



# 38<sup>th</sup> SENAFOR

22<sup>nd</sup> International Forging Conference - Brazil

8<sup>th</sup> International Sheet Metal Forming Conference/5<sup>th</sup> BrDDRG Congress

7<sup>th</sup> International Powder Metallurgy Conference Brazil

8<sup>th</sup> International Conference on Materials and Processes for Renewable Energy

## Análise do Processo de Estampagem Incremental Aplicado em uma Geometria Tubular

Silva. Rafael C. <sup>(1)</sup>  
Reis. Cesar G. dos <sup>(2)</sup>  
Schaeffer. Lirio <sup>(3)</sup>

### RESUMO

Estudos de estampagem incremental em chapas finas (ISF) engajaram este trabalho, onde implementa-se os princípios do processo em uma geometria tubular de parede fina fabricado em aço inoxidável AISI 304, avaliando sua viabilidade técnica. Realizaram-se quatro ensaios, sendo eles com duas geometrias diferentes, três ferramentas semiesféricas com diâmetros de 8, 10 e 12mm e diferentes incrementos verticais. Obteve-se o melhor resultado no quarto ensaio, com a geometria helicoidal, ferramenta de diâmetro 12mm e incremento de 0,1mm.

**Palavras Chave — Estampagem Incremental, Aço Inoxidável AISI304, Geometria Tubular.**

### ABSTRACT

Studies of ISF – Incremental Sheet Forming have engage this work, where the principles of this method are applied in a thin-walled tubular geometry of stainless steel AISI 304, evaluating its technical feasibility. Four tests were performed with two different geometries, three semi-spherical tools with diameters of 8, 10 and 12mm and different vertical increments. The finest result was obtained in the fourth test, with the helical geometry, 12mm diameter tool and 0.1mm increment.

**Keywords — Incremental Sheet Forming, Stainless Steel AISI304, Tubular Geometry.**

### 1. INTRODUÇÃO

A estampagem de chapas é um processo de conformação mecânica de baixo custo e alta produtividade utilizada em grandes volumes de fabricação. Porém há demanda para a fabricação de itens unitários ou pequenos lotes de peças, como para a fabricação de protótipos na fase de desenvolvimento de um novo produto ou na fabricação de itens personalizados, na qual o volume de peças não justifica financeiramente o desenvolvimento de um ferramental completo **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

O método de estampagem incremental (ISF- *Incremental Sheet Forming*) é uma solução

<sup>(1)</sup> Mechanical Engineer, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

<sup>(2)</sup> Prof. Msc. Eng.; Centro Universitário e Faculdades UNIFTEC, Brazil.

<sup>(3)</sup> Prof. Dr. Ing.; Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

possível para estes casos pois com uma ferramenta e um dispositivo de fixação é possível gerar diversos modelos, reduzindo investimentos [9]-[11]. Neste método, a conformação é realizada por meio de sucessivas deformações aplicadas localmente pela ferramenta executando pequenos deslocamentos incrementais na chapa metálica.

A estampagem incremental em chapas planas é amplamente estudada ([4]-[5]-[7]-[10]-[14]-[16] [18]) com variações nos parâmetros do processo, como espessuras, ferramentas, ângulos de parede e variações no incremento. Porém não foram encontrados ensaios em tubos de paredes finas. Portanto este trabalho visa transferir e ensaiar as técnicas do processo já conhecido em chapa plana para a geometria tubular.

## 1.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Em um processo de IFS a peça é fixada em um dispositivo enquanto a ferramenta se movimenta com determinado avanço contra a chapa metálica, causando deformação no material (Figura 1). Um dos principais diferenciais do processo são as baixas forças, pois a deformação acontece ponto a ponto com pequenos deslocamentos até a formação da geometria final da peça.

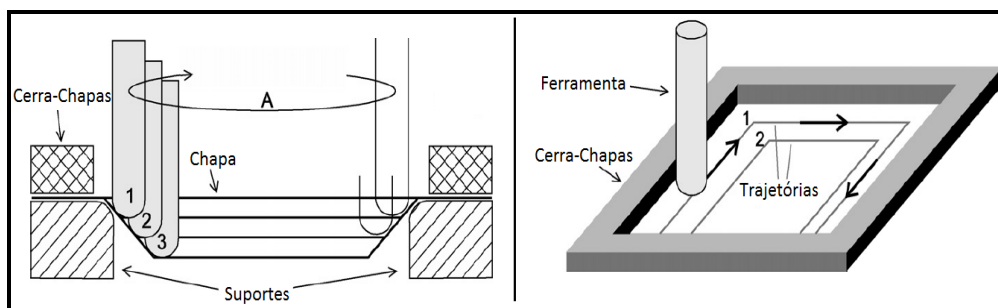


Figura 1: Processo de estampagem incremental em Chapas - [17]

Com o desenvolvimento de máquinas-ferramentas controladas numericamente e a aplicação de software de CAD (Projeto Auxiliado por Computador) e CAM (Manufatura Assistida por Computador) o processo torna-se significativamente flexível e com baixo custo de aplicação comparado a processos de conformação.

