

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**ESTUDO DA SOLDAGEM MIG-MAG NA RESISTÊNCIA A FADIGA DO AÇO  
AISI 4140 EM DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE SOLDAGEM E  
TRATAMENTOS TÉRMICOS**

**Joel Romano Brandão**

**Belo Horizonte**  
**2010**

**Joel Romano Brandão**

**ESTUDO DA SOLDAGEM MIG-MAG NA RESISTÊNCIA A FADIGA DO AÇO  
AISI 4140 EM DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE SOLDAGEM E  
TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ernani Sales Palma.

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Belo Horizonte

2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

B817e Brandão, Joel Romano  
Estudo da soldagem Mig-Mag na resistência a fadiga do aço AISI 4140 em diferentes condições operacionais de soldagem e tratamentos térmicos / Joel Romano Brandão. Belo Horizonte, 2011.  
87f. : Il.

Orientador: Ernani Sales Palma.  
Co-orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa  
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Aço – Fadiga. 2. Mecânica de fratura. 3. Soldagem MIG (Metal Inert Gas). 4. Tensões residuais. I. Palma, Ernani Sales. II. Costa, Maria Celeste Monteiro de Souza. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 669.14

**Joel Romano Brandão**

***Estudo da soldagem MIG-MAG na resistência a fadiga do aço AISI 4140 em diferentes condições operacionais de soldagem e tratamentos térmicos***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

---

Prof. Dr. Ernani Sales Palma (Orientador) PUC Minas

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Celeste Monteiro de S. Costa (Co-orientadora) CEFET-MG

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Elaine Carballo Siqueira Correa CEFET-MG

---

Prof. Dr. Claysson Bruno Santos Vimieiro PUC Minas

**Belo Horizonte, 14 dezembro de 2010**

## RESUMO

O crescimento acelerado da utilização de novas ligas de aço, particularmente os aços microligados e os aços de alta resistência e baixa liga, em aplicações industriais, tem imposto a necessidade crescente de investigação da tecnologia de produção e do comportamento desses materiais em uso. Como, na maioria dos casos, esses materiais estão submetidos a solicitações mecânicas cíclicas, o conhecimento da sua resposta à fadiga torna-se fundamental para a segurança na sua utilização. O presente trabalho visa estudar o comportamento da vida em fadiga de corpos de prova do aço AISI 4140 soldados com a utilização do processo MIG-MAG em relação a corpos de prova sem solda. A avaliação das propriedades mecânicas do material será feita com a utilização de uma máquina de ensaio flexão, com uma tensão média nula ( $R = -1$ ). Os resultados obtidos para cada condição de estudo confirmam que a resistência a fadiga em materiais soldados depende fortemente do procedimento de soldagem.

Palavras-chave: Resistência à fadiga. Soldagem GMAW. Staircase. Tensão residual.

## **ABSTRACT**

The growing utilization of new steel alloys, particularly, microalloy and high strength low alloy steels in industrial applications has exposed a growing need for investigations of the technology required for production, and behavioral properties of these alloys. As in most cases, these materials are under cyclic mechanical solicitation, knowledge of their reaction to fatigue is essential for safety. This project aims to study the behavior of the body test specimen of AISI 4140 steel-welded using the MIG-MAG process and to compare with this the body test specimen that has not been welded. Evaluation of mechanical properties of the material is made using the following tests; flexion-rotation, with a medium stress null( $R = -1$ ). The results for each condition of the study confirm that the fatigue strength in welded materials depends strongly on the welding procedure.

Key-words: Fatigue limit. Welding GMAW. Staircase. Residual stresses.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Estágios de propagação de trincas de fadiga .....	18
FIGURA 2 Imagem de fratura da fadiga em liga AA7175.....	19
FIGURA 3 Boing 737-200 da Aloha Airlines sem parte de sua fuselagem após grave acidente durante um pouso no Havá em 1988.....	21
FIGURA 4 Curva de tensão em função do número de ciclos (S-N) .....	22
FIGURA 5 Curva de tensão em função do número de ciclos.....	23
FIGURA 6 Curvas resultantes do método padrão .....	24
FIGURA 7 Dados de fadiga para níveis de tensão constante em um gráfico S-N ...	25
FIGURA 8 Método de fadiga Staircase para determinar a resistência à fadiga_média em $5 \times 10^6$ ciclos para o aço 4340 .....	30
FIGURA 9 Processo de soldagem GMAW .....	32
FIGURA 10 Representação esquemática do ciclo térmico na soldagem em um só passe.....	33
FIGURA 11 Distribuição típica de tensões residuais em uma solda de topo. (a) Sistema de coordenadas e tensões. (b) Tensões longitudinais. (c) Tensões transversais está sujeita a tensões de reação) .....	38
FIGURA 12 Fluxogram experimental .....	43
FIGURA 13 Preparação do chanfro de soldagem com abertura de 60 graus com a remoção da carepa .....	45
FIGURA 14 Montagem experimental utilizada para a realização dos testes de soldagem.....	46
FIGURA 15 Aparência do cordão de solda .....	47
FIGURA 16 Geometria/regiões dos corpos-de-prova para os ensaios de fadiga.....	48
FIGURA 17 Dimensões dos corpos-de-prova para os ensaios de fadiga .....	48
FIGURA 18 Parâmetro de rugosidade Ra .....	50
FIGURA 19 Dispositivo construído para auxiliar na medição da rugosidade .....	51
FIGURA 20 Validação do processo de medição da rugosidade.....	51

