

Comparação entre visioelasticidade e FEM para determinação das deformações na estampagem incremental em latão C-268

Comparison between visioelasticity and FEM for determination of strains in incremental sheet forming in brass sheet C-268 alloy

DOI:10.34117/bjdv8n10-016

Recebimento dos originais: 30/09/2022

Aceitação para publicação: 03/10/2022

Régis Marcelo de Souza

Graduado em Engenheiro Mecânico

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço: Farroupilha, Porto Alegre - RS, CEP: 90010-150

E-mail: regis.marcelo@ufrgs.br

Rafael Gustavo Schreiber

Doutor em Engenharia

Instituição: Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

Endereço: Av. Mauro Ramos, 950, Centro, Florianópolis - SC, CEP: 88020-300

E-mail: rafael.schreiber@ifsc.edu.br

Andrison Rodrigues Teixeira

Doutor em Engenharia

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço: Farroupilha, Porto Alegre - RS, CEP: 90010-150

E-mail: andrison@glequipamentos.com.br

Dionatan de Souza Britto

Graduado em Engenheiro Mecânico

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço: Farroupilha, Porto Alegre - RS, CEP: 90010-150

E-mail: dinathansb@hotmail.com

Jeferson Camilotti Gaio

Graduado em Engenheiro Mecânico

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço: Farroupilha, Porto Alegre - RS, CEP: 90010-150

E-mail: engenheirogaio@hotmail.com

Lírio Schaeffer

Doutor em Engenharia

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Endereço: Farroupilha, Porto Alegre - RS, CEP: 90010-150

E-mail: schaeffer@ufrgs.br

RESUMO

Este trabalho tem objetivo realizar a comparação entre o método de visioelasticidade e o método de elementos finitos para determinação das deformações aplicadas no processo

de Estampagem Incremental. Neste trabalho foram realizados quatro experimentos de Estampagem Incremental em chapas de latão C268 com espessura inicial 0,81 mm. Os corpos de prova foram conformados em diferentes profundidades, a fim de se obter peças com diferentes níveis de deformação. Após a conformação as deformações foram medidas pelo método da visioplasticidade a partir de uma grade de círculos de 1 mm de diâmetro, gravada nas chapas por processo a laser. Em seguida foi realizada análise de elementos finitos a fim de avaliar as deformações nas chapas para as mesmas condições utilizadas nos experimentos. As chapas foram ainda cortadas ao meio para realização de medição direta de espessura com micrômetro. Os resultados das medições de visioplasticidade foram então comparadas com os resultados de elementos finitos e com os dados de espessura obtidos por medição direta nas chapas cortadas. Comparado com a medição direta, o método visioplasticidade apresentou erro percentual de 1,30 a 8,64%, enquanto que o método de elementos finitos apresentou erro percentual nas medições de 0,39 a 6,03 %.

Palavras-chave: estampagem incremental, deformação, visioplasticidade, método de elementos finitos.

ABSTRACT

This work aims to compare the visioplasticity method and the finite element method to determine the strains applied in the Incremental Sheet Forming process. In this work, four Incremental Sheet Forming experiments were carried out on C268 brass sheets with an initial thickness of 0.81 mm. The specimens were formed at different depths, in order to obtain pieces with different levels of strain. After conformation, the strains were measured by the visioplasticity method from a grid of circles with a diameter of 1 mm, engraved on the sheets by laser process. Then finite element analysis was performed in order to evaluate the strains in the sheets for the same conditions used in the experiments. The sheets were further cut in half for direct thickness measurement with a micrometer. The results of the visioplasticity measurements were then compared with the finite element results and with the thickness data obtained by direct measurement on the cut sheets. Compared with the direct measurement, the visioplasticity method presented a percentage error of 1.30 to 8.64%, while the finite element method presented a percentage error in the measurements of 0.39 to 6.03%.

Keywords: incremental sheet forming, strain, visioplasticity, finite element method.

1 INTRODUÇÃO

A diversificação recente do mercado no que diz respeito à conformação de chapas metálicas permitiu o desenvolvimento de novos métodos de fabricação flexíveis para pequenos lotes de produção com baixos custos de ferramental aplicado. Ceretti *et al.* [1] descreveram processos inovadores introduzidos neste campo, tais como conformação por estiramento flexível, conformação por molde de chapa e conformação por fluido de chapa. Jeswiet *et al.* [2] apresentam modificações que têm acontecido em processos convencionais de conformação em chapas tais como repuxamento, embutimento, corte e

dobra. Nesta mesma via, Malwad e Nandedkar [3] destacam que na maioria das indústrias de manufatura, a fase de desenvolvimento é uma etapa importante na determinação ou aprimoramento de um produto antes de prosseguir para a produção regular.

