

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES RESIDUAIS EM PEÇAS PRODUZIDAS POR MANUFATURA ADITIVA A ARCO

Olga Liskevych

Patrícia do Sacramento de Carli

Lucas Ferreira dos Santos

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, Brasil

e-mail olga.liskevych@ufes.br

Elton Mesquita de Almeida

LABENDEM, Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento, Cariacica – ES, Brasil

e-mail eltonmesquitaalmeida@gmail.com

André Luiz Brito Novelino

Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Brasília – DF, Brasil.

e-mail mziberov@unb.br

Resumo: O estudo de tensões residuais provenientes dos processos de fabricação de grande impacto térmico, como no caso de manufatura aditiva com deposição a arco, é de grande importância, pois a sua subestimação ou falta de controle podem levar a deterioração das propriedades mecânicas ou até mesmo às falhas em serviço dos componentes fabricados, por exemplo, quando há sobreposição de tensões trativas. O objetivo desse trabalho foi realizar uma avaliação experimental sistemática da influência da quantidade de camadas feitas via deposição bidirecional contínua nas tensões residuais de peças produzidas por processo de deposição a arco com proteção gasosa na sua modalidade CMT. Para isso, peças com quantidades diferentes de camadas foram submetidas aos ensaios de furo-cego combinado com a técnica óptica de interferometria (ESPI - Electronic Speckle Pattern Interferometry) de forma a quantificar e comparar os valores de tensões para as condições diferentes. Os resultados demonstraram que o número de camadas e a alteração consequente do impacto térmico do processo influenciam significativamente na estabilidade dimensional dos componentes produzidos, assim como na natureza, magnitude e distribuição das tensões residuais longitudinais, em alguns casos chegando até 38% da tensão de escoamento do material. Com os resultados obtidos espera-se entender melhor os mecanismos de geração de tensões térmicas, e seu acúmulo na forma de tensões residuais em peças produzidas por manufatura aditiva com deposição a arco, além de propor os meios para minimização de tensões nas regiões de maior fragilização dos componentes fabricados.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; MADA; CMT; Tensões Residuais; ESPI.

1. INTRODUÇÃO

O interesse crescente da indústria metalmeccânica pela manufatura aditiva baseada na fusão do arame (WAAM - Wire and Arc Additive Manufacturing ou MADA – Manufatura Aditiva por Deposição a Arco) se deve a possibilidade de confecção de peças com geometrias complexas, produção em larga escala, alta taxa de deposição e economia de material, além de um menor custo de produção. Assim, quando comparado com os métodos tradicionais de manufatura subtrativa, a MADA pode reduzir o tempo de fabricação em 40-60% e o tempo de acabamento em 15-20%, dependendo do tamanho da peça (Martina *et al.*, 2012). Por exemplo, avanços recentes em novas tecnologias relacionadas a manufatura aditiva permitiram economia de aproximadamente 78% em matéria prima na fabricação dos componentes do sistema de pouso de uma aeronave em relação aos métodos de fabricação tradicionais (Wu *et al.*, 2018).

O processo MADA consiste na deposição direta do metal no seu estado fundido, para que as camadas sobrepostas formam a geometria desejada do produto final. Com isso, ciclos térmicos complexos são desenvolvidos a cada momento durante a deposição, podendo gerar pontos onde coexistem diferentes estados físicos da matéria, com fases sólidas, líquidas ou em solidificação. Como resultado de uma exposição repetitiva ao calor gerado pelo arco, as camadas depositadas são compostas por zonas termicamente afetadas (ZTA) sobrepostas e são sujeitas ao efeito termomecânico acumulativo. Esse fenômeno afeta a microestrutura resultante de uma maneira complexa e leva a aparecimento de tensões residuais (TR), que dependendo do material e suas propriedades, podem chegar a 60-100% da tensão de escoamento (Hönnige *et al.*, 2018) e, conseqüentemente, reduzir significativamente a qualidade e confiabilidade das peças produzidas (Nitschke-Pagel *et al.*, 2002; Gibson *et al.*, 2010; Williams *et al.*, 2016).

O estudo de TR em componentes produzidos por MADA encontra vários desafios tanto na parte teórica, que explica os mecanismos de geração das referidas tensões, quanto nas partes experimental e de simulação numérica. Os modelos teóricos são recentes e não são tão difundidos como, por exemplo, os modelos para uma simples soldagem a arco, apresentados pela AWS (2001) e aprimorados por Scotti (2014). Hönnige *et al.* (2018) propuseram um modelo de distribuição de TR numa peça composta por substrato e camadas depositadas horizontalmente. Nele, os autores explicam que durante a deposição das camadas no substrato restrito mecanicamente (parafusado ou grampeado), as tensões trativas longitudinais de valor constante são desenvolvidas na parede da peça, enquanto, as tensões compressivas são desenvolvidas no substrato, também constantes ao longo da sua espessura (Fig.1(a)). Cada camada depositada durante o processamento acrescenta material adicional e contribui com a mesma tensão trativa, segundo os autores, durante a contração térmica devido a solidificação e resfriamento. Após a retirada da restrição mecânica, essa tensão trativa desenvolvida na parede resulta em dobramento do substrato ao longo da sua seção longitudinal (Fig. 1(b)), que, por sua vez, causa distribuição de tensões nas camadas depositadas e no substrato (Fig.1(c)). Como pode ser visto, tanto no substrato, quanto na parede acontece uma transição de TR trativas na base para tensões compressivas no topo.

