

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS NO ESTUDO DA ANISOTROPIA EM CHAPAS METÁLICAS

Leandro de Paula Freire, leandrofreire.engmec@gmail.com^{1,2}

João Vitor Costa, joao.costa@ifmg.edu.br¹

Luiz Augusto Ferreira de Campos Viana, luiz.viana@ifmg.edu.br^{1,3}

Luiz Manuel Ribeiro de Mesquita, lmesquita@ipb.pt²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - IFMG, Arcos, Brasil

²Instituto Politécnico de Bragança - IPB, Bragança, Portugal

³Texas State University - TXTS, San Marcos, Estados Unidos

Resumo. O presente estudo teve como principal objetivo analisar a viabilidade da aplicação da tecnologia de Correlação Digital de Imagens como uma alternativa para a investigação da anisotropia de chapas metálicas empregadas em processos de estampagem. A análise da anisotropia é de grande importância neste contexto, pois fornece dados que são utilizados como entrada no processo, contribuindo para o estabelecimento de parâmetros mais eficientes e redução de perda de materiais. Durante o desenvolvimento do estudo, a técnica de Correlação Digital de Imagens foi utilizada em conjunto com ensaios de tração, permitindo a determinação dos valores de anisotropia média e planar da liga metálica investigada. Ao final do trabalho, foi possível concluir que o método retorna valores condizentes com a realidade. Assim, o método mostrou-se eficaz, demonstrando sua aplicabilidade para o cálculo da anisotropia das chapas submetidas ao processo de estampagem.

Palavras chave: Anisotropia, Estampagem, Chapas metálicas, Correlação digital de imagens.

Abstract. The main objective of this study was to analyze the feasibility of applying Digital Image Correlation (DIC) technology as an alternative for investigating the anisotropy of metal sheets used in stamping processes. Anisotropy analysis is of great importance in this context, as it provides data used as input in the process, contributing to the establishment of more efficient parameters and reduction of material waste. During the development of the study, the DIC technique was employed in conjunction with tensile tests, allowing the determination of the average and planar anisotropy values of the metal alloy investigated. At the end of the study, it was concluded that the method provides values consistent with reality. Thus, the method proved to be effective, demonstrating its applicability for calculating the anisotropy of sheets subjected to the stamping process.

Keywords: Anisotropy, Stamping, Sheet metal, Digital image correlation Correlation.

1. INTRODUÇÃO

O processo de estampagem se trata de uma técnica de conformação mecânica altamente utilizada na indústria em diversos setores, o qual consiste em conferir uma determinada forma a uma chapa metálica a partir de deformação plástica (Schreiber *et al.*, 2022). Esse processo desempenha um papel crucial na indústria automotiva, sendo frequentemente utilizado na fabricação de sistemas de escape de automóveis.

Os materiais utilizados nos processos de estampagem se tratam de ligas metálicas providas do processo de laminação. Durante o processo de laminação, a liga metálica é inserida entre dois cilindros que rolam em sentidos opostos, reduzindo a espessura da chapa Gomes (2015). A seguir, a Fig. 1 ilustra o processo de laminação.

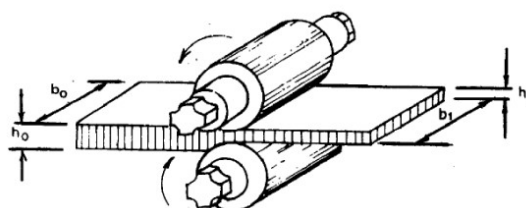


Figura 1. Processo de laminação

Quando o material passa pelo processo de laminação, há uma modificação em sua estrutura cristalina, fazendo com

que o material apresente uma diferença nas propriedades mecânicas em relação a direção que são analisadas (Callister and Soares, 2008). Dessa forma, quando utilizadas no processo de estampagem, estas ligas podem apresentar diferentes comportamentos de deformação plástica, fazendo-se necessário analisar qual a melhor orientação para a estampagem (Banabic, 2000).

A variação das propriedades mecânicas de um material, em relação a direção em que são analisadas, é conhecida como anisotropia, a qual esta diretamente relacionada com a microestrutura do material (Kok *et al.*, 2018). O estudo desta propriedade dos materiais é de grande importância para o processo de estampagem, a qual está associada ao problema de afinamento da espessura das chapas durante o processo (Demin *et al.*, 2018). A medida que o material apresenta um baixo índice de anisotropia, ele terá maior tendência a reduzir a espessura em relação as outras dimensões, tornando-o mais suscetível ao surgimento de trincas.

