

Validação da Técnica de Correlação de Imagens Digitais Aplicada ao Ensaio de Tração de Amostras Miniaturizadas de Aço Inoxidável 316L Produzidas por Manufatura Aditiva

Validation of the Digital Image Correlation Technique Applied to Tensile Testing of Miniaturized 316L Stainless Steel Samples Produced by Additive Manufacturing

Validación de la Técnica de Correlación de Imágenes Digitales Aplicada al Ensayo de Tracción de Muestras Miniaturizadas de Acero Inoxidable 316L Producidas por Manufatura Aditiva

Samuel Antonio Correa dos Santos¹
Tamires de Souza Nossa²

Resumo: A técnica de Correlação de Imagens Digitais (DIC) permite a medição de deformações sem contato, utilizando imagens de superfícies com um padrão estocástico. Este estudo aplica a DIC em corpos de prova miniaturizados de aço inoxidável 316L extraídos de blocos fabricados por manufatura aditiva por arco com arame (WAAM). As amostras foram produzidas em diferentes orientações e testadas sob tração. Os resultados mostraram que as amostras longitudinais apresentaram melhor desempenho mecânico, enquanto as transversais foram menos resistentes. A análise por DIC foi validada por meio de microscopia, demonstrando a relação entre as linhas de fusão, a distribuição de deformações e o comportamento mecânico das amostras.

Palavras-chave: Correlação de Imagens Digitais, Manufatura Aditiva, Corpos de Prova Miniaturizados.

Abstract: The Digital Image Correlation (DIC) technique enables non-contact strain measurement using images of surfaces with a stochastic pattern. This study applies DIC to miniaturized tensile specimens of 316L stainless steel extracted from blocks manufactured by wire-arc additive manufacturing (WAAM). The samples were produced in different orientations and tested under tension. The results showed that the longitudinal samples exhibited superior mechanical performance, while the transverse ones were less resistant. The DIC analysis was validated through microscopy, demonstrating the relationship between fusion lines, strain distribution, and the mechanical behavior of the samples.

Keywords: Digital Image Correlation, Additive Manufacturing, Miniaturized Specimens.

Resumen: La técnica de Correlación de Imágenes Digitales (DIC) permite medir deformaciones sin contacto, utilizando imágenes de superficies con un patrón estocástico. Este estudio aplica la DIC en probetas miniaturizadas de acero inoxidable 316L obtenidas de bloques fabricados mediante manufatura aditiva por arco y alambre (WAAM). Las muestras fueron producidas en diferentes orientaciones y ensayadas a tracción. Los resultados mostraron que las muestras longitudinales presentaron un mejor desempeño mecánico, mientras que las transversales fueron menos resistentes. El análisis por DIC fue validado mediante microscopía, demostrando la relación entre las líneas de fusión, la distribución de deformaciones y el comportamiento mecánico de las muestras.

Palabras clave: Correlación de Imágenes Digitales, Manufatura Aditiva, Probetas Miniaturizadas.

Submetido 13/03/2026

Aceito 21/07/2026

Publicado 04/08/2026

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. ORCID: 0009-0004-8021-0426. E-mail: s.correa@aluno.ifsp.edu.br

² Pós-doutora em Engenharia dos Materiais. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. ORCID: 0000-0002-4715-5953. E-mail: tamires.nossa@ifsp.edu.br.

Introdução

Entre as principais técnicas de medição da deformação por meio de análise experimental é possível citar os extensômetros, medidores de deformação (*strain gauges*) e técnicas de imagem ou medição óptica. Essa última categoria, a Correlação de Imagens Digitais (*DIC - Digital Image Correlation*) começou a ser abordada no meio científico a partir da década de 1980, quando foram definidos os parâmetros que até hoje são utilizados como fundamentos para aplicação da técnica (Pan, 2018).

Em termos gerais, a *DIC* consiste em mensurar a deformação de uma superfície por meio da captura de imagens utilizando uma câmera fotográfica durante a aplicação de tensões. Esses registros são analisados em *softwares* especializados, o que permite extrair das imagens o deslocamento de pontos da superfície aplicando algoritmos baseados em diferenciação numérica (Pan, 2018), conferindo alta precisão quando os parâmetros ideais de iluminação, padrão de pontos e calibração da câmera são aplicados. Para tornar possível esse rastreamento, é necessário aplicar na superfície um padrão estocástico, composto por pontos aleatórios de alto contraste que servem de referência para a correlação das imagens ao longo do ensaio (Strauch, 1991).

As vantagens da aplicação da técnica estão na possibilidade de medição da deformação por meio da ausência de contato direto ou aplicação de esforços na amostra analisada. Além disso, seu custo é mais baixo e a sua aplicação é prática (Strauch, 1991). Entretanto, é de suma importância realizar o controle do ambiente onde o ensaio será realizado, visto que a obtenção de imagens é sensível a vibrações e mudanças na iluminação. Outro ponto a ser considerado é que a resolução da técnica depende da qualidade da câmera, calibração das lentes e volume de medição, apresentando melhor resolução em objetos de estudo de comprimentos menores (Reu et al., 2022).

Existem diversos exemplos de aplicação da *DIC* em diferentes trabalhos, como no controle de qualidade de embalagens plásticas (Zhou et al., 2013), definição de propriedades mecânicas de materiais compósitos (Janeliukstis, 2021), análise da progressão de falhas em estruturas soldadas (Mohamadizadeh et al., 2021) e aplicações multidisciplinares, como por exemplo, na análise de tecidos biológicos (Chen et al., 2021).

Diante do exposto, a aplicação da DIC mostra-se particularmente compatível com o uso em corpos de prova miniaturizados. Isso se deve ao fato de que a técnica apresenta melhor resolução quanto menor for a região de interesse analisada, uma vez que a área de superfície reduzida favorece a detecção precisa dos deslocamentos e deformações. Esse método já foi explorado em outros trabalhos, como por exemplo, na avaliação das propriedades mecânicas da estrutura de um vaso de pressão em serviço (Kumar et al., 2014), para análise de chapas de magnésio AZ31B (Cruz et al., 2020) e o estudo da deformação de amostras de aço F82H irradiado por nêutrons (Nozawa et al., 2020).

