

Previsão de forças na estampagem incremental de chapa fina metálica por meio de experimentos e análises por elementos finitos

Prediction of forces in incremental thin sheet metal stamping by experiments and finite element analysis

DOI:10.34117/bjdv8n4-128

Recebimento dos originais: 21/02/2022

Aceitação para publicação: 31/03/2022

Tony Emerson Marim

Mestrando em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade Federal de São Carlos

Endereço: Rua Sebastião Conti, 80, Parque Fehr, São Carlos, SP, CEP:13563 – 757

E-mail: marim.tonyemerson@gmail.com

Jonatan Augusto da Silva

Mestrando em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade Federal de São Carlos

Endereço: Rua Sebastião Conti, 80, Parque Fehr, São Carlos, SP, CEP:13563 – 757

E-mail: jonatan.silva@hotmail.com

Sérgio Henrique Evangelista

Doutor em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade Federal de São Carlos

Endereço: Rodovia Washington Luís, km 235 – SP-310 – São Carlos, SP

CEP: 13565 – 905

E-mail: toddyprof@ufscar.br

Alessandro de Oliveira

Mestrando em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos

Instituição: Universidade Estadual Paulista

Endereço: Rua Tori Kitamura, 78, Jd. Tancredo de A. Neves, Araraquara, SP

CEP: 14808-215

E-mail: alessandro.oliveira@sp.senai.br

Fábio Eduardo de Oliveira Costa

Mestrando em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos

Instituição: Universidade Estadual Paulista

Endereço: Av. Eng. José dos Santos, 274, Jd. Tabapuã, Araraquara, SP

CEP: 14810-294

E-mail: fabio.oliveira@sp.senai.br

RESUMO

No presente trabalho é investigado o comportamento das chapas de alumínio de uso industrial QQ-A-250/5 'T3' (2024), com 0,40mm de espessura, quando exposto ao processo de Estampagem Incremental. Especificamente para a pesquisa, foi utilizada a modalidade de Estampagem Incremental de Ponta Única com uma ferramenta de ponta semiesférica. Foi elaborado um modelo em elementos finitos por meio do uso do software

ABAQUS (Dassault Systèmes) com dados materiais colhidos anteriormente em ensaio de tração, possibilitando aproximar na simulação os valores adquiridos nos experimentos reais. Experimentos e análises por elementos finitos foram executados sobre alguns casos que combinam raio da ponta de ferramenta e passo diferentes. Foi feito o cálculo das forças de processo por elementos finitos e estes valores foram comparados com um modelo matemático ajustado por outros autores sobre os parâmetros do processo para a liga de alumínio utilizada. Mostrou-se que com baixo tempo de processamento computacional com os presentes modelos foi possível obter uma previsão de forças cujos erros em relação ao modelo da literatura ficaram enquadrados em uma faixa restrita de previsão. Isto aponta para a viabilidade da técnica de previsão discutida às aplicações industriais com peças mais complexas.

Palavras-chave: estampagem incremental, alumínio, elementos finitos, conformação de chapas.

ABSTRACT

The present paper investigated the behavior of 0.40mm thick aluminum sheets for industrial use QQ-A-250/5 'T3' (2024) when exposed to the Incremental Sheet Forming (ISF) process. Specifically for the research, the Single Point Incremental Forming (SPIF) modality was used with a semi-spherical point tool. A finite element model was prepared to run on Abaqus software (Dassault Systèmes) for which experimental data from this alloy were used to get good adjustment in respect of experimental behavior. Experiments and finite element analyses were performed over specific designed cases comprising of different sets of tool tip radius and vertical feed. In the numerical analyses, the predicted vertical forces were picked up to be compared with calculated data from a mathematical model from other authors. The computational runs required low processing times and the calculated data produced a set of errors that fell in a restricted range of values. For the sake of industrial application of a set of complex parts to be formed, it is here emphasized the importance of the finite element model implementation as described in this work to get attainable results in reasonable processing times.

Keywords: incremental forming, aluminum, finite element, sheet forming.

