

PEER REVIEW, Vol. 6, Nº 14, 2024 DOI: 10.53660/PRW-2398-4411 ISSN: 1541-1389

Análise de Deformações em Ensaios de Tração por Correlação de Imagens Digitais (DIC) em Ligas de Aluminio 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 Héricles Ruiliman Oliveira de Souza ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0947-6384 Universidade Federal do Pará, Brasil E-mail: 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 Eduardo de Magalhães Braga ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0739-7592 Universidade Federal do Pará, Brasil E-mail: 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

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 de imagens apresentaram valores mais próximos do valor real que os

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 programa 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 nalysis; 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)

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

Fonte: Os autores (2024)

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.

LE EDIT VIEW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HELP	rentativa 1 - PC 1 - GUM Correlate 2017	FILE EDIT VIEW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HELP	
Edit Creation Parameters 2 × 0		= · ★ · 圖 · 土 · 戶 · Q 向	
Int Commonwell Edit Calibration + + Kam		End (Ctr., PIP Table Diagram	
		• CActuel E	
Apply to All stages		Procession 1 V	1 \
apple compt	a)	Edit Creation Parameters 7 X	b)
Denne scale		int Component Edit Calibration	
OK Cancel		Calibration	
21 A C C C C C C C C C C C C C C C C C C		Apply to All stages =	
		Define Scale	
Scaling		DY Canad	
Point 1 F X 16/3.00 pixel _ Y 1702.00 pixel _	sint 1	UN CONCO	Facet point 1
Point 2 X 2596.00 pixel 1 Y 1702.00 pixel 1	Rom 2	Define Scale ? ×	
asurements Point distance 10.0000 mm	d = 10.000 mm	Name @	Point 1 d = 5.000 mm
Bin- Initial value		U _{20→} Point 1 ► X UST0.00 pore ↓ Y 1800.00 pixel ↓	
Show in Explorer 923.00 Pixel / 10.000 mm	Contraction of the second	Point 2 X 2799.00 pixel \$ Y 1800.00 pixel \$	and the second
Element Front View		Point distance 5.0000 mm	
Lock Visibility State		Initial value	A CONTRACTOR OF A CONTRACTOR A
Delete Bernent Del		Previous distance 929.00 Pixel / 5.000 mm	
Rename Element F2 Celt, click tw	o points in the image using Ctrl+LMB.	• OK Cancel	and in the image using con+childs.
Edit Creation Parameters F4			
) (<u>-</u>			
N N N N N N N N N N N N N N N N N N N	40 45 50 55 60 65 70 75	> 5 10 15 20 25 30 35	40 45 50 55 60 65 70 75 79
EDIT VIEW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HELP		🖸 🖾 🖛 - 14 - 1	New Project 1.gcorrelate - GOM Correlate 2017
EDIT VIEW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HELP		E FILE EDIT VEW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HELP E F E E E E E E E E E E E E E	New Project 1.gcorrelate - GDM Correlate 2017
EDIT VEW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HEP		Construct Neperton of Parameters HLP Construct Neperton of Parameters Construct Neperton of Neperton Construct Edit Calibration Man	New Project 1.gcornline - GOM Cornline 2017
TOT VIEW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HELP Tot Co. PP Tota Dagem Adduate. D B B B B H4 89 -		B Im + m + m + m + m + m + m + m + m + m +	New Project 1.gcorrelate - 00M Correlate 2011
EDT VERV CONTACTOR OF MALEON A A B C C A C A C A C A C A C A C A C A	()	Ele Elor Veso Construct nissection Oreflationes Haip Ele Elor Veso Construct nissection Oreflationes Haip Ele Calansian Control Construction Control Constructio Control Construction Control Construction Control Co	New Project 1 geominate - GOM Constate 2017
EDT VERV CONSTRUCT INSPECTION OFFANTONS HILP A + B + C + C + C + C + C + C + C + C + C	c)	El El tot Vew Construct INSPECTION CERATIONS HELP El Constante Premierantes Companyet Ede Calibration Companyet Ede Calibration Companyet Ede Calibration Define Seate	New Project 1 generate - GAM Connected 27
EDT VIEW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HELP	c)	PIE EDT VEW CONSTRUCT INSPECTION OPPRATIONS HELP PIE Conson Preventes To Conson Preventes To Compose E del Celebration To Compose E del Celebratio To Compose E del Celebration To Compose E del Celebrat	Here Project 1 generate - 62M Constate 211
EDT WAY CONSTANT INSPECTION OFFAUTORS HUP A A B B B B B B B B B B B B B B B B B B	c)	PILE EDT VEW CONSTRUCT INSPECTION GEPARTIONS HELP File Calcine Planateurs Torresoner Edit Calcine Planateurs Torresoner Edit Calcine Planateurs Torresoner Define Scale Oc Cancel	New Project 1 guarminite - 6204 Consolute 221 d)
EDT VIN CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HERP A + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	с)		Here Project 1 generated = 6204 Constante 201 d)
EDT VIEW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HELP A the second secon	с)		New Project 1 generator - GAM Constants 201
EDT VIN CONSTRUCT INVESTION OPERATIONS HUP Tear Construct Temperature Declarate PP Table Degreen Declarate PP Table Degreen PP Table	с)		Here Project 1 generates - 6244 Constate 211
EDT WW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HEP A	- 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2		ther Propert 1 generater - COAI Constants 27
EDT WW CONTRUCT INVECTION OPERATIONS HELP	страниция 4 - 5 400 mm 6 - 7		d - 3.000 mm
EDT UNIC CONSTANCE INSPECTION OFFILIATIONS HILP INFORMATION INFORMATIONS HILP INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATION INFORMATIONI	с. 4 - 5.00 mm Кот		d) d) d) d)
EDT VIN CONTRUCT INSPECTION OPERATIONS HEP	1 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3 - 3 -		der Propert 1 generater - 604 Constate 201 d)
DET WW CONSTRUCT INVESTION OPERATIONS HUP	d = 5 00 mm		d - 5.00 nm d - 5.00 nm d - 5.00 nm
DIT WW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HEAP The second se	- з осо по - с то с т	PLE EDT VEW CONSTRUCT INSPECTION GEBANCHE HELP FLE EDT VEW CONSTRUCT INSPECTION GEBANCHE HELP FLE Editorion Function FLE Editorion FLE Editorion Function FLE Editorion Function FLE Editorion F	den Propei l'accondute 400 Constate 201 d) d - 5.000 mm marks
EDT VW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HELP THE Compare The Comparement of the Comparement The Comparement of the Comparement of the Comparement The Comparement of the	A State and A Stat	THE TOT VEW CONSTRUCT INSPECTION CHEATIONS HEP TOT VEW CONSTRUCT INSPECTION CHEATIONS HEP TOTOLOGICAL CHEATION HEP TOTOL	den Properti generate - 604 Constate 207
EDT VW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HILP THE TOW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HILP THE TOW POINT IN THE TOWN OPERATIONS HILP THE TOW POINT IN THE TOWN OPERATIONS HILP THE TOW POINT IN THE TOWN OPERATIONS HILP THE TOWN CONSTRUCT INSPECTION OPERATION OPERATIONS HILP INSPECTION OPERATIONS HILP INSPECTIONS HILP INSPECTIONS HILP INS	d = 100 m d = 100 m d = 100 m specie atta mega etti CALLE	FIE EDT VEW CONSTRUCT INSPECTION CPERATIONS HELP FIE EDT VEW CONSTRUCT INSPECTION CPERATIONS HELP FIE Editorition Field Control Previous C	d = 3.00 mm d = 5.00 mm d = 5.00 mm d = 0.00 mm d = 0.
EDT VAV CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HILP TOTOLOGY IN CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HILP TOTOLOGY INSPECTION TOTOLOGY INSPECTION OPERATIONS HILP TOTOLOGY INSPECTION TOTOLOGY INFOLOGY INSPECTION TOTOLOGY INSPECTION TOTOLOGY INSPECTION TOTOLOGY IN TOTOLOGY IN TOTOLOGY IN TO	reaction and the second s	FIE EDT VEW CONSTRUCTION GEBANCHE HEIP FIE Edit verwichsichen Verwichten der Gebanchen Heip Gemeinstellen Verwichten verwichten der Gebanchen Verwichten verwichten verwichten der Gebanchen verwi	the Propert generate - GML Canada 277
DET WW CONSTRUCT INSPECTION OPERATIONS HERP THE Comparement of the Co	2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 -	THE TOT VEW CONSTRUCT INSPECTION CHEATIONS HEP Totaling Statements The Construction of the Celebration The Construction The Constructi	Atter Paper I generate - GAI Constant 2017

