

ESTUDO DO PROCESSO ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE LATÃO 70/30

Fritzen, Daniel¹
Schaeffer, Lirio²
Daleffe, Anderson³
Castelan, Jovani⁴

RESUMO

O estudo aborda por meio de bibliografias e experimentos realizados, o processo de Estampagem Incremental de Chapas (*ISF – Incremental Sheet Forming*) para o latão 70/30 com 0,5 mm de espessura. Os experimentos práticos basearam na variante da ISF denominada de Estampagem Incremental com Ponto Simples (*SPIF – Single Point Incremental Forming*). Para execução dos testes práticos, foram utilizados os recursos: softwares CAD/CAM, centro de usinagem CNC com três eixos, uma matriz incremental, ferramenta de estampagem incremental, um dispositivo prensa chapas. O trabalho apresenta os procedimentos de caracterização e ensaio mecânico da chapa de latão 70/30, que juntamente dos testes práticos fornecem informações sobre a aplicabilidade da estampagem incremental em chapas de latão 70/30.

Palavras Chave: Estampagem Incremental, Ferramenta de Estampagem Incremental, Matriz Incremental, Chapa de Latão 70/30.

31^o SENAFOR / 14^a Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 1^a Conferência Internacional de Conformação de Chapas.

1 - Mestrando UFRGS/PPGEM/LdTM. Professor da Faculdade SATC – Rua Pascoal Meller, 73 – CEP 88.805-380 – CP 362 – Criciúma – SC – Brasil. Correspondência com autor: Tel.: (48) 3431 7511; fax: (48) 3431 7501.

e-mail: daniel.fritzen@satc.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1343767494407324>

2 - Professor Doutor LdTM – Laboratório de Transformação Mecânica - UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 01501-970 – CP: 15.021 - Porto Alegre – RS – Brasil. Correspondência com autor: Tel.: (51) 3308 6134 e-mail: schaeffer@ufrgs.br Web: www.ufrgs.br/ldtm

3 - Doutorando UFRGS/PPGEM/LdTM. Professor da Faculdade SATC – Rua Pascoal Meller, 73 – CEP 88.805-380 – CP 362 – Criciúma – SC – Brasil. Correspondência com autor: Tel.: (48) 3431 7511; fax: (48) 3431 7501.

e-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7569701338186684>

4 - Doutor UFRGS/PPGEM/LdTM. Coordenador/Professor da Faculdade SATC – Rua Pascoal Meller, 73 – CEP 88.805-380 – CP 362 – Criciúma – SC – Brasil. Correspondência com autor: Tel.: (48) 3431 7588; fax: (48) 3431 7501.

e-mail: jovani.castelan@satc.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4667787186445203>

1. INTRODUÇÃO

Para atender às demandas do alto volume de produção, levando em consideração custos baixos e tempos mínimos de fabricação, a indústria começou a estampar chapas em prensas. No entanto, evidenciou-se a desvantagem de que para cada produto a estampar, se faz necessário uma ferramenta dedicada (matriz). Os custos de conceber ferramentas dedicadas são muito elevados, resultando também em aumento dos custos dos produtos. Deste modo, confirma-se a estampagem em ferramentas dedicadas como apropriada apenas para alto volume de produção. Como é incessante a produção de

novos produtos pela indústria, há também uma necessidade constante de desenvolver protótipos. Os protótipos são feitos a fim de experimentar uma nova peça ou a sua funcionalidade (Kopac and Kampus 2005).

A fim de minimizar o uso de ferramentas dedicadas para a estampagem de chapas, no que diz respeito à fabricação de pequenos lotes ou modelos únicos, a estampagem incremental de chapas surge como uma boa alternativa na indústria. O processo de Estampagem Incremental (*Incremental Sheet Forming – ISF*) é uma inovação tecnológica na área de deformação de chapas. Consiste na conformação de uma geratriz, com razoável precisão, a partir de arquivos CAD (*Computer Aided Design – Projeto Assistido por Computador*) convertidos em arquivos CAM (*Computer Aided Manufacturing – Manufatura Assistida por Computador*) tridimensionais. A trajetória da ferramenta é controlada por um programa e empregando um pequeno punção, utilizando a tecnologia CNC (*Computer Numeric Control - Controle Numérico Computadorizado*), vai conformando aos poucos a peça através de pequenas deformações (Schaeffer 2004) (Bambach, Hirt and Ames 2004).

Este processo de estampagem incremental de chapas foi patenteado em 1967 por Edward Leszak. O nome desta tecnologia deriva-se pelo fato de que a qualquer momento apenas uma pequena parte do produto está sendo realmente conformado, e que a área da deformação localizada está movendo-se sobre o produto inteiro. Esta definição atinge muitos processos, como a laminação, por exemplo. (Emmens, Sebastiani and Boogaard 2009).

Levando em conta que esta tecnologia abrange um mercado amplo e variado, com características singulares, a Estampagem Incremental se adapta muito bem a algumas das novas exigências do mercado, tais como a agilidade na fabricação de protótipos, a produção de pequenas séries de componentes e a obtenção de peças que, por possuírem elevada complexidade geométrica, se tornariam inviáveis por processos convencionais (Patrício, *et al.* 2010).

Dentro deste contexto, Jeswiet *et al.* (2005) citam aplicabilidade desta tecnologia na confecção de protótipos rápidos para a indústria automotiva (Fig. 1 a) e de outras áreas (Fig. 1 b), tendo as mais variadas formas geométricas alcançadas por este processo. Também mencionam o uso na área médica. Ainda dentro da área médica, Castelan *et al.* (2010) abordam a aplicação da estampagem incremental na confecção de prótese craniana (Fig. 1 c).

