COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Rafael Gustavo Schreiber; Dionatan de Souza Britto; Andrison Rodrigues Teixeira; Régis Marcelo de Souza e Lirio Schaeffer

Resumo

Este trabalho apresenta uma comparação de dois métodos para análise das deformações no processo de Estampagem Incremental. Neste estudo foi estampada uma peça com formato de hiperboloide a partir de uma chapa de latão C268 com 0,81 mm de espessura. O processo de Estampagem Incremental da peça foi realizado em um centro de usinagem CNC, utilizando uma ferramenta de raio 5 mm, com eixo livre (sem rotação), com incremento vertical de 0,5 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) e por medição direta com micrômetro. Os valores obtidos de máxima deformação na espessura foram comparados a fim de determinar o erro percentual no uso do método analítico em relação ao valor obtido na medição direta.

Palavras-chave — Estampagem Incremental, Deformação, Lei do Cosseno, Latão.

Introdução

A estampagem incremental é um processo de aplicado à fabricação de peças em pequena escala e também à prototipagem de componentes em desenvolvimento [1]–[3]. Nesse 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].

A estampagem incremental consiste na conformação progressiva de uma chapa plana de espessura s0, pelo incremento de uma ferramenta de conformação com ponta semiesférica e diâmetro df. Este processo consiste em fixar a chapa entre um prensa-chapas e uma placa de apoio. À medida que a ferramenta de conformação penetra sobre a chapa é realizada sua conformação, de modo que o formato da peça é definido pela trajetória da ferramenta, conforme indicado na Figura 1.

