

## Determinação da tensão meridional de uma chapa de aço IF pelo método da análise da membrana para os processos de estampagem incremental

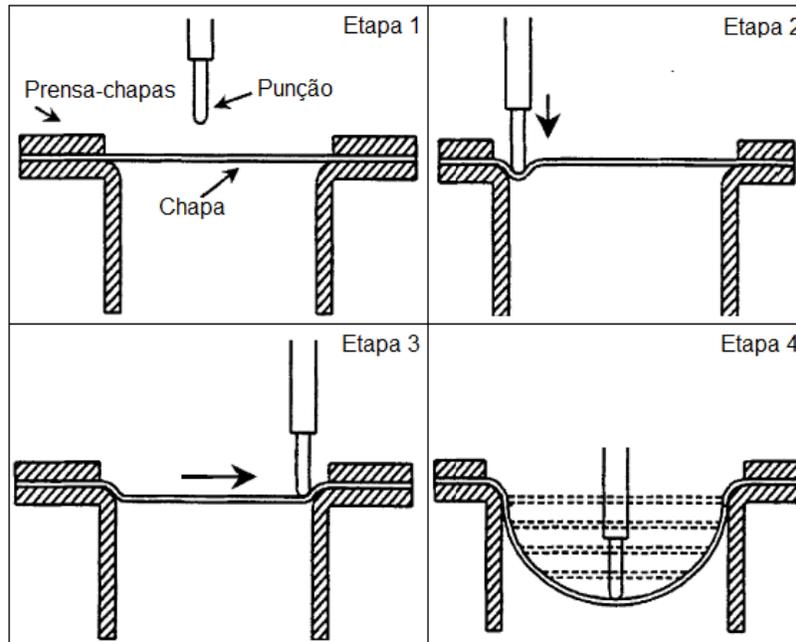
Santos GHP\* e Pereira LC\*

*\*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus São Paulo.*

**Resumo.** Novos processos de estampagem de metais vêm sendo desenvolvidos para atender as demandas do mercado que requer cada vez mais peças customizadas e curtos tempos de fabricação. Neste tocante surge como alternativa para atender as estas solicitações os processos de estampagem incremental de chapas (*incremental sheet forming - ISF*). O processo *ISF* baseia-se na aplicação de uma deformação plástica progressiva e local produzida por uma ferramenta que guiada por uma máquina de controle numérico computadorizado (CNC) pressiona uma chapa ao longo de caminhos específicos a fim de estampar uma peça com determinada geometria (BENEDETTI et al., 2017). Diferentes materiais têm sido utilizados nos estudos do processo *ISF* variando desde metais a polímeros. Poucos estudos têm sido realizados em aços e suas ligas, sobretudo em aços dedicados à estampagem, como o aço livre de intersticiais (*interstitial free – IF*). O aço *IF* apresenta altos níveis de estampabilidade em função de baixos teores de átomos intersticiais de carbono e nitrogênio proporcionando baixo limite à escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio (GORNI; SILVEIRA; ALMEIDA FILHO, 2002). O presente estudo pretende determinar a tensão meridional de uma chapa de aço *IF* pelo método da análise da membrana para os processos de estampagem incremental.

**Palavras-chave.** tensão meridional, método da análise da membrana, aço *IF*, estampagem incremental.

**Introdução.** A ideia básica dos processos *ISF* é obter a forma desejada da peça por meio do movimento de um pequeno punção ao longo de um percurso especificado pelo operador. Um torno ou fresadora controlados numericamente por computador podem ser utilizados para deformar a peça bruta plasticamente, impondo à ferramenta (punção) uma trajetória controlada pelo computador. Não são necessários punções e matrizes convencionais e a forma final da peça depende apenas da trajetória atribuída à ferramenta, pois é determinada pela "soma" das deformações locais induzidas pelo punção ao longo do seu percurso (FILICE; FRATINI; MICARI, 2002). A *ISF* que é basicamente composto de um dispositivo prensa-chapa, a chapa que será estampada e um punção conforme pode ser visto na Figura 1 que ilustra as etapas do processo.



**Figura 1.** Etapas do processo *ISF*.

(BERTOL et al., 2010).