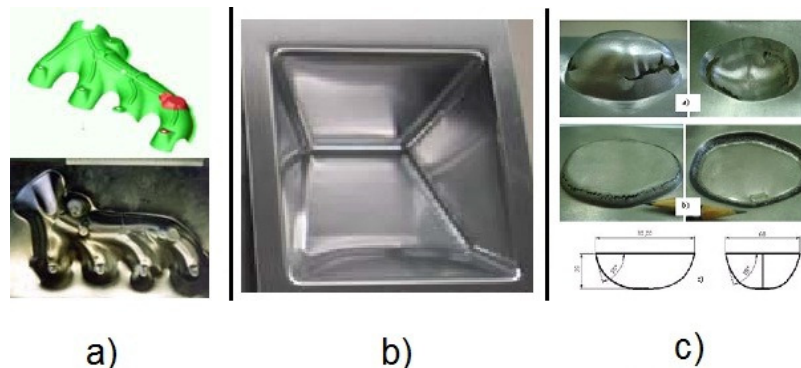


Figura 1: a) Protetor automotivo de calor / ruído; b) Cavidade do forno solar; Jeswiet *et al.* (2005)
c) Resultados dos testes preliminares dos protótipos físicos para implante craniano Castelan *et al.* (2010)

A estampagem incremental é atualmente um processo promissor no que diz respeito à conformação plástica de materiais em chapa, que não está restrita a conformação de chapas de metal apenas. Estudos mais recentes feitos por Franzen *et al.* (2009), Marques (2010) e Martins *et al.* (2009) mostram a aplicação da estampagem incremental em polímeros.

2. ESTAMPAGEM INCREMENTAL

O processo de estampagem incremental pode ser dividido essencialmente em duas famílias, dependendo do número de pontos de contato entre ferramenta, folha, e matriz (quando presente). Por isso, é possível distinguir a estampagem incremental de ponto simples (*SPIF - Single-point Incremental Forming*), e de ponto duplo (*TPIF - Two Points Incremental Forming*) (Attanasio, Ceretti and Giardini 2006).

Contudo, para alcançar formas precisas na estampagem incremental, se utiliza suporte inferior específico no formato desejado, podendo ser com simetria axial ou assimétrico, indicado para obtenção de superfícies complexas e orgânicas. Este suporte, por sua vez, pode ser positivo (ressalto) ou negativo (cavidade) Allwood *et al.* (2005) Hirt *et al.* (2005). A figura 2 a seguir, ilustra as modalidades mencionadas.

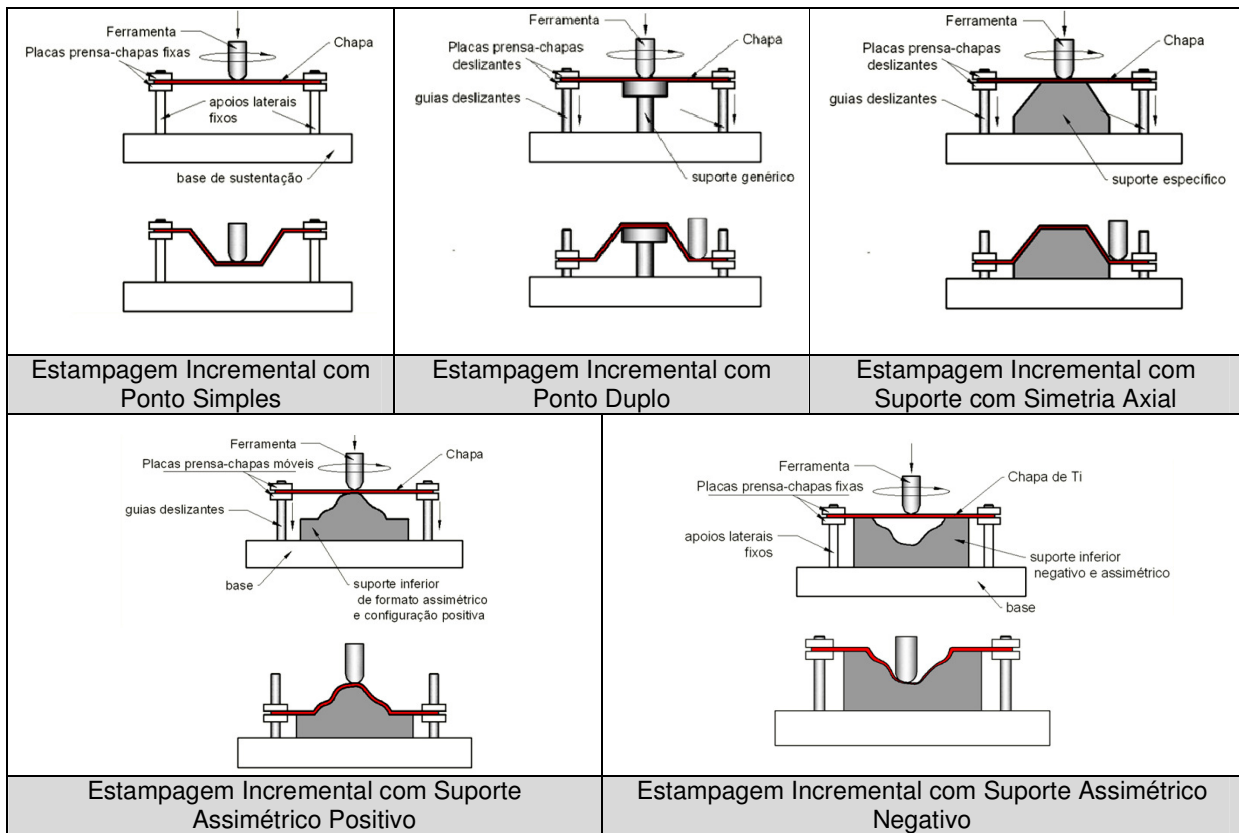


Figura 2: Modalidades da estampagem incremental. Adaptado de (Castelan 2010)

A estampagem incremental de ponto simples na modalidade SPIF será mais detalhada adiante, haja vista que foi a modalidade usada nos experimentos.

2.1. Estampagem Incremental de Ponto Simples - SPIF

A estampagem incremental de ponto simples (ou de ponto único), definida pela sigla em inglês SPIF - *Single-point Incremental Forming*, provou ser viável para a produção de pequenos lotes de peças de chapa, em uma ampla gama de materiais e formas geométricas, por um grupo de cientistas internacionais em 2005 Jeswiet *et al.* (2005).

Os trabalhos de Hussain *et al.* (2009) e Duflou *et al.* (2008), definem o processo SPIF como uma chapa plana de metal, presa num dispositivo móvel, que desliza paralelamente ao eixo Z. Uma ferramenta esférica (Fig. 3) controlada por CNC, desliza-se

sobre a chapa, e de forma gradativa, por meio de incrementos negativos em Z, deforma plasticamente a chapa, transformando-a em uma geometria tridimensional, sem a necessidade de uma matriz de apoio com alto custo.