1 INTRODUÇÃO

Para atender a necessidade de fabricação de componentes mecânicos que envolvem perfis complexos em pequenas quantidades busca-se constantemente por processos flexíveis que têm como objetivo minimização das perdas e aumento na rentabilidade. Uma solução que desperta o interesse e vem sendo investigada e desenvolvida durante os anos é a da estampagem incremental (ISF) pela qual em curtos períodos se realizam etapas desde a construção do modelo CAD até a obtenção do primeiro produto.

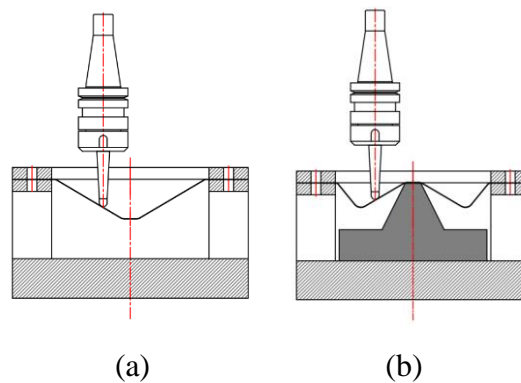
Na estampagem incremental, os custos envolvidos na fabricação de lotes de pequenas quantidades de peças ou protótipos podem ser reduzidos quando comparados

com estampagens convencionais, pois é possível conseguir peças complexas com o uso de ferramentas mais simples e de menor investimento. A implementação da estampagem incremental pode ser realizada por meio de máquinas específicas para a função, tais como máquinas com comando numérico computadorizado (CNC) ou com um braço robótico [7].

No processo, dentre as alternativas estão a estampagem incremental de ponta única e a estampagem incremental de duas pontas. Na estampagem incremental de ponta única, a ação da ferramenta se dá por incrementos progressivos sem apoio em sua parte de baixo, enquanto na estampagem incremental de duas pontas, é utilizada uma matriz posicionada abaixo da chapa metálica, servindo de apoio para adquirir estampagem de maior precisão dimensional ou perfis mais complexos. Tanto no primeiro quanto no segundo caso, as chapas são presas por meio de prensa chapas e sofrem ação de sucessivas deformações aplicadas por uma única ferramenta esférica em deslocamentos incrementais [8].

No processo, as deformações plásticas alteram as propriedades mecânicas do material, cujas diferenças podem ser constatadas antes e depois de sua ação em termos de rugosidade superficial, ductilidade, tensões residuais, geometria e estampabilidade. Na estampagem incremental isso não é diferente, no que é bastante comum a redução da espessura, o retorno elástico e a retenção de tensões residuais do material [5]. As variações que podem ocorrer podem afetar o desempenho dos componentes elaborados no processo de conformação incremental, principalmente com relação à redução da espessura em que os ângulos maiores entre a superfície conformada e sua configuração inicial é fator relevante para a redução acentuada da espessura [9]. Outros parâmetros podem ser relacionados nos estudos de processo de estampagem incremental como temperatura [2], diâmetro da ferramenta [1], lubrificação [3], incremento vertical, avanço e rotação [4, 12, 6] e espessura da chapa em relação ao ângulo de parede resultante da estampagem [6].

Figura 1: Estampagem incremental de ponta única (a) e estampagem incremental de ponta dupla (b).



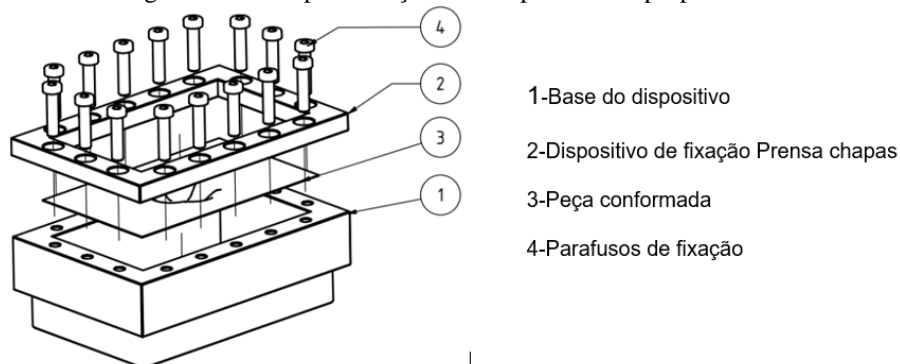
Fonte: próprio autor.