Para calcular o índice de anisotropia de uma liga metálica, é necessário preparar uma amostra e causar nela uma deformação plástica na largura e no comprimento. Este experimento pode ser feito usando uma máquina de ensaio de tração, a qual irá tracionar o corpo de prova e causar as devidas deformações. Entretanto, um grande problema para calcular o índice de anisotropia com apenas uma máquina de tração está relacionado com a medição da deformação na largura. A maioria dos modelos de máquinas convencionais de ensaio de tração contam com a presença de extensômetros para medir apenas a deformação do comprimento, o que torna a medição da deformação na largura um processo complexo.

Uma alternativa para resolver este problema de medição é utilizar a Correlação Digital de Imagens (*Digital Image Correlation* - DIC). Esta tecnologia é capaz de medir a deformação de superfícies a partir de um conjunto de imagens que registram seu comportamento desde seu estado inicial até a deformação final (Rossi *et al.*, 2008). O método de análise se baseia em localizar a posição de um pixel na primeira imagem e localizá-lo nas imagens subsequentes, determinando assim o deslocamento na região de interesse e, em seguida, a extensão do material. Para utilização deste método é necessário garantir que não haja mais de uma correspondência para um bloco (Luo *et al.*, 2022). Portanto, a superfície de estudo deve ser preparada para apresentar um padrão aleatório, o que pode ser facilmente alcançado aplicando-se uma pigmentação com tinta. Um padrão de superfície muito utilizado no método de DIC é o padrão *Speckle*. A seguir, a Fig. 2 ilustra três formas deste padrão.



Figura 2. Padrão *Speckle*

2. METODOLOGIA

Com o intuito de validar a aplicação do método de DIC no cálculo da anisotropia de chapas metálicas, foi realizada uma série de procedimentos para calcular os índices de anisotropia de uma liga. O material utilizado no estudo foi o aço inoxidável AISI 409, classificado na norma europeia EN-10088-2 como 1.4512, com espessura de 1,0 mm.

Foi realizado o ensaio de tração para causar as deformações na largura e no comprimento do material. Sendo assim, inicialmente os corpos de prova foram preparados e, em seguida, todo o ensaio foi gravado, com o intuito de fazer a aquisição de imagens para aplicação do método de DIC.

No cálculo da anisotropia, as amostras são retiradas em diferentes orientações na chapa de estudo, utilizando como referência o sentido de laminação. Geralmente, o estudo é feito nas direções de 0° , 45° e 90° . A seguir, a Fig. 3 faz uma exemplificação das direções citadas.

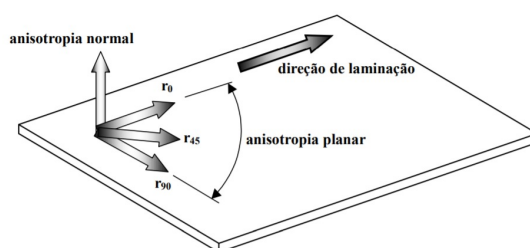


Figura 3. Direções para o estudo da anisotropia

O índice de anisotropia da chapa para cada direção é calculado a partir do fator de *Lankford*, encontrado a partir da

Eq. (1).

$$r = \frac{\varepsilon_{p_w}}{\varepsilon_{p_t}} = \ln \left(\frac{\frac{w}{w_0}}{\frac{t}{t_0}} \right) \quad (1)$$

onde: r é o fator de anisotropia [adimensional], ε_{p_w} é a deformação plástica verdadeira na largura do corpo de prova [adimensional], ε_{p_t} é a deformação plástica verdadeira na espessura [adimensional], w_0 a largura inicial [mm], w a largura final [mm], t_0 a espessura inicial do [mm] e t a espessura final [mm].

Neste estudo, os métodos mensurados utilizados medem a deformação na largura e no comprimento, sendo assim, aplicando-se a lei de constância de volume, Eq. (2), a Eq. (1) pode ser reescrita como a Eq. (3) (Peters, 2015).

$$t_0 \cdot w_0 \cdot l_0 = t \cdot w \cdot l \quad (2)$$

onde: l_0 é o comprimento inicial [mm] e l é o comprimento final [mm].

$$r = \frac{\varepsilon_{p_w}}{\varepsilon_{p_t}} = \ln \left(\frac{\frac{w}{w_0}}{\frac{w_0 \cdot l_0}{w \cdot l}} \right) \quad (3)$$

Feito o cálculo do índice de anisotropia para cada direção, é possível calcular outros dois fatores que revelam característica importantes sobre o material, a anisotropia média normal e a anisotropia planar, encontradas a partir da Eq. (4) e da Eq. (5).