Pelo fato de não utilizar suporte inferior, esta modalidade é comumente chamada de *dieless* – “sem ferramenta”, como previsto por Leszak em 1967. Por conta dessa característica de conformação “*dieless*”, Hussain *et al.*(2009) e Duflou *et al.* (2008) afirmam em seus trabalhos, que esta modalidade tem potencial para reduzir significativamente o custo de pequenos lotes e protótipos, como já citado por Jeswiet *et al.* (2005), haja vista que o tempo de espera e custo de ferramentas pode ser evitado.



Figura 3: Modelos de ferramentas usadas na ISF de Jeswiet *et al.* (2005).

Castelan (2010), acrescenta que por não haver ponto de apoio inferior, o formato da peça final é determinado somente pelo deslocamento da ferramenta nos 3 eixos (X, Y e Z). A chapa é fixada em suportes laterais que mantém altura constante em relação à base. Hussain *et al.* (2007), cita em seus estudos, que estes elementos de fixação, evitam o movimento da chapa durante o processo, culminando na sua deformação plástica. A figura 4 ilustra as características do processo descrito pelos autores citados.

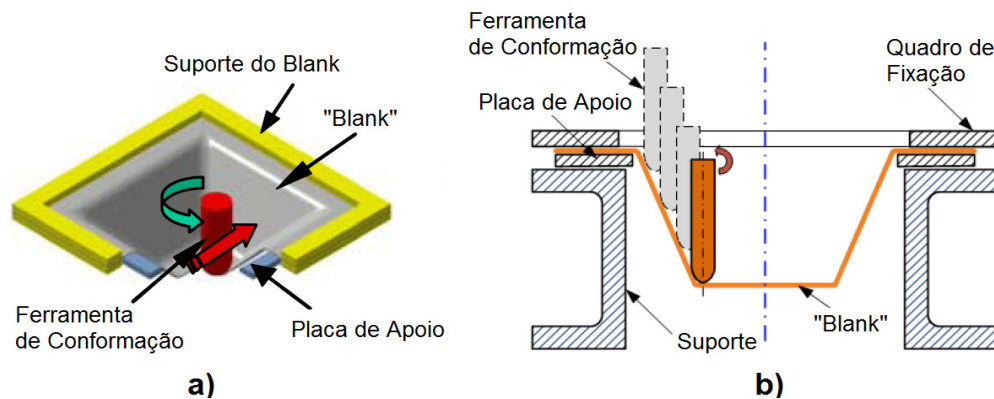


Figura 4: Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples (SPIF).

a) Adaptado de Jeswiet *et al.* (2005) b) Sy (2009)

Como mencionado anteriormente, o fato da ferramenta de deformação ser controlada por CNC, inspirou a criação de máquinas dedicadas, como a desenvolvida por Allwood *et al.* (2005) (Fig. 5 a) na Universidade de Cambridge, e pela empresa japonesa *Amino Corporation*, que atualmente comercializada tal tecnologia.

Entretanto, devido a praticidade, estudos a respeito, [(Cavaler 2010), (Castelan 2010), (Daleffe 2008)] apontam a utilização de máquinas CNC (Fig. 5 b) na aplicação da estampagem incremental de chapas, enquanto Franzen *et al* (2009) e Marques (2010) utilizaram a máquina CNC na aplicação da estampagem incremental em polímeros.

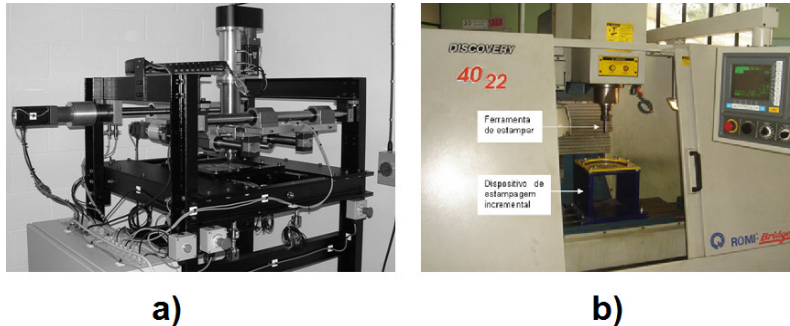


Figura 5: a) Máquina dedicada a ISF Allwood et al. (2005),
b) Centro de Usinagem usado em ISF (Cavaler 2010)

Em SPIF, o fato de a maior parte do material ser deformado sem qualquer apoio na face oposta, ocasiona problemas relevantes relacionados à precisão no modelo final, comparando-o com o modelo CAD projetado. Devido a essa importante observação, estudos foram feitos a respeito (Ambrogio, *et al.* 2007).

Em face dos estudos sobre SPIF, Câmara (2009) *apud* Jadhav (2003) listas as principais vantagens do processo:

- Produção de peças diretamente do arquivo CAD;
- Inexistência de suporte positivo ou negativo;
- As alterações de projeto podem ser fáceis e rapidamente executadas;
- Aumento da conformabilidade material;
- Pode ser executado em uma máquina CNC convencional;
- Devido à natureza incremental do processo, as forças de deformação são pequenas;
- Dimensão das peças são limitadas apenas pela ferramenta da máquina;
- Boa qualidade de acabamento de superfície pode ser alcançado.

Do mesmo modo, as principais desvantagens do processo de SPIF são listadas por Câmara (2009) *apud* (Hirt, Ames and Bambach 2006):

- Maior tempo de conformação, comparado com processo convencional de estampagem profunda;
- Processo limitado a pequenos lotes de produção;
- A formação de ângulos retos deve ser alcançada através de estratégias multi-estágio;
- Ocorrência do retorno elástico;
- Menor precisão na geometria, particularmente em raios convexos e em áreas com dobra de arestas.

Nos estudos de Castelan (2010), o mesmo observou a aplicabilidade da ISF em chapas de titânio comercialmente puro, visando prototipar implantes cranianos. Já Cavaler (2010) aborda no seu trabalho, o uso da ISF em chapas de AISI 304L, onde justifica que se possa obter protótipos de suportes ortopédicos, fornos solares, peças de barcos a vela, peças customizadas (painéis decorativos).

