



**Henrique Ajuz Holzmann
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia
(Organizadores)**

Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica 3

Atena
Editora

Ano 2019

Henrique Ajuz Holzmann
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia
(Organizadores)

**Impactos das Tecnologias na
Engenharia Mecânica**
3

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Lorena Prestes e Geraldo Alves

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

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

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

I34 Impactos das tecnologias na engenharia mecânica 3 [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, Ricardo Vinicius Bubna Biscaia. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica; v.3)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN 978-85-7247-248-7

DOI 10.22533/at.ed.487190504

1. Automação industrial. 2. Engenharia mecânica – Pesquisa – Brasil. 3. Produtividade industrial. 4. Tecnologia. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Biscaia, Ricardo Vinicius Bubna. III. Série.

CDD 670.427

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

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

2019

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.

APRESENTAÇÃO

A engenharia mecânica está em constante mudança, sendo uma das mais versáteis, se olhar desde seu surgimento durante a Revolução Industrial até os dias de hoje é visível a modernização e modificação dos métodos e das tecnologias empregadas.

Nesta evolução um dos pontos de destaque é a área de materiais e dos modos de obtenção dos mesmos, sendo responsável por grande parte desta modernização da área. Neste livro são tratados alguns assuntos ligados diretamente a área de matérias, bem como os processos de transformação dos mesmos em produtos finais.

A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas de desempenho técnico e econômico. Ainda são base da formação do engenheiro projetista cujo ofício se fundamenta na correta escolha de materiais e no processo de fabricação do mesmo.

Um compendio de temas e abordagens que constituem a base de conhecimento de profissionais que se dedicam a seleção, desenvolvimento e processos de obtenção e fabricação são apresentados nesse livro.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DAS LIGAS Al-3%Si E Al-9%Si ATRAVÉS DO PROCESSO “SQUEEZE-CASTING”, E A INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA DUREZA, MACRO E MICROESTRUTURA	
<i>Diógenes Linard Aquino Freitas</i> <i>Cláudio Alves de Siqueira Filho</i> <i>José Joelson de Melo Santiago</i>	
DOI 10.22533/at.ed.4871905041	
CAPÍTULO 2	12
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CEMENTANTES ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE MICRODUREZA VICKERS	
<i>Bernardo Rota</i> <i>Alisson Geovane Silva de Souza</i> <i>Annemarie Henker</i> <i>Daniel Amoretti Gonçalves</i>	
DOI 10.22533/at.ed.4871905042	
CAPÍTULO 3	22
ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO USANDO O MÉTODO DO FIO QUENTE	
<i>Alisson Augusto Azevedo Figueiredo</i> <i>Jefferson Gomes do Nascimento</i> <i>Luís Henrique da Silva Ignácio</i> <i>Vinicius Soares Medeiros</i> <i>Fernando Costa Malheiros</i> <i>Henrique Coelho Fernandes</i> <i>Gilmar Guimarães</i>	
DOI 10.22533/at.ed.4871905043	
CAPÍTULO 4	27
PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE NANOFUIDOS TiO ₂	
<i>Letícia Raquel de Oliveira</i> <i>Stella Rodrigues Ferreira Lima Ribeiro</i> <i>David Fernando Marcucci Pico</i> <i>Alessandro Augusto Olimpio Ferreira Vittorino</i> <i>Enio Pedone Bandarra Filho</i>	
DOI 10.22533/at.ed.4871905044	
CAPÍTULO 5	35
DESENVOLVIMENTO DE UM INDENTADOR INSTRUMENTADO PARA MEDIÇÕES DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS E PLÁSTICAS	
<i>Lucas dos Reis Heni Madeira</i> <i>Vinicius Carvalho Teles</i> <i>Washington Martins da Silva Junior</i>	
DOI 10.22533/at.ed.4871905045	

CAPÍTULO 6 43

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL EM HIDROXIAPATITA COMERCIAL E SINTETIZADA PELO MÉTODO SOL-GEL UTILIZANDO CASCA DE OVO DE GALINHA COMO PRECURSOR

Marcelo Vitor Ferreira Machado
José Brant de Campos
Marilza Sampaio Aguilar
Vitor Santos Ramos

DOI 10.22533/at.ed.4871905046

CAPÍTULO 7 53

PARAMETRIZAÇÃO DE TEXTURIZAÇÃO VIA MECT EM METAL PATENTE

Túlio Alves Rodrigues
Erika Michele Damas
Gabriela Caixeta Alcarria
Náthaly Nascimento Sousa
Washington Martins da Silva Junior

DOI 10.22533/at.ed.4871905047

CAPÍTULO 8 59

CORRELAÇÃO ENTRE DIFERENTES FORMAS DE AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DE FERROS FUNDIDOS E SEU COEFICIENTE DE ATRITO

Luiz Eduardo Rodrigues Vieira
Guilherme de Oliveira Castanheira
Leonardo Rosa Ribeiro da Silva
Wisley Falco Sales
Álisson Rocha Machado
Wilson Luiz Guessser

DOI 10.22533/at.ed.4871905048

CAPÍTULO 9 69

MANUFATURA DE LIGA DE AL5%CU PELO PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ

André Pereira da Silva
Juliano de Lemos Navarro
Leonardo Almeida Lopes
Felipe Antônio Viana de Araújo
Gabriel Aires Honorato
Sérgio Mateus Brandão

DOI 10.22533/at.ed.4871905049

CAPÍTULO 10 85

ANÁLISE DO FENÔMENO DAS BOLHAS EM SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA COM ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO

Camilla Mara Mendonça
Alexandre Queiroz Bracarense
Douglas de Oliveira Santana
Marcelo Teodoro Assunção

