

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA MECÂNICA
Curso de Especialização em Soldagem

Cassio Emanuel Ribeiro Martins

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE INTERPASSE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE PAREDES EM AÇO INOXIDÁVEL 308L FABRICADAS POR MANUFATURA
ADITIVA**

Belo Horizonte

2025

Cassio Emanuel Ribeiro Martins

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE INTERPASSE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE PAREDES EM AÇO INOXIDÁVEL 308L FABRICADAS POR MANUFATURA
ADITIVA**

Monografia de especialização apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Orientador: Dr. Fagner Guilherme Ferreira Coelho

Belo Horizonte

2025

M386i

Martins, Cassio Emanuel Ribeiro.

Influência do tempo de interpasse nas propriedades mecânicas de paredes em aço inoxidável 308L fabricadas por manufatura aditiva [recurso eletrônico] / Cassio Emanuel Ribeiro Martins. - 2025.

1 recurso online (26 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Fagner Guilherme Ferreira Coelho..

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”

Inclui bibliografia.

1. Soldagem. 2. Manufatura aditiva. 3. Aço inoxidável. 4. Resistência à tração. 5. Aço - Propriedades mecânicas. I. Coelho, Fagner Guilherme Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia **04/12/2025**, às **10:50h**, a Comissão Examinadora se reuniu presencialmente para avaliar o trabalho:

Título: *Influência do Tempo de Interpasse nas Propriedades Mecânicas de paredes em Aço Inoxidável 308L Fabricadas por Manufatura Aditiva*

Nome Completo Aluno: Cassio Emanuel Ribeiro Martins

Nº da Matrícula na UFMG: 2024691727

Local: Auditório 1 do prédio de Engenharia.

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 20 minutos e após ter arguido o(a) candidato(a) por 10 minutos, é de parecer **FAVORÁVEL** à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de **90** e **SEM** sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador **Fagner Guilherme Ferreira Coelho**.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br FAGNER GUILHERME FERREIRA COELHO
Data: 26/01/2026 18:14:02-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Fagner Guilherme Ferreira Coelho
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Documento assinado digitalmente
gov.br ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE
Data: 27/01/2026 17:50:20-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Alexandre Queiroz Bracarense
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Documento assinado digitalmente
gov.br CASSIO EMANUEL RIBEIRO MARTINS
Data: 27/01/2026 19:06:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Cassio Emanuel Ribeiro Martins
078.753.346-75

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar a vida, saúde e força para prosseguir no crescimento da minha formação profissional e pessoal.

Agradeço à minha família, por todos os momentos e ensinamentos que me formaram como pessoa.

Agradeço a minha esposa Luciana e meu filho Davi, que estiveram comigo durante toda essa jornada, com muito amor, carinho e apoio.

Ao meu orientador, o professor Fagner Coelho pela orientação e ensinamentos.

RESUMO

A gestão do acúmulo de calor na Manufatura Aditiva Por Deposição à Arco (MADA) é crítica para as propriedades mecânicas do material. Este trabalho analisa a influência do tempo de interpasse (60, 180 e 300 segundos) na dureza e nas propriedades de tração de paredes de aço inoxidável 308L. Os resultados indicam que o aumento do tempo de espera eleva significativamente a dureza e o limite de escoamento, resultando na condição de 300s com os maiores valores e a distribuição mais uniforme. Em contrapartida, o limite de resistência à tração apresentou tendência inversa, diminuindo com o aumento do tempo de interpasse. O estudo demonstra que o tempo de interpasse é uma estratégia passiva eficaz para controlar e otimizar o desempenho mecânico de peças em aço 308L fabricadas por manufatura aditiva por deposição à arco.

Palavras-chave: manufatura aditiva; aço inoxidável 308L; dureza; tração

ABSTRACT

The management of heat accumulation in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is critical to the mechanical properties of the material. This work analyzes the influence of interpass time (60, 180, and 300 seconds) on the hardness and tensile properties of 308L stainless steel walls. The results indicate that increasing the dwell time significantly increases hardness and yield strength, with the 300-second condition yielding the highest values and the most uniform distribution. In contrast, tensile strength showed an inverse trend, decreasing with increasing interpass time. The study demonstrates that interpass time is an effective passive strategy for controlling and optimizing the mechanical performance of 308L steel parts manufactured by arc deposition additive manufacturing.

Keywords: additive manufacturing; 308L stainless steel; hardness; tensile strength

LISTA DE SÍMBOLOS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
DBCP	Distância entre Bico de Contato e Peça
C	Carbono
CP	Corpo de prova
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
F	Ferrita
FA	Ferrita-Austenita
Fe	Ferro
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HV	Dureza <i>Vickers</i>
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Resistência a Tração
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
Ni	Níquel
ZTA	Zona Termicamente Afetada
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Célula de Soldagem Utilizada para Manufatura Aditiva.

Figura 02 – Ilustração da parede depositada no substrato.

Figura 03 – Estratégia de deposição.

Figura 04 – Geometria obtida após a conclusão da deposição.

Figura 05 – Representação das regiões onde os corpos de prova foram removidos

Figura 06 – Localização dos pontos de indentação no teste de dureza HV1.

Figura 07 – Dureza média em três regiões da parede.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição química, em % em peso, fornecida pelo fabricante do arame tubular de aço inoxidável AWS ER 308L.

Tabela 02 – Valores HV1 medidos nas regiões da parede 1.

