



ANÁLISE NUMÉRICA DO ATRITO NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE SAE 1020 POR MEIO DE ANÁLISE MODAL

Maria Fernanda Lousada Antunes

mflousada@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Bernardo de Oliveira Jakitsch

bejakitsch@hotmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Jánes Landre Júnior

janes@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Luis Henrique Andrade Maia

luismaia@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Márcio Eduardo Silveira

mesilveira@gmail.com

Universidade Federal de São João Del Rei

Praça Frei Orlando, 170, Centro, 36307-352 São João del-Rei, MG, Brasil

Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior

paamjr@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo. *A estampagem convencional de chapas é um processo de conformação mecânica no qual a chapa sofre transformações para que uma nova forma geométrica seja conseguida. O processo de estampagem incremental é uma alternativa ao convencional quando o interesse está em protótipos, pequenos lotes e facilidade com máquinas operatrizes. A fim de otimizar esses processos de produção, a simulação numérica pode ser usada para prever falhas, esforços, tensões, deformações dentre outros. Sabe-se que o atrito tem influência sobre a conformabilidade do material e que a variação do mesmo pode antecipar ou postergar a falha. Desta forma, o presente trabalho se propôs a estudar a influência do atrito na simulação de uma estampagem incremental de uma pirâmide em SAE 1020, por meio de uma análise modal, em um modelo numérico 3D. As análises de modos normais foram feitas em chapas livres e chapas completamente engastadas. Foram encontradas diferenças significativas para os valores dos modos normais no atrito 0.375, no entanto, para atrito de 0.125 e 0.250 foram semelhantes.*

Keywords: *Estampagem Incremental, Atrito, Análise modal, Simulação Numérica*

1 INTRODUÇÃO

A indústria de transformação metal mecânica está sempre preocupada com a utilização cada vez mais racional de seus recursos materiais e financeiros, bem como no desenvolvimento de tecnologias que acompanhem esta realidade. Processos não convencionais de fabricação surgem da necessidade da economia de recursos. Os novos processos em grande parte das vezes se tornam economicamente inviáveis, a não ser que sejam aplicados em larga escala, face aos altos custos inerentes à sua implantação, mas existe um cenário produtivo que foge a esta regra. No desenvolvimento de matrizes e operações de conformação profunda, principalmente quando há necessidade do desenvolvimento de novos produtos, produção em baixa escala e/ou geometrias complexas, uma solução que tem se apresentado cada vez mais viável e com razoáveis limites de conformabilidade, levando em consideração o material, é a Estampagem Incremental de Chapas (EI), do inglês Incremental Sheet Forming (ISF).

O processo de Estampagem Incremental se trata da conformação de uma chapa plana por meio de uma ferramenta metálica ou não, que segue uma trajetória gerada por um centro de usinagem por comando numérico (CNC), a qual induz pequenas deformações plásticas incrementais localizadas na região de contato da ferramenta com a peça. Os últimos anos têm registrado um crescente desenvolvimento dos processos de deformação plástica incremental, uma vez que suas características se adaptam muito bem a algumas das novas exigências do mercado. Tem-se a produção de pequenos lotes de componentes, a obtenção de peças com elevada complexidade geométrica (as quais se tornariam inviáveis por processos convencionais) e com necessidade da confecção de matrizes de estampagem, protótipos para futura produção em larga escala, dentre outros. Somam-se a estas facilidades o fato de se usar um centro de usinagem, em geral facilmente encontrado, em que seus tempos de programação são pequenos e, para a aplicação deste processo, o ferramental é, via de regra, muito simples.

Quando o processo de Estampagem Incremental tem um ponto simples de contato entre a ferramenta de conformação e a chapa ele é chamado SPIF do inglês Single Point Incremental Forming. Jeswiet (2005) mostrou as principais vantagens e desvantagens do processo SPIF:

- Vantagens: peças de destinação final podem ser obtidas diretamente de uma interface CAD/CAM, usando-se um centro de usinagem convencional CNC; uma mesma ferramenta de geometria simples pode produzir peças completamente diferentes; pelo caráter incremental; o nível de esforços no processo é baixo, o que minimiza o uso de lubrificantes; o processo não requer uso de matrizes; mudanças em partes específicas do projeto são facilmente implementadas; prototipagem rápida em metais; pequena deformação plástica induzida por incremento; o acabamento superficial é, via de regra, satisfatório; a operação é relativamente silenciosa; o processo permite estampagens profundas.
- Desvantagens: o tempo de conformação é muito maior que um processo de estampagem profunda convencional; a conformação de ângulos retos, via de regra, não se dá em um único passe, mas sim em múltiplos estágios, há a presença de “efeito mola”, ou retorno elástico do material, o que compromete a precisão dimensional dos conformados.

