

Processo

Avaliação dos ângulos-limite na estampagem incremental de alumínio e titânio

A estampagem incremental é um processo automatizado de conformação de chapas que permite a obtenção de formas diversas sem o uso de matrizes. O processo é realizado em equipamento CNC e o ferramental consiste basicamente em um prensa-chapas e um punção. Existem, entretanto, ângulos-limite nos quais as chapas podem ser conformadas sem que apresentem fratura. Além disso, observa-se, como limitação do processo, o retorno elástico da chapa após a remoção da força aplicada pelo punção. Este estudo apresenta uma avaliação dos ângulos em que chapas de titânio comercialmente puro (CP) e alumínio podem ser conformados com segurança por estampagem incremental, e os desvios na precisão do processo devido ao retorno elástico.

L. S. Bertol, L. Folle, L. Schaeffer e W. Kindlein Júnior

Os processos tradicionais de estampagem de metais, frequentemente usados para a conformação de chapas, envolvem custos relevantes associados aos equipamentos e ferramentas. Por consequência, a aplicação industrial da estampagem de

chapas metálicas se justifica economicamente apenas para largas escalas de produção (produção em massa). Neste caso, os custos relacionados à fabricação das matrizes de estampagem são distribuídos entre um grande número de peças. Além disso, os processos tradicionais possibilitam alto nível de automação industrial, mas apresentam baixa flexibilidade.

Em contrapartida, nas últimas décadas a indústria de conformação de metais vem se deparando

com outras necessidades. Entre elas está a produção de pequenos lotes de componentes a partir de chapas metálicas, a crescente demanda por flexibilidade do processo e a necessidade de reduzir o tempo que o produto leva para chegar ao mercado. As necessidades mencionadas são incompatíveis com os processos tradicionais de estampagem.

Em decorrência disso, novos processos de conformação, os quais não possuem os custos intrínsecos aos equipamentos

Liciane Sabadin Bertol e Luis Folle são mestres em engenharia e estudantes de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); Lirio Schaeffer e Wilson Kindlein Júnior são doutores em engenharia e professores do PPGEM/UFRGS. Este artigo foi apresentado durante a 30ª edição do Senafor, realizada entre os dias 20 e 22 de outubro de 2010, em Porto Alegre (RS). Reprodução autorizada pelos autores.

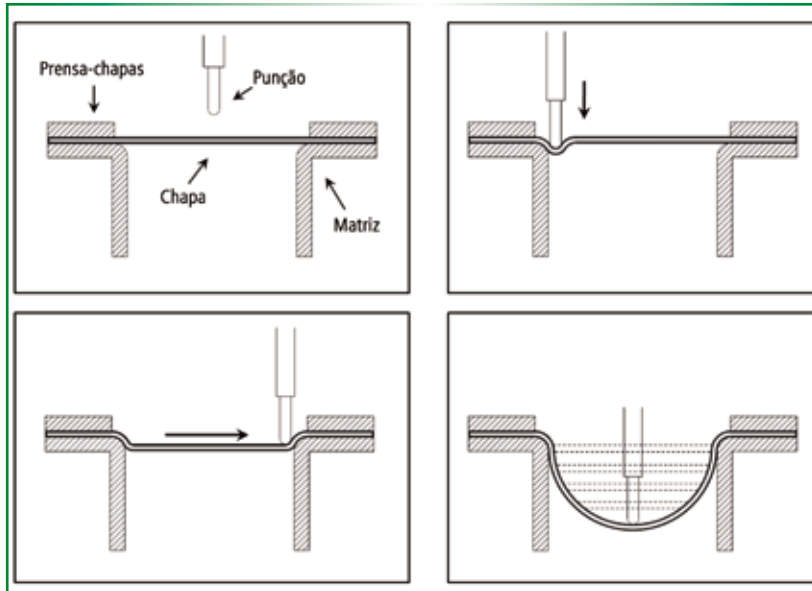


Fig. 1 – Equipamento utilizado para o processo de estampagem incremental (fonte: adaptado de Hussain et al.⁽⁷⁾)

tradicionais, vêm sendo propostos recentemente^(1, 3, 5, 6, 8, 9), usualmente classificados como processos de estampagem incremental.