### 1.1.1 Estampagem Incremental de Ponto Simples

A Estampagem Incremental de Ponto Simples ou SPIF se caracteriza por não necessitar de matriz de apoio durante a conformação sendo que a estampagem sempre ocorre de forma negativa (Figura 1). O processo possui somente um ponto de contato, resultando em uma deformação plástica pontual enquanto percorre a trajetória definida pelo perfil geométrico a ser fabricado. [6]-[10]

Pode ser considerado um dos mais fáceis e flexíveis de se realizar pois necessita apenas de um prensa chapas e uma ferramenta de conformação. Porém apresenta qualidade geométrica inferior comparado ao modelo virtual ou quando comparado a outros processos. Para aumentar a qualidade geométrica pode ser realizada a conformação através de múltiplos estágios, realizando um acabamento sobre a geometria efetuando uma calibração. [16]-**Erro! Fonte de referência não encontrada.**

### 1.1.2 Estampagem Incremental com Ponto Duplo

O método de conformação incremental com duplo ponto ou TPIF (*Two Point Incremental Sheet Forming*) tem como característica a utilização de uma matriz parcial ou total, utilizando dois pontos de contato com a chapa durante o processo de conformação [1]-[4]-**Erro! Fonte de referência não encontrada.** Um dos fatores positivos neste processo é o aumento de qualidade do produto em relação a geometria, podendo ser desenvolvidas geometrias de grande complexidade. No entanto o custo do processo aumenta devido a necessidade de fabricação de uma matriz. [15]

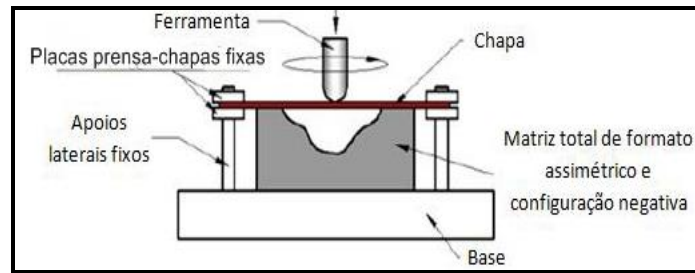


Figura 2: Representação do método TPIF com matriz negativa - [15]

### 1.1.3 Estimativa da espessura

Estudos apontam para um ângulo máximo de parede no produto de 65°. Ultrapassando este valor se torna muito frequente a ruptura ou uma baixa resistência mecânica localizada causada pela diminuição drástica da espessura da chapa [7]. O ângulo máximo de estampagem é determinado por uma relação direta entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, considerando volume constante, demonstrado na equação 1.

$$S_1 = S_0 \operatorname{Sen}(90^\circ - \alpha^\circ) \quad (1)$$

Onde  $S_0$  é a espessura inicial do material e  $S_1$  a espessura da chapa medida em um determinado estágio do processo de conformação e  $\alpha$  o ângulo de inclinação da chapa [7]. Na Figura 3 é mostrado o comportamento da chapa em relação a variação do ângulo de inclinação da parede.

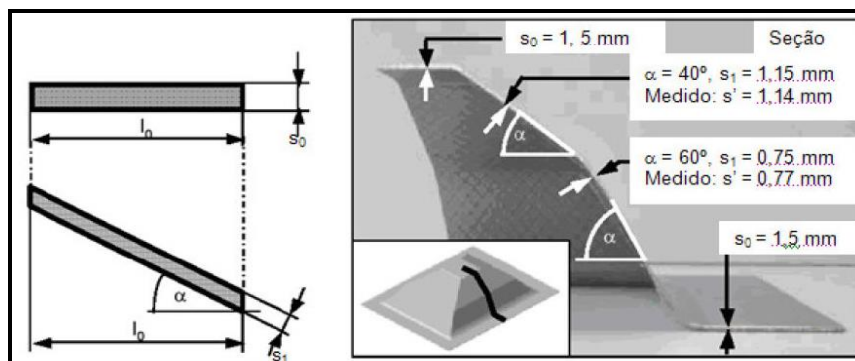


Figura 3: Constância de volume - [12]

### 1.1.4 Estimativa de Força

Os estudos realizados por [1] e [5] demonstram que a força vertical ( $F_v$ ) e a força horizontal ( $F_h$ ) podem ser estimadas pelas equações 2 e 3.

$$F_v = \pi R_T S_0 \sigma_s \operatorname{sen} \beta \quad (2)$$

$$F_h = R_T S_0 \sigma_s (\operatorname{sen} \beta + 1 - \cos \beta) \quad (3)$$

Sendo que nestes cálculos o  $R_T$  é o raio da ferramenta de conformação,  $S_0$  é a espessura inicial da chapa,  $\sigma_s$  é a tensão de escoamento do material e  $\beta$  conforme Figura 4 é a metade do ângulo inferior do cone formado pelo limite de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho.

