

RESISTÊNCIA À FADIGA EM PEÇAS OBTIDAS VIA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) – UMA REVISÃO

Rodrigo Souza Pimenta, souzapimentarodrigo@gmail.com

André Luiz Brito Novelino, andre_novelino@hotmail.com

José Alexander Araújo, alex07@unb.br

Maksym Ziberov, mzyberov@unb.br

Univesidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Darcy Ribeiro, Asa norte, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.

Resumo: O uso da manufatura aditiva em processos industriais tem apresentado grande aumento nos últimos anos, resultado das melhorias que este método de fabricação pode causar, como por exemplo: aumento da automatização, produção de peças com geometrias complexas, utilização otimizada de material com redução do desperdício e, consequentemente, redução dos custos de fabricação. Sendo assim, a análise dos parâmetros envolvidos na fabricação e suas consequências nas propriedades do produto final se tornam essenciais para alcançar um projeto seguro e com qualidade. Dentre as propriedades dos materiais, o comportamento à fadiga apresenta grande relevância, dado que a maioria das falhas em máquinas ocorrem por este fator, que possui como característica um nível de tensão significativamente inferior ao limite de escoamento e ocorre de forma súbita, sem sinais como grande deflexões, o que a torna muito perigosa, despertando o interesse de engenheiros por muitos anos. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o comportamento à fadiga dos materiais fabricados por manufatura aditiva, especificamente pelo método Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), apresentando os principais aspectos e propriedades que caracterizam o processo. Para isso, este artigo foi dividido em função do método de deposição para favorecer a análise e discussão das características de cada método. Assim, foi possível identificar vantagens e desvantagens, bem como semelhanças e diferenças entre os métodos. Com a análise foi possível notar que o fator anisotrópico possui grande influência no comportamento à fadiga na manufatura aditiva; diferentes estratégias e métodos de deposição alteram as características das microestruturas e, consequentemente, as propriedades dos materiais.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, WAAM, CMT, PAW, Fadiga

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço das tecnologias e a necessidade de atender as mais diversas demandas, a indústria têm buscado melhorar os métodos de produção, a fim de alcançar uma produção otimizada em relação a tempo, qualidade, volume de produção e lucros finais. É neste âmbito que surge a Manufatura Aditiva (MA), um método de fabricação que permite a criação de produtos de forma rápida e personalizada. Diferentes setores têm adotado a manufatura aditiva em seus processos. Na indústria automotiva a MA forneceu oportunidades para *designs* mais flexíveis, otimizados e robustos, produtos mais leves, fortes e seguros com prazos e custos reduzidos. Segundo Najmon *et al.* (2019), todos os setores da indústria aeroespacial como aeronaves, aplicações militares e sistemas de mísseis já estão utilizando processos de manufatura aditiva. Também se destacam a indústria médica e odontológica, com a fabricação de modelos personalizados adaptados às necessidades dos pacientes, indústrias de construção, mineração, óleo e gás (Vafadar *et al.*, 2021).

Dentre os processos de manufatura aditiva destaca-se o *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM), também conhecido como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), um método de deposição metálica por energia direcionada, este método tem atraído grande interesse tanto do campo acadêmico quanto industrial (Rosli *et al.*, 2021). Isso ocorre devido à sua capacidade de criar grandes componentes de metal com alta taxa de deposição e baixo custo de equipamento (Wu *et al.*, 2018). Para alguns autores, como Vimal *et al.* (2020), WAAM é a técnica mais avançada usada para manufatura aditiva de metais. Dado o grande potencial dessa tecnologia, a análise dos parâmetros envolvidos na fabricação e suas consequências nas propriedades do produto se tornam essenciais para alcançar um projeto seguro e com qualidade.

A maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. Essas falhas ocorrem, geralmente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais (Norton, 2013). Sendo assim, o estudo da vida em fadiga dos materiais é de extrema importância

na execução de um projeto seguro. Para peças fabricadas por manufatura aditiva não é diferente. Como muitas indústrias estão investindo nessa metodologia em seus processos, garantir que elas suportarão os esforços cíclicos é necessário.

Sendo assim, este artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica acerca do comportamento à fadiga resultante de diferentes parâmetros e métodos relacionados à Manufatura Aditiva por Deposição à Arco, apresentando, através da literatura, as principais características e avanços recentes na área.

2. RESISTÊNCIA À FADIGA EM PEÇAS IMPRESSAS

A falha por fadiga é um fenômeno que chama a atenção de engenheiros há muito tempo, sendo observado pela primeira vez por volta de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar após um pequeno período em serviço. Apesar de serem feitos de aço dúctil, eles exibiam características de fraturas frágeis e repentinas. Rankine publicou um artigo em 1843, “as causas da ruptura inesperada de munhões de eixos ferroviários”, no qual dizia que o material havia “cristalizado” e se tornado frágil devido às tensões flutuantes (Norton, 2013).

O processo de falha por fadiga pode ser dividido em 3 estágios. O primeiro estágio é a iniciação de uma ou mais microtrincas devido à deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica que se estende de dois a cinco grãos da origem. Trincas do estágio 1 normalmente não são discerníveis a olho nu. No estágio 2 a fratura progride de microtrincas a macrotrincas, formando superfícies de fratura tal qual platôs paralelos separados por sulcos paralelos. Essas superfícies podem ter bandas onduladas claras e escuras, conhecidas como marcas de praia ou marcas de concha de ostra. No estágio 3, o material remanescente não consegue suportar as cargas, resultando em uma fratura rápida e repentina (Budynas; Nisbett, 2011).

Com o avanço das tecnologias e o aumento do uso da manufatura aditiva de metais na fabricação de peças, o estudo da fadiga sobre este processo se torna de grande importância para garantir a segurança durante o trabalho. É por este motivo que vários autores têm abordado o tema em suas pesquisas, contribuindo com a caracterização destes materiais. Sendo assim, este estudo apresenta uma relação de trabalhos publicados sobre o tema, separando cada estudo de acordo com o método de deposição utilizado.

