

ESTUDO TEÓRICO DO MECANISMO DE FRATURA DE PEÇAS DE ER70S-6 PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA

Daniel Víctor Carvalho Lima

Daniel Monteiro Rosa

Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF.

daniel.victorc777@gmail.com

danielrosa@unb.br

mziberov@unb.br

Resumo: O processo de manufatura aditiva vem se tornando cada vez mais relevante e acessível nos tempos atuais devido à possibilidade de criação de peças com geometrias mais complexas e inviáveis de serem produzidas por processos convencionais como fundição, usinagem e conformação, expandindo os horizontes no âmbito do design e fabricação de peças. Portanto, há a importância do estudo e estabelecimento das propriedades mecânicas das peças produzidas por manufatura aditiva a fim de garantir a confiabilidade que se faz necessária para determinadas aplicações. Com efeito, o estudo da fratura e seus mecanismos têm relevância no intuito de prever e compreender os mecanismos de falha de peças fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) submetidas a esforços cíclicos. Em vista disso, o presente trabalho objetiva elaborar uma revisão acerca das propriedades de fadiga de peças do arame ER70S-6 fabricadas pelo processo Gas Metal Arc Welding bem como apresentar os mecanismos de fratura destas. Para atingir tal objetivo, será realizada uma revisão acerca dos estudos tangentes à fadiga em peças metálicas impressas e trabalhos referentes à fratura em peças submetidas a tais esforços. Através da análise realizada, foi possível notar que o comportamento em fadiga de peças fabricadas por manufatura aditiva e, conseqüentemente, o seu padrão de fratura variam de acordo com os parâmetros de deposição e ensaio, sendo possível melhorar a resistência à fadiga através de processos de conformação mecânica e tratamentos térmicos. Além disso, o estudo de ensaios que utilizam diferentes direções de extração dos corpos de prova a partir da deposição evidenciaram um forte comportamento anisotrópico, dados os distintos padrões de fratura encontrados.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; MADA; ER70S-6; Fadiga; Mecanismo de Fratura.

1. INTRODUÇÃO

A fabricação de peças por meio de manufatura aditiva (MA) de metais tem atingido cada vez mais camadas da indústria. Milewski (2017) relata a utilização deste processo nas áreas médica, automotiva, aeroespacial e artística. Uma das primeiras ideias de manufatura aditiva de metais foi patenteada por Baker (1925) como uma forma de confecção de peças decorativas através da deposição manual de camadas por meio de arco elétrico. Com o avanço da tecnologia e implementação de técnicas de comando numérico o processo ganhou mais visibilidade e tem sido mais estudado.

Segundo Dilberoglu *et al.* (2017), este modelo de fabricação apresenta diversas vantagens e possui grande importância no âmbito da indústria 4.0, visto que permite a criação de peças com geometrias complexas e personalizadas, que não seriam viáveis por métodos convencionais. Um exemplo de vantagem da manufatura aditiva é possibilidade de redução da massa de componentes através de um novo design, tal como observado no trabalho de Tomlin e Meyer (2011), que ao realizarem uma otimização topológica de uma peça da dobradiça da nacele do Airbus A320 foram capazes de reduzir a massa do componente de 918 g para 326 g mantendo menores níveis de tensão.

No âmbito da manufatura aditiva por deposição a arco com a utilização de arame/pó, os processos utilizados são o GMAW (Gas Metal Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), PAW (Plasma Arc Welding) e processos híbridos. Cada um desses processos apresenta diferentes características de formação do arco, adição de material e conseqüentemente distintas propriedades da deposição realizada. Dentre os diversos métodos, a variação CMT (Cold Metal Transfer), se destaca por controlar o modo de transferência (através do “corte mecânico” da gota com a utilização de um servomotor que retrai o arame), reduzindo o aporte térmico do processo e mitigando a ocorrência de respingos (Furukawa, 2006). Tal método foi desenvolvido e patenteado pela empresa austríaca Fronius em 2004 e permite melhor qualidade do cordão e controle da deposição metálica quando comparado ao processo GMAW convencional (Selvi, Vishvakshnan e Rajasekar, 2017).

Neste contexto, para aplicações de maior sensibilidade e rigor, se faz necessário o estudo dos parâmetros dos processos de fabricação e das propriedades finais do material fabricado via manufatura aditiva a fim de se assegurar as características de projeto (Bandyopadhyay *et al.*, 2022). A resistência à fadiga é uma das propriedades do material que deve ser analisada dada sua relevância em aplicações reais. De maneira conjunta com o estudo da resistência à fadiga, é preciso conhecer também os mecanismos que ocasionam a fratura, que podem ser diferentes em peças impressas dado a peculiaridade do processo. Tal estudo dos mecanismos de fratura é conduzido com o objetivo de identificar descontinuidades ou defeitos (como porosidade) que resultaram na origem e crescimento de trincas.

Tendo em vista a relevância da manufatura aditiva na atualidade e também a importância do estudo do comportamento de falha por fadiga dos materiais impressos buscando a investigação e definição de suas propriedades mecânicas, o presente trabalho foi construído a partir da revisão bibliográfica realizado pelo autor em seu trabalho de conclusão de curso, e têm como objetivo investigar, por meio de uma revisão da literatura, a vida em fadiga e o mecanismo de fratura em peças impressas por meio de processos de deposição a arco com foco em peças produzidas com o arame ER70S-6.

3. FADIGA E MECANISMOS DE FRATURA EM PEÇAS IMPRESSAS

Segundo Budynas e Nisbett (2016), a falha por fadiga é um fenômeno que se difere da falha estática por representar uma falha repentina, semelhante à falha de materiais com características frágeis, sem grandes deformações plásticas. Segundo Callister (2016), esse fenômeno resulta da aplicação de cargas cíclicas num componente sendo observada em diversas aplicações mecânicas como componentes de aeronaves, engrenagens, eixos e molas. Desta forma, Budynas e Nisbett (2016) afirmam que uma das ferramentas para análise de fadiga é a curva S-N, que fornece tensão (resistência à fadiga) por número de ciclos.