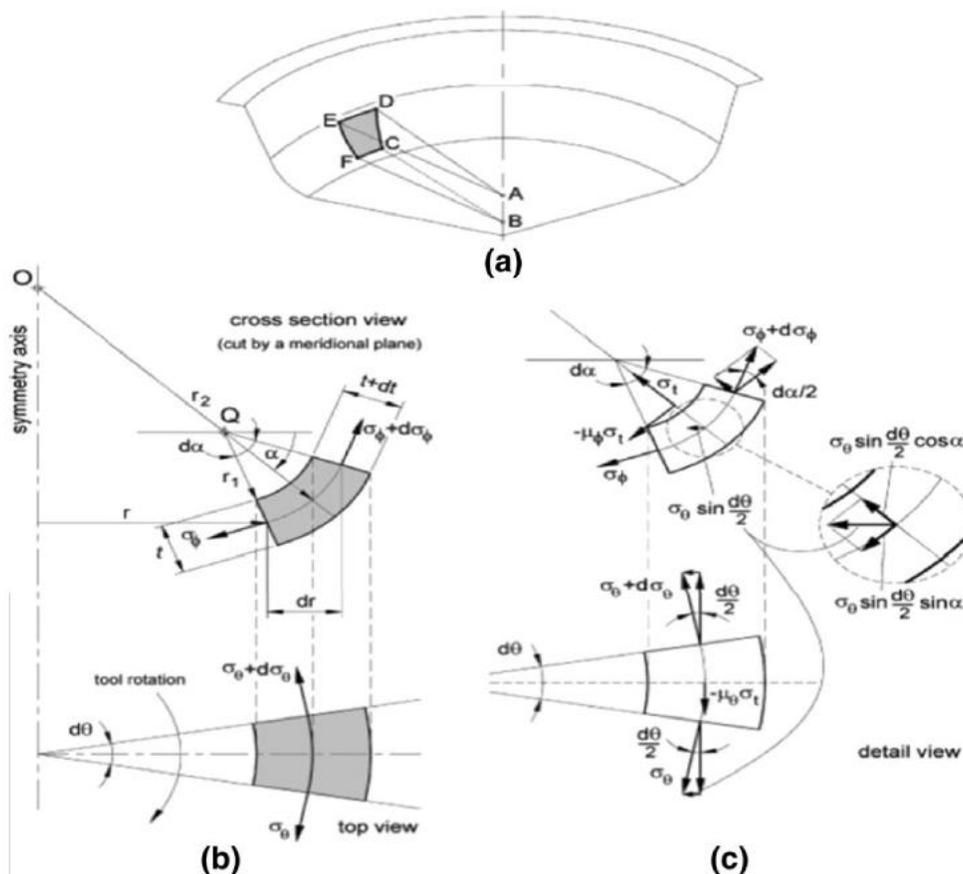
Na etapa 1 é mostrada a preparação da máquina CNC com indicação dos principais elementos do sistema. A etapa 2 refere-se ao início do processo com a entrada do punção na chapa causando uma pequena deformação, a etapa 3 mostra um passe da trajetória programada do punção após a entrada na chapa e a etapa 4 mostra a forma da peça acabada após o punção ter executado todos os passes programados da trajetória pré-estabelecida.

Lu et al. (2014) e Li et al. (2017) citam que embora o processo *ISF* tem sido pesquisado há mais de 20 anos, tanto na análise teórica como nas observações experimentais, as aplicações na indústria são limitadas por uma série de razões incluindo estampabilidade insatisfatória, imprecisão geométrica, longo tempo de fabricação e acabamento superficial ruim devido ao pouco entendimento de como os diferentes parâmetros do processo afetam o comportamento da estampagem e a qualidade final do produto.

O aço *IF* foi projetado para obter uma excelente combinação entre a estampabilidade e a resistência mecânica pois o coeficiente de encruamento é alto o que lhe permite uma boa distribuição das deformações e seu coeficiente de anisotropia reflete um bom comportamento ao estreitamento, o que favorece a estampagem profunda. Esses aços são particularmente adaptados às peças complexas que requerem altas características mecânicas (ARCELLOR MITTAL, 2017).

Neste contexto o objetivo deste trabalho é determinar a tensão meridional de uma chapa de aço *IF* por meio de simulação numérica a fim de estabelecer a relação entre a tensão e a profundidade que podem ser aplicados em estampagens no processo *ISF*.

**Análise de membrana.** Li *et al.* (2017) cita que muitos pesquisadores propuseram que a deformação dominante no processo *ISF* pode ser descrita como uma deformação de membrana. Um modelo analítico fornece informações sobre os fundamentos por trás da fratura do material e a da estampabilidade do processo *ISF*, sendo assim a análise de membrana consiste em estudar uma pequena zona plástica de peças simétricas com formato circular para explicar aspectos da estampabilidade e dos defeitos. A Figura 2 mostra as condições de equilíbrio da membrana analisadas para a casca de um elemento circular.