2.1. Processo GMAW

A deposição a arco com proteção gasosa GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é um processo produzido pelo aquecimento entre a base metálica com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos, sendo a utilização de gás inerte conhecida como processo MIG (*Metal Inert Gas*) e a utilização de gás ativo conhecida como processo MAG (*Metal Active Gas*) (Modenesi *et al.*, 2005). A Fig. 1 apresenta um modelo esquemático do processo WAAM baseado em GMAW. O diâmetro do arame utilizado está na faixa de 0,6 mm a 1,6 mm, podendo fabricar peças de alumínio, cobre, aço, latão, titânio e ligas de níquel (Vimal *et al.*, 2020). A taxa de deposição de WAAM baseado em GMAW é 2-3 vezes maior do que os métodos baseados em GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) ou PAW (*Plasma Arc Welding*). No entanto, o WAAM baseado em GMAW é menos estável e gera mais fumaça de solda e respingos devido à corrente elétrica agindo diretamente na matéria-prima (Wu *et al.*, 2018).

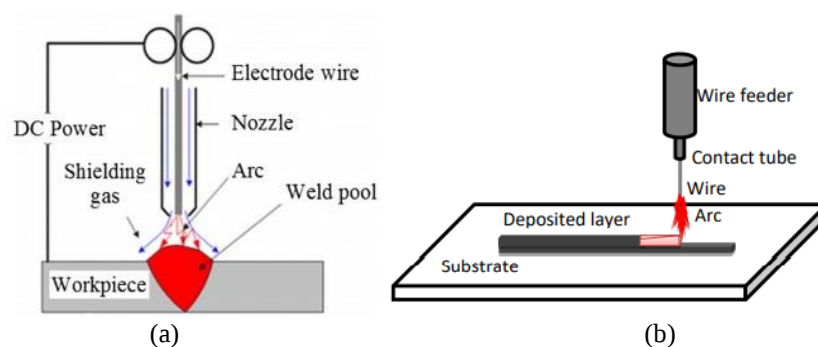


Figura 1. (a) Diagrama esquemático da tocha utilizada no processo GMAW (DING *et al.*, 2015); (b) Representação do processo de deposição pelo método GMAW (Kumar *et al.*, 2019).

Em seu trabalho, Wächter *et al.* (2020) utilizaram do método GMAW para testar a influência da orientação dos corpos de prova (CPs) e da temperatura de interpasse nas características à fadiga. Foram avaliados CPs extraídos nas direções paralela e perpendicular à direção de deposição, em paredes fabricadas mantendo uma temperatura de interpasse de 150°C e 300°C. Os resultados do limite de resistência à fadiga, apresentados pela Tab. 1, mostram que não há uma tendência de melhor orientação do corpo de prova, já que, para uma temperatura de interpasse de 150°C as amostras paralelas apresentaram melhor resposta, o que não se repetiu para a temperatura de 300°C. Comparando os resultados quanto à temperatura de interpasse, foi possível concluir que é possível manter a temperatura a 300°C, já que o processo de fabricação se torna mais rápido e a resistência à fadiga é levemente maior quando comparada à temperatura de 150°C.

Tabela 1. Limites de resistência à fadiga a 5×10^6 ciclos, probabilidade de falha de 50% (adaptado de Wächter, 2020).

Interlayer, Temp./°C	Extraction, Direction	Fatigue Limit, $\sigma_{a,E}$ /MPa
150	Lengthwise	256
150	Crosswise	254
300	Lengthwise	263
300	Crosswise	267

Duraisamy, *et al.* (2021) também utilizaram a tecnologia GMAW e avaliaram a influência da direção de deposição para a vida a fadiga em peças de aço inoxidável 347. As amostras obtidas, denominadas HD (*Horizontal Deposition*) para a direção horizontal e VD (*Vertical Deposition*) para a direção vertical, foram ensaiadas seguindo uma razão de carregamento de 0,10 para uma frequência de 15 Hz, e regimes de carregamento de 45% a 75% da tensão de escoamento do material para a obtenção dos dados da curva. Os autores obtiveram uma resistência a fadiga de 135 MPa para as amostras HD e 128 MPa para as amostras VD, para um carregamento de 2×10^6 ciclos. Os resultados obtidos para as direções estão apresentados na Fig. 2 através de suas curvas S-N, um modelo gráfico que relaciona um valor de tensão à quantidade de ciclos até a falha do material para essa carga.

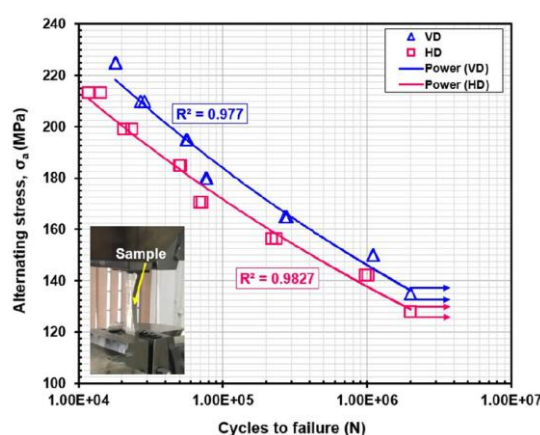


Figura 2. Curvas S-N obtidas para as amostras HD e VD (Duraisamy, *et al.*, 2021).

2.2. Processo PAW

A manufatura aditiva PAW utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio para estabelecer o arco elétrico com a peça sob um gás de proteção. O processo é de alta densidade de energia, onde o arco é forçado a passar por um orifício colocado entre o cátodo e o ânodo que restringe o arco, resultando em um aumento da estabilidade do arco (Rodrigues *et al.*, 2019). A zona termicamente afetada dos cordões feitos através do PAW é estreita, o que permite um melhor controle da geometria do cordão de solda devido à maior facilidade de controlar independentemente a corrente e a velocidade da alimentação de arame (Wang *et al.*, 2011 *apud* Rodrigues *et al.*, 2019). A Figura 3 apresenta um modelo esquemático do processo PAW.

