

---

## **Análise de Deformações em Ensaios de Tração por Correlação de Imagens Digitais (DIC) em Ligas de Alumínio Naval**

### **Strain Analysis in Tensile Tests by Digital Image Correlation (DIC) in Naval Aluminum Alloys**

---

#### **Nádia Silva Cosmo**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9429-3987>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: [nadia12188@gmail.com](mailto:nadia12188@gmail.com)

#### **Hérciles Ruiliman Oliveira de Souza**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0947-6384>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: [hericlesoliveira.ho@gmail.com](mailto:hericlesoliveira.ho@gmail.com)

#### **Tárcio dos Santos Cabral**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6534-7900>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: [engtarciocabral@gmail.com](mailto:engtarciocabral@gmail.com)

#### **Eduardo de Magalhães Braga**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0739-7592>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: [edbraga@ufpa.br](mailto:edbraga@ufpa.br)

CPF: 212.820.132-20

#### **Maria Adrina Paixão de Souza da Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7202-4541>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: [adrina@ufpa.br](mailto:adrina@ufpa.br)

---

### **RESUMO**

Atualmente utilizam-se extensômetros para medir deformações em materiais que são submetidos a esforços mecânicos e deformações. Contudo, existe um limitante, sua alta confiabilidade fica restrita a medições localizadas e pontuais. Uma alternativa para medições de tensões e deformações é a técnica óptica-numérica de correlação de imagens digitais (DIC). Os avanços tecnológicos disponibilizam melhores equipamentos para correlação de imagens, todavia, a falta de conhecimento sobre o método ainda limita a quantidade de pesquisas na área. Neste sentido, a proposta deste trabalho visa analisar os dados fornecidos pelo equipamento de ensaio mecânico, deslocamento e carregamento, com utilização da correlação de imagens para estimar as propriedades mecânicas elásticas, em particular, o módulo de elasticidade com um programa gratuito e uma câmera fotográfica semiprofissional de baixo custo. Os resultados do módulo de elasticidade obtidos pelo processo de correlação de imagens apresentaram valores mais próximos do valor real que os resultados apresentados pelo equipamento de ensaio mecânico utilizado neste estudo.

**Palavras-chave:** Correlação de imagens digitais; Análise de tensões; Análise de deformações; Alumínio naval;

---

## ABSTRACT

Currently, strain measurements in materials subjected to mechanical loads and deformations are typically carried out using strain gauges, which, however, have limitations as their high reliability is confined to localized and discrete measurements. An alternative method for stress and strain measurements is the optical-numerical technique of Digital Image Correlation (DIC). Technological advancements have provided better equipment for image correlation; nevertheless, the lack of understanding about the method still constrains the amount of research in the field. In this context, the aim of this study is to analyze data provided by mechanical testing equipment, such as displacement and loading, using image correlation (DIC) to estimate elastic mechanical properties, particularly the modulus of elasticity, with freely available programs and a low-cost, semi-professional digital camera. The modulus of elasticity results obtained through the image correlation process showed values closer to the real value than those obtained by the mechanical testing equipment used in this study.

**Keywords:** Digital image correlation; Stress analysis; Strain analysis; Naval aluminum;

---

## INTRODUÇÃO

Os ensaios mecânicos desempenham um papel crucial na engenharia mecânica, pois permitem a caracterização precisa de materiais, facilitando a seleção adequada para uma variedade de aplicações. Em um projeto, escolher adequadamente o material e conhecer a forma como este se comporta ao ser submetido a esforços mecânicos é de suma importância para o sucesso da proposta (BORGES *et al.*, 2023). Nesse sentido, é essencial contar com ferramentas adequadas que permitam uma avaliação precisa do estado de tensões nos materiais ensaiados.

