

ESTUDO EXPERIMENTAL E COMPUTACIONAL DAS FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS APLICADA NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO

Paulo Sergio Olivio Filho

Universidade Federal do Paraná. Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba – PR.
paulooliviof@gmail.com

Emilienne Moselli Pirolla

Émillyn Ferreira Trevisani Olivio

Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Av. Alberto Carazzai, 1640 - Cornélio Procopio – PR.
emillynf@utfpr.edu.br, emilienne@alunos.utfpr.edu.br

Paulo Victor Prestes Marcondes

Universidade Federal do Paraná. Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba – PR.
marcondes@ufpr.br

Resumo. Este trabalho analisou de forma experimental as forças cisalhantes F_{xy} médias no plano da chapa aplicados no processo de estampagem incremental de ponto único e avaliou a precisão da simulação computacional aplicada as forças com diferentes parâmetros de processos. Para os ensaios experimentais utilizou-se de um centro de usinagem de três eixos do tipo CNC, um dispositivo para estampagem incremental e um dinamômetro Kistler tipo 9139AA para obtenção dos dados de força. Neste estudo aplicou-se diferentes parâmetros ao processo, analisando a mudança do ângulo de parede e o passo vertical aplicados em conjunto com outros parâmetros fixos para a conformação de peças em aço no formato de cone truncado. Partindo de uma metodologia experimental, foram adquiridos os dados de força F_x e F_y e posteriormente tratados para se comparar e avaliar a predição das forças cisalhantes médias (F_{xy_m}) com os resultados obtidos na simulação por elementos finitos. Foram adotadas, propriedades mecânicas, leis constitutivas, critério de escoamento e um modelo de endurecimento isotrópico para alimentação dos dados do material ao modelo numérico. Para a simulação foi utilizado uma modelagem explícita com o elemento tipo casca (S4R) com integração reduzida e refino definido em estudo. Os resultados mostraram que o comportamento experimental do material devido aos diferentes parâmetros de processo avaliados foi previsto pelo modelo simulado. Tanto os dados experimentais quanto os simulados mostraram que o aumento do ângulo de parede e do passo vertical, contribuíram para o aumento da força de deformação necessária para se moldar a peça. Entretanto, o modelo aplicado não conseguiu prever com qualidade as forças desenvolvidas ao longo do processo.

Palavras chave: Estampagem incremental. Forças de estampagem. Simulação computacional

1. INTRODUÇÃO

A estampagem incremental de chapas é um processo no qual um produto ou peça é obtido através da deformação plástica local e progressiva, produzida por uma ferramenta de cabeça esférica, pressionada contra uma chapa ao longo de uma trajetória conveniente, a qual define a geometria e forma final ao produto (Fontanari, et al., 2012). Esse processo feito por intermédio de uma ferramenta de cabeça esférica rotativa com ponto único foi patenteado por Leszak em 1967, muito antes do processo ser tecnologicamente viável (Sá de Farias, et al., 2014).

O impacto potencial dessa tecnologia tem sido amplamente reconhecido e o interesse em suas aplicações práticas tem crescido constantemente nos últimos vinte anos. Vários estudos experimentais, numéricos e analíticos foram publicados para avaliar os pontos cruciais da tecnologia (Filice, Micari, e Ambrogio, 2006). As análises desse processo são bastante complexas do que nos processos tradicionais de conformação de chapa, sendo uma tecnologia no qual se baseia uma sequência de deformações plásticas localizadas, dependentes de vários fatores, que não são facilmente implementados em uma formulação teórica e em uma modelagem do problema (Jackson e Allwood, 2009; Martins, et al., 2008; Fantini, Micari, e Filice, 2002). Todavia, um grande esforço tem sido feito para melhorar a simulação do processo de ISF e se obter uma melhor compreensão dos mecanismos fundamentais envolvidos para prever o comportamento do material. Assim, a modelagem desse processo através do Método dos Elementos Finitos (FEM) continua sendo uma tarefa exigente (Fontanari, et al., 2012). A fim de prever de forma eficiente o resultado do processo, análises numéricas baseadas em elementos finitos (FE) e simulação computacional podem ser bastante eficazes (Yamashita, Gotoh, e Atsumi, 2008).

Este trabalho tem como objetivo a análise e comparação das forças cisalhantes médias (F_{xy_m}) desenvolvidas no processo de estampagem incremental de ponto único (SPIF) com um modelo computacional simulado a fim de investigar a precisão da simulação computacional aplicada a diferentes parâmetros de processo.

