

Análise do comportamento de chapas de titânio em estampagem incremental

Este artigo relata um experimento realizado para determinar os parâmetros de processo adequados para a conformação de uma chapa de titânio pelo processo de estampagem incremental, tendo em vista a aplicação em implantes ortopédicos. Amostras de chapas de titânio Ti-CP grau 2 com espessura de 0,5 mm foram estampadas incrementalmente na modalidade de processo sem ponto de apoio (SPIF) e submetidas a testes que verificaram as deformações na espessura, o ângulo-limite de parede e a rugosidade superficial.

Atualizado em: 21/11/2022

Autor(es): A. Daleffe, L. Schaeffer, D. Fritzen, A. Milanez



A estampagem incremental de chapas (ISF, sigla do inglês incremental sheet forming) é um moderno e inovador processo de conformação que oferece economia significativa e vantagens relacionadas à flexibilidade de produção e ao meio ambiente, sobretudo para pequenas escalas de produção e para fabricação customizada (sob medida) de produtos derivados de chapas metálicas

As vantagens relacionadas à flexibilidade de produção do processo de estampagem incremental têm sido objeto de estudo ultimamente. Sua aplicabilidade é agora consensual no que diz respeito à produção de pequenas séries e de protótipos em componentes de chapa, atendendo aos requisitos de diferenciação, redução de custos, redução do ciclo concepção-produção e encurtamento do ciclo de vida (mas também manufatura sustentável) que permeiam as estratégias corporativas atuais(9).

O processo de estampagem incremental se desenvolve à temperatura ambiente e requer um centro de usinagem CNC, uma ferramenta de ponta esférica e uma estrutura simples para suporte e fixação da chapa(7).

Existem atualmente quatro modalidades principais de estampagem incremental, cujas características variam conforme o número e a configuração dos pontos de apoio. A figura 1 (pág. 38) mostra desenhos esquemáticos dessas modalidades(2)