Como exemplo, tem-se o ensaio de tração de materiais, normatizado através da norma ABNT NBR ISO 6892-1 (2013) e ASTM E8/8M (2016), em que se podem determinar várias características mecânicas da liga ensaiada. Os ensaios de tração fornecem dados de carregamento obtidos por uma célula de carga acoplada às garras de fixação dos corpos de prova. Eles consistem na aplicação de uma carga que é aumentada de forma contínua e crescente até o momento em que ocorre a ruptura do corpo de prova. Durante o ensaio, a carga é aplicada ao corpo de prova através de uma máquina de tração, que estica o material até que ele se rompa. A célula de carga mede a força aplicada, enquanto o extensômetro mede o alongamento do material (YOSHIHARA e YOSHINOBU, 2014). Na falta de instrumentos mais precisos, os dados de deformação são obtidos com base nos deslocamentos relativos das garras. Durante o ensaio, esses dados são armazenados e apresentados em forma gráfica, mostrando a máxima resistência à tração, tensão de escoamento, módulo de elasticidade, etc. Contudo, os dados coletados

decorrem da deformação de todo o sistema, garras e corpo de prova, assim o valor do módulo de elasticidade apresentado não condiz com o valor exato do material. Esse valor é corrigido ao se utilizar um acessório do equipamento de ensaio acoplado para medições da deformação apenas da área útil do corpo de prova.

Além disso, utilizam-se extensômetros para medir a deformação da peça. Estes dispositivos são essenciais na análise de dados, mas apresentam a limitação de medir apenas deformações pontuais. Isso obriga a utilização de um extensômetro para cada ensaio de tração (YU *et al.*, 2022).

Outro método para determinar o estado de tensões e deformações é a correlação de imagens, do inglês, Digital Image Correlation (DIC), que é um dos métodos ópticos mais utilizados na mecânica experimental. Desenvolvida no início da década de 1980, a técnica DIC usa procedimentos de rastreamento e registro de imagem para quantificar medidas superficiais de deslocamento e deformações, utilizando uma câmera para medições planares (2D) ou duas câmeras para medições espaciais (3D) (PARK *et al.*, 2017; D'ALMEIDA, 2019). Uma sequência de fotos é registrada à medida que o ensaio acontece para análise dos campos de deslocamento (x, y e z). A peça, já pintada de preto e posteriormente de branco, vai apresentando níveis de cinza à medida que ocorre a deformação, juntamente com a luz que é refletida pelos pixels contidos na imagem. Através da informação desses pixels e da sobreposição dessas imagens, o algoritmo do programa fornece então o módulo de elasticidade (RODRIGUES, 2014).

Este trabalho tem por objetivo a utilização da correlação de imagem digital 2D com equipamentos e programas mais acessíveis aos pesquisadores, visando a obtenção do módulo de elasticidade em peças de alumínio naval. Levando em consideração as discrepâncias que podem surgir nos dados das máquinas de ensaio de tração ou por erros no método de correlação de imagem, os valores obtidos serão analisados em relação a valores já obtidos experimentalmente.

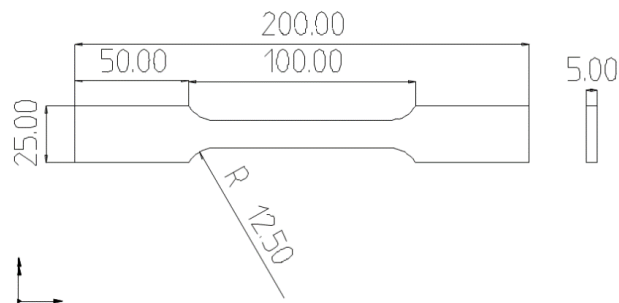
## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O aparato para a realização da análise via DIC é similar para todas as aplicações:

- Corpo de prova alumínio Naval 5052H-34 (4 amostras), cujas medidas são exibidas na Figura 1;

- Câmera Canon® Rebel T5;
- Tripé universal de alumínio - 60W;
- Máquina de ensaios mecânicos *Servor-Hydraulic Fatigue and Edurance Tester* Shimadzu 100 kN;
- Programa para captura de imagens próprio da máquina;
- Fonte de luz de led;
- Computador;
- Programas GOM e Excel para aquisição e tratamento de dados;
- Tinta automotiva preta e branca, ambas foscas.