A ideia básica das operações de estampagem incremental é obter a forma desejada do componente pela ação de um pequeno punção ao longo de uma trajetória espe-

cificada pelo usuário. Para isso, um torno ou uma fresadora CNC podem ser utilizados para deformar plasticamente a chapa, impondo à ferramenta uma trajetória específica controlada por computador. A forma final do componente depende basicamente da trajetória atribuída à ferramenta, pois é determinada pela soma das deformações locais induzidas pelo punção ao longo de sua trajetória. A figura 1 ilustra os dispositivos utilizados para a conformação de chapas por estampagem incremental.

O conceito básico, de fato, é evitar as matrizes tradicionais, dando ao punção o papel de conformar progressivamente a forma final do componente projetado. Essa concepção reduz significativamente os custos com equipamentos, mesmo

**PRENSA JUNDIAÍ,
SOLUÇÕES INTELIGENTES
SERVIÇOS EFICIENTES.**



Rod. Edgard Máximo Zambotto Km 55 - nº 5500
Campo Limpo Paulista - SP - Tel.: 11 4039.8200
vendas@prensajundiai.com.br
www.prensajundiai.com.br

JUNDIAÍ
PRENSA JUNDIAÍ S A

Processo

quando a lentidão do processo reduz as suas vantagens em termos de custo, caso algumas centenas de produtos iguais devam ser produzidas.

Tais considerações explicam por que a estampagem incremental permite uma relevante redução dos custos associados à fabricação da matriz, e também permite que se atinja um alto nível de flexibilidade no processo. Assim, os processos de estampagem incremental são uma alternativa poderosa quando pequenos lotes precisam ser fabricados. Essa possibilidade torna-se uma necessidade para as aplicações nas quais é claro que o produto deve ser único. A área médica representa, certamente, um destes casos.

De fato, mesmo quando diversos produtos podem ser classificados como similares, a diferença natural entre eles de acordo com os aspectos antropométricos de cada indivíduo leva as pesquisas em direção à alta customização, a fim de garantir o melhor desempe-

Tab. 1 – Parâmetros de estampagem utilizados para os ensaios

Velocidade de avanço	1.000 mm/min
Velocidade de penetração	800 mm/min
Rotação	Ferramenta livre
Incremento	5% do raio da ferramenta
Espessura da chapa	1 mm
Diâmetro da ferramenta	8 mm

no possível para o produto. Neste sentido, este estudo avalia a possibilidade de utilização do processo de estampagem incremental para a fabricação de implantes customizados para reconstrução óssea craniofacial. Além disso, busca estabelecer os ângulos-limite que permitem a conformação de chapas de titânio e de alumínio, bem como as limitações com relação à precisão do processo.

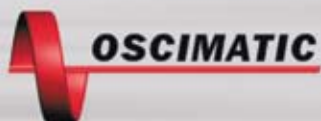
Materiais e métodos

Com o objetivo de determinar parâmetros que viabilizem a estampagem incremental de chapas de titânio comercialmente puro (CP) e de alumínio, este estudo avalia os ângulos-limite de conformação, abaixo dos quais as chapas podem

ser conformadas com segurança. Além disso, foram realizadas medições a fim de comparar os níveis de deformação experimentados pelos metais estudados quando submetidos ao processo de estampagem incremental, em comparação com o processo convencional de estampagem. Para possibilitar a medição das deformações principais, as chapas foram marcadas com grades de círculos pelo processo de gravação eletroquímica. Após a conformação, os círculos foram medidos com o auxílio de uma régua especial graduada.