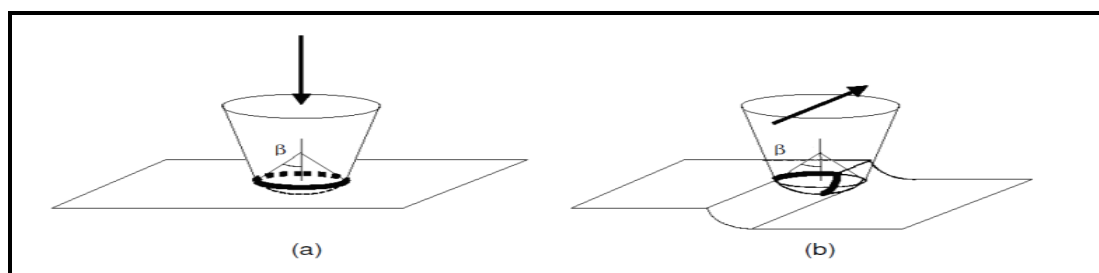


Figura 4: Ilustração da estimativa de força

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A matéria prima para estampagem é um tubo redondo de diâmetro 101,6 mm e parede de 1,2 mm, fabricado em de aço inoxidável AISI304 com acabamento externo polido e com costura conforme norma ASTM A-554. As propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI304 utilizado neste trabalho tem como base bibliográfica a dissertação de [8], demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades mecânicas do AISI304

Material	Rm [Mpa]	$\sigma_s$ [Mpa]	A [%]	n	Kf [Mpa]	Dureza [HB]
AISI 304	630	271	59	0,357	282,5	156

Para comparação entre o material utilizado neste trabalho e a referência bibliográfica foram comparadas as propriedades do certificado de qualidade. Nas amostras ensaiadas a dureza foi medida em 147 HB. Com estas propriedades espera-se uma força de conformação maior (devido  $\sigma_s$  superior) e uma profundidade máxima semelhante ao material do Ferrarini (Rm e Alogamento).

Tabela 2: Comparação das propriedades mecânicas

Fonte	Rm [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]	A [%]	Dureza [HB]
Ferrarini (2004)	630	271	59	156
Certificado	702	305	57	148
Diferença [%]	10	11,5	3,5	

Na realização dos ensaios utilizou-se um Torno CNC (Figura 5), alguns fatores foram importantes para escolha da máquina como: disponibilidade da máquina, domínio da linguagem de programação, tamanho da peça e esforços suportados pela máquina. A amostra foi fixada as castanhas e ao contraponto da máquina com auxílio de buchas de apoio.

Tabela 3: Característica do torno Romi GL350M

Potência total Instalada [kW]	30
Esforço suportado no eixo X [N]	5000
Esforço suportado no eixo Z [N]	6200
Mínimo Incremento de Posicionamento [mm]	0,001
Comando CNC	Fanuc Oi - TD



Figura 5: a)Torno CNC utilizados nos experimentos. b) Sistema de fixação. c) Ferramenta utilizada

As ferramentas utilizadas no processo possuem geometria com ponta semiesférica, fabricada com aço SAE 4140 com uma dureza média de 23 HRC e acabamento polido, com diâmetros de 8,10 e 12mm.

A graxa utilizada é recomendada para rolamentos, do tipo sabão a base de lítio com bissulfeto de molibdênio grafitada, com consistência 2 na escala NLGI (National Grease Lubricating Institute). Esta graxa tem como temperatura de trabalho entre -10 C° até 150 C°. Os principais benefícios desta graxa são: proteção contra cargas pesadas e de choque, excelente estabilidade ao cisalhamento [2].

Além dos dispositivos físicos descritos, também foram utilizados os recursos computacionais, software CAD e CAM. A estratégia empregada nos ensaios foi baseada no processo denominado de Estampagem Incremental com Ponto Simples ou SPIF (item 1.1.1).

Realizaram-se quatro ensaios, sendo os três primeiros com deslocamento no sentido longitudinal do tubo (Figura 6a), variando o incremento de conformação e o diâmetro da ferramenta.