FIGURA 21 Máquina de ensaio de fadiga utilizada neste trabalho .....	54
FIGURA 22 Contador instalado na extremidade da máquina de fadiga .....	55
FIGURA 23 Micrografia (MO) do aço AISI 4140 após a normalização: (a) e (b) aumentos distintos. ....	62
FIGURA 24 Micrografia (MEV) do aço AISI 4140 após a normalização: (a) e (b) aumentos distintos. ....	62
FIGURA 25 Macrografia do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem sem pré e sem pós-aquecimento: (a) vista geral e (b) detalhe. ....	63
FIGURA 26 Macrografia do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem com pré e com pós-aquecimento: (a) vista geral e (b) detalhe. ....	63
FIGURA 27 Micrografia (MO) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento - zona fundida: (a) e (b) aumentos distintos. ....	64
FIGURA 28 Micrografia (MEV) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento - zona fundida: (a) e (b) aumentos distintos. ....	65
FIGURA 29 Micrografia (MO) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento - zona termicamente afetada: (a) e (b) aumentos distintos. ....	65
FIGURA 30 Micrografia (MEV) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento - zona termicamente afetada: (a) e (b) aumentos distintos. ....	66
FIGURA 31 Micrografia (MO) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento - corpo de prova (região afastada do cordão de solda): (a) e (b) aumentos distintos..	66
FIGURA 32 Micrografia (MEV) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem sem pré-aquecimento e sem pós-aquecimento - corpo de prova (região afastada do cordão de solda): (a) e (b) aumentos distintos..	67
FIGURA 33 Micrografia (MO) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem com pré-aquecimento e com pós-aquecimento -zona fundida: (a) e (b) aumentos distintos. ....	68
FIGURA 34 Micrografia (MEV) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem com pré-aquecimento e com pós-aquecimento - zona fundida: (a) e (b) aumentos distintos. ....	68
FIGURA 35 Micrografia (MO) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem com pré-aquecimento e com pós-aquecimento - zona termicamente afetada: (a) e (b) aumentos distintos. ....	69

FIGURA 36 Micrografia (MEV) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem com pré-aquecimento e com pós-aquecimento - zona termicamente afetada: (a) e (b) aumentos distintos. ....	69
FIGURA 37 Micrografia (MO) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem com pré-aquecimento e com pós-aquecimento - corpo de prova (região afastada do cordão de solda): (a) e (b) aumentos distintos..	70
FIGURA 38 Micrografia (MEV) do corpo de prova de aço AISI 4140 para os ensaios de fadiga - condição: soldagem com pré-aquecimento e com pós-aquecimento - corpo de prova (região afastada do cordão de solda): (a) e (b) aumentos distintos..	70
FIGURA 39 Medições referentes ao ensaio de fadiga da amostra normalizada sem solda.....	73
FIGURA 40 Medições referentes ao ensaio de fadiga da amostra soldada com pré e pós-aquecimento.....	73
FIGURA 41 Medições referentes ao ensaio de fadiga da amostra soldado sem pré e pós-aquecimento.....	74
FIGURA 42 Resultado do tratamento estatístico dos dados do ensaio pelo método Staircase para o material na condição normalizado sem solda.....	75
FIGURA 43 Resultado do tratamento estatístico dos dados do ensaio pelo método Staircase para o material na condição soldado com pré e pós-aquecimento .....	75
FIGURA 44 Resultado do tratamento estatístico dos dados do ensaio pelo método Staircase para o material na condição soldado sem pré e pós-aquecimento .....	76
FIGURA 45 Representação do limite de resistência a fadiga - grupo 1: normalizado sem solda; grupo 2: soldado com pré e pós-aquecimento; grupo 3: soldado sem pré e pós-aquecimento.....	76

