

DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE ESTAMPABILIDADE DE AÇO IF PELO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS

Gustavo Henrique de Paula Santos, gustavohenrique@ifsp.edu.br¹

Lucas Clarindo Pereira, lucasclarindo@ifsp.edu.br¹

Mário Luiz Nunes da Silva, marioluiznunes@ifsp.edu.br¹

Pedro Roberto Goulart, pedro.goulart@ifsp.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP – Campus Itapetininga, Avenida João Olímpio de Oliveira, 1561, Vila Asem, Itapetininga - SP, CEP 18202-000

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 a estas solicitações o processo de estampagem incremental de chapas (do inglês *incremental sheet forming - ISF*) que baseia-se na aplicação de uma deformação plástica local e progressiva 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. Diferentes materiais têm sido utilizados nos estudos do processo ISF variando desde metais a polímeros porém 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*). Este estudo apresenta os resultados de 8 experimentos realizados com o aço IF em chapa de 0,6 mm de espessura pelo processo ISF que determinou que, para o formato geométrico de um cone, o ângulo limite de estampagem é de 70,3125°. Acima deste limite o material fica sujeito a fraturas com diferentes graus de severidade e em diferentes profundidades.

Palavras-chave: estampagem incremental de chapas, aço livre de intersticiais, limites de estampabilidade

1. INTRODUÇÃO

Novas tecnologias de estampagem têm sido desenvolvidas nos últimos anos devido aos avanços nas máquinas de usinagem controladas por computador e no desenvolvimento de pós-processadores que controlam os caminhos das ferramentas das máquinas auxiliadas por programas de desenho e manufatura assistida por computador, do inglês *computer-aided design and computer-aided manufacturing - CAD/CAM*, resultando na capacidade de estampar formas simétricas e assimétricas a baixo custo e sem matrizes caras (Jeswiet *et al.*, 2005).

Neste contexto a tecnologia de estampagem incremental de chapas, do inglês *incremental sheet forming - ISF*, é definida como um conjunto de processos de conformação de chapas, com o uso ou não de uma matriz, na qual a deformação é altamente localizada, sem extração de material e com o uso de um dispositivo que prende completamente a chapa, assim a forma final é determinada pelo movimento de uma ferramenta nos eixos X, Y e Z (Emmens; Sebastiani; Boogaard, 2010). Este processo teve seu início nos conceitos das máquinas primeiramente idealizadas, desenvolvidas e patenteadas por Roux (1960) e Lezak (1967) que eram inviáveis na época devido ao pouco desenvolvimento dos sistemas de controle numérico e dos programas computacionais associados (Lu *et al.*, 2014; Jackson; Allwood, 2009 e Jeswiet *et al.*, 2008).

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 plasticamente a chapa, 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).

Os elementos básicos do processo ISF são: (1) chapa metálica, (2) prensa-chapas, (3) punção e (4) máquina com controle numérico computadorizado (CNC) atrelada ao planejamento da trajetória da ferramenta por programas CAD/CAM conforme mostrado na Fig. 1, a qual relaciona como parâmetros básicos da máquina CNC a força de estampagem metálica (F), a velocidade de avanço da ferramenta (v) e a velocidade de rotação do fuso (ω) (Jeswiet *et al.*, 2005).

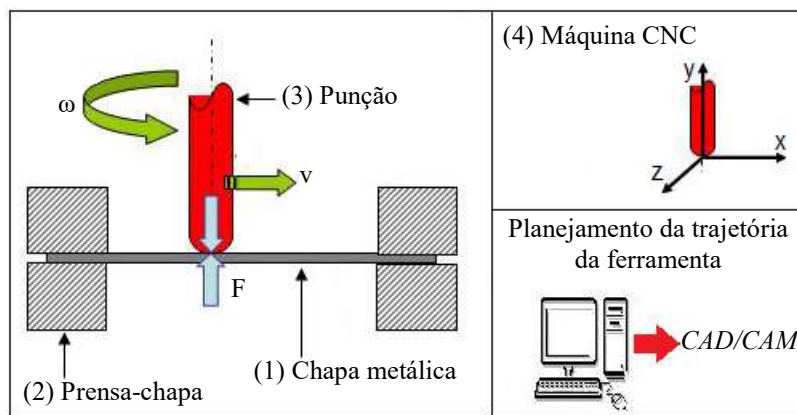


Figura 1. ISF: Elementos básicos (Jeswiet *et al.*, 2005).

No processo *ISF*, antes que quaisquer componentes comerciais possam ser fabricados, é necessário determinar o limite de estampabilidade para o material de interesse, que é geralmente expresso em termos do ângulo máximo em que a parede da peça pode ser estampada sem que ocorram fraturas. Este ângulo é um critério de projeto útil, pois pode ser medido e aplicado ao projetar peças, limitando quais formas geométricas e ângulos podem ser estampados (Jeswiet *et al.*, 2015). “Ham e Jeswiet (2007) definem o limite de estampabilidade como a magnitude máxima de deformação alcançada antes da fratura”.

Diferentes materiais têm sido utilizados nos estudos do processo *ISF* variando desde metais a polímeros. Na literatura as pesquisas em metais têm sido conduzidas predominantemente com o uso de chapas de ligas de alumínio como pode ser visto nos trabalhos de Fratini *et al.* (2004), Jeswiet *et al.* (2005) e Mcanulty; Jeswiet; Doolan (2017). Poucos estudos têm sido realizados em aços, sobretudo em aços dedicados à estampagem, como o aço livre de intersticiais, do inglês *interstitial free* – *IF*. O aço *IF* foi desenvolvido para obter uma excelente combinação entre a estampabilidade e 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. Esses aços são particularmente adaptados às peças que requerem altas características mecânicas (Arcelor Mittal, 2017).

