

DETERMINAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DO LATÃO 70/30 PELO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES

Lucas Clarindo Pereira, lucasclarindo@ifsp.edu.br¹

Gustavo Henrique de Paula Santos, gustavohenrique@ifsp.edu.br¹

Mário Luiz Nunes da Silva, marioluiznunes@ifsp.edu.br¹

Pedro Roberto Goulart, pedro.goulart@ifsp.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP Campus Itapetininga, Av. João Olímpio de Oliveira, 1561 - Vila Asem, Itapetininga - SP, CEP: 18202-000.

Resumo: A Estampagem Incremental é um processo de conformação, utilizado na fabricação de protótipos ou pequenos lotes, realizado normalmente em centros de usinagem e por ser uma técnica ainda recente possui muitos limites a serem investigados para se tornar mais presente no meio fabril. Em comparação a outros processos de conformação, a Estampagem Incremental apresenta custo reduzido e ferramental simples, em contrapartida demanda maior tempo de processo de fabricação por peça e apresenta maior desvio geométrico e dimensional. Este trabalho apresenta os resultados da estampagem incremental de ponto simples utilizando-se como material de ensaio chapas de latão 70/30 com espessura de 0,5 mm e de 1,0 mm, uma geometria com diferentes ângulos de parede e uma ferramenta com esfera rolante. O processo foi realizado em um centro de usinagem de 5 eixos a fim de se obter, para as condições ensaiadas, o ângulo limite de estampagem e a variação de espessura do perfil estampado. Para as chapas de 0,5 mm de espessura não se obteve o ângulo limite e conseqüentemente não há análise da variação de espessura. Com as chapas de 1,0 mm de espessura se obteve um ângulo limite de estampagem de 66,5° e uma variação média de espessura inferior a 8%, se comparada ao valor previsto matematicamente.

Palavras-chave: estampagem incremental, latão, centro de usinagem de 5 eixos

1. INTRODUÇÃO

A importância dos metais na tecnologia moderna se deve, em grande parte, à facilidade com que podem ser conformados em formas úteis por meio de processos de deformação plástica. A capacidade de processamento do metal, sem apresentar defeitos ou fraturas na peça trabalhada pelo processo de deformação plástica, é definida como conformabilidade plástica e está diretamente relacionada ao processo de conformação aplicado. Uma das características da conformação é a estampabilidade, expressa como a capacidade de uma chapa metálica poder ser estampada profundamente (Bresciani *et al.*, 2011).

Para atender altas demandas de produção, baixos custos e tempos mínimos de fabricação, a indústria estampa grandes lotes de produtos em prensas com o uso de matrizes. Para pequenos lotes ou desenvolvimento de protótipos, no qual o uso de uma matriz é inviável devido ao seu alto custo, foram desenvolvidos processos alternativos como a estampagem incremental (Fritzen *et al.*, 2011 e Bertol *et al.*, 2012).

Na Estampagem Incremental, a peça a ser produzida, partindo-se de uma chapa, é presa em uma base e uma ferramenta, um punção, produz pequenas deformações, que são incrementadas verticalmente a cada passe, até se obter o formato desejado. A trajetória desta ferramenta é constituída por uma sequência de linhas de contorno geradas normalmente com o auxílio de programas CAD/CAM (Sousa *et al.*, 2014 e Fritzen *et al.*, 2016).

A Figura 1 ilustra quatro etapas do processo de Estampagem Incremental, em que a etapa 1 mostra a preparação da máquina e indica as principais partes do sistema: o prensa-chapa, que é um dispositivo que prende e sustenta a chapa a ser conformada e o punção, que é uma ferramenta sólida, com dureza superior à dureza da chapa a ser conformada e é responsável por executar as trajetórias programadas a fim de conformar a chapa na forma desejada. A etapa 2 mostra o início do processo, com a entrada do punção na chapa causando uma pequena deformação. A etapa 3 mostra a trajetória do punção na chapa e a etapa 4 mostra a forma da peça acabada após o punção ter executado todas as trajetórias programadas.