DOI 10.22533/at.ed.48719050410

CAPÍTULO 11	99
O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES DE SOLDAGEM	
<i>Heitor Abdias da Silva Pereira</i>	
<i>Marcelo Cavalcanti Rodrigues</i>	
DOI 10.22533/at.ed.48719050411	
CAPÍTULO 12	114
ANÁLISE EXPERIMENTAL DA USINAGEM COM AÇO INOXIDÁVEL	
<i>Gabriella Arruda Martins</i>	
<i>Lays Edinir da Cunha</i>	
<i>Luís Gustavo Moreira</i>	
<i>Mikael Henrique Morais</i>	
<i>Thomas Ernst de Goes Ferreira Kohler</i>	
DOI 10.22533/at.ed.48719050412	
CAPÍTULO 13	123
AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO DE RUGOSIDADE R_v DE CILINDROS DE BLOCOS DE COMPRESSORES HERMÉTICOS USINADOS PELO PROCESSO DE BRUNIMENTO FLEXÍVEL	
<i>Leandro Carvalho Pereira</i>	
<i>Leonardo Rosa Ribeiro da Silva</i>	
<i>Rosenda Valdés Arencibia</i>	
<i>Luciano José Arantes</i>	
DOI 10.22533/at.ed.48719050413	
CAPÍTULO 14	131
INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NO DESGASTE DE MICROFRESAS DE METAL DURO NA MICROUSINAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205	
<i>Aline Gonçalves dos Santos</i>	
<i>Daniel Fernandes da Cunha</i>	
<i>Mayara Fernanda Pereira</i>	
<i>Bruno Souza Abrão</i>	
<i>Mark James Jackson</i>	
<i>Márcio Bacci da Silva</i>	
DOI 10.22533/at.ed.48719050414	
CAPÍTULO 15	139
GERAÇÃO E PARTIÇÃO DE CALOR EM USINAGEM POR MEIO DO MÉTODO CALORIMÉTRICO: UMA REVISÃO	
<i>Ivanilson Sousa da Costa</i>	
<i>Márcio Bacci da Silva</i>	
DOI 10.22533/at.ed.48719050415	
CAPÍTULO 16	153
GERAÇÃO DE CALOR NA FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO POR MEIO DO MÉTODO CALORIMÉTRICO	
<i>Ivanilson Sousa da Costa</i>	
<i>Guilherme Henrique Alves Andrade</i>	
<i>Márcio Bacci da Silva</i>	

DOI 10.22533/at.ed.48719050416

CAPÍTULO 17 168

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE USINAGEM EM AÇOS DE CORTE FÁCIL POR MEIO DO MÉTODO DO TERMOPAR FERRAMENTA- PEÇA

Ivanilson Sousa da Costa

Márcio Bacci da Silva

DOI 10.22533/at.ed.48719050417

CAPÍTULO 18 177

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA NO PROCESSO DE FRESAMENTO UTILIZANDO SENSORES POR EFEITO HALL

Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Kenji Fabiano Ávila Okada

Gabriel Marçal de Carvalho

Eder Silva Costa

Álisson Rocha Machado

DOI 10.22533/at.ed.48719050418

CAPÍTULO 19 187

INFLUÊNCIA DE VÁRIOS PARÂMETROS OPERACIONAIS EM RETIFICAÇÃO NO ACABAMENTO E NA TEXTURA DA SUPERFÍCIE DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

Bruno Souza Abrão

Mayara Fernanda Pereira

Mariana Landim Silveira Lima

Eduardo Carlos Bianchi

Rosemar Batista da Silva

DOI 10.22533/at.ed.48719050419

CAPÍTULO 20 193

INFLUÊNCIA DA PENETRAÇÃO DE TRABALHO E VELOCIDADE DA PEÇA NO ACABAMENTO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR APÓS A RETIFICAÇÃO COM REBOLO DE SIC

Lurian Souza Vieira da Silva

Rosemar Batista da Silva

Mariana Landim Silveira Lima

Deborah de Oliveira

DOI 10.22533/at.ed.48719050420

CAPÍTULO 21 202

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM DO BRUNIMENTO FLEXÍVEL NA QUALIDADE GEOMÉTRICA DE CILINDROS DE BLOCOS DE COMPRESSORES HERMÉTICOS

Leandro Carvalho Pereira

Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Rosenda Valdés Arencibia

Luciano José Arantes

DOI 10.22533/at.ed.48719050421

CAPÍTULO 22 210

USINAGEM ELETROQUÍMICA SUPERFICIAL EM AMOSTRAS DE FERRO FUNDIDO

Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Leandro Carvalho Pereira

Henara Lilian Costa

DOI 10.22533/at.ed.48719050422

SOBRE O ORGANIZADOR..... 219

O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES DE SOLDAGEM

Heitor Abdias da Silva Pereira

Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa – Paraíba

Marcelo Cavalcanti Rodrigues

Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa – Paraíba

RESUMO: A soldagem é o processo de união de metais mais amplamente utilizado na indústria. Tal popularidade é justificada pela versatilidade, variedade de processos disponíveis, excelente qualidade estrutural de elementos soldados, entre outros fatores. A complexidade da multifísica termoestrutural relacionada à realização de operações de soldagem dificulta o tratamento analítico para a predição do ciclo térmico e do nível de tensões residuais na peça de trabalho, sendo esse último um fator preponderante à ocorrência de trincas de hidrogênio e redução da vida sob fadiga. Dessa forma, a simulação numérica da soldagem através do Método dos Elementos Finitos (MEF) se apresenta como alternativa atrativa à análise da soldagem e seus efeitos nos componentes nos quais ela é realizada. O presente trabalho busca descrever a metodologia básica para a simulação de operações de soldagem pelo MEF, bem como apresentar a aplicação do método na simulação da soldagem em um componente estrutural a partir do software

comercial ANSYS. Os resultados numéricos apresentam boa acurácia em comparação aos resultados experimentais, validando assim o uso do método para a aplicação em questão.

PALAVRAS-CHAVE: soldagem; método dos elementos finitos; tensões residuais;

ABSTRACT: Welding is the most widely used process for joining metals. Such popularity is justified by the versatility, variety of processes available, excellent structural quality of welded elements, among other factors. The complexity of the thermo-structural multi-physics related to the welding operations makes the analytical treatment for the prediction of the thermal cycle and the level of residual stresses in the workpiece difficult, being the later a dominant factor to the occurrence of hydrogen cracks and reduction of life under fatigue. Thus, the numerical simulation of welding through the Finite Element Method (MEF) presents itself as an attractive alternative to welding analysis and its effects on the components in which it is performed. The present work seeks to describe the basic methodology for the simulation of welding operations by the MEF, as well as to present the application of the method in the simulation of welding in a structural component from commercial software ANSYS. The numerical results presented good accuracy in comparison to the experimental results, thus

validating the use of the method for the application in question.