Há poucas pesquisas publicadas sobre o comportamento do aço *IF* no processo *ISF*. Além disso foram identificadas lacunas do processo *ISF* na literatura conforme descrito por Lu *et al.* (2014) e Li *et al.* (2017) que 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. Neste tocante o objetivo deste trabalho é determinar, por meio do processo *ISF*, os limites de estampabilidade de um aço *IF* em função do ângulo máximo em que a parede da peça pode ser estampada sem que ocorram fraturas estabelecendo as profundidades alcançadas e as respectivas espessuras finais de estampagem.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais

O aço *IF* foi disponibilizado em formato de bobina com dimensões de 3.920 x 175 x 0,6 mm (comprimento x largura x espessura). A análise química informada pelo fabricante é mostrada na Tab. 1.

Tabela 1. Análise química do aço *IF* (percentual em peso) (Gomes, 2012).

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

Foram cortados os corpos de prova da bobina de aço *IF* em segmentos de 300 x 165 mm (comprimento x largura) para que em cada um fossem estampadas duas formas geométricas com ângulos de parede diferentes.

O programa utilizado para desenho e modelamento da forma geométrica estampada na chapa de aço *IF* foi o Solid Edge®. Para a interface *CAD/CAM*, configuração dos parâmetros de estampagem e geração do código G foi utilizado o programa Esprit®. A lubrificação entre o punção e a chapa foi feita com óleo ISO 68 Capella da Texaco®. Um centro de usinagem de 3 eixos da Veker modelo MV-760-ECO foi utilizado para executar o processo de estampagem. O conjunto prensa-chapa utilizado tem dimensões de 300 x 300 x 100 mm (comprimento x largura x altura) e é dividido em 4 áreas de estampagem que possuem formato quadrado de 105 x 105 mm, conforme mostra a Fig. 2.

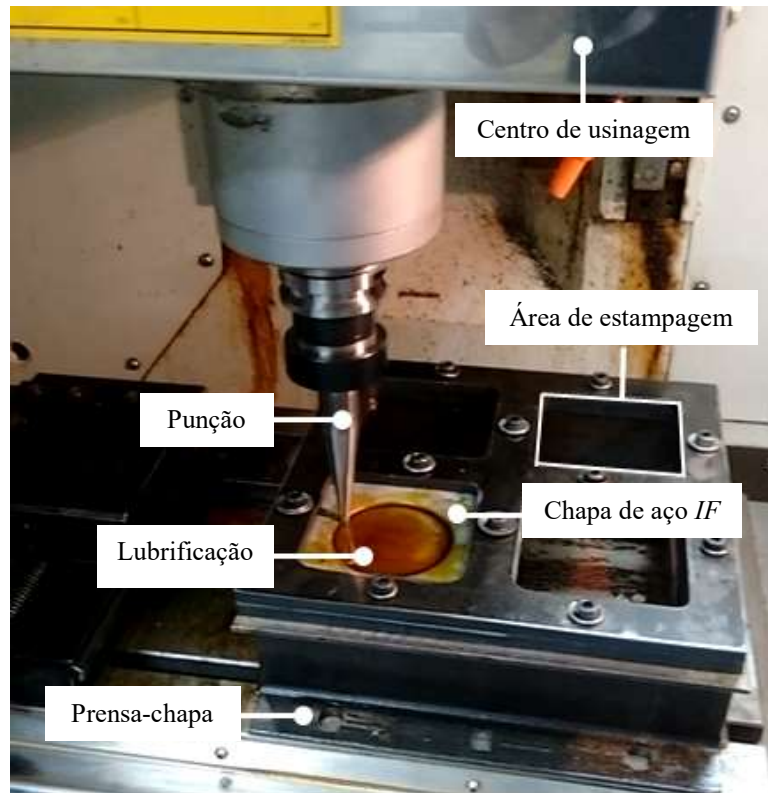


Figura 2. Principais materiais utilizados na execução do processo ISF.

“Jeswiet *et al.* (2005) cita que as ferramentas utilizadas nos processos ISF não estão disponíveis no mercado e são fabricadas pelos próprios usuários” deste modo um punção com diâmetro de ponta de 5,9 mm foi desenvolvido e fabricado para o processo ISF deste trabalho a partir de uma barra redonda do material SAE-4340 a qual foi submetida a tratamento térmico e revenimento. A Figura 3 mostra as dimensões e o formato final da ferramenta.

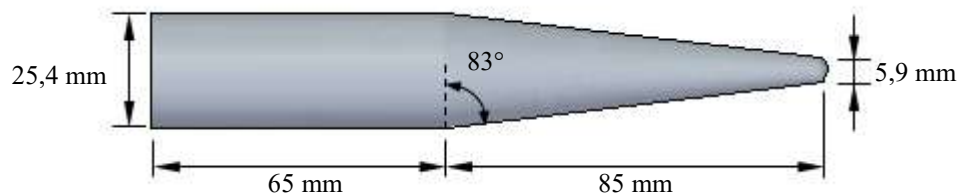


Figura 3. Dimensões e formato da ferramenta.

2.2. Métodos

O procedimento experimental para determinação dos limites de estampabilidade do aço IF pelo processo ISF consistiu em estampar a forma geométrica de um cone com diâmetro da base de 90 mm variando-se o ângulo (θ) da parede. O procedimento consiste em observar se no ângulo de parede selecionado ocorre fratura na chapa durante o processo ISF. A sequência das etapas para a realização dos experimentos é apresentada no fluxograma da Fig. 4 baseada nos métodos propostos por Hirt *et al.* (2004), Jeswiet *et al.* (2005) e Kumar; Kumar, (2015).

2.2.1. Identificação de Fraturas

Na literatura não foi encontrada metodologias para identificação de ocorrência de fraturas na chapa no momento em que ela ocorre durante a execução do processo ISF no centro de usinagem CNC. O método utilizado neste trabalho baseia-se em cuidadosa observação visual do movimento do punção sobre a chapa durante toda a execução do processo de estampagem identificando a fratura no momento em que ela acontece por três modos: por inspeção visual, por ruído de cisalhamento da chapa e por vazamento do lubrificante. No momento em que é identificada a fratura na parede do cone o equipamento é desligado e anota-se o valor da profundidade que o punção atingiu até aquele momento no eixo Z. Este valor é mostrado na tela do centro de usinagem CNC.