Esta geometria favorece para que a força horizontal atue somente no sentido axial do tubo eliminando esforços de torção. O quarto ensaio é realizado em formato helicoidal no tubo, conforme ilustra a Figura 6b. A Tabela 4 mostra os parâmetros considerados em cada ensaio, tendo como referencial a máquina e o programa CAM utilizados.

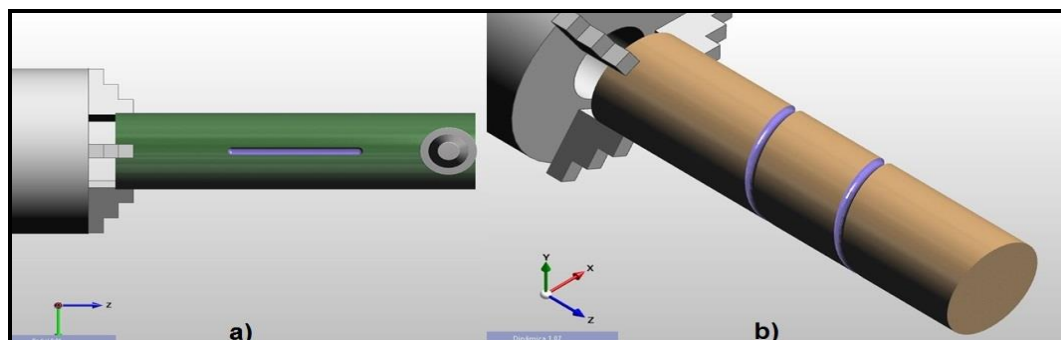


Figura 6: Imagem 3D do CAM

Tabela 4: Parâmetros utilizados nos ensaios

Parâmetro	Ensaio I	Ensaio II	Ensaio III	Ensaio IV
Pressão da Placa [kPA]	900	900	900	900
Pressão do Contra Ponto [N]	1176,8	1176,8	1176,8	1176,8
Ø da Ferramenta [mm]	10	10	8	12
Rotação da ferramenta [Hz]	0	0	0	0
Incremento ( $\Delta z$ ) [mm]	0,1	0,3	0,3	0,1
Avanço Lateral [mm/s]	16,67	16,67	16,67	16,67
Avanço Vertical [mm/s]	16,67	16,67	16,67	16,67
Sentido de deslocamento	Otimizado	Otimizado	Otimizado	Otimizado
Tempo Programado	7' 06"	7' 06"	7' 06"	67'
Profundidade programada [mm]	5	15	15	10

### 3. RESULTADOS

A Figura 12 apresenta as geometrias obtidas nos ensaios, no qual os ensaios I, III e IV se comportaram de forma esperada com a ferramenta deslocando livre sobre a peça permitindo realizar a conformação até a profundidade programada. No ensaio II não foi possível atingir a profundidade programa pois após 5mm de conformação a ferramenta alterou a distância de fixação H conforme ilustra a Figura 5c, em função da força vertical na ferramenta.



Figura 7: Amostras no ensaio I a IV.

Nos ensaios I, II e III os modelos apresentaram erros de geometria em algumas regiões, tendendo a formar uma região plana no tubo, realizaram-se cortes perpendiculares ao do tubo para representar esta deformação (Figura 8).

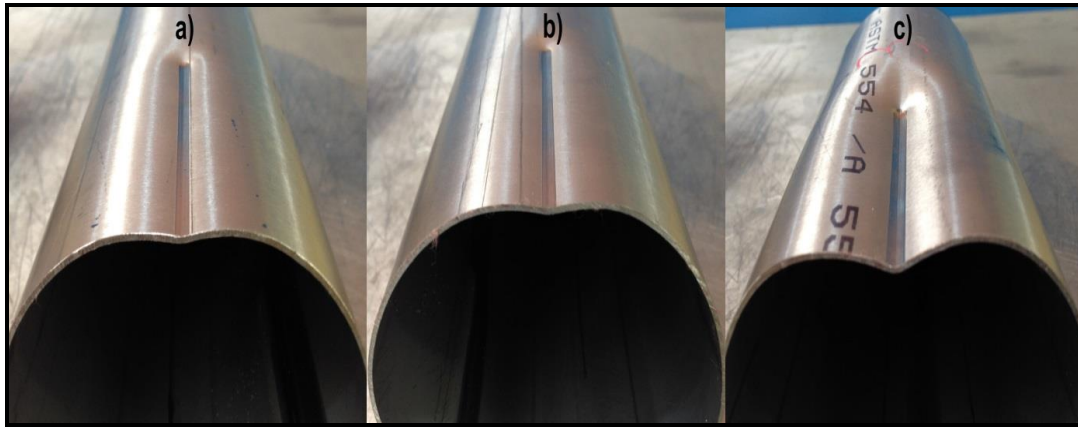


Figura 8: Comparativo dos perfis: a) ensaio I; b) ensaio II; c) ensaio III;

O ensaio IV apresentou uma deformação maior nas regiões iniciais dos perfis, ou seja, no ponto de incremento da ferramenta. A Figura 9 demonstra a região de incremento.