Para a determinação dos parâmetros para a estampagem incremental, geometrias em forma de cone, com diâmetro de 60 mm, altura de 40 mm e ângulos de 30, 40, 45, 50, 60 e 70 graus foram confeccionadas, utilizando o *software* EdgeCam para a geração das estratégias. Os parâmetros utilizados para a estampagem são sumarizados na tabela 1, com base em estudos publicados sobre esse processo.

AUTOMATIZAÇÃO DE SOLDAGEM



MIG/MAG - Arame Tubular
Comandos na Mão do Soldador

Trator de fixação magnética não requer trilho.

Simula todos os movimentos humanos necessários para soldagem através do mecanismo oscilador.

Visualização dos parâmetros em visor LCD.

Correção dos parâmetros de posicionamento da tocha em tempo real.

Repetibilidade da qualidade da soldagem.

Absoluta Segurança Operacional.



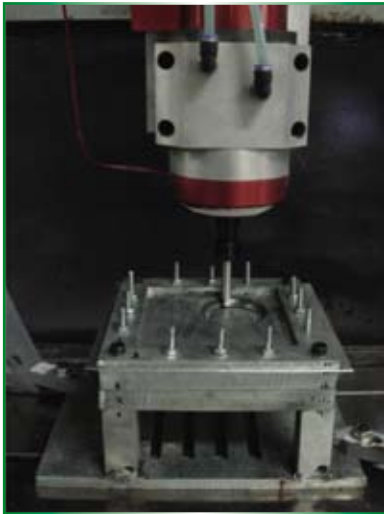


Fig. 2 – Ferramental do processo de estampagem incremental

Um prensa-chapas com área de 200 x 200 mm foi desenvolvido para que a chapa ficasse fixa durante o processo e fosse deformada plasticamente. Ferramentas com ponta esférica foram utilizadas como punção, empurrando pontualmente a



Fig. 3 – Modelo tridimensional do crânio do paciente, com o defeito ósseo reparado pelo implante modelado

chapa de acordo com a trajetória e os parâmetros definidos. Para a conformação das chapas de titânio foi utilizada uma ferramenta de aço rápido 10%Co e MoS2 em pó como lubrificante (Pó Z, marca Molykote). Para

a conformação das chapas de alumínio utilizou-se ferramenta de aço *inox* e graxa com 5% de grafite como lubrificante. O processo foi realizado em um equipamento CNC modelo Digi-mill 3D, da marca Tecnodrill. O ferramental pode ser visualizado na figura 2. Cabe salientar que o processo de conformação da chapa é totalmente automatizado.

O retorno elástico experimentado pelas chapas foi avaliado utilizando um caso médico de necessidade de reconstrução craniana. Um modelo tridimensional do implante, modelado no *software* 3D Studio Max e ilustrado, em verde, na figura 3, foi conformado por estampagem incremental e digitalizado, utilizando a técnica



Sistema de corte CNC a Plasma

Precisão a baixo custo

- Custo Acessível e Fácil de Usar;
- Portátil e Leve;
- Precisão: 0,4mm;
- Trilho extensível.

Distribuidor Autorizado:

Hypertherm
powermax



exaustec sistemas

Brasília - DF
(61) 3399-7499/ 3399-1183
exaustec.sistemas@gmail.com / www.exaustec-brasil.com.br

Processo

ca de digitalização tridimensional a *laser* (equipamento Digimill 3D, Tecnodrill).

Resultados e discussão

Para os diferentes ângulos medidos, foi constatado que o ângulo máximo aconselhado para a conformação do titânio por estampagem incremental, considerando os parâmetros previamente descritos, é de 45° . Nesse ângulo a chapa sofreu deformação, sem apresentar microtrincas ou fissuras (figura 4a), mas acima desse valor ela apresentou uma deformação excessiva e se rompeu (figura 4b). Utilizando o ângulo de 45° , o valor máximo de alongamento obtido foi de 60%. Entretanto, pode-se prever a utilização de um fator de segurança, com a conformação apenas de peças que exijam menores graus de deformação.

