \frac{\omega}{\alpha} u = 0 \tag{A.3}$$

$$u(0) = 0$$

$$u(L) = 1$$

A equação característica da Equação (A.3) é:

$$s^2 - i \frac{\omega}{\alpha} = 0 \Rightarrow s = \pm \sqrt{i \frac{\omega}{\alpha}}$$

$$s_1 = \sqrt{i \frac{\omega}{\alpha}} = (1 + i)\beta$$

$$s_2 = -\sqrt{i \frac{\omega}{\alpha}} = -(1 + i)\beta$$

onde:

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$$

Assim:

$$u(x) = c_1 e^{s_1 x} + c_2 e^{s_2 x} = c_1 e^{(1+i)\beta x} + c_2 e^{-(1+i)\beta x}$$

Como $u(0) = 0$, tem-se:

$$u(0) = c_1 + c_2 = 0 \Rightarrow c_1 = -c_2$$

De $u(L) = 1$, resulta:

$$u(L) = c_1 e^{(1+i)\beta L} + c_2 e^{-(1+i)\beta L} = 1$$

Como $c_1 = -c_2$, resulta:

$$c_1 e^{(1+i)\beta L} - c_1 e^{-(1+i)\beta L} = 1 \quad (\text{A.4})$$

$$c_1 [e^{(1+i)\beta L} - c_1 e^{-(1+i)\beta L}] = 1$$

Por definição, tem-se:

$$\sinh(x) = \frac{(e^x - e^{-x})}{2}$$

Pode-se escrever a Equação (A.4) como

$$c_1 2 \sinh[(1+i)\beta L] = 1$$

E, desta maneira:

$$c_1 = \frac{1}{2 \sinh[(1+i)\beta L]}$$

$$c_2 = -c_1 \Rightarrow c_2 = -\frac{1}{2 \sinh[(1+i)\beta L]}$$

Logo, $u(x)$ é dada por:

$$u(x) = c_1 e^{(1+i)\beta x} + c_1 e^{-(1+i)\beta x}$$

$$u(x) = \frac{e^{(1+i)\beta x}}{2 \sinh[(1+i)\beta L]} - \frac{e^{-(1+i)\beta x}}{2 \sinh[(1+i)\beta L]}$$

$$u(x) = \frac{2 \sinh[(1+i)\beta x]}{2 \sinh[(1+i)\beta L]}$$

$$u(x) = \frac{\sinh[(1+i)\beta x]}{\sinh[(1+i)\beta L]}$$

Desta maneira:

$$\theta(x, t) = u(x) e^{i(\omega t + \varepsilon)}$$

$$\theta(x, t) = \left\{ \frac{\sinh[(1+i)\beta x]}{\sinh[(1+i)\beta L]} \right\} e^{i(\omega t + \varepsilon)}$$

O número complexo $\frac{\sinh[(1+i)\beta x]}{\sinh[(1+i)\beta L]}$ tem uma amplitude (A) e uma fase (Ψ). Logo, tem-se que:

$$u(x) = \frac{a + bi}{c + di} = A(x) e^{i\Psi}$$

onde:

$$A = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^2 + d^2}}$$

$$\Psi = \theta_1 - \theta_2 = \arg \left\{ \frac{a + bi}{c + di} \right\}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{d}{c} \right)$$

Seja:

$$u = \frac{\sinh[(1+i)\beta x]}{\sinh[(1+i)\beta L]}$$

$$u = \frac{e^{(1+i)\beta x} - e^{-(1+i)\beta x}}{e^{(1+i)\beta L} - e^{-(1+i)\beta L}} = \frac{e^{\beta x} e^{i\beta x} - e^{-\beta x} e^{-i\beta x}}{e^{\beta L} e^{i\beta L} - e^{-\beta L} e^{-i\beta L}}$$

$$u = \frac{e^{\beta x} [\cos(\beta x) + i \operatorname{sen}(\beta x)] - e^{-\beta x} [\cos(\beta x) - i \operatorname{sen}(\beta x)]}{e^{\beta L} [\cos(\beta L) + i \operatorname{sen}(\beta L)] - e^{-\beta L} [\cos(\beta L) - i \operatorname{sen}(\beta L)]}$$

