



# As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3

---

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a  
Economia e o Meio Ambiente 3

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Natália Sandrini  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

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

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
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  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

#### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.ª Dr.ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-432-0 DOI 10.22533/at.ed.320192506  1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série.  CDD 658.5
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio	
Maria do Carmo de Andrade Nono	
José Vitor Cândido de Souza	
Sergio Luiz Mineiro	
Daniel Alessandro Nono	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925061</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos	
Daniel Araújo Farias de Melo	
Marinésio Pinheiro de Lima	
Tiago de Freitas Viana	
Igor Fernandes Gomes	
Leonardo José do Nascimento Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925062</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>26</b>
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira	
Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925063</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>42</b>
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo	
Aline Castilho Rodrigues	
Andres Cuña	
Nestor Tancredi	
Eduardo Mendez	
Heide Heloise Bernardi	
Mauricio Ribeiro Baldan	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925064</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>55</b>
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado	
Antônio Viana da Fonseca	
Eduardo Fortunato	
Daniela Raquel Ferreira Coelho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925065</b>	

<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>71</b>
CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDADA	
Ingrid Ariani Belineli Barbosa	
Heide Heloise Bernardi	
William Marcos Muniz Menezes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925066</b>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>80</b>
ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Luís Henrique Pires da Silva	
Alex Sander Chaves da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925067</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>92</b>
ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA	
Eduardo Pires Bonhin	
Sarah David Müzel	
Marcel Yuzo Kondo	
Lúcia de Almeida Ribeiro	
José Vitor Candido de Souza	
Marcos Valério Ribeiro	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925068</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>100</b>
CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117	
Leonardo de Souza Coutinho	
Alexandre Alvarenga Palmeira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925069</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>111</b>
MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS	
Filipi José Arantes Lemos	
João Mario Mendes de Freitas	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250610</b>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>127</b>
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	
Jamile Maria Araujo Tavares	
Rejane Martins Fernandes Canha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250611</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>142</b>
ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM	
Eduardo Dal Piva Schuch	
Magaiver Gabriel Lamp	
Conrado Mendes Morais	
Ângela Beatrice Dewes Moura	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250612</b>	

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>153</b>
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250613</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>156</b>
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250614</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>168</b>
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250615</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>183</b>
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250616</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>198</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNEO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250617</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>207</b>
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250618</b>	

<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>215</b>
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO	
Rosberguer de Almeida Camargo	
Mauren Costa da Silva	
Rafael Beltrame	
Darci Alberto Gatto	
Antônio Carlos da Silva Ramos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250619</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>223</b>
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL	
Giovanni Polette Dalla Libera	
Victor Moreira Leão	
Vitor Augusto de Sousa	
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza	
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira	
Marcelo Eduardo de Oliveira	
Adriano Rogério Bruno Tech	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250620</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>230</b>
CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	
Lenon Diniz Seixas	
Diego Solak Castanho	
Hugo Valadares Siqueira	
Fernanda Cristina Corrêa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250621</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>243</b>
CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC	
Luiz Otávio Limurci dos Santos	
Luiz Antonio Maccari Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250622</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>261</b>
PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6	
Marcos José de Moraes Filho	
Luciano Coutinho Gomes	
Darizon Alves de Andrade	
Josemar Alves dos Santos Junior	
Wanberton Gabriel de Souza	
Cássio Alves de Oliveira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250623</b>	

<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>275</b>
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS	
Pedro Henrique Aquino Barra Arnaldo José Pereira Rosentino Junior Antônio Carlos Delaiba	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250624</b>	
<b>CAPÍTULO 25</b> .....	<b>287</b>
PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA	
Vitor Hörbe Pereira Da Costa Antônio Flavio Licarião Nogueira Leonardo José Amador Salas Maldonado	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250625</b>	
<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>294</b>
SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS	
Guilherme Brasil Pintarelli Afrânio de Castro Antonio Jr. Raul Guedert Sandra Cossul Daniela Ota Hisayasu Suzuki	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250626</b>	
<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>307</b>
SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA	
Giovani Formaggio Mateus Ricardo Barroso Leite	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250627</b>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>322</b>
SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4	
Jobson De Araújo Nascimento José Moraes Gurgel Neto Alexsandro Aleixo Pereira da Silva Regina Maria de Lima Neta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250628</b>	
<b>CAPÍTULO 29</b> .....	<b>333</b>
ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO	
Rideci Farias Tiago Matias Lino Haroldo da Silva Paranhos Itamar de Souza Bezerra Ranieri Araújo Farias Dias Alexsandra Maiberg Hausser	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250629</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>346</b>

## CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA

### **Ingrid Ariani Belineli Barbosa**

Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Prof. Jessen Vida

São José dos Campos – São Paulo

### **Heide Heloise Bernardi**

Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Prof. Jessen Vida

São José dos Campos – São Paulo

### **William Marcos Muniz Menezes**

Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Prof. Jessen Vida

São José dos Campos – São Paulo

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi determinar a vida em fadiga de materiais na forma de fios sob esforços de flexão rotativa e também identificar parâmetros de carregamento mecânico e deformação associados às características da ruptura gerada pela fadiga, a fim de se estabelecer procedimentos para prevenção dessas falhas. Utilizou-se como material de teste um arame de solda da classe AWSA5.18 com diâmetro de 0,80 mm. Os corpos de prova, na forma de fio, foram submetidos à rotação média de 611 rpm com um raio de flexão de 80 mm. Os resultados mostram que o arame de solda suporta em torno de 10.000 ciclos até a fratura, e as análises fractográficas indicaram uma fratura combinada de falha por fadiga e fratura dúctil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fadiga, Flexão rotativa, Arame de solda.

**ABSTRACT:** The objective of this work was to determine the fatigue life of wire materials by rotary bending and to identify parameters of mechanical loading and deformation associated with the characteristics of the rupture generated by fatigue to prevent failures. An AWS A5.18 welding wire with diameter 0.80 mm was used as the specimen. The welding wire specimens were subjected to an average rotation of 611 rpm with a bending radius of 80 mm. The results show that the welding wire supports around 10,000 cycles until its fracture, and SEM image analysis indicates a combined fracture of failure and ductile fractures.

**KEYWORDS:** Fatigue, Rotating beam, Welding wire.

### 1 | INTRODUÇÃO

O estudo do fenômeno da fratura do material por esforços mecânicos cíclicos apresenta especial relevância na flexão rotativa de fios, dado aos processos de fabricação e utilização dos fios metálicos, que invariavelmente impõem ao arame a movimentação entre polias ou mesmo seu deslocamento por sinuosas guias de máquinas.

O arame de solda classe AWS A5.18 estudado neste trabalho foi produzido pela siderúrgica Gerdau, sendo indicado para processos industriais em soldagens semiautomáticas, mecânicas e robotizadas. Sua versatilidade permite o uso em diversas aplicações como em fabricação de carrocerias automotivas, caldeirarias, e em construções mecânicas (GERDAU, 2017). O arame de solda AWS A5.18 é utilizado em soldagem MIG (Metal Inert Gas), e durante sua utilização em soldagem o fio não sofre esforços mecânicos de forma considerável. No entanto, a necessidade de conhecer as características mecânicas deste tipo de material é importante para o controle do processo de conformação dos fios de solda.

A falha por fadiga de um material metálico deve-se ao carregamento mecânico cíclico, capaz de gerar danos progressivos e localizados. A tensão aplicada ao material no processo de fadiga é inferior ao limite de escoamento. Muito embora a fadiga possa ser estudada sob condições de esforços solicitantes puros, neste trabalho utilizaram-se os ensaios de flexão rotativa para avaliar a resistência do material à fadiga (ASKELAND & WRIGHT, 2014). Dessa forma, a vida em fadiga é determinada pelo número total de ciclos que o material consegue resistir até a sua ruptura e/ou falha (DIETER, 1981).