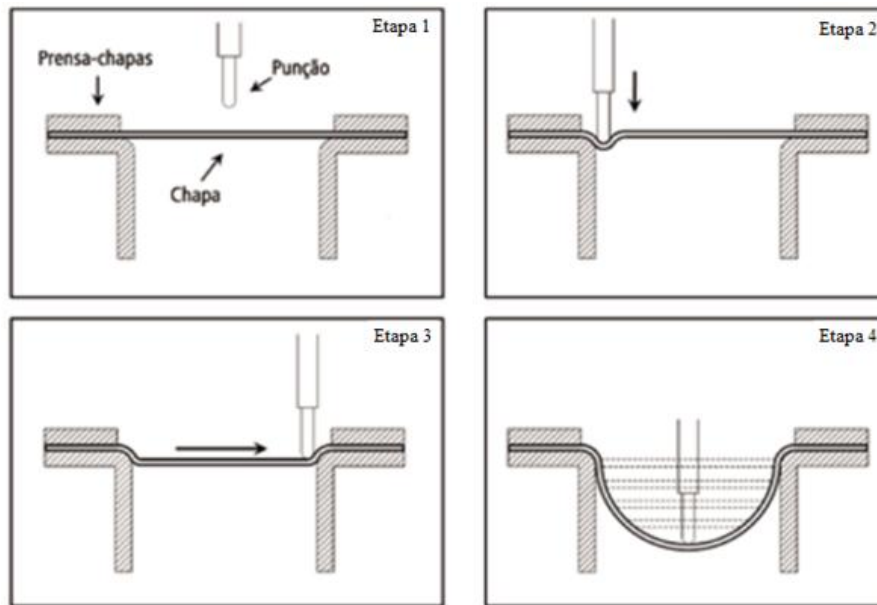


Figura 1 – Etapas do processo de Estampagem Incremental. Adaptado de Bertol *et al.* (2012).

Basicamente os processos de Estampagem Incremental são de dois tipos: de ponto simples ou de dois pontos de estampagem. No processo de ponto simples (em inglês *SPIF- Single Point Incremental Sheet Forming*) o punção é o único responsável por dar forma à chapa, já no processo de dois pontos (em inglês *TPIF- Two Points Incremental Sheet Forming*) o punção trabalha em conjunto com uma matriz que fica posicionada sob a chapa (Lu *et al.*, 2015). A Figura 2 ilustra estes dois processos.

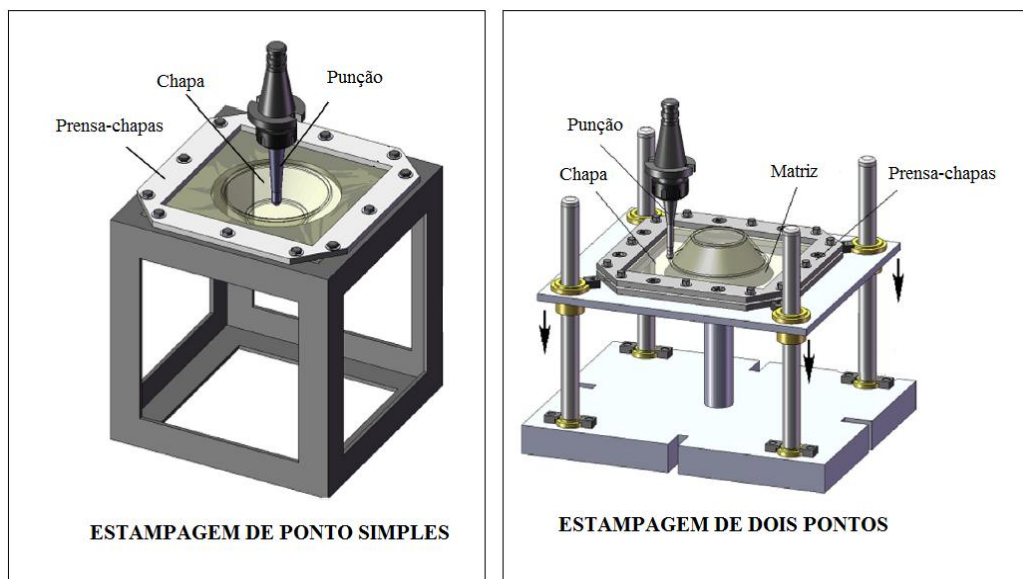


Figura 2 – Processos básicos de Estampagem Incremental. Adaptado de Silva e Martins (2014).

Muitos materiais vêm sendo investigados para o uso nos processos de estampagem incremental, tais como ligas de alumínio e de titânio, aços, latão e polímeros (Jeswiet *et al.*, 2015 e Mcanulty; Jeswiet; Doolan, 2017). Embora o processo venha sendo pesquisado há mais de 20 anos, sua aplicação é limitada devido a razões como estampabilidade insatisfatória, imprecisão geométrica e dimensional, acabamento superficial pobre e longo tempo de conformação quando comparado com a estampagem em matrizes. Para contornar estas dificuldades os diversos trabalhos realizados na área têm focado na mecânica do processo, avaliando parâmetros como: espessura da chapa; ângulos de conformação, tipo e formato da ferramenta; incremento vertical; avanço e rotação da ferramenta; entre outros (Mcanulty; Jeswiet; Doolan, 2017).

A estampabilidade é geralmente quantificada pelo ângulo máximo de parede atingido sem que haja ruptura do material e a determinação destes ângulos é foco de muitos estudos, em que muitas vezes se utilizam geometrias simples nos ensaios, como um tronco de cone (Arfa; Bahloul; Belhadjsalah, 2012 e Mcanulty; Jeswiet; Doolan, 2017).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram ensaiadas 3 chapas com dimensões de 300x300 mm, divididas em 4 setores, variando-se o ângulo de parede, a espessura das chapas e fixando-se os parâmetros tecnológicos conforme descritos a seguir. A ferramenta confeccionada para o experimento tem em sua extremidade de trabalho uma esfera rolante de diâmetro 8 mm, sendo utilizado o óleo ISO VG 68 para minimizar o atrito.