Tabela 03 – Valores HV1 medidos nas regiões da parede 2.

Tabela 04 – Valores HV1 medidos nas regiões da parede 3.

Tabela 05 – Resultados do teste de tração parede 1.

Tabela 06 – Resultados do teste de tração parede 2.

Tabela 07 – Resultados do teste de tração parede 3.

Tabela 08 – Tensão e alongamento médios da parede.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	11
2 – OBJETIVO	12
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1 – MATERIAIS EMPREGADOS.....	13
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1 – TESTE DE DUREZA VICKERS.....	17
4.2 – TESTE DE TRAÇÃO.....	20
5 – CONCLUSÕES.....	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1 – INTRODUÇÃO

A demanda por componentes metálicos com geometrias complexas e propriedades customizadas tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de manufatura aditiva (MA). Dentre elas, a Manufatura Aditiva Por Deposição À Arco (MADA) tem ganhado destaque, especialmente para a produção de peças de médio e grande porte, devido à sua alta taxa de deposição e ao custo relativamente baixo dos equipamentos e da matéria-prima (Jin et al., 2020). A técnica baseia-se em processos de soldagem a arco, como Gas Metal Arc Welding (GMAW), para fundir um arame metálico e construir, camada por camada, uma estrutura tridimensional (Laghi et al., 2020). Metais com boa soldabilidade, como ligas de titânio, alumínio e, notadamente, os aços inoxidáveis, são excelentes candidatos para o processo MADA (Jin et al., 2020).

O aço inoxidável austenítico 308L, em particular, é amplamente utilizado em indústrias críticas como a de óleo e gás, química e automotiva, devido à sua excelente combinação de resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas (Mai et al., 2021). A fabricação de componentes com este material via MADA oferece uma alternativa promissora aos métodos tradicionais, como fundição e forjamento, que frequentemente envolvem maior desperdício de material e limitações geométricas (Li et al., 2021).

Apesar de suas vantagens, o processo MADA apresenta desafios intrínsecos, sendo o gerenciamento térmico o mais proeminente. Os sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento impostos durante a deposição das camadas geram um significativo acúmulo de calor na peça, especialmente em geometrias de paredes finas (Zhang et al., 2021). Esse histórico térmico complexo é uma das principais fontes de heterogeneidade no material final. Conforme aponta a literatura, o controle inadequado do aporte térmico pode levar a consequências indesejáveis, como distorções dimensionais, tensões residuais elevadas e, a formação de microestruturas grosseiras e fases deletérias que degradam o desempenho mecânico (Safarzade et al., 2020; Liu et al., 2022).

A literatura científica tem se dedicado a explorar estratégias para mitigar o acúmulo de calor. Uma abordagem comum é o controle da temperatura de interpasse, que pode ser realizado de forma ativa (com resfriamento forçado) ou passiva (com tempos de espera) (Mai e Paris, 2021). A estratégia passiva, foco deste trabalho, consiste em introduzir um tempo de espera entre a deposição de camadas, permitindo que o calor se dissipe naturalmente (Zhai et al., 2022). Este parâmetro é reconhecido como um fator crítico que influencia diretamente a taxa de

resfriamento, o tamanho e a morfologia dos grãos e, por fim, as propriedades mecânicas da peça. Recentemente, Wang et al. (2021) demonstraram que temperaturas de interpasse mais baixas (resultantes de maior tempo de espera) levam a um refino de grão e, conseqüentemente, a uma melhoria na dureza e no limite de escoamento.

Embora a influência do tempo de interpasse seja conhecida, ainda há uma lacuna na compreensão sistemática de como uma faixa mais ampla de variação desse parâmetro afeta as propriedades do aço 308L. Este trabalho visa preencher essa lacuna, investigando experimentalmente o impacto de três tempos de interpasse distintos 60, 180 e 300 segundos na dureza e nas propriedades de tração de paredes de aço inoxidável 308L fabricadas por MADA.

2 – OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo geral investigar experimentalmente a influência de diferentes tempos de interpasse — especificamente 60, 180 e 300 segundos — sobre as propriedades mecânicas e a integridade estrutural de paredes de aço inoxidável 308L processadas por Manufatura Aditiva por Deposição à Arco (MADA). A pesquisa busca compreender como a gestão passiva do fluxo térmico e a dissipação de calor por convecção natural entre as camadas impactam o ciclo térmico da deposição e, por conseqüência, a homogeneidade do material. Especificamente, o estudo visa correlacionar esses intervalos de tempo com a variação dos perfis de microdureza Vickers ao longo da altura da peça, bem como avaliar o comportamento sob tração uniaxial, analisando o limite de escoamento, a resistência máxima e a ductilidade. Além disso, pretende-se verificar o efeito do controle térmico na redução da anisotropia mecânica entre as direções longitudinal e transversal, validando o tempo de interpasse como uma variável crítica para a otimização de componentes de alto desempenho

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foram definidos a geometria a ser produzida e a determinação dos parâmetros do processo para a fabricação das pré-formas necessárias aos testes. Posteriormente, na segunda fase, realizou-se a fabricação das pré-formas empregando o processo MADA, garantindo condições ideais para o monitoramento térmico e a subsequente remoção dos corpos de prova. Por fim, a terceira etapa englobou a obtenção de todos os corpos de prova destinados aos ensaios de dureza, tração e metalografia, seguida pela realização dos testes no Centro de Inovação e Tecnologia do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (CIT SENAI), situado em Belo Horizonte.

