

Comparação dos métodos de análise da espessura final na Estampagem Incremental

Dionatan de Souza Britto ⁽¹⁾, Rafael Gustavo Schreiber ⁽²⁾, Régis Marcelo de Souza ⁽³⁾, Lírío Schaeffer ⁽⁴⁾

Resumo

Este trabalho apresenta uma comparação dos métodos de determinação da espessura final da chapa estampada no processo de Estampagem Incremental. Neste estudo foi estampada uma peça com formato de hiperboloide a partir de uma chapa de alumínio AA1200-H14 com 0,80 mm de espessura. O processo de Estampagem Incremental da peça foi realizado em um centro de usinagem CNC Eurostec, utilizando uma ferramenta de diâmetro 10 mm, com eixo livre (sem rotação), com incremento vertical de 1,0 mm e lubrificação com óleo VG 100. Após o experimento foi avaliada a deformação máxima na peça por método analítico (baseado na lei do cosseno), por visioplasticidade, por elementos finitos e por medição direta. Os valores obtidos de máxima deformação na espessura foram comparados a fim de determinar o erro percentual no uso de cada método em relação ao valor obtido na medição direta. O menor erro percentual foi obtido pelo método de elementos finitos, seguido pelo método analítico e por visioplasticidade.

Palavras chave: Estampagem Incremental, Deformação, Lei do Cosseno, Alumínio AA1200-H14.

⁽¹⁾ Mechanical Engineer; Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil, dionathansb@hotmail.com

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng.; IFSC (Federal Institute of Santa Catarina), Brazil, rafael.schreiber@ifsc.edu.br

⁽³⁾ MSc. Eng.; Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil, regis.marcelo@ufrgs.br

⁽⁴⁾ Prof. Dr. Ing.; UFRGS (Federal University of Rio Grande do Sul), Brazil, schaeffer@ufrgs.br

1 Introdução

A estampagem incremental é um processo aplicado à fabricação de peças em pequena escala e também à prototipagem de componentes em desenvolvimento [1-3]. Neste processo há grandes vantagens em relação ao processo de estampagem convencional, como o menor custo de fabricação do ferramental e a obtenção de maiores limites de estampabilidade [4-5].

Este método consiste basicamente na conformação progressiva de uma chapa plana a partir de uma espessura inicial, por incremento verticais e horizontais com uma ferramenta de conformação com ponta semiesférica em um diâmetro d_f [6]. Este processo consiste em fixar a chapa entre um prensa-chapas e uma placa de apoio [7]. À medida que a ferramenta de conformação penetra sobre a chapa é realizada sua conformação, de modo que o formato da peça é obtido por uma trajetória da ferramenta a ser realizado de acordo com um comando numérico previamente programado [7], conforme indicado na Figura 1.

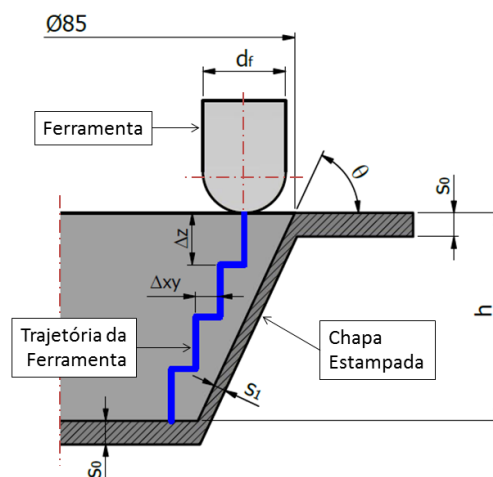


Figura 1. Representação Esquemática de Estampagem Incremental [8]

Para a conformação da peça são necessários vários incrementos com a ferramenta sobre a chapa. O percurso da ferramenta normalmente é determinada por programação de comando numérico computadorizado (CNC) [2-4]. Por meio do incremento vertical (Δz) e lateral ($\Delta x,y$) da ferramenta sobre a chapa é formado o ângulo de parede (θ) com o eixo horizontal, sendo que a espessura inicial (s_0) da chapa é diminuída até a espessura final (s_f).

É possível relacionar o ângulo de parede com a espessura final da chapa, sendo essa relação expressa pela lei do cosseno, conforme indicado na Equação 1 [9]. Segundo a lei do cosseno, quanto maior for o ângulo de parede utilizado, menor será a espessura final da chapa.

$$s_1 = s_0 \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

Onde:

s_0 = espessura final da chapa (mm);
 s_1 = espessura inicial da chapa (mm);
 θ = ângulo de parede (°).