A forma geométrica ensaiada foi um tronco de cone com diâmetro de 90 mm e altura de 40 mm, sendo fixados os parâmetros dos ensaios em 50 rpm para rotação da ferramenta, avanço em 1500 mm/min, incremento vertical em 0,1 mm por passe e variação dos ângulos entre 65° e 80°. Foram usadas chapas de 0,5 mm e 1,0 mm de espessura e cada ângulo foi ensaiado apenas uma vez.

A esfera rolante da ferramenta possui uma dureza média de 499 ± 26 HV, enquanto que as chapas apresentam durezas médias de $64 \pm 1,5$ HV na espessura de 0,5 mm e 71 ± 1 HV na espessura de 1,0 mm.

Os ensaios foram realizados em um Centro de Usinagem de 5 eixos da empresa Pinnacle Machine Tool Co., Ltd., modelo AX450, com as seguintes características: eixo A com inclinação de até 220° e eixo C com rotação de até 360°. A Figura 3 mostra a máquina onde foram realizados os ensaios e a indicação dos eixos de trabalho.



Figura 3 - Centro de usinagem utilizado nos ensaios.

Para modelar as geometrias utilizou-se o programa Solid Edge da empresa Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. através dos recursos de extrusão, corte por revolução e parede fina. O percurso da ferramenta e os códigos de comando foram obtidos com o auxílio do programa Esprit da empresa DP Technology Corp. com o comando de composição em 5 eixos e um posicionamento da mesa com inclinação de 25° para evitar o contato do corpo da ferramenta com a chapa. A Figura 4 mostra a geometria utilizada nos ensaios bem como o posicionamento das regiões estampadas.

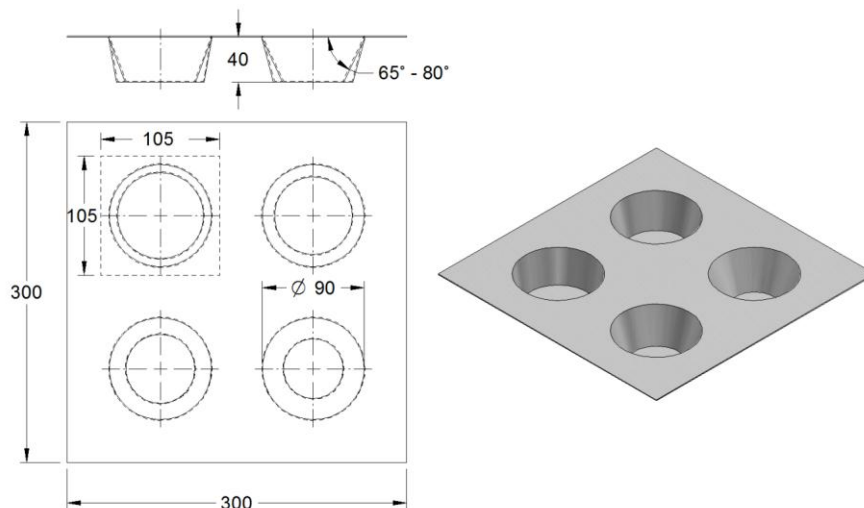


Figura 4 - Geometria criada no Solid Edge.

A base de aço utilizada, mostrada na Fig. 5, possui o formato quadrado de 300 mm e tem altura de 102 mm. Para otimizar o uso das chapas, esta base foi dividida em 4 setores, proporcionando área útil de um quadrado de lado de 105 mm em cada setor. A fixação da chapa é feita através de barras retangulares presas por parafusos tipo Allen.