**Figura 1** - Medidas dos corpos de prova (em mm)



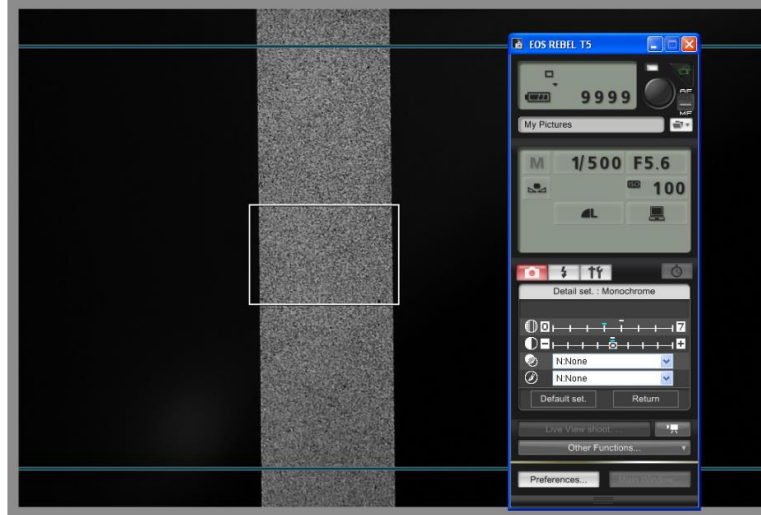
Fonte: Os autores (2024)

Para a aplicação da técnica de correlação de imagem digital (DIC), as superfícies dos corpos de prova foram pintadas em duas etapas: a primeira correspondeu ao *background*, com tinta branca automotiva do tipo spray, com intervalo de 30 minutos para cura. A segunda etapa foi a pulverização com pequenos pontos de tinta preta em spray uniformemente distribuída na peça, com intervalo de 24 horas para cura. O sistema de correlação de imagem digital GOM *Correlate* foi usado em sua versão 2D, disponibilizada gratuitamente pelo site do fabricante. A câmera digital Canon, modelo EOS Rebel T5 de 18 MP, com uma lente do tipo EFS 18-55mm e uma fonte de luz de LED montada em um tripé ajustável, a câmera foi posicionada em frente aos corpos de prova, já instalados na máquina para o ensaio de tração, a uma distância recomendada de 20 cm da peça.

Como mencionado anteriormente, as câmeras do tipo CMOS têm uma série de vantagens em relação às câmeras CCD. Entre essas vantagens estão a fácil utilização, pois não necessitam de lentes especiais, o baixo custo e, no caso deste trabalho, a dispensabilidade da placa de aquisição de imagens padrão, já que foi utilizado o próprio

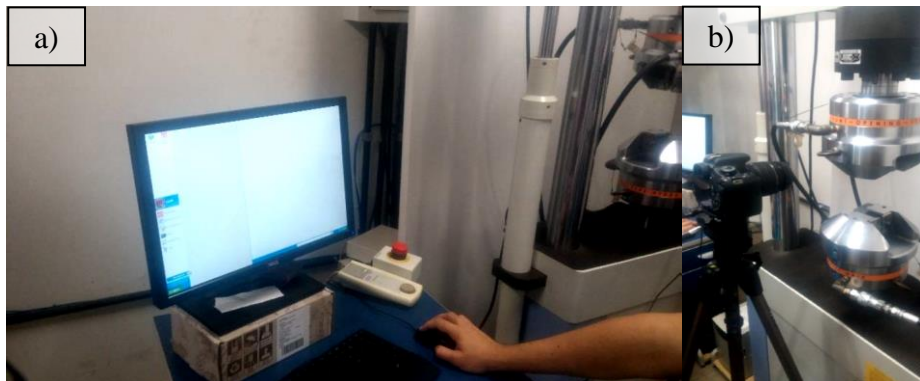
programa da máquina. Os parâmetros do programa estão ilustrados na Figura 2. O aparato completo utilizado pode ser visto nas Figuras 3(a) e 3(b).

**Figura 2** - Configurações de captura no programa da câmera digital



Fonte: Os autores (2024)