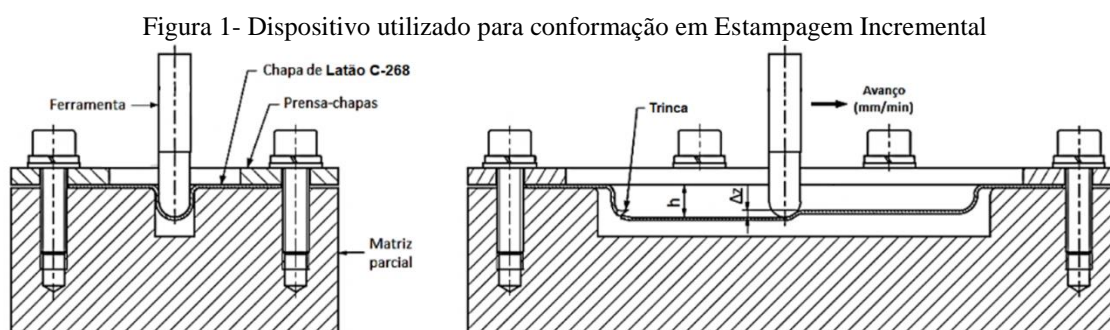
Nesse contexto, o processo de Estampagem Incremental se coloca como um método inovador e de elevado ganho em custo e tempo em termos de prototipagem rápida, adaptabilidade e lotes pequenos [3], também se destaca pela elevada flexibilidade e viabilidade na customização de peças [4]. Entretanto, todo avanço tecnológico e inovação também possuem desvantagens, Langella *et al.* [4] afirmam a necessidade de estudos mais profundos sobre as variáveis que restringem a Estampagem Incremental, tal como o tempo maior de conformação em comparação a outros processos de conformação, que pode ser ainda maior para elevadas espessuras de material [5]. Oleksik *et al.* [6] citam a deficiência em alcançar algumas formas geométricas e a baixa precisão dimensional do processo como sendo um fator desfavorável.

A Estampagem Incremental consiste na conformação de uma chapa com uma espessura inicial conhecida (s_0) a qual é fixada por um prensa-chapas a uma base ou estrutura, que por sua vez é fixada à mesa de uma máquina operatriz. Uma ferramenta com ponta semiesférica e raio (r) é acoplada a um dos eixos da máquina e irá percorrer um trajeto que consiste na combinação de parâmetros que irão atuar em simultâneo até alcançar a geometria desejada da chapa, esses parâmetros são compostos por: incremento vertical (Δ_z), incremento horizontal (Δ_{xy}), avanço da ferramenta (a), rotação da ferramenta (N) [7]. Sendo que a trajetória da ferramenta é geralmente definida por programação em software CAM, e este programa é posteriormente transferido para o comando CNC da máquina operatriz [8]. O processo de Estampagem Incremental pode ser facilmente realizado tanto em centros de usinagem CNC [9,10], quanto em tornos CNC [11] ou através de braços robóticos [12].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização dos experimentos de Estampagem Incremental foi utilizado um centro de usinagem CNC ROMI Discovery 380. O lubrificante usado foi um óleo mineral HIBRAMAX VG100, largamente utilizado em sistemas com alta fricção e rotação. A ferramenta de conformação foi fabricada em aço rápido, temperado e revenido e com dureza de 53 HRC. A ferramenta foi fabricada com ponta semiesférica e raio de 5 mm, sendo sua superfície de ponta polida para maior controle da fricção e melhor acabamento superficial nos experimentos [13]. Para fixação dos corpos de prova, foi desenvolvido um

dispositivo em aço SAE1045 constituído por uma base maciça e um prensa-chapas. O objetivo do dispositivo foi garantir a rigidez e estabilidade no processo, evitando vibrações excessivas e quaisquer outras influências nos resultados [14]. A Figura 1 apresenta o dispositivo utilizado nos experimentos com a ferramenta realizando a conformação de um canal na chapa até a profundidade (h).