Assim, Dowling (2013) menciona que a fratura por fadiga é resultado de tensões cíclicas no material, que por sua vez ocorre como resultado do crescimento e propagação de trincas. Essas trincas podem crescer durante os ciclos de trabalho, levando a fraturas frágeis ou dúcteis. Budynas e Nisbett (2016) dividem a fratura por fadiga em três etapas, o primeiro estágio é caracterizada pelo início de trincas devido a deformação plástica, em seguida ocorre devido ao crescimento dessas trincas formando superfícies com características de um platô liso, e por fim, no terceiro estágio, ocorre uma fratura de maneira súbita. Além disso, segundo Dowling (2013), na visualização da fratura, são observadas duas regiões, uma com superfície lisa e outra com superfície rugosa, que decorre do rápido crescimento da trinca.

No âmbito do estudo da vida em fadiga de peças impressas por deposição a arco, Ermakova *et al.* (2023) realizaram a deposição de peças (paredes) a partir do arame ER70S-6 por meio do processo CMT utilizando estratégia de deposição oscilante. Em seguida foram extraídos corpos de prova cilíndricos na direção horizontal e vertical (paralelo e perpendicular à deposição). Desta forma foram conduzidos ensaios de fadiga sob diferentes condições de tensão (uniaxial, torção e multiaxial) e plotados os resultados na curva S-N com o objetivo de comparar a resistência à fadiga das amostras horizontais e verticais e identificar ou não anisotropia. Sendo assim, as condições de ensaio para tensão uniaxial foram de frequência de 20 Hz e razão de carga $R=0,01$. Tendo sido conduzidos os ensaios foi observado que, para as condições de carga uniaxial as amostras verticais apresentaram maior resistência à fadiga, sendo que os valores de resistência (acima de 2×10^6 ciclos) para as amostras horizontais e verticais foram de 384 MPa e 436 MPa respectivamente, confirmando a anisotropia, tal como apresentado na curva S-N da Fig. 1. Os autores atribuem a maior resistência a fadiga da amostra vertical ao fato de que esta apresenta menor limite de escoamento que a amostra horizontal, como previamente visto por Ermakova *et al.* (2020). Todavia, para os ensaios de torção e multiaxial o resultado observado foi contrário, sendo as amostras horizontais 9,0% e 6,5% mais resistentes à fadiga sob estas condições.

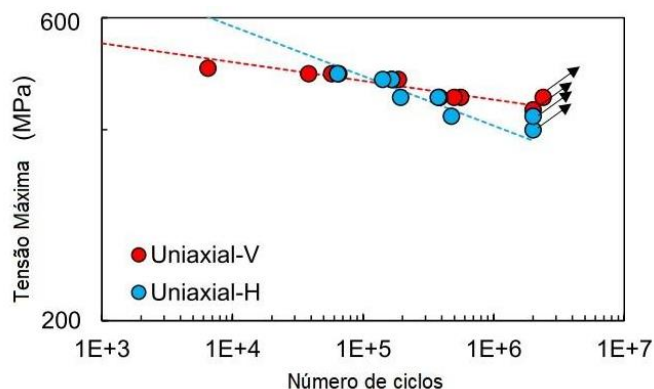


Figura 1. Curva S-N para ensaio de fadiga uniaxial em amostras de ER70S-6 (adaptado de Ermakova *et al.*, 2023)

Após a fratura por fadiga para as amostras, Ermakova *et al.* (2023) realizaram uma análise da região fraturada com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura a fim de identificar possíveis descontinuidades e crescimentos de trincas, sendo observados poucos defeitos com dimensões inferiores a 30 μm . Nas Fig. 2a e 2b é apresentada a região de

fratura de amostras verticais e horizontais respectivamente submetidas ao ensaio de fadiga uniaxial, na qual é possível observar os diferentes estágios de propagação das trincas que levaram à falha do material. As indicações numéricas em cada uma das imagens indicam os estágios de crescimento de trincas. A região 1 apresenta a área na qual ocorreu o surgimento da trinca, já na região 2 e 3 ocorre o crescimento da trinca e falha dúctil decorrente da propagação instável da trinca respectivamente. Por fim, na região 4 ocorre a fratura rápida. É observado também que na amostra horizontal (Fig. 2b), a região de fratura rápida é maior que na amostra horizontal que na vertical, além disso, nesta amostra, foram observadas duas regiões de iniciação de trinca simultâneas e *dimples* mais profundas nas regiões 1 e 2. Em ambas as amostras foram observadas também estrias, indicadas pela seta amarela, perpendiculares a plano de crescimento de trinca.

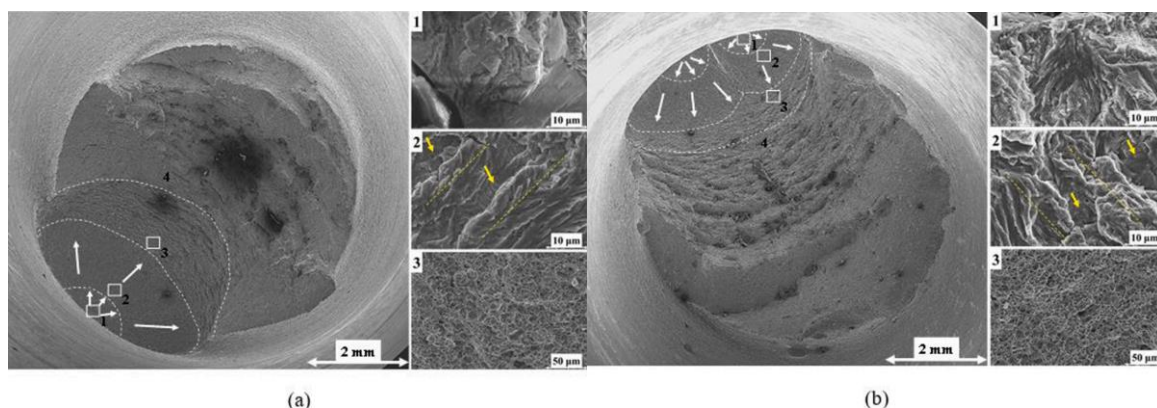


Figura 2. Imagem da região de fratura ER70S-6: (a) Horizontal; (b) Vertical (Ermakova *et al.*, 2023)