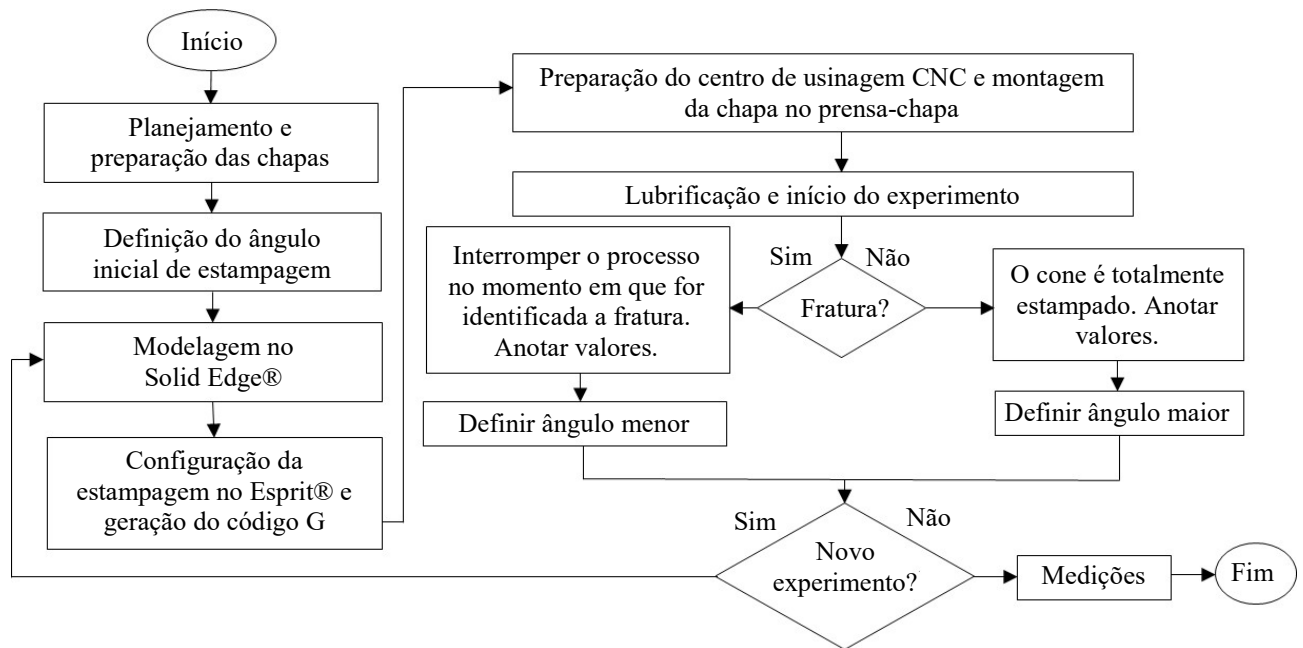


Figura 4. Fluxograma da metodologia experimental.

2.2.2. Ângulo de Parede do Cone

O ângulo inicial de estampagem do primeiro experimento foi de 70°, definido a partir do trabalho de “Golabi e Khazaali (2014) que realizaram testes com aço inox 304 com espessuras de 0,3 a 1,0 mm e ângulos de 63°, 68°, 73°, 78° e 84°”. A partir desta definição foi feito o aumento ou diminuição do ângulo de parede em função do surgimento ou não de fraturas durante o experimento. Os primeiros experimentos foram realizados com o aumento ou diminuição do ângulo de parede em 10° a partir do ângulo inicial até que se tenha entre dois experimentos consecutivos um com fratura e outro sem, ex.: no experimento 1 o cone possui ângulo de 70° e caso sofra fratura no experimento 2 o cone terá ângulo de 60°; caso não sofra fratura o cone terá ângulo de 80°. A partir da obtenção de dois experimentos consecutivos, um com fratura e o outro sem os próximos ângulos serão calculados como a metade da diferença dos ângulos entre os dois cones somado ao ângulo do cone que não fraturou. Alguns ângulos projetados possuem exatidão de milésimos de milímetros ou maiores que não são alcançados em medidas com instrumentos de medição de ângulos convencionais como projetores de perfil.

2.2.3. Parâmetros para o Processo ISF

Os valores dos parâmetros estabelecidos para a velocidade de avanço da ferramenta (v), velocidade de rotação do fuso (ω), incremento do passe vertical (Δz) e tipo de movimento da ferramenta são fixos, ou seja, não variam de experimento para experimento e foram baseados em Mcanulty; Jeswiet; Doolan, (2017). Estes parâmetros fazem parte da programação e configuração do processo de estampagem no Esprit®. A Tabela 2 apresenta os parâmetros estabelecidos.

Tabela 2. Valores dos parâmetros estabelecidos para os experimentos.

Parâmetro	Valores estabelecido para todos os experimentos
Velocidade de avanço da ferramenta (v)	1.500 mm/min.
Velocidade rotação do fuso (ω)	50 rpm
Incremento do passe vertical (Δz)	0,5 mm

2.2.4. Medição das Espessuras

A máquina de eletroerosão marca Charmilles modelo Robofil 310 foi utilizada para cortar os corpos de prova no sentido longitudinal da chapa passando pelo centro geométrico de cada cone a fim de que seja possível realizar a medição da espessura na parede do corpo de prova. Na borda da parede do cone cortado de cada experimento foram marcados pontos de medição espaçados em 5 mm desde a base superior até a inferior, um micrômetro analógico de ponta arredondada marca Mitutoyo com precisão 0,01 mm foi utilizado para realizar as medições em cada ponto.