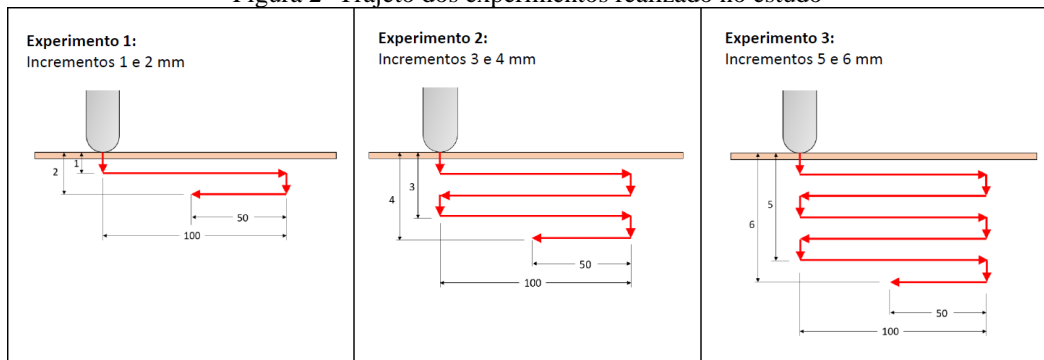
Neste estudo foram utilizados corpos de prova em latão de liga C-268, em formato retangular com dimensões 0,81 x 60 x 160 mm para possibilitar a conformação do canal reto em diferentes incrementos.

As deformações foram verificadas através de dois métodos distintos: O primeiro método por visioelasticidade (medição das elipses) e em medição direta (cortando cada um dos corpos de prova ao meio pelo comprimento). No segundo método, foi realizada a simulação pelo método de elementos finitos (FEM) para avaliar as deformações, aplicando as mesmas condições realizadas nos experimentos.

2.1 EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Para a realização dos experimentos por Estampagem Incremental, foram determinados trajetos individuais em software CAM e transferidos os programas para o comando CNC da máquina operatriz. Os trajetos foram elaborados para fabricação de canais com incrementos verticais (Δz) de 1 mm, sem rotação da ferramenta e com velocidade de avanço de 250 mm/min. Conforme indicado na Figura 2, no primeiro experimento foi conformado um canal de profundidade de 1 mm de um lado e de 2 mm do outro lado. No segundo experimento as profundidades foram de 3 e 4 mm, enquanto que no terceiro experimento as profundidades máximas conformadas foram de 5 e 6 mm. Um quarto experimento foi realizado, mas neste caso ocorreu a ruptura do material ao atingir a profundidade de 7 mm.

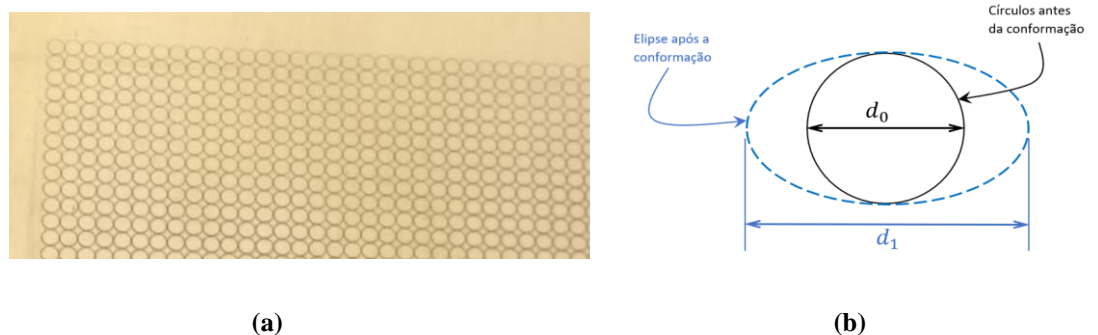
Figura 2- Trajeto dos experimentos realizado no estudo



2.2 MEDIÇÃO POR VISIOPLASTICIDADE

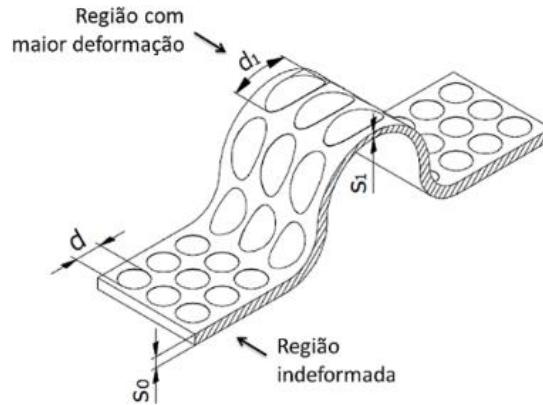
Para realização da medição das deformações nas chapas por visioelasticidade, os corpos de prova necessitaram receber uma gravação a laser de círculos de diâmetro inicial (d_0) de 1 mm justapostos em colunas e linhas, formando uma malha cobrindo a superfície oposta à superfície que recebeu a atuação da ferramenta (Figura 3a). A deformação obtida pela Estampagem Incremental no material é demonstrada pelo alongamento da grade de círculos, alternando este formato para uma forma elíptica após a deformação (Figura 3b) de dimensão (d_1), a qual variou conforme foram aplicadas as deformações com diferentes profundidades máximas nos experimentos.