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Neste estudo, o arame de aço inoxidável comercial AWS ER 308L com diâmetro de 1,2 mm foi utilizado como matéria-prima na construção de corpos de prova de parede em um substrato de aço carbono SAE 1045, cuja composição química do arame é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química, em % em peso, fornecida pelo fabricante do arame tubular de aço inoxidável AWS ER 308L.

Composição química (%)								
C	Cr	Ni	Mo	Cu	Si	Mn	P	S
0,04 máx.	18 - 21	9 - 10	0,75 máx..	0,75 máx.	1,0 máx.	0,5 – 2,5	0,04 máx.	0,03 máx.

Apesar da distinta composição química entre o substrato e o arame de adição, a influência da diluição na interface entre a parede e a base foram intencionalmente desconsideradas nesta análise. A zona de diluição foi completamente removida por usinagem, uma vez que o objetivo do estudo era focar exclusivamente no comportamento mecânico do material depositado, o arame ER 308L.

Para assegurar a qualidade da matéria-prima, o arame ER 308L foi submetido a uma avaliação macroestrutural inicial, visando identificar possíveis defeitos superficiais decorrentes do seu processo de fabricação por trefilação. Foram coletadas três amostras de regiões aleatórias do arame para garantir a homogeneidade da inspeção, cuja análise superficial foi conduzida em um estereoscópio Leica EZ 3.3.0, localizado no Instituto SENAI de Metalurgia e Ligas Especiais (ISIMLE).

Posteriormente, para a caracterização microestrutural, as amostras do arame foram seccionadas longitudinalmente em sua meia altura. Esta seção foi escolhida por ser a mais indicada para a detecção de inclusões, deformações ou efeitos de tratamentos térmicos. As amostras seguiram a preparação metalográfica convencional, incluindo embutimento, lixamento e polimento. Na sequência, a microestrutura foi revelada por ataque químico com o Reagente de Kalling, cujo processo foi interrompido com água, seguido de limpeza com álcool etílico e secagem com ar frio. A observação das microestruturas presentes no arame foi realizada por meio de microscopia óptica (MO) em um microscópio Olympus modelo BX51M, operando em modo campo claro (CC), também no ISIMLE.

A construção das duas paredes foi efetuada em uma célula de manufatura aditiva equipada com um manipulador robótico Yaskawa Motoman MH12, gerenciado por um sistema de controle Yaskawa DX200. O processo de deposição utilizou uma fonte de soldagem multiprocesso Lincoln Electric Power Wave 450 (MIG/MAG) com modo de transferência por curto-circuito controlado, um alimentador de arame Lincoln Electric 4R 220 e uma tocha TBI modelo RM82W com unidade de refrigeração a água (Fig. 1).

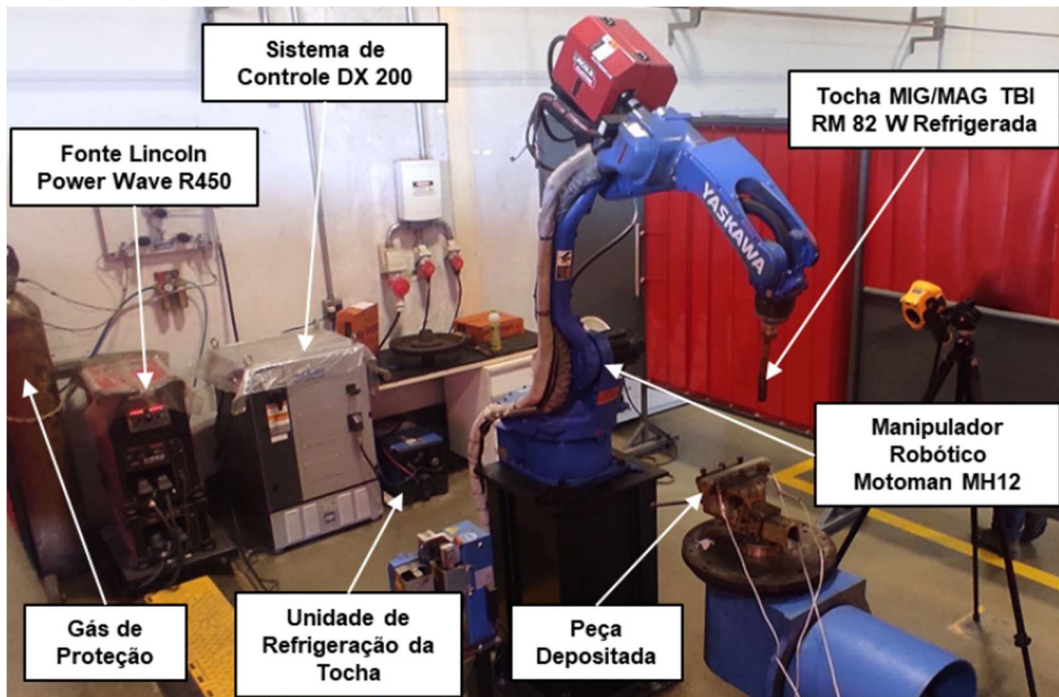


Figura 1. Célula de Soldagem Utilizada para Manufatura Aditiva.