A deformação verdadeira no sentido da espessura da chapa φ_3 é determinada pela Equação 2, em função da espessura inicial e da espessura final.

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right) \quad (2)$$

Onde:

φ_3 = deformação verdadeira na espessura (-).

A deformação na espessura também pode ser obtida por meio da lei da constância de volume, conforme Equação 3 e Equação 4. Mas para isso se faz necessário conhecer as deformações na largura e no comprimento.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (3)$$

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (4)$$

Onde:

φ_1 = deformação verdadeira no comprimento (-);

φ_2 = deformação verdadeira na largura (-).

As deformações φ_1 e φ_2 podem ser determinadas pelo método da visioplasticidade. Neste método geralmente é realizada a gravação eletroquímica ou gravação a laser de uma grade círculos na chapa antes de sua conformação. Dependendo do tipo de deformação à qual a peça está sendo submetida os círculos gravados são deformados podendo assumir um formato diferente (elíptico) ou assumir uma dimensão diferente (um círculo de maior diâmetro). A Figura 2a apresenta as dimensões de um círculo gravado antes da deformação da chapa e as dimensões de um formato elíptico apresentado na chapa após a deformação do material. A

Figura 2b apresenta uma peça estampada e a grade de círculos deformada para avaliação da visioelasticidade.

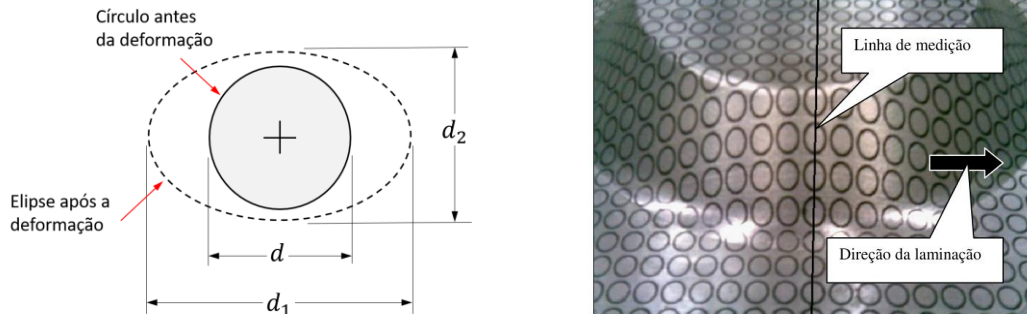


Figura 2. Dimensões do círculo e da elipse para visioelasticidade (a) e Exemplo de peça conformada para avaliação por visioelasticidade (b) [10]

As dimensões da grade deformada podem ser realizadas por meio de uma régua flexível. Após a medição da grade as deformações verdadeiras φ_1 e φ_2 são calculadas por meio da Equação 5 e da Equação 6.

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d}\right) \quad (5)$$

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d}\right) \quad (6)$$

Onde:

d_1 = comprimento da elipse (mm);

d_2 = largura da elipse (mm);

d = diâmetro do círculo gravado na chapa (mm).

Além da estimativa da deformação em espessura por meio da lei do cosseno e por meio da visioelasticidade, também é possível verificar o valor da deformação pela medição direta da espessura final da chapa. No entanto, para fazer a medição da espessura da chapa após a deformação do material é necessário realizar o corte da peça. Este trabalho apresenta uma comparação entre estes três métodos para análise da deformação em espessura no processo de estampagem incremental (lei do cosseno, visioelasticidade e medição direta).

2 Materiais e Métodos

Neste trabalho foi realizada a estampagem incremental de uma chapa de alumínio AA1200-H14 com espessura inicial 0,80 mm. O formato estampado foi de um hiperboloide, que é um perfil que permite a conformação da peça em um ângulo variável, desde um ângulo inicial θ_0 até um ângulo final θ_1 . As dimensões do hiperboloide estão indicadas na Figura 3a e a trajetória da ferramenta no experimento está indicada na Figura 3b. O experimento foi conduzido até que ocorresse a fratura do material, ou seja até a profundidade máxima h .