**Figura 3** - Aparato experimental para coleta de dados do ensaio



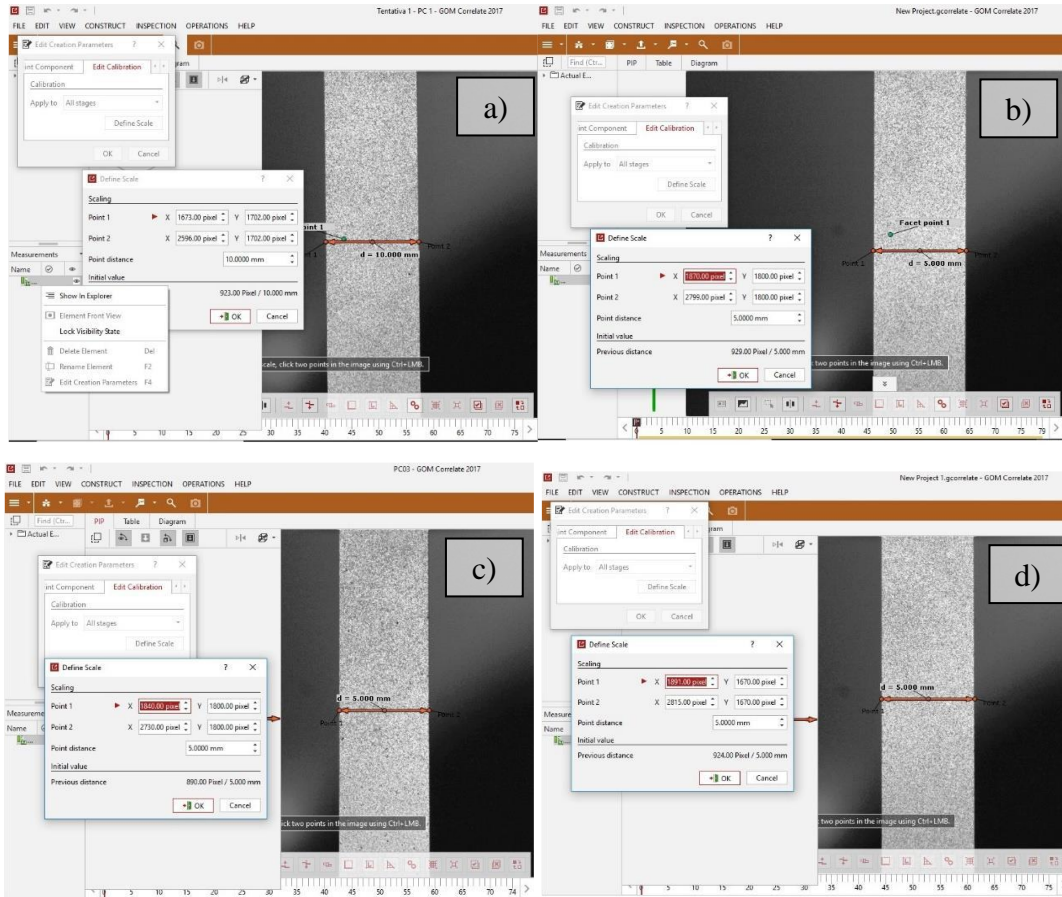
Fonte: Os autores (2024)

O ensaio foi repetido para as quatro peças. Após a realização do ensaio de tração, as imagens foram sincronizadas com o programa GOM *Correlate* versão 2D para a obtenção dos valores do módulo de elasticidade. Para configurar o programa GOM, inicialmente importam-se as imagens na função de deformação do programa; cada imagem representa uma foto tirada a cada intervalo de 5 segundos durante o ensaio de tração. Estabelecem-se então as dimensões e a escala da peça, que deve ser dimensionada sempre na primeira imagem, e o programa irá aplicar os mesmos parâmetros para as imagens posteriores. Os valores trabalhados são em medidas milimétricas (Figuras 4a, 4b, 4c e 4d), o que pode fazer com que os parâmetros variem de uma peça para outra.

Espera-se, posteriormente, estabelecer parâmetros globais através de novos projetos na área.

Através da ferramenta para definir componentes, é criado um ponto de face na peça, e a partir dele pode-se usar a função de extensômetro para plotar o gráfico de deformação no eixo y.