Pimenta (2022) utilizou o processo CMT, modo de deposição bidirecional e o arame ER70S-6 (usou estudo do Novelino *et al.*, (2022) como base para deposição), conduziu medições e ensaios de fadiga a fim avaliar a resistência a fadiga do material e obter a curva S-N para as amostras horizontais, apresentada pela Fig. 3. No entanto, o trabalho dos autores se distingue em alguns aspectos, dentre eles se cita o tipo de corpo de prova utilizado, cilíndrico no caso de Ermakova (2023) e retangular para Pimenta (2022), além de diferenças nos parâmetros de deposição e ensaio (resfriamento, dimensões da parede, velocidades de movimentação da tocha e razão de carga). Para os ensaios uniaxiais foi utilizada uma frequência de 20 Hz e razão de carga $R=0,1$. Sendo assim, a partir da geração da curva foi evidenciado que o material na direção horizontal apresentaria “vida infinita” (superou 2×10^6 ciclos) para tensões inferiores à 302,04 MPa (0,53 Su), enquanto, comparativamente, na literatura o valor encontrado para o material era de 0,50 Su.

Neste contexto, portanto, o resultado obtido por Ermakova *et al.*, (2023) foi 21,3% maior do que o de Pimenta (2022) para as mesmas condições de carregamento e orientação da amostra. Tal distinção nos resultados pode se justificar por diversos fatores, dentre eles a diferença em alguns parâmetros de deposição e, de forma mais provável, a geometria do corpo de prova e adequação destes com a normas. No caso de Pimenta (2022) a parede foi fresada e as amostras foram extraídas num processo de corte por jato d’água, não havendo nenhum processo posterior de acabamento superficial. Tal irregularidade e rugosidade na superfície das amostras pode ter contribuído para uma falha precoce e um menor desempenho em fadiga quando comparado aos resultados de Ermakova *et al.* (2023).

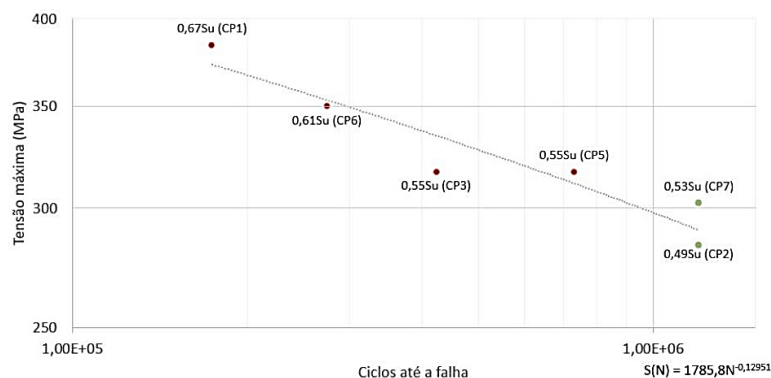


Figura 3. Curva S-N para amostras de ER70S-6 depositadas pelo processo CMT (Pimenta, 2022)

Tendo realizado os ensaios de fadiga para amostras retiradas na posição horizontal, Pimenta (2022) analisou a região da fratura através de um microscópio de varredura eletrônica (MEV) a fim de identificar as regiões de início e propagação de trincas. A partir da análise, foram observados mecanismos de fratura frágil e dúctil, caracterizados pela formação de estrias e *dimples* respectivamente, tal como visto por Ermakova *et al.* (2023). A Fig. 4 apresenta tais estruturas na região de fratura em um dos corpos de prova ensaiados. A propagação da trinca é constatada e indicada pelas estrias, sendo a

origem atribuída a algum elemento concentrador de tensão na superfície. Apesar da similaridade entre os parâmetros de deposição e ensaio de Pimenta (2022) e Ermakova *et al.* (2023), a região de fratura se apresenta de maneira consideravelmente diferente em decorrência da geometria do corpo de prova, com regiões mais bem delimitadas e estrias mais visíveis nas amostras cilíndricas.

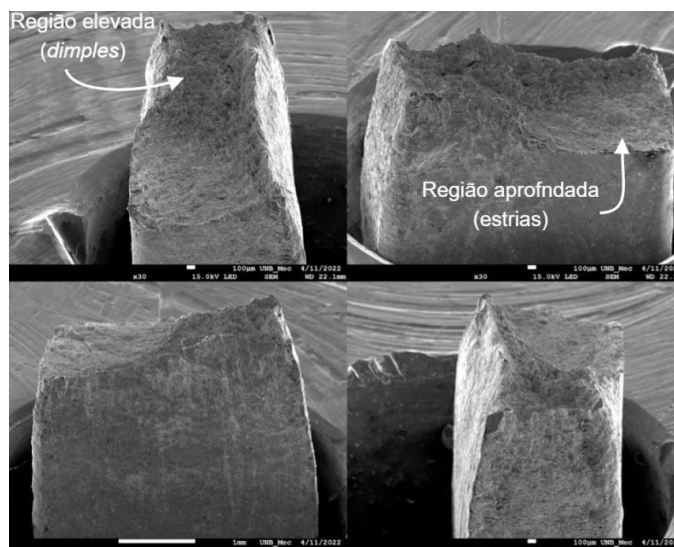


Figura 4. Imagens da região da fratura em amostra horizontal do arame ER70S-6 depositado via CMT (Pimenta, 2022)

Ayan e Kahraman (2022), depositaram peças (paredes) do arame ER70S-6 por meio do processo GMAW e extraíram amostras de seção retangular nas direções vertical e horizontal para estudos de fadiga. No processo de deposição foi utilizada uma estratégia de percurso fechado da tocha de forma a formar uma estrutura de parede retangular. Esta abordagem foi selecionada pois permite o resfriamento de cada camada (para temperaturas entre 90°C e 100°C) sem necessidade de extinção do arco. Diferentemente dos autores anteriores, Ayan e Kahraman (2022) conduziram ensaios de fadiga de flexão com frequência de 10 Hz. A partir dos ensaios foi gerada uma curva S-N apresentada pela Fig. 5. Nela é possível observar que as amostras verticais possuem uma maior resistência à fadiga no intervalo de até 10^6 ciclos. Todavia, para valores no intervalo de 10^7 ciclos a resistência a fadiga foi próxima para as diferentes orientações, sendo de 178 MPa para as amostras verticais e 176 MPa para as amostras horizontais sendo encerrado pela ausência de fratura. Como a natureza dos ensaios e dados apresentados por Ayan e Kahraman (2022) são diferentes dos realizados pelos autores anteriores, não é possível comparar de maneira objetiva os resultados, entretanto é observada a tendência de maior resistência das amostras verticais tal como visto por Ermakova *et al.*, (2023).