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Vida em fadiga de aço SAE 3130 ensaiado em tensão alternada ( $S_m=0$ ) e $S_a = 670$ MPa .....	26
TABELA 2 Composição química prevista para aço AISI 4140 .....	44
TABELA 3 Parâmetros operacionais de soldagem. ....	46
TABELA 4 Composição química (% em peso) do metal de base AISI 4140 .....	58
TABELA 5 Controle dimensional dos corpos de prova.....	59
TABELA 6 Medidas da Rugosidade dos corpos de prova.....	60
TABELA 7 Valor de dureza Vickers médio no aço AISI 4140 após a normalização..	61
TABELA 8 Valores médios de dureza Vickers no aço AISI 4140 após procedimento de soldagem.....	61
TABELA 9 Medições referentes ao ensaio de fadiga da amostra normalizado sem solda.....	71
TABELA 10 Medições referentes ao ensaio de fadiga da amostra corpo de prova soldado com pré e pós-aquecimento .....	72
TABELA 11 Medições referentes ao ensaio de fadiga da amostra corpo de prova soldado sem pré e pós-aquecimento .....	72

## LISTA SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AISI-	American Iron and Steel Institute
AR-	Argônio
ASTM-	American Society for Testing and Materials
C <sub>E</sub> -	Efeito de concentração de tensão
C <sub>G</sub> -	Efeito de tamanho
C <sub>L</sub> -	Efeito de carregamento
CO <sub>2</sub> -	Gás carbônico
CP-	Corpo de prova
C <sub>R</sub> -	Efeito de tensão residual
C <sub>S</sub> -	Efeito de superfície
C <sub>T</sub> -	Efeito de temperatura
D-	Incremento de tensão
DIN-	Deutsches Institute für Normung
DP <sub>e</sub> -	Desvio padrão estimado
GMAW-	Gás Metal Arc Welding
He-	Helio
K <sub>CR</sub> -	Fator limite de tolerância
L-	Comprimento final
L <sub>0</sub> -	Comprimento inicial
MAG-	Metal ativo gás
MIG-	Metalinert gás
N-	Numero de ciclos
N <sub>mf</sub> -	Numero de eventos de menor ocorrência
O <sub>2</sub> -	Oxigênio
R <sub>a</sub> -	Rugosidade média
R <sub>q</sub> -	Rugosidade média quadrática
R <sub>t</sub> -	Rugosidade máxima
R <sub>y</sub> -	Rugosidade parcial máxima
R <sub>z</sub> -	Altura total do perfil de rugosidade
S-	Tensão
S' <sub>e</sub> -	Limite teórico de resistência à fadiga

$S_0$ -	Menor nível de tensão
$S_a$ -	Tensão alternada
$S_e$ -	Limite de resistência a fadiga
$S_{em}$ -	Limite médio estimado de resistência a fadiga
$T_0$ -	Temperatura inicial
$T_c$ -	Temperatura crítica
$T_p$ -	Temperatura de pico
ZTA-	Zona termicamente afetada
$\Delta L$ -	Varição de comprimento
$\Delta T$ -	Varição de temperatura
$\Phi$ -	Velocidade de resfriamento
$\alpha_p$ -	Taxa de Prot
$\Delta\sigma$ -	Varição da Tensão
$\Delta k_{th}$ -	Valor limiar
$\infty$ -	Coeficiente de dilatação térmico