**Figura 4 - Configurações dos parâmetros dos corpos de prova 1, 2, 3 e 4, respectivamente**

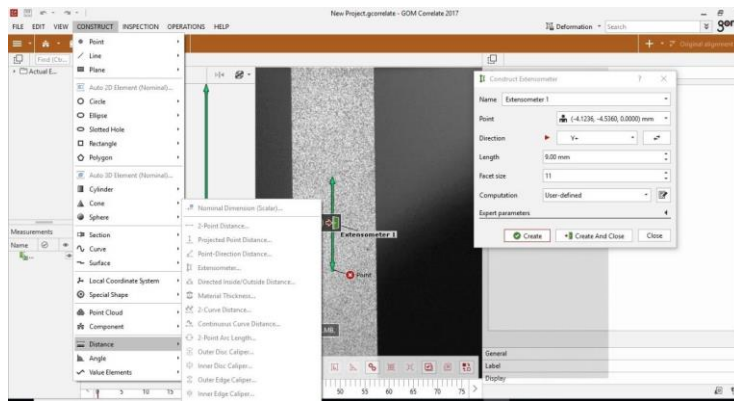


Fonte: Os autores (2024)

A Figura 5 demonstra a adição da ferramenta à peça. De cada corpo de prova, foram utilizadas 30 imagens para a comparação das deformações pontuais.



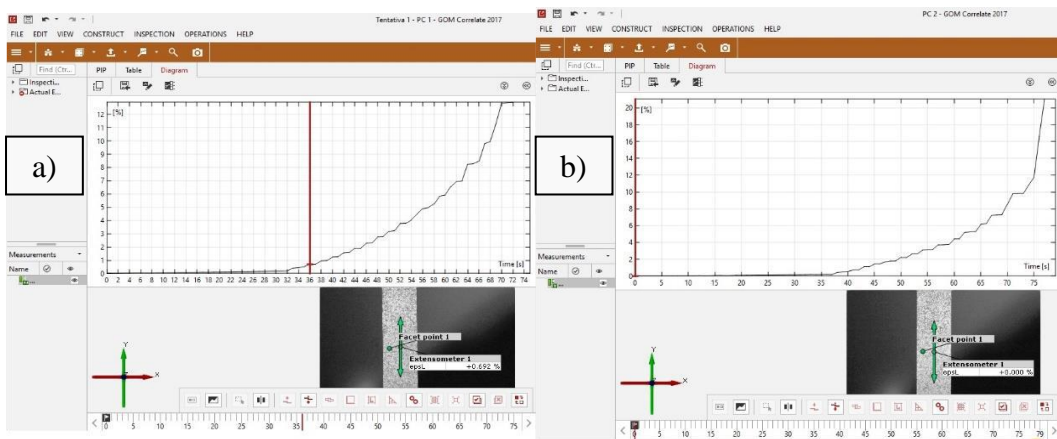
**Figura 5 - Adição da função extensômetro a peça**

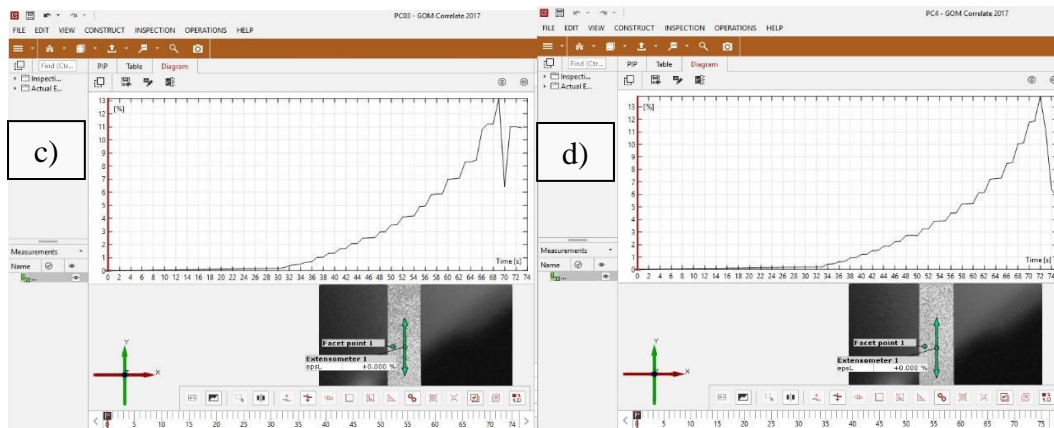


Fonte: Os autores (2024)

O programa plota, em uma de suas abas, o gráfico da peça com os valores de deformação, em porcentagem, ao longo do tempo (Figura 5). É necessário então sincronizar as imagens retiradas do programa da máquina com os valores do programa da Shimadzu Servopulsor. Pela ausência de um programa para executar essa sincronização, ela foi feita manualmente, observando o tempo. A filmagem deve visualizar, ao mesmo tempo, tanto o programa da máquina fotográfica quanto o da Shimadzu Servopulsor (Figuras 6a, 6b, 6c e 6d) para a retirada de dados em tempos específicos.