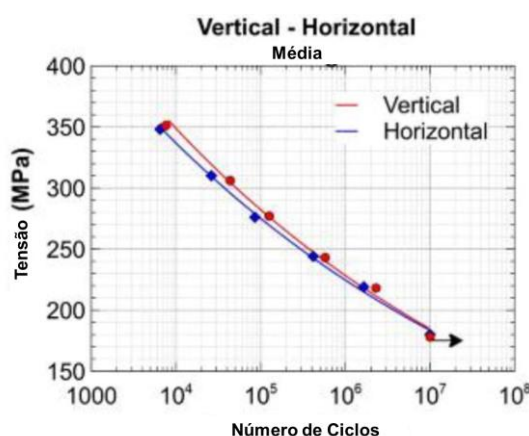


Figura 5. Curva S-N de ensaios de fadiga por flexão para amostras de ER70S-6 (Ayan e Kahraman, 2022)

Na análise da região da fratura realizada por Ayan e Kahraman (2022) foi observada a predominância de fratura frágil caracterizada pela presença de estrias tal como as de Pimenta (2022). Além disso, foi constatado também que os mecanismos de fratura para as amostras horizontais e verticais eram semelhantes e durante a análise através de microscópio de varredura eletrônico foram observadas também esferas de MnO (inclusões) que podem ter iniciado o processo de fratura.

Ayan e Kahraman (2023) também utilizaram o processo GMAW para a deposição de uma parede composta de materiais dissimilares, sendo empregado o ER70S-6 nas camadas inferiores da parede e a liga 308LSi. Tal como Ayan e

Kahraman (2022), foi utilizada a mesma estratégia de deposição e parâmetros de ensaio, com corpos de prova na vertical sendo submetidos a ensaios de fadiga por flexão. Após os ensaios foi observado que a região de fratura ocorreu na parte em que foi utilizado o arame ER70S-6, sendo a resistência para 10^7 ciclos de 170 MPa (próximo, porém menor que no estudo de Ayan e Kahraman (2022)). Além disso, a partir da análise da fratura via MEV, foi constatado um modo de falha frágil, tal como observado anteriormente.

A partir do emprego do arame ER70S-6 e do processo CMT com estratégia de tocha oscilante, Ermakova *et al.* (2022) realizaram a deposição de uma parede e fabricação de corpos de prova com entalhes com objetivo de analisar o crescimento de trincas durante os ensaios de fadiga. Tais experimentos foram conduzidos de acordo com a norma ASTM E647-13 (2014), utilizando uma câmera de alta resolução para monitoramento do crescimento de trinca. Os parâmetros utilizados para o ensaio de fadiga foram de raio de carga de $R = 0,1$ e frequência 5 Hz com cargas máximas de 10 kN e 11 kN. Desta maneira, o gráfico da Fig. 6 relaciona o comprimento da trinca com o número de ciclos, sendo possível constatar que o comprimento inicial para as amostras foi de aproximadamente 20 mm. Ademais, para as amostras horizontais submetidas a carga de 10 kN, a resistência à fadiga foi o dobro do que o observado nas verticais. Entretanto, o oposto foi observado para a carga de 11 kN, no qual as amostras verticais apresentaram uma maior resistência à fadiga. Desta forma, os autores concluíram que a direção de deposição não possui influência considerável no crescimento de trincas por fadiga. Além disso, o mecanismo de falha observado foi diferente para cada uma das orientações, sendo dúctil nas amostras horizontais e frágil nas verticais. Sendo assim, a análise da fratura para as amostras horizontais com carga máxima de 10 kN indicou mecanismo de fratura dúctil com presença de ruptura de *dimples* tal como observado por Pimenta (2022), entretanto nas amostras verticais foi observada o mecanismo de frágil.

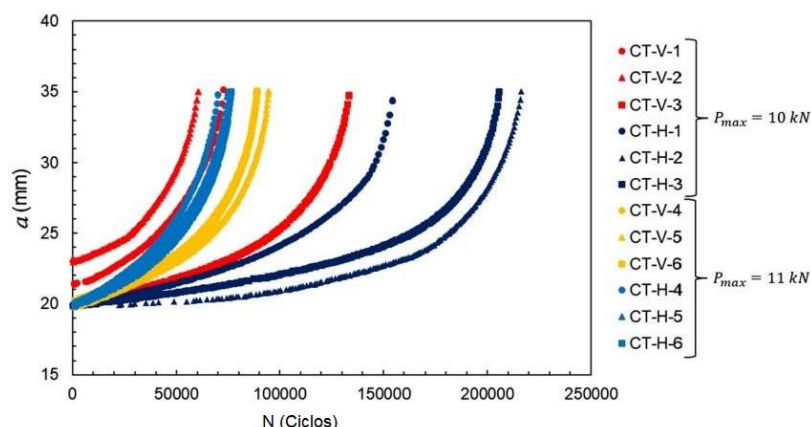


Figura 6. Tamanho do comprimento da trinca por número de ciclos (adaptado de Ermakova *et al.*, 2022)

Com objetivo de avaliar o crescimento de trinca durante o ensaio de fadiga, Shamir *et al.* (2022) depositaram paredes do arame ER70S-6 via CMT (com estratégia de deposição paralela) nas posições verticais e horizontais. Os parâmetros de ensaio utilizados foram os mesmos de Ermakova *et al.* (2022), com razão de carga de $R = 0,1$, frequência de 5 Hz, carga máxima de 10 kN e comprimento inicial de trinca de 20 mm. A partir das análises realizadas pelos autores, bem como dos gráficos gerados, foi concluído que a posição e orientação de retirada das amostras não resultou em diferentes taxas de crescimento de trinca.