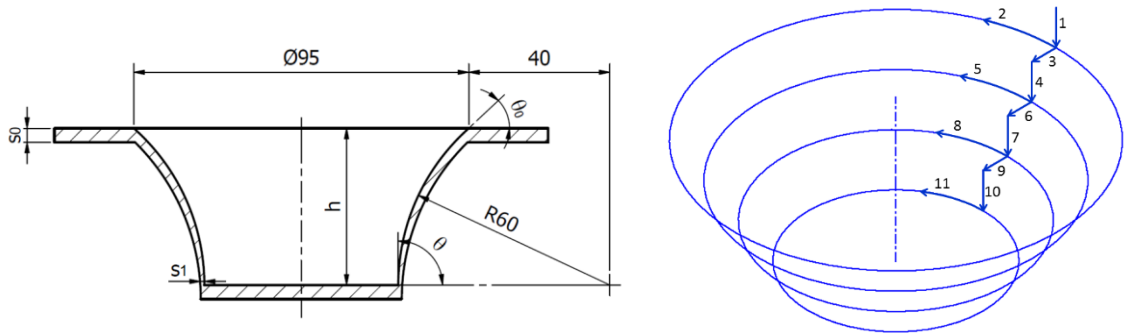


Figura 3. Dimensões do hiperboloide (a) [8] e Trajetória da ferramenta no experimento (b) [11]

2.1 Estampagem Incremental do corpo de prova

Para a realização do experimento de estampagem incremental foi utilizada uma ferramenta com diâmetro $d_f = 10$ mm, fabricada em aço SAE 1045 temperada e revenida. Para conformação da peça foi utilizado incremento vertical $\Delta_z = 1,0$ mm, velocidade de avanço $v = 500$ mm/min, sem rotação da ferramenta (eixo livre) e lubrificação com óleo VG 100. O experimento foi conduzido em um centro de usinagem CNC marca Romi e modelo Discovery 380, conforme indicado na Figura 4.

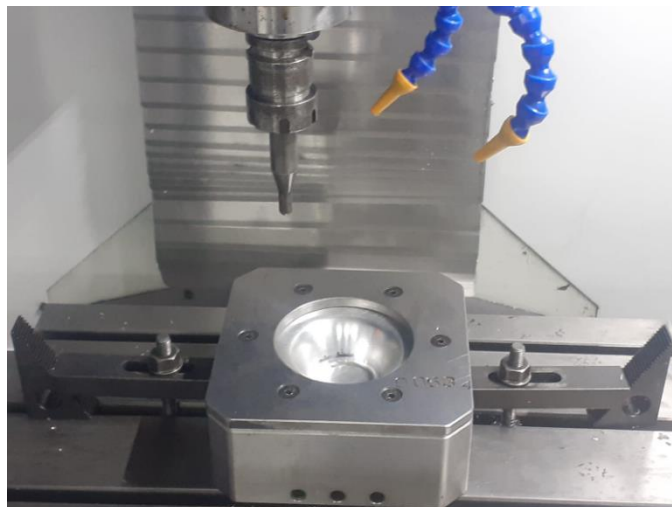


Figura 4. Realização do experimento no centro de usinagem CNC

Após a conformação da peça foi realizado um corte transversal por eletroerosão a fio. Em seguida foram marcados 21 pontos de medição ao longo do perfil da peça. A altura de cada ponto foi marcada com auxílio de um traçador de altura com resolução 0,01 mm. A espessura da peça em cada ponto marcado foi realizada através de um micrômetro com curso 0-25 mm e resolução 0,01 mm. Com o valor de espessura em cada ponto foi possível calcular a deformação em espessura em cada ponto por meio da Equação 2. Na Figura 5 são indicados os pontos de medição ao longo do perfil da seção transversal da peça.

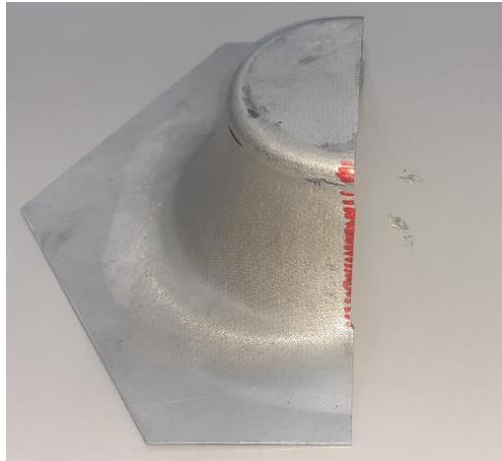


Figura 5. Pontos de medição na peça estampada

A deformação obtida pelo incremento vertical da ferramenta de Estampagem Incremental sobre a chapa, resultou na formação de um canal com perfil de um hiperboloide. Os experimentos foram realizados, aplicando gradualmente incrementos verticais de 1 em 1 mm até que ocorresse a fratura (Figura 6).