Para o alumínio, foram estampados corpos de prova com geometria do tipo cone, que resistiram aos ângulos de 30, 40, 50 e 60 graus. Este último pode ser visualizado na figura 5a. Nele, foram medidos valores de alongamento de até 140%. A partir do ângulo de 70 graus ocorreu a fratura do material (figura 5b).

Comparando as deformações sofridas pelo metal nos processos de estampagem incremental e no processo convencional (curvas-limite de conformação) – previamente determinadas por outros autores, como Folle *et al.*⁽⁴⁾ para o alumínio Al 1100 e Chen e Chui⁽²⁾ para titânio CP –, é possível observar a alteração no comportamento

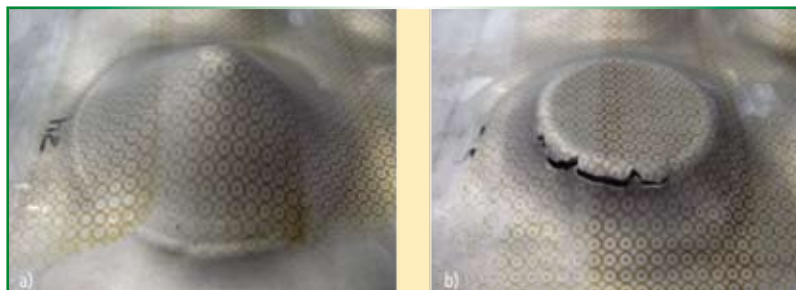


Fig. 4 – Ensaios de estampagem incremental em titânio, com a conformação de geometria do tipo cone. a) Cone formando um ângulo de 45° com o plano da chapa; b) cone formando ângulo de 50° com o plano da chapa, que apresentou rompimento.

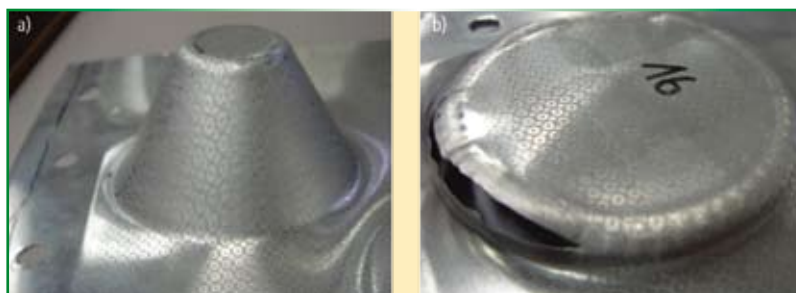


Fig. 5 – Ensaios de estampagem incremental em alumínio, com a conformação de geometria do tipo cone. a) Cone formando ângulo de 60° com o plano da chapa; b) cone formando ângulo de 70° com a base da chapa, que apresentou rompimento.

do material com relação ao seu modo de deformação.

Na estampagem incremental das chapas de alumínio, os valores de deformação apresentados estão acima da CLC medida para o material (figura 6). Há um incremento na capacidade de o material deformar-se, sem sofrer

fratura. Para a estampagem incremental das chapas de titânio, entretanto, não foi observada tal propriedade nos ensaios realizados com as condições descritas (figura 7, pág. 48). Tal fato leva à consideração de outros fatores que afetam a capacidade de conformação, como a presença