Figura 3- Detalhe da malha de círculos sobre a superfície do corpo de provas (a), condição dos círculos antes e após a deformação da chapa (b)



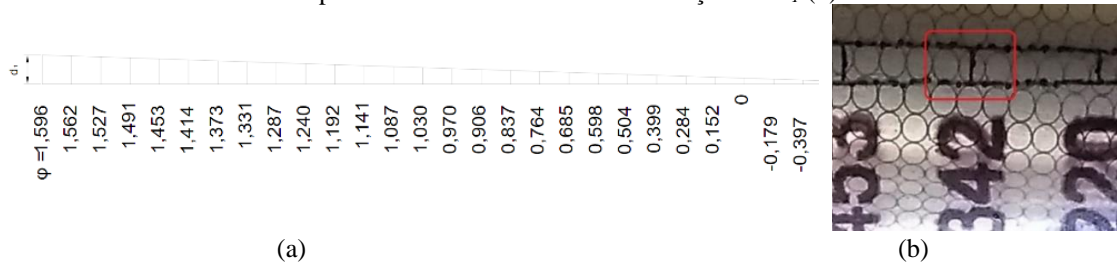
Após a finalização das conformações de canal reto sobre os corpos de prova, foram realizadas as medições para obtenção dos resultados de visioelasticidade. A medição foi realizada sobre a região de maior deformação, a qual é demonstrada pela formação da elipse com maior dimensão d_1 a partir do círculo d_0 (Figura 4)

Figura 4- Maior deformação demonstrada pelo círculo conformado em elipse



A medição por visioelasticidade consiste em sobrepor uma escala flexível (Figura 5a), posicionando a sua faixa de medição que melhor se encaixar na elipse com a maior deformação (Figura 5b). O objetivo de a escala ser flexível é facilitar o manuseio, possibilitando a sobreposição na curvatura da superfície conformada do corpo de prova e garantir um posicionamento e visualização mais fácil.

Figura 5- Escala flexível para medição por visioelasticidade (a), Detalhe da medição da escala sobreposta à elipse encontrada com maior deformação em d_1 (b)



Para interpretação da faixa de medição da escala, a maior deformação φ_1 (deformação verdadeira principal) é determinada pelo logaritmo natural da razão do comprimento da elipse (d_1) pelo diâmetro do círculo (d_0) gravado na chapa, conforme apresentado na Equação 1.

$$\varphi_1 = \ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right) \quad \text{Eq. [1]}$$

Onde:

φ_1 = deformação verdadeira no comprimento (-);

d_1 = comprimento da elipse - obtida pela deformação do círculo gravado na chapa para análise das deformações (mm);

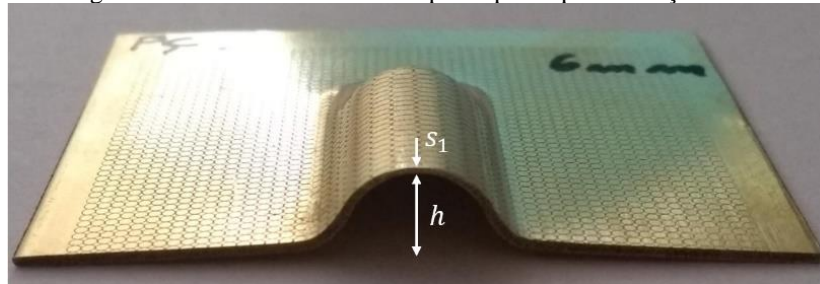
d_0 = diâmetro do círculo gravado na chapa antes das deformações (mm).

2.3 MEDIÇÃO DIRETA

Na medição direta, a menor espessura obtida na região de maior deformação (s_1) foi medida com o auxílio de um micrômetro convencional milesimal. Os resultados obtidos em *mm*, foram tabulados para posterior comparativo com a simulação por elementos finitos e viscoplasticidade.

Para possibilitar a medição direta, cada um dos corpos de prova foi cortado na seção transversal, cruzando a menor espessura obtida nas conformações (Figura 6).