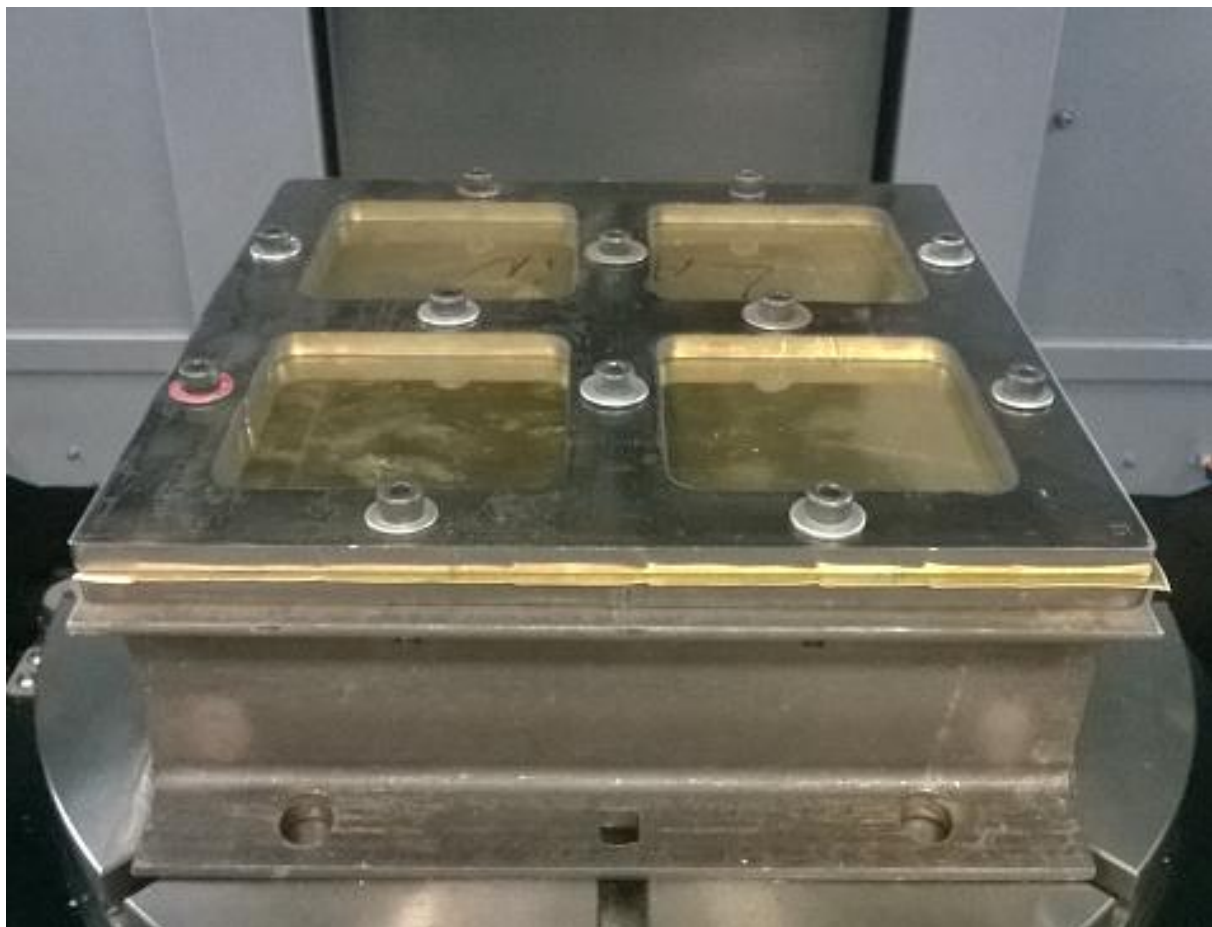


Figura 5 - Base utilizada nos ensaios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ângulos e profundidades

Na Tabela 1 são mostrados a espessura da chapa, o ângulo ensaiado, a profundidade máxima atingida e o tempo gasto em cada ensaio, para as chapas de 0,5 mm e 1,0 mm. É mostrada também a ocorrência ou não de fratura no corpo de prova.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados nos ensaios.

Ensaio	Espessura (mm)	Ângulo	Profundidade (mm)	Tempo (min)	Fratura
1	0,5	65°	10,5	23	Sim
2	0,5	70°	9,4	20,5	Sim
3	0,5	75°	9,2	20	Sim
4	0,5	80°	8,9	19,5	Sim
5	1,0	65°	40	76,5	Não
6	1,0	66°	40	76,5	Não
7	1,0	66,5°	40	76,5	Não
8	1,0	67°	15,2	32,5	Sim
9	1,0	68,5°	14,9	32	Sim
10	1,0	70°	12,9	28	Sim
11	1,0	75°	12,2	26,5	Sim
12	1,0	80°	11,6	25,5	Sim

O gráfico relacionando a profundidade atingida com o ângulo ensaiado é mostrado na Fig. 6.