Materiais submetidos à fadiga mecânica apresentam uma fratura característica, cuja morfologia pode apresentar: (a) marcas de praia que são formadas por cada parada da máquina ou por mudança de carga; (b) estrias que são formadas por cada ciclo de carga aplicado e (c) dimples (microvoids) que iniciam a formação das trincas (OLSON, SIEWERT, LIU, & EDWARDS, 1993), (ESAB, 2016).

Baseado nisso, o objetivo deste trabalho foi avaliar mecanicamente um arame de solda por meio de ensaio de fadiga por flexão rotativa, e posteriormente foi realizada a fractografia do material por microscopia eletrônica de varredura.

## 2 | EXPERIMENTAL

### Material

Neste trabalho foi estudado um arame para solda classe AWS A5.18 tipo ER70S-6 com limite de escoamento da ordem de 400 MPa e diâmetro nominal de 0,80 mm (GERDAU, 2017).

O fio de arame de solda estudado trata-se de um aço de baixo carbono (inferior a 0,25% p. carbono) submetido à normalização, trefilação, e tratamento de galvanização eletrolítica para cobreamento.

De acordo com a Eq. 1 do Instituto Internacional de Soldagem (International Institute of Welding (IIW)) (OLSON, SIEWERT, LIU, & EDWARDS, 1993), o carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) de um arame de solda classe AWS A5.18 tipo ER70S-6 corresponde à 0,567. O  $C_{eq}$  (% p.<sub>max</sub>) foi calculado usando as informações da composição química do material apresenta na Tabela 1.

Elementos (p. %)	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
%Min	0,06	0,8	1,4	-	-	-	-	-	-	-
%Máx	0,15	1,15	1,85	0,035	0,025	0,5	0,15	0,15	0,15	0,03

Tabela 1 Composição química do arame AWS A5.18 (GERDAU, 2017).

O  $C_{eq}$  é associado à soldabilidade, quanto menor o carbono equivalente, menor a probabilidade de obter um segundo estágio de precipitação (carboneto) ou uma microestrutura martensítica e conseqüentemente, uma melhor soldabilidade do aço ( $0,40 \leq C_{eq} \leq 0,60$  soldabilidade média). Na soldabilidade, é importante conhecer a composição química do material base para selecionar a temperatura correta de pré-aquecimento (ESAB, 2016). O carbono equivalente e a liga do material são dois fatores importantes e necessários para determinar a temperatura de pré-aquecimento. Quanto maior for o número do carbono equivalente do material, mais alta será a temperatura para o pré-aquecimento (FORTES & ARAÚJO, 2005).

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$

### Ensaio de fadiga por flexão rotativa

Os ensaios de fadiga por flexão rotativa foram realizados na máquina modelo ROTATFLEX 180 desenvolvida por Menezes (WMM, 2013), (MENEZES, MATHEUS & OTUBO, 2014). O comprimento das amostras foi de  $394 \pm 7$  mm, suficientes para a fixação no mandril rotativo da máquina e para a obtenção de uma curva de semicircunferência.

Todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de fadiga por flexão rotativa utilizando-se um raio de curvatura em flexão de 80 mm; para tal flexão obteve-se uma deformação teórica de 0,5% ( $\epsilon_a$ ), o que significa deformação máxima em tração ou compressão na superfície mais externa do fio flexionado. A velocidade de rotação em torno de 611 rpm teve pequena variação, apresentando um desvio padrão de 6,2 rpm.

Todos os corpos de prova foram ensaiados em temperatura ambiente até a sua ruptura. A Figura 1 apresenta o desenho esquemático da máquina utilizada no teste.