Este artigo apresenta uma avaliação da influência das ações das forças na estampagem incremental do tipo de ponta única, com ferramenta de ponta semiesférica rotativa simulada em um modelo elaborado em elementos finitos, a fim de prever as ocorrências na deformação obtida na estampagem de chapas finas do alumínio 2024.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para os experimentos de estampagem incremental de ponta única, foram construídos uma matriz vazada e um suporte tipo prensa chapas em aço carbono 1045, com fixações por meio de parafusos M6x1,25mm em 16 pontos da superfície.

Figura 2: Matriz para fixação das chapas. Fonte: próprio autor.



A estampagem foi feita em chapas de Alumínio QQ-A-250/5 'T3' (2024) com dimensões de 0,4 X 77 X 127 mm. Essa matéria prima é descrita como um material de resistência mecânica alta e boa usinabilidade e indicada para construção de peças do ramo aeronáutico, sendo objeto de estudo em diversas áreas do campo acadêmico das engenharias e que buscam um melhor aproveitamento de suas propriedades [11]. As

propriedades mecânicas das chapas de alumínio foram obtidas a partir de ensaio de tração realizado anteriormente.

Para cada experimento foi determinado o percurso e o incremento das ferramentas por programação em uma máquina CNC da marca Romi e modelo D800, com dados conforme a Tabela 2.

Tabela 1: Dados do material utilizados.

Propriedades do material	Alumínio 2024
Densidade	2,74 g/cm ³
Poisson	0,33
Módulo de Young	73 GPa
Tensão de escoamento	350 MPa
Tensão de ruptura	341 MPa
Tensão máxima	439 MPa
Alongamento (corpo de prova de 32mm)	19,8 %

Tabela 2: Parâmetros da máquina CNC Romi D800.

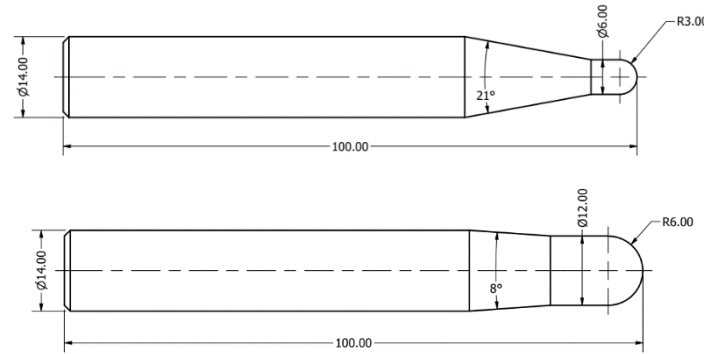
Cursos dos eixos da máquina	Romi D800
Curso da mesa superior (eixo X)	800 mm
Curso de mesa inferior (eixo Y)	530 mm
Curso do cabeçote (eixo Z)	580 mm

Figura 3: Centro de Usinagem CNC Romi D800. Fonte: próprio autor.



Para a conformação das chapas foram construídas duas ferramentas com ponta semiesférica em aço ferramenta VC131 – AISI D6 – com corpo de diâmetro de 14 mm, raios de ponta de 6 mm e 12 mm com região procedente a ponta com ângulos de 21° e 8° respectivamente.

Figura 4: Ferramentas de pontas semiesféricas. Fonte: próprio autor.



Em todos os experimentos foi desenvolvida uma geometria cônica e em espiral, sendo mantidos a rotação da ferramenta em 1000 RPM e um avanço constante de $F=200$ mm/min. sobre a chapa nos eixos X, Y e Z. O incremento vertical inicial sobre o eixo Z iniciou-se em 0,5mm, percorrendo uma forma circular iniciada em um diâmetro de 60mm com profundidade de 15 mm, mantendo um ângulo de 45° de parede em relação a ferramenta. Na figura 5, é possível observar a representação da posição da ferramenta durante todo o percurso em relação ao ângulo da parede.