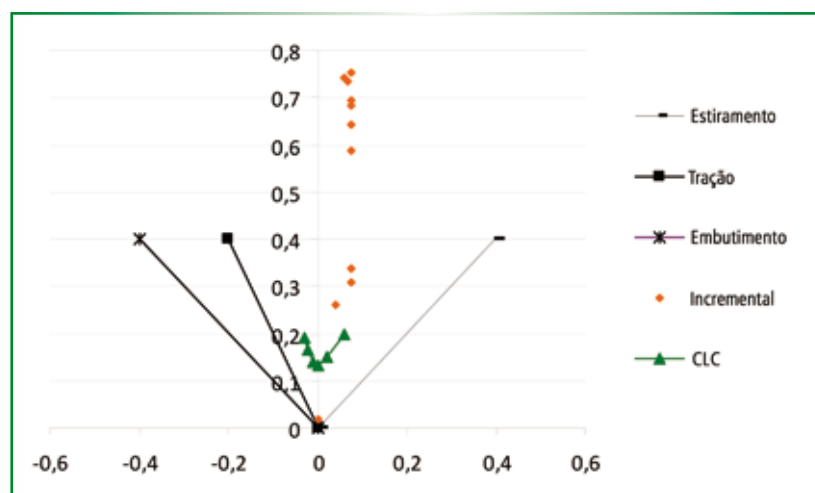


Fig. 6 – Diagrama-limite de conformação das chapas de alumínio utilizadas

Processo

de defeitos no material ou atrito excessivo.

Para aplicações que exijam formas extremamente complexas, o processo de estampagem incremental pode ser considerado inviável devido à limitação do ângulo de conformação (45°). O esqueleto craniofacial, por sua vez, apresenta regiões, principalmente na face, que apresentam geometria complexa, o que exigiria a conformação da chapa em ângulos superiores ao limite determinado, inviabilizando o processo. O crânio, por sua vez, apresenta curvatura suave, o que possibilita que ele seja fabricado por estampagem incremental.

Após a definição da superfície a ser conformada, obe-

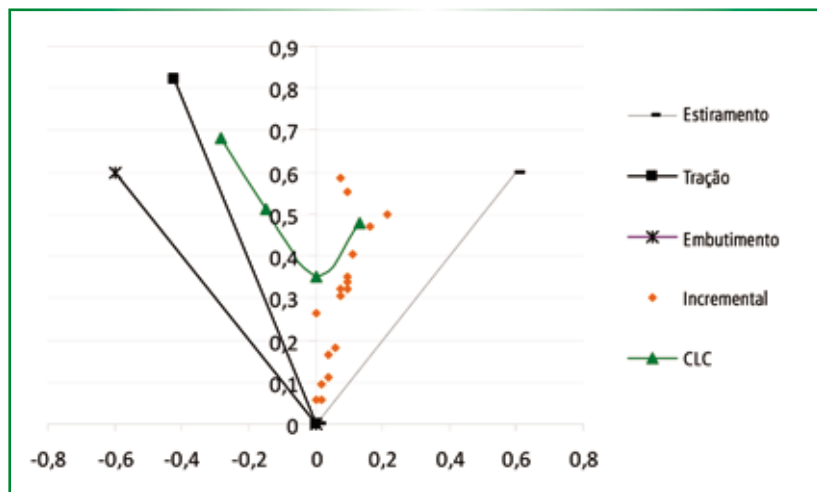


Fig. 7 – Diagrama-limite de conformação das chapas de titânio utilizadas

decendo aos ângulos-limite de conformação, uma estratégia de conformação em software CAM foi gerada (figura 8, pág. 49). Para este caso, utilizou-se a es-

tratégia que define uma curva constante (*constant cusp*) de 0,01 mm e um *step over* de 5%, com trajetória espiral. Deve-se tomar cuidado para que o incre-

Prestação de Serviços

- **Perfilação**
 - **Slitter** (CORTE LONGITUDINAL) e ● **Blanks** (CORTE TRANSVERSAL)
- **Corte e Dobra** (GUILHOTINAS / DOBRADEIRAS)
- **Usinagem**
- **Soldagem**
- **Calderaria Leve**
- **Estamparia**
- **Confecção FERRAMENTAIS**
- **Eletroerosão à FIO e PENETRAÇÃO**

