

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

I.A.B. Barbosa^{1,*}; H.H. Bernardi¹; W.M.M. Menezes¹

1 Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Professor Jessen Vidal
Av. Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1350 - Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP,
CEP: 12247-014, Brasil.
Telefone: (12) 3905-2423

*ariabelineli@gmail.com

RESUMO: O objetivo do trabalho foi determinar a vida em fadiga de materiais na forma de fios sob esforços de flexão rotativa; 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 AWS A5.18, com diâmetro de 0,80 mm; os corpos de prova do fio foram submetidos à rotação média de 611,3 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, diameter 0.80mm, was used as the specimen. The welding wire specimens were subjected to an average rotation of 611.3 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 between failure fracture and ductile fracture.

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 [1]. 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 utilizou-se os ensaios de flexão rotativa para avaliar a resistência do material à fadiga [2]. 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 [3].

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 [4, 5].

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. MATERIAIS e MÉTODOS

2.1 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 [1]. O fio de arame de solda estudado trata-se de um aço de baixo carbono submetido à normalização, trefilação e recozimentos intermediários na conformação mecânica do fio máquina até seu diâmetro final; um tratamento de galvanização eletrolítica para cobreamento completa sua fabricação. Para os testes mecânicos foram preparados quatro corpos de prova (cdp's) cuja composição química é apresentada na Tabela 1. A fim de facilitar a identificação dos corpos de prova, estes foram nomeados como ASFR1000X, no qual: AS = arame de solda, FR = flexão rotativa, 100 = ciclagem até ruptura e 0X = sequência de testes. Para a nomenclatura adotada, apenas os dois últimos dígitos serão variados, pois correspondem ao número do corpo de prova.

Tabela 1. Composições química do arame AWS A5.18 [1].

Elementos	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
%Mín.	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

2.2. Ensaio de fadiga por flexão rotativa

A preparação dos corpos de prova contou com o endireitamento manual dos fios, uma vez que apresentavam arqueamento resultante do acondicionamento em bobinas de uso em soldagem. Assim, cortados de uma bobina de fios, o comprimento das amostras foi de 394 ± 7 mm, suficientes para fixação no mandril rotativo da máquina, arqueamento para obtenção de uma curva de semicircunferência, e apoio deslizante da extremidade livre em uma bucha de Nylon® lubrificada. 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% (ϵ_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 ruptura. Os ensaios de fadiga por flexão rotativa foram realizados na máquina modelo ROTATFLEX 180 (Figura 1) desenvolvida por Menezes [6].

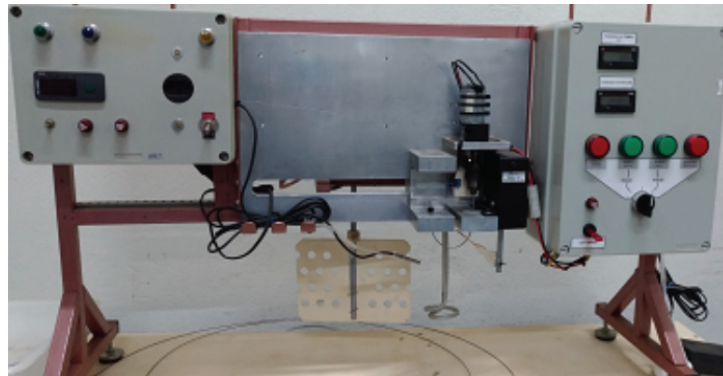


Figura 1. Máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa ROTATFLEX 180.

2.3. 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

3.1. Cálculo da deformação

A vida em fadiga por flexão rotativa de um material com forma de fio é determinada pelo número de ciclos de esforço, sob certas condições como velocidade média de rotação do fio (ω), diâmetro do fio (d), raio de flexão do fio (R) e sua deformação (ϵ). Quanto à deformação do fio, dada à condição de flexão rotativa cíclica foi considerada ϵ_{ac} como máxima deformação em compressão, e ϵ_{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 ϵ_{ac} quanto ϵ_{at} como simplesmente ϵ_a .