Os ensaios em corpos de prova miniaturizados, que podem ser representados pela sigla SSTT (do inglês, *Small Specimen Test Technologies*), são amplamente utilizados na indústria nuclear, aeroespacial e em microdispositivo (Wang et al., 2023; Zheng et al., 2020). A fabricação desses modelos surge como alternativa quando há insuficiência de recursos, quantidades pequenas de material disponível para confecção de amostras padrão ou para prototipagem rápida de material de máquinas ou equipamentos em serviço (Zhang et al., 2021).

No contexto de materiais relevantes para aplicação dessa análise, a manufatura aditiva tem se apresentado como uma tendência em ambientes industriais e de pesquisa, como uma forma de obtenção de componentes com precisão e baixo tempo produtivo (Srivastava; Rathee, 2022). Apesar de ser tradicionalmente realizada com materiais poliméricos, a investigação de métodos para utilização de outros materiais como concreto (Wu; Wang; Wang, 2016) ou metais é amplamente estudada e aplicada (Durai Murugan et al., 2022)

Entre os principais metais aplicáveis à manufatura aditiva podemos citar o aço 316L, que apresenta grande potencial devido a características como resistência à corrosão em altas temperaturas devido ao baixo teor de carbono e presença de molibdênio em sua composição química, como observado na Tabela 1 (ABNT, 2011). O 316L pode ser processado por Manufatura Aditiva de Deposição a Arco (WAAM - *Wire Arc Additive Manufacturing*) que consiste na deposição de camadas do material fundido por arco de solda com auxílio de comandos computadorizados (Liu et al., 2021).

Tabela 1 – Caracterização química do aço 316L

Elemento	Valor (%)
C	0,03
Mn	2
Si	1
P	0,045
S	0,03
Cr	16,00 – 18,00
Ni	10,00 – 14,00
Mo	2,00 – 3,00

Fonte: ABNT (2011).

O objetivo desse trabalho é realizar a validação da técnica de Correlação de Imagens Digitais aplicada na análise de corpos de prova miniaturizados produzidos por meio de manufatura aditiva de deposição a arco de aço 316L, bem como a caracterização das propriedades mecânicas e microestrutura do material.

Metodologia

A Figura 01 mostra os passos utilizados para a realização desse trabalho na forma de fluxograma, partindo da manufatura do bloco por manufatura aditiva até a microscopia para validação do DIC.

Figura 01: Fluxograma de realização do trabalho



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

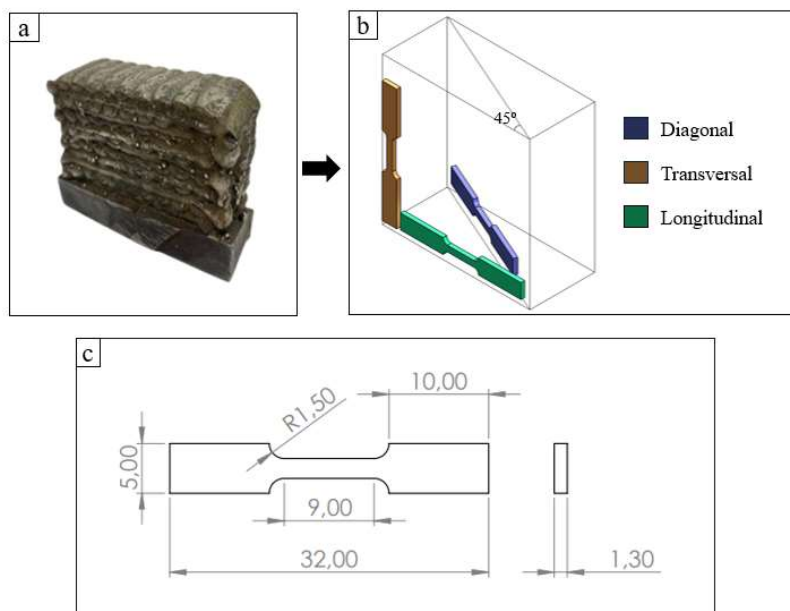
O material foi produzido em outro estudo utilizando a técnica de manufatura aditiva por deposição a arco (*Wire Arc Additive Manufacturing* – WAAM) (Neto et al., 2025), utilizando-se de um arame de aço inoxidável 316L com diâmetro de 1,2 mm, associado a um fluxo gasoso

composto por 97,5% de argônio e 2,5% de dióxido de carbono, aplicado a uma distância de trabalho de 14 mm sobre um substrato de aço SAE 1020 com dimensões de 100 mm × 100 mm × 100 mm. O processo foi realizado com a fonte de soldagem PULSARC 6200 Max, da Eutectic Castolin. Como resultado, obteve-se um bloco com 45 mm de comprimento, 22 mm de largura e 50 mm de altura (Neto et al., 2025).

Preparação das Amostras

A partir dos blocos cedidos foram obtidas chapas, para que os corpos de prova pudessem ser extraídos. Essas chapas foram cortadas em 5 amostras nos sentidos longitudinal (denominadas L1 a L5), transversal (T1 a T5) e diagonal em um ângulo de 45° (D1 a D5) por meio de corte por eletroerosão na Novick Eletrocut AR1300. As dimensões para confecção dos corpos de prova validadas na literatura para ensaio de tração miniaturizado (Zhang, 2021) estão dispostas na Figura 02.

Figura 02: Bloco de 316L (a), (b) sentidos de corte transversal, longitudinal e diagonal e (c) dimensões do corpo de prova.