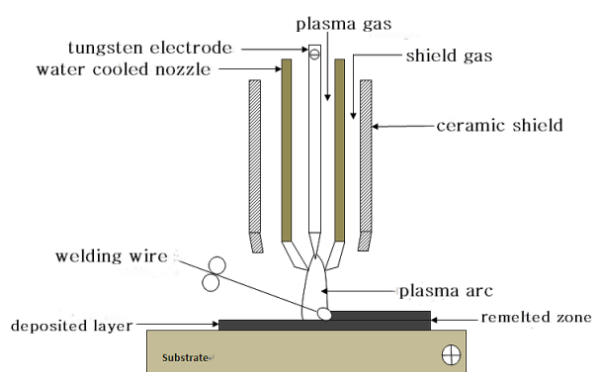


Figura 3. Diagrama esquemático do processo de manufatura aditiva por PAW (Zeli *et al.*, 2021).

Em seu trabalho, Syed *et al.* (2021a) utilizam do método PAW para comparar a resposta à fadiga para diferentes estratégias de deposição: oscilação e passe paralelo, e posição de corpo de prova: horizontal e vertical, comparando com

valores típicos obtidos por fundição (*cast*) e forjamento (*wrought*). Para a fabricação foi utilizado o material do arame uma liga Ti-6Al-4V. Através de ensaios de fadiga de alto ciclo foram obtidas as curvas S-N apresentadas pela Fig. 4, onde é possível perceber uma resistência à fadiga das peças depositadas superior às peças fundidas e apenas marginalmente inferior às peças forjadas, com exceção das amostras horizontais da deposição por oscilação a 500 MPa. Segundo os autores, a microestrutura mais fina obtida na deposição paralela resultou em uma maior resistência à iniciação de trincas, e então, um maior limite à fadiga em relação às amostras horizontais da deposição por oscilação.

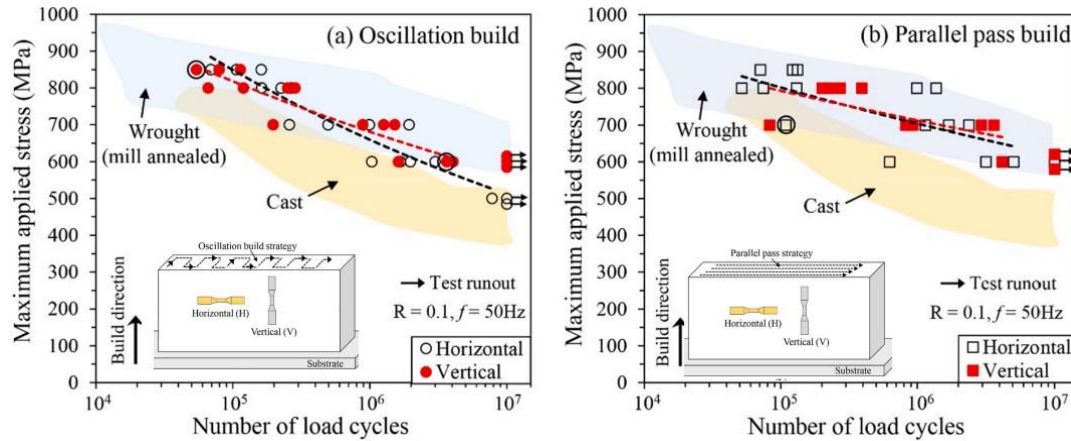


Figura 4. Curvas S-N para as estratégias de deposição por oscilação (a) e paralelo (b) nas posições horizontal e vertical em comparação com a fadiga na fundição e forjamento (adaptado de Syed *et al.*, 2021a).

Outro fator determinante na resistência à fadiga em peças impressas é a presença de porosidade. Biswal *et al.* (2019) utilizaram a manufatura aditiva a plasma para fabricarem duas diferentes paredes, uma feita com um grupo controlado de liga de titânio Ti-6Al-4V sem porosidades (amostra referência) e outro grupo do mesmo material, porém com arames contaminados (amostra de porosidade), que causam porosidade. Após a análise da presença de poros, foram feitos corpos de prova sem defeitos e com poros menores que 100 μm a partir das amostras referência, e corpos de prova com poros maiores que 100 μm . O resultado, apresentado na Fig. 5, mostra como a porosidade causa um impacto nas propriedades do material, diminuindo em cerca de 33% sua vida à fadiga.

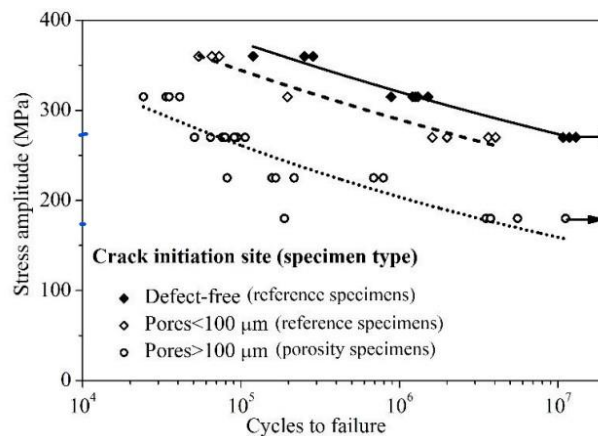


Figura 5. Curva S-N para comparação entre as amostras de referência e amostras de porosidade (Biswal *et al.*, 2019).

Como continuidade ao trabalho de Biswal, Akgun *et al.* (2021) focaram a pesquisa para o Ti-6Al-4V, estudando a formação e comportamento dos defeitos e quantificando a dispersão da vida à fadiga com o aumento do tamanho dos defeitos. A metodologia das amostras contaminadas foi similar ao trabalho de Biswal *et al.* (2019). Os ensaios de fadiga foram realizados com carga controlada, utilizando uma razão de tensão cíclica de 0,1, com frequência de carregamento de 10 Hz, menor que a frequência de 50 Hz utilizada no trabalho anterior. Após cada ensaio, foi realizada a análise da superfície fraturada, identificando o defeito do qual se iniciou a propagação de trincas. Com os resultados, gerou-se as curvas S-N para as amostras e os diagramas Kitagawa-Takahashi (K-T) para determinação da performance a fadiga baseado no tamanho do defeito. De acordo com as análises, determinou-se um diâmetro do poro crítico de 85 μm , onde para valores superiores, a vida para fadiga reduziu com magnitude de 2. Porém constatou-se pelos ensaios experimentais do trabalho que os poros não tiveram um comportamento similar às trincas, como prevê o diagrama K-T. De acordo com

a análise, o comportamento dos defeitos se aproximou mais com os entalhes, podendo ser relacionados a um fator de concentração de tensão equivalente e que varia em função da microestrutura da região.