Consulte
(11) 2487-5500

HOME eletronic **TECNOLOGIA** **Cumbica - Guarulhos- SP**
vendas@homeline.com.br
www.homeline.com.br

SANDEZA
Indústria Metalúrgica

Fabricação de Peças Usinadas, Conjuntos Soldados e Componentes Industriais

A sandeza conta com uma estrutura de alto nível para desenvolver seus serviços de usinagem, corte laser, dobra, soldagem e pintura com total segurança e garantia de qualidade. Possui equipamentos modernos que possibilitam grandes capacidades de trabalho, além de departamentos específicos para cada área da empresa. Confira um pouco da estrutura:

Usinagem 6 Centros de Usinagem; 7 Tornos CNC; 3 Tornos Convencionais; 5 Fresadoras Ferramentais; 3 Rosqueadeiras.	Solda e Dobra 15 Máquina de Solda; 1 Dobradeira; 1 Guilhotina; 3 Pressas.	Qualidade 1 Máquina de Medir Coordenadas; 1 Braço Tridimensional Portátil; 1 Laboratório de Soldagem.
Corte Laser 2 Máquinas de Corte Laser (cortando em segundos de até 10mm)	Pintura 1 Cabine de Pintura Líquida; 1 Cabine de Pintura Pó; 1 Estufa; 1 Jato de Granalha; 1 Linha de Banho de Fosfato	

ISO 9001
SISTEMA DE GESTÃO DE QUALIDADE

SANDEZA INDUSTRIA METALURGICA
Av. Nelsons Prado, 1090 - Vila Maria - Jd. - SP
CEP: 07.208.220 - São Paulo/SP - Fone/Fax: (11) 5624.7450 / (11) 5624.3105
vendas@sandezas.com.br / www.sandezas.com.br

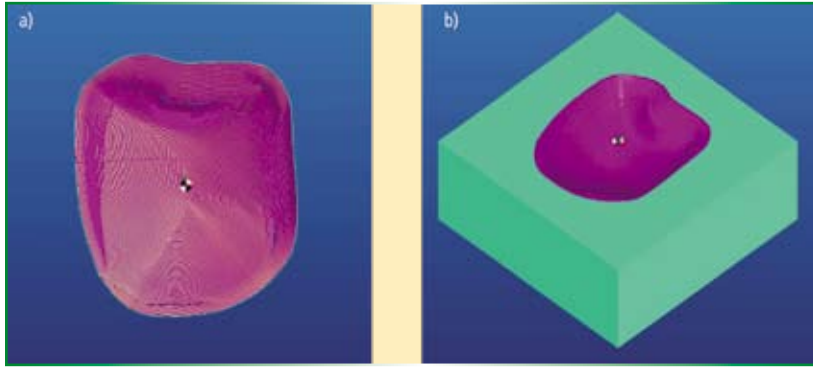


Fig. 8 – Estratégia de conformação definida no software CAM. a) Trajetória da ferramenta; b) simulação do processo.

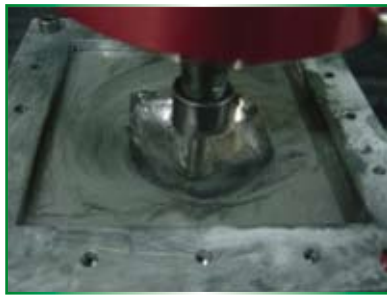


Fig. 9 – Estampagem incremental do protótipo do implante



Fig. 10 – Protótipo do implante de reconstrução de osso frontal e órbita confeccionado em alumínio pelo processo de estampagem incremental

mento seja pequeno o suficiente para garantir que apenas um pequeno ponto da ferramenta encontre a superfície do metal a ser conformada, aumentando a pressão exercida.

Um exemplo de conformação de implante de crânio é ilustrado nas figuras 9 e 10.