Elas foram fabricadas depositando 50 camadas sucessivas (Fig. 2) e usando os mesmos parâmetros de processamento, incluindo uma voltagem de 24 V, uma corrente de soldagem de 256 A, uma velocidade de deslocamento de 11,7 cm/min, uma velocidade de alimentação de arame de 8,4 m/min e protegidas por um gás de 98% Argônio e 2% CO₂, com uma vazão de 15 L/min. Neste sistema, o ajuste da velocidade de alimentação do arame é realizado de forma automática com base na corrente de soldagem. A velocidade de alimentação do arame geralmente aumenta à medida que a corrente de soldagem aumenta. Para construir as paredes, a estratégia de deposição foi em zigue-zague, com um incremento vertical de 2,5 mm, totalizando 50 camadas depositadas, conforme mostrado na Figura 3, pois isso permite um melhor controle geométrico, evitando o decaimento nas extremidades. As dimensões finais das paredes foram: espessura de 10 mm, altura de 70 mm e comprimento de aproximadamente 200 mm.

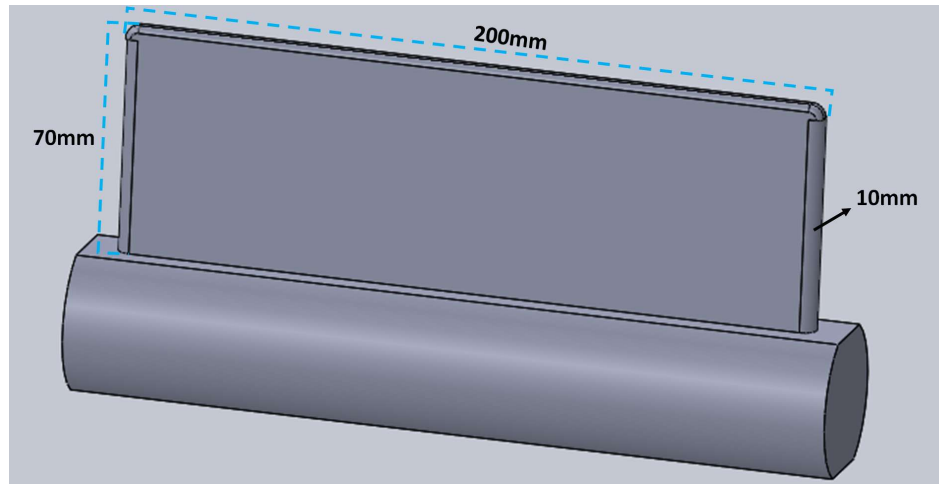


Figura 2. Ilustração da parede depositada no substrato.

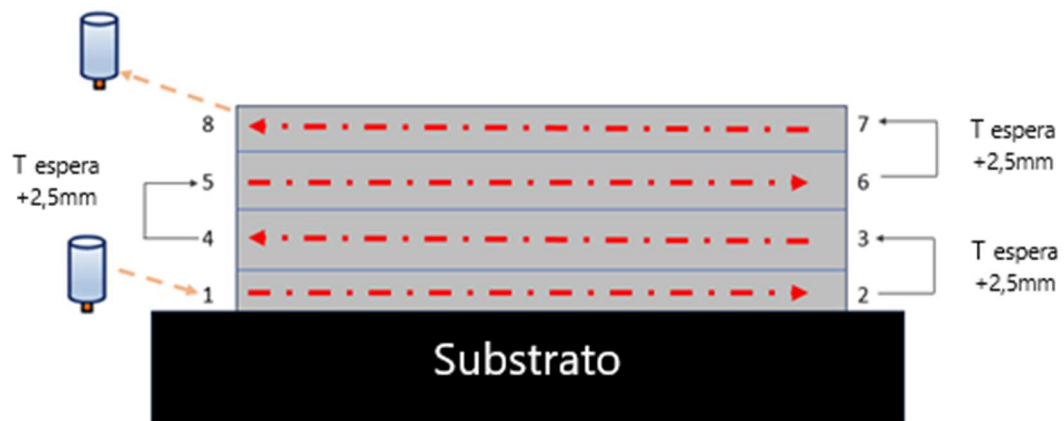


Figura 3. Estratégia de deposição.

A variável de controle para este estudo foi o tempo de espera entre a deposição das camadas. Foram estabelecidos dois níveis para esta variável: 60 segundos para a primeira parede, 180 segundos para a segunda parede e 300 segundos a terceira parede. É importante ressaltar que o resfriamento das peças ocorreu de forma passiva, exclusivamente por convecção natural com o ar ambiente, sem o emprego de qualquer método para acelerar a dissipação de calor.

A seleção desses intervalos de tempo foi fundamentada em estudos prévios de Yang (2017) e Rocha (2020). As conclusões desses autores indicaram que tempos de espera que excedem 5 minutos (300 segundos) apresentam um impacto térmico e microestrutural pouco significativo, além de terem pouca influência na qualidade superficial final da peça.

A Figura 4 mostra a parede produzida, bem como detalhes como a altura e o comprimento obtidos.



Figura 4. Geometria obtida após a conclusão da deposição.

A fim de comparar os efeitos do tempo entre passes, as propriedades do material das paredes foram analisadas em particular. Para cada parede construída, uma amostra para análise de dureza foi retirada transversalmente da região central, e quatro corpos de prova de tração, dois transversais (TT.1.1, TT.1.2) e dois longitudinais (TL.1.1, TL.1.2) foram extraídos (Fig. 5).



Figura 5. Representação das regiões onde os corpos de prova foram removidos.