O estágio de propagação da trinca também é alvo de diversos estudos, por exemplo, Zhang *et al.* (2016) avaliaram a taxa de propagação da trinca em amostras de Ti-6Al-4V fabricadas pelo método PAW considerando diferentes posições da trinca inicial: perpendicular e paralelo à direção de deposição. Como resultado, apresentado pela Fig. 6, a propagação da trinca na direção perpendicular à direção de deposição ocorreu de forma levemente mais rápida quando comparada à direção paralela, porém essa diferença está dentro da dispersão dos dados. Através da Fig. 6 também é notado que a taxa de propagação da trinca nas amostras depositadas está entre os valores típicos para a mesma liga fabricada por forjamento e fundição.

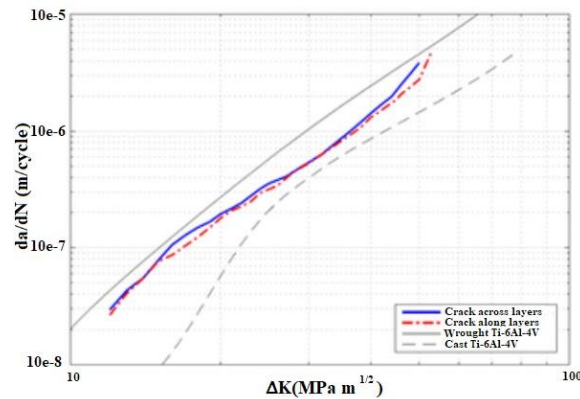


Figura 6. Comparação entre a taxa de propagação da trinca em diferentes orientações em relação aos valores da fundição e forjamento (Zhang *et al.*, 2016).

Dando continuidade ao seu estudo de estratégias de deposição, Syed *et al.*, (2021b) avaliam de forma análoga a Zhang *et al.* (2016) a propagação de trincas durante a fadiga em amostras fabricadas de Ti-6Al-4V pelo método PAW. Além da posição da trinca inicial, são analisadas também a influência das estratégias de deposição (passe único, passes paralelos e oscilação) na propagação das trincas. Diferentemente dos resultados encontrados por Zhang *et al.* (2016), para todas as estratégias de deposição, a propagação da trinca na direção perpendicular à direção de deposição ocorreu de forma mais lenta quando comparada à direção paralela, conforme a Fig. 7. Dentre as estratégias de deposição, a utilização de oscilação resultou nas taxas mais lentas de propagação da trinca.

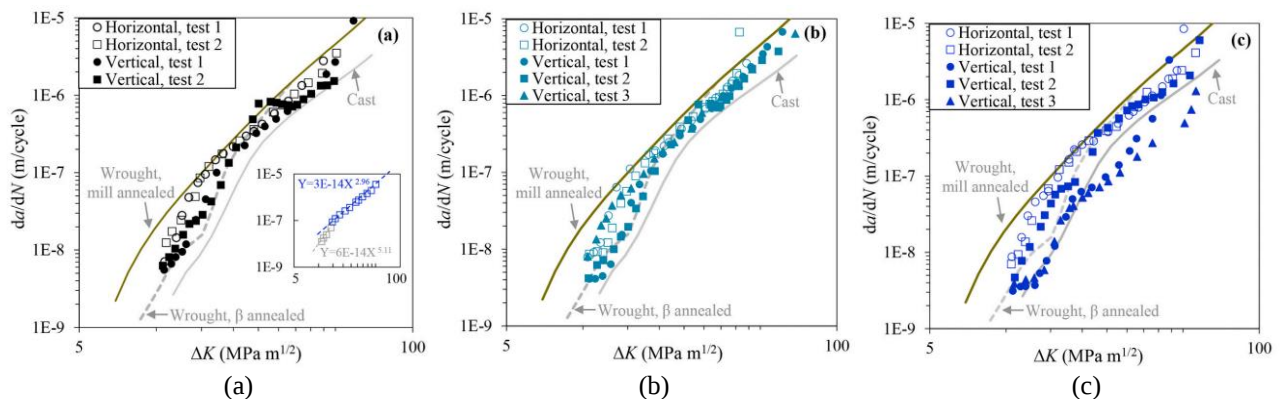


Figura 7. Taxa de crescimento das trincas para as estratégias de deposição: (a) Passe único; (b) Passes paralelos; (c) Oscilação (Syed *et al.*, 2021b).

2.3. Cold Metal Transfer

O *Cold Metal Transfer* (CMT) é um processo de soldagem MIG modificado que foi inventado pela empresa Fronius. A principal inovação é que os movimentos do arame foram integrados ao processo de soldagem e ao controle geral do processo (Feng *et al.*, 2009). O procedimento é relativamente novo e atualmente apresenta uma ampla variedade de aplicações como em revestimentos, manufatura aditiva, fabricação de pinos compósitos de juntas e soldagem para reparo de rachaduras (Selvi *et al.*, 2018).

O CMT utiliza um sistema inovador de alimentação de arame integrado ao controle digital de alta velocidade para controlar não apenas o comprimento do arco durante a soldagem, mas também o método de transferência de material e a quantidade de calor transferida para a peça de trabalho (Pickin; Young, 2006). Quando a ponta do arame do eletrodo faz contato com a poça fundida, o servomotor da tocha de soldagem é revertido pelo controle de processo digital. Isso faz

com que o arame retraia, promovendo a transferência de gotículas (Selvi *et al.*, 2018). Durante a transferência de metal, a corrente cai para quase zero e, portanto, qualquer geração de respingos é evitada. Assim que a transferência de metal é concluída, o arco é reacendido e o arame é alimentado para frente mais uma vez com o refluxo da corrente de soldagem definida.