Para Martins et al (2008), a maioria das investigações de SPIF tem concentrações em aplicações e limites de conformabilidade do processo. As investigações levam a conclusão de que a formabilidade do processo pode ser definida em termos de quatro parâmetros principais:

(i) a espessura da chapa; (ii) tamanho do passo vertical durante uma volta; (iii) velocidade (tanto rotação quanto avanço); (iv) o raio da ferramenta de modelagem.

A influência do primeiro parâmetro é comumente explicada pela aplicação da lei do seno em relação à espessura, onde t_f é a espessura final, t_0 é a espessura inicial e θ o ângulo de parede da peça conformada.

$$t_f = t_0 \sin\theta \quad (1)$$

O segundo parâmetro é relacionado de forma inversa sobre a estampabilidade. A velocidade da ferramenta influencia as condições de estampabilidade a partir do momento em que ela é uma medida direta do atrito na interface ferramenta-chapa, ou seja, é uma medida da imposição do estado de tensões aplicado localmente nesta região. No trabalho de Jeswiet (2005), no que concerne ao raio da ferramenta, é experimentalmente observado que a conformabilidade aumenta na razão inversa deste raio (concentra a deformação apenas na região de contato), havendo um limite após o qual esta variável impacta apenas na mesma medida que geraria influência em um processo convencional de estampagem.

Nas últimas décadas, Fang et al (2013) relataram que o processo de estampagem incremental tem atraído um interesse cada vez maior no campo de conformação de chapas de metal devido a seus méritos exclusivos, como a flexibilidade do processo, redução de custos de ferramentas e aumento da estampabilidade. Comparando com o processo de conformação de chapas convencional, tal como a estampagem profunda, EI tem uma vantagem óbvia na fabricação de pequenos lotes ou produtos personalizados, o que é especialmente verdade no campo do modelo de automóvel e desenvolvimento da indústria aeroespacial.

A investigação de Centeno et al (2012) mostrou o comportamento da fratura no processo de produção incremental do furo de um flange e sugeriram que a alta conformabilidade vem da supressão de estricção antes da fratura. Nas análises, foi discutido que o principal mecanismo de deformação em SPIF é a combinação de dobramento, alongamento e cisalhamento, dependendo das condições do processo.

De acordo com Fiorentino et al (2013) várias tentativas têm sido feitas para melhorar a exatidão da peça a ser conformada, que nem sempre é fiel ao desenho proposto. Malhotra et al (2012) sugerem estratégias em múltiplas etapas (*multipass*) com uma combinação de diversos caminhos de ferramenta para deformações intermediárias na forma da peça a fim de reduzir o erro geométrico. Duflou Jr et al (2008) demonstraram que, com estratégias em múltiplos estágios, geometrias podem ser obtidas excedendo-se os limites de conformação para um passe único.

Neste trabalho foi feita a análise numérica de diferentes valores de atrito nas simulações para verificar a variação de frequências naturais obtidas após procedimento de estampagem incremental de uma pirâmide em SAE 1020.

2 METODOLOGIA

Para o modelamento numérico do processo de estampagem incremental da chapa de SAE 1020, foi usada uma chapa engastada em todos os nós presentes nas quatro arestas, sem movimento de rotação ou translação simulando o prensa-chapas utilizado no processo convencional. O punção foi modelado como uma esfera indeformável já que a ponta da ferramenta utilizada é semi-esférica.