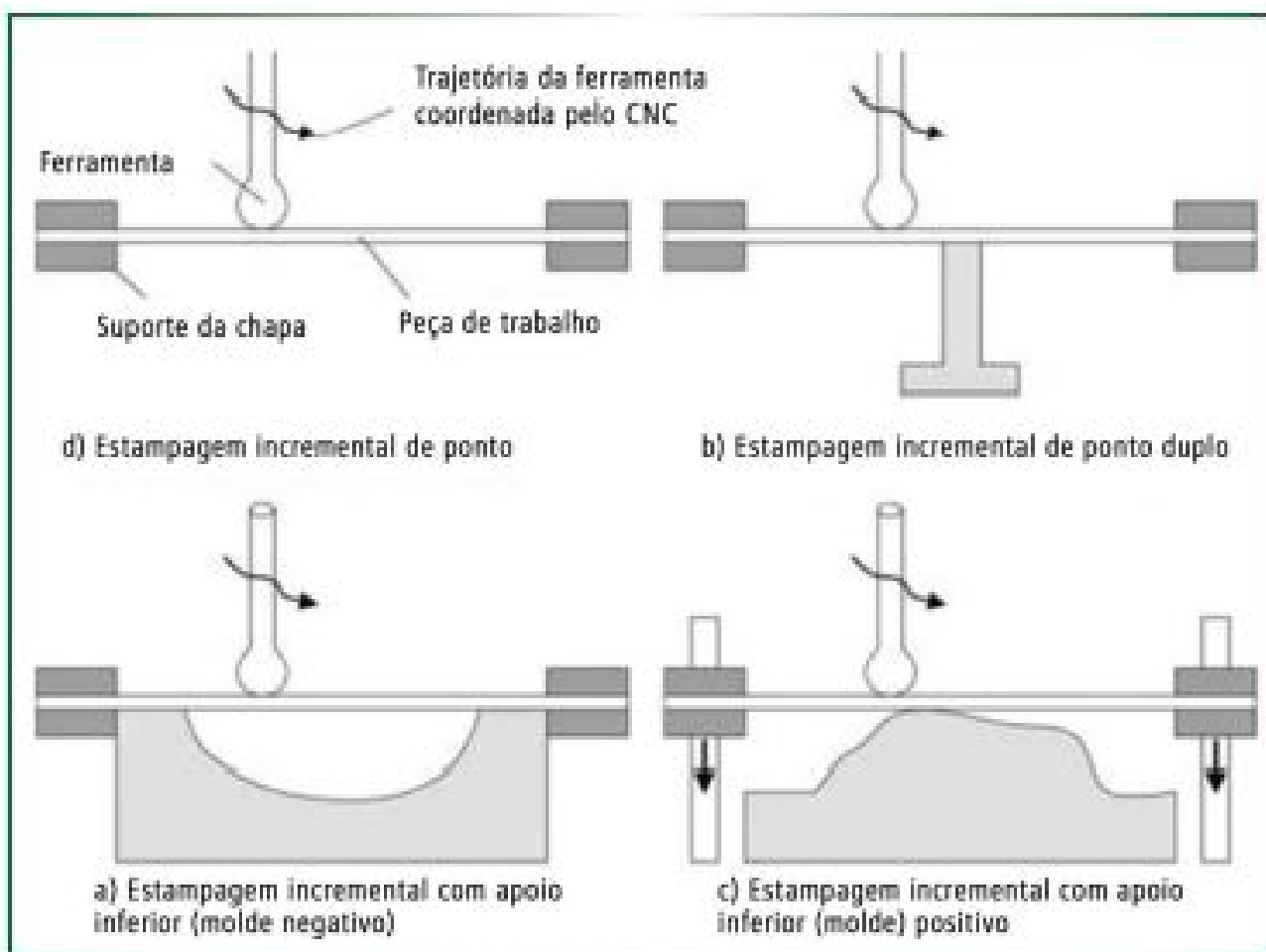


Fig. 1 – Modalidades de estampagem incremental(1)

As modalidades de estampagem incremental dividiram-se em duas famílias, dependendo do número de pontos de contato entre chapa, ferramenta e matriz inferior. Assim, temos processos dos tipos SPIF – sigla inglesa para estampagem incremental de ponto simples (single point incremental forming) – e TPIF – estampagem incremental de ponto duplo (two point incremental forming). Na modalidade SPIF há uma característica não desejada de discrepância geométrica entre o modelo digital em CAD e a peça real. Existem recursos para minimizar tais discrepâncias, como múltiplos estágios de estampagem e o uso de algoritmo para correção das trajetórias da ferramenta, porém esses resultam em aumento do tempo de manufatura da peça. O processo TPIF, por outro lado, oferece um decréscimo da conformabilidade da chapa e um incremento da acuidade geométrica entre o modelo teórico e o real, em apenas um estágio(3).

Estampagem incremental

Na estampagem incremental, a chapa a ser conformada (blanque) é presa em um suporte retangular móvel, independente do formato final da chapa, que pode efetuar movimentos controlados na direção vertical, ou seja, paralelamente ao eixo Z de um sistema CNC. Enquanto a estampagem estiver acontecendo, elementos de fixação distribuídos em torno da chapa evitam que ela se movimente, criando assim uma deformação plástica na chapa. Acoplada ao eixo-árvore de um dispositivo CNC, uma ferramenta de cabeça esférica dá

início ao processo por meio do movimento contínuo sobre a superfície da chapa. Gradativamente, por meio de incrementos verticais negativos, a ferramenta realiza a conformação (figura 2)(8).