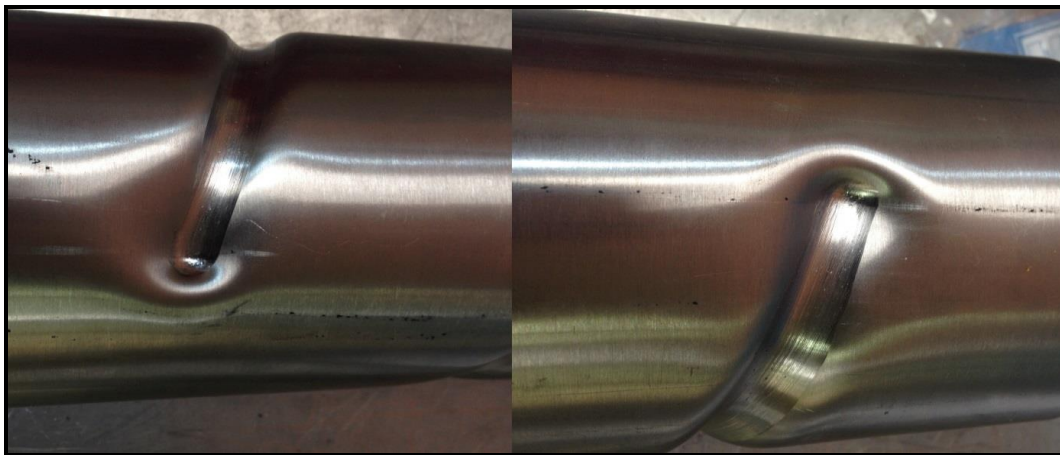


Figura 9: Defeito na entrada de ferramenta

Outro defeito observado na peça é um amassamento devido aos esforços de torção ocorridos durante o processo, ilustrado pelo círculo vermelho na Figura 10a. Para uma melhor visualização do ocorrido realizou-se um corte perpendicular ao sentido longitudinal do tubo. A Figura 10b destaca que o ponto de falha ocorreu na região da costura do tubo.

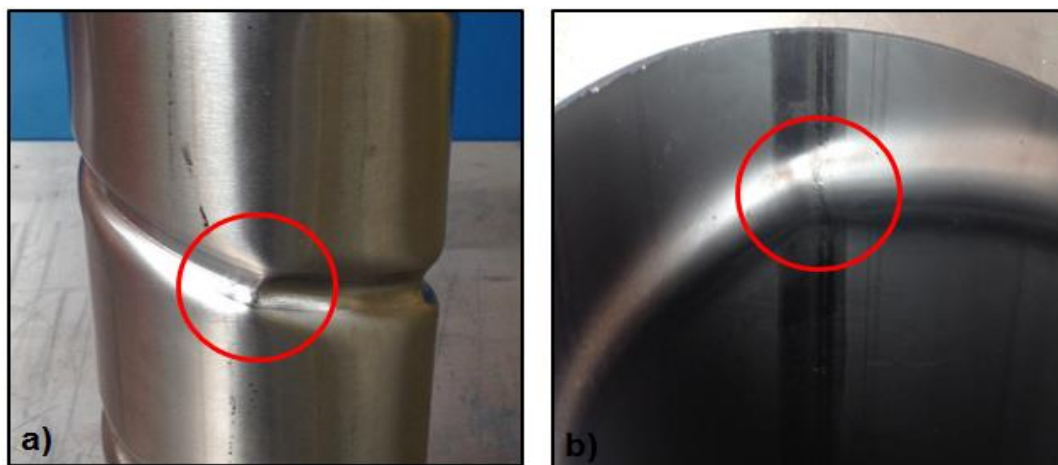


Figura 10: a) Falha de torção na geometria b) Ponto de falha

Observa-se acabamento mais rugoso nas regiões conformadas quando comparados ao tubo original, fica evidente que o arraste da ferramenta alterou o acabamento da superfície da peça. A Figura 11 mostra os detalhes da textura produzida nos corpos de prova.



Figura 11: Superfície do corpo de prova

Conforme equação 1 apresentada no item 1.1.3, foram estimadas as espessuras finais de cada ensaio. Obteve-se ângulo  $\alpha$  da equação 2 utilizando a peça conformada como base, traçando o ângulo da região conformada da peça e utilizando a espessura inicial da peça de 1,2mm. A Tabela 5 demonstra os resultados, comparando com as espessuras medidas em cada ensaio.