Para realização de simulação numérica da EI do material, o Aço SAE 1020 foi considerado isotrópico com características elasto-plásticas. O modelo utilizado para representar a fase plástica do material foi feito utilizando Johnson-Cook, devido a facilidade de entrada de dados em software, dada por:

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) (1 - T^m) \quad (2)$$

Onde σ é a tensão plástica verdadeira, ε_p é a deformação plástica verdadeira, a é tensão de escoamento, b é o módulo de encruamento, n o expoente de encruamento c é o coeficiente da taxa de deformação, $\dot{\varepsilon}$ a taxa de deformação, $\dot{\varepsilon}_0$ a taxa de deformação de referência e m o expoente de temperatura.

A fase elástica foi definida pela Lei de Hooke: $\sigma = E\varepsilon$, onde σ é a tensão, E o módulo de elasticidade e ε é a deformação.

Na Tabela 1 são mostrados todos os valores de entrada utilizados para a simulação numérica.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais utilizados no trabalho.

Propriedades	SAE 1020
Densidade	7,87x10 ⁻⁹ ton/mm ³
Poisson	0,29
Módulo de Young	205000 Mpa
Tensão de escoamento	259 Mpa
Parâmetro de encruamento	490 Mpa
Expoente de encruamento	0,76

Neste presente trabalho foi utilizada uma trajetória incremental de uma pirâmide com ângulos de estampagem 75° e 60°, onde o incremento foi feito no eixo z. Houve variação do atrito para valores de 0.125, 0.250 e 0.375.

Após simulação não linear, a geometria obtida pós processamento foi importada para uma análise linear dos modos de vibração normais ser feita, de modo a se ter uma ideia do comportamento das mesmas em função do atrito. Foram feitas análises modais para a chapa completamente livre e para a chapa completamente engastada em todas as suas arestas.

As simulações numéricas foram realizadas em microcomputadores com a seguinte configuração, e o tempo médio de simulação do processo foi de 40 horas para os modelos 3D:

- Processador: Intel ® Core™ i7 @ 3.60GHz 64 bits com 4 núcleos
- Memória RAM: 16 GB
- Windows 10

3 RESULTADOS OBTIDOS

A primeira parte do trabalho, que é a simulação não linear do processo de estampagem incremental de uma pirâmide em SAE 1020 em um modelo 3D pode ser vista na Fig. 1.

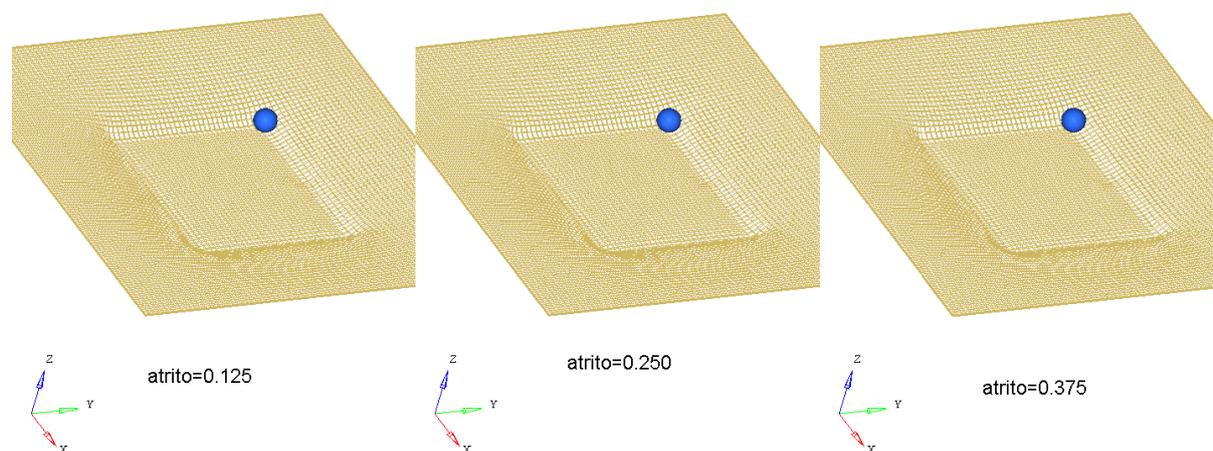


Figura 1 – Simulação do processo de estampagem incremental de uma pirâmide.

Com posse das malhas em 3D já com a geometria da peça final, foram obtidas as análises dos 10 primeiros modos normais da chapa quando esta estava totalmente livre. Na fig. 2 vemos um exemplo do modo 7, de vibração da chapa.