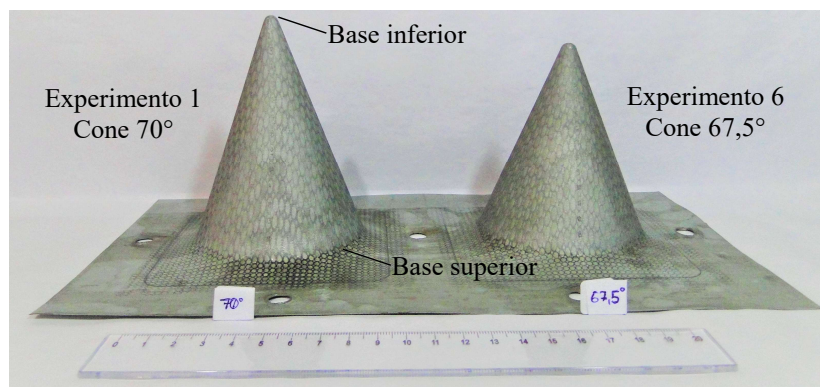
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados 8 experimentos conforme metodologia e parâmetros estabelecidos. Os dados coletados estão descritos na Tab. 3 e os corpos de prova ensaiados são mostrados nas Fig. de 5 a 8.

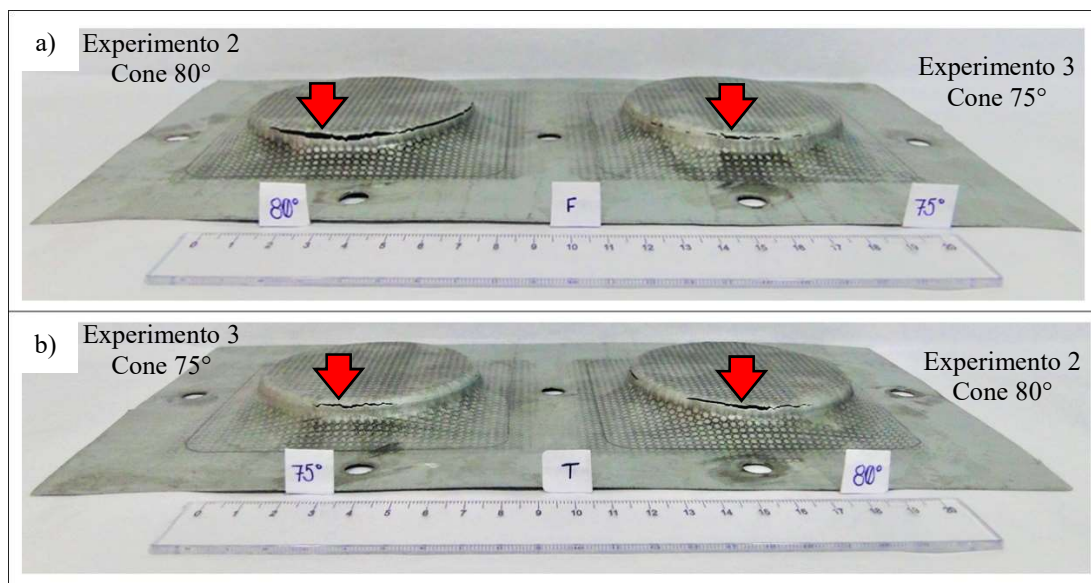
Tabela 3. Resultados dos experimentos realizados.

N.º experimento	Ângulo de parede (θ) projetado	Profundidade máxima projetada no cone (mm)	Houve fratura?	Tipo de fratura	Profundidade atingida no processo <i>ISF</i> (mm)
1	70°	107,15	Não	-	107,15
2	80°	107,15	Sim	Cisalhamento horizontal	11,07
3	75°	107,15	Sim	Cisalhamento horizontal	12,07
4	72,5°	107,15	Sim	Cisalhamento horizontal	13,61
5	71,25°	107,15	Sim	Cisalhamento horizontal	15,3
6	67,5°	94,15	Não	-	94,15
7	70,625°	107,15	Sim	Orifícios	28,55
8	70,3125°	107,15	Não	-	107,15

A Figura 5 mostra os cones dos experimentos 1 e 6, respectivamente com ângulos de parede de 70° e 67,5°. Não houve fratura e as peças foram estampadas até a profundidade máxima de 107,15 mm para o cone do experimento 1 e 94,15 mm para o cone do experimento 6. A diferença de altura entre o cone de 70° e o 67,5° é devido ao fato de que quanto mais o ângulo tende a 90° maior a profundidade possível de ser atingida.

**Figura 5. Experimentos 1 e 6: Cones com ângulo de parede de 70° e 67,5°.**

A Figura 6 mostra os experimentos 2 e 3, respectivamente cones com ângulos de parede de 80° e 75°. Houve fratura na profundidade de 11,07 mm para o cone de 80° e 12,07 mm para o cone de 75° conforme mostram as setas vermelhas. Em ambos os experimentos as fraturas caracterizaram-se por cisalhamentos horizontais na parede do cone, exatamente no local onde o punção passou durante a execução de sua última trajetória antes que fosse identificada a fratura e interrompido o processo. O experimento 2 possui fraturas maiores e mais severas que no 3 devido ao ângulo de parede mais acentuado.

**Figura 6. Experimentos 2 e 3 - Cones com ângulo de parede de 80° e 75°: a) vista frontal, b) vista posterior.**

A Figura 7 mostra os experimentos 4 e 5, respectivamente cones com ângulo de parede de $72,5^\circ$ e $71,25^\circ$. Houve fratura na profundidade de 13,61 mm para o cone de $72,5^\circ$ e 15,3 mm para o cone de $71,25^\circ$. As fraturas em ambos experimentos se caracterizaram por cisalhamentos horizontais na parede do cone e surgiram exatamente no local por onde o punção passou durante a execução de sua última trajetória no centro de usinagem CNC antes que fosse identificada a fratura e interrompido o processo. À medida que o ângulo de parede diminui a severidade da fratura também diminui; desta forma as fraturas no experimento 4 são mais severas que no experimento 5 devido ao maior ângulo de parede, além disso o experimento 5 possui apenas um ponto de fratura enquanto o experimento 4 possui dois pontos conforme pode ser visto nas setas vermelhas da Fig. 7a e b.