**Figura 6 - Deformação dos corpos de prova 1, 2, 3 e 4, respectivamente**

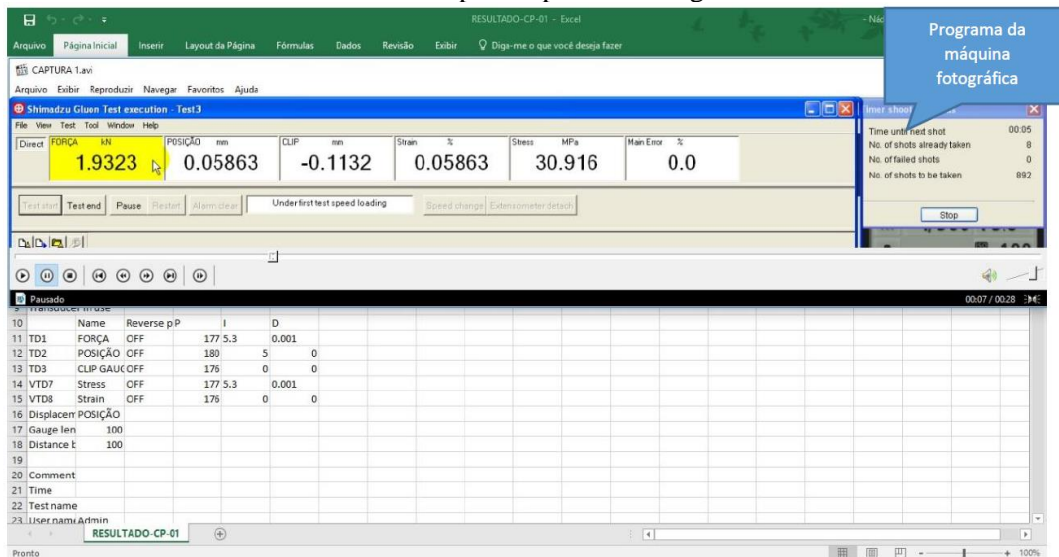




Fonte: Os autores (2024)

A máquina tem uma restrição: quando ligada ao computador, tira fotos com um intervalo mínimo de 5 segundos por foto. Neste trabalho, os dados são retirados da máquina de ensaio mecânico a cada 2 centésimos de segundo (Figura 7).

**Figura 7 -** Visualização do programa da Shimadzu Servopulser simultaneamente ao programa da câmera para captura de imagens



Fonte: Os autores (2024)

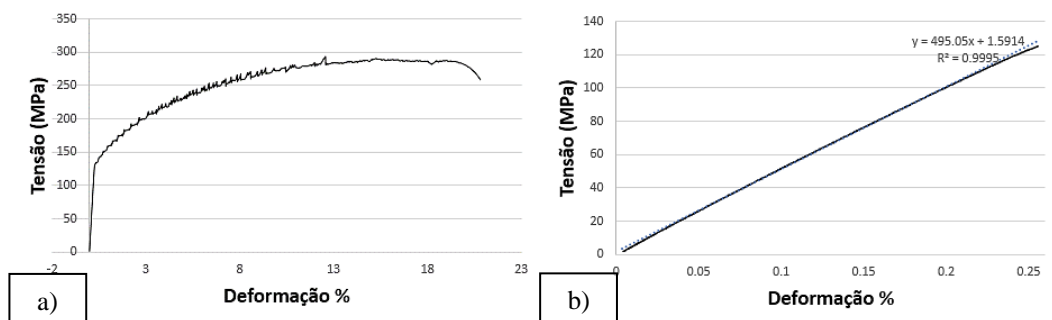
Após retirados os valores de tensão do programa da Shimadzu Servopulser para os intervalos de 5 segundos, esses valores são relacionados com os valores de deformação fornecidos pelo programa GOM para os mesmos instantes.