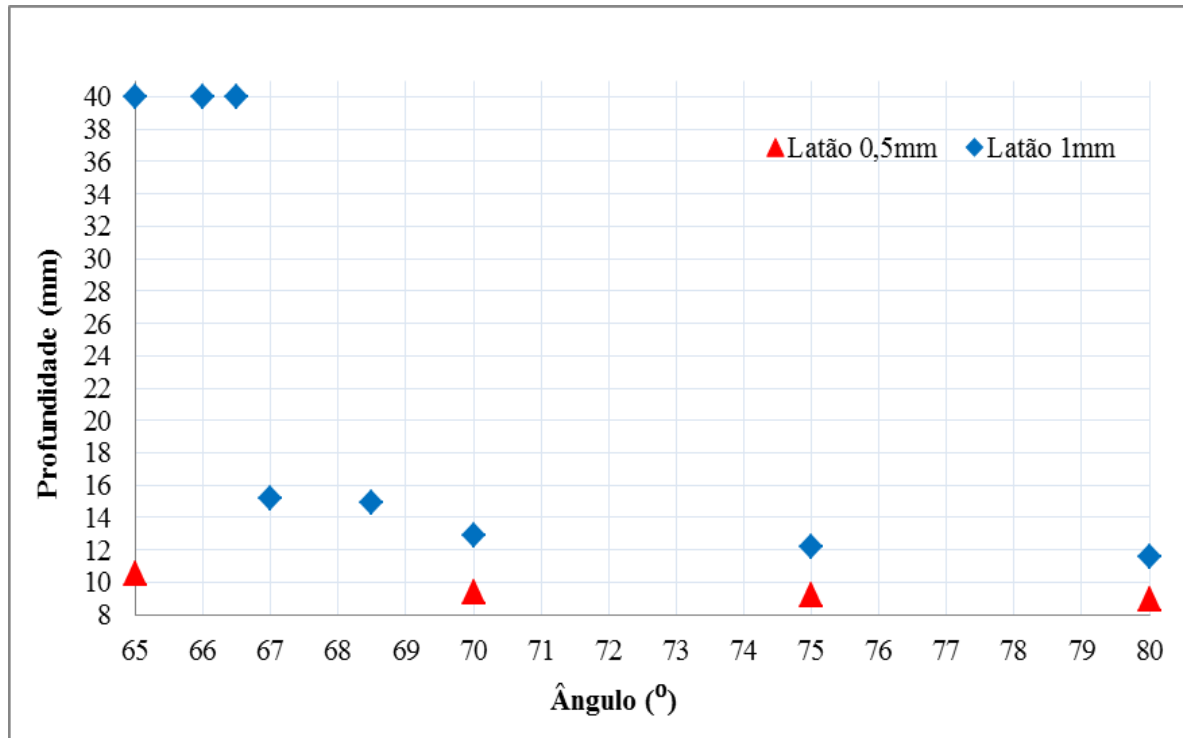


Figura 6 – Relação profundidade x ângulo.

A Figura 7 mostra a parte superior e inferior dos 4 setores de uma chapa de 1,0 mm espessura após a estampagem.

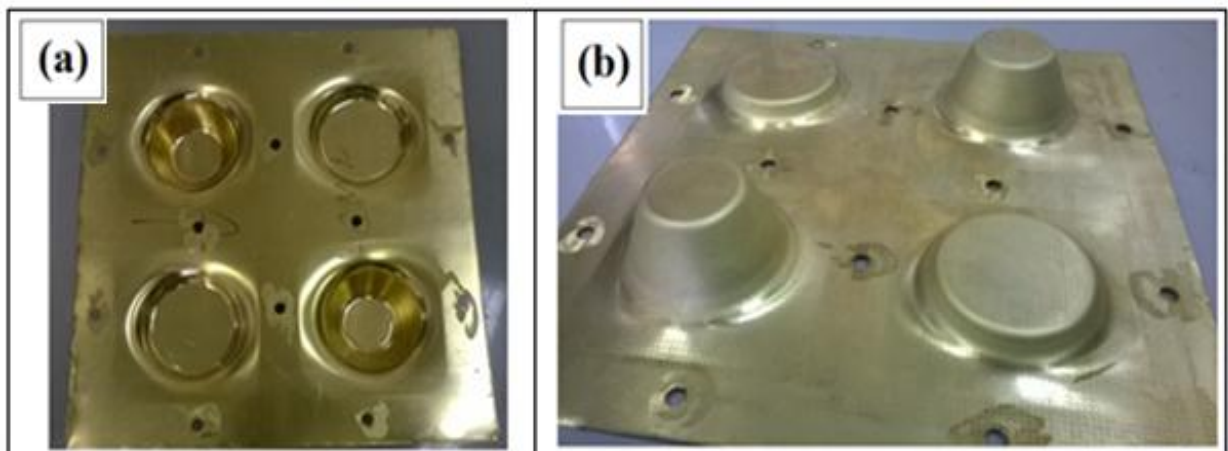


Figura 7 – Chapa estampada. (a) Parte superior; (b) Parte inferior.

As fraturas ocorreram sempre na região imediatamente acima do ponto de contato da ferramenta, sendo que o material produziu um leve estalo ao se romper.

Todas as chapas de 0,5 mm de espessura se romperam antes do término dos ensaios sendo que a maior profundidade de estampagem obtida foi de 10,5 mm com ângulo de 65°. A menor profundidade de estampagem obtida foi de 8,9 mm com ângulo de 80°.

As chapas com 1,0 mm de espessura apresentaram maior rigidez em comparação com as chapas de 0,5 mm, pois nos primeiros passes a parte que não estava em contato com a ferramenta não se deformou. Foram obtidas maiores profundidades de estampagem em todos os ângulos ensaiados em comparação com as chapas de espessura 0,5 mm. A maior profundidade de estampagem obtida sem ruptura para estas chapas foi de 40 mm com ângulo limite de 66,5° sendo que nos ensaios realizados constatou-se uma queda brusca da profundidade máxima de estampagem entre os ângulos 66,5° e 67°. Os ensaios realizados com ângulos maiores que 67° indicam diminuição da profundidade máxima obtida em função do aumento do ângulo de parede.