O estudo de Ron *et al.* (2020) teve como objetivo avaliar e comparar o desempenho em fadiga de amostras de ER70S-6 produzidas por deposição à arco submetido a ambiente corrosivo. Para tal foi utilizado o processo GMAW e uma máquina de ensaios de eixo rotativo com frequência de 50 Hz para os ensaios de fadiga. Foram preparadas amostras em uma solução de 3,5% de NaCl e outras em condições normais (ar) para comparação e a partir dos ensaios foram obtidas as curvas apresentadas na Fig. 7, nela também há a curva S-N para a liga metálica ST-37 (obtida por métodos convencionais) que possui similaridades com o arame ER70S-6. A resistência à fadiga para a liga de ER70S-6 produzida por manufatura aditiva (em ambiente com ar) foi pouco menor que a liga convencional, sendo os valores de tensão (10^8 ciclos) de 220 MPa 230 MPa respectivamente. Para a amostra de ER70S-6 a diferença de resistência entre a amostra em solução salina e em ar foi expressiva, sendo que para 10^8 ciclos a resistência foi de 140 MPa e 220 MPa respectivamente. Os autores não comentam sobre a direção de retirada das amostras, entretanto os resultados para aproximadamente 10^6 ciclos condizem com os obtidos por Ayan e Kahraman (2022) com tensões entre 200 MPa e 250 MPa.

Após os ensaios, Ron *et al.* (2020) realizaram uma análise da região de fratura cujas superfícies são apresentadas na Fig. 8. Na Fig. 8a é possível observar a região de fratura para amostra exposta ao ar, nela há uma área mais lisa caracterizada pelo surgimento (na superfície) e crescimento de trinca e uma área rugosa, sendo este padrão de falha bem semelhante ao observado por Ermakova *et al.* (2023) e Pimenta (2022). Já na Fig. 8b é apresentada a superfície de fratura do corpo de prova submetido a solução corrosiva, nela é possível observar 3 estágios de propagação de trinca. Na porção inferior é constatada uma superfície lisa onde ocorreu o início da trinca, a segunda região, na porção central da amostra

corresponde ao crescimento da trinca e na parte superior, com superfície mais rugosa, ocorreu o processo final de falha por sobrecarga nesta amostra são observados dois sítios de início de trinca no qual o autor atribui a origem à interação da solução corrosiva com descontinuidades do material (inclusões, porosidade e falta de fusão).

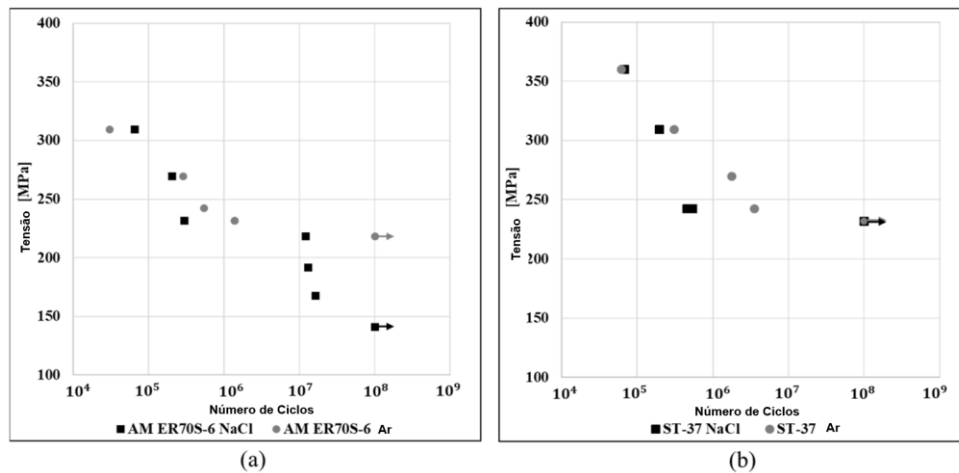


Figura 7. Curva S-N para amostras em solução de NaCl e ar: (a) ER70S-6 (b) liga ST-37 (adaptado de Ron *et al.*, 2020)

A Fig. 8c apresenta uma aproximação da superfície de fratura com alguns poros presentes. Tal porosidade é comum de ser observada em peças produzidas por manufatura aditiva e pode afetar o desempenho em fadiga do material. Sales, Kotousov, Yin (2021) relata também a presença de porosidade gerada no processo de deposição para a liga de aço inoxidável super duplex (ER2594) produzida pelo processo CMT convencional, sendo que tal defeito afetou de maneira negativa o desempenho à fadiga do material, resultando no surgimento de trincas e falha precoce do material.

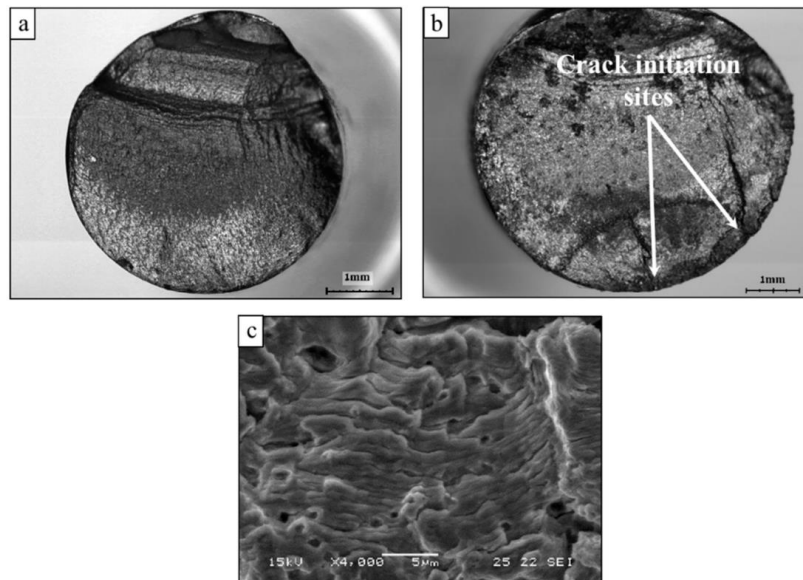


Figura 8. Região de fratura ER70S-6: (a) Ar (b) Solução de NaCl (c) Porosidade (Ron *et al.*, 2020)