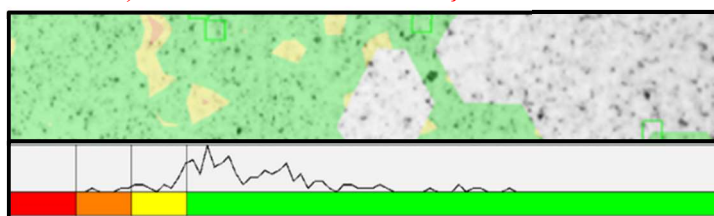
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A preparação da superfície para a realização de DIC foi realizada por meio do lixamento das amostras com lixas d'água com 1200 de granulação, pintura com tinta metálica automotiva branca e inserção do padrão estocástico por meio da aplicação de tinta de impressão realizada por aerógrafo. Foram avaliadas diferentes padronizações quanto a limpeza superficial, tempo de secagem, distância de trabalho e densidade do padrão estocástico.

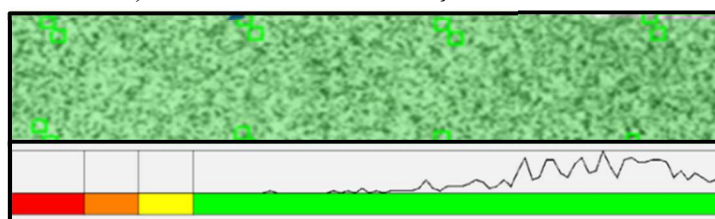
A qualidade do padrão estocástico foi definida por meio do software GOM Correlate 2019, onde é possível analisar a indexação ao longo da área do corpo de prova. Nos parâmetros de análise, foi definido um tamanho de facetas de 30 pixels e distância entre pontos de 20 pixels. O acabamento com melhores resultados está exposto na Figura 03, sendo que a escala de cores indica a qualidade do padrão identificado pelo programa, onde a coloração verde indica as regiões com melhor reconhecimento, enquanto a vermelha representa menor reconhecimento. As áreas sem coloração não foram identificadas pelo software.

Figura 03: Comparação da qualidade dos padrões por meio do software GOM Correlate 2019, onde (a) padrão com baixa indexação e (b) padrão com alta indexação.

Padrão a) – Baixa Taxa de Indexação



Padrão b) – Alta Taxa de Indexação



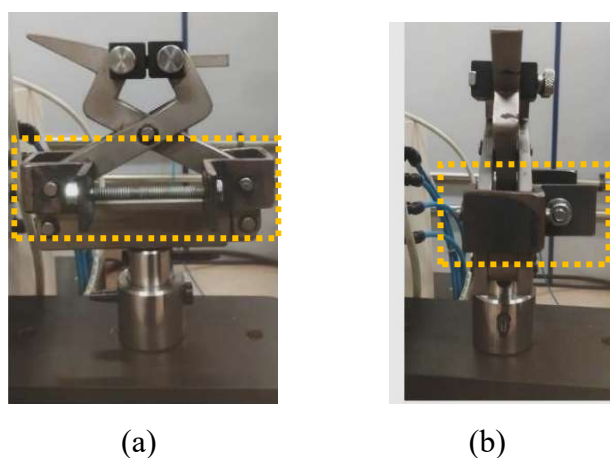
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Caracterização Mecânica

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios DL30000 da Emic, com célula de carga de 500 kgf e velocidade de subida de 1 mm/min. Foram analisados

5 corpos de prova de cada direção. Para a fixação dos corpos de prova foi necessária uma adaptação em um sistema de presilhas, que tiveram as molas substituídas por um parafuso prisioneiro para prevenir o escorregamento durante a realização dos ensaios. A Figura 04 mostra o dispositivo antes e depois da adaptação.

Figura 04: Imagens da pesilha de fixação com identificação da adaptação do fechamento (a) vista frontal (b) vista lateral



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As imagens foram obtidas por meio de câmera fotográfica NIKON DL7200 com uma lente de alta resolução TAMRON USD58 SP90mm F/2.8 1:1 MACRO. Para garantir a estabilidade e repetibilidade dos ensaios, foram utilizados um tripé para estabilidade e um disparador automático que obteve as imagens em intervalos contínuos de 4 segundos por uma função intervalômetro.

Para assegurar a padronização da iluminação durante o ensaio e a redução de ruído na obtenção de imagens, foi desenvolvido um estúdio acoplável à região de testes. Esse dispositivo foi adaptado de um projeto anterior, possibilitando a instalação de uma lâmpada LED de luz azul.

A análise da deformação foi realizada em uma licença gratuita do *software* GOM Correlate 2019, onde foi realizada a seleção da área do corpo de prova e a definição da escala. Entre as diversas análises disponíveis no programa podemos destacar o cálculo da deformação

máxima, a deformação equivalente de Von – Mises e a verificação da qualidade do padrão estocástico das amostras.

Caracterização Microscópica

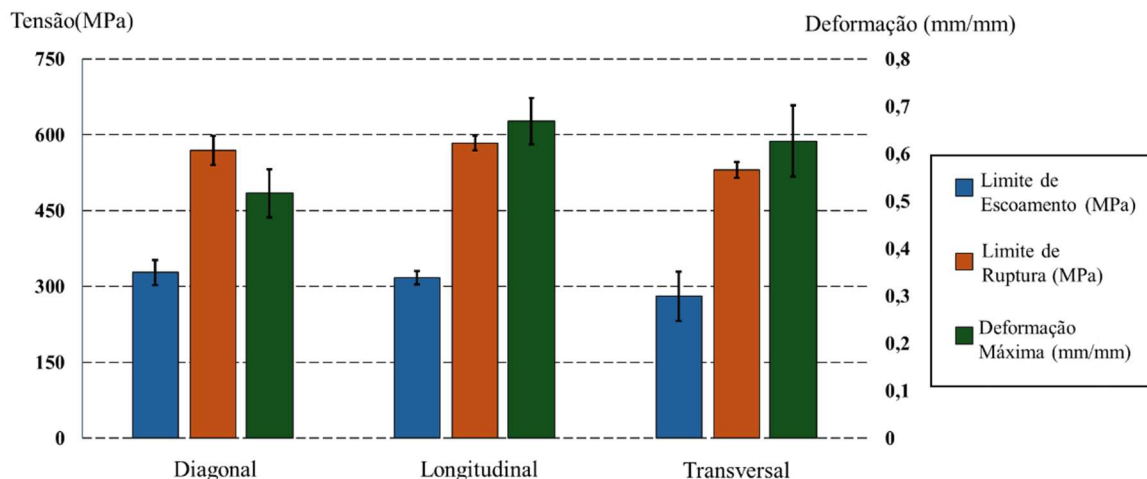
Para a realização da microscopia, que possui como objetivo a validação da análise DIC, as amostras foram embutidas em baquelite e em seguida passaram por um processo de lixamento com granulometrias consecutivas de 600, 800 e 1200. Após esse processo, foi realizado o polimento com alumina de 0,3 μm , utilizando-se de politrizes Arotec Aropol 2V. As imagens foram obtidas com o microscópio Zeiss Axio Lab A1.