Em relação à deformação ϵ_a esta foi calculada de acordo com a Equação 1 [6], considerando-se a superfície neutra no centro do fio, longitudinalmente. Para o cálculo da deformação ϵ_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 $\epsilon_a = 0,50\%$.

$$\epsilon_a = \frac{d}{2R} \times 100\% = \frac{0,80}{2 \times 80} \times 100\% = 0,50\% \quad (1)$$

Para determinação da deformação máxima na condição elástica (ϵ_e) de acordo com a Equação 2 considerou-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 $\epsilon_e = 0,19\%$.

$$\epsilon_e = \frac{LE}{E} = \frac{400}{210.000} = 0,0019 \text{ ou } 0,19\% \quad (2)$$

A deformação é diretamente proporcional ao diâmetro do fio, como pode ser verificado na Equação 1; 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.

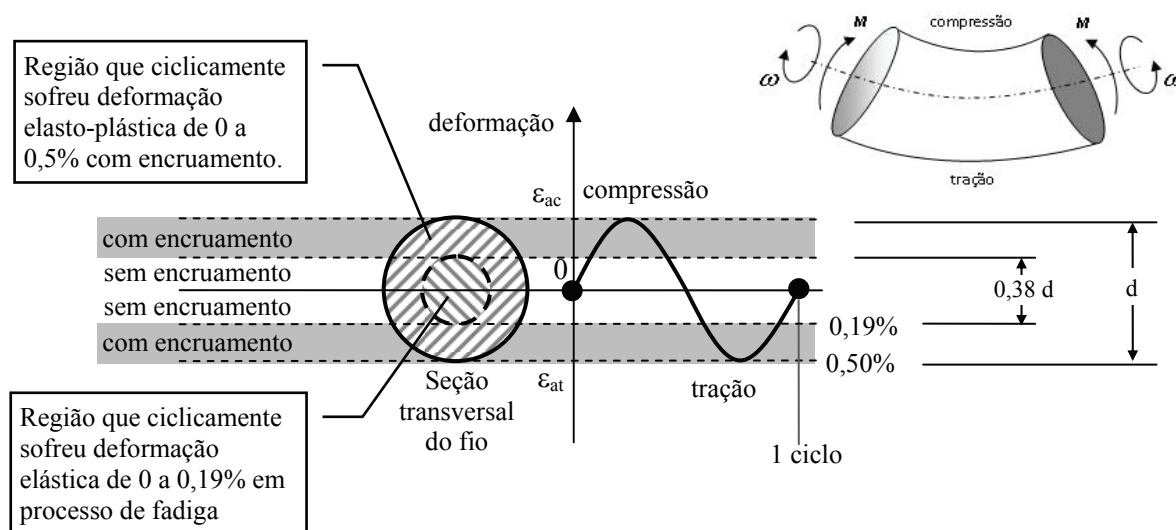


Figura 2. Deformação do fio segundo sua seção transversal.

Se $\epsilon_e = 0,19\%$ e $\epsilon_a = 0,50\%$, isso resulta que o arame de solda sofreu deformação puramente elástica em sua região mais central (0,38 d) e deformação elasto-plástica variando de 0,19% à 0,50% em sua porção mais externa, levando à diferentes mecanismos de falha nestas regiões.

3.1. 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.

3.2. 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. As trincas se propagam em direção ao centro do fio (amplitude de deformação igual a zero), na região onde ocorre deformação elástica. A Figura 3 apresenta a fractografia do fio de solda com essas características de fratura. A propagação das trincas que iniciam na superfície de fratura do fio 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 [6]. A presença de nucleação na superfície do CDP ASFR1004, localizada da extremidade da borda, está indicada pela seta em vermelho (Figura 3).

Essa fratura combinada, gerou formas muito distintas entre as superfícies de início (borda) e de fim da fratura (centro), como pode ser observado na Figura 4. Na superfície do fio, onde ocorre o encruamento do material, ocasionou uma fratura com características do tipo frágil (região A da Figura 4a e 4b). A superfície da fratura junto a origem da trinca tende a ser lisa [3]. 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. 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 das Figuras 4a e 4b).