KEYWORDS: welding; finite element method; residual stresses;

1 | INTRODUÇÃO

A soldagem pode ser definida como o “processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão” (Wainer, 1992), e o resultado da aplicação de um processo de soldagem é a solda.

Segundo Masubachi (1980), as principais vantagens que a soldagem oferece em relação a outros processos de união, tais como o uso de rebites ou parafusos, são a alta eficiência da junta, a impermeabilidade a água e ar, a economia de peso, a irrestrrição quanto à espessura e a simplicidade do projeto estrutural com conseqüente redução no tempo de nos custos de fabricação. Por essas e outras razões, a soldagem se firmou na indústria como principal processo de união de materiais, sendo amplamente utilizada na fabricação e recuperação de peças e estruturas.

No entanto, a soldagem também apresenta, além de todas as vantagens já mencionadas, alguns inconvenientes, ou defeitos a ela relacionados, que são dignos de nota. Dentre os quais, pode-se citar porosidades, as trincas a quente e a frio, mordeduras, distorções e as tensões residuais. No caso desse último, as elevadas entradas térmicas envolvidas na união de duas peças metálicas por soldagem a arco elétrico, bem como os ciclos não uniformes de aquecimento e resfriamento causados pelo movimento da tocha durante a operação, induzem, pelo fenômeno da dilatação térmica, deformações na expansão e na contração dos materiais. Essas deformações são associadas a tensões, que, por se estabelecerem durante a operação e permanecerem mesmo após o seu fim, são, portanto, de natureza plástica. Essas tensões são críticas, pois, de acordo com Radaj (1990), a vida por fadiga de um componente pode ser reduzida consideravelmente devido à presença de tensões residuais de tração. Chang et al. (2010) também afirmam que essas mesmas tensões, especialmente nas proximidades do cordão de solda, podem provocar, além da falha por fadiga, fratura frágil e fragilização por corrosão sob tensão. Dessa forma, prever a distribuição dessas tensões residuais torna-se imprescindível à garantia da ótima operação e da integridade estrutural dos componentes soldados. Os métodos para medição das tensões residuais podem ser classificados como destrutivos, semidestruativos e não-destrutivos (Rossini et. al., 2012). Esses métodos, apesar do alto nível de confiabilidade, muitas vezes necessitam de equipamentos complexos, nem sempre ao alcance, ou ainda infligem danos que podem inviabilizar o serviço do componente soldado.

Nesse contexto, as simulações numéricas, em particular pelo MEF, têm se mostrado uma ferramenta versátil e capaz de prever o histórico térmico da peça submetida à soldagem, bem como o estado de tensões residuais no componente.

Goldak *et al.* (1984), ao referenciar os modelos matemáticos mais importantes para a distribuição da entrada térmica durante a soldagem, e ainda propor o modelo duplo-elipsoidal de densidade de potência, mais completo e capaz de representar o gradiente de temperatura na peça, estabeleceu o trabalho fundamental no que diz respeito à modelagem e simulação numérica de fontes de calor em processos de soldagem. Usando alguns desses modelos ou suas simplificações, Deng e Murakawa (2006) avaliaram o campo de temperaturas e de tensões residuais desenvolvidos em uma tubulação de aço SUS 304, abordando importantes aspectos da geometria cilíndrica do problema. Stamenkovic e Vasovic (2009) estudaram a distribuição de tensões residuais na soldagem de duas placas iguais, e Chang *et al.* (2010) investigaram a distribuição de tensões residuais num elemento estrutural tubular, com a realização de simulações para o efeito da superposição com tensões de tração de serviço no componente, ressaltando a criticidade das tensões residuais. Bonnard e Gunnars (2015) analisaram os efeitos das tensões residuais de soldagem no reparo de tubulações, com importantes conclusões a respeito da influência das interrupções da soldagem durante a operação, e Liu *et al.* (2015) realizaram análises das tensões residuais na soldagem autógena a laser, discutindo a versatilidade e capacidade de representação do método, tanto do histórico térmico, quanto da distribuição de tensões, mesmo quando não há o uso de metal de adição.

O presente trabalho busca descrever a metodologia básica para a simulação de operações de soldagem pelo MEF, bem como apresentar a aplicação do método na simulação do processo de soldagem TIG orbital autógena de um tubo de diâmetro reduzido seguindo o desenvolvido experimentalmente por Silva (2007). Os resultados numéricos apresentam boa acurácia em comparação aos resultados experimentais, corroborando assim a capacidade do método para a aplicação em questão.

2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O método dos elementos finitos

A análise por elementos finitos é um método numérico fundamentado na possibilidade de se substituir a aplicação de uma equação que governa algum fenômeno físico num domínio de geometria grande e complexa, pela sua aplicação em subdomínios de menor tamanho e complexidade (Reddy, 2006). Esses subdomínios, em termos dos quais a geometria complexa é simplificada, são chamados elementos – dando assim origem ao nome do método –, e em sua fronteira estão posicionados os nós, responsáveis pela interligação entre os múltiplos elementos que definem o corpo.

Em síntese, segundo Bathe (1982), para a aplicação do método, primeiro realiza-se a simplificação da geometria em um conjunto de subdomínios, ou elementos. Em seguida, as equações que regem o fenômeno são discretizadas, ou seja, transformadas

em um conjunto de equações algébricas, que são resolvidas para cada um dos elementos. O próximo passo é a montagem dos elementos. O compartilhamento dos nós por elementos vizinhos que faz a interligação dos subdomínios permitem que assim se obtenha a resposta do sistema por completo. Quando aplicado à sistemas contínuos, o tratamento dado às equações diferenciais que regem os fenômenos físicos é fundamentado nos métodos da matemática variacional, em particular os métodos de Rayleigh-Ritz e Galerkin (Assan, 2003), que, a partir de uma função interpoladora característica de cada tipo elemento, permite a obtenção da solução para a variável de interesse que se aproxima da real, tão boa quanto for a simplificação do domínio original.