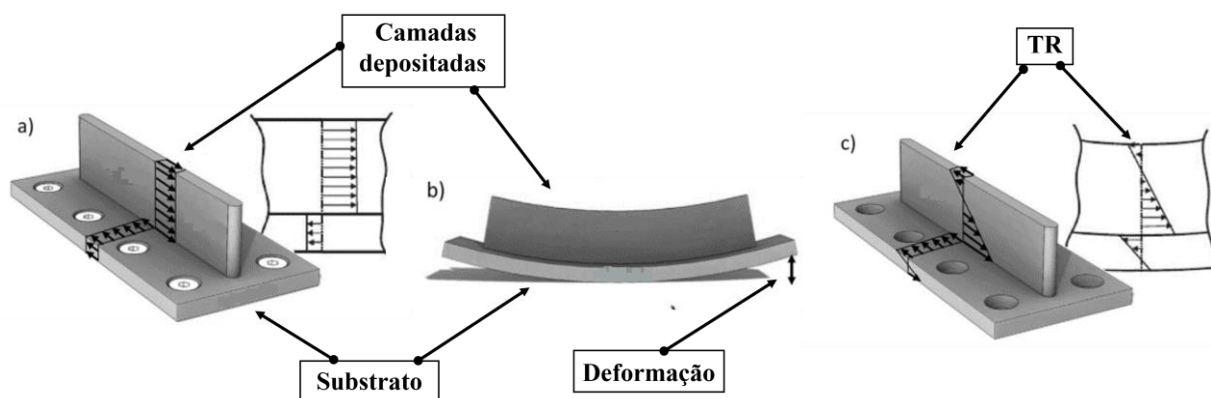


Figura 1. Distribuição típica de TR longitudinais em componentes fabricados por MADA e deformação resultante: a) perfil com restrição mecânica; b) deformação após a retirada da restrição mecânica; c) redistribuição final das TR.

Fonte: Adaptado de Hönnige *et al.* (2018).

Nesse contexto, Colegrove e colaboradores (2013) investigando a distribuição de referidas tensões em componentes de aço e utilizando o método de difração de nêutrons confirmaram experimentalmente que as tensões compressivas, de fato, são desenvolvidas no topo das amostras. Por sua vez, Köhler *et al.* (2019) estudaram as TR decorrentes de MADA em ligas de alumínio via método de difração de raios-x. Os resultados demonstraram que as magnitudes de tensões na última camada da parede depositada foram na faixa de -150 MPa, enquanto na superfície do substrato os valores obtidos foram na faixa de -50 MPa (tensões compressivas em ambos os casos). Os autores do estudo concluíram ainda que para manter o equilíbrio na peça, as primeiras camadas da parede e a base do substrato devem ficar sob ação das tensões trativas, o que, de uma forma geral, corresponde ao modelo teórico apresentado por Hönnige *et al.* (2018).

Entretanto, as conclusões gerais sobre a distribuição de TR nos componentes fabricados por MADA não são definitivos. Assim, com objetivo de investigar melhor a transição entre as tensões trativas e compressivas no corpo da peça produzida por MADA, Sun *et al.* (2021) desenvolveram um modelo numérico para diferentes casos de números de camadas depositadas (de 1 a 30). Os resultados da simulação demonstraram que com aumento da altura, a magnitude e a natureza das TR mudam tanto na parede, quanto no substrato. Por exemplo, como pode ser visto na Figura 2, para amostra de 15 camadas as tensões trativas são desenvolvidas ao longo de toda a parede, inclusive no topo da peça (resultado que difere dos relatados por Hönnige *et al.*, 2018; Colegrove *et al.*, 2013; Köhler *et al.*, 2019), enquanto para amostra de 30 camadas as TR começam como compressivas nas camadas iniciais, mudam de natureza na altura de aproximadamente 25 mm e voltam a ser compressivas na última camada. Uma outra observação pode ser feita: para a mesma altura da parede (por exemplo, 15 mm ou, aproximadamente, 10 camadas depositadas), amostras com 30, 20 e 15 camadas teriam TR de magnitude e natureza diferentes. A distribuição de TR no substrato também foi relatada como dependente do número total de camadas do componente.

Embora os resultados de simulação demonstrados por Sun *et al.* (2021) são de extrema importância para compreensão do fenômeno de geração e distribuição de TR nas peças fabricadas por MADA, a sua validação ainda carece de resultados experimentais. Ainda mais porque a medição de tensões via difração por raios x, que foi realizada durante o estudo para comparação com os dados simulados, foi feita apenas para amostra de 20 camadas depositadas e apresentou uma diferença de 120% entre os valores previstos e valores obtidos numericamente para TR longitudinais, demonstrando certas inconsistências do modelo numérico. Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação experimental sistemática da influência da quantidade de camadas depositadas na magnitude e natureza das TR longitudinais acumuladas nas peças produzidas por MADA e colaborar com os estudos publicados recentemente.