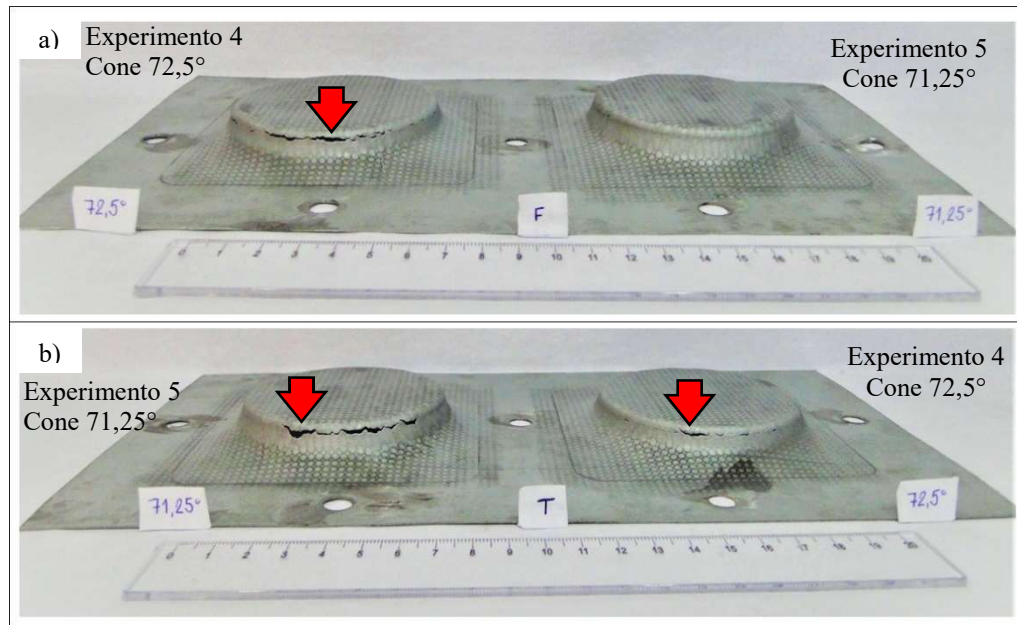


Figura 7. Experimentos 4 e 5 – Cones com ângulo de parede de $72,5^\circ$ e $71,25^\circ$: a) vista frontal. b) vista posterior.

A Figura 8 mostra os experimentos 7 e 8, respectivamente cones com ângulo de parede de $70,625^\circ$ e $70,3125^\circ$. O cone com $70,625^\circ$ do experimento 7 foi estampado até a profundidade de 28,55 mm onde foram identificadas fraturas. Houve transição de severidade e tipo de fratura dos experimentos 2, 3, 4 e 5 para o experimento 7, respectivamente de cisalhamentos horizontais para orifícios na parede do cone o que indicou menor severidade que as demais fraturas observadas, garantiu maior profundidade de estampagem, maior integridade da parede do cone indicando que o limite de estampabilidade, objetivo deste trabalho, estava próximo. No experimento 8 foi confirmado as indicações do experimento 7 pois, o cone com $70,3125^\circ$ não fraturou e atingiu a profundidade máxima de estampagem de 107,15 mm.

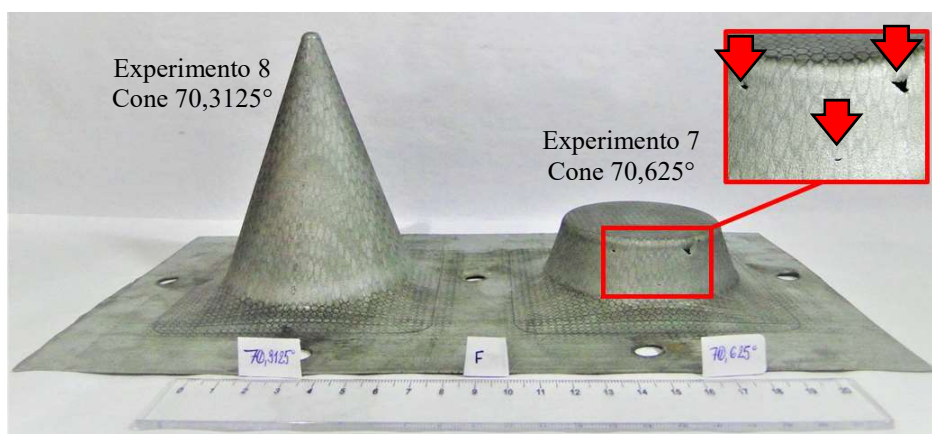


Figura 8. Experimentos 7 e 8 – Cones com ângulo de parede de $70,625^\circ$ e $70,3125^\circ$.

A principal constatação obtida nos experimentos é que o ângulo de parede crítico da chapa de aço IF com espessura de 0,6 mm no processo ISF para a forma geométrica de um cone dentro dos parâmetros estabelecidos é de $70,3125^\circ$, acima deste ângulo o cone está sujeito a fraturas em diferentes graus de severidade e em diferentes profundidades. Quanto maior o ângulo de parede acima do ângulo crítico maior a severidade da fratura e menor a profundidade atingida. Abaixo do ângulo de parede crítico o cone é estampado totalmente sem fraturas até a profundidade máxima como pode ser visto

nos experimentos 1, 6 e 8. “Segundo Li *et al.* (2017) o ângulo de estampagem para geometrias pré-determinadas pode ser considerado como um indicador de estampabilidade no processo *ISF* devido ao fato de que uma peça com ângulo de estampagem maior que o crítico ainda pode ser estampada em uma profundidade menor que a limite”. Neste tocante a Fig. 9 apresenta o gráfico para o indicador citado com a transição do ângulo de parede crítico entre os pontos dos experimentos 7 e 8.