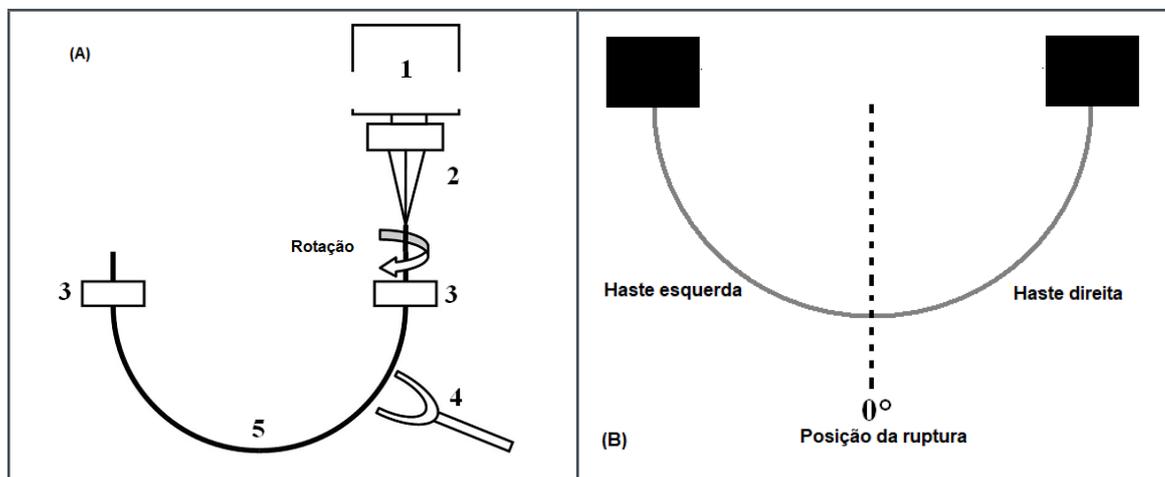


Figura 1 Desenho esquemático: (A) Máquina ROTATFLEX 180 indicando (1) o motor, (2) o mandril para fixar a amostra, (3) os mancais de suporte da amostra, (4) o sensor de ruptura da amostra, e (5) a amostra flexionada (WMM, 2013), (B) os parâmetros mecânicos do teste.

## Fractografia

As análises fractográficas foram realizadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN modelo VEGA3. A tensão de aceleração utilizada foi de 25kV. As imagens foram geradas no modo de elétrons secundários (SE).

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Material

A vida em fadiga por flexão rotativa de um material na forma de fio é determinada pelo número de ciclos de esforço, sob certas condições como velocidade média de rotação do fio ( $\omega$ ), diâmetro do fio ( $d$ ), raio de flexão do fio ( $R$ ) e sua deformação ( $\epsilon$ ). Quanto à deformação do fio, dada à condição de flexão rotativa cíclica foi considerada  $\epsilon_{ac}$  como máxima deformação em compressão, e  $\epsilon_{at}$  como máxima deformação em tração. Para este trabalho considerou-se também que os efeitos da fadiga e do encruamento foram os mesmos para deformação em tração e em compressão dada a natureza similar desses fenômenos em pequenas deformações. Assim denominou-se tanto  $\epsilon_{ac}$  e  $\epsilon_{at}$  como simplesmente  $\epsilon_a$ .

Em relação à deformação ( $\epsilon_a$ ) esta foi calculada de acordo com a Eq. 2, considerando-se a superfície neutra no centro do fio, longitudinalmente. Para o cálculo da deformação  $\epsilon_a$  do arame de solda considerou-se seu diâmetro de 0,80 mm e o raio de flexão de 80 mm, obtendo-se como resultado  $\epsilon_a = 0,50\%$ .

$$\varepsilon_a = \frac{d}{2R} \times 100\% = \frac{0,80}{2 \times 80} \times 100\% = 0,50\% \quad (2)$$

Para determinação da deformação máxima na condição elástica ( $\varepsilon_e$ ), de acordo com a Eq. 3, consideraram-se os seguintes parâmetros do material: limite de escoamento (LE) de 400 MPa e módulo de elasticidade (E) de 210 GPa. Obteve-se como resultado final  $\varepsilon_e = 0,19\%$ .