3.2. Espessuras

As chapas de 1,0 mm que não sofreram fratura, atingindo a profundidade de 40 mm, foram cortadas para medição da espessura ao longo do perfil. Foram realizadas 9 medições, distanciadas entre si em aproximadamente 4 mm, utilizando um micrômetro analógico de ponta arredondada de precisão igual a 0,01 mm. As posições usadas para medição de espessura e o perfil de uma chapa cortada são mostrados na Fig. 8.

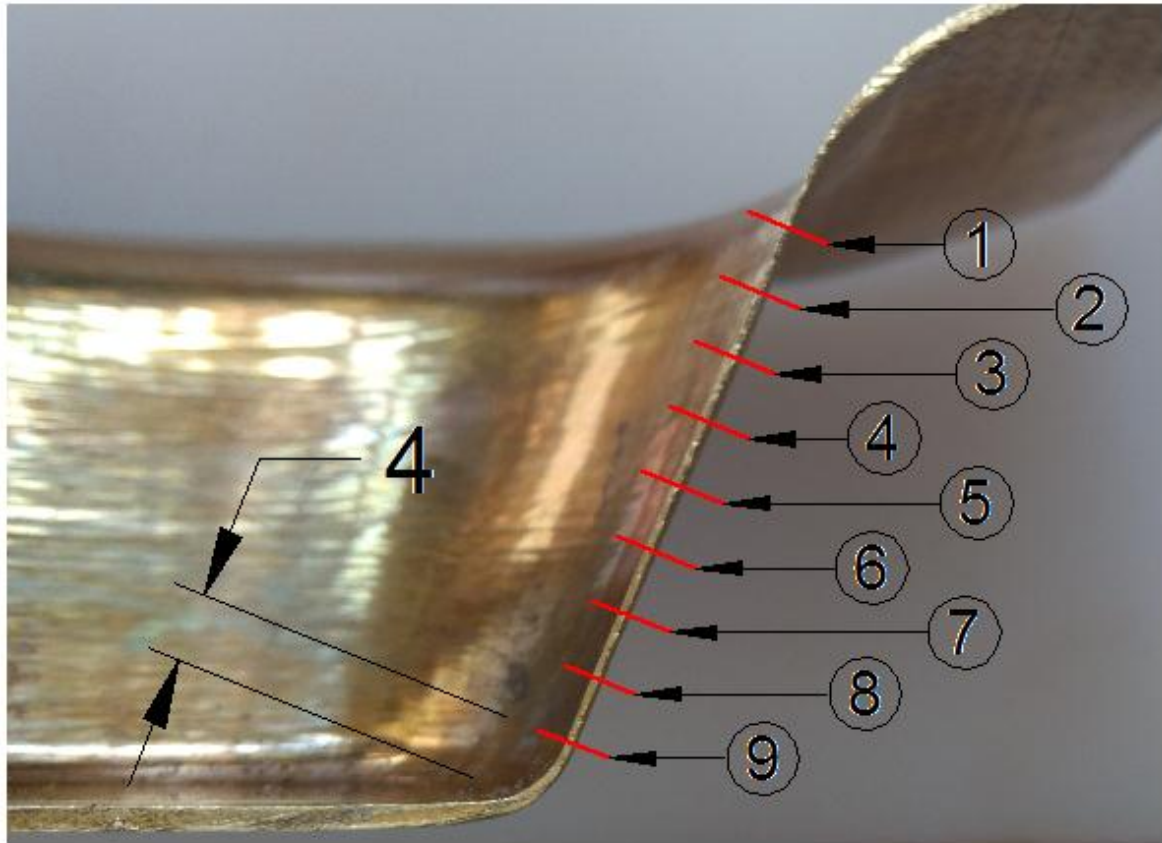


Figura 8 – Perfil de uma chapa cortada e posições para medição das espessuras.

A lei do cosseno relaciona a espessura inicial (t_i) com o ângulo de parede (ϕ), permitindo prever a espessura final (t_f) da chapa após a estampagem por meio da relação mostrada na Eq. (1). Nota-se que quanto maior for o ângulo menor será a espessura e que um ângulo de 90° resultará, teoricamente, numa espessura igual a zero, inviabilizando o processo (Jeswiet *et al.*, 2015, Arfa; Bahloul; Belhadjsalah, 2012).

$$t_f = t_i \cdot \cos \phi \quad (1)$$

Os valores medidos de espessura e os valores previstos pela lei do cosseno são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Espessuras das chapas após estampagem.

65°	tf prevista = 0,423 mm	66°	tf prevista = 0,407 mm	66,5°	tf prevista = 0,399 mm
Posição	tf medida (mm)	Posição	tf medida (mm)	Posição	tf medida (mm)
1	0,41	1	0,46	1	0,40
2	0,44	2	0,37	2	0,29
3	0,50	3	0,36	3	0,40
4	0,49	4	0,40	4	0,39
5	0,46	5	0,43	5	0,41
6	0,47	6	0,40	6	0,37
7	0,44	7	0,39	7	0,39
8	0,43	8	0,36	8	0,42
9	0,42	9	0,39	9	0,43

Os gráficos relacionando as espessuras medidas com o valor previsto pela lei do cosseno são mostrados na Fig. 9.