Nas regiões B das Figuras 4a e 4b, podem ser observadas uma superfície rugosa, fibrosa e a presença de *dimples*, que são características de fratura dúctil. *Dimples* (Figura 4c) 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. Outra característica da morfologia de *dimples*, é que eles são o início (nucleação) e propagação da fratura caracterizada como dúctil. Na Figura 4d, podem ser observadas as presenças de estrias, que indicam o sentido e direção de propagação das trincas.

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

	ASFR10001	ASFR10002	ASFR10003	ASFR10004
Número total de ciclos	9599	10747	10177	10903
Tempo até ruptura (min)	15	17	17	18
Rotação por minuto (rpm)	615	618	606	606
Comprimento da haste direita após ruptura (mm)	177	195	133	183
Posição da ruptura	3°	3°	2°	3°

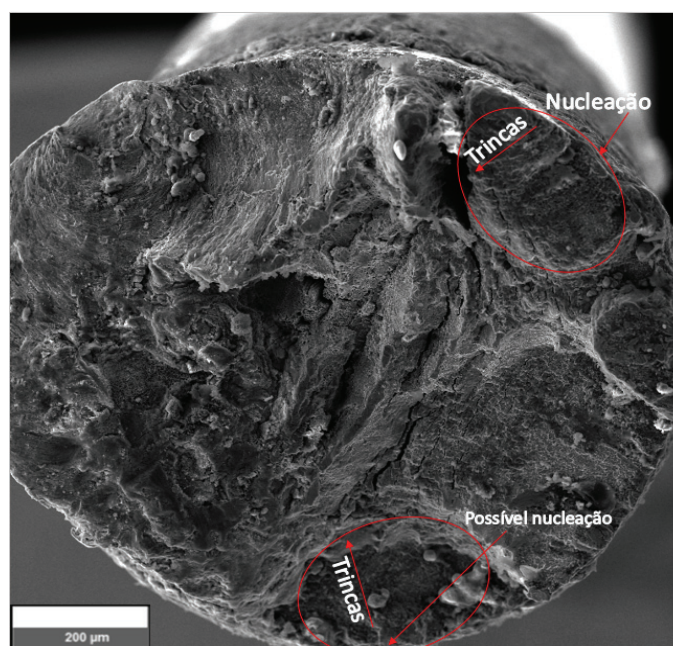


Figura 3. Fractografia da amostra ASFR10004 mostrando a propagação das trincas e a presença de nucleação (MEV-SE).