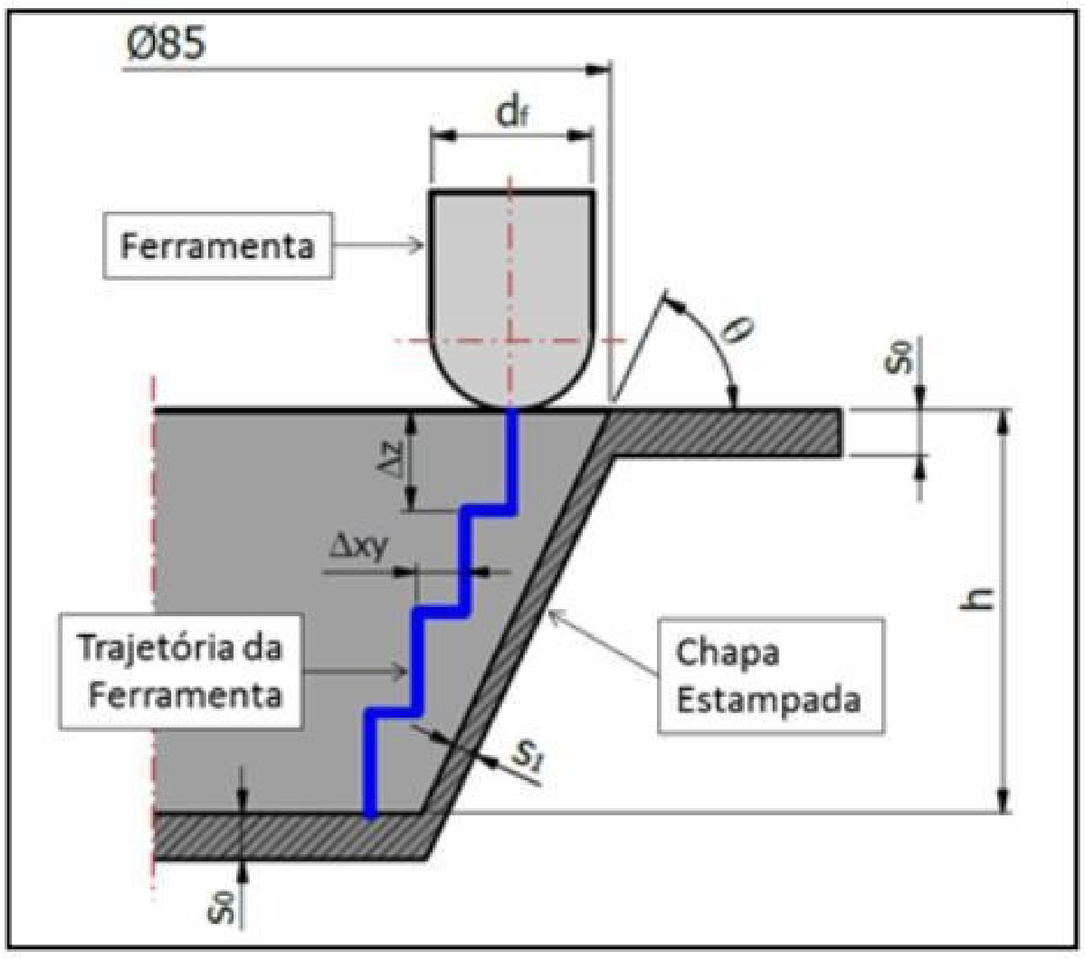

Figura 1. Representação Esquemática de Estampagem Incremental [6]

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 Δxy da ferramenta sobre a chapa é formado o ângulo de parede θ com o eixo horizontal, sendo que a espessura da chapa é diminuída até a espessura final s_1.

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 [7]. 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.

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

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

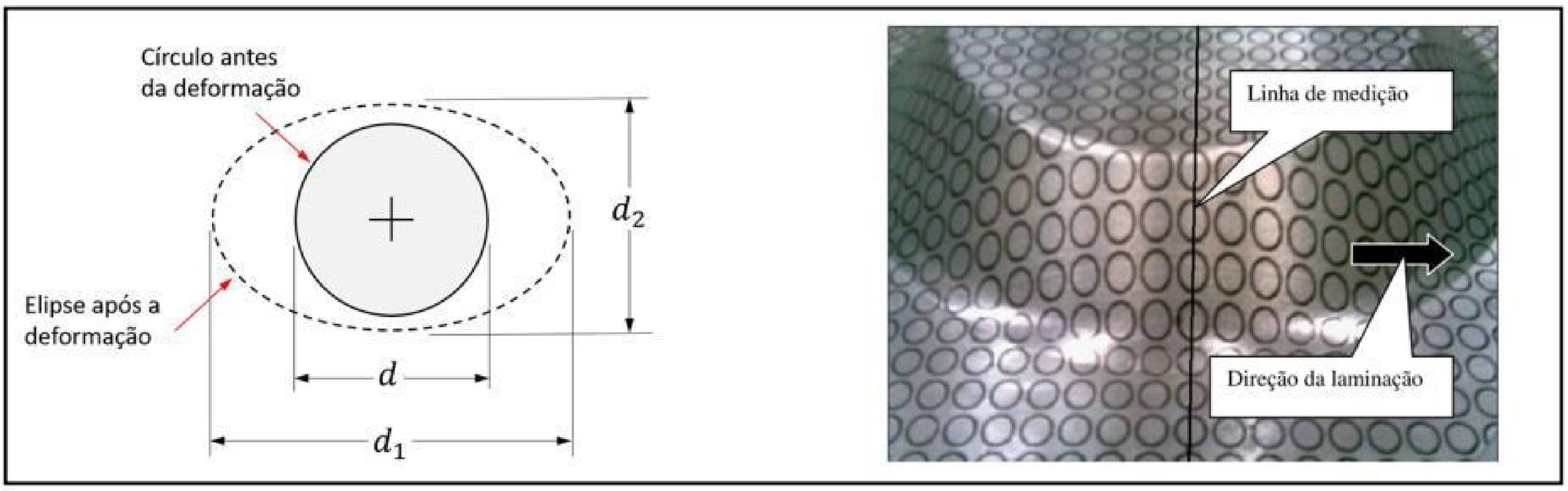

Figura 2. Dimensões do círculo e da elipse para visioplasticidade (a) e Exemplo de peça conformada para avaliação por visioplasticidade (b) [8]