Figura 5: Trajetória da ferramenta para estampagem incremental. Fonte: próprio autor.

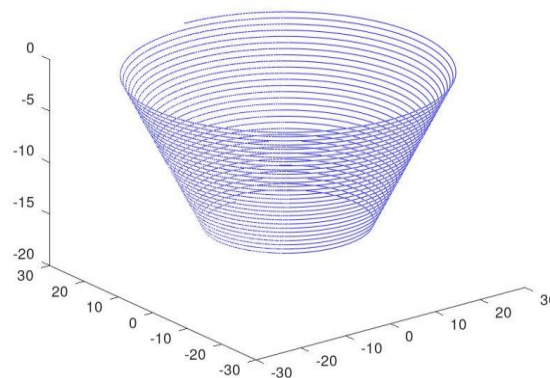
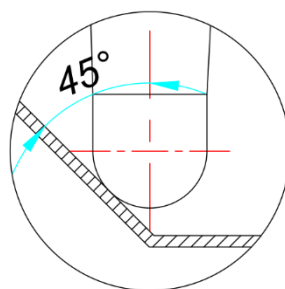


Figura 6: Inclinação de 45 graus da parede do material durante a estampagem. Fonte: próprio autor.

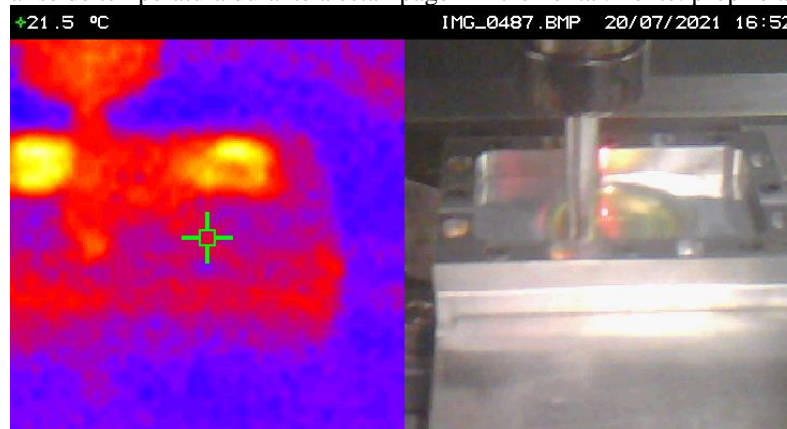


Os parâmetros e trajetória da ferramenta em relação ao material adotado foram determinados por uma programação e realizada no software GNU Octave, conforme a figura 4, ajustando-se o cabeçalho e a finalização do programa com dados inseridos manualmente.

Durante os ensaios foi utilizado o óleo hidráulico mineral ISO 68, o qual apresenta propriedade lubrificante, antiespumante e possui boa estabilidade térmica para a aplicação.

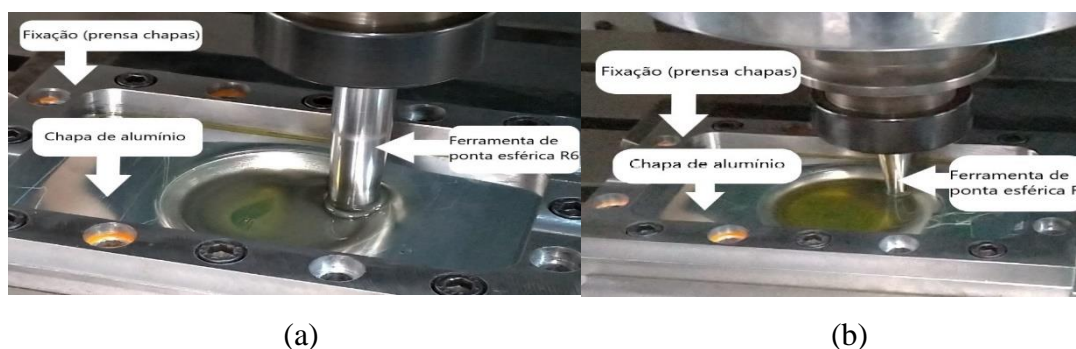
Atentando-se para valores relevantes da temperatura durante a estampagem incremental [6], foi utilizada uma câmera termográfica da SKF modelo Therm TKT110 para o acompanhamento de qualquer variação que pudesse ocorrer na chapa a ser conformada.