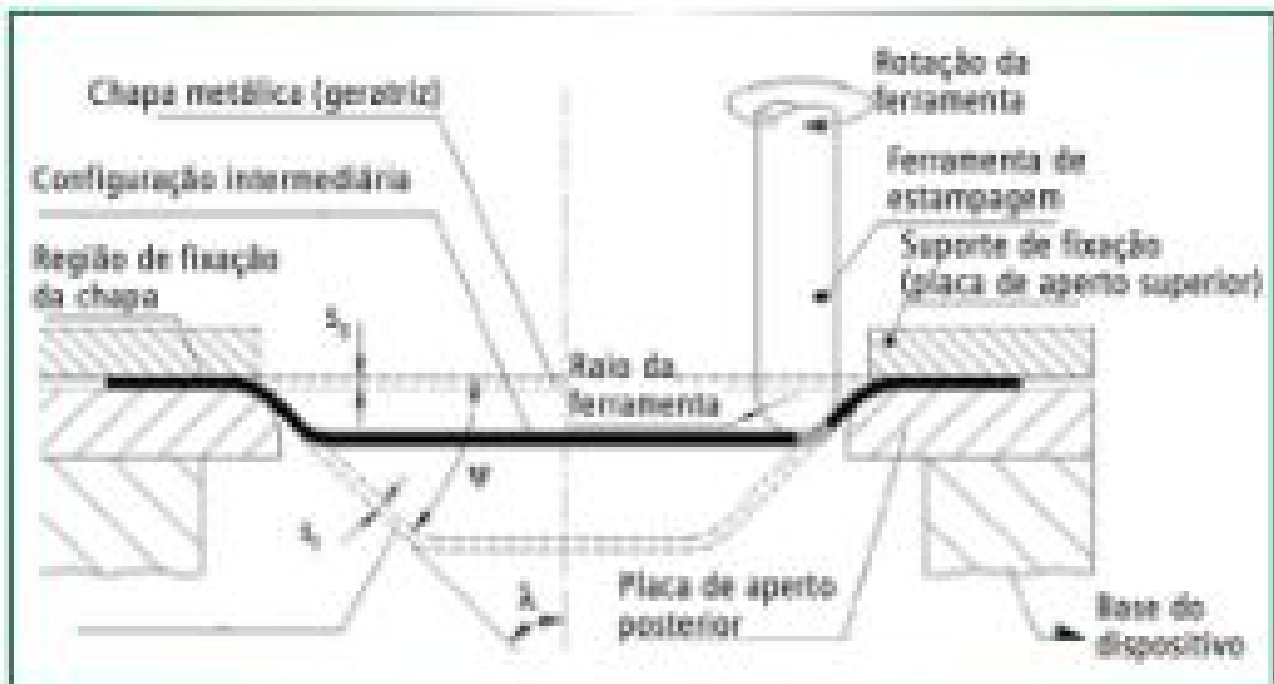


Fig. 2 – Princípio do processo de estampagem incremental(8)

A trajetória de deformação da ferramenta é baseada em tecnologia de comando numérico (CN), que é gerada a partir do sistema CAM normal (6). O produto desse processo pode ser feito diretamente de um modelo de CAD 3D de produto acabado, sem qualquer tipo de matriz(14).

O grande diferencial da estampagem incremental é o fato de que a estampagem pode ser realizada com uma matriz bastante simplificada, ou mesmo sem matriz. Isso torna o processo muito interessante para pequenos volumes de produção e para a prototipagem rápida de componentes de chapas(4).

Materiais e métodos

Este capítulo traz a caracterização de uma chapa de titânio usada para os testes práticos de estampagem incremental tipo SPIF – estampagem incremental de ponto simples.

Caracterização das chapas

Na caracterização da chapa são feitos testes para determinar qual é o tipo de material que compõe estas peças. Os teste realizados são mecânicos e químicos.

Ensaio de tração

A melhor maneira para determinar as propriedades mecânicas de um metal por tração é ensaiar um corpo de prova retirado da peça. Os ensaios de tração geralmente são feitos em corpos de prova normalizados pelas várias normas técnicas(13).

As chapas de Ti-CP F67 G2 foram adquiridas da empresa Realum Comércio de Metais, de São Paulo (SP). A chapa para o ensaio de tração tinha espessura de 0,5 mm e dela foram retirados três corpos de prova, com o sentido de laminação variando entre 0°, 45° e 90° em relação ao comprimento do corpo de prova. O formato seguiu a norma ABNT 6152 / DIN EN 10002 para corpos de prova de ensaio de tração para chapas, conforme mostra a figura 3.