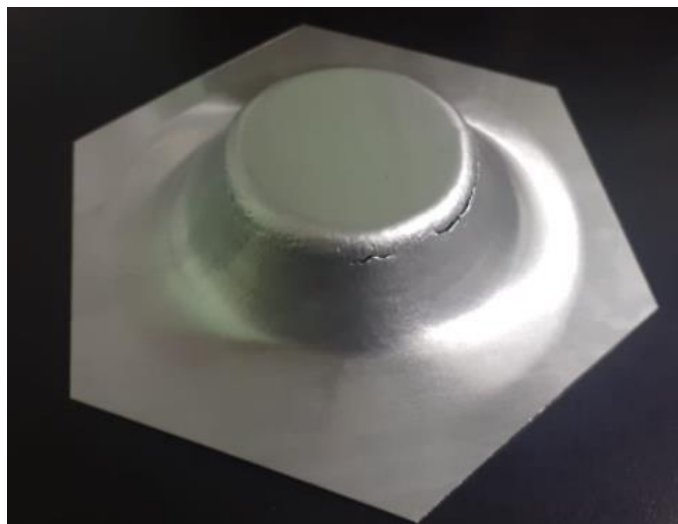


Figura 6 – Corpo de prova estampado até a ruptura

Para determinar a deformação do material neste experimento com base na lei do cosseno foi necessário calcular o ângulo de parede (θ) em função da profundidade do perfil (h) por meio da Equação 7, apresentada nos estudos de Schreiber et al. [8].

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\sqrt{(R+r)^2 - (R-h+r)^2}}{R+r} \right) \quad (7)$$

Onde:

θ = Ângulo de parede ao longo do perfil (°);

s = Espessura da chapa ao longo do perfil (mm);

R = Raio do hiperboloide (mm);

r = Raio da ferramenta (mm);

h = Profundidade ao longo do perfil (mm).

A Figura 7 apresenta uma representação do perfil de hiperboloide estampado com variação de espessura ao longo da profundidade, sendo esta figura a referência para a dedução da Equação 7. Com base no ângulo estimado em função da profundidade do perfil, foi estimada a espessura final da chapa (Equação 1) e a deformação correspondente (Equação 2).

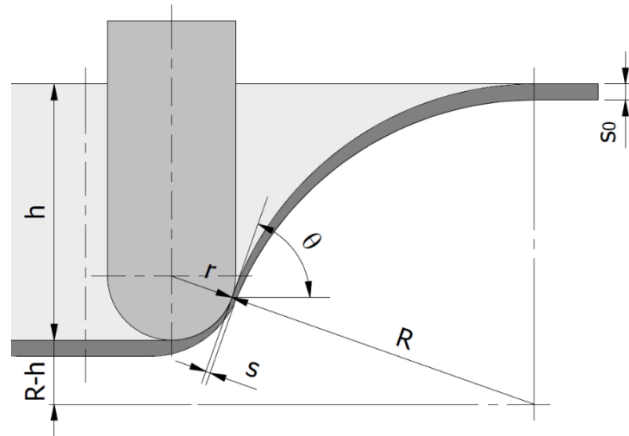


Figura 7. Realização do experimento no centro de usinagem CNC

O erro percentual calculado entre a espessura da chapa estimada pela lei do cosseno e a espessura da chapa medida com micrômetro foi determinado pela Equação 8.

$$ep = \left(\frac{s_{1med} - s_{1calc}}{s_{1med}} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Onde:

ep = Erro percentual (%);

s_{1med} = Espessura final da chapa medida com micrômetro (mm);

s_{1calc} = Espessura final da chapa calculada pela lei do cosseno (mm).

2.2 Método da Visioplasticidade

Para realização da medição das deformações nas chapas por visioplasticidade, 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 8). 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 de dimensão, a qual variou conforme foram aplicadas as deformações com diferentes profundidades máximas nos experimentos.

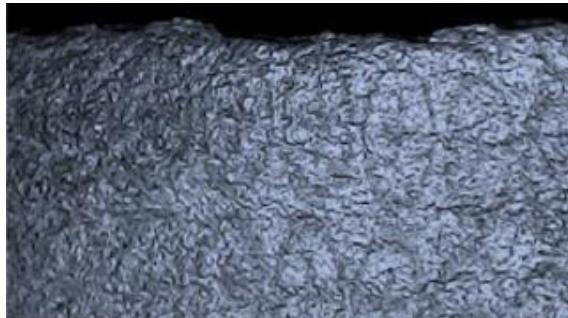


Figura 8 - Detalhe da malha de círculos sobre a superfície do corpo de provas (a), condição dos círculos antes e após a deformação da chapa (b)

Após a finalização das conformações de canal reto sobre os corpos de prova, foram realizadas às medições para obtenção dos resultados de visioplasticidade. A medição foi realizada sobre a região de maior deformação, a qual é demonstrada pela formação da elipse com maior alongamento do d_1 a partir do círculo d_0 (Figura 9).