Nos trabalhos de Emakova *et al.* (2021a) e Emakova *et al.* (2021b), estudou-se a propagação de trincas devido à fadiga em peças extraídas de paredes fabricadas pelo método CMT convencional, utilizando como materiais os arames ER70S-6 e ER100S-1 respectivamente. Foram avaliados fatores como a orientação da amostra (propagação de trinca paralela, representada pela letra “H”, ou perpendicular à direção de deposição, representada pela letra “V”), e a localização na parede (porção superior ou inferior). Para o primeiro estudo, os resultados, apresentados pela Fig. 8 (a), mostraram que para um nível de carga de 10 kN, a velocidade de propagação ao longo da deposição foi duas vezes mais lenta em relação à direção perpendicular, mas, para uma carga de 11 kN, a direção perpendicular apresentou uma vida a fadiga 1,3 vez maior. Já o segundo trabalho mostrou que a propagação das trincas de amostras das porções inferiores, representadas pela letra “B”, foram em média 3,9 vezes mais lenta quando comparadas às amostras das porções superiores, representadas pela letra “T”. Além disso, como apresentado pela Fig. 8 (b), a taxa de crescimento das trincas das regiões inferiores foi similar, no entanto, as amostras superiores apresentaram grandes variações.

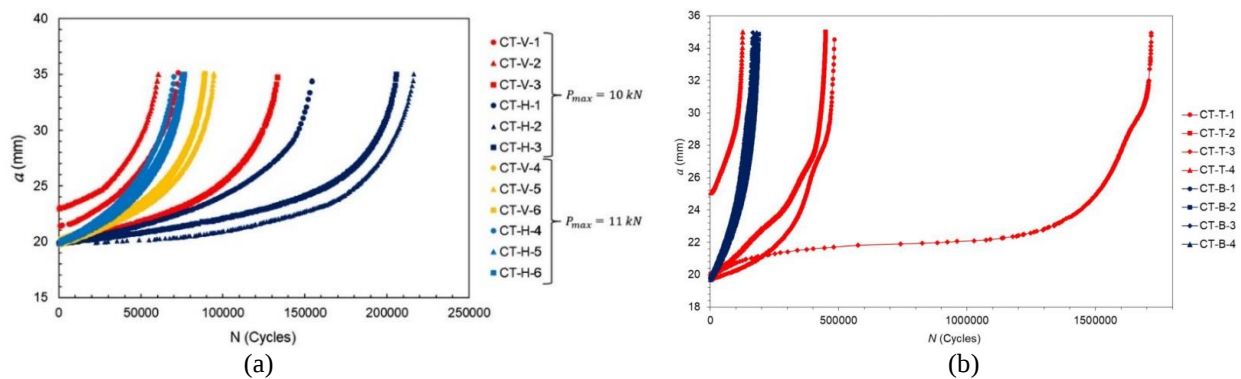


Figura 8. (a) Curva do crescimento da trinca em função do número de ciclos para as amostras verticais (V) e horizontais (H) (Ermakova *et al.*, 2021a); (b) Curva do crescimento da trinca em função do número de ciclos para amostras de regiões superiores (T) e inferiores (B) (Ermakova *et al.*, 2021b).

Um detalhamento sobre a propagação das trincas na manufatura aditiva é realizado no trabalho de Wang *et al.* (2020), no qual amostras da liga de titânio Ti-6Al-4V fabricadas por CMT convencional foram analisadas através de microscópio eletrônico e os estágios da propagação das trincas foram avaliados. Inicialmente, uma única trinca inicial é formada devido à concentração de esforços no entalhe inicial feito na amostra (Fig. 9 (a)). Com o aumento da quantidade de ciclos, há a formação de trincas secundárias (Fig. 9 (b)) que, segundo os autores, desaceleram a taxa de propagação geral da trinca. O padrão final observado na trinca é uma forma de “zig-zag” aproximadamente perpendicular à direção da carga aplicada (Fig. 9 (c)). As imagens que descrevem as etapas para 11410, 17551 e 20852 ciclos, Fig. 9.

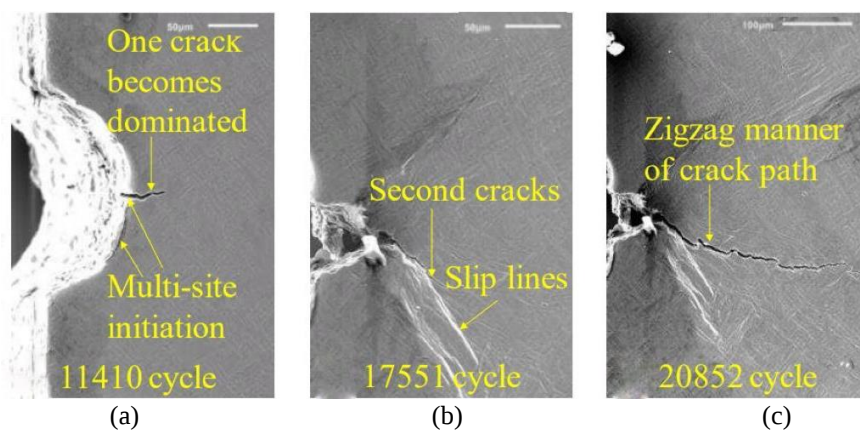


Figura 9. Comportamento da propagação da trinca durante o ensaio de fadiga (Wang *et al.*, 2020).

Ao estudar as características anisotrópicas da manufatura aditiva, Sales (2021) avalia a resposta à fadiga em amostras retiradas em diferentes orientações de paredes de ER2594 SDSS (*Super Duplex Stainless Steel*) depositadas pelo método CMT convencional. Comparando corpos de prova longitudinais (ao longo da direção de deposição) e transversais (perpendicular à deposição), foi possível observar uma forte anisotropia, na qual os primeiros apresentaram uma maior resistência à fadiga. Porém, os ensaios ainda apontaram propriedades à fadiga inferiores das amostras fabricadas por manufatura aditiva quando comparados aos valores de literatura dos SDSSs SAF2205 e SAF2507, como apresentado na Fig. 10.