$$\varepsilon_e = \frac{LE}{E} = \frac{400}{210000} = 0,0019 \quad (3)$$

A deformação é diretamente proporcional ao diâmetro do fio, como pode ser verificado na Eq. 3; assim, infere-se que a seção circular no centro do fio, relativa a 38% de seu diâmetro, esteve submetida a ciclos de deformação puramente elástica e consequentemente ciclos de fadiga, ao passo que a seção transversal que corresponde à uma coroa de círculo mais externa, submetida à uma deformação superior a 0,19% sofreu deformação com ciclos de encruamento. Ou seja, para uma seção transversal do fio, durante o ensaio de fadiga por flexão rotativa, a distribuição da deformação do centro até a superfície do fio ocorreu como apresentado na Figura 2, e pode ser descrita como: (a) no centro do fio a deformação devido à flexão foi desprezível ou mesmo nula, (b) do centro do fio até 38% de seu diâmetro ocorreu ciclagem sob deformação elástica e, portanto em fadiga e (c) a região entre 38% (0,38 d) do diâmetro do fio até sua superfície sofreu deformação elasto-plástica e consequentemente encruamento do material.

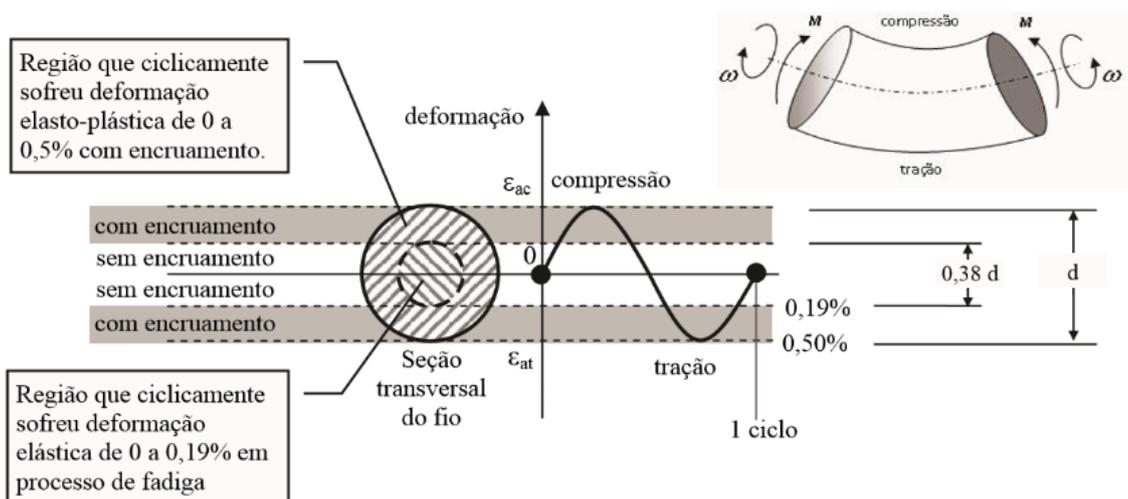


Figura 2 Deformação do fio segundo sua seção transversal.

Para o arame estudado neste trabalho, foi possível calcular (Eq. 4) o diâmetro

da região que sofreu deformação elástica, considerando-se o raio de curvatura (R) de 80 mm e deformação máxima em condição elástica ( $\epsilon_e$ ) de 0,0019 (valor obtido na Eq. 3). Obteve-se um diâmetro (d) de 0,304 mm, representando a região que sofreu deformação elástica.

$$\epsilon_e = \frac{d}{2R} \rightarrow 0,0019 = \frac{d}{2 \times 80} \rightarrow d = 0,304 \text{ mm} \quad (4)$$

### Fadiga por flexão rotativa

A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de fadiga por flexão rotativa para os CDP's de arame de solda. Os 4 CDP's estudados suportaram em média  $10,4 \times 10^3$  ciclos até a sua ruptura com uma velocidade média de rotação de 611 rpm, por um período médio de 17 minutos.