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (4)$$

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (5)$$

onde: r_m é a anisotropia média normal [adimensional], Δ_r a anisotropia planar [adimensional], r_{0° é anisotropia no sentido de laminação [adimensional], r_{45° é anisotropia a 45° em relação ao sentido de laminação [adimensional] e r_{90° é anisotropia a 90° em relação ao sentido de laminação [adimensional].

2.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram preparados seguindo os procedimentos da norma EN 10002-1 (European Committee for Standardization, 2006), específica para este tipo de ensaio. Para cada direção do ensaio foram preparadas três amostras, sendo feita uma média dos resultados para os valores finais do estudo de cada orientação da chapa. A seguir, a Fig. 4 apresenta o formato do corpo de prova com suas dimensões e, em seguida, a Tab. 1 exibe o nome e o valor correspondente de cada uma das dimensões.

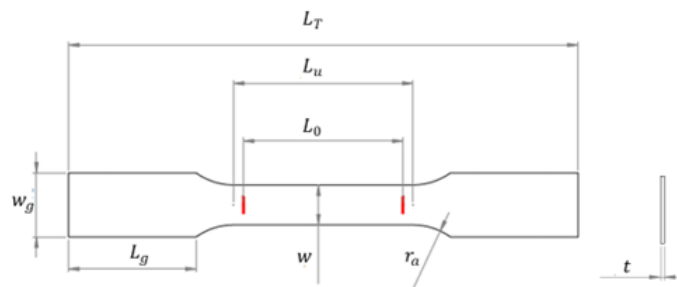


Figura 4. Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração

Tabela 1. Dimensões do corpo de prova

Dimensão	Designação	Valor (mm)
L_t	Comprimento total	160,00
L_u	Comprimento da zona útil	56,25
L_0	Comprimento útil	50,00
L_g	Comprimento da seção de engaste	20,00
w	Largura	12,50
w_g	Largura da seção de engaste	20,00
r_0	Raio de aresta	20,00

Após a obtenção dos corpos de prova, a próxima etapa foi criar o padrão *Speckle* em suas superfícies. Para criar o padrão, foi adotada uma sequência de procedimentos. Primeiramente, a superfície foi limpa com acetona e, posteriormente, o corpo de prova foi pintado com *spray* de cor branca. Após um dia de secagem, foi feita uma pigmentação sobre a superfície com *spray* de cor preta, dando origem ao padrão *Speckle*, conforme ilustrado na Fig. 5. Este procedimento foi aplicado em todos os corpos de prova do estudo.



Figura 5. Padrão *Speckle*

3. Ensaio de tração

Após a obtenção dos corpos de prova, foram preparados os procedimentos para o ensaio de tração. Como era necessário gravar o ensaio, foi criado um *setup* próximo a máquina de ensaio de tração. Foi utilizada uma câmera modelo Laia *full HD 4K*, onde os parâmetros para o vídeo foram uma resolução de 1920×1080 *pixels* e uma taxa de quadros de 30 *fps*.

Como o intuito do método de DIC é seguir um ponto do padrão *Speckle* durante o ensaio, é necessário garantir uma boa iluminação na região de interesse. Sendo assim, o *setup* também incluiu a presença de LEDs para auxiliar na iluminação. A seguir, a Fig. 6 ilustra o arranjo feito para gravação do ensaio.



Figura 6. Setup para realização do ensaio

4. Correlação digital de imagens

Após a realização do ensaio de tração e gravação do vídeo, foi iniciado o procedimento de medição com o método DIC. O procedimento foi feito utilizando o *software GOM Correlate*.

O primeiro passo no *software* consistiu em determinar a região de interesse, na qual é escolhido um ponto aleatoriamente e acompanhado durante toda a gravação do ensaio. A seguir, a Fig. 7 apresenta a superfície delimitada no *software*.