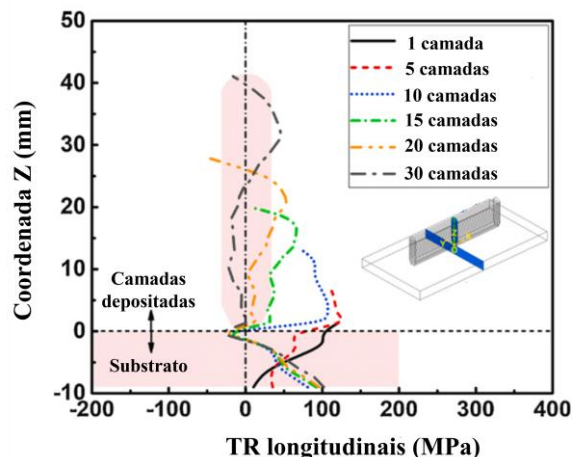


Figura 2. Distribuição de TR longitudinais obtida pela simulação numérica em componentes fabricados por MADA com número diferente de camadas depositadas Fonte: Adaptado de Sun *et al.* (2021).

2. METODOLOGIA

2.1. Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova para o estudo foram fabricados por MADA utilizando o processo de deposição a arco com proteção gasosa na sua modalidade CMT (*Cold Metal Transfer*) no laboratório do Departamento da Engenharia Mecânica da UnB. As paredes de 10, 25, 50 e 100 camadas sobrepostas foram depositadas em um substrato de aço AISI 1020 com 6,35 mm (1/4”) de espessura, utilizando como material de adição o arame ER70S-6 com 1,20 mm de diâmetro. A estratégia de deposição bidirecional contínua aplicada está apresentada na Figura 3, a composição e propriedades do material depositado se encontram na Tabela 1. Os parâmetros e variáveis do processo de deposição se encontram na Tabela 2. Após a fabricação dos corpos de prova, as suas dimensões (comprimento das paredes depositadas L, sua altura H e espessura E) foram conferidos por paquímetro com capacidade de 0 a 150 mm e resolução de 0,05 mm.

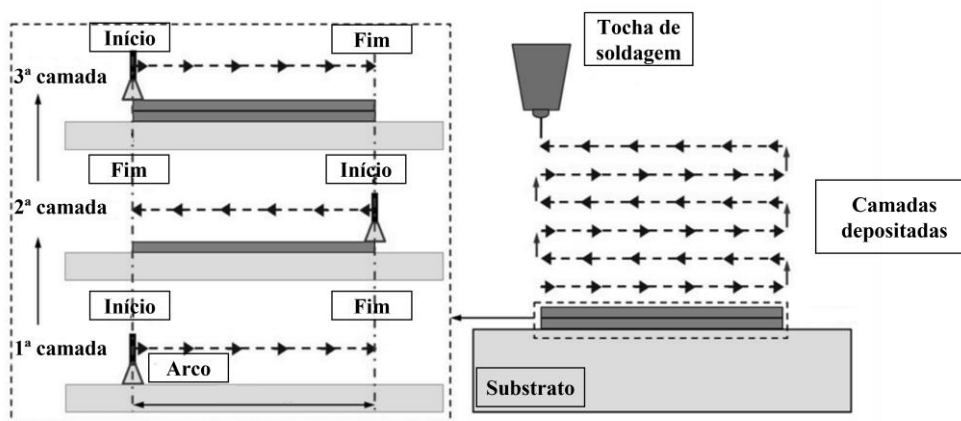


Figura 3. Estratégia de deposição bidirecional contínua usada para fabricação dos corpos de prova. Fonte: Adaptado de Sun *et al.* (2021)

Tabela 1. Composição química e propriedades do material de adição. Fonte: Elaboração própria

Composição química nominal do arame ER70S-6			Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Modulo de Young (GPa)	Coeficiente de Poisson
C	Teor, (%)	0,07	500	420	207	0,292
Si		0,85				
Mn		1,50				

Tabela 2. Parâmetros do processo de fabricação dos corpos de prova. Fonte: Elaboração própria

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente média (I)	A	62
Tensão média (U)	V	20,60
Velocidade de deslocamento horizontal da tocha (V_h)	mm/s	8
Velocidade de deslocamento vertical da tocha (V_v)	mm/s	24
Passo vertical da camada (P_v)	mm	1,20
Gás de proteção		Ar+18%CO ₂
Vazão de gás	l/min	15
Velocidade de alimentação de arame (V_a)	m/min	2,60
DBCP	mm	12
Temperatura de interpasse	(°C)	~420°

2.2. Medição de tensões residuais

Para a medição das TR foi utilizada uma técnica experimental semidestrutiva ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) combinada com método do furo-cego. O equipamento utilizado para esse fim está situado no Laboratório de Ensaios não Destrutivos Multidisciplinar do Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do Estado do Espírito Santo (LABENDEM/CPID). A Figura 4 representa os seus componentes: um laser, câmera, furadeira e suporte para fixação do corpo de prova.