**Figura 2.** Condições de equilíbrio da membrana para a casca de um elemento circular (LI *et al.*, 2017).

Ainda Segundo Li et. Al. (2017) as formas simplificadas das equações da análise de membrana podem ser deduzidas de acordo com as equações descritas abaixo onde  $\delta_\theta$ ,  $\delta_\varphi$  e  $\delta_t$  são as tensões circunferenciais, meridionais e de espessura respectivamente,  $t$  é a espessura da chapa,  $r$  é a coordenada radial,  $r_1$  é o raio do punção e  $r_z$  é o raio do elemento normal onde cortou o eixo z.

Direção circunferencial

$$d\delta_\theta = -\mu_\theta \delta_t \frac{rd_\theta}{t} \approx -\mu_\theta \delta_t \quad (1)$$

Direção da espessura

$$\frac{\delta_t}{t} + \frac{\delta_\varphi}{r_1} + \frac{\delta_\theta}{r_z} = 0 \quad (2)$$

Direção da meridional

$$\frac{d\delta_\varphi}{dr} + \frac{\delta_\varphi - \delta_\theta}{r} + \frac{\mu_\theta \delta_t}{t \times \sin\alpha} + \frac{\delta_\varphi}{t} \frac{dt}{dr} = 0 \quad (3)$$

**Materiais e métodos.** Os cálculos para análise da direção meridional serão realizados no programa Matlab® versão R2017b *trial use*. Embora o presente estudo seja uma simulação número, o aço *IF* é existente e faz partes de outras pesquisas a qual este estudo irá complementar. O aço *IF* foi fornecido pela Universidade Estadual de Campinas (LCM - UNICAMP) em formato de bobina, conforme com dimensões de 3.920 x 175 x 0,6 mm (comprimento x largura x espessura). A dureza da chapa foi medida em 57,7 HV (valor médio de cinco medições) no Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus Itapetininga (IFSP – Itapetininga) por meio de um durômetro modelo EMCO-TEST DURAVISION. A análise química do aço *IF* encontra-se na Tabela 1.

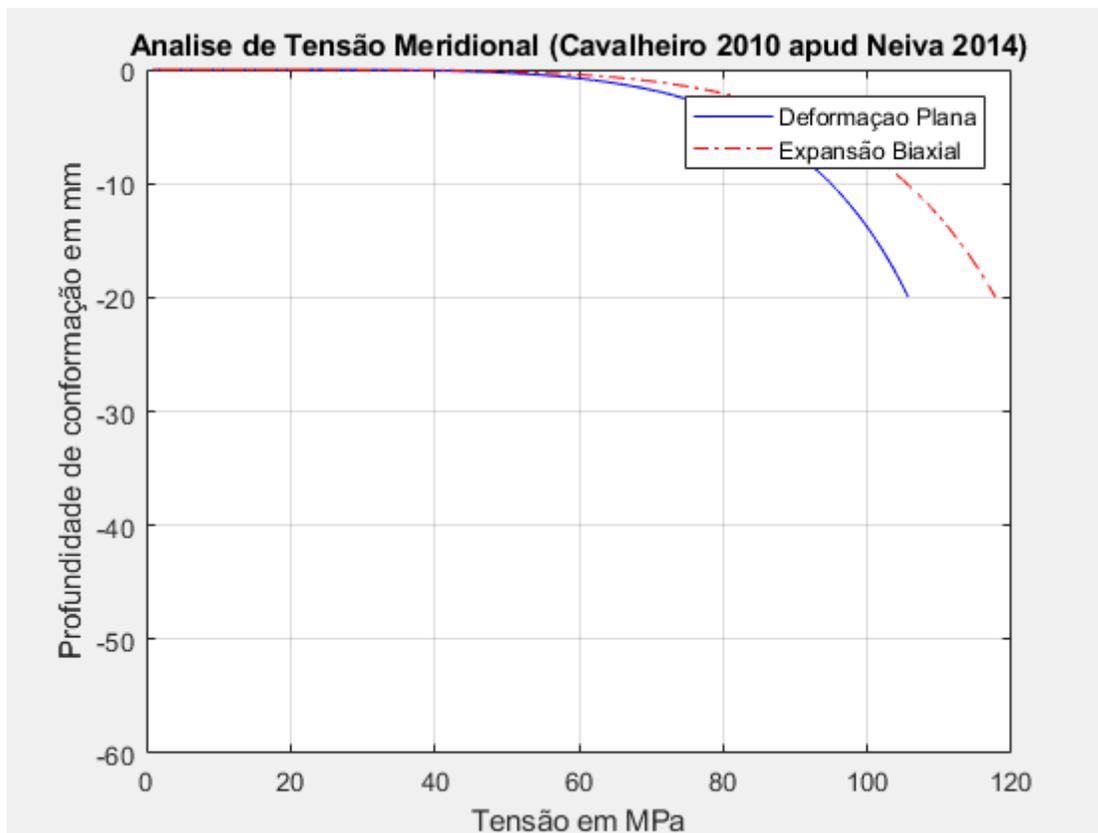
**Tabela 1.** Análise química da chapa de aço *IF*.