2. MATERIAL

Neste estudo científico, foram utilizados chapas de aço de baixo teor de carbono e fina espessura, com boa conformabilidade à temperatura ambiente, de forma que as cargas necessárias a deformação não colocasse em risco a integridade do sistema de fixação da ferramenta e à máquina. O material usado no processo de estampagem incremental de ponto único foi o aço ASTM A792 CS-A AZM 150 laminado a frio com revestimento Galvalume®, na espessura 0,8mm e composição química do metal de base conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Composição Química do Material de Base, Adaptado de (CSN, 2017).

Material	Composição Química (partes da massa em % máx)			
CS-A	C	Mn	P	S
	0,10 máx.	0,6 máx.	0,03 máx.	0,035 máx

2.1 Caracterização do Material

Para a caracterização do material foram realizadas análises químicas do substrato e do revestimento, medição de dureza e ensaio de tração para definir as propriedades mecânicas fundamentais do material processado.

Na Tabela 2 é apresentado a composição química no material analisada por espectrômetro de fluorescência de Raios-X por energia dispersiva EDX 7000 da marca SHIMADZU.

Tabela 2: Composição Química do AÇO ASTM A792 CS-A AZM 150 via EDX.

Material	Composição Química (%)				
	Fe	Mn	Si	Zn	Al
Metal de Base	99,366	0,382	-	-	0,251
Revestimento	12,093	-	0,932	35,013	51,963

A presença do alumínio no metal de base e do ferro no revestimento está ligada a difusão do substrato e do revestimento Galvalume pelo processo de imersão a quente para produção desse tipo chapa. Esses elementos são característicos da fase intermetálica formada nesse tipo de revestimento.

Foram realizadas medições de dureza na escala Rockwell B, conforme normas ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 e ASTM E18-15 em amostras de chapas não estampadas e sem revestimento. Para a obtenção de outras propriedades mecânicas do material foi utilizado a máquina de tração EMIC modelo DL10000 capacidade 100 kN, localizado no Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR com corpos de prova de chapa nas direções de laminação 0°, 45° e 90° em tiras de chapa de 12,5 mm de largura por 150 mm de comprimento conforme padrão tipo 1 da NBR ISO 6892-1:2013, a uma taxa de deformação nominal de 0,001/s. As médias das propriedades mecânicas do material são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades Mecânicas do Aço CS-A AZM 150.

Parâmetros	CS-A - #0,8
E - Modulo de Elasticidade (MPa)	210000
ν - Coeficiente de Poisson	0,31
μ - Modulo de Rigidez (MPa)	77500
LR - Tensão de Resistência (MPa)	*250,250
LE - Tensão de Escoamento (MPa)	*232,166
Al - Alongamento A_{50} (%)	*47,227
H - Dureza Rockwell (HRB)	58,63

Devido material se apresentar num estado envelhecido, para a região plástica da curva no intervalo de deformação de $0,0028 < \varepsilon < 0,07$ foi usado uma aproximação polinomial conforme apresentado na Equação (1). Para intervalo de deformação $\varepsilon > 0,07$, foi aplicada a lei de potência de Hollomon (HOLLOMON, 1945). A partir dos pontos da curva tensão-deformação verdadeira foi encontrado o valor de K, coeficiente de resistência, e n, coeficiente de encruamento. Ambos os coeficientes K e n foram obtidos pela média das três direções de laminação, obtendo a função que descreve o comportamento plástico do material apresentado na Equação (2)

$$\sigma = 233,563 \varepsilon^3 - 526,757 \varepsilon^2 + 10016,154 \varepsilon - 34144,436 \quad (1)$$

$$\sigma = 450,141 \varepsilon^{0,255} \quad (2)$$

Cada uma das equações para a curva experimental em toda a gama de deformação foi obtida pelo método de mínimos quadrados. Contudo a região de transição e as regiões plásticas de grande deformação foram combinadas sem degradação significativa, com coeficiente de correlação de Pearson maiores que 0,95. Na Figura 1 é ilustrada a função de plasticidade do material adaptado para uso nas simulações computacionais com o aplicativo ABAQUS®.