Resultados

Ensaio de tração miniaturizado com DIC

Foi possível a condução dos ensaios de tração na ausência de escorregamentos ao longo de todo o teste, sendo eficaz a adaptação do dispositivo de fixação. A Figura 5 apresenta os valores médios de Limite de Escoamento, Limite de Ruptura e Deformação Máxima para as amostras nos sentidos transversal, longitudinal e diagonal, com o erro definido por meio de desvio padrão amostral. Vale destacar que o Limite de Escoamento foi obtido pelas curvas tensão x deformação, utilizando-se de uma análise de regressão linear com uma reta de 100 pontos deslocada 2% em relação à curva original tensão x deformação.

Figura 5 – Propriedades Mecânicas das amostras em função da direção de deposição.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Para fins de comparação, os resultados obtidos no ensaio foram confrontados com outros trabalhos que utilizaram metodologias semelhantes para confecção de amostras por manufatura aditiva e apresentou propriedades muito similares (Ajay et al., 2023; Wang; Xue; Wang, 2019). Quando comparado ao aço 316L fundido, o limite de escoamento das amostras longitudinais é aproximadamente 37,42 % maior (MATWEB, 2025). O resumo dos resultados pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos Resultados dos Ensaio de Tração

Amostras	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Def. Máx (mm/mm)
Diagonal	327,59 ± 24,45	569,19 ± 28,72	0,52 ± 0,06
Longitudinal	317,21 ± 12,85	583,54 ± 14,05	0,67 ± 0,05
Transversal	280,62 ± 48,36	530,59 ± 16,10	0,63 ± 0,08

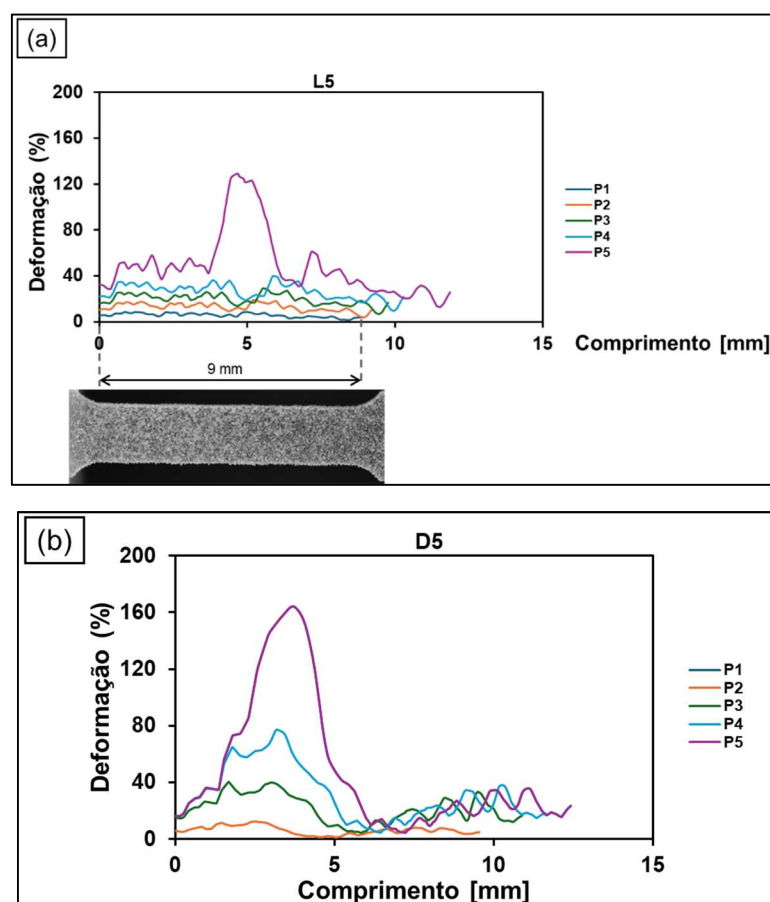
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

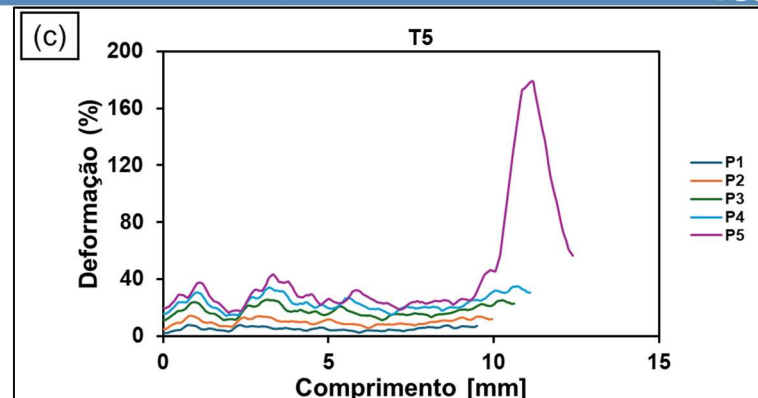
Os resultados dos ensaios mostraram que as amostras no sentido diagonal e longitudinal apresentaram os maiores valores médios de limite de escoamento (LE) e limite de ruptura (LR), respectivamente. Em relação à deformação específica, a amostra longitudinal (L) apresentou as maiores deformações máximas médias e a menor dispersão, sendo 5,97% superiores às amostras transversais (T) e 22,39% superiores às amostras diagonais (D), que exibiram os menores valores.

