

INFLUÊNCIA DAS VELOCIDADES DE AVANÇO E ROTAÇÃO NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE ALUMÍNIO

POR ANDRISON R. TEIXEIRA | RAFAEL G. SCHREIBER | LIRIO SCHAEFFER



A estampagem incremental (*Incremental Sheet Forming*) é um processo de fabricação aplicado a conformação de chapas metálicas que pode ser realizado tanto em máquinas dedicadas à estampagem incremental, como em fresadoras, centro de usinagem CNC, ou ainda através de um braço robótico [2]. O processo possui duas variações principais, a Estampagem Incremental de Ponto Único: onde uma chapa fixada por um prensa chapas sofre deformação pelo movimento de uma ferramenta de ponta semiesférica em movimento de rotação e realizando incrementos progressivos contra a chapa metálica nos eixos X, Y e Z, conferindo a ela a forma desejada; e a Estampagem Incremental de Dois Pontos: onde

uma matriz é posicionada abaixo da chapa metálica, o que confere ao produto estampado maior precisão, permitindo que a chapa assumira a forma desejada quando um perfil mais complexo é exigido [3], conforme indicado na Figura 1.

A estampagem incremental de dois pontos pode ser realizada com matriz parcial positiva ou negativa, ou ainda com matriz completa positiva ou negativa, dependendo do formato que se deseja conformar [5]. A utilização de uma matriz parcial não é um caso que exija muito tempo ou recursos, já que

matriz pode ser fabricada na própria máquina CNC, onde se realizará a estampagem [3]. Assim sendo não há necessidade da matriz ser fabricada em aço ferramenta, podendo-se destinar a este propósito materiais mais acessíveis como aço comum ou poliuretano rígido de alta densidade [5].

Diversos estudos relacionam os parâmetros de destaque com influência no processo de estampagem incremental, como a temperatura do processo [6], a lubrificação utilizada [7], a espessura da chapa e o ângulo de parede formado na estampagem [8], bem como o diâmetro [9], o incremento vertical (Δz) [10], o avanço (F) [11,12] e a rotação (N)

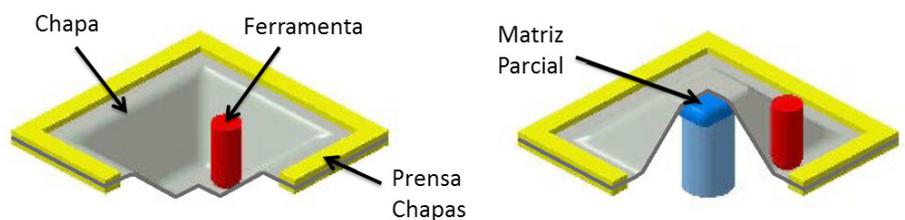


Figura 1 – (a) Estampagem Incremental de Ponto Único, (b) Estampagem Incremental de Dois Pontos [4]

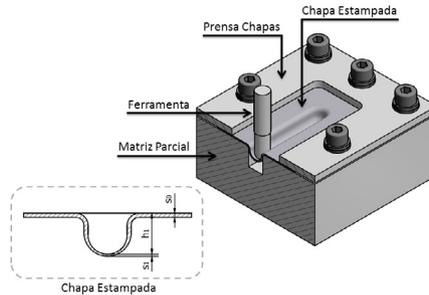


Figura 2 – Dispositivo para realização dos experimentos de estampagem incremental.

ficava sem lubrificação. A escolha da graxa foi orientada por Azevedo et al. [7] que na estampagem incremental de alumínio obteve resultados de rugosidade das chapas com o uso de uma graxa similar (graxa AL-M). A Figura 4 apresenta o processo de estampagem incremental sendo realizado no centro de usinagem CNC e a superfície da chapa devidamente lubrificada.

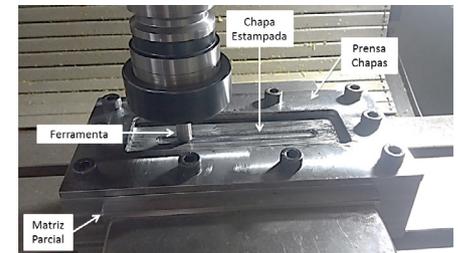


Figura 4 – Realização dos experimentos no Centro de Usinagem CNC

[13] da ferramenta. Este artigo apresenta uma análise detalhada da influência das velocidades de avanço e rotação da ferramenta na deformação máxima obtida pela chapa metálica estampada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar os experimentos de estampagem incremental foi utilizado um centro de usinagem CNC da marca Romi modelo Discovery 308, com curso longitudinal de 450 mm, curso transversal de 310 mm e curso vertical de 410 mm.