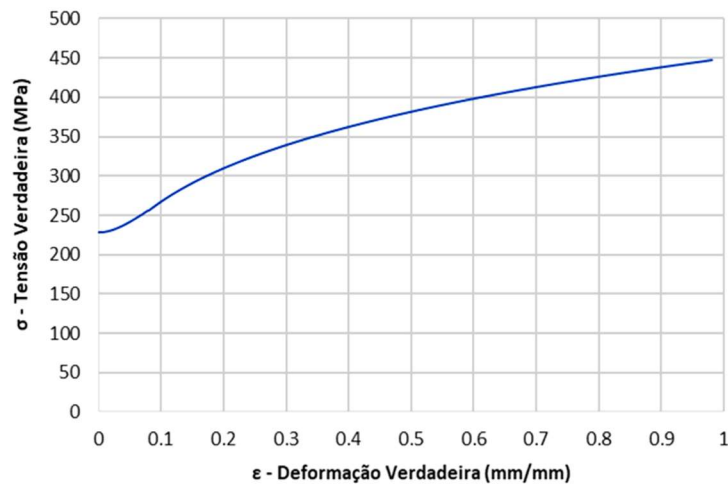


Figura 1. Função de Plasticidade do Aço CS-A.

Os procedimentos para determinação das propriedades anisotrópicas dos materiais foram executados de acordo com a norma ASTM E-517. A medição do comprimento do corpo de prova foi feita por meio de um extensômetro acoplado ao corpo de prova durante todo o ensaio de tração, servindo também para controlar o limite de deformação a ser aplicado ao material. A medição de largura foi efetuada por meio de um paquímetro digital. Com esses dados foram calculados o coeficiente de anisotropia normal ($\bar{r}$) obtidos a partir das médias do coeficiente médio de anisotropia para cada direção de laminação (r_0 , r_{45} , r_{90}) e o coeficiente de anisotropia planar a fim de conhecer o comportamento do material. Esses parâmetros de estampagem são apresentados na (Tabela 4).

Tabela 4: Anisotropia Normal e Planar do Material.

Parâmetros	CS-A AZM 150
$\bar{r}$ – Coeficiente de Anisotropia Normal	1,049
Δr – Coeficiente de Anisotropia Planar	0,236

Embora o material apresente característica quase isotópicas, foi calculado o critério de escoamento anisotrópico de Hill'48 para uso no aplicativo ABAQUS® (Tabela 5). Esses dados são necessários para a caracterização da anisotropia do material no aplicativo de simulação numérica.

Tabela 5: Parâmetros de Anisotropia de Hill'48.

Material	R11	R22	R33	R12	R13	R23
CS-A AZM 150	0,970	1,024	1	1,048	1	1

3. Ensaios Experimentais

Com o intuito de analisar a precisão computacional do processo de estampagem incremental de ponto único, fixou-se o diâmetro da ferramenta de conformação e a velocidade de estampagem de 150 mm/min, aplicando 7 passes com ferramenta, variando somente 2 parâmetros de processo na simulação computacional, sendo eles: o ângulo de parede (α) e o avanço vertical (dz). Esses diferentes parâmetros de processo correspondem a 4 ensaios e 3 repetições realizados na prática, conforme apresentado na Tabela 6.

Para os ensaios experimentais foram necessários 5 equipamentos principais: Um centro de usinagem CNC ROMI Discovery Modelo 4022 (Figura 2a), para a execução do programa numérico computacional para estampagem incremental da chapa; um dinamômetro piezoelétrico Kistler modelo 9139AA (Figura 2b), para aquisição dos esforços mecânicos; um amplificador de carga Kistler modelo 5070A10100 (Figura 2c), para ajuste dos sinais enviados pelo dinamômetro; um dispositivo Incremental Sheet Forming (ISF) (Figura 2d), para fixação dos corpos de prova, e um computador para configuração e aquisição dos dados de carga pelo dinamômetro. Para isso, procedimentos e equipamentos validados por Valle (2016) foram utilizados como base neste estudo.

Tabela 6. Ensaios experimentais.

Ensaios	Diâmetro da Ferramenta - dt (mm)	Espessura da Chapa - t (mm)	Ângulo de Deslocamento - α (°)	Avanço Vertical - dz (mm)
1	8	0,80	40	0,40
2	8	0,80	40	0,80
3	8	0,80	60	0,40
4	8	0,80	60	0,80