A diferença entre a peça projetada e a peça final, conformada por estampagem incremental, pode ser visualizada na figura 11 (pág. 50). Tal análise, realizada por meio de digitalização tridimensional a *laser*, fornece informações importantes sobre a precisão do processo. Para a fabricação de implantes personalizados, como é o caso deste estudo, tal precisão é particularmente importante, uma vez

USINANDO COM QUALIDADE PELO MENOR CUSTO DO MERCADO



CLIENTES APROVAM

Com a compra da linha Corte e Dobra Atlasmaq Guilhotina Hidráulica Atlasmaq GHA 4x2000 e Prensa Viradeira Atlasmaq PVA 40/2000, aumentamos significativamente a capacidade e versatilidade da produção em nossa empresa. Gílson Baptista dos Santos proprietário da empresa Nagiltec Indústria e Comércio - www.nagiltec.com.br



ATLASMAQ
Atender bem para atender sempre

FÁBRICA E SHOWROOM - SP

Rua Piratininga, 557/607 - Brás
São Paulo - Tel.: (11) 3511 3030
www.atlasmaq.com.br



Processo

que o implante deve adaptar-se exatamente à estrutura óssea do paciente.

As diferenças encontradas entre a peça projetada e a peça efetivamente executada variam de zero até um valor máximo de 5,9 mm. Tal diferença pode ser explicada pelo retorno elástico experimentado pelo material, após a liberação da pressão exercida pelo punção. Para a aplicação desta metodologia, considerando material, parâmetros de processo e ferramental, a precisão deve apresentar melhores resultados, uma vez que o implante deve adaptar-se exatamente à anatomia do paciente. A utilização de um fator de escala pode se mostrar uma alternativa, atribuindo à peça desejada dimensões maiores do que ela realmente deve ter. Assim, pode ser possível compensar o retorno elástico experimentado pelo material. A quantificação do valor exato a ser incrementado no modelo

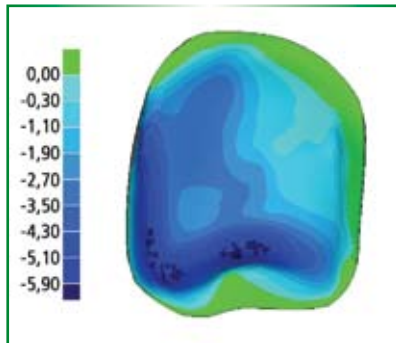


Fig. 11 – Diferenças, em milímetros, entre o implante projetado e o implante conformado por estampagem incremental

deve, entretanto, ser previamente determinada.

Conclusão

Neste estudo foi avaliada a conformação de chapas de alumínio e titânio por estampagem incremental. Por meio deste processo, devido à sua automatização, podem ser fabricadas formas diversas sem a necessidade de utilização de matrizes. Entretanto, existem ângulos-limite nos quais a chapa metálica pode

ser conformada sem que ocorra fratura, e esses ângulos variam conforme o material que está sendo conformado.

Para a avaliação desses ângulos-limite foi realizada a conformação de corpos de prova em formato de cone, em chapas com dimensões de 200 x 200 x 1 mm. As chapas de titânio suportam ângulos de 45°; acima deste ângulo foi observado o rompimento da chapa. O alumínio, por sua vez, tolera maiores ângulos de conformação, possibilitando a conformação em até 60°, sem fraturas.

Por fim, comparando as deformações que podem ser experimentadas pelos metais no processo de estampagem incremental, observa-se um aumento da deformação sofrida pela chapa de alumínio em relação aos processos convencionais de estampagem. Para o titânio, por sua vez, o aumento da deformação sofrida não foi significativo.

CORTE, DOBRA, PEÇAS TÉCNICAS E GABINETES



Para que suas peças sejam fabricadas com a melhor tecnologia, agilidade e baixo custo, dispomos de equipamentos com a mais moderna tecnologia existente, assim atendemos as mais variadas aplicações nos diversos segmentos.