Foi fixado à mesa do centro de usinagem um dispositivo constituído por uma matriz parcial, sobre a qual foi fixada cada chapa de Alumínio AA1200, com dimensões 1 x 60 x 160 mm, através de um prensa chapas. A conformação da chapa foi realizada pela ferramenta de estampagem incremental com ponta semiesférica com diâmetro 9,5 mm. Após a estampagem das chapas em cada experimento, estas apresentaram uma redução significativa da espessura inicial (s_0) para a espessura final (s_1), sendo que cada experimento foi interrompido logo após a apresentação da trinca na chapa, registrando-se a profundidade (h_1) em que ela ocorreu, conforme indicado na Figura 2.

O dispositivo de estampagem foi fabricado em aço SAE1020, inclusive a

matriz parcial, devido às baixas tensões atuantes no processo. No entanto, a ferramenta foi fabricada em aço rápido, a fim de garantir sua funcionalidade no processo. Para realização de cada experimento foi determinado o percurso da ferramenta de estampagem por programação CNC, com incremento vertical de 0,5 mm sobre a chapa (no eixo Z). Após cada incremento vertical ocorre um deslocamento da ferramenta em 100 mm (no eixo X) e outro incremento vertical, até que ocorra o surgimento de trinca na chapa, então o experimento é interrompido. A Figura 3 apresenta o percurso da ferramenta em cada experimento de estampagem incremental.

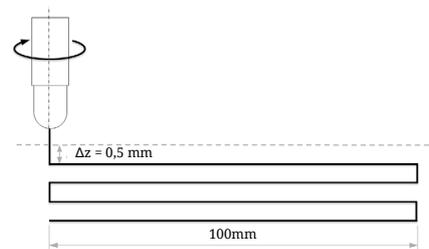


Figura 3 – Percurso da ferramenta nos experimentos

A lubrificação nos experimentos foi realizada por meio da graxa UNILIT MP BSM, graxa preta com bissulfeto de molibdênio. Sua aplicação foi feita por meio de pincel, sendo que a cada incremento da ferramenta essa graxa foi sendo reaplicada manualmente à medida que a interface chapa-ferramenta

No total foram realizados 12 experimentos combinando-se 4 parâmetros de rotação N (com eixo livre, 200 rpm, 400 rpm e 800 rpm) e 3 parâmetros de avanço F (200 mm/min, 400 mm/min e 800 mm/min) mantendo-se o incremento vertical Δz de 0,5 mm. Em cada chapa de alumínio foram gravados círculos com 2,5 mm de diâmetro por um processo eletroquímico. Após o surgimento da trinca em cada experimento ocorreu sua interrupção, sendo a medição das deformações máximas realizada nas formas elípticas (geradas pela deformação da chapa) logo ao lado da região onde a trinca ocorreu, conforme indicado na Figura 5.

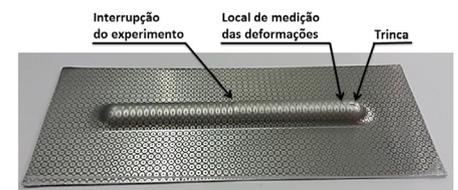


Figura 5 – Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200, com $\Delta z = 0,5$ mm

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da análise dos 12 experimentos realizados variando os parâmetros de avanço e rotação e mantendo o incremento vertical constante em 0,5 mm, foi construída a Tabela 1. Nela também foram adicionados os resultados de cada experimento, como a profundidade em que ocorreu a trinca h_1 , a espessura final da chapa s_1 , a deformação no comprimento φ_1 , a deformação na largura φ_2 , e a deformação na espessura φ_3 .

Conhecendo a deformação na espessura φ_3 e o valor da espessura inicial ($s_0 = 1 \text{ mm}$), a partir da Equação 2, foi possível calcular a espessura final s_1 , conforme indicado na Equação 3.

$$\varphi_3 = \ln s_1/s_0 \quad \text{Equação 2}$$

$$s_1 = e^{\varphi_3} \cdot s_0 \quad \text{Equação 3}$$

Nº	N (rpm)	F(mm/min)	h_1 (mm)	s_1 (mm)	φ_1 (-)	φ_2 (-)	φ_3 (-)
1	livre	200	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
1	livre	400	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
3	livre	800	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
4	200	200	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
5	200	400	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
6	200	800	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
7	400	200	7,0	0,41	0,88	0	-0,88
8	400	400	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
9	400	800	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
10	800	200	8,0	0,38	0,96	0	-0,96
11	800	400	6,5	0,50	0,69	0	-0,69
12	800	800	6,5	0,50	0,69	0	-0,69