Variáveis	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Número total de ciclos (Nf)	9599	10747	10177	10903
Tempo até ruptura (min)	15	17	17	18
Velocidade de rotação (rpm)	615	618	606	606
Comprimento da haste direita após ruptura (mm)	177	195	133	183
Posição da ruptura	3°	3°	2°	3°

Tabela 2 Resultados do ensaio de fadiga por flexão rotativa para os CDP's de arame de solda

### Fractografia

Com base nas análises fractográficas e nos cálculos obtidos, observou-se uma superfície de fratura combinada: fratura por fadiga e fratura dúctil. Nas bordas da superfície do fio ( $\epsilon_a = 0,5\%$ ), durante o processo de fadiga, esta região sofre deformação plástica e encruamento, resultando em locais propícios para o surgimento de trincas. Figura 3a mostra a propagação das trincas, e a área delimitada pelo círculo branco corresponde à região que sofreu deformação elástica (d= 0,304 mm). A propagação das trincas ocorre em direção ao centro do fio na região de deformação elástica ( $\epsilon_a = 0$ ).

A propagação das trincas que iniciam na superfície de fratura do fio (Figura 3b) ocorre no sentido da máxima amplitude de deformação (superfície cilíndrica) para mínima amplitude (zero) no centro do fio, que corresponde à sua linha neutra em flexão rotativa (WMM, 2013).

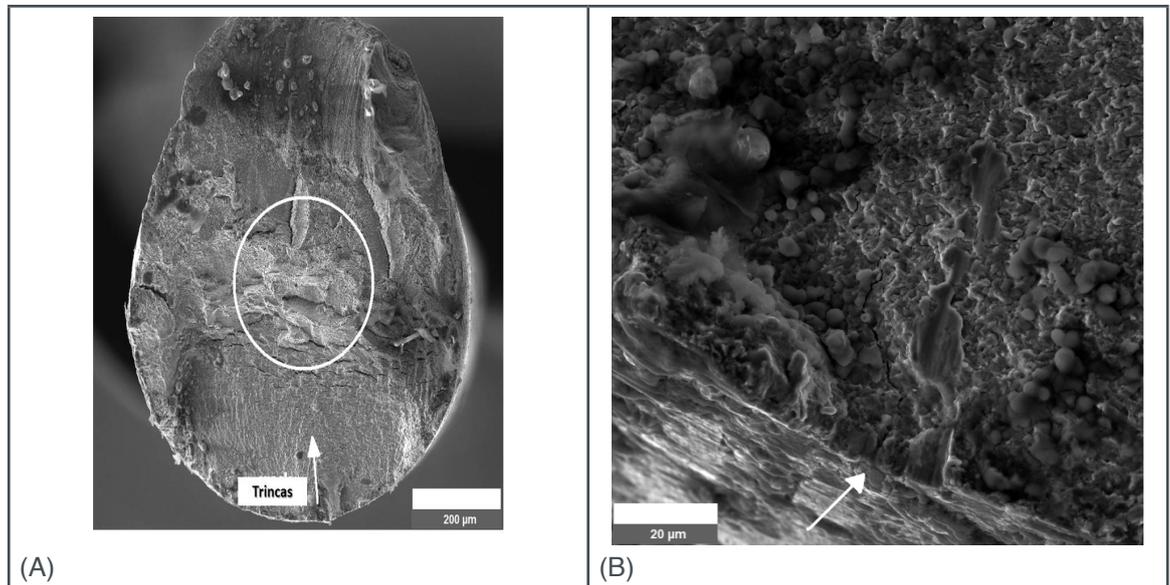


Figura 3 Fio e superfície da fratura mostrando (A) nucleação e propagação de trincas, e (B) vista detalhada do início das trincas (SEM-SE).

Com a carga cíclica, as trincas começarão a se formar na região de maior concentração de tensão após um número crítico de ciclos. As trincas se propagarão e, após certa distância, a seção transversal não poderá mais suportar as cargas e ocorrerá a ruptura final. Em geral, as falhas por fadiga ocorrem da seguinte forma: (A) deformação plástica cíclica antes do início das trincas; (B) início e propagação de trincas, e (C) ruptura final (MILLS, 1987).