- CORTE A LASER CNC • PUNÇONADEIRAS • DOBRA CNC • ESTAMPAS
- SOLDAS MIG, TIG, PONTO E ACABAMENTO • TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIES
- BANHOS FRIOS DECAPANTES E FOSFATIZANTES
- PINTURA ELETROSTÁTICA PÓ • MONTAGEM MECÂNICA

PROCURA-SE
REPRESENTANTE

Porto Alegre
Fone/Fax: 51 3340 6567
metalógica@metalógica.com.br
www.metalógica.com.br

São Paulo
Fone/Fax: 11 4368 7828
metalaser@metalaser.com.br
www.metalaser.com.br

metalaser
metalógica

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo aporte financeiro. Agradecem também ao Senai Cimatec da Bahia por disponibilizar a licença para uso dos *softwares* eta/Dynaform e LS-Dyna.

Referências

- 1) AMBROGLIO, G.; DE NAPOLI, L.; FILICE, L.; GAGLIARDINI, F.; MUZZUPAPPA, M. Application of Incremental Forming process for high customized medical product manufacturing. In: *Journal of Materials Processing Technology*, v. 162–163, 2005, pp.156–162.
- 2) CHEN, F.K.; CHIU, K.H. Stamping formability of pure titanium sheets. In: *Journal of Materials Processing Technology*, v.170, p.181–186, 2005.
- 3) DEJARDIN, S.; THIBAUD, S.; GELIN, J.C.; MICHEL, G. Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts. In: *Journal of Materials Processing Technology*, v.210, 2010, pp. 363–369.
- 4) FOLLE, L.; ARRUDA, R.P.; MARCA, D.; SCHAEFFER, L. Escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva limite de conformação. In: *Corte e Conformação de Metais*, v.3, p.64-76, 2008.
- 5) G. HUSSAIN, G.; GAO, L.; HAYAT, N.; CUI, Z.; PANG, Y.C.; DAR, N.U. Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet. In: *Journal of Materials Processing Technology*, v.203, 2008, pp. 193–201.
- 6) HAM, M.; JESWIET, J. Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming. In: *Annals of the CIRP*, Vol. 56/1/2007.
- 7) HUSSAIN, G.; GAO, L.; DAR, N.U. An experimental study on some formability evaluation methods on negative incremental forming. In: *Journal of Materials Processing Technology*, v. 186, 2007, pp. 45-53.
- 8) HUSSAIN, G.; GAO, L.; HAYAT, N.; XU, ZIRAN. A new formability indicator in single point incremental forming. In: *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, 2009, pp. 4237–4242.
- 9) MICARI, F.; AMBROGLIO, G.; FILICE, L. Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends. In: *Journal of Materials Processing Technology*, v. 191, 2007, pp. 390–395.

22ª Exposição Internacional de Tecnologias para Trabalhar Chapas Metálicas



The World's No.1

Para o futuro sustentável



Tecnologia Eficiente

Processos de fabrico amigos do ambiente

Utilização inteligente dos materiais

23 – 27 de outubro de 2012
Hanôver, Alemanha

Chapas de metal, tubos, secções (ferrosa e não-ferrosa)
Produtos acabados, componentes, conjuntos • Manuseamento
Separação, corte • Formação • Tecnologia para trabalhar
chapas de metal flexíveis • Tubos/Processamento de secção
Elementos de maquinaria • Processamento de chapas de
metal/estruturas de plástico híbridas • Junção, Soldadura,
Engaste • Tecnologia de tratamento de superfícies para chapas
de metal • Ferramentas, Matrizes • Controlo, Regulação,
Medição, Testes • Garantia de qualidade • Sistemas CAD/CAM,
Processamento de dados • Equipamento de fábrica e armazém
• Protecção do ambiente, Reciclagem • Segurança no trabalho
• Investigação e desenvolvimento

www.euroblech.com