Figura 7: Análise de temperatura durante a estampagem incremental. Fonte: próprio autor.



Para levantar os dados dos resultados foram realizados oito experimentos, sendo quatro com a ferramenta de ponta semiesférica de raio de 6mm e quatro com a ferramenta de ponta semiesférica de raio de 3 mm.

Figura 8: Estampagem incremental: estampagem com uso de ferramenta com raio de 6 mm (a) e a estampagem incremental com uso de ferramenta de raio de 3 mm (b). Fonte: próprio autor.

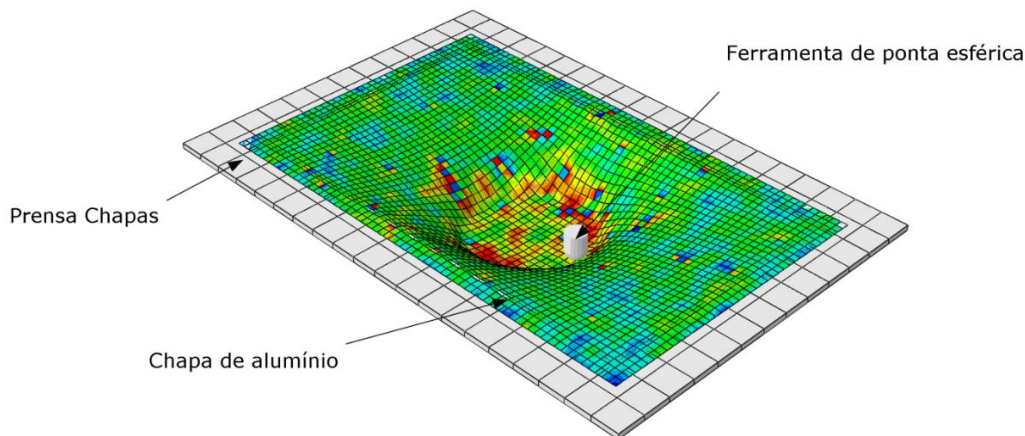


Em ordem, foram realizados primeiramente as estampagens nas chapas de 0,4 mm de espessura e trajetória com incrementos de 0,5 mm em hélice, com rotação no cabeçote rotativo do centro de usinagem de 1000 RPM fixa e uma redução na trajetória a cada experimento até chegar em 0,2 mm de incremento.

O modelo para análises em elementos finitos foi construído com o auxílio do software da Dassault Systèmes ABAQUS, para analisar a influência do atrito, das tensões e forças aplicadas durante a estampagem incremental, fixando-se a malha e variando-se as condições de contorno.

A chapa de alumínio foi modelada em elemento de casca S4R, classificada como elemento em três dimensões de uso geral de 4 nós, discretizados com refinamento de malha com tamanhos mínimos de 0,1 mm e máximos de 2 mm, enquanto o prensa-chapas segue o refinamento de mesmo valor nos tamanhos mínimos e máximos de 7,5 mm. As ferramentas foram simplificadas em formas semiesféricas de 12 mm e 6 mm de diâmetro e assim como o prensa-chapas, as ferramentas foram determinadas como elementos rígidos.

Figura 9: Modelo de elementos finitos elaborado no ABAQUS. Fonte: próprio autor.