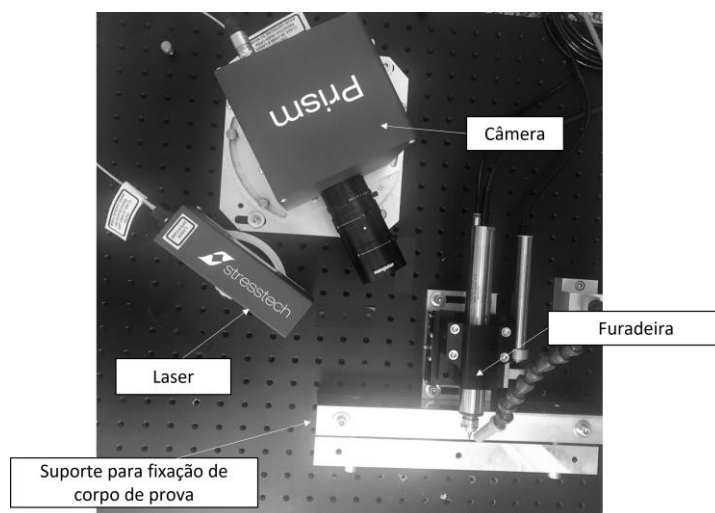


Figura 4. Equipamento para medição de tensão residual (combinação de técnicas ESPI e furo-cego). Fonte: Elaboração própria

Basicamente, a técnica consiste em usinar um pequeno furo na superfície do componente a ser analisado provocando um alívio das tensões existentes que atuam no volume de material removido. Esse alívio de tensões resultará em uma mudança nos estados de deformação em pontos da região no entorno do furo. Por sua vez, o equipamento utilizado conta com um feixe de luz (laser) com todas as propriedades conhecidas. Este feixe é dividido em dois, sendo que o primeiro é lançado no corpo de prova e refletido para a câmera. Já o segundo, de referência, passa por um sistema de mudança de fase piezoelétrico e posteriormente é direcionado para o mesmo sistema óptico. Quando a amostra sofre o alívio de tensão através do furo, o feixe de luz refletido pelo corpo de prova sofre uma ligeira alteração, enquanto o feixe de referência permanece intacto. Isso causa uma mudança de fase do feixe refletido, registrando um novo padrão de granulado (pixels).

Da diferença de padrões de granulado (pixels), antes e depois da furação, ou seja, antes e depois do alívio de tensão, obtém-se um padrão de franjas, conhecidas como franjas de correlação (*speckles*). Através do algoritmo do sistema e por meio das franjas de correlação consegue-se obter os mapas de fase, a partir do qual determina-se o deslocamento da superfície da amostra e dessa forma determinando a tensão presente no material antes da furação. A referida técnica já foi utilizada previamente nos estudos de TR (Steinzig e Takahashi, 2003; Barile *et al.*, 2014; Rahimi e Violatos, 2022) e demonstrou uma boa exatidão (erro médio de 5,8%), precisão (coeficiente de variação de 6%) e sensibilidade das medições, mesmo nas superfícies irregulares de juntas soldadas (Liskevych *et al.*, 2022).

Para cada ensaio, um furo com 0,8 mm de diâmetro e 0,4 mm de profundidade foi aberto na superfície do material por meio da furadeira utilizando a velocidade de rotação da ferramenta de 25000 rpm. A cada incremento de furação, que para os fins deste estudo foi de 0,05 mm para profundidade total do furo de 0,4 mm, o software do equipamento fornece como resposta os valores de tensão longitudinal (σ_x) e transversal (σ_y). As medições de TR nos corpos de prova fabricados por MADA foram feitos na superfície das camadas depositadas ao longo do eixo Z, conforme demonstrado na Figura 5. A escolha do sentido da furação (eixo Y) foi feita para garantir que as tensões longitudinais (σ_x) e transversais (σ_y) medidas por equipamento coincidem com as TR longitudinais e transversais formadas de fato, segundo os modelos teóricos apresentados por Hönnige *et al.* (2018) e Sun *et al.* (2021), nas peças durante a fabricação. Os furos foram feitos no substrato e nas camadas, distribuídos com aproximadamente de 8,5 mm de distância ao longo da altura das paredes. Assim, foram feitas 3 medições (furos) na parede de 10 camadas, 5 medições na parede de 25 camadas, 7 medições na parede de 50 camadas e 12 medições na parede de 100 camadas, resumindo em 27 ensaios no total.