Figura 6- Corte transversal do corpo de prova para medição direta



2.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

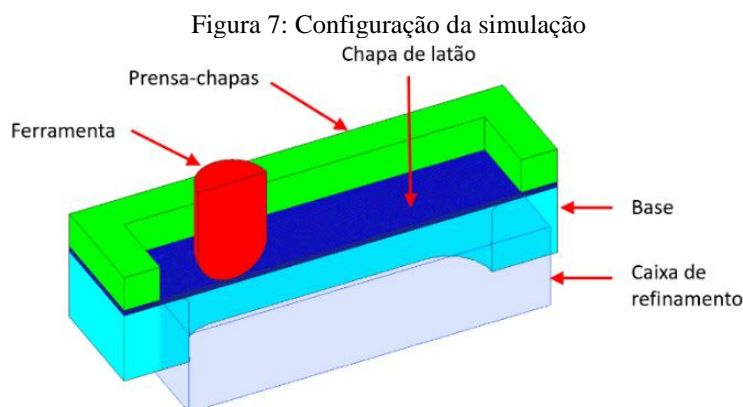
Para estimativas de comportamentos de projeto, usam-se metodologias de elementos finitos, sendo que o papel de um elemento finito é interpolar um espaço de função de finita dimensão, formando o “elemento geométrico” [15]. Assim, tem-se a análise em funções (nodal, de borda, faceta e volume), com quais os espaços discretos são representados, ficam anexos à interpretação destas funções no intuito de discretizar o modelo. As propriedades dos espaços discretos permitem equivalentes vetoriais no domínio contínuo [15]. Nos estudos de [16], o método dos elementos finitos (FEM) é escolhido pelas características de convergência de uma solução para qualquer problema que tenha características de ser discretizado em uma faixa finita de derivadas (parciais/espaciais) e condições iniciais interpostas.

Foi realizada análise utilizando o Método de Elementos Finitos a fim de avaliar a espessura final e a conseqüente deformação após cada incremento de deformação no ensaio do canal. A simulação foi realizada usando o software *Simufact Forming®* no módulo *Sheet Metal Forming®*, com o tipo de simulação 3D elementos do tipo sólido.

Todo o ferramental para o processo, constituído de ferramenta de conformação, prensa-chapas, base e chapa a ser conformada, foram modelados a fim de simular uma condição o mais próxima possível do ensaio dos realizados. A fim de diminuir o tempo total de simulação, o comprimento do canal foi reduzido no modelo de simulação para 30 mm.

As trajetórias de ferramenta foram definidas na simulação por meio de tabela de movimentos (*tabular motion*) usando o tempo de deslocamento da ferramenta calculado em função da velocidade de avanço de 250 mm/min, conduzida nos experimentos. A temperatura inicial do ferramental foi configurada para a simulação como 20°C, e o coeficiente de atrito foi configurado como 0,1 seguindo a lei de Coulomb.

O material foi configurado como latão C268 com curva de escoamento $k_f = 736 \cdot \phi^{0,2618}$. Além disso, o material foi considerado isotrópico na simulação. A malha do material da chapa foi configurada com comprimento de aresta de 1 mm e com três elementos sob a espessura da chapa. O primeiro nível de refinamento foi configurado para a caixa de refinamento posicionada no local de deformação do material, conforme indicado na Figura 7. Na caixa de refinamento a aresta de malha foi de 0,5 mm.

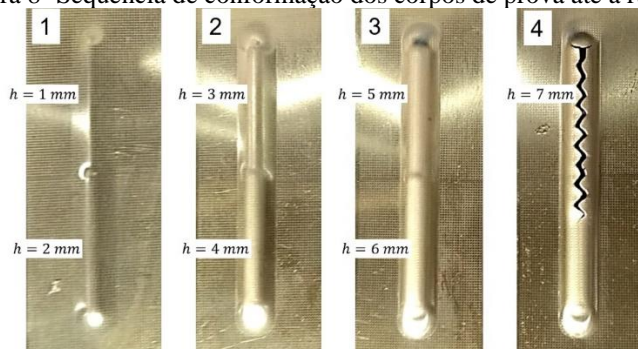


3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todos os experimentos a deformação obtida pelo incremento da ferramenta de Estampagem Incremental sobre a chapa, resultou na formação de um canal com mesmo raio da ferramenta. Os experimentos foram realizados aplicando gradualmente incrementos verticais de 1 em 1 mm até que ocorresse a fratura. Conforme indicado na Figura 8, no primeiro experimento foram obtidas as profundidades de 1 e 2 mm, no segundo experimento as profundidades de 3 e 4 mm, no terceiro experimento as profundidades de 5 e 6 mm, enquanto que no quarto experimento ocorreu a fratura do