Deste modo, o presente trabalho aborda o comportamento da chapa de latão 70/30, comumente conhecida por latão de cartucho, com 0,5 mm de espessura.

Para isso, o trabalho apresentado, traz o limite do ângulo de parede da chapa de latão 70/30, bem como o índice de anisotropia, além dos resultados de caracterização do material.

Para a realização dos experimentos de estampagem incremental, foram usados: Centro de Usinagem Discovery 4022, um dispositivo prensa chapas devidamente projetado para o SPIF, além de ferramentas específicas.

O interesse desta pesquisa visa prover informações relevantes para estudos futuros sobre a prototipagem e customização de produtos de ferragens para construção civil (espelhos de fechaduras), considerando uma produção de lote unitário ou pequenos lotes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos as características do latão 70/30, bem como a maneira de como foram conduzidos os experimentos de 1 a 7.

3.1. Caracterização da Chapa Utilizada nos Testes

O material abordado, chapa de latão 70/30 com 0,5 mm de espessura, segue a norma SAE J463. Comercialmente, é conhecido também como Latão UNS C26000 (ASM 1992).

A tabela 1 traz os valores da análise química da chapa de latão 70/30, extraídos do certificado de qualidade emitido pelo fornecedor. Os valores dos elementos listados a seguir estão expressos em porcentagem (%):

Tabela 1: Análise química. Fonte: Servicorte Indústria e Comércio de Metais

<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Fe</i>	<i>Outros</i>	<i>Zn</i>
67,2400	0,0280	0,0268	0,0000	32,7052

Comparando os resultados emitidos pelo fornecedor (tabela 1) com os limites especificados pela literatura (ASM 1992), foi constatado o valor percentual de Cu abaixo dos 68,5% mínimos especificados. Essa diferença pode ser preponderante nos resultados seguintes, comparados a literatura.

Conforme (ASM 1992) este material apresenta uma tensão máxima (σ_B) de 525 MPa e uma tensão de escoamento (σ_E) de 435 MPa e índice de anisotropia média (r_m) entre 0,8 e 1,0 (Souza 1984).

Para a realização dos ensaios de tração, fora usado a máquina de tração EMIC modelo DL10000 capacidade 100 kN. Foram produzidos doze corpos de prova, alternando-os de acordo com o sentido de laminação (0°, 45° e 90°). O formato usado está de acordo com a norma ABNT 6152 / DIN EM 10002, conforme a figura 6. Já a figura 7 ilustra o corpo de prova original e os corpos de provas após o ensaio de tração realizado.

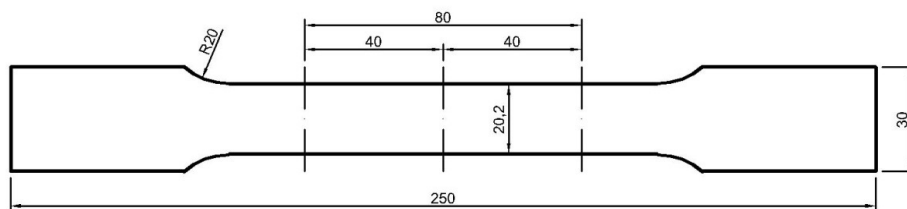


Figura 6: Dimensões do corpo de prova.

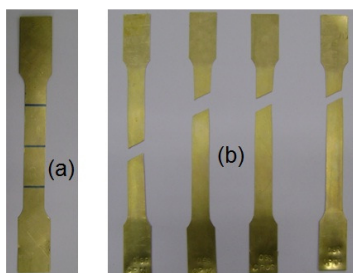


Figura 7: a) Corpo de Prova original. b) Corpos de Prova após ensaio de tração

Após realizados os ensaios, foram geradas as curvas tensão-deformação convencionais para cada sentido de laminação (Fig. 8).

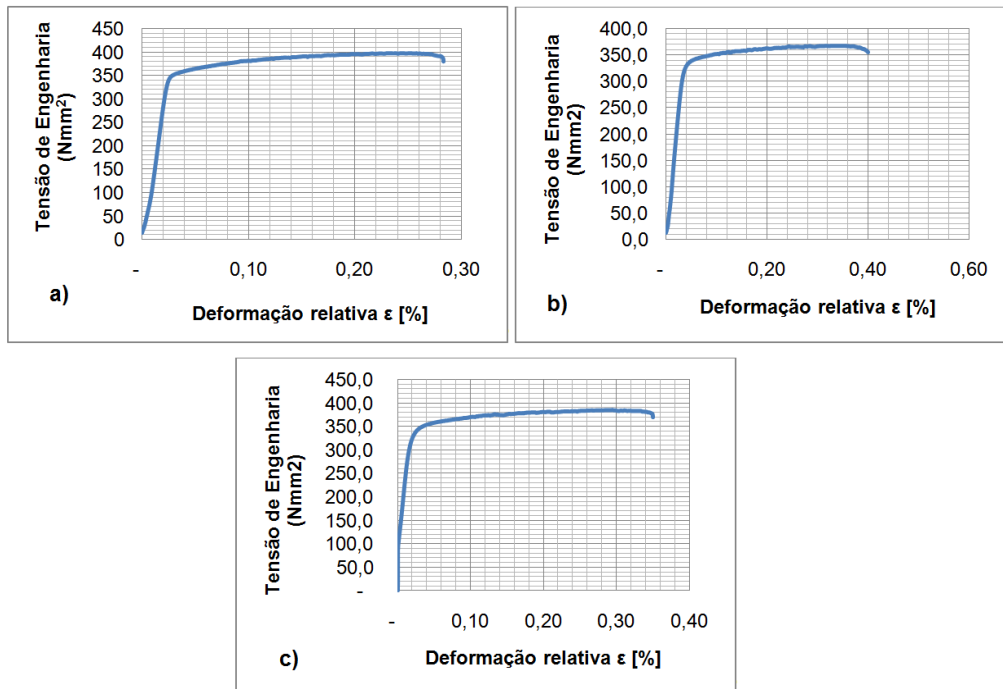


Figura 8: Curva convencional $\sigma \times \epsilon$ latão 70/30. a) Sentido de longitudinal (0° da laminação) b) Sentido de oblíquo (45° da laminação), c) Sentido de transversal (90° da laminação)

A tabela 2 a seguir relaciona os dados calculados de deformação relativa (ϵ), Alongamento (δ), Tensão Máxima (σ_B), Tensão de Escoamento (σ_E) e anisotropia (r) de cada curva. No caso da anisotropia média (r_m), obteve-se 0,77.