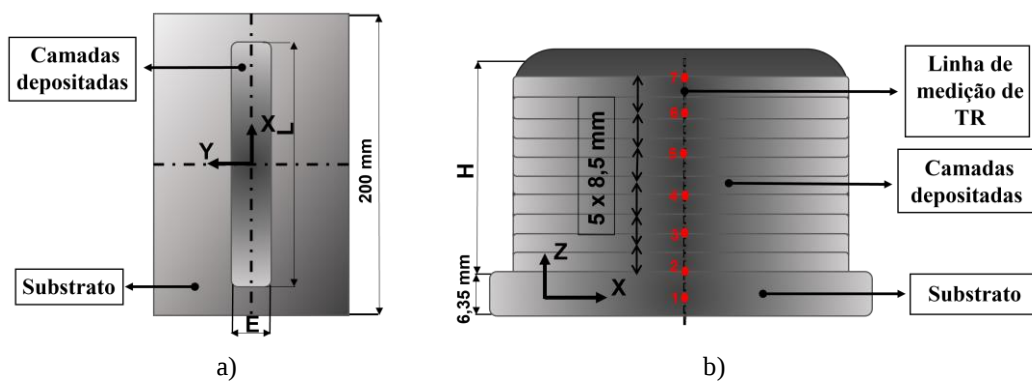


Figura 5. Representação esquemática dos corpos de prova fabricados por manufatura aditiva: a) vista de cima; b) vista frontal com detalhamento dos pontos de medição (exemplo dado para peça com deposição de 50 camadas). Fonte: Elaboração própria

3. RESULTADOS

3.1. Corpos de prova fabricados por MADA

Os corpos de prova com número diferente de camadas depositadas por processo a arco com proteção gasosa na sua modalidade CMT e utilizados para medição de TR são apresentados na Figura 6.

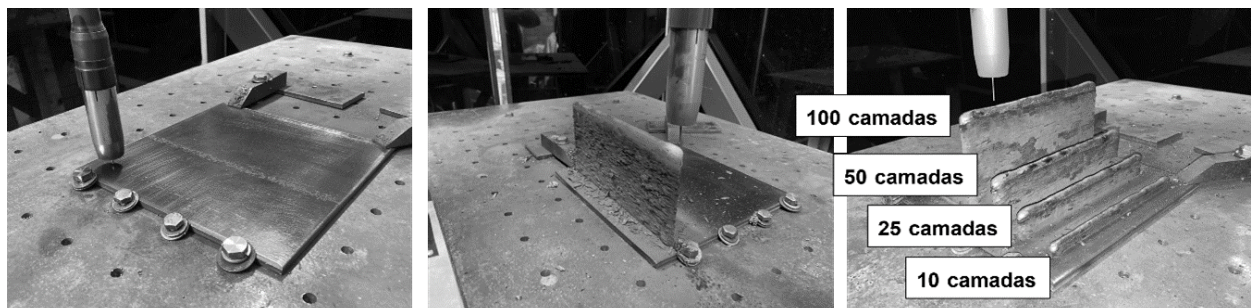


Figura 6. Corpos de prova produzidos por meio de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA): (a) substrato antes da deposição das camadas (b) deposição de 100 camadas da primeira amostra (c) amostras com 100, 50, 25 e 10 camadas depositadas. Fonte: Elaboração própria.

As dimensões medidas nos corpos de prova de acordo com a Fig. 5 estão apresentadas na Tabela 3. Como pode ser observado, o comprimento das paredes L não sofreu grandes alterações, enquanto a sua espessura foi diferente para todos os corpos de prova analisados. Inclusive, houve variação de espessura das paredes ao longo da sua altura. Assim, para

todos os corpos de prova (de 10, 25, 50 e 100 camadas depositadas), a espessura da base da parede foi menor, aumentando nas camadas intermediárias e apresentando valores maiores nas camadas superficiais. Esse efeito pode ser explicado pelo pré-aquecimento progressivo do material pelas deposições anteriores, diminuição consequente da sua viscosidade e melhor espalhamento pela parede.

Tal comportamento fica ainda mais evidente, quando a altura final das paredes é analisada. Já era esperado que esse parâmetro geométrico seja diferente em função de número das camadas, mas o seu aumento não foi proporcional ao aumento de quantidade de camadas depositadas, e. g., um aumento de 100%, de 25 para 50 camadas, resultou em apenas 84% de aumento da altura da parede. Da mesma forma, um aumento de 100%, de 50 para 100 camadas, resultou em 93% do aumento da altura da parede. A análise mostra que mantendo os parâmetros do processo iguais para fabricação de todos os corpos de prova, acontece um aumento desproporcional da altura das paredes e essa desproporcionalidade é compensada por aumento da espessura das camadas superiores. Maiores estudos devem ser conduzidos para entender se esse comportamento é progressivo (e pode levar a instabilidade dimensional significativa) ou ao certo ponto o pré-aquecimento atinge a sua saturação e a proporcionalidade de altura/largura não muda mais depois da certa altura de deposição.