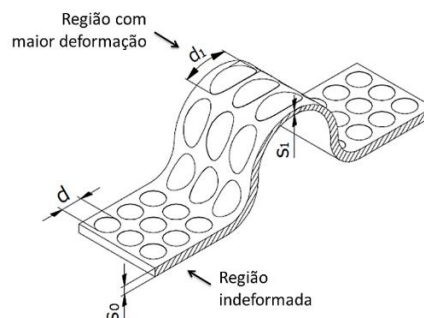


Figura 9 - Maior deformação demonstrada pelo círculo conformado em elipse [12]

A medição por visioplástico consiste em sobrepor uma escala flexível (figura 10-a), posicionando a sua faixa de medição que melhor se encaixar na elipse com a maior deformação (figura 10-b). 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.

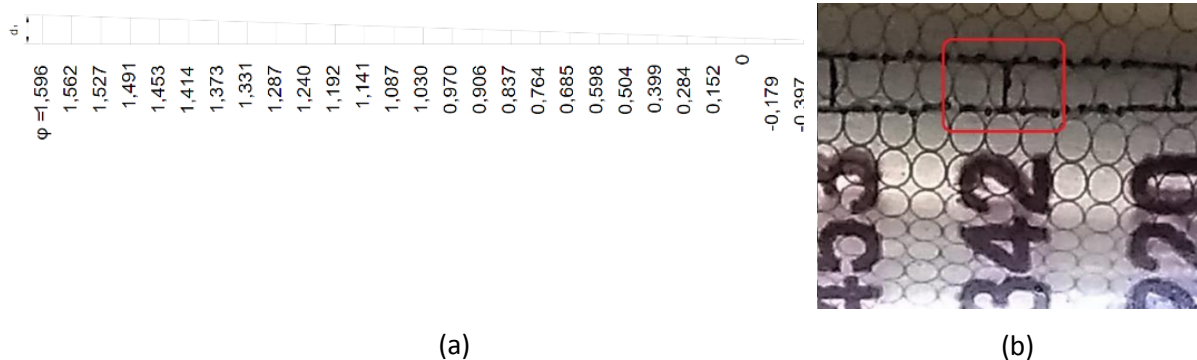


Figura 10- Escala flexível para medição por visioplástico (a), Detalhe da medição da escala sobreposta à elipse encontrada com maior deformação em d_1 (b)

Para interpretação da faixa de medição da escala, a maior deformação φ_1 (deformação verdadeira no comprimento) 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 5.

2.3 Medição Direta

Na medição direta, a menor espessura obtida na região de maior deformação (s_1) é medida com o auxílio de um micrômetro convencional milésimal, os resultados obtidos em *mm*, foram tabulados para posterior comparativo com a simulação por elementos finitos. Para possibilitar a medição direta, cada um dos corpos de prova em cada incremento aplicado, foram cortados na seção longitudinal, cruzando a menor espessura obtida nas conformações, permitindo que a medição fosse realizada na borda do corte (fig. 11).