Tabela 2: Dados do material após o ensaio de tração.

Sentido Laminação	Tensão Máxima (σ_B) [MPa]	Tensão de Escoamento (σ_E) [MPa]	Anisotropia (r)	Deformação relativa (ϵ)	Alongamento (δ) [mm]
Longitudinal (0°)	398	363	0,784	0,234	23,44
Oblíquo (45°)	368	334	0,781	0,281	28,13
Transversal (90°)	385	355	0,743	0,254	25,35

Para a análise metalográfica, foi feita uma mistura, em temperatura ambiente, de 5 partes de HNO₃, 5 partes de ácido acético, 1 parte de H₃PO₄, onde a amostra fica imersa durante 3 s nesta solução (ASM 2004). A análise metalográfica revelou a matriz α do latão 70/30 ensaiado, mostrado na figura 9.



Figura 9: Micrografia da chapa de latão antes dos experimentos.

Por meio de um microdurômetro Future Tech FM 700, foram feitos ensaios de microdureza Vickers, aplicando uma carga de 0,2 kg em amostras não estampada da chapa de latão 70/30. Na superfície, obteve-se uma microdureza média de 135,93 HV e na espessura 142,30 HV.

3.2. Dispositivos utilizados nos Experimentos

Foi usado um Centro de Usinagem Vertical Discovery 4022, fabricado pela empresa Romi. A tabela 3 apresenta as características técnicas da máquina.

Tabela 3: Características técnicas do Centro de Usinagem usado nos experimentos.

Potência	15 kVA
Potência do Motor Principal	7,5 CV
Comando CNC	Mach - 9
Cone da Árvore	ISO 40
Dimensões da Mesa	840,00 x 360,00
Curso Longitudinal (Eixo X)	599,00 mm
Curso Transversal (Eixo Y)	406,00 mm
Curso Vertical (Eixo Z)	508,00 mm
Resolução de Posicionamento	0,001 mm
Avanço Rápido dos Eixos X, Y e Z	1500 mm/min
Faixa de Rotação	60 a 6.000 rpm

Também foi usado um dispositivo para estampagem incremental para os experimentos, bem como uma ferramenta para estampar. A figura 10 ilustra os dispositivos usados.

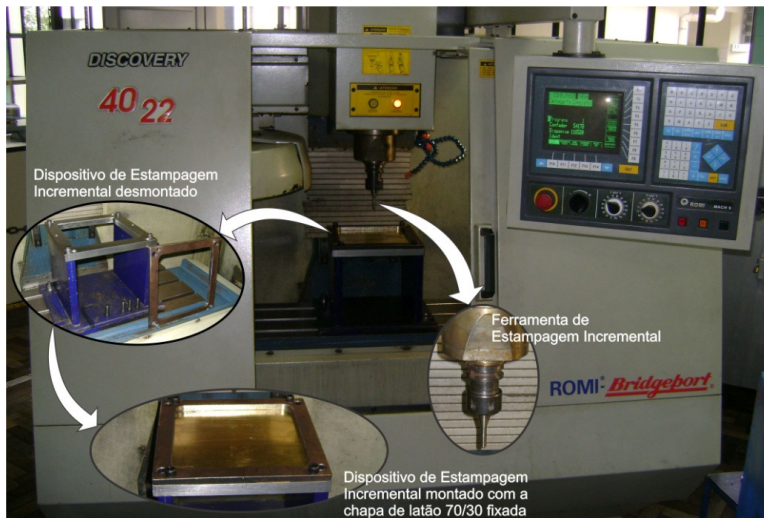


Figura 10: Centro de Usinagem usado nos experimentos.

Nos experimentos foi usado uma ferramenta de estampar com ponta semi-esférica com raio R_t de 5 mm, (Fig. 11) feita de aço 4340 sem revestimento algum, montada em um mandril porta-pinça. As ferramentas de estampagem incremental diferem das ferramentas de usinagem convencionais por não possuírem arestas de corte.

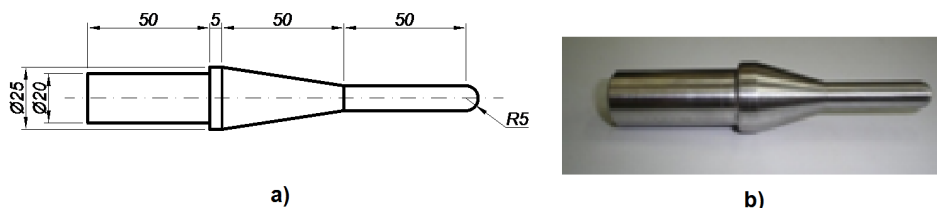


Figura 11: a) Desenho Projetivo da Ferramenta de Estampar, b) Ferramenta de Estampar

Além dos dispositivos físicos descritos, também foram utilizados os recursos computacionais, *software* CAD/CAM e cabo serial RS-232 para a comunicação entre computador e centro de usinagem.

3.3. Metodologia dos Experimentos de Estampagem Incremental

A metodologia empregada nos experimentos foi baseada na modalidade de estampagem incremental denominada SPIF, ou seja, movimentação da ferramenta em Z e o *blank*, sem apoio na sua face inferior, movimentando-se nas direções XY.

O modelo de estudo foi baseado num tronco de pirâmide de base quadrada com 220 mm de lado e 40 mm de profundidade e raios de concordância de 10 mm. Para o projeto deste *blank* foi utilizado o *software* CAD SolidWorks 2010 (Fig. 12 a). Para as estratégias de usinagem foi empregado o *software* EdgeCAM 2011 (Fig. 12 b). Foram usadas as estratégias convencional de usinagem e helicoidal.