O perfil de dureza ao longo da altura de construção das paredes foi avaliado por meio de ensaios de microdureza Vickers, realizados na seção transversal das amostras após a devida preparação metalográfica. Os ensaios foram conduzidos em um microdurômetro modelo FM300 (fabricante IGS-Kontakt), localizado no Instituto SENAI de Metalurgia e Ligas Especiais, seguindo rigorosamente as diretrizes da norma ASTM E92-2017. Em cada medição, foi utilizada uma carga de 1 kgf aplicada por um penetrador de diamante durante 15 segundos.

Para garantir uma caracterização representativa da evolução da dureza com a deposição sucessiva de camadas, um total de 10 medições foram efetuadas em cada uma das três regiões de interesse (inferior, central e superior) para todas as paredes. As indentações foram distribuídas em um padrão de zigue-zague, conforme ilustrado na Figura 6, com um

espaçamento vertical de 10 mm e horizontal de 5 mm entre os pontos. A análise teve início a uma distância de 10 mm da base da parede, na região adjacente à interface com o substrato.

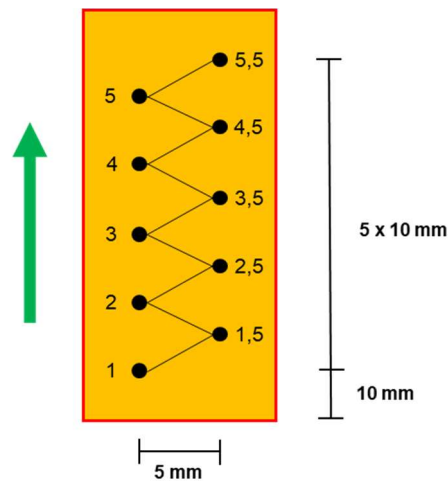


Figura 6. Localização dos pontos de indentação no teste de dureza HV1.

Para determinar as propriedades mecânicas do material, limite de escoamento (LE), o limite de resistência à tração (LRT) e o alongamento (EL), foram conduzidos ensaios de tração uniaxial. Os procedimentos seguiram as diretrizes da norma ASTM A370 e foram executados no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalográficos (LEMM) do Instituto SENAI de Tecnologia em Mecânica e Metalurgia.

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente em corpos de prova subdimensionados, extraídos em duas orientações distintas: transversal, que corresponde à direção de crescimento da parede, e longitudinal, alinhada à direção do cordão de solda. Para a execução dos testes, foi empregada uma máquina de ensaio universal Shimadzu Autograph AG-X 300 kN, operando a uma velocidade constante de 1,5 mm/min.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TESTE DE DUREZA VICKERS

Os resultados obtidos após a medição das paredes 1,2 e 3 são mostrados nas Tabelas 2, 3 e 4 abaixo. Os resultados podem ser analisados rapidamente observando os valores médios de dureza calculados em três áreas das paredes.

Parede 1 - Tempo de Interpasse 60s - HV1 (Mpa) / 1000g, 15s					
Pontos	Base	Pontos	Meio	Pontos	Topo
1	219,6	1	183,0	1	187,3
2	200,4	2	187,0	2	182,6
3	205,9	3	199,3	3	170,6
4	205,4	4	183,2	4	183,0
5	197,9	5	200,4	5	173,1
6	198,3	6	180,3	6	173,0
7	193,6	7	175,3	7	170,7
8	202,8	8	173,9	8	171,3
9	200,3	9	173,2	9	175,4
10	193,4	10	177,0	10	172,9
Média (Mpa)	Desv. Padrão (Mpa)	Média (Mpa)	Desv. Padrão (Mpa)	Média (Mpa)	Desv. Padrão (Mpa)
201,76	7,58	183,26	9,81	175,99	6,03

Tabela 2. Valores HV1 medidos nas regiões da parede 1.

Parede 2 - Tempo de Interpasse 180s - HV1 (Mpa) / 1000g, 15s					
Pontos	Base	Pontos	Meio	Pontos	Topo
1	204,0	1	199,5	1	193,3
2	194,3	2	199,5	2	202,4
3	203,2	3	205,3	3	188,7
4	204,1	4	201,7	4	202,1
5	209,9	5	200,0	5	206,8
6	213,6	6	212,7	6	198,1
7	208,4	7	206,9	7	188,3
8	203,5	8	214,4	8	189,7
9	198,3	9	210,3	9	190,3
10	194,1	10	208,1	10	204,0
Média (Mpa)	Desv. Padrão (Mpa)	Média (Mpa)	Desv. Padrão (Mpa)	Média (Mpa)	Desv. Padrão (Mpa)
203,34	6,39	205,84	5,56	196,37	7,10

Tabela 3. Valores HV1 medidos nas regiões da parede 2.

Parede 3 - Tempo de Interpasse 300s - HV1 (Mpa) / 1000g, 15s					
Pontos	Base	Pontos	Meio	Pontos	Topo
1	210,0	1	198,0	1	211,0
2	232,0	2	221,0	2	213,0
3	241,0	3	223,0	3	224,0
4	242,0	4	230,0	4	222,0
5	230,0	5	223,0	5	231,0
6	210,0	6	248,0	6	230,0
7	217,0	7	243,0	7	229,0
8	213,0	8	239,0	8	232,0
9	226,0	9	228,0	9	206,0
10	226,0	10	230,0	10	215,0
Média (Mpa)	Desv. Padrão (Mpa)	Média (Mpa)	Desv. Padrão (Mpa)	Média (Mpa)	Desv. Padrão (Mpa)
224,70	11,92	228,30	13,95	221,30	9,43

Tabela 4. Valores HV1 medidos nas regiões da parede 3.