As amostras produzidas na tansversal apresentaram variações significativas na tensão de escoamento e deformação máxima, o que pode ser constatado devido a presença de barras de erro de maior amplitude. É possível destacar que a amostra apresentou propriedades inferiores a demais, retornando os menores valores de LE e LR, sendo essa última, com menor variação de resultados.

Para a análise DIC foi selecionado um corpo de prova de cada orientação. As imagens analisadas foram escolhidas em pontos de deformação $P1 = 0,15 \text{ mm/mm}$; $P2 = 0,25 \text{ mm/mm}$; $P3 = 0,35 \text{ mm/mm}$; $P4 = 0,45 \text{ mm/mm}$; $P5 = \text{Último ponto antes da ruptura}$. A Figura 06 indica a relação entre comprimento x deformação de cada amostra nos pontos de deformação citados anteriormente e as imagens obtidas em cada ponto da deformação de cada corpo de prova. A Figura 07 mostra a evolução da deformação durante o desenvolvimento do ensaio.

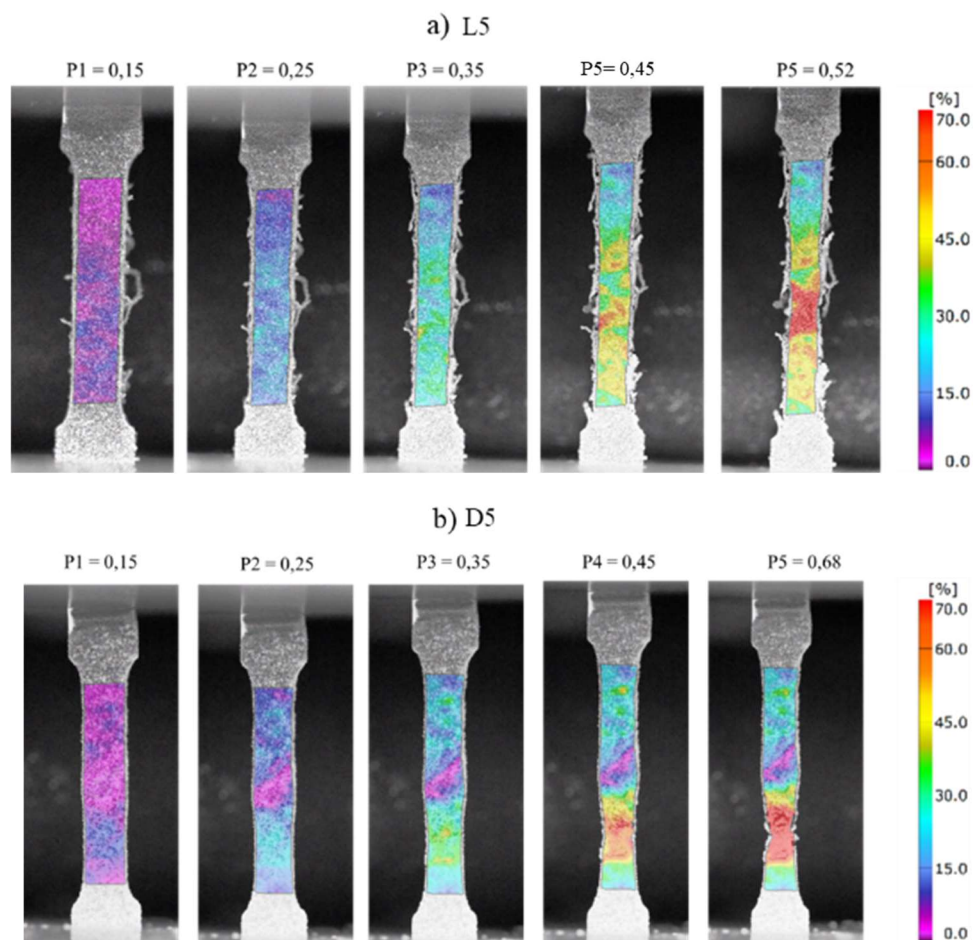
Figura 06 – Curvas Comprimento x Deformação obtidas por DIC (a) Amostra Longitudinal, (b) Amostra Diagonal (c) Amostra Transversal

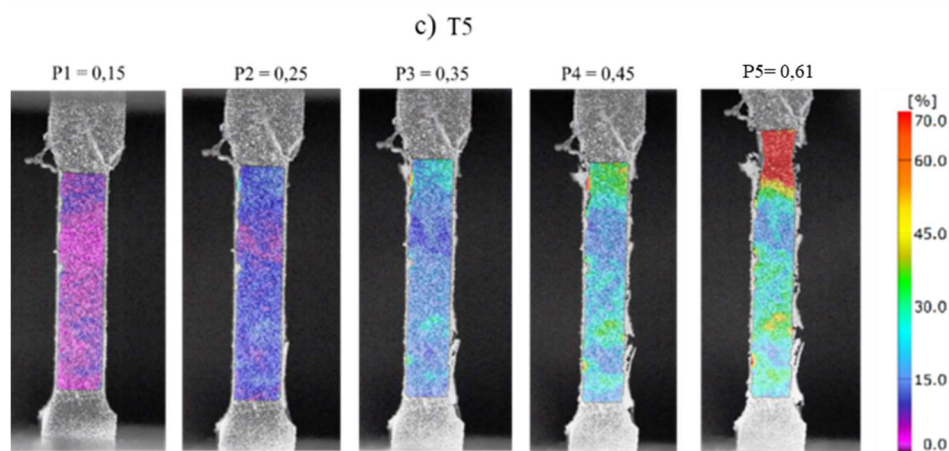




Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 07: Resultados da Análise DIC (a) Amostra Longitudinal, (b) Amostra Diagonal (c) Amostra Transversal





Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Analisando os resultados de DIC, é possível observar que a amostra diagonal apresentou estricção dupla a partir de P3 até a ruptura. A amostra longitudinal apresentou concentração de tensões na região central, com comportamento uniforme até o fim da execução do ensaio. A amostra transversal apresentou concentrações distribuídas ao longo do comprimento útil do corpo de prova até o fim do ensaio, que culminou em uma concentração localizada na extremidade inferior um pouco antes da falha.