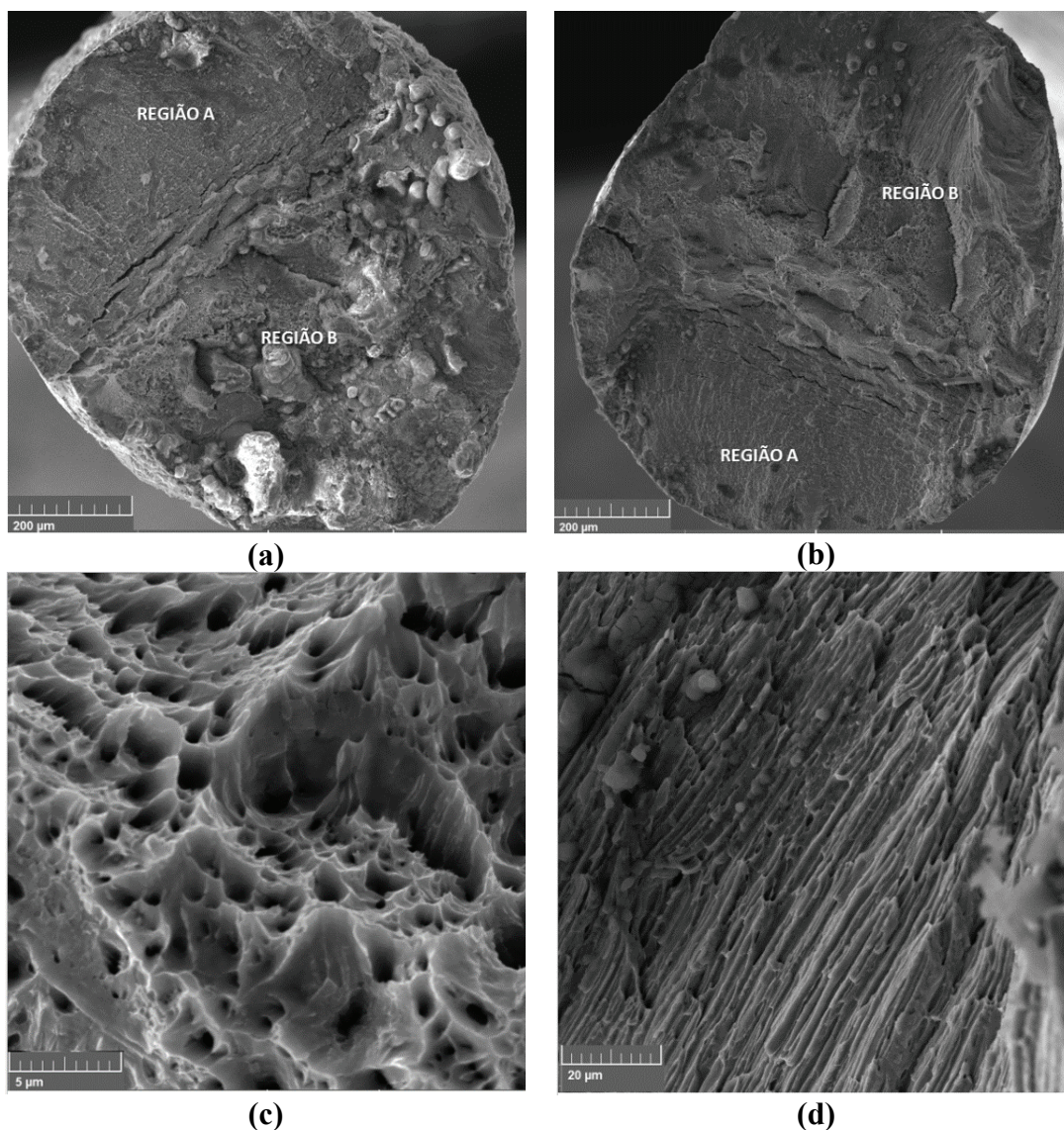


Figura 4. Fractografia das amostras: **(a)** ASFR10002: vista geral, **(b)** ASFR10003: vista geral, **(c)** vista detalhada da região B da amostra ASFR10003 mostrando a presença de *dimples*, e **(d)** vista detalhada da região B da amostra ASFR10003 mostrando a presença de estrias (MEV-SE).

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.

5. AGRADECIMENTOS

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



6. REFERÊNCIAS

- [1] GERDAU. *Arames para Solda Gerdau*. São Paulo: 2017. Disponível em <https://www.gerdau.com/br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/catalogo-arames-para-solda.pdf>. Acesso em 28/08/2017.
- [2] ASKELAND, D.R. e WRIGHT, W.J. *Ciência e engenharia dos materiais*. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- [3] DIETER, G.E. *Metalurgia Mecânica*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981.
- [4] CHAPTER OUTLINE: FAILURE. MSE 2090: Introduction to Materials Science. Chapter 8, Failure. Disponível em: <http://people.virginia.edu/~lz2n/mse209/Chapter8.pdf>. Acesso em 20/08/2017.
- [5] FADIGA E FLUÊNCIA - MECÂNICA DE DEFORMAÇÃO E FRATURA, n.d. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://www.slideshare.net/emc5714/grupo-fadiga-e-fluncia>. Acesso em 20/08/2017.
- [6] MENEZES, W. M. M. *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*. Tese de Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Área de Matérias e Processos de Fabricação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2013.