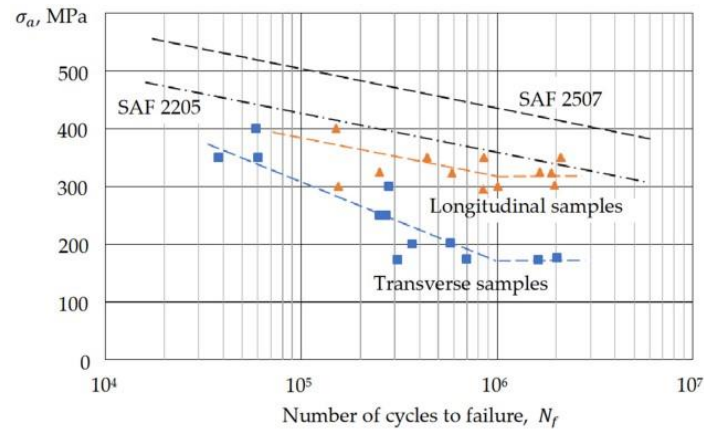


Figura 10. Curva S-N comparativa entre as amostras longitudinais, transversais e valores da literatura (Sales, 2021).

A comparação das propriedades de materiais fabricados por diferentes métodos de fabricação também é de grande importância para a caracterização dos processos. Li *et al.* (2022) fazem uma comparação entre a vida em fadiga do aço inoxidável 308 L fabricado por CMT convencional e por fundição com laminação a quente. Os resultados, apresentados pela Fig. 11, mostram que para altas amplitudes de tensão (1,0% e 0,8%) as amostras fabricadas por CMT convencional apresentam uma vida à fadiga levemente maior quando comparadas às amostras fabricadas por laminação à quente. Já para menores amplitudes de tensão o comportamento observado é o oposto. Segundo os autores, essa variação ocorre devido aos diferentes mecanismos de fratura, incluindo a iniciação e propagação das trincas.

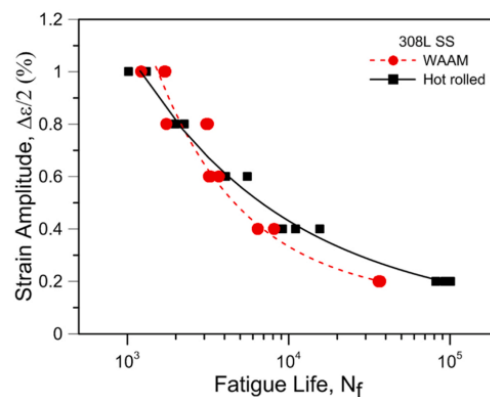


Figura 11. Relação entre amplitude de tensão e vida em fadiga para amostras de aço inoxidável fabricadas por CMT convencional e laminação a quente (Li *et al.*, 2022).

2.4. Processo híbrido *rolling* WAAM

O método de fabricação híbrido conhecido como *Hybrid Rolled Additive Manufacturing* (HRAM) é um método de impressão 3D com grande potencial, que combina o convencional WAAM com um processo de *micro-rolling*. Acredita-se que, devido à laminação entre as camadas, ocorre uma diminuição das tensões residuais, refinamento dos grãos e assim, melhoria das propriedades mecânicas desses materiais (Xie *et al.*, 2021). Um esquemático do método é apresentado pela Fig. 12. A utilização do processo híbrido de *micro-rolling* com o WAAM vem sendo estudado em diversos trabalhos. O trabalho de Xie *et al.* (2021) aborda a performance de peças fabricadas pela liga de alumínio Al-Mg4.5Mn utilizando o processo GMAW com e sem o processo híbrido de *micro-rolling*, processo de conformação *in loco*. As amostras fabricadas foram previamente avaliadas em um microtomógrafo para a identificação e mapeamento dos defeitos que possam ser potenciais geradores de trincas. Dois tipos diferentes de defeitos foram identificados, sendo os poros de gás e as regiões de pouca fusão, intitulados LOF (*lack of fusion*). Os autores indicam que com o processo de *micro-rolling* fecham ou reduzem o tamanho em cerca de 2/3 dos defeitos, obtendo um limite de fadiga de 86 MPa com uma taxa de sucesso de 95% dos ensaios. Já Dirisu *et al.* (2020) compararam a resposta em fadiga de amostras fabricadas com o arame ER70S-6 pelo método CMT convencional e CMT com *rolling*. Os resultados mostraram que, assim como em Xie *et al.* (2021), a utilização de um processo *rolling* juntamente com a deposição melhora a resposta à fadiga, segundo Dirisu *et al.* (2020) devido à diminuição da ondulação superficial. Os resultados encontrados para ambos os estudos estão apresentados pela Fig. 13.

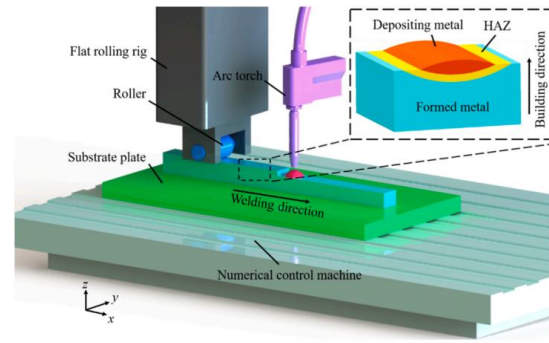


Figura 12. Esquemático do método de deposição híbrido HRAM e seus principais componentes (Xie *et al.*, 2021).