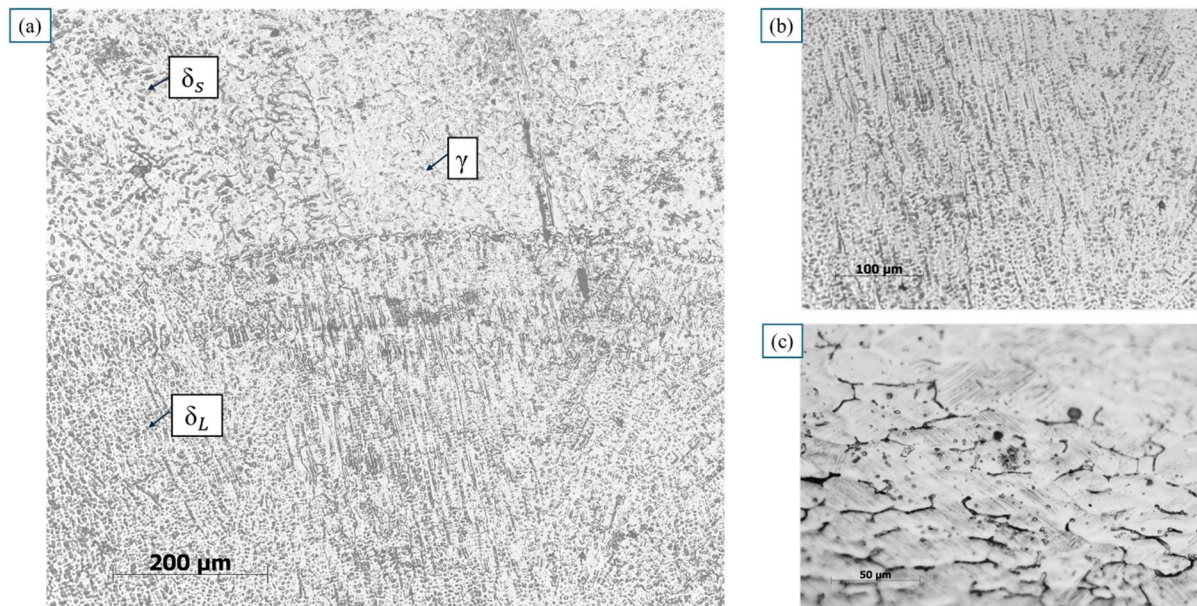
Morfologias das Amostras Rompidas

Após os ensaios mecânicos, foram obtidas imagens de microscopia óptica dos corpos de prova rompidos, sendo possível relacionar o comportamento observado durante os ensaios com a micrografia das amostras.

A micrografia observada é composta da distribuição de ferrita delta (de coloração escura) em uma matriz austenítica (em cinza). É possível perceber a diferença da morfologia das fases delimitadas pelas linhas de refusão, onde os tempos de resfriamento do material levam a formação de morfologias distintas, conforme apresentado no trabalho de (Wang et al., 2022). A fase ferrítica apresenta-se basicamente em duas formas distintas nas amostras estudadas: ferrita lamelar e ferrita esquelética, apresentando características dependentes das condições de soldagem e resfriamento. Conforme é possível perceber na Figura 08, a ferrita se apresenta na forma de lamelas (*lathy ferrite*) em regiões próximas à linha de fusão, o que pode indicar tempos de resfriamento mais curtos. Já em tempos moderados de resfriamento, a taxa de difusão se

torna limitada, levando a substituição da ferrita pela austenita, levando à formação de ferrita em forma esquelética em estruturas mais grosseiras e mais espaçadas (Noga et al., 2024).

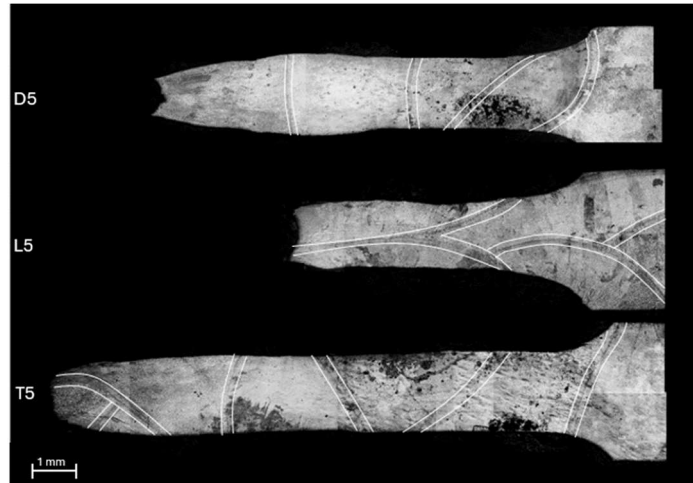
Figura 08 – (a) Fases presentes no material: Matriz austenítica — γ , ferrita lamelar — δ_L , ferrita esquelética — δ_s , (b) Ferrita lamelar, (c) Ferrita esquelética



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 09 apresenta um conjunto de micrografias que inicialmente foram feitas com ampliação de 50x e depois todas as imagens geradas foram unidas, onde é possível observar as linhas de fusão formadas durante o processo de manufatura aditiva, destacadas em linhas brancas.

Figura 09: Micrografias das amostras na região de ruptura, onde D5 é Diagonal, L5 é Longitudinal e T5, Transversal.