Para análise da malha foram levadas em consideração as forças obtidas no final da simulação e as análises feitas nos elementos escolhidos conforme a realização do trajeto da ferramenta com a superfície da chapa. Na predição dos valores da força no eixo Z F_z , Aerens et al. [1] desenvolveram a variável dependente F_s , que é a força em Z dada em Newton.

$$F_s = 0,0716Rmt^{1.57} dt^{0.4} \Delta h^{0.09} \propto \cos \alpha \quad (1)$$

em que, R_m é o valor de resistência a tração (N/mm^2), t é a espessura da chapa (mm), dt é o diâmetro da ferramenta (mm), α é o valor do ângulo da parede e Δh é altura do *scallop* relacionado ao incremento de profundidade Δh_1 .

$$\Delta h = 2 \sin \alpha \sqrt{\Delta h_1 (dt - \Delta h_1)} \quad (2)$$

As análises do modelo simulado foram compatibilizadas com a trajetória realizada da ferramenta de ponta esférica com raio de 6 mm e uma trajetória com hélices de 0,5 mm sendo reduzida gradativamente, até ser realizada a trajetória com hélices de 0,2 mm de passo, tendo como parâmetro comparativo a deformação plástica empregado às forças horizontais e verticais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os experimentos realizados, os primeiros corpos de prova não demonstraram alterações de temperatura em sua superfície, permanecendo entre valores de 20 a 23 °C, o que permitiu dispensar o acompanhamento constante da variável.

As figuras 10 e 11 apresentam o aspecto final das chapas extraídas em 2 casos que combinam raio da ferramenta e passos diferentes. Nota-se o detalhe de cada figura com a indicação da abertura da trinca, o que condicionou a interrupção do processo. Como informação levada às análises por Elementos Finitos, considerou-se a execução das mesmas com profundidade máxima de 15,0 mm.

Figura 10: Experimento realizado com ferramenta de raio 3 mm, passo 0,20 mm, profundidade de 15,0 mm.
Fonte: próprio autor

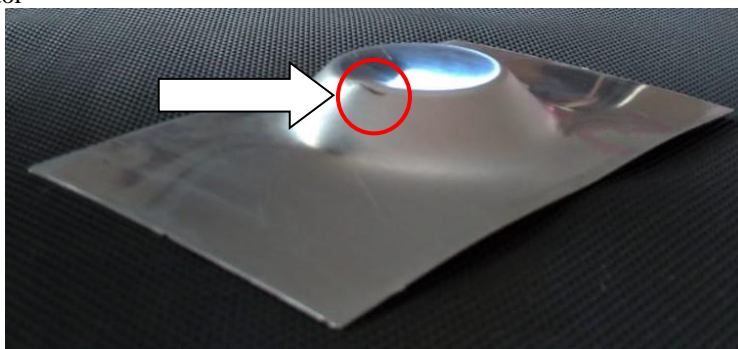
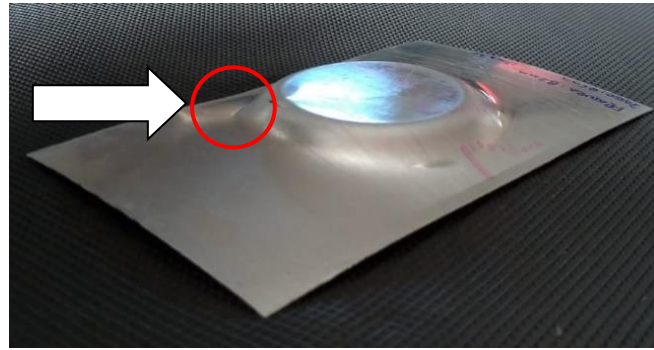