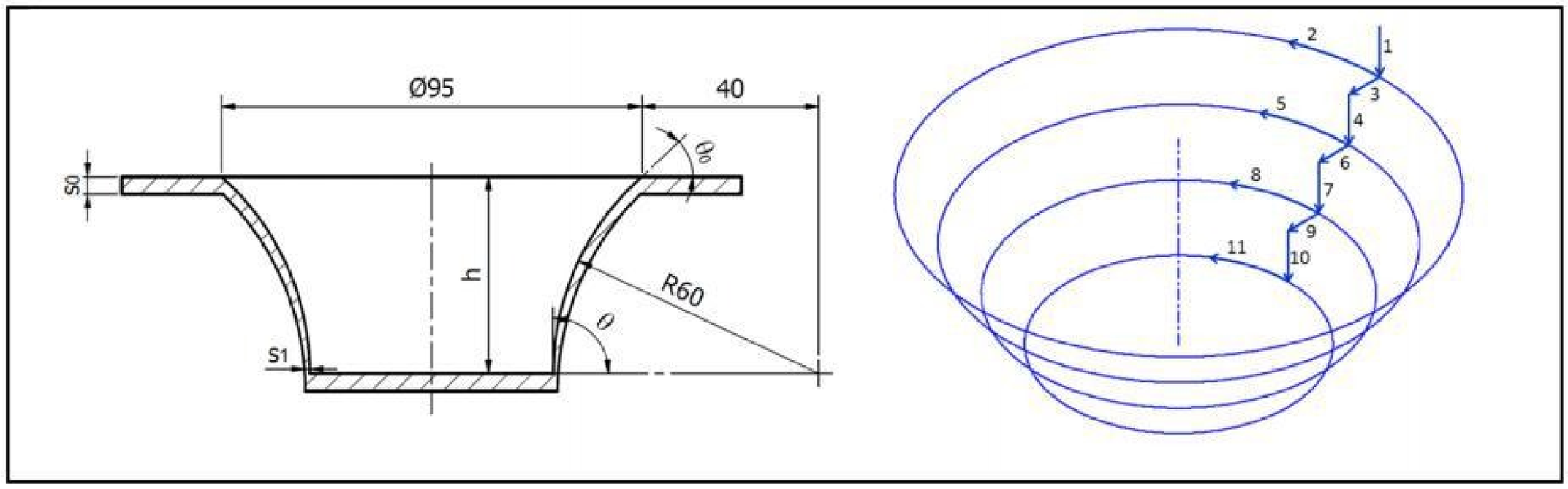

Figura 3. Dimensões do hiperboloide (a) e Trajetória da ferramenta no experimento (b) [9]

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 formado 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 visioplasticidade.

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 visioplasticidade, 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, visioplasticidade e medição direta).

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi realizada a estampagem incremental de uma chapa de latão C268 com espessura inicial 0,81 mm. O formado 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.