Tabela 5: Espessura Final

	Ângulo de inclinação $\alpha$ [°]	Espessura Estimada [mm]	Espessura Medida [mm]	Varição [%]
<b>Ensaio I</b>	11	1,177	1,16	1,45
<b>Ensaio II</b>	12	1,173	1,17	0,26
<b>Ensaio III</b>	20	1,127	1,12	0,62
<b>Ensaio IV</b>	45	0,84	0,76	10,53

Com a análise dos resultados obtidos, verifica-se que as medidas finais encontradas foram menores que as calculadas, sendo que a variação máxima encontrada entre a relação foi de 10,53%. As espessuras foram medidas diretamente, com um corte transversal nas amostras, conforme representado na Figura 12 foram realizadas medições em diversos pontos do perfil a fim de demonstrar o efeito da redução da espessura no processo de ISF.

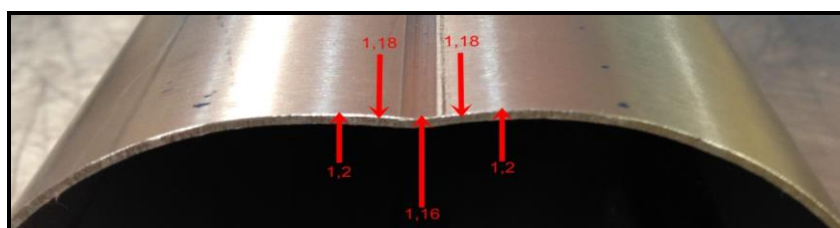


Figura 12: Redução da espessura no ensaio I.

As forças longitudinais e verticais foram estimadas para cada ensaio conforme equação 2 e 3, apresentadas no item 1.1.4. A Tabela 6 demonstra os resultados, comparando as forças estimadas com as forças medidas na máquina durante cada ensaio, sendo que a máquina fornece os valores percentuais ao da carga de trabalho especificada pelo fabricante, utilizando a relação linear converteu-se então os dados em unidades de força.

Tabela 6: Tabela de força

	Força Vertical Estimada [N]	Força Vertical Medida [N]	Diferença percentual [%]	Força Longitudinal Estimada [N]	Força Longitudinal Medida [N]	Diferença percentual [%]
<b>Ensaio I</b>	1437,5	1150	25	515,7	930	44,5
<b>Ensaio II</b>	1961,6	1350	45,3	734,21	1364	46,2
<b>Ensaio III</b>	1747,45	1150	52	665,05	1550	57
<b>Ensaio IV</b>	1254,3	2000	37,3	435,85	1488	70,70

A diferença mostrada na tabela é o erro relativo calculado com base no valor da força medida. Avaliando a dedução da equação 3 é possível verificar que não é considerada a crista total da ferramenta, mas sim somente  $\frac{1}{4}$  do diâmetro (Figura 4). A Tabela 7 apresenta os resultados da força longitudinal estimada considerando crista total de incremento ( $\frac{1}{2}$  do diâmetro).

Tabela 7: Tabela de força considerando crista total

	<b>Força Longitudinal Estimada [N] considerando crista total</b>	<b>Força Longitudinal Medida [N]</b>	<b>Diferença Percentual [%]</b>
<b>Ensaio I</b>	1031,4	930	10,9
<b>Ensaio II</b>	1468,42	1364	7,65
<b>Ensaio III</b>	1330,1	1550	14,19
<b>Ensaio IV</b>	871,7	1488	41,42

A Tabela 8 demonstra os resultados, comparando as forças medidas em relação ao incremento vertical e o diâmetro da ferramenta. Verifica-se que as forças vertical e longitudinal são maiores com o aumento do incremento vertical (entre ensaios I e II), bem como que a força vertical é maior para o maior diâmetro da ferramenta (ensaios II e III).

Tabela 8: Comparação de força entre ensaios I, II e III.

<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio I</b>	<b>Ensaio II</b>	<b>Ensaio III</b>
<b>Ø da Ferramenta [mm]</b>	10	10	8
<b>Incremento (<math>\Delta z</math>) [mm]</b>	0,1	0,3	0,3
<b>Força Vertical Medida [N]</b>	1150	1350	1150
<b>Força Longitudinal Medida [N]</b>	930	1364	1550

As forças medidas durante o ensaio quatro não foram constantes, tendo variações em relação ao deslocamento vertical da máquina. A Figura 13a apresenta a força vertical (sentido de incremento) no processo de ISF, a Figura 13b demonstra a evolução da força no sentido horizontal, mostrando picos de aumento e redução que podem ser relacionadas com uma lubrificação e consequente força de atrito não estável. A Figura 13c relaciona o torque aplicado para rotação do tubo com ao deslocamento vertical, o pico demonstrado no deslocamento de 6mm é o momento da falha apresentada na Figura 10.