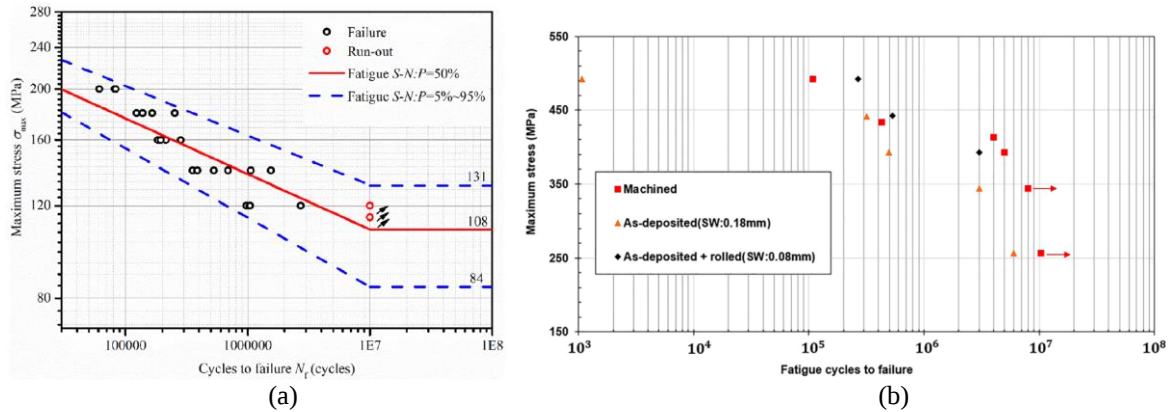


Figura 13. (a) Curva S-N probabilística para peças fabricadas por WAAM híbrido com *micro-rolling* (Xie *et al.*, 2021); (b) Comparação entre a resistência à fadiga entre os processos CMT convencional e CMT com *rolling* (Dirisu *et al.*, 2020).

Seguindo com a caracterização do processo híbrido *rolled* WAAM, Gao *et al.* (2021) analisaram o estágio de propagação da trinca em ensaios de fadiga da liga TC4-DT fabricados por WAAM e *rolled* WAAM. Como resultado, apresentado pela Fig. 14, o estudo mostrou que a propagação de trincas das amostras fabricadas por *rolled* WAAM apresentou uma taxa mais lenta quando comparado às amostras fabricadas por WAAM convencional. Segundo os autores, isso ocorre devido à menor presença de defeitos e uma estrutura de grãos mais fina do processo híbrido.

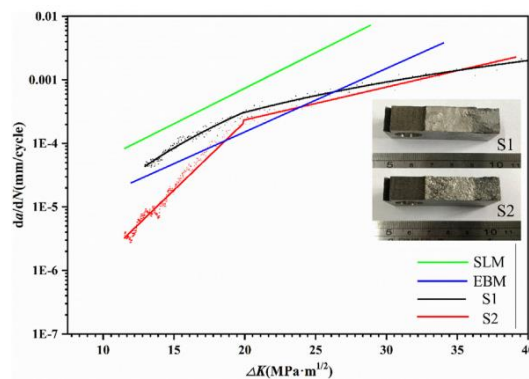


Figura 14. Taxa de propagação de trincas obtidas por ensaio de fadiga para os métodos de deposição WAAM (S1) e *rolled* WAAM (S2) em comparação com valores previamente obtidos por *selective laser melting* (SLM) e *Electron Beam Melting* (EBM) (Gao *et al.*, 2021).

3. CONCLUSÕES

Conforme apresentado neste trabalho, diversos estudos têm sido feitos acerca do comportamento à fadiga na manufatura aditiva por WAAM, contribuindo com o avanço deste importante setor da indústria. Através dos estudos apresentados é possível concluir que:

- Existe um fator de anisotropia no comportamento à fadiga em materiais fabricados por manufatura aditiva. Avaliando os trabalhos, foi possível notar as diferentes respostas em função da posição das amostras nas paredes depositadas, porém, ainda não foi obtido um padrão.

- Diferentes estratégias de deposição alteram a microestrutura e, consequentemente, a resposta à fadiga dos materiais.
- A presença de descontinuidades, como poros e trincas, é um fator altamente prejudicial às propriedades mecânicas dos materiais, podendo reduzir consideravelmente a vida em fadiga. A utilização de alguns métodos de deposição, como o HRAM, pode reduzir consideravelmente a presença dessas imperfeições, aprimorando as propriedades em fadiga dos materiais.
- Através da pesquisa bibliográfica foi possível perceber uma maior concentração de estudos de fadiga em alguns métodos de deposição, como PAW, GMAW, CMT e HRAM.
- Considerando, porém, a grande variedade de processos dentro do WAAM torna-se necessário um estudo mais diversificado para um melhor desenvolvimento nos processos de fabricação.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia Mecânica (ENM), Faculdade de Tecnologia (FT), Decanato de Ensino de Graduação (DEG), Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas (PCMEC) da UnB pelo apoio e suporte laboratorial/financeiro para participação do congresso.