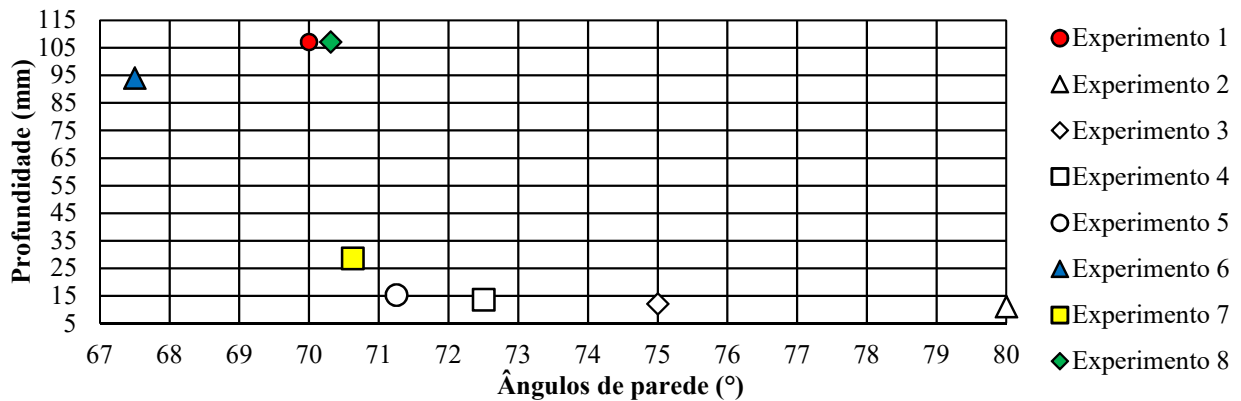


Figura 9. Relação profundidade x ângulo de parede dos experimentos realizados.

Jeswiet *et al.* (2015) afirmam que o ângulo de parede máximo da peça determina a espessura final da parede da chapa após a estampagem. Segundo Jeswiet *et al.* (2005), a medida que o ângulo aumenta, a redução da espessura da parede da chapa atinge um valor mínimo onde a fratura ocorre como consequência e assim pode ser determinado o respectivo limite de estampabilidade do material. O ângulo máximo e a espessura final da parede da peça são estimados utilizando a lei do cosseno (Hirt *et al.*, 2004; Jeswiet *et al.*, 2005; Jeswiet *et al.*, 2015; Mcanulty; Jeswiet; Doolan, 2017; Li *et al.*, 2017) conforme Eq. 1 sendo “Ef” a espessura final da chapa após a estampagem em mm, “Ei” a espessura inicial da chapa em mm e “ ϕ ” o ângulo de parede em graus.

$$Ef = Ei \times \cos \phi \quad (1)$$

A Tabela 4 apresenta as espessuras finais estimadas pela lei do cosseno (Ef est.) e as espessuras finais medidas em cada ponto com o micrômetro (Ef med.). Os experimentos 2, 3, 4 e 5 foram descartados da medição de espessuras devido à pequena profundidade atingida no processo *ISF* e ao cisalhamento horizontal que não proporcionaram pontos de medição com o micrômetro.

Tabela 4. Pontos de medição de espessura: Ef estimada x Ef medida.

Pontos de medição	Exp. 1 ($\phi = 70^\circ$)	Exp. 6 ($\phi = 67,5^\circ$)	Exp. 7 ($\phi = 70,625^\circ$)	Exp. 8 ($\phi = 70,3125^\circ$)
	Ef est. = 0,205 mm	Ef est. = 0,230 mm	Ef est. = 0,199 mm	Ef est. = 0,202 mm
	Ef med. (mm)	Ef med. (mm)	Ef med. (mm)	Ef med. (mm)
1	0,150	0,180	0,140	0,140
2	0,210	0,230	0,160	0,200
3	0,220	0,240	0,190	0,200
4	0,200	0,210	0,180	0,230
5	0,210	0,230	-	0,190
6	0,215	0,220	-	0,200
7	0,215	0,225	-	0,190
8	0,230	0,230	-	0,190
9	0,220	0,220	-	0,190
10	0,205	0,220	-	0,180
11	0,210	0,210	-	0,180
12	0,210	0,220	-	0,170
13	0,205	0,220	-	0,180
14	0,200	0,220	-	0,190
15	0,210	0,220	-	0,180
16	0,220	0,215	-	0,170
17	0,200	0,180	-	0,160
18	0,210	0,210	-	0,160
19	0,200	-	-	0,160
20	0,210	-	-	0,190

No experimento 1, cone com ângulo de parede de 70° , a média da espessura medida foi de 0,208 mm contra o valor estimado pela lei do cosseno de 0,205 mm representando variação de $\pm 1,1\%$. A Figura 10 mostra os resultados obtidos entre o valor estimado e medido.

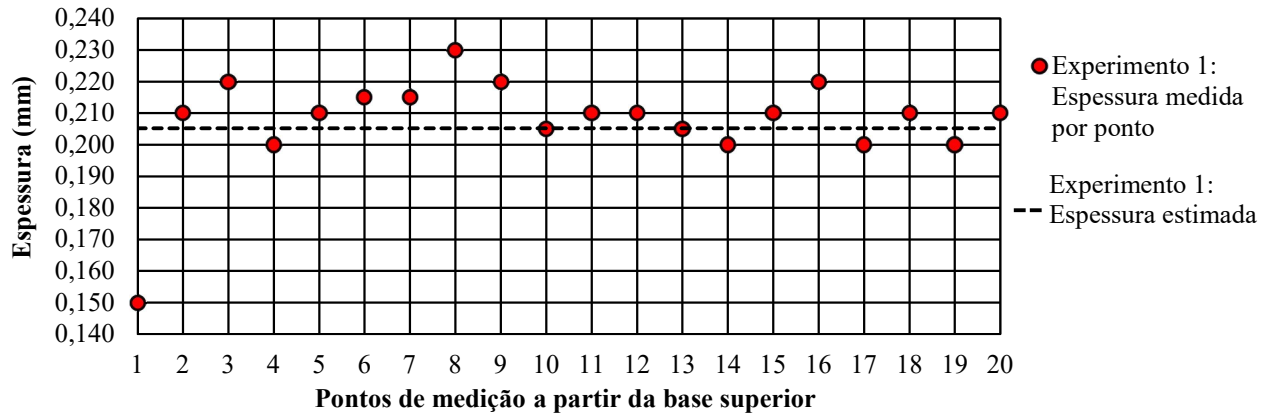


Figura 10. Experimento 1 (Cone 70°): Espessura estimada x medida por ponto.