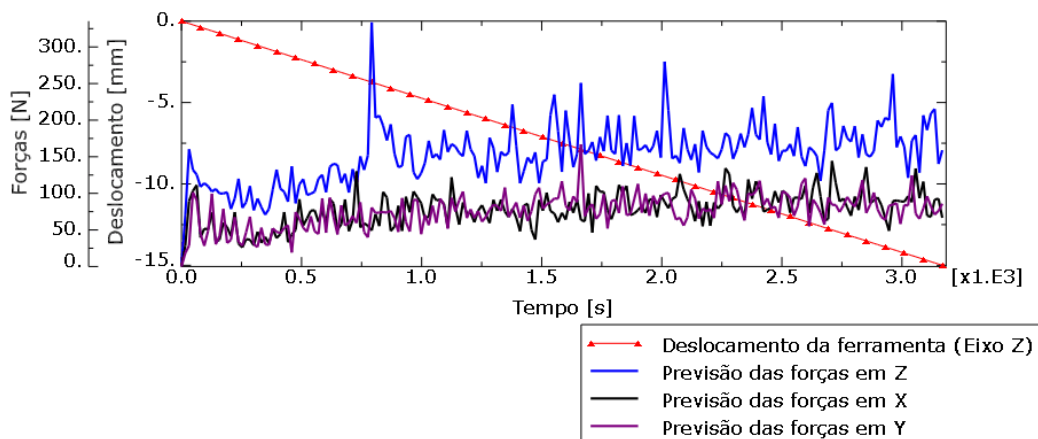
Figura 11: Experimento realizado com ferramenta de raio 6 mm, passo 0,50 mm, profundidade de 8,30 mm.
Fonte: próprio autor.



A Figura 12 ilustra em superposição as curvas de forças nas direções X, Y e Z, bem como os deslocamentos na direção Z, para o caso de Estampagem Incremental em que a ferramenta tinha raio de 3 mm, com passos de 0,20 mm. Esta configuração refere-se ao caso experimental demonstrado na figura 10. Não serão demonstradas as curvas para os outros casos. Elas foram obtidas numericamente para um deslocamento de 15 mm, mas os dados efetivos de forças contemplaram uma região de análise dos gráficos em que os deslocamentos eram menores ou iguais aos efetivos em seus respectivos experimentos.

De toda a maneira, a previsão de esforços nos vários casos demonstrou uma grande oscilação das cargas. É possível que isto seja uma penalização de caráter numérico devido ao fato de que simplificações foram adotadas na implementação do modelo de Elementos Finitos para que as análises durassem em torno de 20 minutos para serem executadas.

Figura 12: Previsão de forças por Elementos Finitos – Caso da ferramenta de raio 3 mm, passo 0,20 mm.



Fonte: próprio autor.

A tabela 3 traz um comparativo das forças aplicadas ao eixo Fz a partir da estimativa pela Equação (1) dos autores [1] e por elementos finitos. Observa-se que foi desconsiderada neste estudo a influência da rotação da ferramenta pois a presença dos valores de rotação empregados nas simulações em comparação com os cálculos realizados implicaram em uma redução média de apenas 5% da força final no eixo Z, conforme [13].

Tabela 3: Valores de forças em Z previstos para os casos citados. Fonte: próprio autor.

Raio da ferramenta	Passo (incremento)	Valores estimados conforme Eq. (1)	Valores obtidos por Elementos finitos	Erro % em relação ao estimado pela Eq. (1)
R 6mm	0,5	392,2 N	328 N	- 16,4 %
R 3mm	0,5	314,2 N	311 N	- 1,01 %
R 6mm	0,2	332,6 N	233 N	- 29,9 %
R 3mm	0,2	266,4 N	234 N	- 12,2 %

Da Tabela 3 observa-se que os valores obtidos por Elementos Finitos ficaram em geral menores que os valores obtidos de [1]. Verifica-se que o módulo de erros de previsão ficou abaixo de 30%.

São trazidas as seguintes considerações acerca destas comparações.

Dos valores obtidos por elementos finitos destacou-se na Tabela 3 o pico mais pronunciado em cada caso.

Por outro lado, das estimativas obtidas pela Eq. (1), consideram-se as investigações feitas pelos autores da equação [1]. Estes ponderaram pelo fato de que as equações apresentadas em seu trabalho para vários materiais referiram-se às curvas ajustadas a partir de uma quantidade grande de experimentos, com variações em suas condições. Disto, para a liga de Alumínio 2024 foi estimado que o erro de previsão da equação em relação aos seus experimentos ficou entre +10% e -24%. Estes autores trabalharam com ferramentas de raio maior ou igual a 10mm.