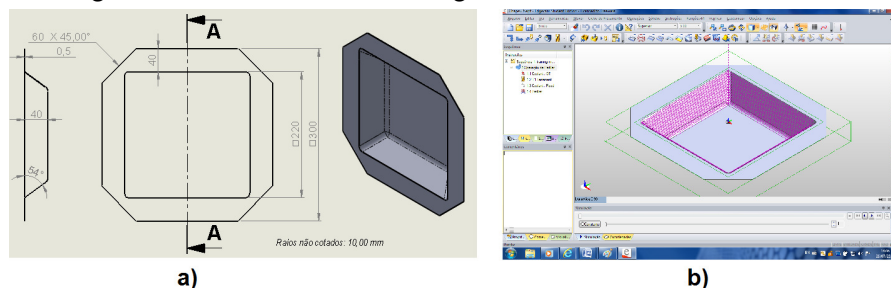


Figura 12: a) Desenho Projetivo do *blank*, b) Simulação da estampagem incremental

Nos experimentos foi usada uma graxa para lubrificar rolamentos com sabão base de lítio, chamada de UNILIT MPA-2, como lubrificante na interface ferramenta/*blank*. Dentre as características dessa graxa, destaca-se sua consistência 2 (NLGI-2), ponto de gota de 185°C e aplicação até a 130°C.

Como tratavam-se dos primeiros experimentos com este material, decidiu-se fixar alguns parâmetros, de acordo com outros trabalhos realizados, para todos experimentos. São eles:

- Raio da ferramenta R_t : 5 mm;
- Passo vertical Δ_z : 1 mm
- Velocidade de avanço V_{fh} em XY: 1000 mm/min
- Velocidade de mergulho V_z em Z: 300 mm/min
- Rotação da ferramenta V_c : 0 rpm (ou seja, ferramenta livre, conforme visto em outros trabalhos)

Com os parâmetros descritos acima permanentes para todos os experimentos, e visando estudar principalmente o limite do ângulo de parede suportado pelo material proposto, optou-se por alterar dois parâmetros apenas. São eles:

- Ângulo de parede α [°];
- Estratégia de usinagem.

4. RESULTADOS E DICUSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes aos experimentos de n^{os}1 a 7 de estampagem incremental na modalidade SPIF.

4.1. Metodologia dos Experimentos de Estampagem Incremental

A metodologia dos experimentos foi baseada em estudos de outros materiais, haja vista que não encontrou-se dados a respeito da aplicação de ISF em chapas de latão.

No primeiro experimento, optou-se por um ângulo de parede de 60° e profundidade de 40 mm. Contudo, com 6 mm de profundidade houve um pequeno rompimento da chapa inicialmente no segundo arco após a descida da ferramenta (Fig. 13 b), e em seguida com a nova descida da ferramenta (Fig. 13 c) houve um rompimento maior e o experimento foi interrompido.

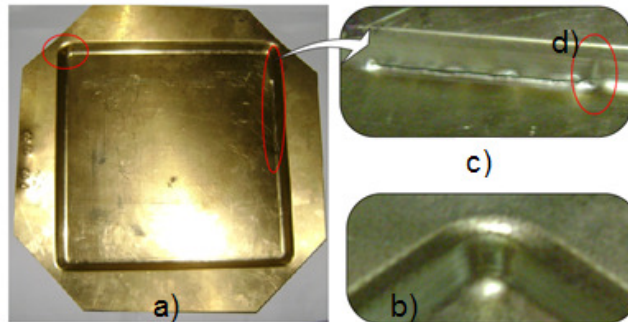


Figura 13: a) Experimento 1; b) Primeira fratura; c) Segunda fratura; d) Ponto de entrada da ferramenta.

Com o rompimento a 60° no primeiro teste, optou-se por 45° no segundo experimento e uma profundidade de 40 mm. Não houve rompimento e o experimento foi concluído até o final (Fig. 14). Do mesmo modo, mantendo todos os parâmetros iguais aos experimentos 1 e 2, e apenas alterando o ângulo de parede, obteve-se sucesso com os experimentos n^{os} 3 [52°] e 5 [53°].

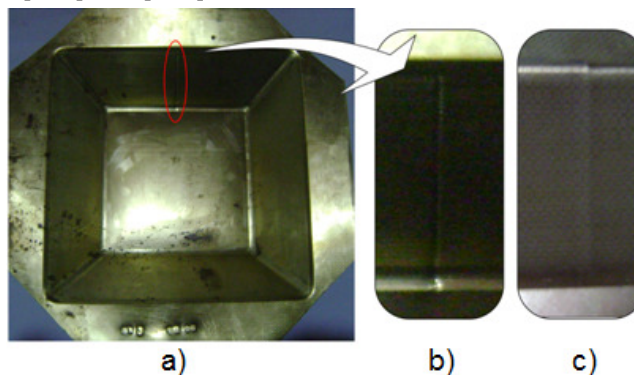


Figura 14: a) Experimento 2; b) Ponto de entrada da ferramenta em Z; c) Marca do Ponto de entrada da ferramenta em Z na parte externa.

No experimento n^o 4, o ângulo de parede testado foi de 55° . Contudo, com 13 mm de profundidade houve um rompimento da chapa no último arco após a descida da ferramenta em Z (Fig. 15 b), e o experimento foi interrompido.

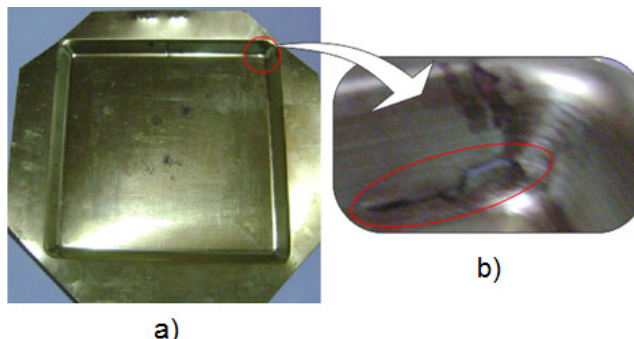


Figura 15: Experimento 4; b) Região fraturada durante o processo de ISF.

No experimento nº 6, o ângulo de parede testado foi de 54°. Contudo, com 15 mm de profundidade houve um rompimento da chapa no segundo arco após a decida da ferramenta (Fig. 16 b). Como este experimento não foi interrompido, a fratura foi aumentando até o final do experimento (Fig. 16 b, c).