Na Figura 7, os resultados são apresentados graficamente e demonstram uma influência marcante do tempo de interpasse sobre a dureza do material. Primeiramente, observa-se que a dureza média geral aumenta progressivamente com o aumento do tempo de espera. A Parede 3 (300s) apresentou os maiores valores de dureza em todas as três regiões, atingindo um pico de 228,30 HV na região central. Em comparação, a Parede 1 (60s) exibiu os valores mais baixos, com uma queda acentuada na dureza da base para o topo.

A segunda observação crítica é a melhora na uniformidade da dureza. A Parede 1 (60s) mostrou uma heterogeneidade significativa, com uma diferença de 25,77 HV entre a base e o topo. Esse comportamento é característico de um acentuado acúmulo de calor; o curto tempo de interpasse não permite a dissipação eficiente do calor, fazendo com que as camadas superiores sejam depositadas sobre um substrato cada vez mais quente. Isso leva a taxa de resfriamento mais lentas, favorecendo o crescimento de grãos e, conseqüentemente, resultando em menor dureza, conforme discutido por Wang et al. (2021). Em contraste, a Parede 2 (180s) já mostra uma melhora drástica na homogeneidade, com uma variação de apenas 6,97 HV. A Parede 3 (300s), com uma variação de 7,00 HV, não só atinge um patamar de dureza superior, como mantém essa propriedade de forma consistente ao longo de toda a sua altura. Este resultado sugere que um tempo de interpasse de 300 segundos é altamente eficaz para dissipar o calor e garantir um ciclo térmico mais estável entre as camadas, promovendo um refino microestrutural que se reflete diretamente no aumento e na homogeneização da dureza.

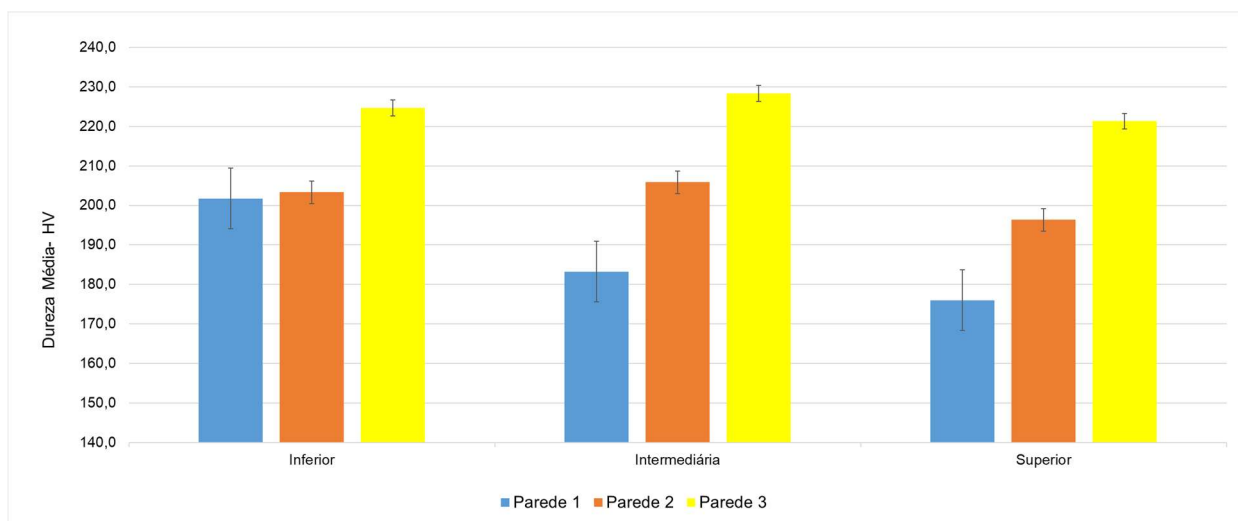


Figura 7. Dureza média em três regiões da parede.

4.2 TESTE DE TRAÇÃO

Os resultados obtidos após a realização dos testes de tração nas paredes 1, 2 e 3 são mostrados na Tabela 5, 6 e 7 abaixo. Os resultados podem ser analisados rapidamente observando os valores médios para limite de escoamento, limites de resistência e alongamento.

TRANSVERSAL / 60s			
Corpo de Prova	LE (MPa)	LR (MPa)	Al. (%)
TT1.1	289,12	597,03	52,91
TT1.2	287,78	582,92	52,90
Média	288,45	589,98	52,91
Desvio Padrão (MPa)	0,95	9,98	0,01
Coef. Variação (%)	0,33	1,69	0,01
LONGITUDINAL / 60s			
Corpo de Prova	LE (MPa)	LR (MPa)	Al. (%)
TL1.1	324,46	691,13	54,94
TL1.2	267,82	665,99	49,94
Média	296,14	678,56	52,44
Desvio Padrão (MPa)	40,05	17,78	3,54
Coef. Variação (%)	13,52	2,62	6,74

Tabela 5. Resultados do teste de tração parede 1.