Tabela 3. Dimensões das paredes depositadas com quantidade diferente de camadas. Fonte: Elaboração própria

	Altura da parede, H (mm)	Espessura da parede, E (mm)			Comprimento da parede, L (mm)
		Base	Camadas intermediárias	Camadas superficiais	
CP de 10 camadas	10,68	4,00	4,80	5,00	153,14
CP de 25 camadas	23,54	4,20	5,40	6,30	153,88
CP de 50 camadas	43,24	4,15	6,10	6,15	152,16
CP de 100 camadas	83,48	4,15	6,60	6,40	152,40

3.2. Análise das tensões residuais

Quanto a análise de TR longitudinais (σ_x) nos corpos de prova avaliados, os resultados prévios mostraram que independentemente da quantidade de camadas, natureza (trativa ou compressiva) das tensões e da sua magnitude, a sua tendência é diminuir com a profundidade da medição (um exemplo ilustrativo pode ser observado na Figura 7 para CP com número de camadas diferentes e pontos de medição diferentes). Essa tendência já foi observada em estudos anteriores tanto para o método de medição usado, quanto para produtos de MADA (Colegrove *et al.*, 2013; Hizli & Gür, 2017; Liskevych *et al.*, 2022) e pode ser explicada por aumento de volume do material removido (e, consequentemente, maiores deformações provocadas) à medida que profundidade de furação aumenta, e também pela própria heterogeneidade do material estudado (com alteração das propriedades mecânicas) devido a sobreposição de zonas termicamente afetadas. Dessa maneira, para garantir a comparação objetiva, os valores de TR medidas na profundidade de 0,3 mm foram escolhidos arbitrariamente nas análises a seguir.

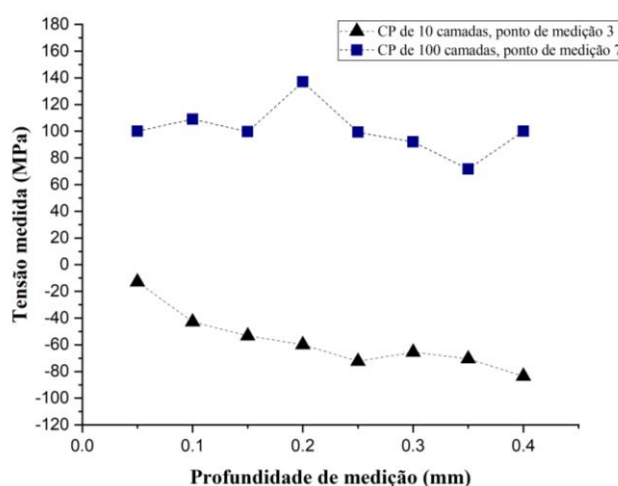


Figura 7. Exemplo de mudança das tensões medidas ao longo da profundidade de furação. Fonte: Elaboração própria

A Tabela 4 contém os respectivos valores das TR longitudinais medidas nos corpos de prova com alturas diferentes das paredes depositadas. Inicialmente, observa-se que as tensões do substrato se demonstraram dependentes do número de camadas depositadas, apresentando tensões trativas para parede de menor altura (10 camadas) e tensões compressivas para as demais paredes (25, 50 e 100 camadas), o que está em concordância com os resultados experimentais relatados por Köhler *et al.* (2019) para amostras de alumínio e os resultados simulados relatados por Sun *et al.* (2021). Observa-se também que houve um aumento nas magnitudes das tensões de -73,4 (25 camadas) para -223 MPa (50 camadas), e,

posteriormente, diminuição nas magnitudes das tensões para -71,6 MPa (100 camadas). Esse fenômeno pode ser explicado com saturação de impacto térmico numa certa altura (entre 50 e 100 camadas para o dado material) e a sua diminuição devido ao resfriamento das camadas inferiores no caso de deposição das paredes maiores.

Tabela 4. Tensões residuais longitudinais medidas nos corpos de prova produzidos com número diferente de camadas.

Fonte: Elaboração própria

	CP de 10 camadas	CP de 25 camadas	CP de 50 camadas	CP de 100 camadas
	σ_x (MPa)	σ_x (MPa)	σ_x (MPa)	σ_x (MPa)
Substrato	41,1	-73,4	-223	-71,6
Ponto 2	-148	0,59	-30,2	-20,9
Ponto 3	-65,5	91,1	42,8	- 47,5
Ponto 4	-	-64,8	37,9	-11,6
Ponto 5	-	-75,9	103	-11,4
Ponto 6	-	-	-72,8	-48,3
Ponto 7	-	-	-20,6	64,3
Ponto 8	-	-	-	68,5
Ponto 9	-	-	-	161
Ponto 10	-	-	-	71,7
Ponto 11	-	-	-	13,2
Ponto 12	-	-	-	-29,8

Quanto a distribuição das tensões ao longo da altura das paredes, ilustrada na Figura 8, pode ser observado que as TR longitudinais nas peças produzidas por MADA dependem significativamente do número de camadas depositadas, tanto na sua natureza (trativa ou compressiva), quanto nas magnitudes. Assim, na peça de 10 camadas as tensões começam como trativas no substrato e evoluem para compressivas de maior magnitude nas camadas inferiores da parede e de menor magnitude na sua última camada depositada. Já para a peça produzida com 25 camadas, as TR começam como compressivas no valor de -73,4 MPa no substrato, mudam para praticamente nulas na interface entre o substrato e a parede depositada (ponto 2 da Figura 5) e evoluem para trativas no valor de aproximadamente 22% da tensão de escoamento do material. Na metade da parede depositada as tensões mudam de natureza de novo, apresentando magnitudes compressivas nas últimas camadas. Por sua vez, no corpo de prova produzido com 50 camadas depositadas, as TR no substrato apresentam valores compressivos, assim como na interface entre o substrato e a parede, evoluem para as trativas nas camadas intermediárias e mudam para compressivas nas camadas superficiais. E por fim, na peça com maior número de camadas estudadas, as tensões apresentam os valores compressivos tanto no substrato, como na interface e nas camadas inferiores, evoluem para tensões trativas nas camadas intermediárias (atingindo, inclusive, 38% da tensão de escoamento do material no ponto de medição 9, Figura 5), e mudam para tensões compressivas nas camadas superficiais.