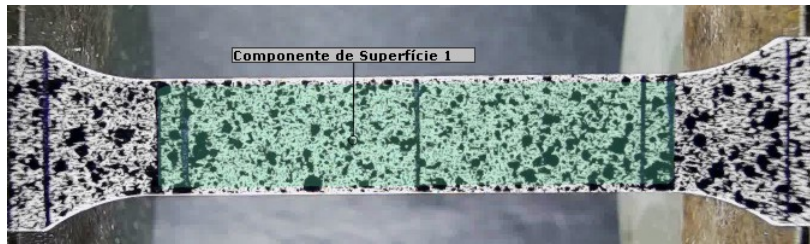


Figura 7. Definição da superfície

A medição da deformação é feita a partir de extensômetros digitais, disponíveis no software. Sendo assim, para garantir maior precisão, foi definida uma escala para a imagem, a qual foi realizada a partir de pontos de referência marcados na superfície do corpo de prova. Para maior exatidão do estudo, foram utilizados três extensômetros para medir o alongamento da largura ao longo da região a ser analisada e, para cálculo da anisotropia, foi utilizada a média dos valores fornecidos pelos extensômetros. Além disso, também foi utilizado um extensômetro para medir o alongamento no comprimento, a fim de comparar estes valores com o extensômetro da máquina de ensaio de tração. A seguir, a Fig. 8 ilustra os extensômetros posicionados.

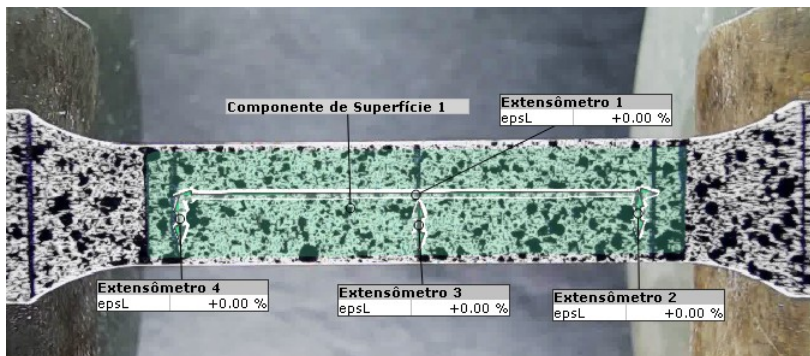


Figura 8. Posicionamento dos extensômetros

Ao término da medição, o *software* produz um arquivo contendo as variações de comprimento registradas pelos extensômetros. Esses dados foram então importados para um programa de análise de dados, onde, por meio das equações conhecidas, foram realizados os cálculos da anisotropia.

5. RESULTADOS

A partir dos resultados encontrados, foi possível comparar os valores com estudos de outros autores para verificar a viabilidade do método de correlação digital de imagens.

Os índices de anisotropia foram calculados para as três direções definidas, 0°, 45° e 90° em relação a direção de laminação. A seguir, a Tab. 2 apresenta os índices de anisotropia, e também a anisotropia média e planar da liga. O *software* de Correlação Digital de Imagens fornece a porcentagem de alongamento da largura ao longo do ensaio de tração. Sendo assim, estes dados foram tratados e transformados em deformação.

Tabela 2. Índices de anisotropia

Direção	r	r_m	Δ_r
0°	1,78	1,352	0,352
45°	1,53		
90°	2,68		

Os valores do índice de anisotropia apresentados na tabela foram obtidos a 15% de deformação, em relação ao comprimento, semelhante ao estudo realizado por Krevicz (2022). Entretanto, o autor cita que este valor pode ser analisado em outros níveis de deformação, a depender das condições do projeto de estampagem. Como o *software* de correlação digital de imagens fornece a deformação da largura ao longo de todo o ensaio de tração, é possível traçar uma curva do comportamento da anisotropia em relação a deformação no comprimento, conforme apresenta a Fig. 9.