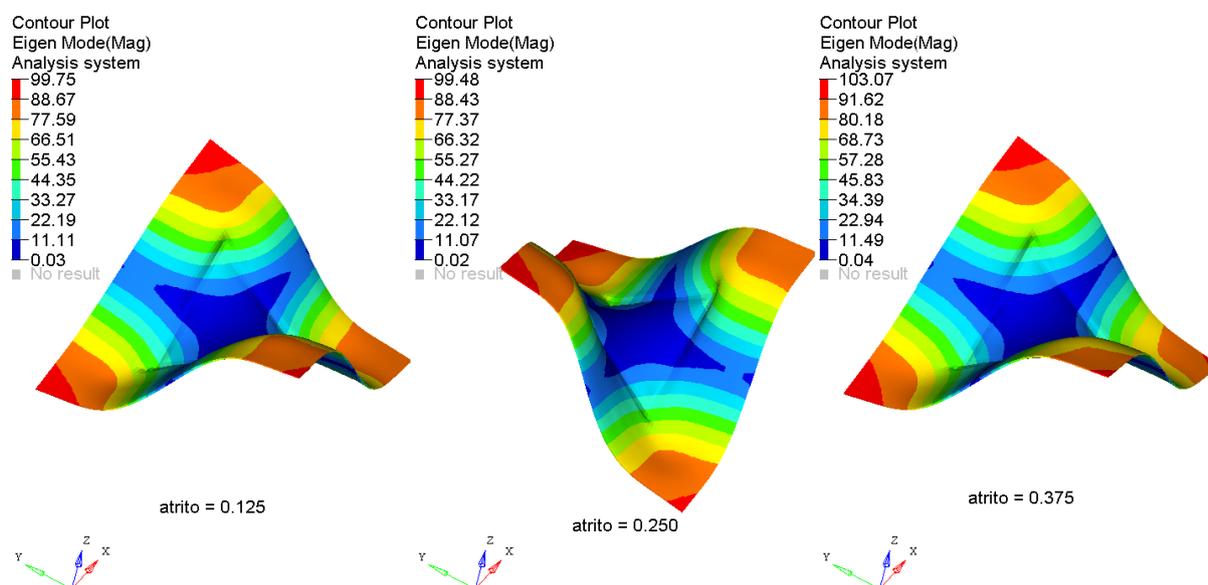


Figura 2 – Modo normal 7 para a chapa estampada completamente livre.

Com posse dos valores encontrados de modos normais a partir do modo 7, foi montada a tabela 2 abaixo para comparação do atrito na simulação.

Tabela 2 – Modos normais de vibração para a chapa completamente livre em função do atrito.

Atrito ->	0.125	0.250	0.375
Modo 7	252,287	252,904	226,265
Modo 8	403,024	403,146	365,774
Modo 9	586,300	586,282	562,176
Modo 10	591,860	590,495	575,289

Para a chapa livre é possível verificar que os modos normais para os atritos 0.125 e 0.250 são praticamente iguais e para o atrito de 0.375 é observado um valor inferior aos outros dois.

Para as chapas engastadas, temos um exemplo do modo 4, mostrados na figura 3.