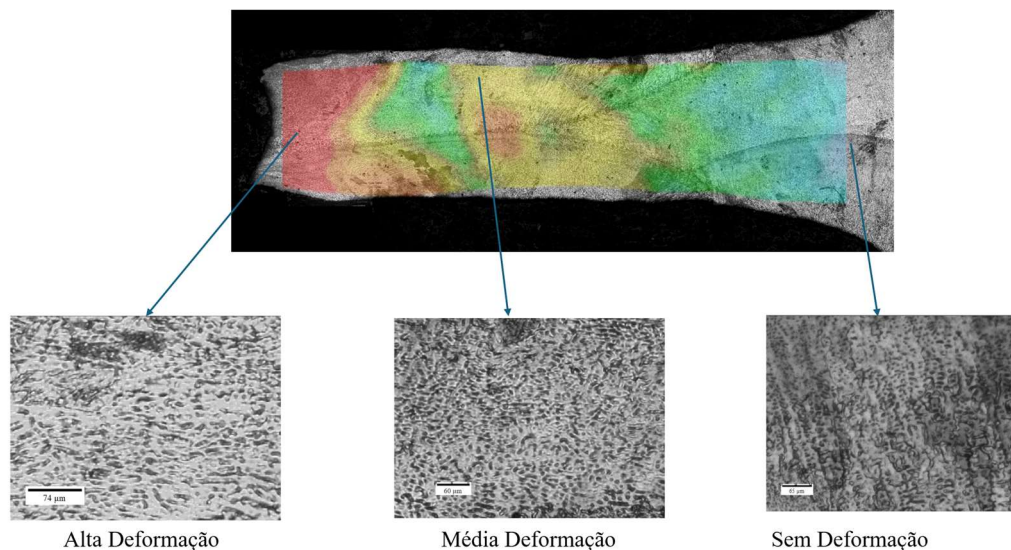


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As amostras confeccionadas no sentido longitudinal possuem linhas de fusão paralelas ao sentido do ensaio, o que resultou em melhores resultados em resistência e deformação máxima. Em contrapartida, a amostra transversal apresentou linhas de fusão perpendiculares à direção do ensaio, o que justifica os diversos pontos de concentração de tensão observados na Figura 6.

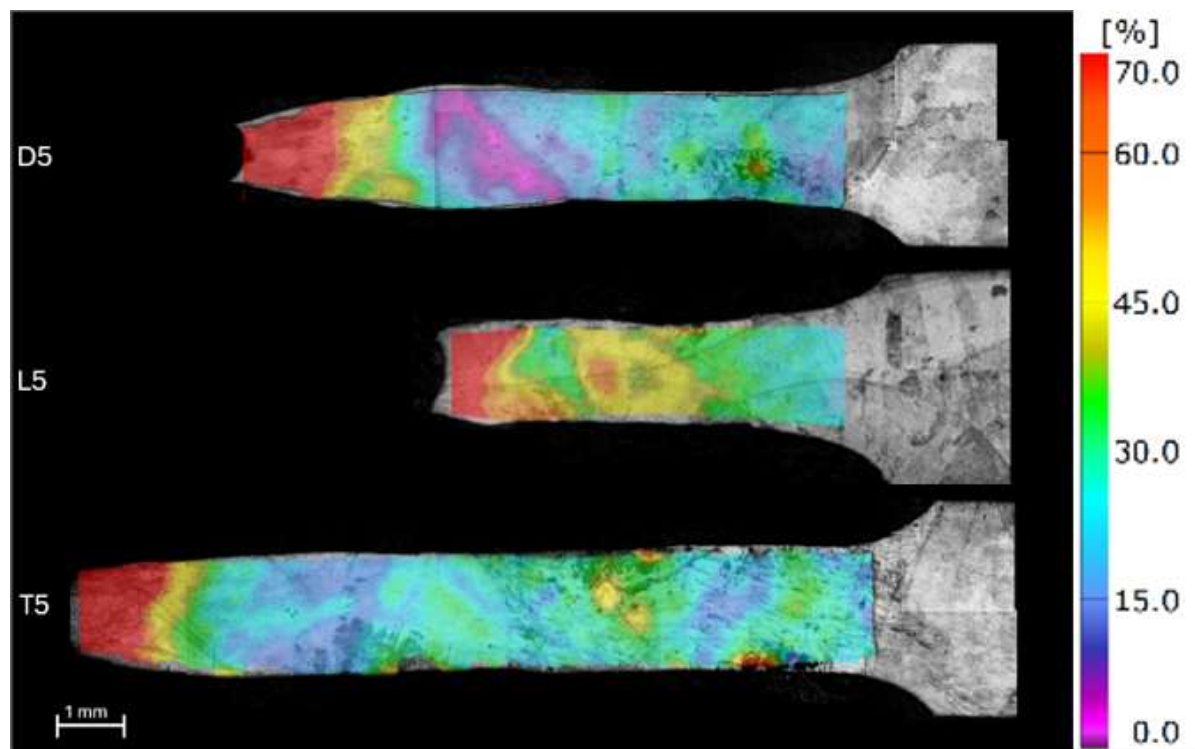
As amostras confeccionadas no sentido diagonal apresentaram valores intermediários de Limite de Escoamento e Limite de Ruptura, além de estricção dupla, o que pode ser explicado pela presença de interfaces em ambos os sentidos, porém em menor quantidade ao longo do corpo de prova. Por fim, os resultados da análise DIC foram sobrepostos à microscopia, onde foi possível perceber a relação entre a deformação da micrografia e os valores de deformação específica encontrados pelo software, conforme pode ser observado na Figura 10. A Figura 11 mostra a sobreposição de imagem para as três amostras analisadas.

Figura 10: Detalhes da micrografia comparados com o resultado do DIC.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 11: Resultados da análise DIC sobrepostos à micrografia das amostras.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Considerações Finais

A utilização da técnica de *Digital Image Correlation* (DIC) aplicada ao ensaio de tração de corpos de prova miniaturizados de aço inoxidável 316L demonstrou ser eficaz para a análise do comportamento mecânico e da distribuição de deformações. Foi possível realizar medições precisas, não destrutivas e com alta resolução, reforçando seu potencial como ferramenta complementar os ensaios tradicionais.

Os resultados evidenciaram que a orientação de fabricação das amostras influencia diretamente suas propriedades mecânicas. As amostras longitudinais apresentaram maior resistência e deformação máxima, enquanto as transversais tiveram maiores interfaces entre as camadas de deposição e isso influenciou em propriedades mecânicas inferiores quando comparadas as demais. Esse comportamento está diretamente relacionado à disposição das linhas de fusão formadas durante o processo de fabricação por manufatura aditiva, que atuam como regiões de concentração de tensões.