Tabela 1 – Resultados dos Ensaios de Estampagem Incremental de AA1200, com $\Delta z = 0,5 \text{ mm}$

Nos 12 experimentos a deformação φ_1 variou de 0,69 a 0,88 com a deformação φ_2 se mantendo em 0, o que caracteriza a deformação plana, medidas ao lado da trinca. A deformação na espessura φ_3 foi determinada pela lei da constância de volume, que determina que a variação das deformações é nula, conforme indicado na Equação 1.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- φ_1 = Deformação no comprimento [adimensional];
- φ_2 = Deformação na largura [adimensional];
- φ_3 = Deformação na espessura [adimensional].

Onde:

- s_1 = Espessura final da chapa [mm];
- s_0 = Espessura inicial da chapa [mm].

A profundidade em que ocorreu a trinca h_1 , foi determinada de acordo com a profundidade registrada no painel do centro de usinagem CNC no instante em que cada experimento foi interrompido, variando de 6,5 mm a 8 mm.

Na Figura 6 é apresentada a relação entre rotação (N) e deformação máxima obtida (φ_1) para cada avanço (F) utilizado nos experimentos.

A Figura 6 indica que quanto menor for a velocidade de avanço, maior será a estampabilidade no processo de estampagem incremental, assim como também concluído por Arruda [14]. Já que com avanço $F = 200 \text{ mm/min}$ foi possível obter os maiores valores de deformação, enquanto que com avanço de $F = 800 \text{ mm/min}$, foram obtidas as menores deformações e com $F = 400 \text{ mm/min}$ deformações intermediárias dependendo da rotação utilizada.

Também se percebe que com baixo valor de avanço (200 mm/min) há aumento na deformação máxima com

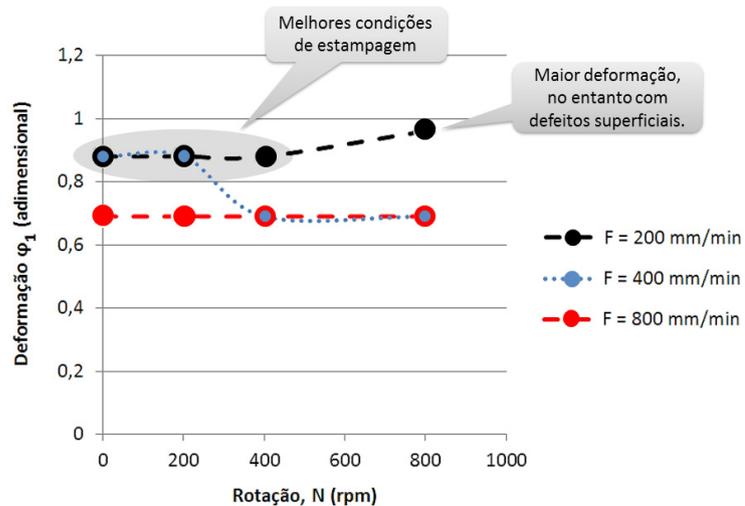


Figura 6 – Relação de rotação (N) e deformação (φ_1) para cada velocidade de avanço (F) nos experimentos de Estampagem Incremental

rotação de 800 rpm, confirmando as conclusões dos estudos de Xu et al. (com mesmo incremento vertical e faixa de avanço próxima) [13] que indicam que em geral, a estampabilidade aumenta à medida que ocorre aumento da rotação da ferramenta.

No entanto, com avanço de 400 mm/min, a deformação diminui a partir de 400 rpm. Já com avanço de 800 mm/min a variação de rotação não apresenta nenhuma influência na profundidade estampada.

Na Figura 6 ainda é apresentada uma região em destaque onde foram constatadas as melhores condições de estampagem incremental, ou seja, onde foi possível obter maior deformação sem que houvesse comprometimento da rugosidade superficial da chapa estampada. Desta região foi excluído ao o experimento que apresentou maior deformação, pois este também apresentou defeitos superficiais.