A Figura 4 mostra que a fratura combinada resultou em características contrastantes entre a borda da superfície (origem da fratura) e o centro do fio (fratura final). Na superfície do fio, onde ocorre o encruamento do material, ocasionou uma fratura com características do tipo dúctil (região A da Figura 4a). A superfície da fratura junto à origem da trinca tende a ser lisa (Figura. 4b) (DIETER, 1981). Na borda pode-se dizer que a morfologia da fratura é relativa à completa fadiga, enquanto que no centro é relativa à fratura sem fadiga (fratura dúctil). A fratura dúctil ocorre praticamente de forma instantânea quando a tensão mínima para ruptura é atingida em função da redução da área da seção (regiões B da Figura 4a).

Na região correspondente a fratura dúctil, pode ser observada uma superfície rugosa, fibrosa e a presença de dimples, que são características de fratura dúctil (Figura 4b). Dimples são resultantes do micro-alongamento dos grãos até o seu rompimento. Desta forma, a fratura é precedida por um acúmulo de energia em forma de deformação plástica, ou seja, a presença de dimples indica que ocorreu fratura dúctil no material.

O tipo de carga que o material sofreu durante a sua fratura determina o tipo de dimples produzidas, e a presença de estrias indica o sentido e direção de propagação das trincas. Dimples equiaxial são formados sob condições de deformação plástica uniforme na direção da tensão de tração aplicada, tipicamente produzido sob condições de sobrecarga de tração. Por outro lado, dimples alongados resultam de condições

de deformação plástica não uniforme, como flexão. Estes dimples são alongados na direção da propagação das trincas e revelam a origem da fratura. Figuras 4c e 4d mostram dimples equiaxial e alongados, respectivamente.