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>
0,0028	0,1130	0,0150	0,0067	0,006	0,028	0,009	0,012
<b>Ni</b>	<b>N</b>	<b>Mo</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>Sn</b>	<b>B</b>
0,008	0,0026	0,002	0,037	0,0004	0,002	0,001	0,0001

(GOMES, 2012)

O punção utilizado para a simulação tem raio de ponta de 5,9 mm. O coeficiente de encruamento “n” adotado para o aço *IF* será conforme trabalho de Gomes (2012) que o determinou em seu estudo sobre aço *IF* o valor de 0,1690. Os cálculos, bem como a programação do Matlab® foram desenvolvidos em Neiva (2014) e serão replicados neste trabalho alterando-se apenas os dados para a chapa de aço *IF*. Os “loops” programados para o cálculo permitirão a construção de um gráfico tensão *versus* profundidade de conformação.

**Resultados.** A Figura 3 mostra o gráfico da simulação numérica para cálculo da tensão meridional de uma chapa de aço *IF* de 0,6 mm de espessura. Conforme pode ser visto acima de uma tensão de aproximadamente 40 MPa é possível conformar a chapa até a profundidade de 20 mm considerando deformação plana e expansão biaxial. Vale ressaltar que para estes resultados o formato da casca do elemento é circular e o punção considerado no processo *ISF* tem raio de 5,9 mm.



**Figura 3.** Gráfico da determinação da tensão meridional de uma chapa de aço *IF* de 0,6 mm de espessura para o processo *ISF*.



**Conclusão.** A relação tensão x profundidade de estampagem do aço *IF* para o processo *ISF* foi definida por meio da simulação numérica da análise de membrana via tensão meridional. Os dados obtidos são de grande importância pois poderão ajudar a complementar a determinação dos limites de estampabilidade do aço *IF* em trabalhos futuros.

### Referências.

ARCELOR MITTAL. Arcelor Mittal Vega Aços Planos. Disponível em: <[http://www.constructalia.com/repository/transfer/br/resources/Catalogo/05858782ENLACE\\_PDF.pdf](http://www.constructalia.com/repository/transfer/br/resources/Catalogo/05858782ENLACE_PDF.pdf)>. Acesso em: 15 set. 2017.

BENEDETTI, Matteo et al. Single-point incremental forming of sheet metals: Experimental study and numerical simulation. Proceedings of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, [s.l.], v. 231, n. 2, p.301-312, jan. 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405415612351>.

BERTOL, L. S.; FOLLE, L.; SCHAEFFER, L.; KINDLEIN JÚNIOR, W.. Avaliação dos ângulos-limite na estampagem incremental de alumínio e titânio. Corte & Conformação, Porto Alegre, p.42-51, out. 2010.

FILICE, L.; FRATINI, L.; MICARI, F. Analysis of Material Formability in Incremental Forming. Cirp Annals - Manufacturing Technology, [s.l.], v. 51, n. 1, p.199-202, 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61499-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61499-1).

GOMES, Luís Carlos Pereira. Estudo das propriedades mecânicas e da estampabilidade de aços IF. 2012. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

GORNI, Antonio Augusto; SILVEIRA, José Herbert Dolabela da; ALMEIDA FILHO, Célio de. Efeito do processo de laminação a quente sobre as propriedades mecânicas de chapas finas de aço i.f. laminadas a frio. In: 39º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 39., 2002, Ouro Preto. Anais... . Ouro Preto: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.

LI, Yanle et al. A review on the recent development of incremental sheet-forming process. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, [s.l.], p.1-1, 3 abr. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0251-z>.

LU, B. et al. Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool. International Journal Of Machine Tools And Manufacture, [s.l.], v. 85, p.14-29, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.04.007>.

NEIVA, Vinícius Santos. Modelagem e análise computacional da estampagem incremental de ponto único pelo método da membrana. 2014. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.