A maior deformação ocorreu no 10º experimento, com baixo valor de avanço ($F = 200$ mm/min) e alta velocidade de rotação ($N = 800$ rpm). No entanto, nessa condição a rugosidade da chapa foi visivelmente comprometida, apresentado a aparência característica do “efeito casca de laranja” (*orange peel effect*) na parte externa. Este tipo de defeito também verificado em alguns experimentos nos estudos de Hamilton e Jeswiet [15] para valores de avanço

muito mais elevados (entre 5080 e 8890 mm/min). Na Figura 7 fica evidente a elevada rugosidade apresentada na superfície externa do 10º experimento quando comparada com o 7º experimento (semelhante aos demais).

Além disso, o 10º experimento também apresentou irregularidades na parte interna. A Figura 8 apresenta a comparação entre as superfícies internas do 10º experimento (com muitas irregularidades) e do 7º experimento (com a aparência uniformemente lisa, muito semelhante à dos demais experimentos).

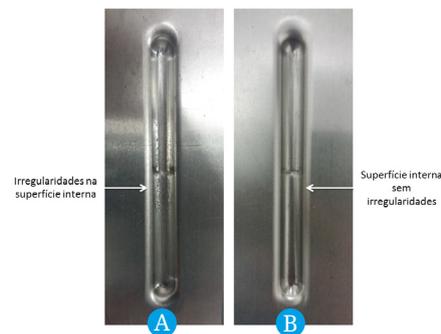


Figura 8 – (A) Superfície interna com irregularidades - experimento 10 e (B) sem irregularidades (demais experimentos)

Nos demais ensaios as superfícies não apresentaram comprometimento algum em sua rugosidade, que fossem visíveis a olho nu.

Com base nos dados obtidos nos 12 experimentos foi possível agrupar os resultados de deformação em três Retas Limite de Conformação (RLC): a primeira com RLC com o menor valor de deformação para os ensaios nº 3, 6, 8, 9, 11 e 12; a segunda RLC com valor intermediário de deformação para os ensaios nº 1, 2, 4, 5 e 7; a terceira reta com maior valor de deformação para o ensaio nº 10, conforme indicado na Figura 9.

CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma análise de 12 experimentos de estampagem incremental de AA1200, comparando as velocidades de avanço e rotação utilizados com as deformações obtidas. Permitindo a conclusão de que é possível obter maior deformação na estampagem incremental de alumínio puro, sem comprometer a rugosidade superficial do produto estampado, utilizando incremento vertical de 0,5 mm, com avanço de 400 mm/min e rotação entre 0 a 200 rpm, ou ainda com avanço de 200 mm/min e rotação dentre 0 a 400 rpm.

Também se conclui que os experimentos propostos permitem a construção de três Retas Limites de Conformação que agrupam os resultados obtidos, podendo estes serem aplicados à estampagem incremental de qualquer formato desejado, desde que atendam às faixas de parâmetros estabelecidas.

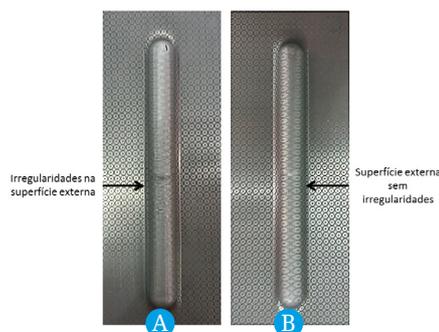


Figura 7 – (A) Superfície externa com irregularidades - experimento 10 e (B) sem irregularidades - demais experimentos

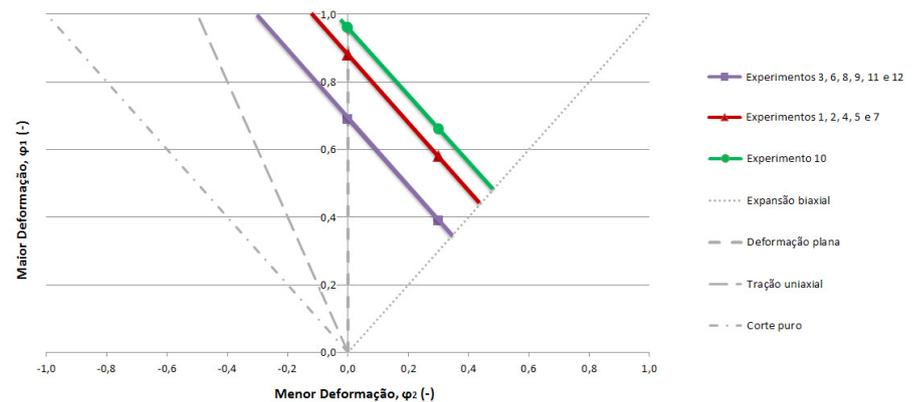


Figura 9 – Retas Limite de Conformação (RLC) para Estampagem Incremental de AA1200