5. REFERÊNCIAS

- Akgun, E., Zhang, X., Biswal, R., Zhang, Y. and Doré, M., 2021 “Fatigue of wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V in presence of process-induced porosity defects”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 150, 10631.
- Biswal, R., Zhang, X., Syed, A. K., Awd, M., Ding, J., Walther, F. and Williams, S., 2019. “Criticality of porosity defects on the fatigue performance of wire+ arc additive manufactured titanium alloy”. *International Journal of Fatigue*, 122.
- Budynas, R. G.; Nisbett, J. K., 2011. “Elementos de Máquinas de Shigley”, AMGH Editora Ltda.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., and Li, H., 2015. “Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 465-481.
- 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*, 130, 105237.
- Duraisamy, R., Kumar, S. M., Kannan, A. R., Shanmugam, N. S., and Sankaranarayanan, K., 2021. "Fatigue Behavior of Austenitic Stainless Steel 347 Fabricated via Wire Arc Additive Manufacturing". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(9), 6844–6850.
- Ermakova, A., Mehmanparast, A., Ganguly, S., Razavi, J., and Berto, F., 2021(a). “Fatigue crack growth behaviour of wire and arc additively manufactured ER70S-6 low carbon steel components”. *International Journal of Fracture*.
- Ermakova, A., Ganguly, S., Razavi, J., Berto, F., and Mehmanparast, A., 2021(b). “Experimental investigation of the fatigue crack growth behavior in wire arc additively manufactured ER100S-1 steel specimens”. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*.
- Feng, J.; Zhang, H.; HE, P., 2009. “The cmt short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding”. *Materials and Design*, v. 30.
- Gao, Y., Wu, C., Peng, K., Song, X., Fu, Y., Chen, Q., Zhang, M., Wang, G. and Liu, J., 2021. “Towards superior fatigue crack growth resistance of TC4-DT alloy by in-situ rolled wire-arc additive manufacturing”. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1395-1407.
- Jafari, D.; Vaneker, T. H. J.; Gibson, I., 2021. “Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts”. *Materials and Design*, v. 202.
- Kumar, M., Sharma, A., Mohanty, U. K., and Kumar, S. S., 2019. “Additive manufacturing with welding”. In *Advances in Welding Technologies for Process Development* (pp. 77-100). CRC Press.
- Li, Y., Yuan, Y., Wang, D., Fu, S., Song, D., Vedani, M., and Chen, X., 2022. “Low cycle fatigue behavior of wire arc additive manufactured and solution annealed 308 L stainless steel”. *Additive Manufacturing*, 102688.
- Modenesi, P. J., Marques, P. V., e Bracarense, A. Q., 2005. Soldagem-fundamentos e tecnologia. *Editora UFMG*, 17.
- McAndrew, A. R., Rosales, M. A., Colegrove, P. A., Hönnige, J. R., Ho, A., Fayolle, R., and Pinter, Z., 2018. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, 21, 340-349.
- Najmon, J. C.; Raeisi, S.; Tovar, A., 2019. “Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. Additive manufacturing for the aerospace industry”. *Elsevier*, p. 7–31.
- Norton, R. L., 2013. “Projeto de máquinas: uma abordagem integrada”. Bookman.
- Pickin, C. G. and YOUNG, K., 2006. “Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy”. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 11.
- Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., and Oliveira, J. P., 2019. “Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)”. *Materials*, 12(7), 1121.
- Rosli, N. A., Alkahari, M. R., bin Abdollah, M. F., Maidin, S., Ramli, F. R., and Herawan, S. G., 2021. “Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process”. *journal of materials research and technology*, 11, 2127-2145.
- 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*, 11(12), 1965.

- Selvi, S.; Vishvaksean, A.; Rajasekar, E., 2018. "Cold metal transfer (CMT) technology - an overview". *Defence Technology*, v. 14.
- Syed, A. K., Zhang, X., Caballero, A., Shamir, M., and Williams, S., 2021 (a). "Influence of deposition strategies on tensile and fatigue properties in a wire+ arc additive manufactured Ti-6Al-4V". *International Journal of Fatigue*, 149, 106268.
- Syed, A. K., Zhang, X., Davis, A. E., Kennedy, J. R., Martina, F., Ding, J., Williams, S. and Prangnell, P. B., 2021 (b). "Effect of deposition strategies on fatigue crack growth behaviour of wire+ arc additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V". *Materials Science and Engineering: A*, 814, 141194.
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., and Hayward, K., 2021. "Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges". *Applied Sciences*, 11(3), 1213.
- Vimal, K.; Srinivas, M. N.; Rajak, S., 2020. "Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: a review". *Materials Today: Proceedings*, Elsevier.
- Wächter, M., Leicher, M., Hupka, M., Leistner, C., Masendorf, L., Treutler, K., Kamper, S., Esderts, A., Wesling, V. and Hartmann, S., 2020. "Monotonic and fatigue properties of steel material manufactured by wire arc additive manufacturing". *Applied Sciences*, 10(15), 5238.
- Wang, F.; Williams, S.; Rush, M., 2011. "Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured ti6al4v alloy". *The international journal of advanced manufacturing technology*, Springer, v. 57, n. 5, p. 597–603.
- Wang, X., Zhao, Y., Wei, L., and Guan, X., 2020. "In-Situ SEM Investigation of the Fatigue Behavior of Additive Manufactured Titanium Alloys". In *European Workshop on Structural Health Monitoring* (pp. 612-621). Springer.
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., and Norrish, J., 2018. "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement". *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 127-139.
- Xie, C., Wu, S., Yu, Y., Zhang, H., Hu, Y., Zhang, M. and Wang, G., 2021. "Defect-correlated fatigue resistance of additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with in situ micro-rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 291, 117039.
- Zeli, W. A. N. G., and Zhang, Y., 2021. "A review of aluminum alloy fabricated by different processes of wire arc additive manufacturing". *Materials Science*, 27(1), 18-26.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

FATIGUE RESISTANCE IN PARTS OBTAINED VIA WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM) - A REVIEW

Rodrigo Souza Pimenta, souzapimentarodrigo@gmail.com
André Luiz Brito Novelino, andre_novelino@hotmail.com
José Alexander Araújo, alex07@unb.br
Maksym Ziberov, mziberov@unb.br

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

Abstract. The use of additive manufacturing in industrial processes increased in recent years, as a result of the improvements that this manufacturing method can achieve, such as: increasing in automation, production of parts with complex geometries, optimized use of material with reduced waste and, consequently, reduction of manufacturing costs. Therefore, the analysis of the parameters involved in the manufacturing and their consequences on the properties of the final product become essential to achieve a project safe and with quality. Among the properties of the materials, the fatigue behavior has great relevance, given that most failures in machines occurs due to this factor, which has as a characteristic a stress level significantly lower than the yield point and occurs suddenly, without signs such as large deflections, which makes it very dangerous, arousing the interest of engineers for many years. Therefore, this work aims to present a literature review on the fatigue behavior of materials manufactured by additive manufacturing, specifically by the Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) method, presenting the main aspects and properties that characterize the process. For this, this article was divided according to the deposition method to favor the analysis and discussion of the characteristics of each method. Thus, it was possible to identify advantages and disadvantages, as well as similarities and differences between the methods. With the analysis it was possible to notice that the anisotropic factor has a great influence on the fatigue behavior in additive manufacturing; different deposition strategies and methods alter the characteristics of microstructures and, consequently, the properties of materials.

Keywords: Additive Manufacturing, WAAM, CMT, PAW, Fatigue