TRANSVERSAL / 180s			
Corpo de Prova	LE (MPa)	LR (MPa)	Al. (%)
TT1.1	309,34	570,20	57,11
TT1.2	312,28	572,29	59,92
Média	310,81	571,25	58,52
Desvio Padrão (MPa)	2,08	1,48	1,99
Coef. Variação (%)	0,67	0,26	3,40
LONGITUDINAL / 180s			
Corpo de Prova	LE (MPa)	LR (MPa)	Al. (%)
TL1.1	314,74	651,14	51,10
TL1.2	340,83	651,21	50,46
Média	327,79	651,18	50,78
Desvio Padrão (MPa)	18,45	0,05	0,45
Coef. Variação (%)	5,63	0,01	0,89

Tabela 6. Resultados do teste de tração parede 2.

TRANSVERSAL / 300s			
Corpo de Prova	LE (MPa)	LR (MPa)	Al. (%)
TT1.1	364,29	559,15	40,55
TT1.2	352,76	552,24	53,30
Média	358,53	555,70	46,93
Desvio Padrão (MPa)	8,15	4,89	9,02
Coef. Variação (%)	2,27	0,88	19,21
LONGITUDINAL / 300s			
Corpo de Prova	LE (MPa)	LR (MPa)	Al. (%)
TL1.1	336,40	565,61	54,05
TL1.2	347,40	562,46	57,42
Média	341,90	564,04	55,74
Desvio Padrão (MPa)	7,78	2,23	2,38
Coef. Variação (%)	2,27	0,39	4,28

Tabela 7. Resultados do teste de tração parede 3.

A Figura 8 mostra que em ambas as paredes, a análise dos dados de tração revela tendências complexas e multifacetadas. O Limite de Escoamento (LE) exhibe uma correlação positiva e forte com o aumento do tempo de interpasso. A Parede 3 (300s) apresentou os maiores

valores de LE em ambas as direções, com um aumento de aproximadamente 24% na direção transversal em comparação com a Parede 1 (60s). Esse comportamento está em total concordância com a relação de Hall-Petch e com os resultados de dureza, indicando que o material se torna mais resistente ao início da deformação plástica devido ao refino microestrutural promovido pelo resfriamento mais eficaz.

Curiosamente, o Limite de Resistência à Tração (LRT) demonstrou uma tendência oposta, diminuindo com o aumento do tempo de interpasse. A Parede 1 (60s) registrou o maior valor de LRT, especialmente na direção longitudinal (678,56 MPa). Esse fenômeno sugere que, embora o acúmulo de calor (interpasse curto) seja prejudicial para a dureza e o LE, ele pode ativar mecanismos de endurecimento por deformação ou precipitação que elevam a resistência máxima do material antes da fratura. O maior tempo de permanência em altas temperaturas pode ter influenciado a morfologia e a quantidade de ferrita delta, impactando o comportamento de encruamento.

A anisotropia mecânica, uma característica inerente a processos de fabricação camada a camada como o MADA (Haden et al., 2017), também foi influenciada pelo tempo de interpasse. Nas paredes de 60s e 180s, a anisotropia é pronunciada, com o LRT na direção longitudinal sendo significativamente maior (15% e 14%, respectivamente) que na direção transversal. Esta diferença é tipicamente atribuída à orientação dos grãos colunares que crescem epitaxialmente na direção de construção. Notavelmente, na Parede 3 (300s), a anisotropia do LRT é drasticamente reduzida, com os valores nas direções longitudinal e transversal tornando-se quase idênticos (diferença de apenas 1,5%). Isso indica que um controle térmico mais rigoroso, proporcionado pelo longo tempo de espera, pode promover uma microestrutura mais equiaxial e homogênea, resultando em propriedades mecânicas mais isotrópicas.

O Alongamento (EL), indicador da ductilidade, não apresentou uma tendência monotônica clara. A Parede 2 (180s) mostrou a maior ductilidade na direção transversal (58,52%), enquanto a Parede 3 (300s) exibiu o maior valor na direção longitudinal (55,74%). Essa variação sugere um complexo balanço entre os mecanismos de endurecimento e a microestrutura resultante, que afeta a capacidade de deformação do material de maneira distinta para cada condição térmica.