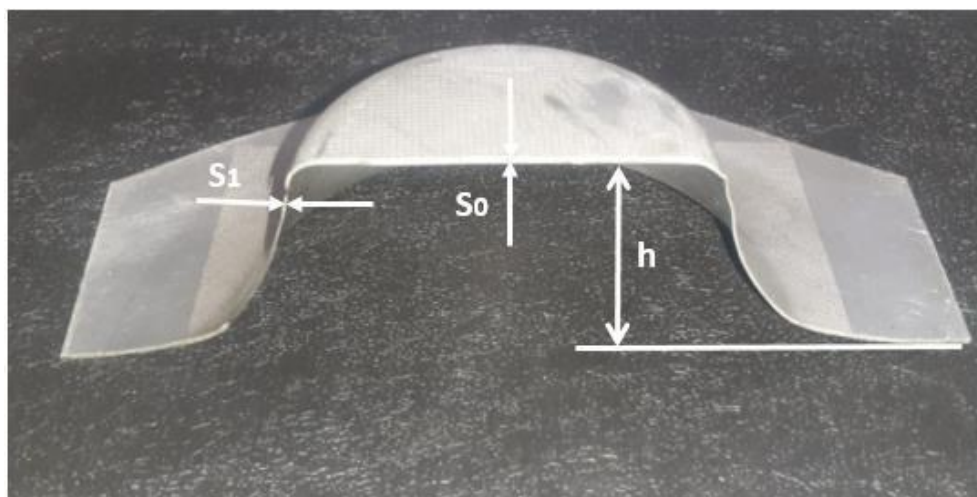


Figura 11- Corte transversal do corpo de prova para medição direta



Figura 12- Medição direta do corpo de prova

2.4 Método de elementos finitos

O último método de estimativa da espessura final da peça foi realizada por meio do Método de Elementos Finitos. A simulação foi realizada por meio do software Simufact Forming - módulo Sheet Metal Forming, com o tipo de simulação 3D elementos do tipo solid-shell. O ferramental utilizado no experimento foi modelado a fim de simular uma condição o mais próxima possível do experimento, no entanto, para reduzir o tempo de simulação o diâmetro inicial do hiperboloide utilizado na simulação foi de 65 mm, enquanto as demais dimensões se mantiveram igual às do experimento. A Figura 11 apresenta a configuração utilizada na simulação.

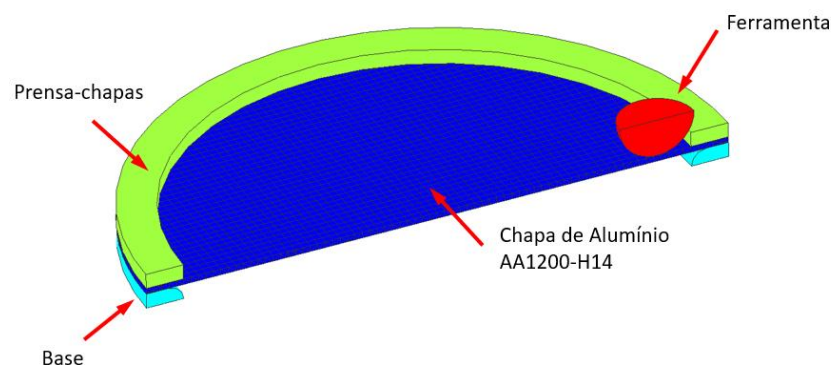


Figura 13. Configuração utilizada na Simulação

O caminho da ferramenta foi definido por tabela de movimentos (tabular motion) usando o tempo de deslocamento em função da velocidade de avanço de 500 mm/min, utilizada nos experimentos. A temperatura inicial do ferramental foi configurada como 20°C, enquanto que o coeficiente de atrito foi configurado como 0,1 (para a lei de Coulomb). O material foi configurado como alumínio AA1200-H14 com curva de escoamento $k_f = 181,45 \cdot \phi^{0,108}$ e foi considerado isotrópico. A malha do material da chapa foi configurada com comprimento de aresta de 1 mm e com três elementos sob a espessura.

3 Resultados e Discussão

Após a medição direta de espessura nos 21 pontos marcados na seção transversal da peça estampada, foi calculada a deformação em espessura corresponde a cada ponto. Na realização do experimento em máquina, os incrementos foram sendo gradativamente aplicados na chapa (Figura 6), tendo ocorrido a ruptura na altura (h) de 27 mm, no corpo de prova. A trinca ocorreu de forma caótica, acompanhando o movimento da ferramenta até a interrupção da execução do trajeto, com a ruptura tendo ocorrido nesse incremento.

A temperatura de trabalho foi desconsiderada uma vez que sua verificação medida ao fundo da formação do hiperboloide 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 20°C.

Conforme indicado na Figura 14 a região de menor espessura obtida na simulação coincide com a região de menor espessura obtida no experimento, na transição do arredondamento da ferramenta com o raio da geometria conformada. O tempo total de processamento foi de 8 horas para realização da simulação.