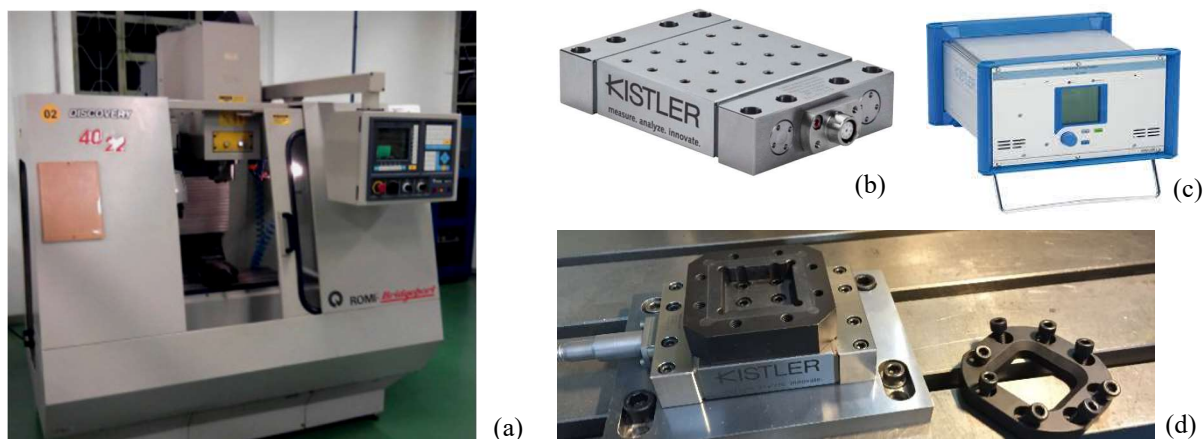


Figura 2. (a) Modelo Computacional; (b) Dinamômetro Kistler; (c) Amplificador de Carga ; (d) Dispositivo ISF fixado ao Dinamômetro e ao Centro Usinagem.

Foram cortados corpos de prova com dimensões 70x70mm, com área útil para a aplicação da deformação de 50x50mm, ou seja, a parte restante da chapa entre 50 mm e 70 mm foi usada para fixação ao dispositivo. Como produto final obteve-se uma peça no formato interno de um cone truncado com diâmetro maior de 40 mm (Figura 3a) e diâmetro menor variado devido aos diferentes valores do incremento vertical (dz) e do ângulo de parede (α) (Figura 3b).

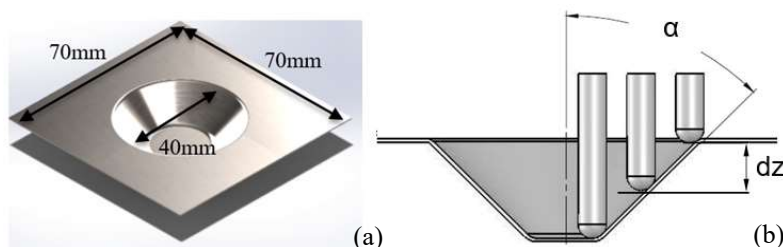


Figura 3. (a) Formato Final da peça; (b) Parâmetros Variados Durante o Processo.

4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Na simulação computacional do processo experimental, foi utilizado o software ABAQUS® 6.12.11. Para se aproximar dos ensaios experimentais realizados, utilizou-se nesse trabalho modelo similar aplicado por Wang, Nair e Zhang (2016). Uma vez que a espessura do metal da chapa é pequena comparada ao seu comprimento e largura, usou-se um elemento tipo casca S4R e nove pontos de integração ao longo da espessura da chapa pelo método de integração padrão do aplicativo. Um estudo de densidade de malha foi realizado avaliando a deformação equivalente plástica em

diferentes densidades de malha juntamente com as forças normais médias em estudo de convergência. Segundo os resultados estabelecidos no Ensaio 1, a melhor densidade de malha foi 19600 elementos com um tempo de processamento de respectivamente de 32 horas. Os dados do ensaio de tração foram atribuídos ao modelo com modelamento anisotrópico Hill'1948 e endurecimento isotrópico do material. A chapa foi desenhada conforme experimento e modelada como elemento deformável, a ferramenta de conformação foi modelada como um corpo analítico rígido com uma extremidade hemisférica e o suporte foi modelado como discreto rígido com observado na Figura 4.

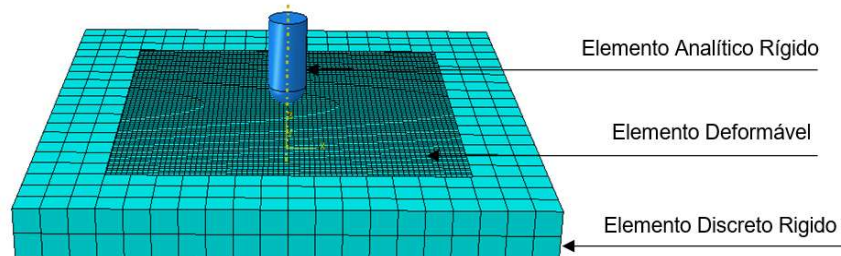


Figura 1. Modelo Computacional

Devido ao atrito de contato entre a ferramenta e a chapa ser desconhecido, para os estudos utilizou-se o coeficiente de atrito conforme Lei de Coulomb com valor de 0; 0,1; e 0,2 na simulação e para o atrito de contato entre a chapa e o suporte foi admitido com o valor 1, de forma que a chapa não se desloque do suporte. O valor de atrito foi formulado utilizando o método de penalização assumindo-se uma direcionalidade isotrópica.