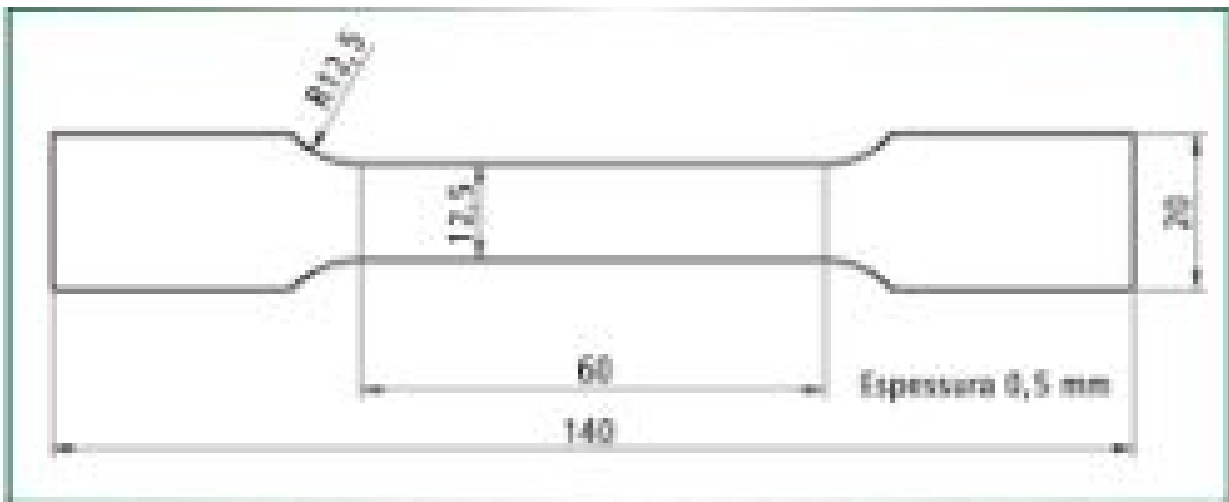


Fig. 3 – Dimensões padronizadas do corpo de prova

Após a realização dos ensaios, foram geradas as curvas de tensão-deformação convencionais para cada corpo de prova retirado em relação ao sentido de laminação: 0°, 45° e 90° (figura 4).

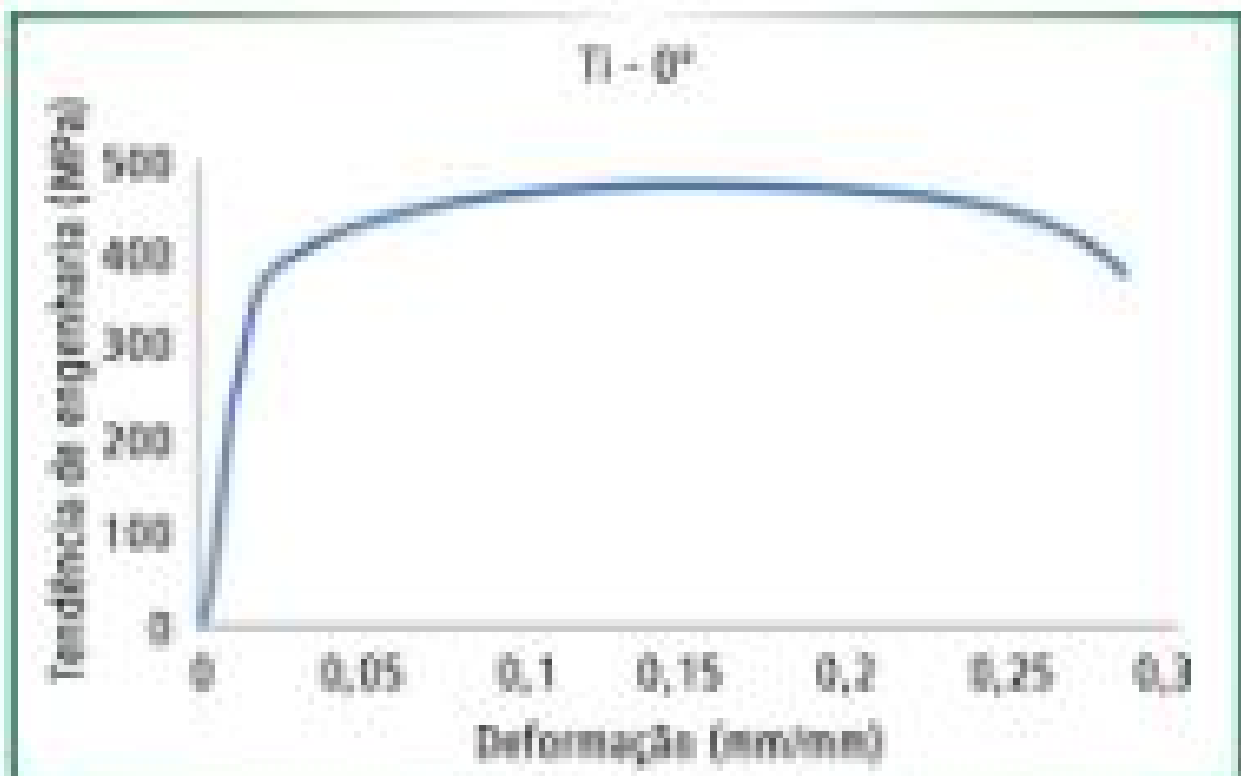


fig. 4 – Curva convencional $\tau \times \epsilon$ do Ti-CP Grau 2 para ângulo de laminação 0°