2.2 A multifísica da soldagem

Os processos de soldagem mais comuns envolvem o aquecimento localizado da peça de trabalho a partir de um arco elétrico estabelecido entre uma tocha de soldagem, que está conectada à uma fonte de energia, e a peça de trabalho, promovendo a fusão do metal da peça nas proximidades da região aquecida, e ainda de um metal de adição, presente em alguns processos, que preencherá a junta. Tal tocha se move ao longo da junta enquanto preenche o chanfro com metal fundido. O calor fornecido pela fonte de energia tende a causar dilatação térmica nas regiões aquecidas. Se a peça for aquecida uniformemente, e sem restrições à sua dilatação, ela se expandirá uniformemente, e nenhuma tensão interna será produzida. Todavia, uma vez que isso é muito difícil de ser obtido, a não uniformidade do aquecimento faz com que as regiões sob o efeito de temperaturas mais baixas atuem restringindo a dilatação de regiões vizinhas, que estão a maiores temperaturas. Então, deformações elásticas e plásticas são desenvolvidas na peça soldada, e, como resultado tensões internas, também chamadas de tensões residuais (Masubachi, 1980).

Nota-se então que a indução de tais tensões num componente submetido à soldagem é um fenômeno que envolve mais de uma disciplina de engenharia, sendo portanto caracterizado como sendo um problema de multifísica termomecânica, ou seja, dependente do histórico térmico da peça submetida à operação – portanto, um fenômeno transiente – e da influência deste sobre a peça, através das deformações causadas na dilatação durante o aquecimento não uniforme, e na contração durante o posterior resfriamento.

Problemas de multifísica, dentro do contexto do método dos elementos finitos, podem ser resolvidos de duas maneiras, a depender da natureza do problema: a abordagem sequencial ou a abordagem direta. A primeira abordagem é apropriada para problemas em que a dependência das variáveis é muito mais sensível em um único sentido, como no caso do processo de soldagem, onde o nível de tensões residuais é diretamente dependente do histórico de temperaturas, mas o aspecto térmico praticamente não é influenciado pelo estado de tensões. Já a segunda é adequada

quando a interdependência entre as físicas envolvidas é sensível nos dois sentidos.

2.3 Considerações térmicas

Uma vez que a tocha de soldagem produz um gradiente de temperaturas na peça, o modo de transferência por condução é responsável pela difusão de calor para o seu interior. A equação do calor representa esse aspecto, e sua solução fornece a distribuição de temperaturas “ $T(x,y,z)$ ” na peça de trabalho. Ela está explicitada na Eq. 1, em coordenadas cartesianas.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 (kT) + \dot{q} \quad (1)$$

Nela, “ ρ ” é densidade, “ c ” é o calor específico, “ k ” a condutividade térmica e “ \dot{q} ” é referente à geração volumétrica de calor no interior da peça, e nele será inserido o modelo matemático de fonte de calor usado para representar a ação do arco elétrico na peça, e tal modelo é dependente da potência térmica fornecida pelo arco, que, segundo Masubachi (1980), é o fator de maior importância, e que mais fornece calor ao processo. Goldak et. al. (1984) apresenta os modelos matemáticos mais comuns de fontes de calor. A potência térmica é dada pela Eq. 2, baseada no efeito Joule.

$$\dot{Q} = \eta UI \quad (2)$$

Onde “ η ” é a eficiência do processo, “ U ” é a tensão de soldagem e “ I ” é a corrente de soldagem.

Além da condução para o interior da peça, convecção em relação ao fluxo de ar externo à peça de trabalho, bem como a radiação para a atmosfera circunvizinha, são responsáveis pela dissipação do calor envolvido. A convecção é modelada pela lei do resfriamento de Newton, e a radiação pela lei de Stefan-Boltzmann, conforme as Eqs. (3) e (4), respectivamente.

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

$$\dot{Q} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (4)$$

Onde, para a Eq. 3, “ h ” é o coeficiente convectivo, “ A ” é área exposta, “ T_s ” é a temperatura da superfície e “ T_∞ ” a do fluido externo. Na Eq. 4, “ ε ” é a emissividade da superfície, “ σ ” é a constante de Stefan-Boltzmann, e “ T_{amb} ” representando a temperatura da ambiente vizinho.

2.4 Considerações mecânicas

Conforme já destacado, uma vez que há forte dependência do campo de tensões residuais ao histórico de temperaturas, mas a dependência inversa é negligenciável (Chang et al., 2010), uma análise sequencial é eficiente para a avaliação do fenômeno.

Nessa abordagem, para o caso da soldagem, a análise térmica transiente é realizada, o histórico de temperaturas obtido é então utilizado como carregamento em uma análise estrutural transiente posterior, visando assim, além da obtenção da distribuição de tensões residuais, sua variação com o tempo. Seguindo Chang et. al. (2010), o incremento na deformação “ $d\epsilon_{ij}$ ” é então dividido em três componentes: a deformação elástica “ $d\epsilon_{ij}^e$ ”, computada a partir da lei de Hooke isotrópica; a deformação plástica “ $d\epsilon_{ij}^p$ ”, avaliada de acordo com o modelo de plasticidade adotado; e a parcela referente à ação térmica “ $d\epsilon_{ij}^t$ ”, obtida em função do coeficiente de expansão térmica. A Eq. 5, na forma indicial, representa essa relação.

$$[d\epsilon_{ij}] = [d\epsilon_{ij}^e] + [d\epsilon_{ij}^p] + [d\epsilon_{ij}^t] \quad (5)$$

3 | PROCEDIMENTOS COMPUTACIONAIS

Os procedimentos envolvidos na realização de uma simulação por elementos finitos de uma operação de soldagem, dentro do contexto da abordagem sequencial, podem ser analisados em separado para as simulações térmica-transiente e estrutural-transiente, uma vez que, com exceção da transferência do resultado térmico como carga na simulação estrutural, as duas podem ser realizadas de forma independente. Além disso, apesar das etapas descritas serem comuns a todos os pacotes comerciais capazes de realizar simulações de processos de soldagem, cada um deles tem seu procedimento próprio de execução. No presente trabalho, o problema exemplo, replicando a análise experimental realizada por Silva (2007), foi feito a partir do software ANSYS, e algumas particularidades quanto à execução podem estar presentes na descrição.