material na profundidade de 7 mm. Na profundidade de 7 mm a fratura ocorreu de forma catastrófica, acompanhando o movimento da ferramenta até a interrupção da execução do trajeto. Devido ao modo como a fratura ocorreu no último incremento, neste corpo de prova não foi realizada a medição direta de espessura. Sendo assim, a espessura crítica para este material, nestas condições de processo, foi considerada o $s_1 = 0,398$ mm, determinada por medição direta com micrômetro na profundidade de 6 mm.

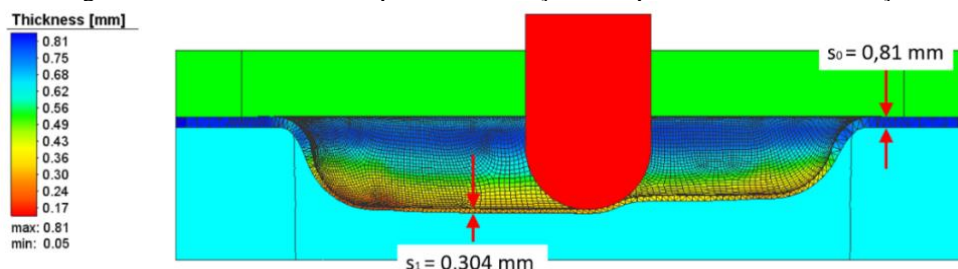
Figura 8- Sequência de conformação dos corpos de prova até a ruptura



A temperatura de trabalho foi desconsiderada uma vez que sua verificação medida ao fundo da formação do canal durante a deformação demonstrou uma pequena variação, mantendo ao longo de todos os incrementos a média de 26°C, tendo à temperatura ambiente verificada em 18°C.

O local utilizado para determinação da espessura final da chapa na simulação foi determinado sobre a região posicionada entre o centro e a extremidade do canal (Figura 9). Este ponto foi selecionado a fim de permitir melhor comparação entre os dados obtidos por cada método, já que este ponto é de fácil medição direta e de fácil medição por visioelasticidade.

Figura 9- Ponto de referência para determinação da espessura final na simulação



A Tabela 1 relaciona as medições de espessura final em cada experimento, em função da profundidade do canal (h). Na tabela estão relacionadas as medições em função do método de visioelasticidade, FEM e medição direta da chapa seccionada.

Tabela 1- Resultados das medições de espessura por diferentes métodos

h (mm)	Visoplast.	FEM	Medição direta	h (mm)	Visoplast.	FEM	Medição direta
	s1 (mm)				φ1 (-)		
1	0,748	0,776	0,779	1	0,079	0,043	0,039
2	0,748	0,744	0,751	2	0,079	0,085	0,076
3	0,650	0,651	0,662	3	0,220	0,219	0,202
4	0,575	0,546	0,564	4	0,342	0,394	0,362
5	0,515	0,458	0,474	5	0,453	0,570	0,536
6	0,426	0,374	0,398	6	0,642	0,773	0,711

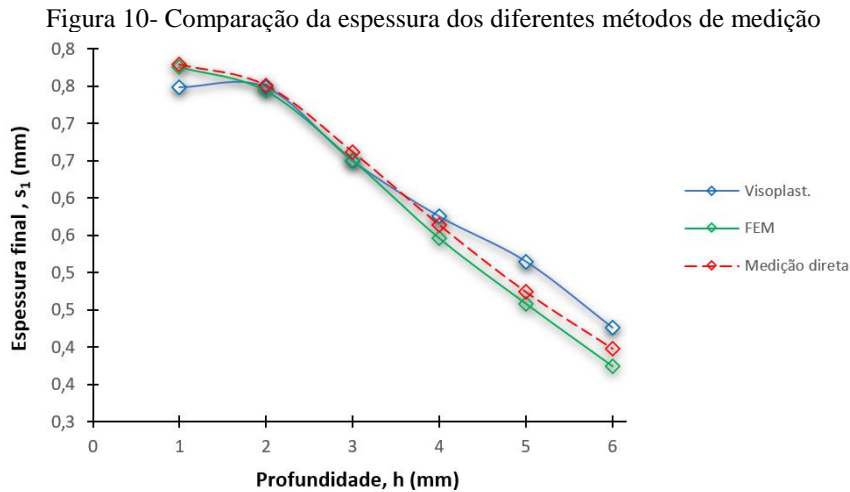
Já que, para o estado plano de deformações obtido no ensaio do canal, a deformação verdadeira principal (φ_1) obtida pela visioelasticidade se relaciona com a deformação em espessura (φ_3) pela relação $\varphi_1 = -\varphi_3$, conhecendo a deformação principal por visioelasticidade é possível determinar a espessura final da chapa (s_1) por meio da Equação 2.