Smismans *et al.* (2021) realizaram a deposição do arame G3Si1 (correspondente ao ER70S-6 para a norma da AWS (*American Welding Society*)) através do processo GMAW convencional em modo sinérgico com objetivo de comparar a resistência à fadiga da peça sob diferentes tratamentos térmicos. Os autores prepararam amostras (todas verticais) usinadas sem tratamento térmico (DED-Arc-M), amostras temperadas a 950°C por 30 min (DED-Arc-MQ) e amostras temperadas e revenidas à 180 °C e 220°C (DED-Arc-MQT@T1 e DED-Arc-MQT@T2, respectivamente). Os ensaios foram conduzidos numa máquina de viga rotativa e a partir dele e de dados de outros autores (Bartsch *et al.* (2021)) foi obtida a curva da Fig. 9. A amostra apenas usinada suportou tensões de 206 MPa para valores de 10^6 ciclos, próximo ao observado por Ayan e Kahraman (2022) (220 MPa) no mesmo tipo de ensaio. Todas as peças que foram submetidas a algum tratamento térmico apresentaram uma resistência maior que a apenas usina, sendo a amostra temperada (DED-Arc-MQ) a que apresentou a melhor resistência à fadiga (331 MPa) para 10^6 ciclos.

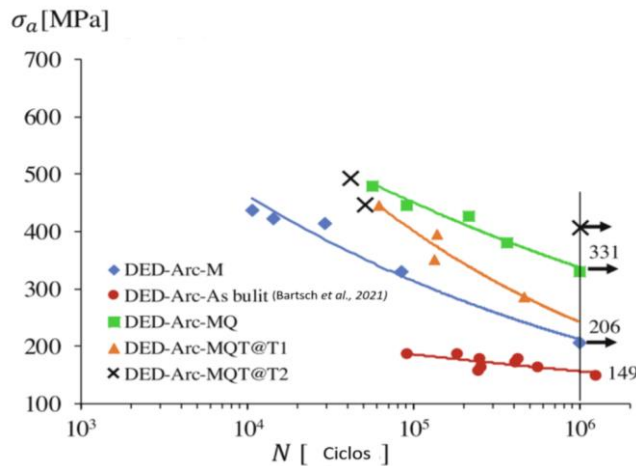


Figura 9. Curva S-N para amostras de G3Si1 submetidas a diferentes etapas de tratamento térmico (adaptado de Smismans *et al.*, 2021)

Após a falha foi avaliada a superfície de fratura para as diversas amostras, sendo observado que o início da trinca teve origem na superfície das amostras e as etapas de crescimento e mecanismos de estrias e *dimples* foram indicados pelas imagens I-IV da Fig. 10. Os mecanismos de propagação de trinca observados por Smismans *et al.* (2021) foram os mesmos observados por Pimenta (2022) e Ermakova *et al.* (2023), sendo compostos de um início trinca na superfície seguido pela propagação da trinca via estrias nos estágios II e III há e a fase de fratura dúctil, constatada pela presença de *dimples*.

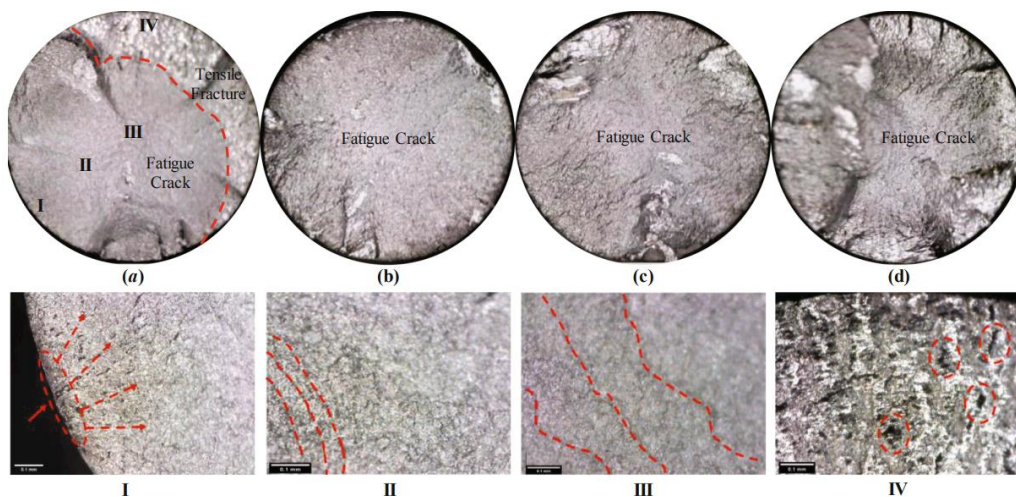


Figura 10. Região de fratura para amostras de G3Si1 (a) DED-Arc-M (b) DED-Arc-MQ (c) DED-Arc-MQT@T1 (d) DED-Arc-MQT@T2 (adaptado de Smismans *et al.*, 2021)

Dirisu *et al.* (2020) avaliou os efeitos da laminação pôr rolos durante o processo de deposição no desempenho em fadiga de peças impressas. Para tal, utilizando o processo CMT convencional e o arame ER70S-6 os autores dividiram as amostras em: sem usinagem, usinadas e laminadas (com força de 160 kN) sem usinagem para realização de ensaios de fadiga, que foram conduzidos com uma frequência de 10 Hz e razão de carga $R = 0,1$. A partir da curva S-N obtida foi constatado que a peça usinada apresentou melhor resistência à fadiga quando comparada às demais, a sem usinagem apresentou o pior desempenho e as amostras laminadas apresentaram um rendimento intermediário. Na ordem de 10^6 ciclos as peças usinadas e as laminadas apresentaram resultados de tensões muito próximas aos obtidos por Ermakova *et al.* (2023) com tensões de aproximadamente 400 MPa.