A partir da trajetória numérica computacional (NC) utilizada em experimentação prática, foi desenvolvido a trajetória da ferramenta com uma programação baseada em coordenadas cartesianas com o auxílio do software Matlab®, descrevendo o caminho gerado pela ferramenta de conformação.

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 Sensibilidade ao Atrito

A sensibilidade do modelo numérico ao atrito foi analisada para a peça de cone truncado, utilizado o Ensaio 1 (dt8_t0,8_α40_dz0,4) como base para o estudo. Nesse ensaio foi necessária uma ferramenta de conformação de diâmetro 8 mm, corpo de prova padrão de chapa de aço CS-A AZM 150 em espessura 0,8 mm e parâmetros para determinação do caminho da ferramenta com ângulo de parede de 40 graus e um avanço vertical (dz) de 0,4 mm.

Na simulação numérica deste experimento utilizou-se o modelo de atrito de Coulomb aplicando os coeficientes em 0,0 (sem atrito); 0,1 e 0,2, mantendo os parâmetros de entrada fixos (propriedades do material, geometrias das ferramentas, condições de contorno e refino de malha) como definidos anteriormente. Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os 2 primeiros passes da ferramenta e os resultados do estudo de atrito para as forças desenvolvidas nas direções x, y e z respectivamente.

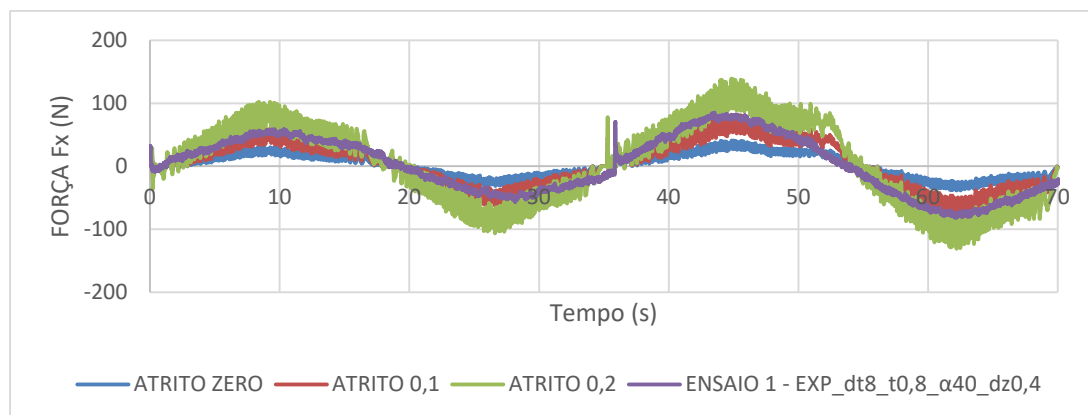


Figura 5. Força Desenvolvida na Direção x com Vários Coeficientes de Atrito.

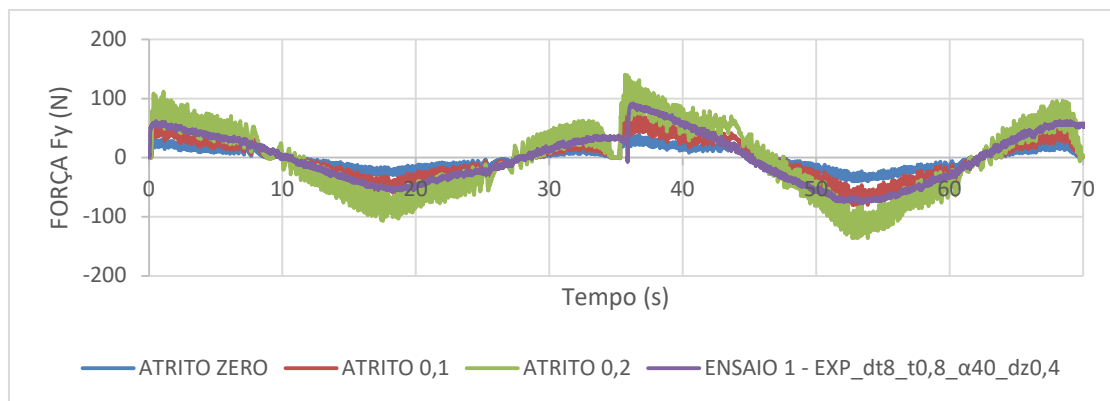


Figura 62. Força Desenvolvida na Direção y com Vários Coeficientes de Atrito.