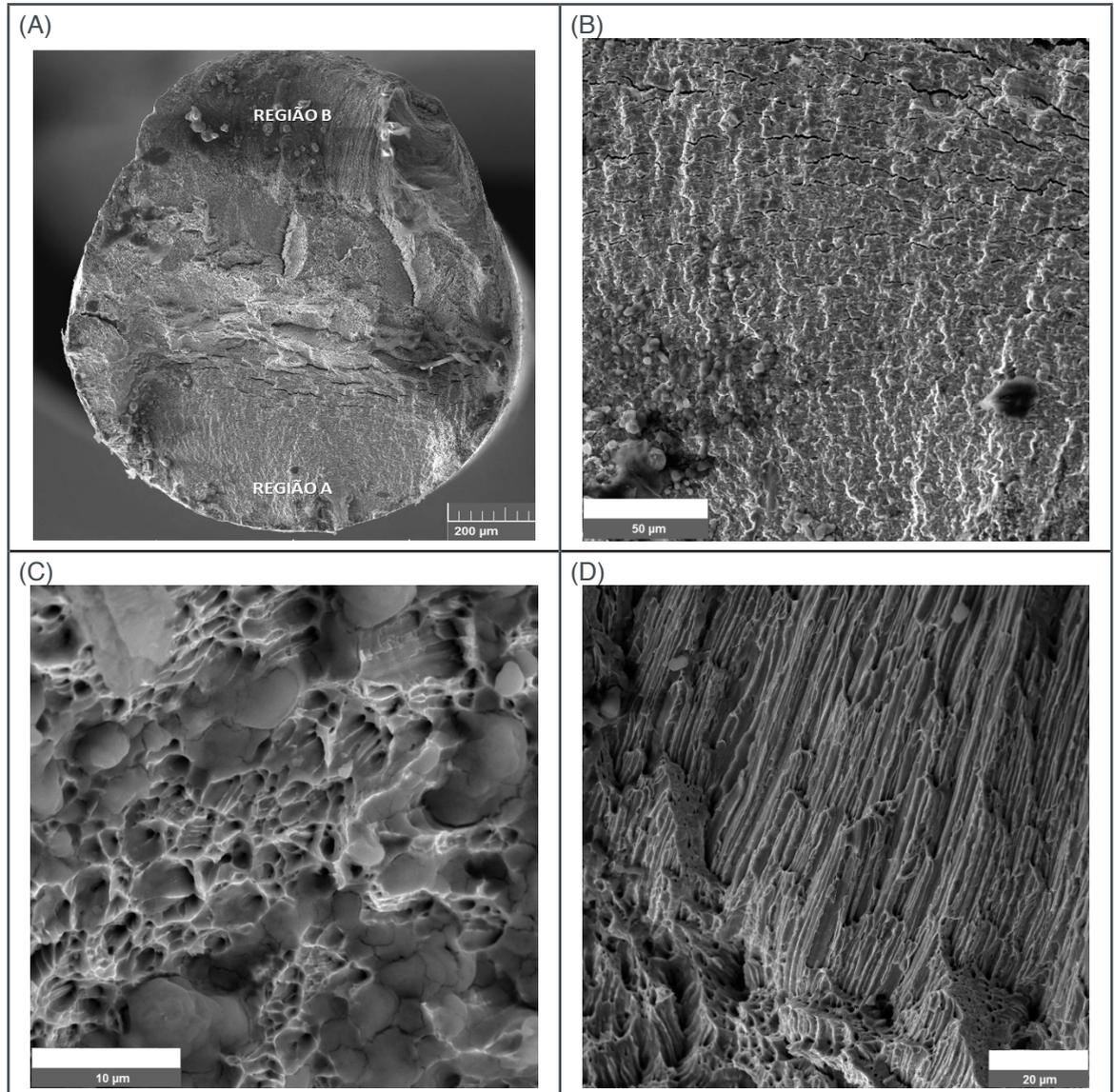


Figura 4 Fractografia do fio de arame de solda mostrando: (A) Macrografia da superfície da fratura; (B) Vista detalhada da região A; (C) A presença de dimples equiaxial, e (D) a presença de dimples alongados (SEM-SE).

#### 4 | CONCLUSÃO

Após as análises dos testes de fadiga por flexão rotativa nos CDP's de arame de solda AWS A5.18 tipo ER705-6, conclui-se que as características da falha é ocasionada pela combinação de fratura por fadiga e fratura dúctil. No entanto, em função do encruamento que ocorre na superfície do material, a fratura possui um aspecto de fratura frágil na borda do fio. Embora tenha aspecto de fratura frágil, é uma fratura dúctil com um desenvolvimento progressivo gerado pelo encruamento na direção radial.

## 5 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Materiais e Processos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) pela utilização do MEV.

## REFERÊNCIAS

Askeland DR, Wright WJ. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3 ed. São Paulo: Cengage Learning; 2014.

Dieter GE. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois; 1981.

ESAB. **Technical Handbook Submerged Arc Welding** [internet]. ESAB; 2016. [Cited 2018 Jan. 27]. Available from: <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12295.pdf>

Fortes C, Araújo W. **Apostila de metalurgia da soldagem** [internet]. Contagem: ESAB; 2005. [Cited 2018 Jan. 17]. Available from: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>

GERDAU. **Arames para Solda** [internet]. São Paulo: Gerdau; 2017. [Cited 2017 Aug. 8]. Available from: <https://www.gerdau.com.br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/catalogo-arames-para-solda.pdf>

Menezes WMM, Matheus TCU, Otubo J. **Projeto, fabricação e qualificação de equipamento para flexão rotativa de fios superelásticos de NiTi em ensaios de fadiga**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014;11(1):14-21. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2014.005>

Menezes WMM. **Influência do teor de carbono e oxigênio sobre a vida em fadiga por flexão rotativa de fios de ligas NiTi com Efeito Memória de Forma** [PhD Thesis]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica; 2013

Mills K, editor. **ASM Handbook: fractography**. v. 12. Novelty: ASM International; 1987.

Olson DL, Siewert TA, Liu S, Edwards GR, editors. **ASM Handbook: welding, brazing and soldering**. v. 6. Novelty: ASM International; 1993.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-432-0