Este experimento de estampagem incre-

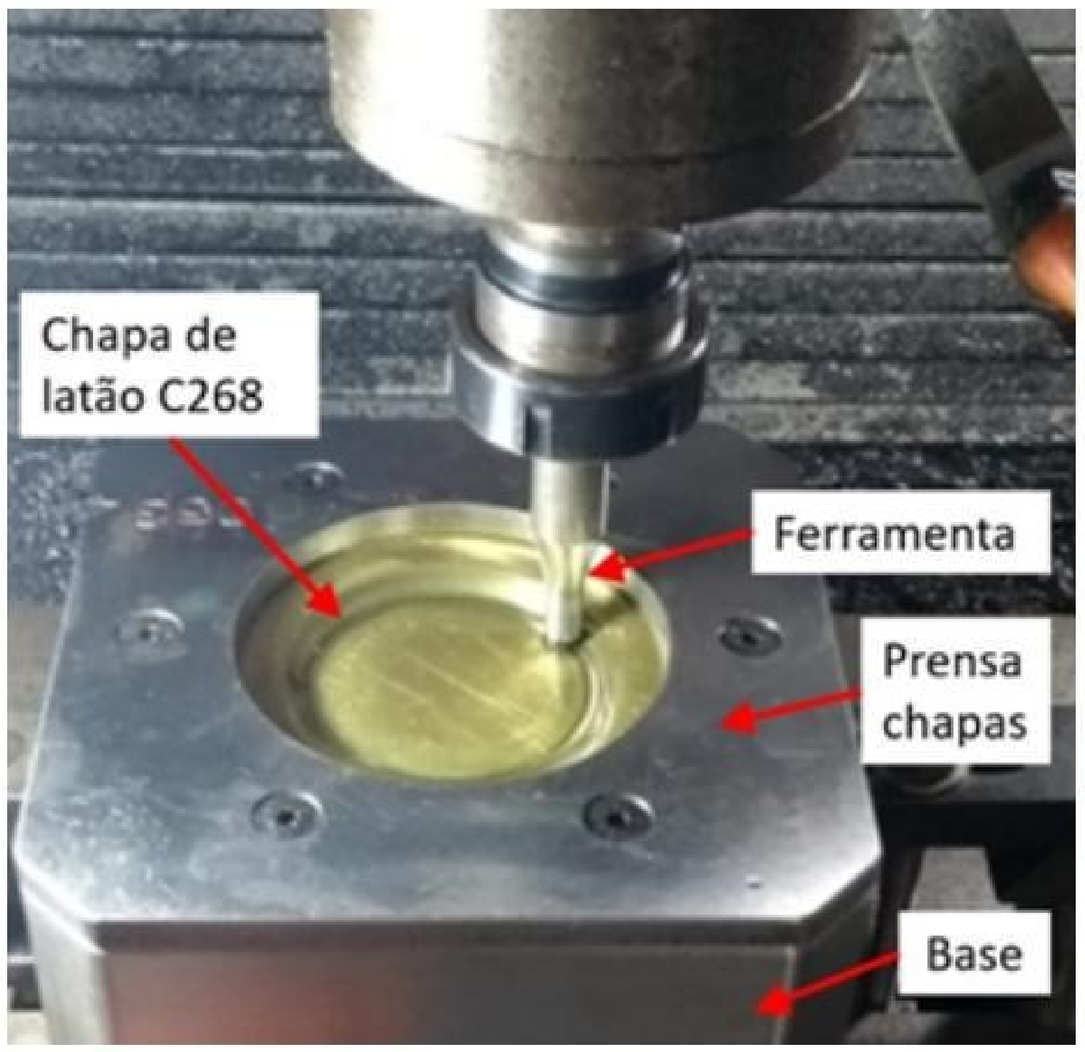

Figura 4. Realização do experimento no centro de usinagem CNC

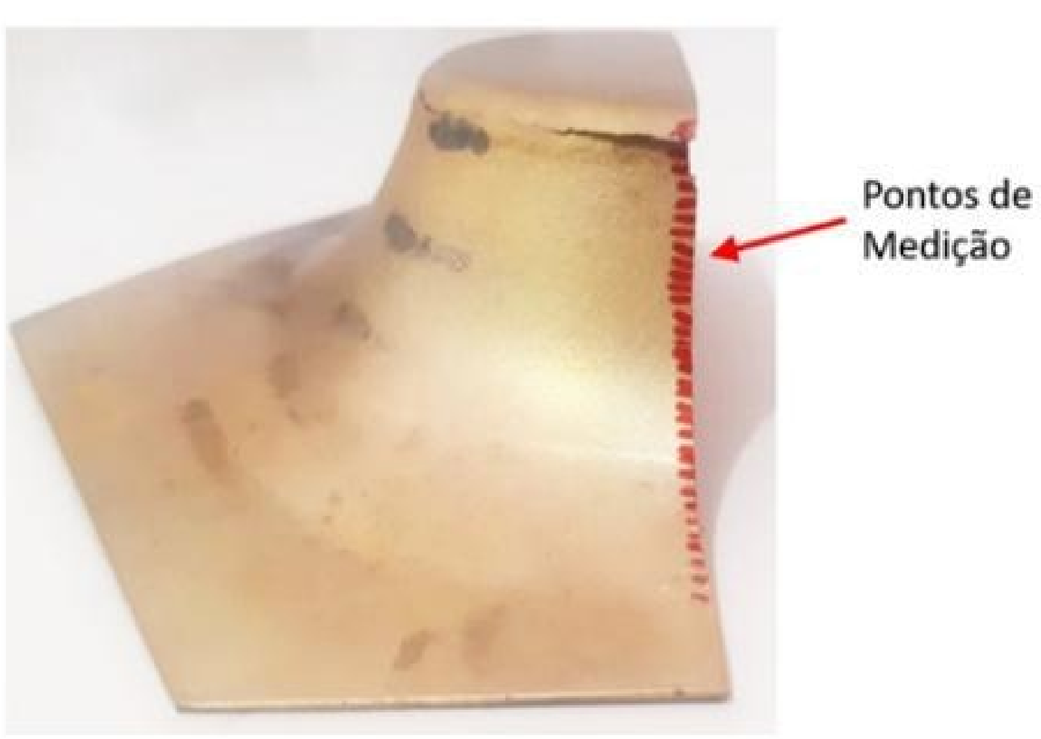

Figura 5. Pontos de medição na peça estampada

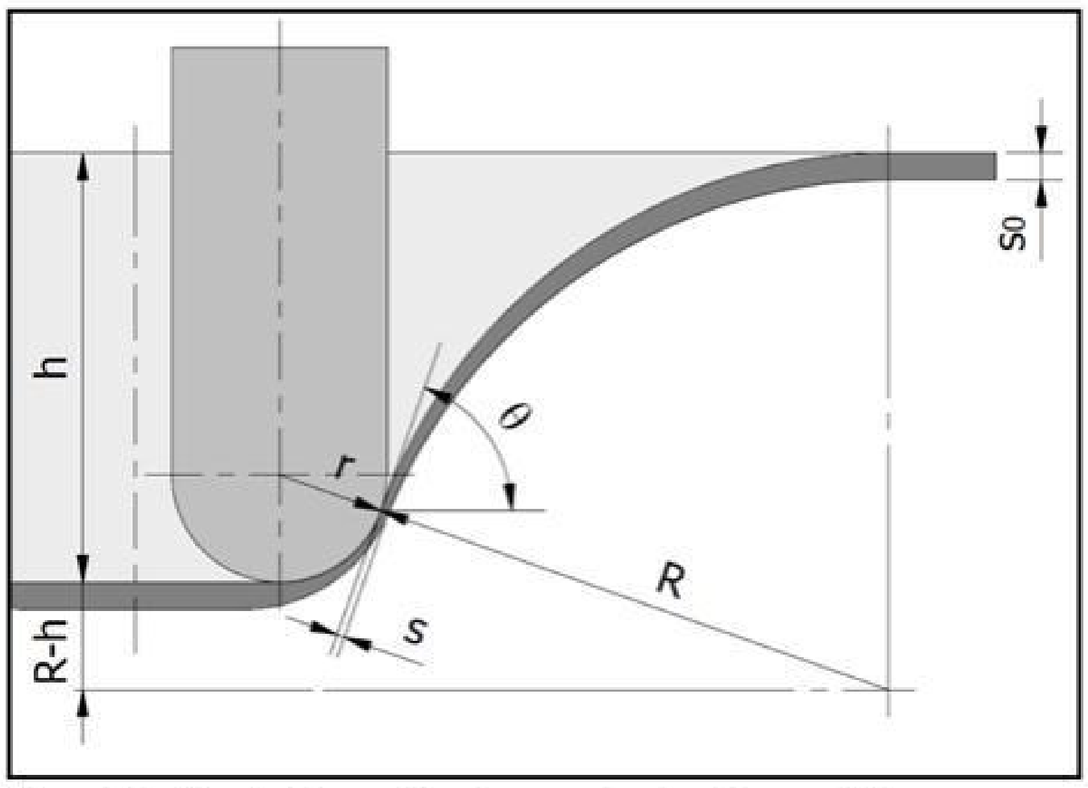

Figura 6. Realização do experimento no centro de usinagem CNC

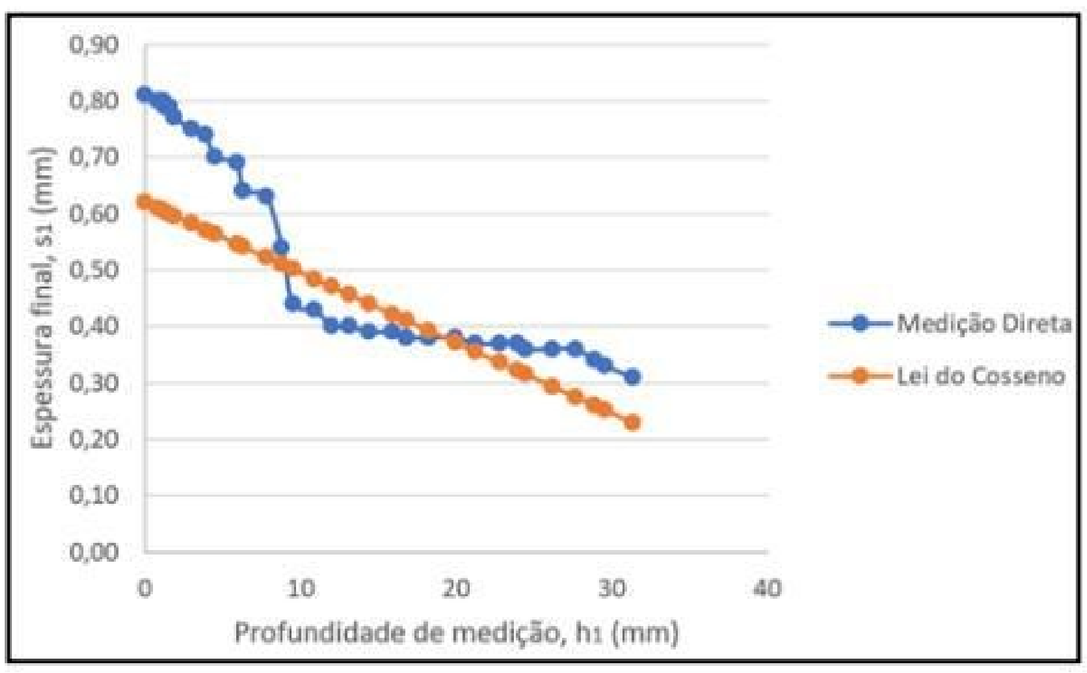

Figura 7. Comparação de espessura entre a medição direta e lei do cosseno

mental foi realizado utilizando uma ferramenta com diâmetro df = 10 mm, fabricada em aço SAE 1045 temperada e revenida. Para conformação da peça foi utilizado incremento vertical Δz = 0,5 mm, velocidade de avanço v = 500 mm/min, sem rotação da ferramenta (eixo livre) e lubrificação com óleo VG 100. O experimento foi realizado em um centro de usinagem CNC marca Romi e modelo Discovery 380, conforme indicado na Figura 4.

Após a conformação da peça foi realizado um corte transversal por eletroerosão a fio. Em seguida foram marcados 32 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.

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.