No entanto, antes de qualquer coisa, a criação do modelo CAD do componente a ser soldado deve ser realizada. Um detalhe importante é que todo o modelo deve ser incorporado, incluindo o cordão de solda. Em seguida, o modelo deve ser discretizado em malha adequada, buscando o balanço entre o custo computacional e a qualidade do resultado a ser obtido. Um procedimento comum com relação a esse ponto é o uso de uma malha mais refinada nas proximidades do cordão de solda e da zona termicamente afetada, e uma malha mais grosseira nas regiões mais distantes, nas quais um detalhamento tão grande não se faz necessário. O tipo de elemento também deve ser escolhido de acordo com a necessidade do problema, no entanto é procedimento comum optar pelos elementos hexaédricos de alta ordem, para garantir um resultado mais acurado e compatível com o requerido pela análise estrutural-transiente.

Uma vez que modelo CAD e malha estejam adequados, procede-se com a simulação térmica-transiente.

3.1 Simulação Térmica-Transiente

A primeira etapa é obter as propriedades térmicas e físicas do material. A princípio, são necessárias as propriedades térmicas e físicas presentes na equação do calor, ou seja, densidade, calor específico e condutividade térmica. Elas podem ou não ser dependentes da temperatura, levando em conta que, quanto maior o nível de detalhamento, ainda que o custo computacional aumente, mais próximo da representação do fenômeno real se chega. Vale destacar que, ao implementar as propriedades com dependência da temperatura, tem-se então uma análise com aspecto de não-linearidade de material, sendo necessário atentar aos controles de solução para análise não-linear.

Em seguida, é necessário definir o modelo de fonte de calor mais adequado para o seu problema em questão. Goldak et. al. (1984) referenciou os modelos gaussiano de fluxo superficial, o hemisférico e elipsoidal de densidade de potência, ressaltando suas vantagens e desvantagens, e propôs o modelo duplo-elipsoidal de densidade de potência, mais robusto e capaz de superar as limitações dos demais. Uma análise do problema, tanto no que diz respeito à aspectos geométricos, como de características do procedimento utilizado no caso real, indicará o modelo mais adequado, uma vez que um modelo menos robusto, em dadas circunstâncias, pode ser capaz de representar tão bem o fenômeno quanto um modelo mais completo. Todos os modelos de fonte de calor, conforme descrito por Goldak et. al. (1984), dependem de parâmetros geométricos próprios do cordão de solda, bem como dos parâmetros de soldagem, conforme a Eq. (2) antes discutida.

O próximo passo é determinar as condições iniciais e de contorno para a simulação térmica. As condições iniciais dizem respeito à temperatura da peça de trabalho, geralmente igual à ambiente, ou igual a uma temperatura de pré-aquecimento da peça de trabalho. Já as condições de contorno, como tratamento mais comum tem-se a aplicação de convecção com coeficiente convectivo constante, e radiação com emissividade definida, às superfícies expostas da peça de trabalho. Um outro método recorrente é o uso de um coeficiente convectivo combinado “ h_{comb} ” dependente da temperatura, que leva em conta os efeitos de convecção e radiação, e é expresso de acordo com a Eq. 6.

$$h_{comb} = \frac{\varepsilon\sigma(T^4 - T_{amb}^4)}{T - T_{amb}} + h \quad (6)$$

Outro ponto a ser observado é a necessidade de implementar alguma técnica de ativação e desativação de elementos, conhecidas como “*birth and death technique*” na qual os elementos que compõe o cordão de solda podem ser desativados, e reativados no momento da deposição. De acordo com Liu et. al. (2015), procedimentos autógenos não apresentam a necessidade da implementação da técnica, mas processos em que há o uso de metal de adição, e multipasses, para completa caracterização, precisam

levar a deposição do cordão de solda em conta.

Uma vez que os pontos acima estejam observados, pode-se realizar a simulação térmica-transiente para a duração da soldagem, e o tempo de resfriamento até o alcance do equilíbrio térmico à temperatura ambiente. Serão obtidos como resultados, para cada instante de tempo, a distribuição de temperatura em todos os pontos do componente.

3.2 Simulação Estrutural-Transiente

Tal como na análise térmica-transiente, o primeiro passo é determinar as propriedades do material. Para a completa caracterização do problema, são necessários o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, o coeficiente de expansão térmica, a densidade – já obtida para realização da análise térmica-transiente –, e a adoção de um modelo de plasticidade para o material – uma vez que as tensões residuais são de natureza plástica –, com seus respectivos dados necessários. Um modelo bastante utilizado é o bilinear, no qual, além do módulo de elasticidade e da tensão de escoamento, um módulo tangente, correspondente à inclinação de uma reta que define a região plástica do diagrama tensão-deformação do material, deve ser informado. Uma implicação fundamental desse requerimento é a caracterização de uma análise com aspecto de não-linearidade de material, necessitando novamente à atenção aos controles e parâmetros do software para análises não-lineares.

As condições de contorno devem ser também definidas, correspondendo aqui ao modo de fixação do componente a ser soldado, sendo traduzidas para o software em termos de deslocamentos e rotações nos eixos coordenados em certas faces ou arestas do modelo. Além das condições de contorno, seguindo o descrito para a análise térmica-transiente, é necessário avaliar a necessidade de implementar a desativação e ativação de elementos, de acordo com o procedimento real da soldagem.

E por fim, a transferência do histórico térmico obtido na análise térmica-transiente deve ser exportando para a análise estrutura-transiente como carregamento nodal. Dependendo do software, a transferência pode ser feita automaticamente, através da indicação do acoplamento sequencial, ou individualmente, para cada passo de tempo da análise estrutural-transiente, através da leitura do arquivo de resultados da análise prévia.

Ao término da análise, ter-se-á o estado de tensões em todos os pontos do componente, para cada instante de tempo. No instante final da simulação, que corresponde ao equilíbrio térmico na análise térmica-transiente, poderá ser observado o estado de tensões residuais deixado no componente.

3.3 Estudo de Caso

Silva (2007) realizou a análise experimental das tensões residuais de soldagem em um tubo de diâmetro comercial de 2 in, com os seguintes dados geométricos:

diâmetro externo de 60,3 mm, diâmetro interno de 52,5 mm, espessura de 3,9 mm, comprimento de 410,4 mm, distância entre os tubos de 4 mm, e chanfro com ângulo de 35° em relação à linha vertical. A Fig. 1 traz o modelo CAD, já com a malha, composta por 19240 elementos tetraédricos com 37914 nós, aplicada. Há o uso de uma opção de refinamento da malha próxima ao cordão de solda, que reduz o tamanho dos elementos dividindo-os gradualmente na ordem de $2^n 2^n$, com n sendo o grau de refinamento aplicado. No caso em questão, foi aplicado grau 2.