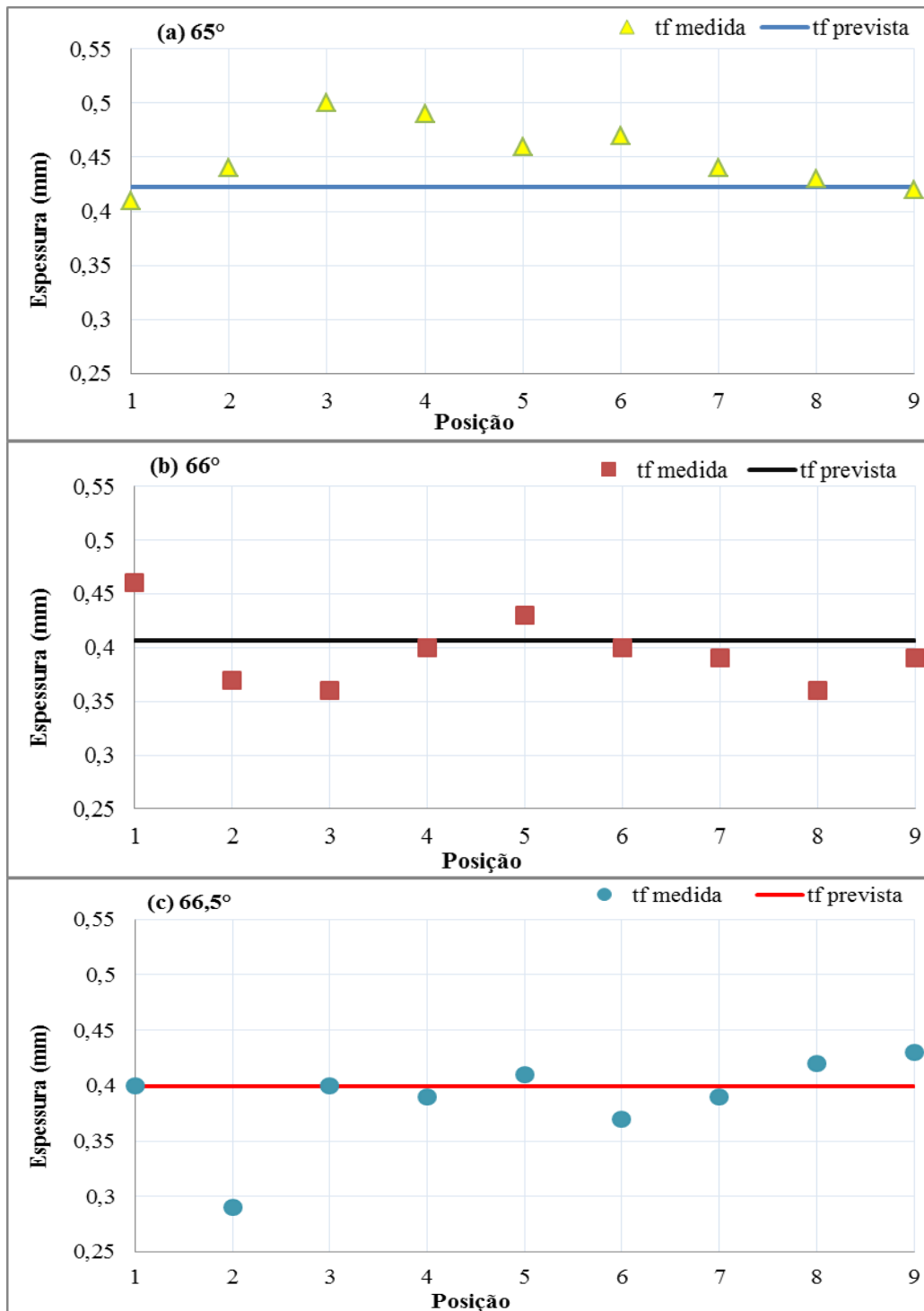


Figura 9 – Espessura medida x prevista. (a) 65°; (b) 66°; (c) 66,5°.

Os perfis não apresentaram espessura constante ao longo do perfil, como previsto pela lei do cosseno. A variação do valor medido em relação ao previsto não possui regularidade entre as diferentes posições de medição, alguns valores se apresentam acima e outros abaixo da espessura prevista.

Para o ângulo de 65° a maior variação identificada foi de 0,077 mm na posição 3 e a menor variação de 0,003 mm na posição 9. Com o ângulo de 66° a maior variação foi de 0,053 mm na posição 1 e a menor de 0,007 mm nas posições 4 e 6. Para o ângulo de 66,5° a maior variação foi de 0,109 mm na posição 2 e a menor variação identificada foi de 0,001 mm nas posições 1 e 3, sendo este ângulo o que apresentou a maior e a menor variação de espessura em relação ao valor previsto pela lei do cosseno.