No ensaio realizado a 0° foi obtida a curva mostrada na figura 4, com tensão máxima (σ_{max}) de 490 MPa. Essa curva está próxima da encontrada por Moosruggger(10), em que a tensão máxima (σ_{max}) foi de 520 MPa.

A curva de escoamento ($k_f \times \phi$) do titânio CP grau 2 pode ser definida matematicamente por $k_f = 772,69 \times \phi^{0,200}$ e está representada na figura 5 (pág. 41).

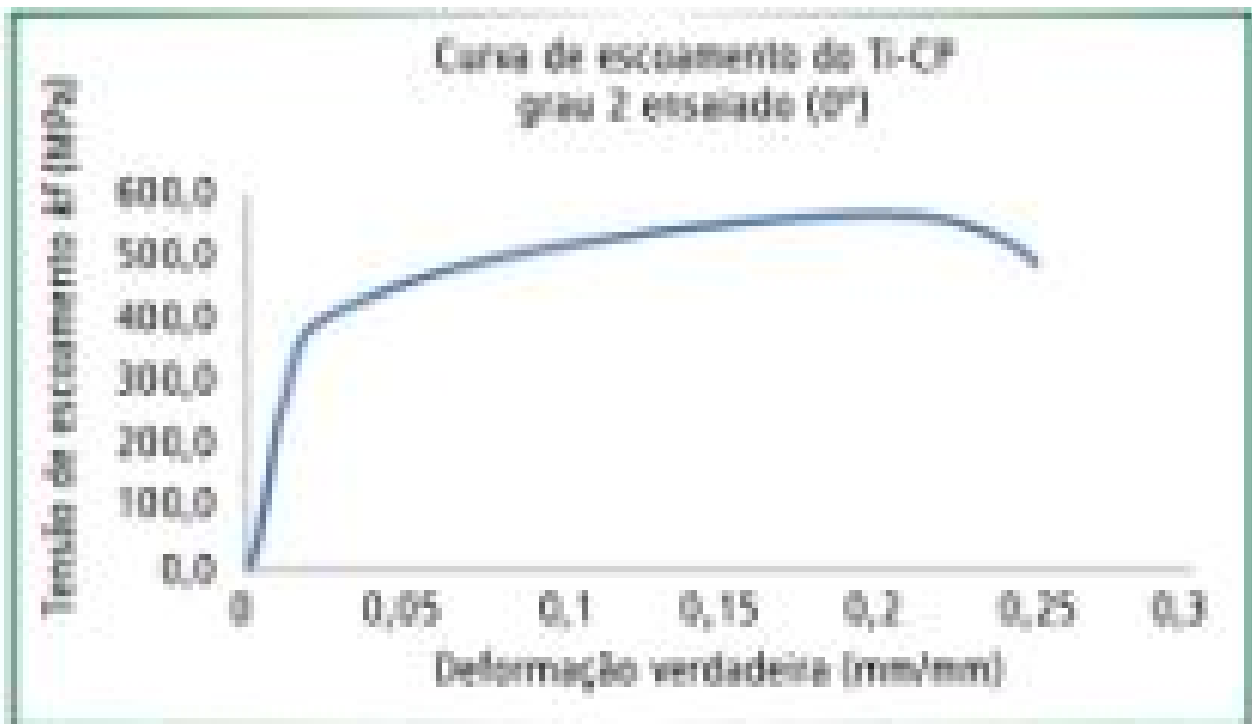
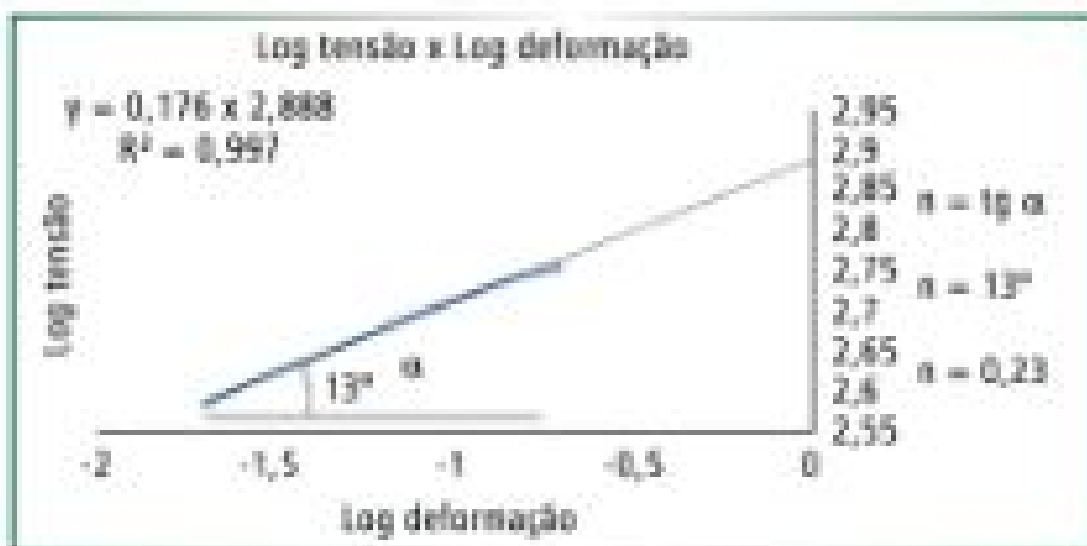