Os autores também avaliaram a superfície de fratura das amostras, sendo observados os mecanismos de fratura em cada uma das diferentes condições. A Fig. 11 apresenta a fratura da amostra usinada submetida a 492 MPa de tensão na qual o autor atribui a falha a um modo de fratura dúctil por meio de coalescência de microvazios (Fig. 11a). Na Fig. 11 são observadas também regiões de propagação de trincas por mecanismo dúctil, bem como *dimples* e microtrincas. A análise desta superfície de fratura se distingue dos anteriormente apresentados; sendo uma possível justificativa para tal o diâmetro do arame utilizado, de 0,18 mm enquanto em outros trabalhos são comumente utilizados diâmetros maiores (de 0,8 mm ou 1,2 mm).

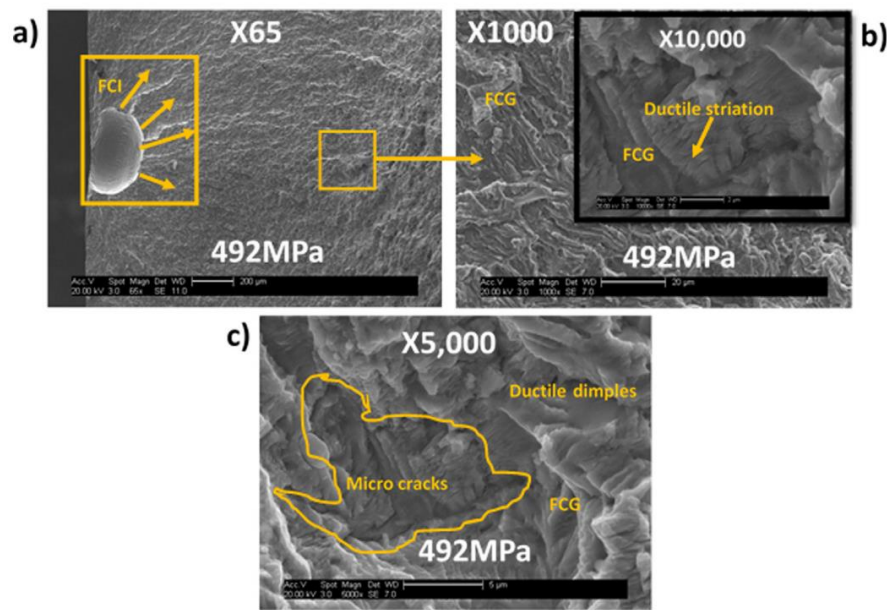


Figura 11. Região de fratura para amostras de ER70S-6 usinadas (Dirisu *et al.*, 2020)

A fim de permitir uma melhor comparação entre os trabalhos apresentados, bem como entender as diferenças entre os parâmetros utilizados, foi montada a Tabela 1, que sintetiza os parâmetros de ensaio e resultados encontrados pelos autores supracitados. Nesta tabela é possível observar como as diferenças nos parâmetros de geometria, tipo de ensaio e considerações sobre números de ciclos afetam a resistência à fadiga nos materiais.

Tabela 1. Parâmetros de ensaio e resultado resistência encontrada por autores

Autores	Tipo de Ensaio	Geometria da seção transversal do CP	Razão de Carga (R)/ Frequência (Hz)	Número de Ciclos Considerados	Resistência à Fadiga MPa
Ermakova <i>et al.</i> (2023)	Trativo Uniaxial	Circular	0,01/20	2×10^6	384 (Horizontal)
Pimenta (2022)	Trativo Uniaxial	Retangular	0,1/20	2×10^6	302,04 (Horizontal)
Ayan e Kahraman (2022)	Flexão	Retangular	-/10	10^7	176 (Horizontal)
Ayan e Kahraman (2023)	Flexão	Retangular	-/10	10^7	170 (Vertical)
Ron <i>et al.</i> (2020)	Flexão Rotativa	Circular	-/50	10^8	220 (Ar)
Smismans <i>et al.</i> (2021)	Flexão Rotativa	Circular	-/-	10^6	331 (Vertical Temperada)
Dirisu <i>et al.</i> (2020)	Tensão-Tensão	Retangular	0,1/10	10^7	~ 250 (Horizontal, usinada)

5. CONCLUSÕES

Tendo em vistas a relevância dos processos de manufatura aditiva por deposição a arco na atualidade e para aplicações futuras, bem como as implicações das falhas por fadiga e mecanismos de fratura, conclui-se que:

- É observado um comportamento anisotrópico na resistência à fadiga em peças impressas, sendo que na maioria dos casos as amostras verticais apresentam melhor resistência à fadiga;
- A vida em fadiga de peças impressas pode ser melhorada com aplicação de tratamentos térmicos ou processos de conformação mecânica;
- Para ensaios uniaxiais trativos de fadiga o arame ER70S-6 “vida infinita” (10^6 ciclos) para tensões entre 300 MPa e 400 MPa;
- De modo geral as peças de ER70S-6 produzidas pelo processo GMAW apresentam modelos de falha dúctil e frágil para fadiga, com estrutura de *dimples* e estrias bem definidas;
- A versatilidade do processo CMT em termos de qualidade e possibilidade de materiais tem feito com que este processo tenha ganhado relevância no âmbito científico e sendo estudado em amostras de diferentes materiais para fadiga;

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia Mecânica (ENM), Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB) pelo apoio e suporte laboratorial/financeiro. CNPq (processo 405499/2022-1).