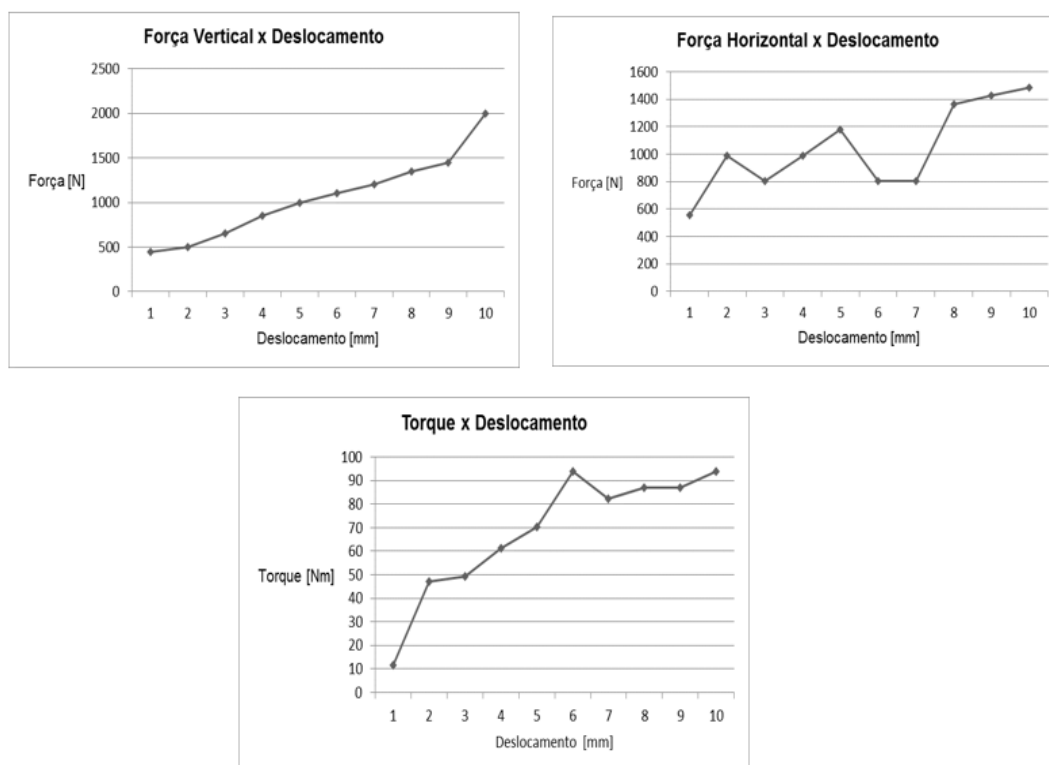


Figura 13: Forças em função do deslocamento da ferramenta para ensaio IV.



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estampagem incremental de ponto simples (SPIF) apresenta diferenças entre a geometria projetada e a real, devido à falta de uma matriz. Nos três primeiros ensaios esta diferença é mais percebida pois do deslocamento total da ferramenta uma parcela é absorvida em retorno elástico do material, outra porção é absorvida para a alteração da geometria, conformando a circunferência do tubo em uma área plana. Por fim, temos a profundidade conformada no material. No ensaio IV esta variação foi menor, ou seja, a geometria obtida foi semelhante à projetada.



Figura 14: Geometria projetada x obtida

A fim de viabilizar o processo é fundamental controlar os parâmetros de conformação, não excedendo o torque limite da geometria, pois este é o modo de falha mais evidente conforme os ensaios realizados.

A equação utilizada para determinar a espessura final do produto é válida para geometria tubular pois a geometria final medida foi próxima da estimada. Observa-se também o aumento da espessura na borda da estampagem, a geometria circular tende a ficar plana aumentando sua espessura.

Em relação ao atrito observou-se que a ferramenta deve possuir um baixo coeficiente de atrito e alta dureza superficial, a fim de melhorar o acabamento do produto e também reduzir o desgaste da mesma. A graxa utilizada pode ser aplicada no processo de IFS como lubrificante, sendo que é de fácil obtenção, atende os requisitos e pode ser removida da máquina com facilidade. Esta remoção é importante pois evita a contaminação com o fluido de corte. Outro ponto positivo é que o lubrificante é semelhante ao utilizado em rolamentos e fusos de esferas, portanto mesmo que venha a contaminar o fluido de corte não são esperadas maiores complicações.