## RESULTADOS E DISCUSSÕES

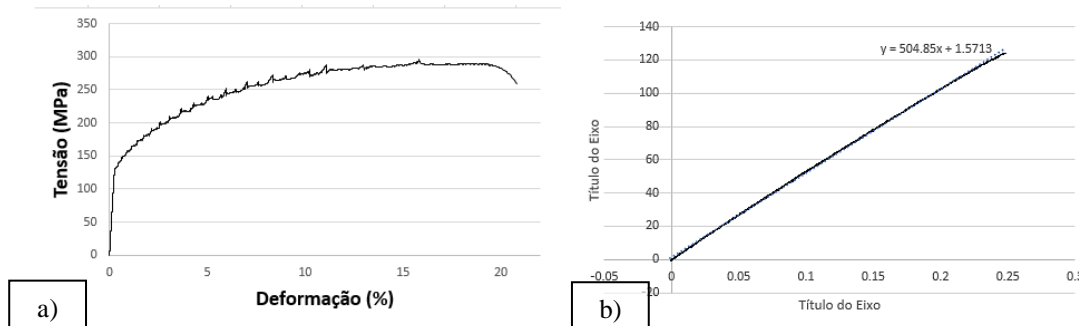
Abaixo estão os gráficos gerados no Excel a partir dos resultados da Shimadzu Servopulsor (Figuras 8, 9, 10 e 11). A inclinação da reta fornecerá o módulo de elasticidade. Pode-se observar a discrepância dos resultados obtidos diretamente pela máquina (Figura 12).

**Figura 8 -** (a) gráfico tensão x deformação para o corpo de prova 01; (b) reta para a retirada do módulo de elasticidade



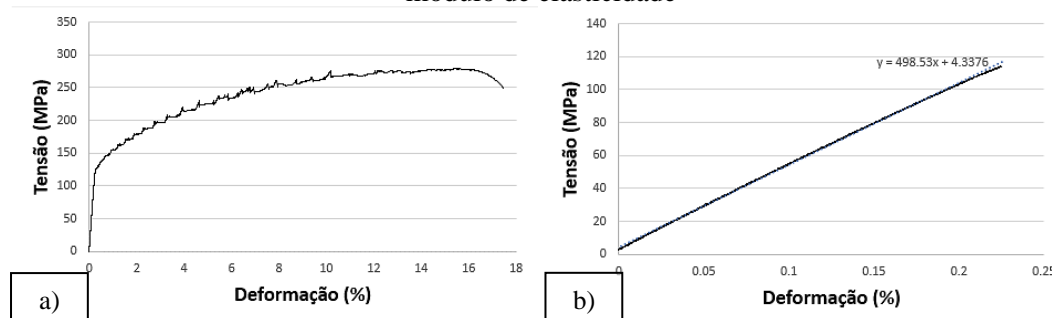
Fonte: Os autores (2024)

**Figura 9 -** (a) gráfico tensão x deformação para o corpo de prova 02; (b) reta para a retirada do módulo de elasticidade



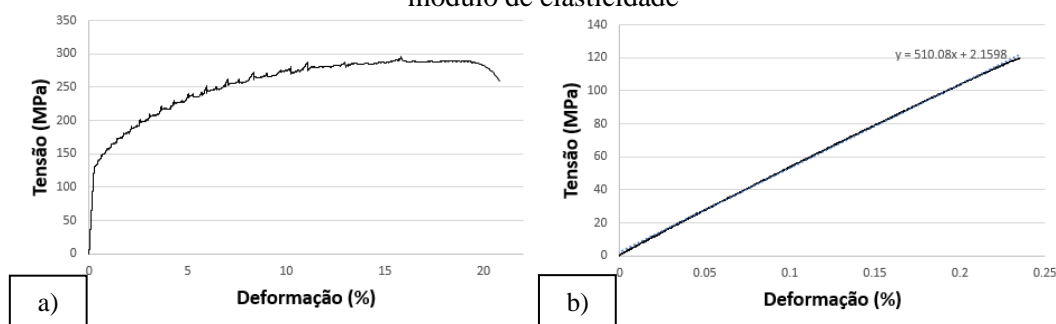
Fonte: Os autores (2024)

**Figura 10 -** (a) gráfico tensão x deformação para o corpo de prova 03; (b) reta para a retirada do módulo de elasticidade



Fonte: Os autores (2024)

**Figura 11** - (a) gráfico tensão x deformação para o corpo de prova 04; (b) reta para a retirada do módulo de elasticidade



Fonte: Os autores (2024)

**Figura 12** - Valores do módulo de elasticidade fornecidos pela Shimadzu Servopulser

Corpos de prova	Módulo de elasticidade (GPa)
1	49,289
2	50,366
3	50,018
4	50,668

Fonte: Os autores (2024)

O alumínio naval 5052H-34 tem o módulo de elasticidade entre 70 a 74 GPa. Esse valor se altera na máquina, pois é medida a deformação de todo o sistema, incluindo as garras e o corpo de prova, sendo necessário utilizar outros métodos de leitura da deformação (apenas no corpo de prova).