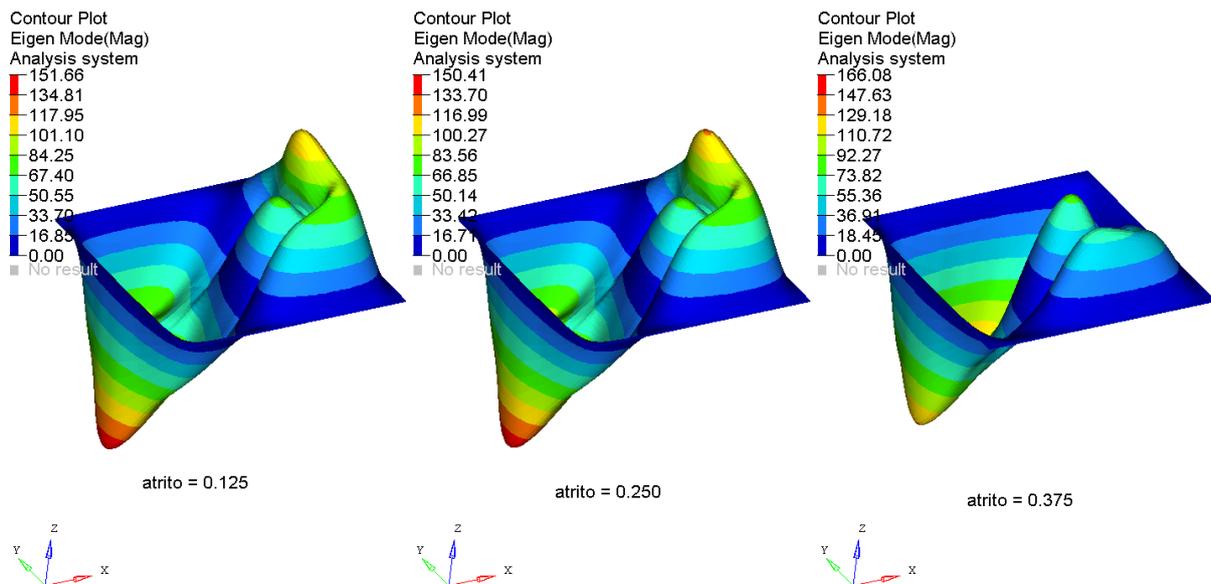


Figura 3 - Modo normal 4 para a chapa estampada engastada

Para a chapa engastada, temos os valores de frequências naturais mostrados na tabela 3. Nesse caso, os valores de modos normais para os atritos 0.125 e 0.250 se mantêm semelhantes, enquanto para o atrito 0.375 os modos 3 e 4 tem valores maiores e os outros com valores inferiores.

Tabela 3 - Modos normais de vibração para a chapa engastada em função do atrito.

Atrito ->	0.125	0.250	0.375
Modo 1	931,387	931,004	889,076
Modo 2	1264,678	1264,352	1210,927
Modo 3	1322,993	1323,027	1358,497
Modo 4	1393,613	1391,396	1411,032
Modo 5	1933,250	1933,585	1868,360
Modo 6	2052,81	2051,520	1919,770
Modo 7	2062,931	2062,030	2008,572
Modo 8	2338,417	2337,371	2190,740
Modo 9	2835,320	2830,146	2735,898
Modo 10	2917,851	2912,956	2766,030

4 CONCLUSÃO

Na análise dos modos normais de vibração em função do atrito em uma simulação de estampagem incremental em modelo 3D, não há diferenças significativas entre os valores de atrito 0.125 e 0.250, no entanto, para o atrito 0.375 há algumas diferenças para as chapas completamente livres e para a chapa engastada. Para a chapa completamente livre houve semelhança no modo 7 do atrito 0.125 e 0.375, o que nos mostra que o aumento gradual do atrito não gera influência esperada para a análise modal. Assim, foi possível verificar que o atrito é um parâmetro importante da simulação e deve ser mais explorado de modo a gerar explicações mais profundas do assunto tratado, o que deve ser feito em trabalhos futuros.

5 AGRADECIMENTOS

Os AUTORES generosamente agradecem o apoio da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – e a Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG.

6 REFERÊNCIAS

- Centeno, G., Silva, M.B., Cristino, V.A.M., Vallellano, C., Martins, P.A.F.,. Hole-flanging by incremental sheet forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 59, 46–54. 2012.
- Duflou Jr, Verbert J, Belkassam B, Gu J, Sol H, Henrard C, Habraken Am Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. *CIRP Ann* 57(1):253–256 (2008).
- Fang A, Y.; Lua, B.; Chena, J.; Xua, D. K.; Ou, H..Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, p. 1503-1515. 2014.
- Fiorentino, A. Force-based criterium in incremental sheet forming, *Int J Adv Manuf Technol*, v. 68, p. 557-563, DOI 10.1007/s00170-013-4777-4, 2013.
- Hirt A, G.; Amesa, J.; Bambacha, R.; Kappb, R. Forming strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming, 2004.
- Malhotra, R., Xue, L., Belytschko, T., Cao, J.,. Mechanics of fracture in single point incremental forming. *Journal of Material Processing Technology* 212,1573–1590. 2012.
- 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.