A máquina utilizada para realizar os ensaios atendeu os requisitos. Nos três primeiros ensaios a força vertical (sentido de incremento) utilizou 27% da capacidade da máquina e no sentido horizontal 25%. Isso ilustra que é possível aplicar o processo para diferentes materiais, ou até mesmo aumentando a espessura do produto. No ensaio quatro observou-se que a força vertical aumenta com a profundidade chegando a um ponto máximo de 40% da capacidade da máquina. A força horizontal máxima utilizou 24% da capacidade da máquina que durante o processo apresentou picos. Estes picos são explicados pelo aumento do coeficiente de atrito em determinados momentos em que a lubrificação não foi constante. As equações utilizadas para estimar as forças envolvidas no processo podem ser empregadas para determinar uma estimativa inicial do processo de conformação incremental, a fim de avaliar a capacidade da máquina.

O torque aplicado no tubo para realizar a conformação aumentou gradativamente com o deslocamento vertical, seu pico máximo foi no momento da falha de torção, que ocorreu na profundidade de 6 mm na costura do tubo.

O estudo realizado sobre ISF aplicado em geometria tubular pode ser considerado uma contribuição metodológica e experimental para o meio acadêmico e industrial, podendo ser utilizado para desenvolvimento futuros.

## Referências

- [1] ALLWOOD, J.; BRAMLEY, A ; RIDGMAN, T; MILEHAM, A. A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. V.220 p.323-327, 2005.
- [2] N. G. AZEVEDO et al. **Lubrication Aspects during Single Point Incremental Forming for Steel and Aluminum Materials** – International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. V. 16, no 3, p 1-7,2015.
- [3] CASTELAN, Jovani. **Utilização das tecnologias CAD/CAM para estampagem incremental do alumínio série 1000**. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/12582>>. Acesso em: 07 jun. 2017.
- [4] CASTELAN, Jovani. **Estampagem incremental de titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. 2010. 117 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [5] CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro. **Parâmetros de conformação para a estampagem incremental de chapas de aço inoxidável AISI 304L**. 2010. 131 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/27922>>. Acesso em: 27 fev. 2017.
- [6] CERRO, A.; MAIDAGAN, J.; ARANA, A.; RIVEROA, P.; RODRIGUEZ, A. **Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process**. Journal of Materials Processing Technology. v.152 p.450-80, 2006.
- [7] DALEFFE, Anderson. **ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE ALUMÍNIO PURO**.2008. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <[http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/16205?locale=pt\\_BR](http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/16205?locale=pt_BR)>. Acesso em: 21 fev. 2017.
- [8] FERRARINI, José Luiz. **Caracterização de materiais para o processo de estampagem**. 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4696>>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [9] FRITZEN, Daniel. **Estudo dos parâmetros de conformabilidade para o processo de estampagem incremental**. 2016. 134 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/150566>>. Acesso em: 23 fev. 2017.
- [10] HAGAN, E.; JESWIET, J. A review of conventional and modern single point sheet metal forming methods. of Engineering Manufacture. V. 217. p 213-225, 2003.
- [11] HIRT, G; AMES, J; BAMBACH, M. **Economical and ecological benefits of cnc incremental sheet forming (ifs)**. Institute of Materials Science/Precision Forming (LWP); Saarland University Building, 2003.
- [12] JUNK, S.; HIRT, G.; CHOUVALOVA, I. **Forming Strategies and Tools in Incremental Sheet Forming**. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany, 2003.
- [13] KIM, Y. H.; PARK, J. J. **Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal**. Journal of Materials Processing Technology, v.130. p. 42-46;130-131, 2002.
- [14] KOPAC, J. e KAMPUS, Z. 2005. **Incremental sheet metal forming on CNC-milling machinetool**. Journal of Material Processing Technology. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia, v. 162-163. p. 622-628, 2005.
- [15] LOPES, Tiago Filipe Ramos da Silva. **Estampagem Incremental - Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rotura**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/65713>>. Acesso em: 23 fev. 2017.
- [16] 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.
- [17] RODRIGUES, Pedro Filipe da Silva. **Aplicação da estampagem incremental no fabrico de moldes: Estudo de viabilidade técnico-econômica para industrialização**. 2013. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/69002/2/26956.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2017.
- [18] Schaeffer, L., et al. **Development of customized products through the use of incremental sheet forming for medical orthopaedic applications**, in 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, J.F.S. Gomes and S.A. Meguid, Editors. 2009, INEGI-Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial: Porto/Portugal. p. 63-80.
- [19] TIBURI, Fabio. **Aspectos Do Processo De Estampagem Incremental**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/11801>>. Acesso em: 09 fev. 2017.