Abaixo estão os valores dos módulos de elasticidade retirados a partir dos dados do GOM (Figura 13). Foram usados os pontos que estão dentro da zona elástica do material.

**Figura 13** - Valores do módulo de elasticidade fornecidos pelo GOM

Corpos de prova	Módulo de elasticidade médio (GPa)
1	74,999 ±7,45
2	66,225±22,57
3	62,779±28,92
4	56,326±9,252

Fonte: Os autores (2024)

Os valores observados na Figura 13 apresentam uma variação. Esta variação pode ser ocasionada por alguns fatores:

- Problemas com o sincronismo das imagens tiradas pela câmera fotográfica e os valores de tensão fornecidas pela máquina de ensaio mecânico;

- Problema de descamação da pintura observados em alguns corpos de prova, Figura 14.

**Figura 14** - Exemplos de descamação na pintura dos corpos de prova de tração



Fonte: Os autores (2024)

Todavia, os valores observados na Figura 13 são mais próximos dos valores obtidos pelo ensaio de tração da máquina de ensaio mecânico. Acredita-se que os valores podem ser refinados com uma quantidade maior de ensaios, o que possibilitará mais prática no sincronismo das imagens com os valores de tensão fornecidos pelo ensaio de tração.

## CONCLUSÃO

Pode-se observar que os resultados foram próximos dos retirados pelas células da máquina quando o módulo de elasticidade foi determinado pelo DIC. Apesar de algumas discrepâncias, houve contratemplos que provavelmente influenciaram nos resultados, como a descamação da pintura. Quando medidos os módulos dentro da zona elástica, obtêm-se resultados mais próximos dos retirados pelas células da máquina, principalmente na primeira peça. Para a terceira e a quarta peça, os pequenos valores de deformação no começo do ensaio influenciaram nos resultados. Pode-se supor alguns erros relacionados à pintura, tornando interessante uma análise mais aprofundada. É comprovado também que a utilização do método de correlação de imagem com uma câmera CMOS semiprofissional e um programa gratuito é viável. Além do baixo custo de aquisição, é uma ferramenta dinâmica para a utilização do método voltado à pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos da Universidade Federal do Pará (LCAM/UFPa) pelo suporte técnico durante as análises, ao Núcleo de Processamento de Materiais da Universidade Federal do Pará (NPM/UFPa) pelo conhecimento científico e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 6892-1, **Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**, 70p., 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, Philadelphia, 2016.

BORGES, C. S., ALMEIDA, ÉRICA C., BOMFIM, D. S., BOMFIM, T. S., & LIMA, K. M. (2023). Simulação de ensaio mecânico de tração por elementos finitos utilizando o SolidWorks. **Brazilian Journal of Development**, 9(4), 12577–12590. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n4-003>.

D'ALMEIDA, José Roberto Moraes. **Avaliação do comportamento mecânico de polímeros em altas deformações mediante uso da técnica de correlação de imagens digitais**. 2019. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

PARK, J. *et al.* Assessment of speckle-pattern quality in digital image correlationbased on gray intensity and speckle morphology. **Optics and Lasers inEngineering**, v. 91, p. 62–72, 2017.

RODRIGUES, Leonardo Dantas. **Aplicação da técnica DIC a espécimes com diferentes formas, materiais e gradientes de deformação**. 2014. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

YOSHIHARA, H., YOSHINOBU, M. Effects of specimen configuration and measurement method of strain on the characterization of tensile properties of paper. **Journal of Wood Science**, 60, 287–293 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10086-014-1398-y>

YU, LIPING *et al.* Ultra-high temperature video extensometer: System development and experimental validation. **Review of Scientific Instruments**, v. 93, n. 4, 2022.