De maneira conservadora, pode-se estimar que os erros de predição de força neste trabalho poderiam ser estimados a partir de uma composição entre os valores da Tabela 3 e os valores obtidos por [1] para a liga de Alumínio utilizada. Assim, estima-se que o padrão de implementação por elementos finitos empregado neste trabalho deverão produzir erros compostos em relação a experimentos futuros que fique na faixa entre +9% e -45%.

Considerações adicionais podem ser feita acerca de melhorias ao modelo de Elementos Finitos empregado e que possam contribuir com uma previsão mais robusta dos esforços desejados. Destacam-se entre os fatores as condições de contorno impostas ao travamento à borda da chapa e a estimativa robusta para o coeficiente e modelo de atrito a serem impostos ao problema de Elementos Finitos.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados e discutidos alguns procedimentos simples relacionados à implementação por Elementos Finitos do problema da estampagem incremental de chapa fina de Alumínio 2024, segundo algumas condições de processo. Erros de predição da força em Z (direção da profundidade da estampagem) para o estudo foram estimados para ficarem entre +9% e -45% quando comparado com trabalho de outros autores [1]. A condição de implementação dos presentes modelos mediante esta faixa de erros de predição sugere a busca por melhorias discutidas. Dentre elas, destacam-se a melhoria, no âmbito do modelo de elementos finitos, sobre as condições de travamento da borda da chapa na matriz e também sobre a escolha do modelo de atrito e seu coeficiente. Vale enfatizar a importância em se manter o tempo de processamento computacional baixo (20 minutos) para que a disseminação em âmbito industrial da técnica seja atrativa, mesmo com erros de predição enquadrados na faixa acima citada.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR, ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PPGMEC, ao Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar – D.E.Ma pela concessão da licença para o uso do programa ABAQUS a este trabalho, a escola Senai “Henrique Lupo” e ao Capes pelo apoio fornecido.

REFERÊNCIAS

- [1] AERENS, R.; EYCKENS, P.; BAEL, A. V.; DUFLOU, J. R. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and fem observations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 46, n. 9, p. 969–982, Feb 2010.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] AZEVEDO N.G., FARIAS J.S., BASTOS R.P., TEIXEIRA P., DAVIM J.P., SOUSA R.J.A. Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2015; 16:589–95.
- [5] BHATTACHARYA A., MANEESH K., REDDY N.V., CAO J. Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2011;133.
- [6] BRUSCHI, S.; ALTAN, T.; BANABIC, D.; BARIANI, P.F.; BROSIUS, A.; CAO, J.; GHIOTTI, A.; KHRAISHEH, M.; MERKLEIN, M.; TEKKAYA A.E. Testing and modelling of material behavior and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. p 727 – 749. 2014.
- [7] DUFLOU J.R., VERBERT J., BELKASSEM 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.
- [8] JESWIET, J., MICARI, F., HIRT, G. et al. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54(2), 88–114, 2005.
- [9] KOPAC J., KAMPUS Z. Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool. *Journal of Materials Processing Technology* 2005;162–163:622–8.
- [10] LI, J.; LI, C.; ZHOU, T. Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation. *Transactions Of Nonferrous Metals Society of China*, [s.l.], v. 22, p.54-60, out. 2012.
- [11] MARTINS, P. A. F.; BAY, N.; SKJOEDT, M.; SILVA, M. B. Theory of single point incremental forming, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 57, p. 247-252. 2008.
- [12] SILVA, R. C; REIS, C. G. dos; SCHAEFFER, L. Análise do processo de estampagem incremental aplicado em uma geometria tubular. 38th SENAFOR. 2019.
- [13] SILVA, P. J. da. Estampagem incremental de ponto simples: uma análise de conformabilidade baseada em medição de força, desgaste de ferramenta e aquecimento. Tese de doutorado. Universidade de Brasília - DF, 2017.

[14] 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