$$s_1 = s_0 \cdot e^{\varphi_3} \quad \text{Eq. [2]}$$

No entanto, o cálculo de deformação em espessura, a partir dos dados de espessura final e inicial no FEM e na medição direta foram realizados por meio da Equação 3.

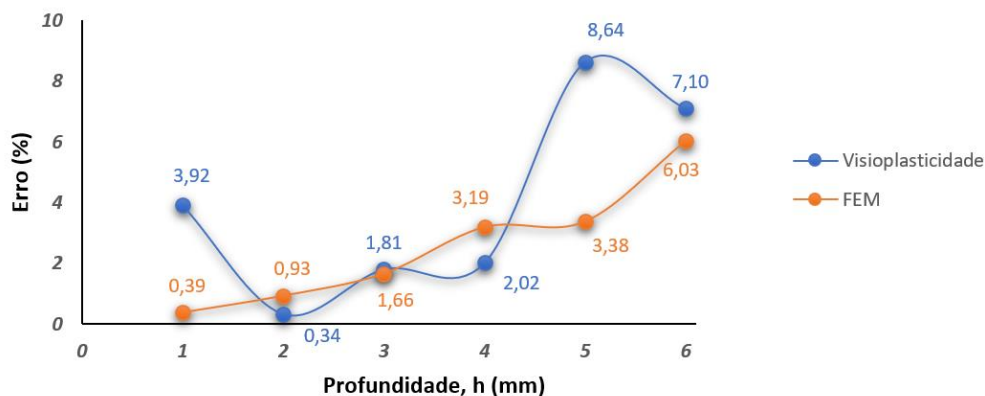
$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} \quad \text{Eq. [3]}$$

Baseado na Tabela 1 foi elaborada a Figura 10, onde é possível observar a comparação entre os valores de medição de espessura obtidos pelos três métodos, com os resultados da espessura final s_1 muito semelhantes, com um leve distanciamento para os resultados da visioelasticidade. Essa diferença mais acentuada obtida pela visioelasticidade já era esperada, em virtude de se tratar de um método manual e por ter influência direta pelo diâmetro do círculo gravado, já que quanto menor o diâmetro do círculo gravado mais localizada será a análise [17].



Na Figura 11 é possível avaliar o erro percentual para visioelasticidade e FEM em relação a medição direta de espessura para cada profundidade deformada.

Figura 10- Variação de erro percentual para visioelasticidade e FEM em relação a medição direta de espessura para cada profundidade deformada



Conforme apresentado na Figura 11 o erro percentual para FEM, foi de modo geral inferior ao apresentado pela visioelasticidade. Além disso, na visioelasticidade o erro variou de 1,81 a 8,64 %, sendo o valor médio de erro 3,97%. Para FEM o erro variou de 0,39 a 6,03 %, sendo o valor médio de erro 2,60%. Em ambos os casos o erro médio pode ser considerado relativamente baixo. Na Figura 10 verifica-se uma tendência de aumento de erro percentual por FEM à medida que ocorrem maiores deformações no material, enquanto que para visioelasticidade essa tendência ocorre, apesar de não ser tão evidente.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados 4 experimentos de Estampagem Incremental em chapas de latão C-268 com espessura inicial 0,81 mm, para deformação de canais com

diferentes profundidades até que ocorresse a fratura no material. Após a conformação das peças os valores de espessura final e deformação foram determinados por medição direta, visioplasticidade e pelo método de elementos finitos (FEM), obtendo-se as seguintes conclusões:

- Os três métodos de determinação das espessuras e das deformações apresentaram valores muito semelhantes;
- Comparada à medição direta a visioplasticidade apresentou erro percentual nas medições de 1,30 a 8,64%;
- Comparada à medição direta o FEM apresentou erro percentual nas medições de 0,39 a 6,03 %.
- Os valores obtidos por FEM são mais precisos que os obtidos pela visioplasticidade.