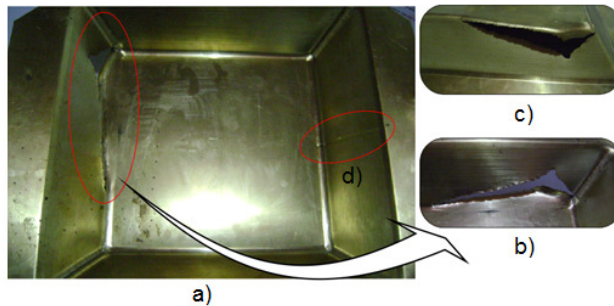


Figura 16: Experimento 6; b) Fratura da chapa (vista interna) c) Fratura da chapa (vista externa); d) Ponto de entrada da ferramenta em Z.

No experimento nº 7, o ângulo de parede testado foi de 54° novamente. Entretanto, a estratégia de usinagem foi alterada de convencional para helicoidal. Por conta dessa alteração, foi diminuída a profundidade para 30 mm. Razão essa devido ao tamanho do arquivo CAM gerado que impossibilitava a comunicação com a máquina. Nesta nova situação, não houve rompimento da chapa (Fig. 17), diferentemente do experimento nº 6. Outro detalhe a ser ressaltado é que nesta nova estratégia de usinagem, a chapa não fica com as marcas de entrada da ferramenta em Z.

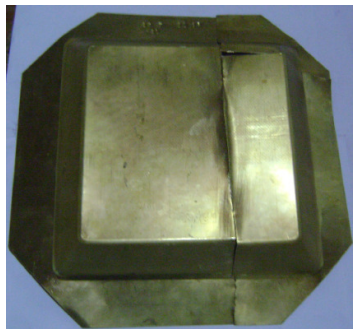


Figura 17: Experimento 7 partido para as medições de espessuras e deformações.

Os parâmetros que foram trabalhados durante os sete experimentos, são apresentados de forma sucinta na tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros analisados nos experimentos.

<i>DADOS DOS EXPERIMENTOS</i>				
<i>Experimento</i>	<i>Profundidade [mm]</i>	<i>Ângulo de Parede α [°]</i>	<i>Estratégia</i>	<i>Status</i>
1	40	60	Paralela / Radial	Rompimento com 6,00
2	40	45	Paralela / Radial	Não rompeu
3	40	52	Paralela / Radial	Não rompeu
4	40	55	Paralela / Radial	Rompimento com 13,00
5	40	53	Paralela / Radial	Não rompeu
6	40	54	Paralela / Radial	Rompimento com 15,00
7	30	54	Helicoidal	Não rompeu

Após o final dos testes o experimento nº 7 foi cortado para medição das espessuras após o processo de ISF, como mostra a figura 18.

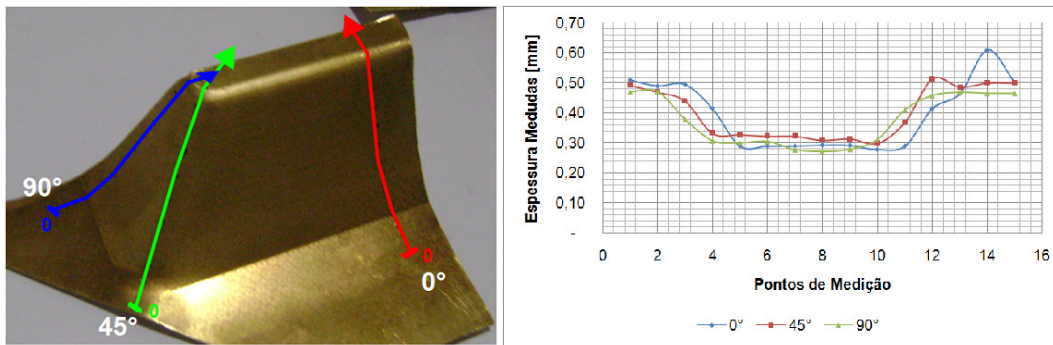


Figura 18: a) Sentido de laminação; b) Gráfico da variação das espessuras.

5. CONCLUSÃO

Como citado inicialmente neste trabalho, o estudo visava prover informações relevantes para estudos futuros sobre a prototipagem, em especial ferragens para construção civil (espelhos de fechaduras). Considerando a vasta quantidade de formatos que estes produtos possuem, há possibilidade de estudosa de geometrias que não ultrapassem 6 mm de profundidade (experimento nº 1), no cado de um ângulo de parede igual a 60°.

Para obtenção de produtos com uma maior profundidade, a chapa de latão 70/30 está limitada a um ângulo de parede de 53° (experimento nº 5) na estratégia convencional de usinagem, e 54°(experimento nº 7) na estratégia helicoidal. Tal fato deve se que nesta a ferramenta está em constante contato com o *blank*, além de estar sempre incrementando passes em Z- (Δ_z) por toda trajetória de usinagem, diferente da estratégia convencional que apresenta sempre o mesmo ponto de mergulho da ferramenta.

Outro fator a ser considerado, é que na estratégia convencional o blank apresenta ao longo de toda a sua deformação os pontos de mergulho da ferramenta (experimentos de 1 a 6) causando uma marcação indesejada ao produto, e comprometendo sua estética final. Ainda sobre a estética, mesmo não sendo avaliada neste trabalho, a rugosidade do *blank* na área deformada ficou bem visível. Isso deve ao passo vertical Δ_z , e ao raio R_t da ferramenta de estampar.

Como os estudos de ISF visaram primordialmente verificar o limite do ângulo de parede suportado pela chapa de latão 70/30, outros parâmetros importantes não foram contemplados, como o diâmetro da ferramenta de estampar e o passo vertical Δ_z , além da própria estratégia helicoidal em ângulos maiores. Por conta disso, se faz necessário novos estudos afim de verificar com maiores propriedades o limites do ângulo de parede.