As forças desenvolvidas nas direções x e y com vários coeficientes de atrito (Figura 5 e 6). mostram no primeiro passe da ferramenta para tempos $t < 35$ segundos, que em valores máximos para as forças de deformação na direção x, valores mínimos são vistos para a força na direção y, apresentando-se de forma senoidal. Em ambas as figuras, verifica-se que as forças aumentam juntamente com o crescimento do coeficiente de atrito tanto para a direção x quanto para a direção y, repetindo esse comportamento no segundo passe da ferramenta para $t > 35$ segundos. Para os demais passos da ferramenta realizados nesse ensaio, totalizando 7 passos, o mesmo comportamento se desenvolve. A razão para este comportamento é devido à localização e a natureza da deformação da chapa durante o processo de estampagem incremental de ponto único (EIPU). Segundo Nair (2011), a deformação da chapa ocorre apenas numa área muito pequena que está em contato com a ferramenta e assim, o efeito do atrito sobre a força de deformação é apenas ao longo da direção de movimento da ferramenta no plano da chapa.

Contudo, o atrito apresenta grande influência sobre as forças aplicadas no plano da chapa. Devido os valores de atrito correspondente as forças F_x e F_y se apresentarem entre 0.1 e 0.2. Neste trabalho serão apresentados somente a comparação experimental e simulada para o caso de atrito igual a 0.1

5.1. Predição das Forças Cisalhantes Médias

Na predição das forças cisalhantes médias (F_{xy_m}), realizadas para os 4 ensaios experimentais e simulados, foi utilizado o coeficiente de atrito de Coulomb igual a 0,1. Na Figura 7a observou-se que o comportamento das curvas dos ensaios experimentais e o desvio-padrão dos dados para cada valor de forças se apresentam semelhantes com os dados simulados da figura 7b.

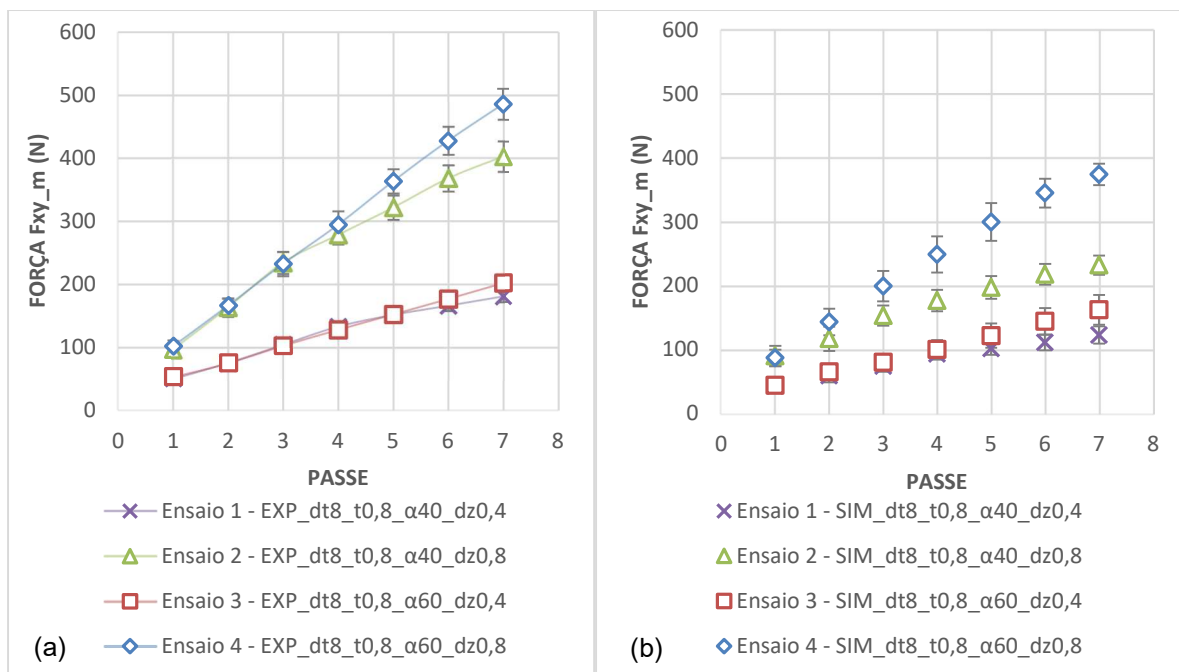


Figura 3. Forças Cisalhantes Médias Experimentais e Simuladas. (a) Forças Experimentais, (b) Forças Simuladas