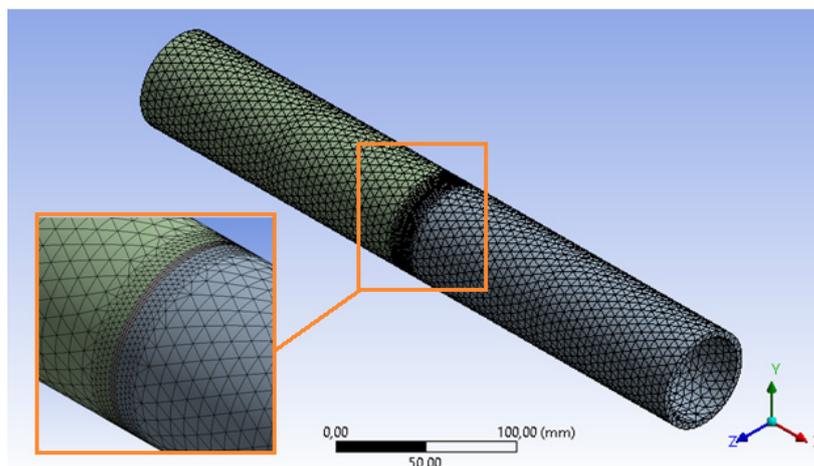


Figura 1. Modelo Cad com Malha Aplicada.

Fonte: Autor.

O material utilizado por Silva (2007) foi o aço ASTM A106 GR. B, e as propriedades físicas e térmicas estão mostradas na Tab. 1. O modelo de plasticidade adotado para análise estrutural-transiente foi o bilinear, com o diagrama tensão deformação sendo mostrado na Fig. 2.

ASTM 106 Gr. B	Propriedades	
Densidade (Kg/m ³)	7850	
Condutividade térmica (W/m K)	51	
Calor específico (J/kg K)	461	
Coeficiente de expansão térmica (10E-5 1/°C)	100 °C	1,25
	200 °C	1,3
	300 °C	1,36
	400 °C	1,41
	450 °C	1,43

Tabela 1. Propriedades Termofísicas do Aço Astm A106 Gr. B.

Fonte: Astm, 2015.

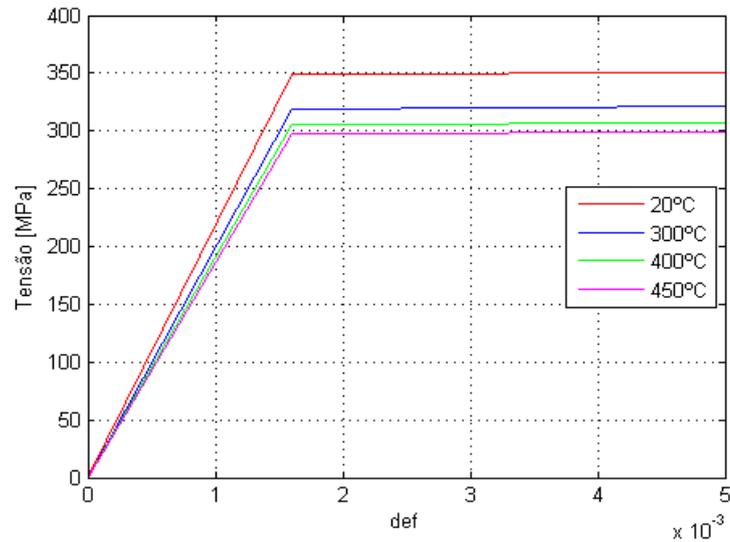


Figura 2. Diagrama Tensão Deformação do Aço Astm A106 Gr. B.

Fonte: Astm, 2015.

Os parâmetros de soldagem utilizados por Silva (2007) estão mostrados na Tab. 2, e as condições de contorno adotadas para análise térmica-transiente estão na Tab. 3.

Velocidade (mm/s)	Tensão (V)	Corrente (A)	Raio de incidência (mm)	Eficiência
1,72	13,2	130	5	0,7

Tabela 2. Parâmetros de Soldagem.

Fonte: Silva (2007).

Tempo (s)	Temperatura inicial (°C)	Coefficiente convectivo (W/mm ² K)	Emissividade
600	22	0,0005	0,7

Tabela 3. Condições Iniciais e de Contorno para a Simulação Térmica.

Fonte: Silva (2007).

O modelo de fonte de calor adotado, seguindo o descrito por Goldak et. al. (1984), foi o hemisférico de densidade de potência, dado pela Eq. 7.

$$\dot{q}(x, y, z, t) = C_1 e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}{c_2^2} \right]} \quad (7)$$

Nessa equação, “ (x_0, y_0, z_0) ” define a posição instantânea do centro da distribuição – ponto onde a fonte de calor está atuando no dado instante – e que dista “ $v \cdot t$ ” do ponto de início, com “ v ”, que também é dado de entrada, correspondendo à velocidade de soldagem. Como “ t ” varia ao longo da análise, o ponto de centro

também varia, sempre dentro da aresta da junta. Além disso, " C_1 " é a intensidade do fluxo térmico pela ação do arco, que é função da potência térmica fornecida pelo arco, conforme Eq. 2, e " C_2 " o raio de incidência sobre a peça.

Para a simulação estrutural, o tubo foi engastado nas duas extremidades com condições de contorno, com a simulação sendo realizada para o mesmo período de tempo da simulação térmica. O histórico de temperaturas é automaticamente transferido como carga na simulação estrutural dentro do ANSYS. As tensões residuais longitudinais foram medidas nas posições indicadas na Fig. 3, tanto por Silva (2007), quando no modelo usado nas simulações, para a superfície externa dos tubos, nas posições de início e término da soldagem circunferencial.

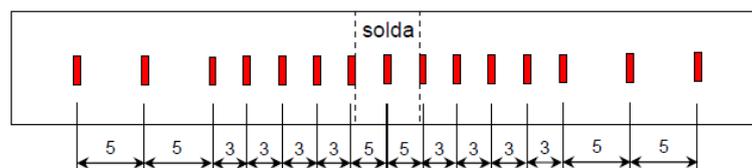


Figura 3. Pontos Para Medição das Tensões Residuais.