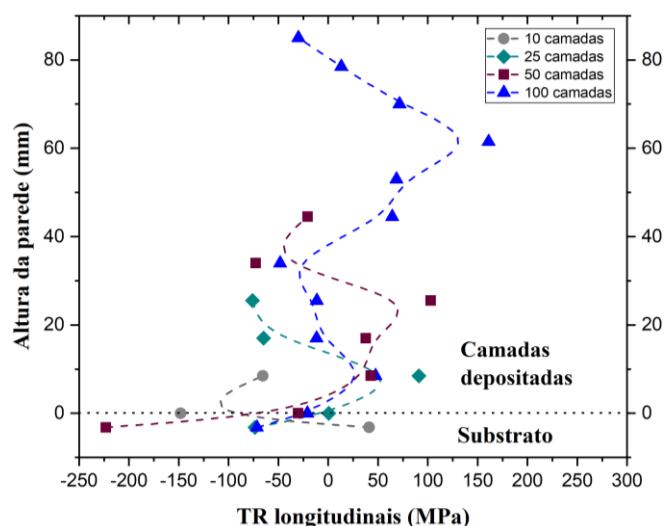


Figura 8. TR longitudinais medidas nos corpos de prova fabricados por MADA com número diferente de camadas

Fonte: Elaboração própria.

Dessa maneira, com exceção do corpo de prova com menor número de camadas depositadas, todas as outras peças produzidas por MADA apresentaram a tendência de TR compressivas no substrato, TR trativas nas camadas intermediárias e TR compressivas nas camadas superficiais. Inclusive, quanto maior foi o número das camadas, maiores

foram as magnitudes destas tensões no sentido da altura do corpo de prova. Esses resultados experimentais estão em total concordância com os resultados simulados relatados por Sun *et al.*, (2021) e demonstrados na Fig. 2 quanto a natureza das TR desenvolvidas nas peças fabricadas por MADA. Por outro lado, o que foi observado no presente estudo é que, ao contrário das conclusões do Sun *et al.*, (2021), a magnitude das tensões (trativas e compressivas) não seguiu o mesmo padrão nas peças analisadas: quanto maior foi a altura das paredes depositadas, maior foi a magnitude das tensões trativas desenvolvidas nas camadas intermediárias e menor foi a magnitude das tensões compressivas nas camadas superficiais. Essa observação merece maiores estudos, pois há uma tendência de aumento significativo das TR longitudinais trativas com aumento de altura das peças fabricadas por MADA, podendo chegar em certo ponto aos valores da tensão de escoamento do material. Além disso, os resultados experimentais demonstram que o modelo teórico apresentado por Hönnige *et al.* (2018) não pode ser aplicado para peças produzidas por MADA de todos os tamanhos, pois a peça com menor número de camadas depositadas (10 camadas) apresentou a distribuição de tensões diferente do proposto na Fig. 1.

E por fim, pode ser observado que, independentemente da quantidade de camadas, todos os corpos de prova produzidos por MADA apresentaram tensões longitudinais compressivas na última camada (em concordância com Köhler *et al.*, 2019 e Sun *et al.*, 2021), sendo de magnitude maior para alturas menores e de magnitudes menores para alturas maiores. Seguindo essa tendência, supõe-se que para número de camadas depositadas ainda maior, pode obter as tensões trativas nas camadas superficiais das peças fabricadas por manufatura aditiva a arco (o que seria efeito indesejável do ponto de vista de condições de serviço dinâmicos/cíclicos e resistência a fadiga). Entretanto, maiores estudos são necessários para confirmar esta suposição.