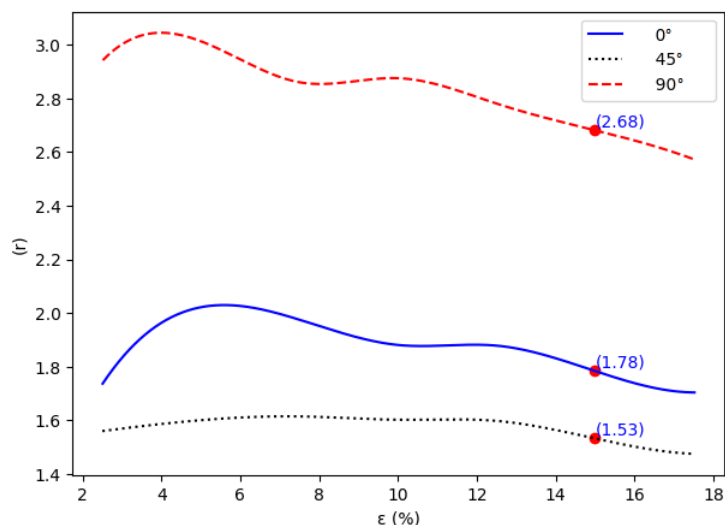


Figura 9. Evolução dos índices de anisotropia

Os valores dos índices de anisotropia encontrados neste estudo assemelham-se aos valores descritos no trabalho de (Lopes, 2009), que utilizou o método de representação da textura cristalográfica e a técnica de cisalhamento planar simples. A seguir, a Tab. 3 faz uma comparação entre estes resultados e a diferença em termos percentuais.

Tabela 3. Comparação dos índices de anisotropia com os resultados de (Lopes, 2009)

Direção	r	$r(Lopes, 2009)$	Δ
0°	1,78	1,71	4,09%
45°	1,53	1,52	0,65%
90°	2,68	2,62	2,29%

6. CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizado neste estudo, concluiu-se que o método de Correlação Digital de Imagens demonstra ser um método viável para o estudo da anisotropia das chapas metálicas submetidas ao processo de estampagem. Conforme apresentado nos resultados, os valores encontrados mostram coerência com um estudo anterior, o qual utilizou um método diferente.

Além disso, a análise do comportamento dos índices de anisotropia revelou uma diminuição dos valores à medida que a deformação aumenta. Isso evidência que, quanto maior a deformação plástica, maior a probabilidade de ocorrer o afinamento da espessura da chapa.

Uma das principais vantagens da utilização deste método está em seu baixo custo em termos de medição da deformação na largura durante o ensaio de tração, uma vez que máquinas convencionais que possuem essa funcionalidade geralmente apresentam um valor elevado. O método de Correlação Digital de Imagens requer apenas de uma câmera de alta resolução e o *software* para análise das imagens, tornando as pesquisas desta área mais acessíveis.

7. REFERÊNCIAS

- Banabic, D., 2000. *Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits*. Springer Science & Business Media.
- Callister, W. and Soares, S., 2008. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Livros Técnicos e Científicos. ISBN 9788521615958.
- Demin, V., Larin, S., Riskin, R. and Rizkova, A., 2018. "Study the influence of anisotropy on the drawing cylindrical part". *CIS Iron and Steel Review*, Vol. 16, pp. 25–28. doi:10.17580/cisr.2018.02.05.
- European Committee for Standardization, 2006. "Metallic materials - tensile testing - part 1: Method of test at ambient temperature".
- Gomes, M.A., 2015. *Caracterização mecânica e microestrutural de compósitos de matriz metálica Al/SiCp e Al/Al2O3p obtidos via interação por laminação Acumulativa*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Kok, Y., Tan, X.P., Wang, P., Nai, M., Loh, N.H., Liu, E. and Tor, S.B., 2018. "Anisotropy and heterogeneity of micros-

- tructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review”. *Materials & Design*, Vol. 139, pp. 565–586. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.021>.
- Krevicz, A.R., 2022. “Simulação numérica e avaliação experimental dos parâmetros envolvidos na estampagem de chapas de aço”.
- Lopes, W., 2009. “Estudo do encruamento dos aços aisi 304 e aisi 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples”.
- Luo, P., Wang, L., Li, D., Yang, J. and Lv, X., 2022. “Deformation and failure mechanism of horizontal soft and hard interlayered rock under uniaxial compression based on digital image correlation method”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 142, p. 106823. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106823>.
- Peters, P.R., 2015. *Yield functions taking into account anisotropic hardening effects for an improved virtual representation of deep drawing processes*. Ph.D. thesis, ETH Zurich.
- Rossi, M., Broggiato, G. and Papalini, S., 2008. “Application of digital image correlation to the study of planar anisotropy of sheet metals at large strains”. *Meccanica*, Vol. 43, pp. 185–199. doi:DOI:10.1007/s11012-008-9123-9.
- Schreiber, R.G., Kiniz Júnior, M., Fiuza Filho, F. and Schaeffer, L., 2022. “Influência dos parâmetros de estampagem incremental na estampabilidade de chapas de alumínio puro”. *Matéria (Rio de Janeiro)*, Vol. 27, p. 13140.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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