REFERÊNCIAS

- [1] Li Y., Chen X., Liu Z., Sun J., Li F., Li J., et al.; A review on the recent development of incremental sheet-forming process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017;92:2439–2462. doi:10.1007/s00170-017-0251-z.
- [2] Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Dufloy J., Allwood J.; Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2005;54:88–114. doi:10.1016/S0007-8506(07)60021-3.
- [3] Kopac J., Kampus Z.; Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool. *Journal of Materials Processing Technology* 2005;162–163:622–8. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.160.
- [4] Bambach M.; Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process. *AIP Conference Proceedings* 2004;712:1969–74. doi:10.1063/1.1766822.
- [5] Castelan J.; Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano. Porto Alegre: Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2010.
- [6] Al-Obaidi A., Kräusel V., Landgrebe D.; Hot single-point incremental forming assisted by induction heating. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016;82:1163–71. doi:10.1007/s00170-015-7439-x.
- [7] Azevedo N. G., Farias J. S., Bastos R. P., Teixeira P., Davim J. P., Alves de Sousa R. J.; Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2015;16:589–95. doi:10.1007/s12541-015-0079-0.
- [8] Dufloy J. R., Verbert J., Belkassam B., Gu J., Sol H., Henrard C., et al.; Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2008;57:253–6. doi:10.1016/j.cirp.2008.03.030.
- [9] Al-Ghamdi K. A., Hussain G.; Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2015;88:82–94. doi:10.1016/j.ijmactools.2014.09.005.
- [10] Bhattacharya A., Maneesh K., Cao J.; Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming 2011;133. doi:10.1115/1.40054.58.
- [11] Baruah A., Pandivelan C., Jeevanantham A. K.; Optimization of AA5052 in incremental sheet forming using grey relational analysis. *Measurement* 2017;106:95–100. doi:10.1016/j.measurement.2017.04.029.
- [12] Ambrogio G., Filice L., Gagliardi F.; Improving industrial suitability of incremental sheet forming process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012;58:941–7. doi:10.1007/s00170-011-3448-6.
- [13] Xu D., Wu W., Malhotra R., Chen J., Lu B., Cao J.; Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2013;73:37–46. doi:10.1016/j.ijmactools.2013.06.007.
- [14] Arruda R. P. de.; Estampagem Incremental na Conformação de Chapas para Fabricação de Coletores Solares Planos. Porto Alegre: Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2010.
- [15] Hamilton K., Jeswiet J.; Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2010;59:311–4. doi:10.1016/j.cirp.2010.03.016.



Autor principal Andrisson Rodrigues Teixeira - Diretor Industrial na empresa G1 Equipamentos. Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Meta-lúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) na área de conformação mecânica. Pós-graduado em MBA em Gestão de Projetos em 2017 pela Faculdade IBGEN (Instituto Brasileiro de Gestão de Negócios). Graduado em Automação Industrial em 2011 pela Faculdade SENAI de Tecnologia (FATEC). andrisson@g1equipamentos.com.br

Co-autor Rafael Gustavo Schreiber - Professor do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) Campus Lages. Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Meta-lúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) na área de conformação mecânica. Especialista em Docência na Educação Profissional e Tecnológica em 2014 pela Faculdade SENAI CETIQT. Graduado em Engenharia Mecânica em 2010 pela Universidade Luterana do Brasil (ULBRA). rafael.schreiber@ifsc.edu.br

Co-autor Lirio Schaeffer - Professor titular da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) no Departamento de Metalurgia. Concluiu o Doutorado em Conformação Mecânica em 1982, pela Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule/Aachen na Alemanha. É orientador de mestrado e doutorado da UFRGS. Atua principalmente nas áreas de forjamento, estampagem, metalurgia do pó, materiais biomédicos e energias alternativas. schaeffer@ufrgs.br

SISTEMAS DE CÂMARA QUENTE

A **Tecnoserv** possui uma ampla variedade de **buchas aquecidas** e **ponteiras** para diversos tipos de materiais injetados. Esses sistemas de câmara quente são rigorosamente verificados e testados (try out), além de serem produzidos com a melhor tecnologia.

Possuímos uma equipe técnica qualificada para instalação, manutenção e assistência, além de oferecer um grande estoque de peças para reposição: buchas aquecidas, ponteiras, resistências e termopares.

 +55 11 4057-3977

 www.tecnoserv-moldes.com.br

 tecnoserv@tecnoserv-moldes.com.br