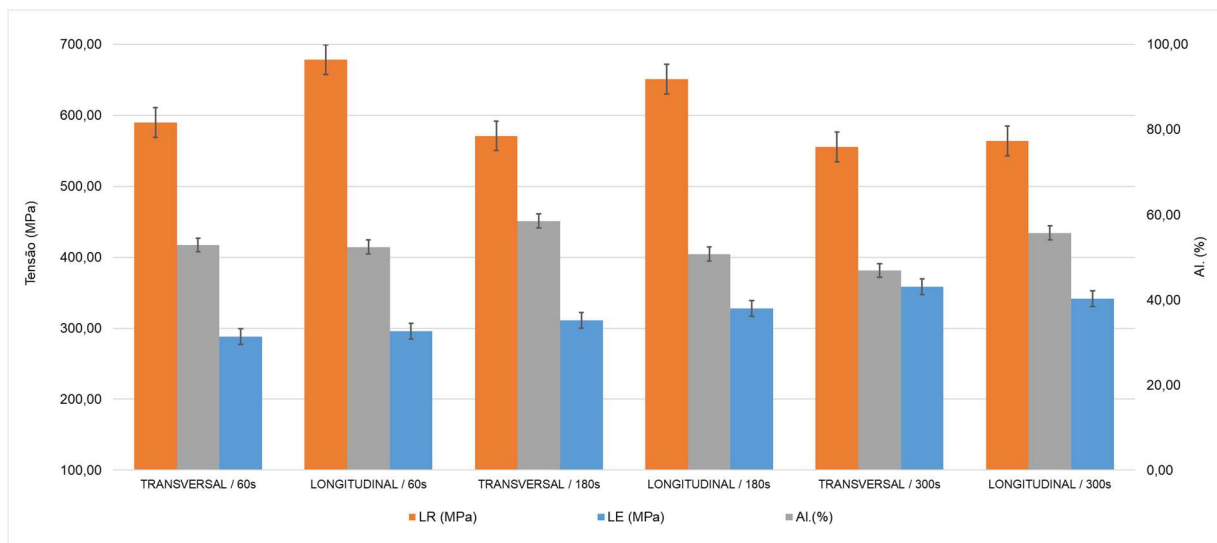


Figura 8. Tensão e alongamento médios da parede.

5 – CONCLUSÕES

Esta pesquisa analisou a influência que o tempo entre passes pode ter na redução do acúmulo de calor e, conseqüentemente, na melhoria das propriedades de paredes de aço inoxidável 308L produzidas por MADA. As principais conclusões do estudo são resumidas a seguir:

1. Fica demonstrado que o tempo de interpasse é um parâmetro de processo de primeira ordem, capaz de modular fundamentalmente as propriedades mecânicas. Um aumento no tempo de espera promoveu um aumento significativo e consistente da dureza e do limite de escoamento. Este efeito é atribuído à melhor dissipação de calor, que resulta em maiores taxas de resfriamento e, conseqüentemente, em um refino microestrutural.
2. A homogeneidade das propriedades ao longo da direção de construção foi drasticamente aprimorada com o aumento do tempo de interpasse. A condição de 300 segundos provou ser altamente eficaz na mitigação do acúmulo de calor, resultando em um perfil de dureza notavelmente uniforme, uma característica desejável para componentes de alto desempenho.
3. Foi identificado uma compensação entre o limite de escoamento e a resistência máxima à tração. Enquanto tempos de interpasse longos favorecem um maior limite de escoamento, tempos mais curtos (com maior acúmulo de calor) otimizam o comportamento de encruamento do material, elevando sua resistência máxima.
4. O controle térmico rigoroso, proporcionado pelo tempo de interpasse de 300

segundos, mostrou-se notavelmente eficaz na mitigação da anisotropia mecânica, resultando em um material com comportamento de tração quase isotrópico. Este é um avanço significativo, pois a anisotropia é um dos principais desafios para a qualificação de peças fabricadas por MADA.

Do ponto de vista prático, esta pesquisa valida o tempo de interpasso como uma ferramenta de baixo custo e alta eficácia para a engenharia de propriedades em componentes MADA. A escolha deliberada deste parâmetro permite customizar o material para aplicações específicas: tempos longos para componentes que exigem alta dureza superficial e resistência ao escoamento, e tempos curtos para aplicações que demandam a máxima capacidade de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HADEN, C. V., ET AL., 2017. “Anisotropic tensile behavior of austenitic stainless steel 316L made by wire-arc additive manufacturing”. **Additive Manufacturing**, Vol. 16, pp. 1-10.

JIN, W., ZHANG, C., JIN, S., TIAN, Y., WELLMANN, D., AND LIU, W., 2020. “Wire arc additive manufacturing of stainless steels: a review”. **Applied sciences**, Vol. 10, No. 5, pp. 1563.

LAGHI, V., PALERMO, M., TONELLI, L., GASPARINI, G., CESCHINI, L., AND TROMBETTI, T., 2020. “Tensile properties and microstructural features of 304L austenitic stainless steel produced by wire-and-arc additive manufacturing”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 106, pp. 3693-3705.

LI, Y., LUO, Y., LI, J., SONG, D., XU, B., AND CHEN, X., 2021. “Ferrite formation and its effect on deformation mechanism of wire arc additive manufactured 308 L stainless steel”. **Journal of Nuclear Materials**, Vol. 550, pp. 152933.

LIU, R., ET AL., 2022. “A review of mechanical properties of stainless steels by wire arc additive manufacturing”. **Welding in the World**, Vol. 66, pp. 1569-1596.

MAI, D. S., PARIS, H., 2021a. “Influences of the compressed dry air-based active cooling on external and internal qualities of wire-arc additive manufactured thin-walled SS308L components”. **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 62, pp. 18-27.

MAI, D. S., DOAN, T. K., PARIS, H., 2021b. “Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties”. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, Vol. 24, No. 4, pp. 1015-1026.

SAFARZADE, A., SHARIFITABAR, M., AFARANI, M. S., 2020. “Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing process”. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Vol. 30, No. 11, pp. 3016-3030.

WANG, Y. F., ET AL., 2021. “Effect of interpass temperature on the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of 316L stainless steel prepared by wire arc additive manufacturing”. **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 297, pp. 117208.

ZHAI, W., WU, N., AND ZHOU, W., 2022. “Effect of interpass temperature on wire arc additive manufacturing using high-strength metal-cored wire”. **Metals**, Vol. 12, No. 2, pp. 212.

ZHANG, C., QIU, Z., ZHU, H., WANG, Z., MURÁNSKY, O., IONESCU, M., AND LI, H., 2021. “On the effect of heat input and interpass temperature on the performance of inconel 625 alloy deposited using wire arc additive manufacturing–cold metal transfer process”. **Metals**, Vol. 12, No. 1, pp. 46.