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

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 6 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).

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).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a medição direta de espessura nos 32 pontos marcados na seção transversal da peça estampada, foi calculada a deformação em espessura corresponde a cada ponto. A Tabela 1 relaciona a altura de medição de cada ponto marcado na peça com a espessura final e a deformação em espessura obtidas por medição direta com micrômetro e pelo método analítico em função da lei do cosseno.

Na Tabela 1 também é apresentado o valor de erro percentual no valor da espessura estimado pela lei do cosseno em

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

Nº	Altura de medição, h (mm)	Espessura final, s1 (mm)			Deformação na espessura, φ3 (-)	
		Medição Direta	Lei do Cosseno	Erro, ep (%)	Medição Direta	Lei do Cosseno
1	0	0,81	0,62	23,5	0,000	-0,268
2	0,85	0,80	0,61	-23,9	-0,012	-0,285
3	1	0,80	0,61	-24,1	-0,012	-0,288
4	1,2	0,80	0,60	-24,4	-0,012	-0,292
5	1,25	0,79	0,60	-23,5	-0,025	-0,293
6	1,55	0,79	0,60	-24,0	-0,025	-0,300
7	1,9	0,77	0,60	-22,6	-0,051	-0,307
8	3	0,75	0,58	-22,4	-0,077	-0,330
9	3,9	0,74	0,57	-22,8	-0,090	-0,350
10	4,5	0,70	0,56	-19,5	-0,146	-0,363
11	5,9	0,69	0,55	-20,9	-0,160	-0,394
12	6,3	0,64	0,54	-15,5	-0,236	-0,403
13	7,8	0,63	0,52	-17,1	-0,251	-0,439
14	8,8	0,54	0,51	-5,6	-0,405	-0,463
15	9,5	0,44	0,50	13,9	-0,610	-0,480
16	10,9	0,43	0,48	12,5	-0,633	-0,515
17	12	0,40	0,47	17,5	-0,706	-0,544
18	13,1	0,40	0,46	14,1	-0,706	-0,574
19	14,43	0,39	0,44	12,8	-0,731	-0,611
20	15,92	0,39	0,42	8,0	-0,731	-0,654
21	16,77	0,38	0,41	8,1	-0,757	-0,679
22	18,23	0,38	0,39	3,3	-0,757	-0,725
23	19,92	0,38	0,37	-2,3	-0,757	-0,780
24	21,24	0,37	0,35	-4,1	-0,784	-0,825
25	22,78	0,37	0,34	-9,3	-0,784	-0,881
26	23,88	0,37	0,32	-13,0	-0,784	-0,922
27	24,45	0,36	0,31	-12,5	-0,811	-0,945
28	26,15	0,36	0,29	-18,4	-0,811	-1,014
29	27,67	0,36	0,27	-23,7	-0,811	-1,081
30	28,89	0,34	0,26	-23,7	-0,868	-1,138
31	29,54	0,33	0,25	-23,8	-0,898	-1,170
32	31,35	0,31	0,23	-26,2	-0,960	-1,264