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>14</b>
1.2.1 <i>Objetivo geral</i> .....	14
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Fadiga</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 Aspectos históricos da fadiga</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Curva S-N</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4 Métodos para determinação da Curva S-N</b> .....	<b>23</b>
2.4.1 <i>Fatores que afetam as curvas S-N</i> .....	25
<b>2.5 Métodos de determinação do limite de resistência à fadiga</b> .....	<b>27</b>
<b>2.6 Soldagem</b> .....	<b>31</b>
2.6.1 <i>Processo de soldagem MIG/MAG ou GMAW</i> .....	31
2.6.2 <i>Ciclo térmico na soldagem</i> .....	33
<b>2.7 Fadiga em juntas soldadas</b> .....	<b>35</b>
<b>3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>43</b>
<b>3.1 Caracterização do material</b> .....	<b>44</b>
<b>3.2 Preparação dos corpos de prova para soldagem</b> .....	<b>45</b>
<b>3.3 Soldagem dos corpos de prova</b> .....	<b>45</b>
<b>3.4 Ensaios de fadiga</b> .....	<b>47</b>
3.4.1 <i>Preparação dos corpos de prova para o ensaio de fadiga</i> .....	47
3.4.2 <i>Análise da rugosidade superficial dos corpos de prova para o ensaio de fadiga</i> .....	49
3.4.3 <i>Caracterização do aço AISI 4140</i> .....	52
3.4.3.1 <i>Análise do comportamento mecânico: dureza</i> .....	52
3.4.3.2 <i>Análise metalográfica</i> .....	52
3.4.4 <i>Testes de fadiga</i> .....	53
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>58</b>
<b>4.1 Composição química</b> .....	<b>58</b>
<b>4.2 Controle dimensional dos corpos de prova (cp)</b> .....	<b>58</b>
<b>4.3 Rugosidade superficial</b> .....	<b>59</b>
<b>4.4 Análise do comportamento mecânico – dureza</b> .....	<b>60</b>
<b>4.5 Análise metalográfica</b> .....	<b>62</b>
<b>4.6 Ensaio de fadiga</b> .....	<b>70</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>77</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>78</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO A - MEDIÇÕES DO CORPO DE PROVA.....</b>	<b>85</b>

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, E 466-96. **Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials**, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM E1823 - 10a **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**, 1996b. Disponível em: < <http://www.astm.org/Standards/E1823.htm>> Acesso em: 06 jun. 2011.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS. **Welding handbook; welding process**. 8ed. Miami: AWS, 2001. v. 1, 65 p.

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS. **Welding handbook; Welding process-Arc and gas Welding and cutting, brazing and soldering**. 7.ed. Miami: AWS, 1978. 592p. v.2.

ASM HANDBOOK. **Heat treating**. 10 ed. Ohio: American Society for Metals - ASM International, 1991. 1012p. v. 4.

AMIN, M. Pulsed current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. **Metal construction**, May, p.272-278. 1983.

ASM handbook. **Mechanical testing and evaluation**. 10 ed. Ohio: American Society for Metals - ASM International, 2000. 998p. v. 8.

ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. 10 ed. Ohio: American Society for Metals - ASM International, 2004. 1184p. v. 9.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405**: rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: Informações e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS. **Gas metal arc welding**. Welding Handbook. 8.ed. Miami: AWS, v.2, p.109-155. 1991.

ATZORI, B.; MENEGHETTI, G. Fatigue strength of fillet welded structural steels: finite elements, strain gauges and reality. **International journal of fatigue**, v.23, 713-721. 2001.

BALASUBRAMANIAN, V. et al. Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behavior of aa7075 aluminium alloy joints. **International journal of fatigue**, v.30, p.405-416. 2008.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R.W.K. **Steels: microstructure and properties**. 3rd ed. Oxford: Elsevier, 2006. 344p.

BRANCO, C.M.; FERNANDES, A.A.; CASTRO, P.T. **Fadiga de estruturas soldadas**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

BROSILOW, R. **Gases for shielding metal arc welding**. Welding Design e Fabrication, 1978. 63-69p.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2002. 589p.

CÂNDIDO, L. C.; GODEFROID, L. B.; SILVA, J. G. A.. Comportamento em fadiga de um aço estrutural patinável soldado. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.55, n.2, Apr. 2002.

CAPELLO, E. Residual stresses in turning part I: influence of process parameters. **Journal of Materials Processing Technology**. v.172, p.310-326p. 2006.

CARY, H.B. **Modern welding technology**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 120p.

CATÁLOGO Gerdau. **Produto: aços especiais para beneficiamento**. 2004. Disponível em [www.gerdau.com.br/gerdauacosespeciais](http://www.gerdau.com.br/gerdauacosespeciais). Acesso em: 20 jan. 2009.

CATÁLOGO Villares. **Catálogo técnico: composição química de aços villares**. 2004. Disponível em <http://www.cimm.com.br/primitus/catalogue>. Acesso em: 20 jan. 2009.

COLLINS, J.A. **Failure of materials in mechanical design**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

DIETER, G.E. **Mechanical metallurgy**. Tokyo: McGraw-Hill International Editions, 3 ed. 1986.

DOWLING, N.E., **Mechanical behavior of materials**. New Jersey: Prentice-Hall, 1993.

DUTRA, J.C. Análise estatística de estabilidade de arco em soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM - ABS, 15, 1989, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABS, 1989. v.1, p. 327-347.

EWING, J. A., ROSENHAIN, W. Experiments in micro-metallurgy: effects of strain. Preliminary notice", **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. A199, p.85-90. 1900.