Também foi aplicado as marcas de visioplasticidade nas chapas antes dos experimentos, afim de verificar as deformações ϕ_1 e ϕ_2 . Como esta técnica é um processo eletroquímico e usa ácido para fazer as marcações, as mesmas não ficaram visíveis a ponto de medi-las. Isto deve-se ao fato de que nos experimentos não foi usado o ácido apropriado para material latão. Também segue como uma necessidade de estudo em novos trabalhos.

Sobre as espessuras medidas nos três principais sentidos de laminação (0°, 45° 90°), ficou visível (Fig. 18) que nas faces planas (0° e 90°), as espessuras na área deformada (pontos de 4 a 10 do gráfico) são próximas, mantendo uma média de aproximadamente 0,30mm, enquanto nos arcos de concordâncias (45°) apresentou-se uma espessura maior.

Por fim, o trabalho realizado credita ao material estudado boas chances de aplicação no campo da ISF, mesmo sem uma maior abrangência de parâmetros.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, pelo apoio técnico, e a Faculdade SATC pela apreciável contribuição com os equipamentos para os desenvolvimento dos experimentos.

BIBLIOGRAFIAS

ALLWOOD, J. M., BRAMLEY, A. N., Ridgman, T. W., MILEHAM, A. R. 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, 2005: 323-327p

AMBROGIO, G.; COZZA V., FILICE, L., MICARI, F. An analytical model for improving precision in single point incremental forming. Journal of Materials Processing Technology, 2007: 92-95p

ASM INTERNATIONAL. ASM HANDBOOK - Metallography and Microstructures. Vol. 9. USA: ASM International, 2004. 2733p.

ASM INTERNATIONAL. ASM HANDBOOK - Properties and Selection: Nonferrous Alloys an Special-Purpose Materials. Vol. 2.. USA: ASM INTERNATIONAL, 1992. 3470p.

ATTANASIO, A., CERETTI, E., GIARDINI, C. Optimization of tool path in two points incremental forming. Journal of Materials Processing Technology, 2006: 409-412.

BAMBACH, M., HIRT, G., AMES, J. Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), 2004: 6p

CÂMARA, João Luís Padrão de Brito. Single Point Incremental Forming. Dissertação de Mestrado, ISF - Instituto Superior Técnico, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2009. 88p.

CASTELAN, Jovani. Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano. Tese de Doutorado, LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2010. 114p.

CASTELAN, Jovani, DALEFFE, Anderson, SCHAEFFER, Lirio, CASAGRANDE, Joeci, GRUBER, Vilson, FRITZEN Daniel. Development of Cranial Implant Through Incremental Sheet Forming for Medical Orthopedic Applications. International Journal of Materials Engineering an Technology (Pushpa Publishing House). (2010): 63-80p

CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro. Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L. Tese de Doutorado, LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre. 2010, 152p.

CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro, SCHAEFFER, Lirio, PERUCH, Fábio. Variação de Espessura na Parede na Estampagem Incremental com Ponto Simples para o Aço Inoxidável AISI 304L. 30 SENAFOR - 13 Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 2010: 333-352p

DALEFFE, Anderson. Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro. Dissertação de Mestrado, LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre. 2008. 84p.

DUFLOU, J.R., et al. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008: 253–256p

- EMMENS, W.C., SEBASTIANI, G., BOOGAARD, A.H. van den. The technology of Incremental Sheet Forming – A brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009: 24p
- FRANZENA, V., KWIATKOWSKI, L., MARTINS, P.A.F., TEKKAYA, A.E.. Single point incremental forming of PVC. *Journal of Materials processing technology*, 2009: 462-469p
- HIRT, G., JUNK, S., BAMBACH, M., CHOUVALOVA, I., AMES, J. Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation. *Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP)*, 2005: 12p
- HIRT, G., AMES, J., BAMBACH, M. Basic Investigation into the Characteristics of dies and support tools used in CNC-Incremental Sheet Forming. *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference (IDDRG)*, 2006: 341-348p
- HUSSAIN, G., GAO, L., HAYAT, N., ZIRANA, X. A new formability indicator in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009: 4237–4242p
- HUSSAIN, G., DAR, N. U., GAO, L., CHENA, M. H. A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007: 94 – 98p
- JESWIET, J., MICARI, F., HIRT, G., BRAMLEY, A., DUFLOU, J., ALLWOOD, J. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *5Katholieke Universiteit Leuven*, 2005: 27p
- KOPAC, Janez, and KAMPUS, Zlatko. Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005: 622–628p.
- MARQUES, Tânia Alexandra Ferreira. *Estampagem Incremental de Polímeros. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2010, 109p*
- MARTINS, P. A. F., KWIATKOWSKI, L., FRANZEN, V., TEKKAYA, A. E., KLEINER, M. Single point incremental forming of polymers. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2009: 229-232p.
- PATRÍCIO, Lúcio Flávio Santos, MARTINS, Paulo Antonio Firme, LANDRE JR, Jánes, SANTOS, Carlos Eduardo. *A estampagem incremental como alternativa para a conformação em pequenas séries. Corte & Conformação, Outubro 2010: 26-44p*
- SCHAEFFER, Lirio. *Conformação de Chapas Metálicas. Porto Alegre, RS: Imprensa Livre, 2004, 167p.*
- SOUZA, Sérgio Augusto de. *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. 5. São Paulo: Edgar Blücher, 1984. 286p.*
- SY, Lê Van. *Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet. Tese de Doutorado, Innovazione Meccanica e Gestionale, Università degli Studi di Padova, Padova: Università degli Studi di Padova, 2009, 205p.*

PROCESS STUDY IN INCREMENTAL SHEET FORMING BRASS 70/30

ABSTRACT

The study approaches through bibliographies and experiments, the process of Incremental Sheet Forming Metal (ISF - Incremental Sheet Forming) for 70/30 brass 0.5 mm thick. The experiments based on practical variant of the ISF called Forming with Single Point Incremental (SPIF - Single Point Incremental Forming). For the execution of practical tests, we used the resources: CAD / CAM, CNC machining center with three axes, an incremental matrix, incremental forming tool, a device and a punch press sheets. The paper presents the procedures for characterization and mechanical test of 70/30 brass sheet, which together provide information of practical tests on the applicability of the incremental forming brass sheet 70/30.

Keywords: Incremental Forming, Incremental Forming Tool, Incremental Matrix, 70/30 brass sheet.