7. REFERÊNCIAS

- Ayan, Y., and Kahraman, N., 2022. Bending fatigue properties of structural steel fabricated through wire arc additive manufacturing (WAAM). *Engineering Science and Technology, an International Journal*, p. 101247.
- Ayan, Y., and Kahraman, N., 2023. Fabrication and Fatigue Properties of Dissimilar Steel Functionally Graded Material Structure Through Wire Arc Additive Manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance*; p. 1-11.
- Baker, R., 1925. U.S. Patent No. 1,533,300. Washington, DC: *U.S. Patent and Trademark Office*.
- Bandyopadhyay, A., Traxel, K. D., Lang, M., Juhasz, M., Eliaz, N., and Bose, S., 2022. Alloy design via additive manufacturing: Advantages, challenges, applications and perspectives. *Materials Today*.
- Bartsch, H., Kühne, R., Citarelli, S., Schaffrath, S., and Feldmann, M., 2021. Fatigue analysis of wire arc additive manufactured (3D printed) components with unmilled surface. *In Structures*; Vol. 31, p. 576-589.
- Budynas, R. G. and Nisbett, J. K., 2016. *Elementos de Máquinas de Shigley*. AMGH Editora Ltda, 10ª edição.
- Callister, W. D., 2016. *Ciência de Engenharia de Materiais*. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora, 9ª edição.
- Dowling, N. E., 2013. *Mechanical Behavior of Materials*. Pearson Education, 4ª edição.
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., and Yaman, U., & Dolen, M., 2017. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*; Vol. 11, p. 545-554.
- Dirisu, P., Supriyo, G., Martina, F., Xu, X., and Williams, S., 2020. Wire plus arc additive manufactured functional steel surfaces enhanced by rolling. *International Journal of Fatigue*; Vol.130, p. 105237.
- Ermakova, A., Mehmanparast, A., Ganguly, S., Razavi, J., and Berto, F., 2020. Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*; Vol. 109, p. 102685.
- Ermakova, A., Mehmanparast, A., Ganguly, S., Razavi, J., and Berto, F., 2022. Fatigue crack growth behaviour of wire and arc additively manufactured ER70S-6 low carbon steel components. *International Journal of Fracture*; Vol. 235(1), p. 47-59.
- Ermakova, A., Razavi, J., Berto, F., and Mehmanparast, A. (2023). Uniaxial and multiaxial fatigue behaviour of wire arc additively manufactured ER70S-6 low carbon steel components. *International Journal of Fatigue*; Vol. 166, p. 107283.
- Furukawa, K., 2006. New CMT arc welding process—welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. *Welding international*; Vol. 20(6), p. 440-445.
- Milewski, J. O., 2017. Additive manufacturing of metals. Cham, Switzerland: *Springer International Publishing AG*.
- Novelino, A.L.B., Carvalho, G.C. and Ziberov, M., 2022. Influence of WAAM-CMT deposition parameters on wall geometry. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, Vol. 5, 100105, ISSN 2666-9129, <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100105>.
- Pimenta, R.S., 2022. *Avaliação da resistência à fadiga em peças impressas através de manufatura aditiva por deposição a arco*. Trabalho de conclusão de graduação, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Ron, T., Levy, G. K., Dolev, O., Leon, A., Shirizly, A., and Aghion, E., 2020. The effect of microstructural imperfections on corrosion fatigue of additively manufactured ER70S-6 alloy produced by wire arc deposition. *Metals*; Vol. 10(1), p. 98.
- Sales, A., Kotousov, A., and Yin, L., 2021. Design against Fatigue of Super Duplex Stainless Steel Structures Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing Process. *Metals*; Vol. 11(12), p. 1965.
- Selvi, S., Vishvakshnan, A., and Rajasekar, E., 2018. Cold metal transfer (CMT) technology-An overview. *Defence technology*; Vol. 14(1), p. 28-44.
- Shamir, M., Igwemezie, V., Lotfian, S., Jones, R., Asif, H., Ganguly, S., and Mehmanparast, A., 2022. Assessment of mechanical and fatigue crack growth properties of wire+ arc additively manufactured mild steel components. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*; 45(10), 2978-2989.
- Smismans, T., Chernovol, N., Lauwers, B., Van Rymenant, P., and Talemi, R., 2021. Influence of post-heat treatments on fatigue response of low-alloyed carbon-manganese steel material manufactured by Direct Energy Deposition-Arc technique. *Materials Letters*; Vol. 302, p. 130465.
- Tomlin, M., and Meyer, J., 2011. Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part. *In Proceeding of the 7th Altair CAE technology conference*.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

THEORETICAL STUDY OF THE FRACTURE MECHANISM OF PARTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Daniel Víctor Carvalho Lima

Daniel Monteiro Rosa

Maksym Ziberov

University of Brasilia, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Zip code 70910-900, Brasília-DF, Brazil.

daniel.victorc777@gmail.com

danielrosa@unb.br

mziberov@unb.br

Abstract. *The additive manufacturing process has become increasingly relevant and accessible in current times due to the possibility of creating parts with more complex geometries and unfeasible to be produced by conventional processes such as casting, machining and forming, expanding the horizons in the scope of designing and manufacturing parts. Therefore, it is important to study and establish the mechanical properties of parts produced by additive manufacturing in order to guarantee the reliability that is necessary for certain applications. Therefore, the study of the fracture and its mechanisms are a relevant way to predict and to understand the failure mechanisms of parts manufactured by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) that experienced cyclic stresses. In this sense, the present work aims to elaborate a review about the fatigue properties of ER70S-6 parts manufactured by the Gas Metal Arc Welding process as well as to submit their fracture interrupters. To achieve this objective, a review will be carried out on studies related to fatigue in printed metallic parts and works related to fracture in parts maintained under such stresses. Through the analysis carried out, it was possible to notice that the fatigue behavior of parts manufactured by additive manufacturing and, consequently, their fracture pattern changed according to the deposition and test parameters, it was also noted that it is possible to improve the resistance to fatigue of this parts through processes of mechanical conformation and thermal treatments. In addition, the study of parts deposited in different directions presented a strong anisotropic behavior, considering the diverse fracture patterns found.*

Keywords: Additive Manufacturing; WAAM; ER70S-6; Fatigue; Fracture Mechanism.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.