REFERÊNCIAS

- [1] CERETTI, E., GIARDINI, C., ATTANASIO, A., 2004. **Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines**. Journal of Materials Processing Technology 152, 176–184, Bergamo, Italy, 2004.
- [2] JESWIET, J., MICARI, F., HIRT, G., BRAMLEY, A., DUFLOU, J., ALLWOOD, J.: **Asymmetric single point incremental forming of sheet metal**. Annals of the CIRP 54/2, 628 – 650. 2005.
- [3] MALWAD, D. S., NANDEDKAR, V. S.: **Deformation Mechanism Analysis of Single Point Incremental Sheet Metal Forming**, International Conference on Materials Processing and Characterization, 3. 2014, p. 1505 – 1510, Nanded, India, 2014.
- [4] LANGELLA, A.; DURANTE, M.; FORMISANO, A.; MINUTOLO, F.M.C.: **The influence of tool rotation on an incremental forming process**, Department of Materials and Production Engineering, University of Naples Federico II, Naples, Italy, 2008.
- [5] REDDY, T. M., REDDY, A. C.: **Numerical investigation on the SPIF in 60-40 brass alloy to fabricate hyperbolic cups**, international journal for Advance Research in Science and Engineering, vol. 5, Ed. 11, 2016, p. 161 – 170, 2016, Hyderabad, India, 2016.
- [6] OLEKSIK, V.; PEPELNJAK, T.; NAJM, S. M.; PANITI, I.; MAJI, K.: **Emerging Trends in Single Point Incremental Sheet Forming of Lightweight Metals**, Metals 2021, 11, 1188.
- [7] SCHREIBER, R. G.; SOUSA, A. L. DE; SANTOS, E. M. DOS; FILHO, F. F.; NORBERTO, J. C.; MONDO, L. S. S.; CABRAL, T. H.; SCHAEFFER, L. **Incremental sheet forming parameters and applications: a review**, Brazilian Journal of Development, 58036–58060 (2022) 8 (8)
- [8] ZAVALA, J. M. D., ROMERO, O. M., ZUÑIGA, A. E., GUTIERREZ, H. M. L., TIJERINA, J. T.: **Investigation of tool wear in single point incremental sheet forming, Study of Friction and Wear Effects in Aluminum Parts Manufactured via Single Point Incremental Forming Process Using Petroleum and Vegetable Oil-Based Lubricants**, Materials 2021, 14, 3973.
- [9] SCHREIBER, R. G.; SCHAEFFER, L. **Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming**, Journal of Materials Research and Technology, 1132–1140 (2019) 8 (1)
- [10] SCHREIBER, R. G.; TEIXEIRA, A. R.; PEREIRA, R. S. F.; DA SILVA OSÓRIO, F.; SCHAEFFER, L. **Prototyping of absorber plate for solar collector by ISF and FSW processes**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 1–12 (2021) 43 (7).
- [11] SCHREIBER, R. G.; ARALDI, A.; KINIZ JÚNIOR, M.; DALEFFE, A.; SCHAEFFER, L. **Failure criterion for SPIF based on mean stress**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 1–11 (2022) 44 (5).

- [12] SCHREIBER, R. G.; JÚNIOR, M. K.; FILHO, F. F.; SCHAEFFER, L. **Influência dos parâmetros de estampagem incremental na estampabilidade de chapas de alumínio puro**, Revista Materia, (2022) 27 (1).
- [13] SILVA, P. J., ALVARES, A. J.: **Investigation of tool wear in single point incremental sheet forming**, Journal of Engineering Manufacturing, 234, p. 170-188, Brasília, Brasil, 2019.
- [14] SIDDIQI, M. U. R.; CONEY, J. R.; SIVASAWAMI, G.; AMIR, M.; BHATTACHARYA, R.: **Design and validation of a fixture for positive Incremental Sheet Forming**, Journal of Engineering Manufacturing, p. 1-15, UK, 2016.
- [15] BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N.: **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**, Florianópolis: Marcel Dekker, Inc., 497 p. 2003.
- [16] GAIO, J. C.; BACK, J. A.; SCHAEFFER, L.; ASSUNÇÃO, H.: **Finite Element Simulation of a Synchronous Wind Generator with Soft Magnetic Material Rotor**, Journal Of Engineering Research, [S.L.], v. 2, n. 16, p. 2-9, 27 jul. 2022.
- [17] DO, V.-C.; PHAM, Q.-T.; KIM, Y.-S. **Identification of forming limit curve at fracture in incremental sheet forming**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 4445–4455 (2017) 92 (9–12).