EWING, J. A.; HUMFREY, J. C. The fracture of metals under rapid alterations of stress. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London , v.A200, p. 241-250. 1903.

HAAGENSEN, P.J., **IIW's round robin and design recommendations for improvement methods**, Proc. IIW 50th Annual Conference, San Francisco, p. 305 - 316. 1997.

HONEYCOMBE, R.W.K. **The plastic deformation of metals**. London: Edward Arnold, 1984. 402-429p.

HORN, A.M.; HUTHER, I.; LIEURADE, H.P. **Fatigue behaviour of T-joints improved by TIG dressing**. *Welding in the World*, v.41, p. 273-280. 1998.

KIRKHOPE, K.J. et al. Weld detail fatigue life improvement techniques. **Part 2: application to ship structures**. *Marine Structures*, n.12, p.477-496. 1999.

LASSEN TOM.; RECHO NAMAN. Proposal for more accurate physically based s-n curve for welded steel joints. **International journal of fatigue** , v.31, p. 70-78p. 2009.

LEE, YUNG-LI *et al.* **Fatigue testing and analysis: theory and practice**. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

LIPSON, C.; SHETH, N.J. **Fatigue experiments: statistical design and analysis of engineering experiments**. New York: Mcgraw-Hill, USA, 1973. 9<sup>th</sup> Chapter. 262-310p.

LOPES, Karina Stefania Souza. **Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140**. 2006. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

MACHADO, I.G. **Soldagem e tecnologia e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre, 1996. 477p.

MADDOX, S.J. et al. **The application of fatigue life improvement techniques to steel welds**, TWI: Edition Welding Institute, March 26, 1992.

MAGNABOSCO, R.; ROSSETTO, L. C. **Toughness anisotropy in HSLA steels**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15. 1999, 22-26 nov. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1999. 291p. (Anais em CD-ROM).

MANSUR, T. R. **Avaliação e desenvolvimento de modelos de determinação de acúmulo de danos por fadiga em aço estrutural**. 2003. 215f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Minas Gerais.

MANTEGHI, S. **Methods of fatigue life improvement for welded joints in medium and high strength steels**. TWI: Abington Hall, Cambridge, UK, 1998. 2p.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 362p.

MASUBUCHI, Koichi. **Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences**. 1980. 642p.

MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. **Princípios de metalurgia mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1982. 505p.

MITCHELL, M. R. Fatigue analysis for design. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE FADIGA - SAE Brasil, 1, **Anais...** São Bernardo do Campo, SP, 2001. 1-29p.

MODENESI, P.J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2006. 141p.(Apostila).

NGUYEN, T.N.; WAHAB, M.A. The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading. **Journal of Material Processing Technology**, n.77, p. 201-208. 1998.

NOVOVIC, D. et al. The effect of machined topography and integrity on fatigue life. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, n. 2, p. 125-134, 2004.

PASTOUKHOV, V., A.; VOORWALD, H.J.C. **Introdução à mecânica da integridade estrutural**. São Paulo: UNESP, 1995. 196p.

PONCE, Aline Szabo. **Previsão da vida em fadiga da liga AA7175-T1- Parte I: curvas tensão-deformação cíclicas**, 2003- Departamento de Engenharia Mecânica – FEI. (Relatório).

RAVI,S.; BALASUBRAMANIAN,V.; NEMAT,S.N. Influences of post weld heat treatment on fatigue life prediction of strength mis-matched hsla stell welds. **International Journal of Fatigue**, v. 27, p. 547-553. 2005.

ROTHBART, Harold A. **Mechanical design handbook**. New York: McGraw-Hill, v. 1, 1996.

SCHIJVE, J. Fatigue os structures and materials in the 20<sup>th</sup> century and the state of the Art. **International Journal of Fatigue**, v.25, p. 679-702, 2003.

SCHÜTZ, T. A history of fatigue. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 54, n. 2, p.263-300, 1993.

SULLIVAN, D. **The gas metal arc welding process celebrates a 50<sup>th</sup> anniversary**. Welding Journal, set., p. 53-54. 1998.

SURESH, S. **Fatigue of materials**. Boston: Cambridge Press, 2. ed. cap.7. 1-29p. 1998.

VURAL, M.; ARKUS, A.; ERYUREK, B. Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets. **Journal of Materials Processing Technology**, v.176, p.127-132, 2006.

ZAHAVI, Eliahu; TORBILO, Vladimir. **Fatigue design**: life expectancy of machine parts. Boca Raton: CRC, 1996.

ZEEMANN, A. Fadiga em juntas soldadas. **Soldagem e inspeção**, n.10, p. 21-23, 1998.