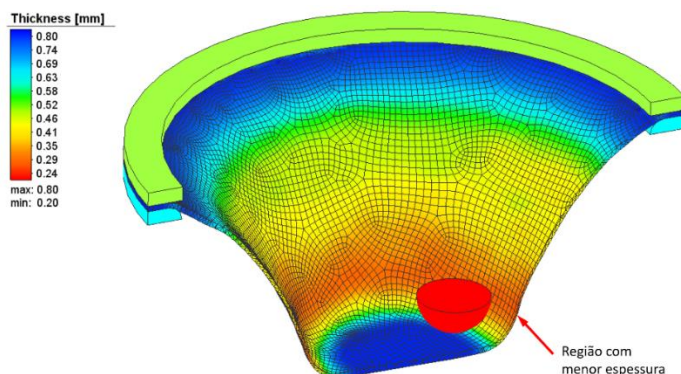


Figura 14. Comparação de espessura entre a medição direta e a simulação

A Tabela 1 relaciona as medições de espessura final em cada experimento, em função da profundidade do canal (h). Nessa tabela estão relacionadas as medições em função do método

de visioelasticidade, FEM e medição direta da chapa seccionada, bem como o erro percentual (ep) de cada método em comparação com a medição direta, determinado pela Equação 8.

Tabela 1. Espessura final e deformação obtidas para cada ponto de medição

N	h (mm)	Medição direta	FEM	ep (FEM)	Lei do Cosseno	Ep (lei do cos.)	Visiopl.	ep (visopl.)
		s (mm)	s (mm)		s (mm)		s (mm)	
01	3,00	0,688	0,670	-2,6	0,575	-16,4	0,687	-0,1
02	3,90	0,682	0,618	-9,4	0,564	-17,3	0,687	0,8
03	4,55	0,596	0,581	-2,5	0,556	-6,7	0,687	15,3
04	5,90	0,517	0,503	-2,7	0,539	4,3	0,687	32,9
05	6,30	0,486	0,494	1,6	0,534	10,0	0,602	23,9
06	7,80	0,476	0,460	-3,4	0,516	8,4	0,602	26,5
07	8,80	0,448	0,457	2,0	0,504	12,4	0,570	27,2
08	9,50	0,439	0,455	3,6	0,495	12,8	0,570	29,8
09	10,90	0,431	0,452	4,9	0,478	10,9	0,570	32,2
10	12,00	0,427	0,442	3,5	0,464	8,7	0,483	13,2
11	13,10	0,419	0,434	3,6	0,451	7,6	0,440	5,0
12	14,43	0,404	0,425	5,2	0,434	7,5	0,373	-7,8
13	15,92	0,398	0,413	3,8	0,416	4,5	0,373	-6,4
14	16,77	0,387	0,407	5,2	0,406	4,8	0,303	-21,6
15	18,23	0,382	0,388	1,6	0,388	1,5	0,286	-25,2
16	19,92	0,371	0,356	-4,0	0,367	-1,1	0,270	-27,3
17	21,24	0,347	0,335	-3,5	0,351	1,0	0,256	-26,3
18	22,78	0,307	0,304	-1,0	0,332	8,0	0,243	-20,9
19	23,88	0,287	0,275	-4,2	0,318	10,8	0,232	-19,3
20	24,45	0,266	0,255	-4,1	0,311	16,9	0,221	-17,0
21	26,15	0,238	0,235	-1,3	0,290	21,9	0,203	-14,8

Conforme indicado na Tabela 1, o erro percentual do FEM apresentou menor variação em comparação com a medição direta do que os outros, variando entre -9,4% e 5,2%. O erro percentual apresentado pelo método de cálculo baseado na lei do cosseno (Equação 7) apresentou erro entre -17,3% e 21,9%, enquanto que a visioelasticidade apresentou erro entre -27,3% e 32,9%. Apesar de menos precisos os métodos de visioelasticidade são muito rápidos de serem aplicados.

A Figura 15 apresenta a comparação entre os valores de espessura final obtidos na chapa em função da profundidade de medição para cada método utilizado. Na Figura 15 é possível verificar que o método de elementos finitos se mostrou muito próximo da medição direta, enquanto que a visioelasticidade e a lei do cosseno apresentaram desvios maiores.