Fonte: Silva (2007).

4 | RESULTADOS

A Fig. 4 mostra a evolução das temperaturas máxima e mínima observadas em toda a peça, para todos os instantes de tempo avaliados. Pode-se observar que a temperatura máxima alcançou valores da ordem de 1550°C , e a mínima permaneceu em torno na temperatura ambiente de 22°C . Percebe-se que, após o término da operação, por volta dos 100 segundos, a temperatura máxima passa a apresentar queda, até que o equilíbrio térmico seja completamente atingido ao fim da análise térmica transiente.

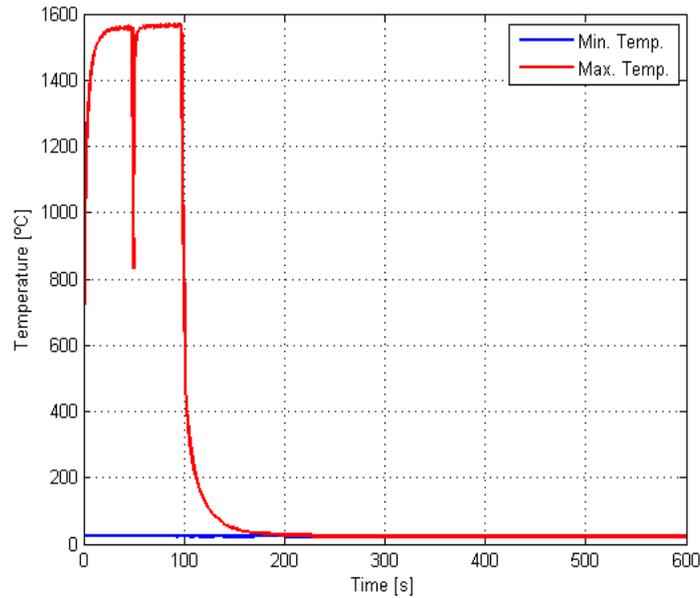


Figura 4. Temperatura Mínima (Azul) e Máxima (Vermelho) Observadas na Peça Durante a Simulação Térmica.

Fonte: Autor.

Na Fig. 5 está representada a distribuição de tensões residuais longitudinais, críticas à ocorrência de trincas e redução da vida em fadiga, ficando claro a presença das tensões, majoritariamente compressivas, nas zonas próximas ao cordão de solda. Já a Fig. 5 traz a comparação entre os resultados experimentais de Silva (2007) e os obtidos pelo método dos elementos finitos, ambas medidas nas posições ilustradas na Fig. 4, e a Fig. 7 mostra o comparativo a partir da curva média e do desvio padrão. É possível observar que, além dos níveis mais elevadas de tensão se posicionarem próximo ao cordão de solda, a forma característica da curva foi bem capturada pelo método numérico.

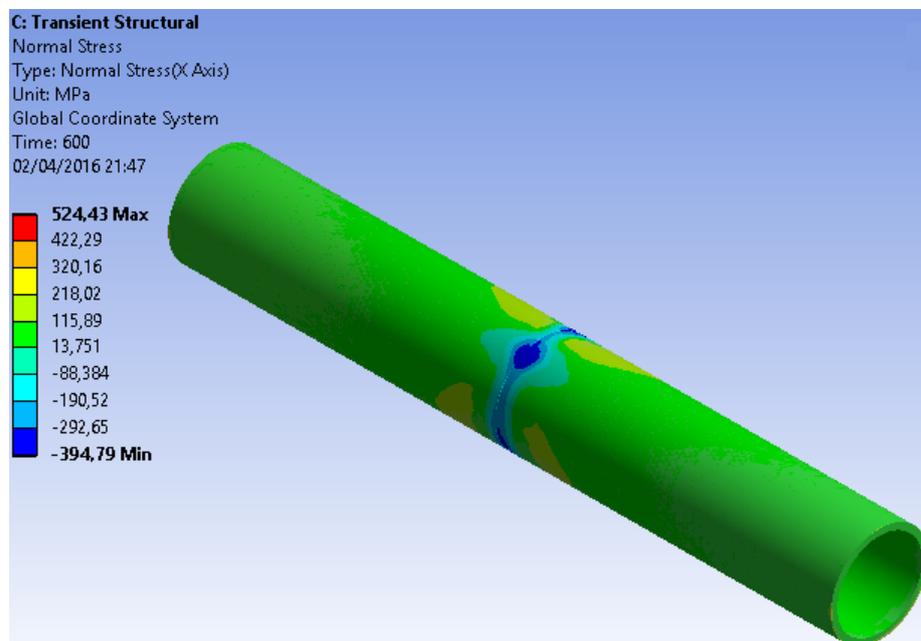


Figura 5. Distribuição de Tensões Residuais Longitudinais.

Fonte: Autor.

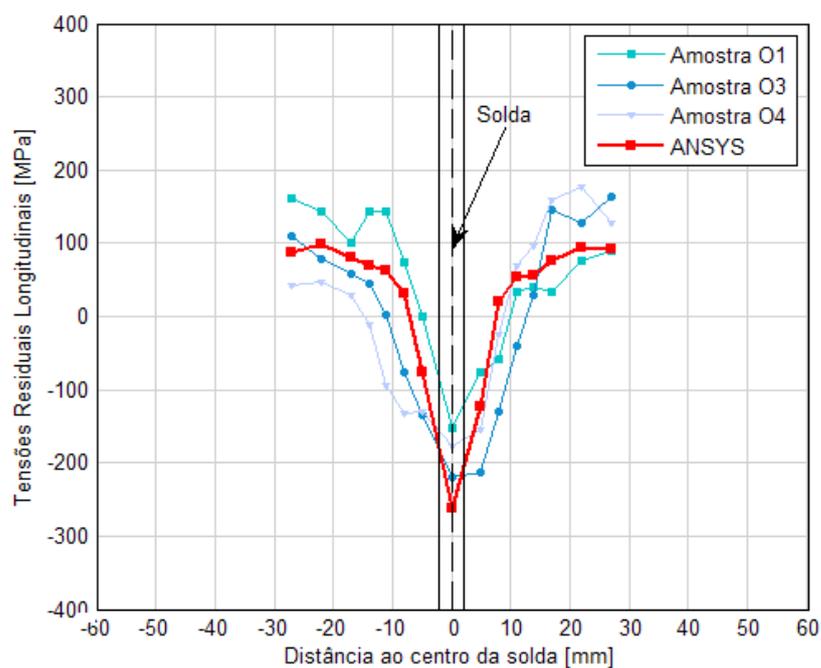


Figura 6. Comparativo Entre os Resultados Numéricos e Experimentais.