A validação da DIC por meio da microscopia ótica confirmou a relação entre as deformações observadas nas imagens e as características microestruturais das amostras. A sobreposição dos mapas de deformação com as micrografias mostrou que regiões de acúmulo de tensões coincidem com interfaces entre camadas ou descontinuidades estruturais do material.

Dessa forma, conclui-se que a DIC é uma técnica confiável para o estudo de corpos de prova miniaturizados e pode ser aplicada com sucesso na investigação de materiais produzidos por manufatura aditiva, aumentando assim a precisão e eficiência dos estudos de diferentes parâmetros de fabricação através da otimização pela produção de amostras miniaturizadas. Além disso, os resultados de DIC oferecem respostas melhores sobre a anisotropia das amostras estudadas podendo servir de base de dados para pesquisas futuras envolvendo simulação por elementos finitos.

Agradecimentos

À EESC-USP pela concessão das amostras utilizadas nesse trabalho e ao CNPq pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de iniciação científica. Pelo apoio dado ao trabalho pelo Centro de Pesquisa e Inovação em Materiais e Estruturas (CEPIMATE).

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5601:2011 – Aços inoxidáveis: classificação por composição química**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 7 p.

AJAY, V. *et al.* Anisotropic fatigue crack propagation in wire arc additively manufactured 316L stainless steel. **International Journal of Fatigue**, v. 177, p. 107976, 1 dez. 2023.

CHEN, Terry Yuan-Fang *et al.* Use of Digital Image Correlation Method to Measure Bio-Tissue Deformation. **Coatings**, v. 11, n. 8, p. 924, ago. 2021.

CRUZ, Daniel J. *et al.* Development of a mini-tensile approach for sheet metal testing using Digital Image Correlation. **Procedia Structural Integrity**, 1st Virtual Conference on Structural Integrity - VCSII. v. 25, p. 316–323, 1 jan. 2020.

DURAI MURUGAN, P. *et al.* A current state of metal additive manufacturing methods: A review. **Materials Today: Proceedings**, International Conference Virtual Conference on Technological Advancements in Mechanical Engineering. v. 59, p. 1277–1283, 1 jan. 2022.

KUMAR, Kundan *et al.* Use of Miniature Tensile Specimen for Measurement of Mechanical Properties. **Procedia Engineering**, Structural Integrity. v. 86, p. 899–909, 1 jan. 2014.

LIU, Dan *et al.* Research Progress of Arc Additive Manufacture Technology. **Materials**, v. 14, n. 6, p. 1415, jan. 2021.

MATWEB. **MetalTek MTEK 316L Cast UNS J92800 Austenitic Stainless Steel**.

Disponível em:

<<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=f5d415d4157c4648b1024e08a61f90a>>. Acesso em: 5 nov. 2025.

MOHAMADIZADEH, A.; BIRO, E.; WORSWICK, M. Novel Double-Half Spot Weld Testing Technique For Damage Progress And Failure Analysis Using Digital Image Correlation Techniques. **Experimental Mechanics**, v. 61, n. 9, p. 1405–1418, 1 nov. 2021.

NETO, Francisco *et al.* Mechanical and corrosion behaviour of 316L stainless steel processed by wire arc additive manufacturing (WAAM). **Progress in Additive Manufacturing**, v. 10, p. 6453–6469, 13 fev. 2025.

NOGA, Piotr *et al.* The Influence of Various Welding Methods on the Microstructure and Mechanical Properties of 316Ti Steel. **Materials**, v. 17, n. 7, p. 1681, jan. 2024.

NOZAWA, Takashi *et al.* Non-contact strain evaluation for miniature tensile specimens of neutron-irradiated F82H by digital image correlation. **Fusion Engineering and Design**, v. 157, p. 111663, 1 ago. 2020.

PAN, Bing. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. **Measurement Science and Technology**, v. 29, n. 8, p. 082001, 1 ago. 2018.

REU, P. L. *et al.* DIC Challenge 2.0: Developing Images and Guidelines for Evaluating Accuracy and Resolution of 2D Analyses. **Experimental Mechanics**, v. 62, n. 4, p. 639–654, 1 abr. 2022.

RIMS JANELIUKSTIS, Xiao Chen. Review of digital image correlation application to large-scale composite structure testing. **Composite Structures**, v. 271, p. 114143, 1 set. 2021.

SRIVASTAVA, Manu; RATHEE, Sandeep. Additive manufacturing: recent trends, applications and future outlooks. **Progress in Additive Manufacturing**, v. 7, n. 2, p. 261–287, 1 abr. 2022.

STRAUCH, Julia Celia Mercedes. Correlação de imagens digitais. 1991.

WANG, C. *et al.* Anisotropy of microstructure and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated by wire and arc additive manufacturing. **Corrosion Science**, v. 206, p. 110549, 1 set. 2022.

WANG, Leilei; XUE, Jiaxiang; WANG, Qiang. Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 751, p. 183–190, 28 mar. 2019.

WANG, Xiaorui *et al.* A review of selected small specimen test techniques for identifying deformation and failure properties of metallic materials. **Journal of Materials Science**, v. 58, n. 1, p. 63–100, 1 jan. 2023.

WU, Peng; WANG, Jun; WANG, Xiangyu. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. **Automation in Construction**, v. 68, p. 21–31, 1 ago. 2016.

ZHANG, Lintao *et al.* The development of miniature tensile specimens with non-standard aspect and slimmness ratios for rapid alloy prototyping processes. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 1830–1843, 1 nov. 2021.

ZHENG, Pengfei *et al.* On the standards and practices for miniaturized tensile test – A review. **Fusion Engineering and Design**, v. 161, p. 112006, 1 dez. 2020.

ZHOU, Jian-Wei *et al.* Application of Digital Image Correlation to Measurement of Packaging Material Mechanical Properties. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, n. 1, p. 204875, jan. 2013.