Verificando os dados iniciais e finais das forças médias F_{xy} na Figura 7a e 7b, observou-se para todos os passes grande divergência em relação à média, embora não seja possível ver claramente, no passe 1 do ensaio 1; 2; 3 e 4, os valores experimentais foram respectivamente de 49,93 N; 96,43 N; 52,91 N e 101,19 N; enquanto que na simulação os valores médios foram 42,73 N; 89,80 N; 44,06 N e 87,13 N, minimizados pelo desvio-padrão médio de aproximadamente 10 N. Já para o último passe para o ensaio 1; 2; 3 e 4, os valores experimentais foram de 180,73 N; 402,23 N; 201,80 N e 485,49 N e os simulados de 122,80 N; 232,38 N; 162,20 N e 374,62 N, com desvio padrão médio de aproximadamente 17 N.

Como referenciado pela literatura e observado neste trabalho, o atrito e as forças cisalhantes na direção x e y influenciam diretamente na predição das forças pico. Devido à não otimização do coeficiente de atrito, o qual é indispensável nos estudos futuros, a curva simulada não consegue prevê com qualidade os dados de força cisalhantes ao longo dos passes. Avaliando os ensaios, os ensaios 1 e 2 deram erros maiores que os experimentos 3 e 4, ensaios que apresentam mudança do parâmetro de processo “ângulo de parede” que por sua vez reduz o erro de predição do modelo.

Na comparação das forças cisalhantes médias obtidas nos experimentos e na simulação numérica para diferentes parâmetros de processo. Como observado na Figura 8a e 8b o aumento do ângulo de parede e o aumento do incremento vertical favorece no crescimento das forças cisalhantes F_{xy} .

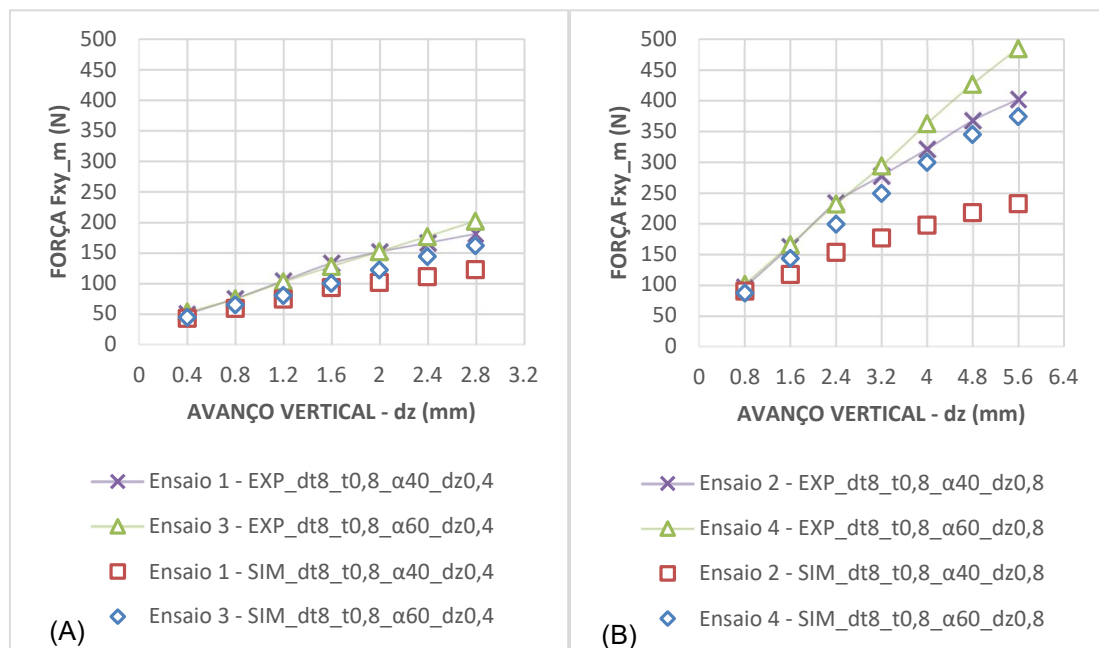


Figura 4. Comparação entre Forças Cisalhantes Médias Experimentais e Simuladas com diferentes ângulos de parede. (a) Forças Cisalhantes Médias - $dz=0,4$ mm; (b) Forças Cisalhantes Médias - $dz=0,8$ mm.