A média da variação da espessura medida em relação à espessura prevista nas 9 posições mostrou uma diferença de aproximadamente 7,54% para o ângulo de 65°, 6,93% para o de 66° e de 6,17% para o ângulo de 66,5°.

4. CONCLUSÕES

A estampagem incremental de ponto simples é um processo capaz de produzir geometrias com ângulos diferentes e com relativa facilidade de reconfiguração, pois não há necessidade de troca de ferramental. Diversos ângulos foram ensaiados, em duas espessuras diferentes, confirmando a flexibilidade do processo.

Para a geometria e parâmetros utilizados foi possível identificar o ângulo limite de estampagem de 66,5° para a espessura de 1,0 mm. Não se encontrou o ângulo limite para as chapas de 0,5 mm devido à fratura prematura do material, mas ficou evidente que menores espessuras estão limitadas a menores ângulos.

Nota-se que para as chapas de 1,0 mm de espessura variações mínimas no ângulo, acarretam variações significativas na profundidade de estampagem máxima atingida.

As chapas em que não ocorreu fratura tiveram suas espessuras comparadas com o valor previsto matematicamente e apesar da espessura da peça estampada não ser constante a variação média ficou abaixo de 8%.

Os resultados obtidos nos experimentos são subsídios importantes quanto aos limites de estampabilidade da liga estudada, para as condições ensaiadas, podendo servir de norte para trabalhos futuros.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos professores do IFSP – Campus Itapetininga pelo auxílio no uso de equipamentos, à empresa Termomecânica São Paulo S A. pela cessão dos materiais para a execução dos ensaios e à Unicamp na figura do Prof. Dr. Sérgio Tonini Button pelo apoio incondicional no empréstimo de equipamentos e discussões técnicas.

6. REFERÊNCIAS

- Arfa, H.; Bahloul, R.; Belhadjsalah, H., 2012, “Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts”, *International Journal of Material Forming*, [s.l.], v. 6, n. 4, p.483-510, Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-012-1101-z>.
- Bertol, L. S. *et al.*, 2012, “Avaliação dos ângulos-limite na estampagem incremental de alumínio e titânio”, *Corte & Conformação*, Porto Alegre, p.42-51.
- Bresciani F. E. *et al.*, 2011, “Conformação Plástica dos Metais”, 6. ed. São Paulo: EPUSP.
- Fritzen, D. *et al.*, 2011, “Estudo do processo estampagem incremental em chapa de latão 70/30”, 31º SENAFOR, Porto Alegre.
- Fritzen, D. *et al.*, 2016, “SPIF of brass alloys: Preliminary studies”, *AIP Conference Proceedings*. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4963442>.
- Jeswiet, J. *et al.*, 2015, “Single point and asymmetric incremental forming”, *Advances in Manufacturing*, [s.l.], v. 3, n. 4, p.253-262. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-015-0126-1>.
- Lu, B. *et al.*, 2015, “Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, [s.l.], v. 93, p.37-48. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.03.007>.
- Mcanulty, T.; Jeswiet, J.; Doolan, M., 2017, “Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 16, Pages 43-54, ISSN 1755-5817. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.07.003>.
- Silva, M.B.; Martins, P.A.F., 2014, “Incremental Sheet Forming”, *Comprehensive Materials Processing*, [s.l.], p.7-26. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-096532-1.00301-0>.
- Sousa, R.J.A. *et al.*, 2014, “SPIF-A: on the development of a new concept of incremental forming machine”, *Structural Engineering and Mechanics*, [s.l.], v. 49, n. 5, p.645-660. Techno-Press. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2014.49.5.645>.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

DETERMINATION OF THE FORMABILITY OF Cu-30Zn BRASS ALLOY IN SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING PROCESS

Lucas Clarindo Pereira, lucasclarindo@ifsp.edu.br¹

Gustavo Henrique de Paula Santos, gustavohenrique@ifsp.edu.br¹

Mário Luiz Nunes da Silva, marioluiznunes@ifsp.edu.br¹

Pedro Roberto Goulart, pedro.goulart@ifsp.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP Campus Itapetininga

Abstract. Incremental Sheet Forming is a metal forming process used to produce prototypes and small batches of parts, usually performed in CNC machining centers and due to the fact of it's a recent technique there are still many limits to be investigated in order to this process become more present in the industry. Incremental Sheet Forming process has lower cost than traditional stamping processes and it uses tools that are easy to produce, however it needs longer production times and it presents greater geometric and dimensional deviation than the parts produced by traditional processes. This work shows the results obtained with single point incremental forming of Cu-30Zn brass alloy sheets with a thickness of 0.5 and 1.0 mm. A rolling ball tool was used and tests were performed with different wall angles. For the parts made with sheets with a thickness of 1.0 mm, the maximum formability angle obtained was 66.5 degrees and it was verified a variation of thickness less than 8% when compared to the prediction of a mathematical model. For the sheets with a thickness of 0.5 mm, the formability angle was not obtained.

Keywords: incremental sheet forming, brass, 5 axis CNC machining center