relação à medição direta em cada ponto. Este erro percentual apresentou um valor mínio de 2,3% no ponto 23 e um valor máximo de 26,2% no ponto 32.

A Figura 7 apresenta um gráfico comparativo entre os valores de espessura final obtidos para cada ponto selecionado na peça por meio de medição direta e estimado pela lei do cosseno.

Na Figura 7 é possível observar que ao método da lei do cosseno se mostrou mais impreciso nas extremidades do perfil, principalmente na parte inicial, assim como constatado nos estudos de Silva et al. [10]. No entanto na parte central a lei do seno apresentou uma estimativa mais aproximada.

No gráfico a profundidade inicial de medição apresenta grande discrepância entre o valor calculado e medido em função

de que o perfil estampado (hiperboloide) iniciou com ângulo de parede elevado (θ = 40,1º), de modo que a mudança brusca de ângulo resultou em grande diferença entre a lei do cosseno e o valor real da espessura obtida na medição da chapa.

Para a estampagem incremental de um perfil irregular Do et al. [11] também encontraram valores experimentais de espessura e deformação significativamente diferentes do estimado pela lei do cosseno. Esses desvios são menos significativos em geometrias simples como em troncos de cone, com ângulo de parede constante, como constatado por Schreiber et al. [9].

CONCLUSÕES

Neste estudo para comparação do método de determinação da deformação na estampagem incremental, foi possível concluir que:

• A previsão de espessura pela lei do cosseno se mostrou mais imprecisa nas regiões de curvatura inicial e final da peça;

• O erro percentual na estimativa de espessura pela lei do cosseno em relação à medição direta variou de 2,3 a 26,2% na peça analisada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GARG, A.; GAO, L.; PANDA, B. N.; MISHRA, S. A comprehensive study in quantification of response characteristics of incremental sheet forming process, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 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, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 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, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 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, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 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] 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.

[7] 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 Ann. - Manuf. Technol., 253–256 (2008) 57 (1).

[8] 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.

[9] 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, An. do 39o SENAFOR, (2019) (3).

[10] SILVA, M. B.; SKJOEDR, M.; ATKINS, A. G.; BAY, N.; MARTINS, P. A. F. Single-point incremental forming and formability-failure diagrams, J. Strain Anal. Eng. Des., 15–35 (2008) 43 (1).

[11] DO, V.-C.; PHAM, Q.-T.; KIM, Y.-S. Identification of forming limit curve at fracture in incremental sheet forming, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 4445–4455 (2017) 92 (9–12).

Rafael Gustavo Schreiber, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC; rafael.schreiber@ifsc.edu.br

Dionatan de Souza Britto, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI RS; dionathansb@hotmail.com

Andrison Rodrigues Teixeira, G1 Equipamentos; andrison@g1equipamentos.com.br

Régis Marcelo de Souza, Bomber Speakers; regismsouza@yahoo.com.br

Lirio Schaeffer, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS; schaefer@ufrgs.br