No experimento 6, cone com ângulo de parede de $67,5^\circ$, a média da espessura medida foi de 0,217 mm contra o valor estimado pela lei do cosseno de 0,230 mm representando variação de $\pm 5,6\%$. A Figura 11 mostra os resultados obtidos entre o valor estimado e o medido.

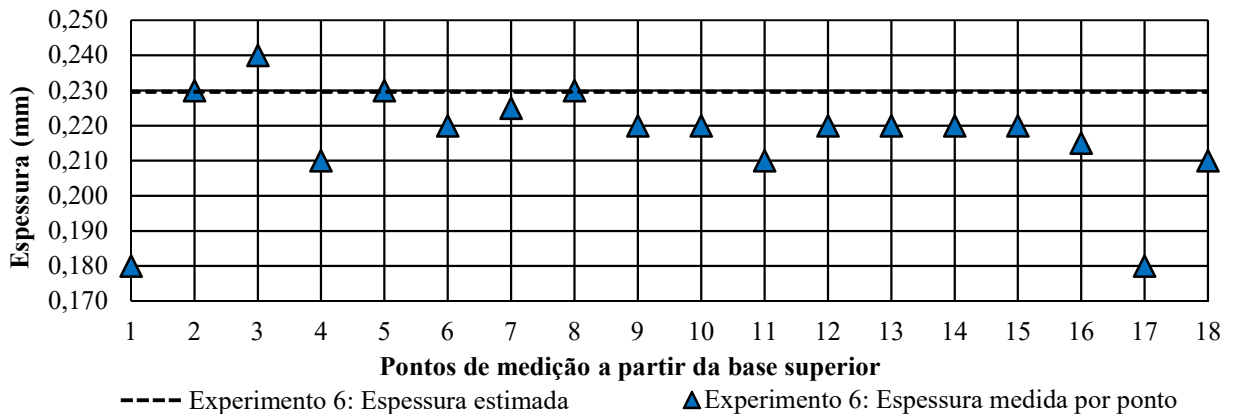


Figura 11. Experimento 6 (Cone $67,5^\circ$): Espessura estimada x medida por ponto.

No experimento 7, cone com ângulo de parede de $70,625^\circ$ foi possível medir apenas 4 pontos ao longo da parede do cone devido à pequena profundidade de estampagem atingida. A média da espessura medida foi de 0,168 mm contra o valor estimado pela lei do cosseno de 0,199 mm representando variação de $\pm 15,9\%$. A Figura 12 mostra os resultados obtidos entre o valor estimado e o medido.

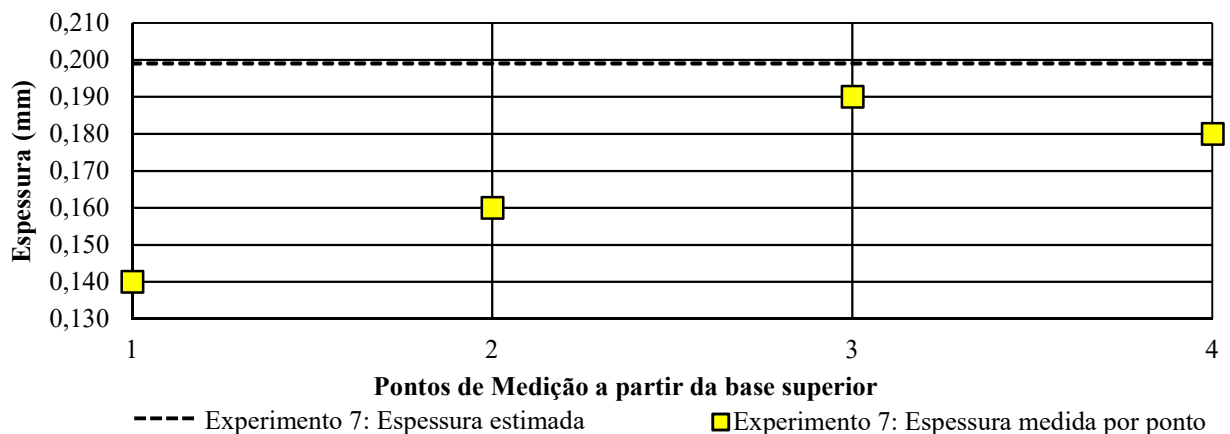


Figura 12. Experimento 7 (Cone $70,625^\circ$): Espessura estimada x medida por ponto.

No experimento 8, cone com ângulo de parede de $70,3125^\circ$ a média da espessura medida foi de 0,183 mm contra o valor estimado pela lei do cosseno de 0,202 mm representando variação de $\pm 9,7\%$. A Figura 13 mostra os resultados obtidos entre o valor estimado e o medido.

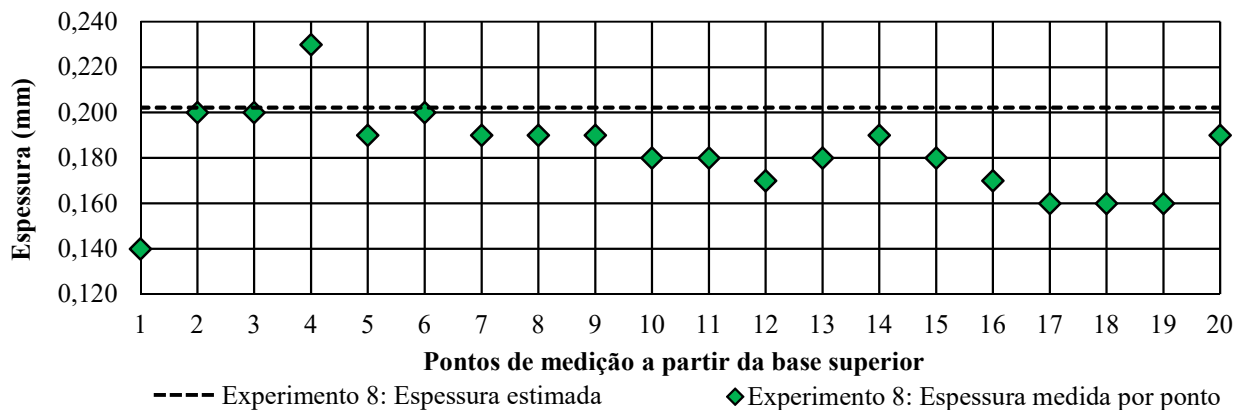


Figura 13. Experimento 8 (Cone 70,3125°): Espessura estimada x medida por ponto.