Fonte: Autor.

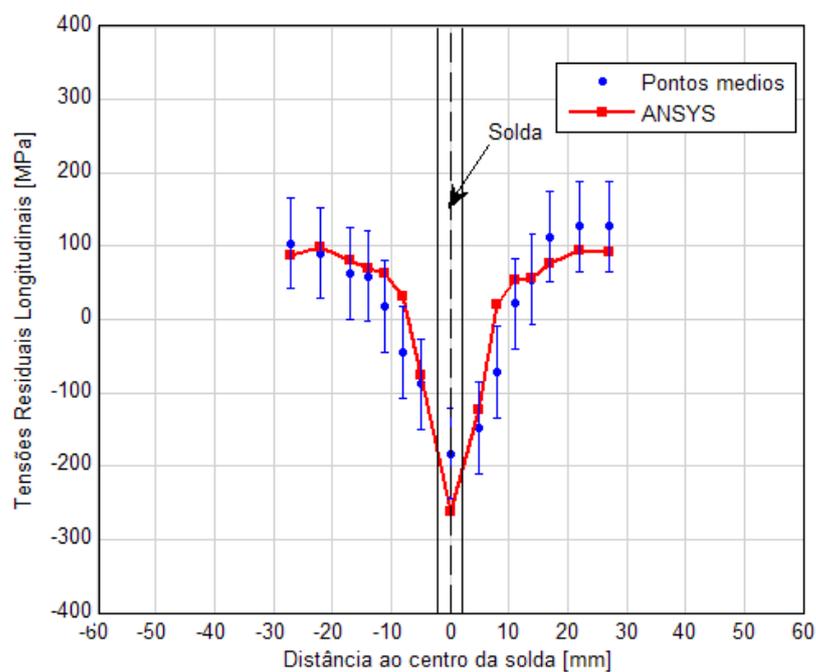


Figura 7. Comparativo Entre os Resultados Numéricos e Experimentais Utilizando a Curva Média.

Fonte: Autor.

5 | CONCLUSÕES

Conclui-se que a solução proposta pelo modelo numérico se comportou de modo bastante similar aos resultados experimentais propostos por Silva (2007). O comportamento das tensões externas distantes da ZTA é coerente, e tende a se acomodar com o tempo, porém as tensões mais próximas a ZTA apresentam valores que podem comprometer o bom funcionamento do equipamento devido à presença de tensões residuais.

Pode-se observar que a análise numérica, com as considerações térmicas e mecânicas bem escolhidas, pode representar bem o comportamento real do equipamento, no caso da avaliação dos efeitos das operações de soldagem. Ela é capaz de prever as distribuições de tensões residuais em equipamentos submetidos a processos de soldagem, com a vantagem de se obter comportamento em qualquer posição escolhida, gerando economia e agilidade em projetos e nas montagens de estratégias de manutenção, buscando a prevenção de falhas em equipamentos, principalmente no caso de serviço contínuo e ininterrupto, ou que possuam acesso dificultado.

6 | AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao PPGEM-UFPB, à ANP/CAPES pelo financiamento do trabalho, e ao LABII-UFPB, pelo suporte.

REFERÊNCIAS

Assan, A. E. Método dos Elementos Finitos: Primeiros Passos. Editora da Unicamp, 2ed., 2003.

ASTM A106 / A106M-15, Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

Bathe, K. J. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.

Bonnaud, E., Gunnars, J., Three dimensional weld residual stresses simulations of start/stop and weld repair effects. Procedia Engineering, v. 130, pp. 531-543, 2015.

Chang, K., Le, C., Park, K., You, Y., Joo, B., Jang, G. Analysis of Residual Stress in Stainless Steel Pipe Weld Subject to Mechanical Axial Tension Loading. International Journal of Steel Structures, no 4, pp. 411-418, 2010.

Deng, D., Murakawa, H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements. Computational Materials Science, 37, pp. 269-277, 2006.

Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M. A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical Transactions B, v. 15B, pp. 299-305, 1984.

Liu, W., Ma, J., Kong, F., Liu, S., Kovacevic, R. Numerical Modeling and Experimental Verification of Residual Stress in Autogenous Laser Welding of High-Strength Steel. *Lasers Manuf. Mater. Process.*, v. 2, pp. 24-42, 2015.

Masubachi, K. *Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion and their Consequences*. 1st ed. Massachusetts: Pergamon Press, 1980.

Radaj, D. *Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures*. 1st ed. Abington Publishing: Cambridge UK, 1990.

Reddy, J. *An Introduction to the Finite Element Method*. 3rd Ed. McGraw-Hill Book Co., 2006.

Rossini, N. S., Dassisti, M., Olabi, A. Methods of measuring residual stresses in componentes. *Materials and Design*, 35, 572-588, 2012.

Silva, C. *Avaliação das tensões residuais de soldagem em tubulações de pequeno diâmetro usadas em refinarias de petróleo*. 2007. 194 f. Dissertação (Mestrado em engenharia e ciência dos materiais) - Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2007.

Stamenkovic, D., Varsovic, I. Finite Element Analysis of Residual Stress in Butt Welding Two Similar plates. *Scientific Technical Review*, Vol 59, No.1, 13 mar. 2009.

Wainer, E., 1992, "Soldagem: Processos e Metalurgia", 2ª Edição, Editora Edgard Blücher, São Paulo.

SOBRE O ORGANIZADOR

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

Ricardo Vinicius Bubna Biscaia - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia de Produção pela UTFPR. Trabalha com os temas: análise microestrutural e de microdureza de ferramentas de usinagem, modelo de referência e processo de desenvolvimento de produto e gestão da manutenção.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-248-7