Nos trabalhos realizados por Yanle, et al. (2014) ao analisar as forças cisalhantes do processo, mostraram que um modelo combinado isotrópico e cinemático apresentou melhor acurácia com os resultados experimentais, obtendo erros médio entre de 6 e 11% e erros máximos próximos de 17% e 24% entre as forças tangenciais experimentais geradas a partir das forças F_x e F_y .

5. CONCLUSÃO

Para a simulação numérica de processos de estampagem incremental de ponto único, optou-se por avaliar um modelo que descrevesse o processo no âmbito experimental, utilizado uma abordagem explícita e um modelo de endurecimento isotrópico para o material. Os principais progressos realizados durante este trabalho foram:

- Compreensão dos parâmetros de influência no processo e na simulação numérica;
- Com base nos estudos realizados com o aço CS-A de espessura 0,8 mm mensurado durante processo, observou-se que nos experimentos simulados via ABAQUS/EXPLICIT com o modelo de endurecimento isotrópico conseguiu-se aproximar dos dados experimentais nos primeiros passes. Entretanto, para maiores números de passes o modelo começou a divergir dos dados experimentais;
- Com base na avaliação do modelo explícito, o modelo se comportou como planejado, apresentando dados de qualidade para predição de forças nos primeiros passes da ferramenta para todos os ensaios;
- Com base na observação da força de medição, verificou-se que a simulação identificou com qualidade o comportamento das forças segundo variáveis de processo;

- A simulação e os dados experimentais mostraram que em ambas as análises os parâmetros de processo estudados (ângulo de parede e passo vertical) influenciam nos dados de força.
- Sobre o uso do mecanismo de endurecimento isotrópico na simulação numérica, constatou que ele prever o comportamento do material durante as variações do processo de estampagem incremental de chapas, todavia, ele não ajuda a prever as forças de deformação ao longo de vários passes.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a UFPR e a UTFPR pela disponibilização dos recursos necessários para a realização e publicação desse artigo.

7. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. ASTM E112. Standard for test methods for determining average grain size. ASTM International. Philadelphia, p. 24. 1996.
- American Society for Testing and Materials. ASTM E18-15. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, ASTM International. West Conshohocken, PA, p. 38. 2015.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008. Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell. Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Rio de Janeiro, p. 18. 2008.
- CSN. Companhia Siderúrgica Nacional. Catálogo Galvalume, 2017. Disponível em: <http://www.csn.com.br/irj/go/km/docs/csn_documentos/CSN/CATALOGO_ZINCADO.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2017.
- Duflou, J. et al. Experimental study on force measurements for single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, n. 189, p. 65–72, jan. 2007.
- Fantini, L.; Micari, L. e Filice, F. Analysis of Material Formability in Incremental Forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 51, n. 1, p. 199-202, 2002.
- Filice, L.; Micari, F. e Ambrogio, G. A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 177, n. 1-3, p. 413-416, 2006.
- Fontanari, V. et al. Numerical and experimental analysis of the single point sheets incremental forming process. 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto/Portugal, 22-27 jul. 2012. 12.
- Jackson, K. e Aallwood, J. The mechanics of incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 3, p. 1158-1174, 2009.
- Martins, P. A. F. et al. Theory of single point incremental forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 57, n. 1, p. 247–252, 2008.
- Nair, M. An Experimental and Numerical Investigation of the Steady State Forces in Single Incremental Sheet Forming. Birla Institute of Technology and Science, Texas, p. 198, ago. 2011.
- Sá de Farias, J. B. et al. Towards Smart Manufacturing Techniques Using Incremental Sheet Forming. In: LUO, Z. Smart Manufacturing Innovation and Transformation: Interconnection and Intelligence. Hong Kong: IGI Global, 2014. Cap. 7, p. 159-189.
- Valle, P. D. Investigação Téorico-Experimental dos Esforços de Conformação Mecânica na Estampagem Incremental Assimétrica. Curitiba: Tese de Doutorado, 2016.
- Wang, J.; Nair, M. e Zhang, Y. An Efficient Force Prediction Strategy in Single Point Incremental Sheet Forming. *Elsevier - Procedia Manufacturing*, v. 5, p. 761–771, 2016.
- Yamashita, M.; Gotoh, M. e Atsumi, S. Y. Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *J. Materials Processing Technology*, v. 199, n. 1-3, p. 163-172, abr. 2008.
- Yanle, L. et al. Efficient Force Prediction for Incremental Sheet Forming and Experimental Validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. Vol 73 Issue 1-4, 571-587, 2014.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.