4. CONCLUSÕES

Para o aço *IF* em chapas com espessura de 0,6 mm, estampado pelo processo *ISF* nos parâmetros e procedimentos utilizados, na forma geométrica de cone com diâmetro da base de 90 mm apresentou como limite de estampabilidade ângulo de parede de $70,3125^\circ$. Ângulos de parede maiores ficam sujeitos a fraturas com diferentes graus de severidade que limitam a integridade da peça no formato geométrico desejado em diferentes profundidades devido à fratura por cisalhamento.

A espessura medida no primeiro ponto de cada experimento, ou seja, na base superior da peça, apresenta grande divergência em relação a espessura estimada e aos demais pontos medidos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos professores do IFSP – Campus Itapetininga pelo acompanhamento e auxílio no uso de equipamentos dos laboratórios, à UNICAMP representada pelo Prof. Dr. Sérgio Tonini Button pela doação da bobina de aço *IF*, apoio incondicional no empréstimo de equipamentos, sugestões e discussões técnicas e à Nivelartec© pela doação do dispositivo de fixação da chapa no prensa-chapas.

6. REFERÊNCIAS

- Arcelor Mittal, 2017, “Arcelor Mittal Vega Aços Planos”, Disponível em: <http://www.constructalia.com/repository/transfer/br/resources/Catalogo/05858782ENLACE_PDF.pdf>. Acesso em: 15 set. 2017.
- Emmens, W.C., Sebastiani, G. and Boogaard, A.H., 2010, “The Technology of Incremental Sheet Forming — A Brief Review of the History”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 8, pp. 981-997, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014>.
- Filice, L., Fratini, L. and Micari, F., 2002, “Analysis of Material Formability in Incremental Forming”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1, pp. 199-202. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61499-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61499-1).
- Fratini, L. *et al.*, 2004, “Influence of Mechanical Properties of the Sheet Material on Formability in Single Point Incremental Forming”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 207-210. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60680-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60680-5).
- Golabi, S. and Khazaali, H., 2014, “Determining Frustum Depth of 304 Stainless Steel Plates with Various Diameters and Thicknesses by Incremental Forming”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 8, pp. 3273-3278. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-014-0738-6>.
- Gomes, L. C. P., 2012, “Estudo das Propriedades Mecânicas e da Estampabilidade de Aços IF”, Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas/SP.
- Ham, M. and Jeswiet, J., 2007, “Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 277-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.064>.
- Hirt, G. *et al.*, 2004, “Forming Strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 203-206, [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60679-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60679-9).
- Jackson, K. and Allwood, J., 2009, “The Mechanics of Incremental Sheet Forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 3, pp. 1158-1174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025>.

- Jeswiet, J. *et al.*, 2005, "Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 54, No. 2, pp. 88-114. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60021-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60021-3).
- Jeswiet, J. *et al.*, 2008, "Metal Forming Progress Since 2000", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 2-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.06.005>.
- Jeswiet, J. *et al.*, 2015, "Single Point and Asymmetric Incremental Forming", Advances in Manufacturing, Vol. 3, No. 4, pp. 253-262. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-015-0126-1>.
- Kumar, Y. and Kumar, S., 2015, "Incremental Sheet Forming (ISF)", Advances in Material Forming and Joining, pp. 29-46. http://dx.doi.org/10.1007/978-81-322-2355-9_2.
- Li, Y. *et al.*, 2017, "A Review on the Recent Development of Incremental Sheet-Forming Process", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 92, No. 5-8, pp. 2439-2462. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0251-z>.
- Lu, B. *et al.*, 2014, "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, Vol. 85, pp. 14-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.04.007>.
- Mcanulty, T., Jeswiet, J. and Doolan, M., 2017, "Formability in Single Point Incremental Forming: A Comparative Analysis of the State of the Art", CIRP - Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 16, pp. 43-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.07.003>.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETERMINATION OF THE FORMING LIMITS OF THE IF STEEL BY THE INCREMENTAL SHEET FORMING PROCESS

Gustavo Henrique de Paula Santos, gustavohenrique@ifsp.edu.br¹
Lucas Clarindo Pereira, lucasclarindo@ifsp.edu.br¹
Mário Luiz Nunes da Silva, marioluiznunes@ifsp.edu.br¹
Pedro Roberto Goulart, pedro.goulart@ifsp.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP – Campus Itapetininga, Avenida João Olímpio de Oliveira, 1561, Vila Asem, Itapetininga - SP, CEP 18202-000

Abstract. *New metal forming processes have been developed to meet the demands of the market that requires increasingly custom parts and short manufacturing times. In this regard, an alternative to meet these requests is the incremental sheet forming process (ISF), which is based on the application of a local and progressive plastic deformation produced by a tool that is guided by a computerized numerical control machine (CNC) and presses a sheet along specific paths in order to forming a geometry of a part. Different materials have been used in the ISF process studies ranging from metals to polymers, but few studies have been done on steels and their alloys, especially on steels dedicated to forming, such as interstitial free steel (IF steel). This study presents the results of 8 experiments performed with IF steel sheets with a thickness of 0.6mm by mean of ISF process that determined, for a cone, the limiting forming angle of 70.3125 °. Above this limit the material is subject to fractures with different degrees of severity and at different depths.*

Keywords: *incremental sheet forming, interstitial free steel, drawability limits*