$$u = \frac{\cos(\beta x) [e^{\beta x} - e^{-\beta x}] + i \operatorname{sen}(\beta x) [e^{\beta x} + e^{-\beta x}]}{\cos(\beta L) [e^{\beta L} - e^{-\beta L}] + i \operatorname{sen}(\beta L) [e^{\beta L} + e^{-\beta L}]}$$

$$u = \frac{\cos(\beta x) \operatorname{senh}(\beta x) + i \operatorname{sen}(\beta x) \operatorname{cosh}(\beta x)}{\cos(\beta L) \operatorname{senh}(\beta L) + i \operatorname{sen}(\beta L) \operatorname{cosh}(\beta L)}$$

Desta maneira, para determinar-se A, tem-se:

$$A = \sqrt{\frac{[\cos(\beta x) \operatorname{senh}(\beta x)]^2 + [\operatorname{sen}(\beta x) \operatorname{cosh}(\beta x)]^2}{[\cos(\beta L) \operatorname{senh}(\beta L)]^2 + [\operatorname{sen}(\beta L) \operatorname{cosh}(\beta L)]^2}}$$

$$A = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \{ \cos^2(\beta x) [e^{2\beta x} - e^{-2\beta x}]^2 + \operatorname{sen}^2(\beta x) [e^{\beta x} + e^{-\beta x}]^2 \}}{\frac{1}{4} \{ \cos^2(\beta L) [e^{2\beta L} - e^{-2\beta L}]^2 + \operatorname{sen}^2(\beta L) [e^{\beta L} + e^{-\beta L}]^2 \}}}$$

$$A = \sqrt{\frac{\{ \cos^2(\beta x) [e^{2\beta x} - 2e^{\beta x} e^{-\beta x} + e^{-2\beta x}] + \operatorname{sen}^2(\beta x) [e^{2\beta x} + 2e^{\beta x} e^{-\beta x} + e^{-2\beta x}] \}}{\{ \cos^2(\beta L) [e^{2\beta L} - 2e^{\beta L} e^{-\beta L} + e^{-2\beta L}] + \operatorname{sen}^2(\beta L) [e^{2\beta L} + 2e^{\beta L} e^{-\beta L} + e^{-2\beta L}] \}}}$$

$$A = \sqrt{\frac{\{ \cos^2(\beta x) [e^{2\beta x} - 2 + e^{-2\beta x}] + \operatorname{sen}^2(\beta x) [e^{2\beta x} + 2 + e^{-2\beta x}] \}}{\{ \cos^2(\beta L) [e^{2\beta L} - 2 + e^{-2\beta L}] + \operatorname{sen}^2(\beta L) [e^{2\beta L} + 2 + e^{-2\beta L}] \}}}$$

$$A = \sqrt{\frac{\{ \cos^2(\beta x) [2 \operatorname{cosh}(2\beta x) - 2] + \operatorname{sen}^2(\beta x) [2 \operatorname{cosh}(2\beta x) + 2] \}}{\{ \cos^2(\beta L) [2 \operatorname{cosh}(2\beta L) - 2] + \operatorname{sen}^2(\beta L) [2 \operatorname{cosh}(2\beta L) + 2] \}}}$$

$$A = \sqrt{\frac{2 \operatorname{cosh}(2\beta x) [\cos^2(\beta x) + \operatorname{sen}^2(\beta x)] - 2[\cos^2(\beta x) - \operatorname{sen}^2(\beta x)]}{2 \operatorname{cosh}(2\beta L) [\cos^2(\beta L) + \operatorname{sen}^2(\beta L)] - 2[\cos^2(\beta L) - \operatorname{sen}^2(\beta L)]}}$$

Das relações trigonométricas, tem-se que:

$$\cos^2(\gamma) + \sin^2(\gamma) = 1$$

$$\cos^2(\gamma) - \sin^2(\gamma) = \cos(2\gamma)$$

Logo:

$$A = \sqrt{\frac{2 \cosh(2\beta x) - \cos(2\beta x)}{2 \cosh(2\beta L) - \cos(2\beta L)}} = \left\{ \frac{2 \cosh(2\beta x) - \cos(2\beta x)}{2 \cosh(2\beta L) - \cos(2\beta L)} \right\}^{1/2}$$