4. CONCLUSÃO

A análise das tensões residuais realizada no presente trabalho em peças produzidas por manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), utilizando a técnica de medição semidestrutiva ESPI combinada com o método do furo-cego, permitiu avaliar de uma maneira sistemática a influência de número de camadas depositadas na distribuição, natureza e magnitude das tensões longitudinais. Observou-se que altura final depositada tem impacto significativo nas TR acumuladas no substrato da peça, nas camadas intermediárias e nas camadas superficiais. O estudo desse efeito é essencial, pois enquanto as tensões trativas apresentam a extrema importância para o serviço, principalmente, onde há sobreposição das tensões trativas ou eventual possibilidade da fadiga do material, as tensões compressivas nas últimas camadas devem ser observadas para os fins de estabilidade dimensional dos componentes e eventuais deformações.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB) pela produção de corpos de prova, ao LABENDEM (Laboratório de Ensaio Não Destrutivos Multidisciplinar no Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do Estado do Espírito Santo) e ao projeto de ação transversal FINEP do governo do estado do Espírito Santo, assim como ao Laboratório de Metrologia (LabMetro), pela infraestrutura oferecida e pela oportunidade de realização desse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- AWS, American Welding Society, Welding Handbook, Vol 1: Welding Technology, Chapter 7: Residual Stresses and Distortion, American Welding Society, 2001, 8ª Edição, 891 p., ISBN: 0-87171-281-4;
- Barile C., Casavola G., Pappalettere G., Pappalettere C., 2014. Analysis of the effects of process parameters in residual stress measurements on Titanium plates by HDM/ESPI. *Measurement*, Vol.: 48, pp. 220-227. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.11.014>;
- Gibson I., Rosen D., Brent S., 2010. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. *Springer*, New York;
- Hönnige J.R., Colegrove P.A., Ahmad B., Fitzpatrick, M.E., Ganguly S., Lee, T.L., Williams, S.W., 2018. Residual stress and texture control in Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured intersections by stress relief and rolling. *Materials and Design*, Vol. 150, pp. 193-205. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.065>;
- Hizli, H., & Gür, C. H., 2017. Comparison of Electronic Speckle Laser Interferometry Hole-Drilling and X-ray Diffraction Techniques for Determination of Residual Stresses in the Heat Treated Steels. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 36(2), 1–8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0423-7>;
- Köhler, M., Fiebig, S., Hensel, J., & Dilger, K., 2019. Wire and arc additive manufacturing of aluminum components. *Metals*, 9(5), 1–9. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met9050608>;
- Liskevych, O., Almeida, E. M., Feijo, G. F., Macêdo, M. C. S., 2022. Estudo de aplicabilidade da técnica ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) combinada com o método do furo-cego para medição de tensões residuais em juntas soldadas. *Anais de XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2022, Teresina – PE, Brasil*;

- Martina, F., Mehnen, J., Williams, S., Colegrove, P., Wang, F., 2012. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.: 212, pp. 1377–1386;
- Nitschke-Pagel, T. & Wohlfahrt, H., 2002. Residual stresses in welded joints – sources and consequences. *Mater. Sci. Forum*, 404–407, pp. 215–226. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.404-407.215>;
- Scotti, A., 2014. Five bars and one bar models for thermal stress generation in the FZ, HAZ and BM during arc welding. *Soldagem e Inspeção*, vol. 19(1), pp. 82-90. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242014000100010>;
- Rahimi S. & Violatos S. R. I., 2022. Comparison Between Surface and Near - Surface Residual Stress Measurement Techniques Using a Standard Four - Point - Bend Specimen. *Experimental Mechanics*, Vol. 62, pp. 223-236. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00779-6>;
- Steinzig M. & Takahashi T., 2003. Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry. Part IV: Measurement accuracy. *Experimental Techniques*, Vol: 27(6), pp. 59-63. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2003.tb00141.x>;
- Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P., 2016. Wire + Arc Additive Manufacturing", *Materials Science and Technology*, Vol. 32 (7), pp. 641-647. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.000000003>
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J., 2018. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 35 (February), pp. 127–139. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE RESIDUAL STRESS IN ADDITIVE MANUFACTURE

Olga Liskevych

Patrícia do Sacramento de Carli

Lucas Ferreira dos Santos

Federal University of Espírito Santo, Vitoria – ES, Brazil

e-mail olga.liskevych@ufes.br

Elton Mesquita de Almeida

LABENDEM, Center of Research, Innovation and Development, Cariacica – ES, Brazil

e-mail eltonmesquitaalmeida@gmail.com

André Luiz Brito Novelino

Maksym Ziberov

University of Brasilia, Brasilia – DF, Brazil.

e-mail mziberov@unb.br

Abstract. The residual stress evaluation coming from manufacturing processes of great thermal input, which is the case of wire and arc additive manufacturing, is of major importance since its underestimation or lack of control can lead to mechanical properties deterioration of produced components or even to service failures, for example, when there is an overlap of tensile stress. The aim of this work was to perform a systematic experimental evaluation of the layer quantity influence in beams produced by bidirectional continuous deposition on residual stress in the samples manufactured by GMA process via its CMT modality. For this purpose, specimens with different number of layers were subjected to residual stress measurements using an optical technique (ESPI - Electronic Speckle Pattern Interferometry) combined with a hole drilling method in order to quantify and to compare the stress values under different conditions. The results demonstrate that the number of layers and consequent thermal impact of the process have a significant influence on the dimensional stability of manufactured components, as well as, on the type, magnitude and distribution of residual longitudinal stress, reaching in some cases to 38% of the material yield stress. With results obtained during this study, it is expected to understand better the mechanism of thermal stress generation and its accumulation in the way of residual stress in samples produced by wire and arc additive manufacturing process in addition of coming up with the means of residual stress minimization in areas of the major brittleness of produced components.

Keywords: additive manufacturing; WAAM; CMT; Residual Stress; Hole Drilling Method; ESPI.

RESPONSIBILITY NOTICE

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