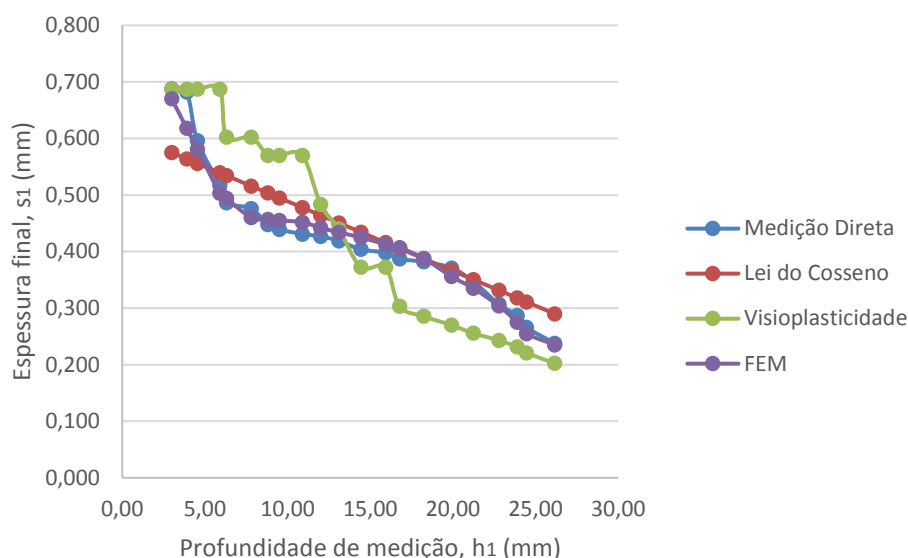


Figura 15. Espessura final x Profundidade de medição h1 pelos 3 métodos de medição

Conclusões

Neste trabalho foram comparados os métodos de determinação da espessura final da chapa estampada por FEM, visioplaticidade e por cálculo (em função da lei do cosseno) em relação à medição direta da chapa seccionada. Após a análise dos resultado, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Entre os métodos analisados, o método FEM apresentou menor erro percentual quando comparado com a medição direta, com erro percentual variando entre - 9,4% e 5,2%;
- Os demais métodos apresentaram elevados erros percentuais, variando entre - 17,3% e 21,9% para o método de cálculo baseado na lei do cosseno e entre - 27,3% e 32,9% para a visioplaticidade;
- Apesar do FEM apresentar maior precisão, este método exige longo tempo de processamento para sua realização, enquanto os outros métodos são rápidos de serem aplicados.

Referências

- [1] GARG, A.; GAO, L.; PANDA, B. N.; MISHRA, S. A comprehensive study in quantification of response characteristics of incremental sheet forming process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1353–1365 (2016) 89 (5–8).
- [2] NETO, D. M.; MARTINS, J. M. P.; OLIVEIRA, M. C.; MENEZES, L. F.; ALVES, J. L. Evaluation of strain and stress states in the single point incremental forming process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 521–534 (2016) 85 (1–4).
- [3] LI, Y.; CHEN, X.; LIU, Z.; SUN, J.; LI, F.; LI, J.; ZHAO, G. A review on the recent development of

incremental sheet-forming process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2439–2462 (2017) 92 (5–8).

- [4] LI, Y.; DANIEL, W. J. T.; MEEHAN, P. A. Deformation analysis in single-point incremental forming through finite element simulation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 255–267 (2017) 88 (1–4).
- [5] PARK, J. J.; KIM, Y. H. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique, *Journal of Materials Processing Technology*, 447–453 (2003) 140 (1-3 SPEC.), Amsterdam, 2003.
- [6] MARTINS, P. A. F.; BAY, N.; SKJOEDT, M.; SILVA, M. B. Theory of single point incremental forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 247–252 (2008) 57 (1).
- [7] RAUCH, M.; HASCOET, J. Y.; HAMANN, J. C.; PLENEL, Y. Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications, *CAD Computer Aided Design*, 877–885 (2009) 41 (12).
- [8] SCHREIBER, R. G.; BRITTO, D. DE S.; TEIXEIRA, A. R.; SOUZA, R. M. DE; SCHAEFFER, L. Comparação dos métodos de análise das deformações na Estampagem Incremental, *Anais do 40º SENAFOR*, (2021) (3).
- [9] DUFLOU, J. R.; VERBERT, J.; BELKASSEM, B.; GU, J.; SOL, H.; HENRARD, C.; HABRAKEN, A. M. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 253–256 (2008) 57 (1).
- [10] CASTELAN, J. *Utilização das tecnologias CAD/CAM para estampagem incremental do alumínio série 1000*, (2007). Porto Alegre: Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- [11] SCHREIBER, R. G.; SOUSA, A. L. DE; SCHAEFFER, L.; SANTOS, E. M. DOS; FILHO, F. F.; NORBERTO, J. C.; MONDO, L. S. S.; CABRAL, T. H. *Influência do Ângulo de Parede na Estampagem Incremental de AA1100 - H14*, 10 (2019) (3). Porto Alegre, 2019.
- [12] SCHREIBER, R. G. *Estampagem Incremental e Soldagem FSW para Fabricação de Coletor Solar*, (2018) 66. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.