Dessa maneira, a fase é dada pela expressão

$$\Psi = \operatorname{arg} \left\{ \frac{\sinh[\beta x(1+i)]}{\sinh[\beta L(1+i)]} \right\}$$

Chega-se, desta maneira, às expressões de A e Ψ mostradas em Carslaw e Jaeger (1959). Portanto, a solução para o regime periódico permanente é:

$$\theta(x, t) = u(x)e^{i(\omega t + \varepsilon)} = A(x)e^{i\Psi}e^{i(\omega t + \varepsilon)}$$

$$\theta(x, t) = A(x)e^{i(\omega t + \varepsilon + \Psi)} = A(x)[\cos(\omega t + \varepsilon + \Psi) + i \sin(\omega t + \varepsilon + \Psi)]$$

Assim, a solução para o problema $T(x, t)$ é dada pela Equação (A.5):

$$T(x, t) = A(x) \sin(\omega t + \varepsilon + \Psi) \tag{A.5}$$

Onde

$$A = \left\{ \frac{2 \cosh(2\beta x) - \cos(2\beta x)}{2 \cosh(2\beta L) - \cos(2\beta L)} \right\}^{1/2}$$

$$\Psi = \operatorname{arg} \left\{ \frac{\sinh[\beta x(1+i)]}{\sinh[\beta L(1+i)]} \right\}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$$

Neste trabalho, adotou-se:

$$\varepsilon = 0$$

SOBRE OS AUTORES

JOSÉ RICARDO FERREIRA OLIVEIRA - Possui Graduação (2008) e Mestrado (2017) em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande. Está cursando Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia, com previsão de término em 2022. Atuou como Engenheiro de Manutenção e de Projetos no setor de autopeças (2007 - 2016). Foi membro do Comitê Científico e da Comissão Organizadora do 25th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2019, realizado em Uberlândia-MG. Atua em pesquisas relacionadas à determinação de propriedades termofísicas de materiais sólidos e na detecção de tumores em mamas através de imagens termográficas e/ou do uso do método da impedância térmica.

LUIZ ROBERTO ROCHA DE LUCENA - Mestrado em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica PPGEM da UFCG (2015), Graduação em Sistema de Informação pela Universidade Paulista (2012). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Engenharia Mecânica e Geração de Energia Elétrica.

RÔMULO PIERRE BATISTA DOS REIS - Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Campina Grande (2008), mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande (2010) e doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande (2018). Atualmente é Professor Adjunto I da Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Vibrações Mecânica, atuando principalmente nos seguintes temas: ligas com memória de forma, atenuação de vibrações, amortecimento e efeito peltier.

CARLOS JOSÉ DE ARAÚJO - CJ De Araujo possui Graduação e Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (1991; 1994), e Doutorado em Engenharia Mecânica e de Materiais (Comportement Mécanique et Macroscopique des Matériaux) pelo Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (França), INSA - Lyon (1999). É Professor Titular da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), além de Pesquisador do CNPq desde 2006, atualmente no Nível 1C. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica e de Materiais, com ênfase em Mecânica dos Sólidos e Propriedades Físicas e Mecânicas dos Metais e Ligas. Desde os anos 1990 vem realizando pesquisas de caráter interdisciplinar principalmente no seguinte tema: Desenvolvimento de Ligas com Memória de Forma - Fabricação, Caracterização, Simulação e Aplicações.

CELSO ROSENDO BEZERRA FILHO - Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (1985), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (1988) e doutorado em Génie Thermique - Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon (1998). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase

em Transferência de Calor e Termodinâmica, atuando principalmente nos seguintes temas: regime periódico, transferência de calor, difusividade térmica, resistência de contato e análise termodinâmica de motores de combustão interna.

ESTIMATIVA DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE LIGAS METÁLICAS UTILIZANDO UM CAMPO DE TEMPERATURA PERIÓDICO

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ESTIMATIVA DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE LIGAS METÁLICAS UTILIZANDO UM CAMPO DE TEMPERATURA PERIÓDICO

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br