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

8 5· č·	•				RESULT	TADO-CP-01 - Excel		14	1 Star	Programa da
Arquivo Páginal	nicial Inserir	Layout da Págin	ia Fórmulas	Dados	Revisão Exibir 🖓 Di	iga-me o que você deseja fazi	N .			máquina
西 CAPTURA 1.avi										fata and fina
Arquivo Exibir R	eproduzir Navegar	Favoritos Aiu	da							totografica
Chimadau Chu	Testermulae T									
Shimadzu Gluo	Weden Male	esta								mer shoo
File View Test To	LN DOS	clo m	Crue .		Circle V	Chara MDa	Main France W	_		Time until next shot 00:05
Direct Ponca	KN PUSI			1100	o o c o c o c o c o c o c o c o c o c o	Stress MPa	Man Ellor 4			No. of shots already taken 8
1.3	323 R	0.0586	3 -0	.1132	0.05863	30.916	0.0			No. of shots 0
						1	1	_		No. or shots of be taken 892
Test start Test er	d Pause Restort	Alarm dear	Underfirst te	est speed loading	Speed change Ex	tensometer detach				
		·								Stop
n. In. Im. I. ml										4
			171							
		•								تا (ب
Pausado										00:07 / 00:28 3046
10 Nac	a Reverse p.P.	1	D							
11 TD1 FOR	CA OFF	177 5 3	0.001							
12 TD2 POS	ICÃO OFF	180	5 0							
13 TD3 CLE	GAUCOFF	176	0 0							
14 VTD7 Stre	SS OFF	177 5.3	0.001							
15 VTD8 Stra	in OFF	175	0 0							
16 Displacer POS	IÇÃO									
17 Gauge len	100									
18 Distance t	100									
19										
20 Comment										
21 Time										
22 Test name										
23 User name Adr	nin	-								
4 +	ESULTADO-CP-01	+					4			•
Pronto									III	III + 100%

Fonte: Os autores (2024)

Após retirados os valores de tensão do programa da Shimadzu Servopulsor 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)





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 modulo de elasticidade fornecidos pela Shimadzu Servopulser

Corpos de prova	Modulo 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 modulo de elasticidade fornecidos pelo GOM

Corpos de prova	Modulo 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.







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 contratempos 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.