Fig. 5 – Curva de escoamento do titânio CP, Grau 2

O índice de encruamento (n) é um importante indicador das características de encruabilidade dos materiais. Quanto maior o índice de encruamento (n), maior é a encruabilidade do material. O índice de encruamento (n) pode ser obtido com a transferência dos dados da tensão de escoamento (k_f) e deformação (ϕ) para um diagrama em escala logarítmica (figura 6). Normalmente se obtém uma reta, sendo o valor “ n ” dado pela inclinação (α) desta reta ($n = \text{tg } \alpha$) (12).



Índice de anisotropia – Na laminação a frio de chapas, ocorre um fenômeno de alongamento dos grãos na direção da laminação, tornando o material anisotrópico e variando suas propriedades mecânicas. O índice de anisotropia pode ser determinado por ensaio de tração e representa a razão entre as deformações verdadeiras de comprimento e largura do corpo de prova, segundo a direção de laminação(2).

O índice de anisotropia r é definido por:

$$r = \phi b / \phi_1$$

$$r = \ln(b/b_0) / -\ln(l/l_0)$$

Sendo:

- b_0 [mm]: largura inicial do
 - corpo de prova no ensaio de tração; b [mm]: largura final do corpo de prova no ensaio de tração;
 - l_0 [mm]: comprimento inicial do corpo de prova no ensaio de tração;
 - l [mm]: comprimento final do corpo de prova no ensaio de tração.

A anisotropia média (r_m) indica a capacidade de uma chapa metálica resistir à diminuição de espessura quando submetida às forças de tração, e pode ser calculada por:

$$r_m = 1/4(r_0 + 2r_{45} + r_{90})$$

Foram substituídos os valores nas fórmulas e foi encontrado um “ r ” médio de: $r_m = 1,688$

Análise química – A tabela 1 mostra a composição química do titânio comercialmente puro. O material usado nos testes práticos foi o Ti-CP F67 grau 2. Os graus especificam as quantidades de C, O, N, H e Fe presentes em sua composição (valores expressos em porcentagem).

Tab. 1 – Propriedades químicas do Ti-CP F67 G2 (fonte: Realum Comércio de Metais)									
	Ti	C (máx)	O (máx)	N (máx)	H (máx)	Fe (máx)	Al	V	Pd
Grau 2	Bal.	0,08	0,25	0,03	0,015	0,30	–	–	–

Ferramental e máquina usados na estampagem incremental

Foi utilizada uma ferramenta de ponta semiesférica, em aço 4340, com diâmetro de 10 mm (figura 7). Diferentemente das ferramentas de usinagem convencionais, as ferramentas de estampagem incremental não possuem arestas de corte.

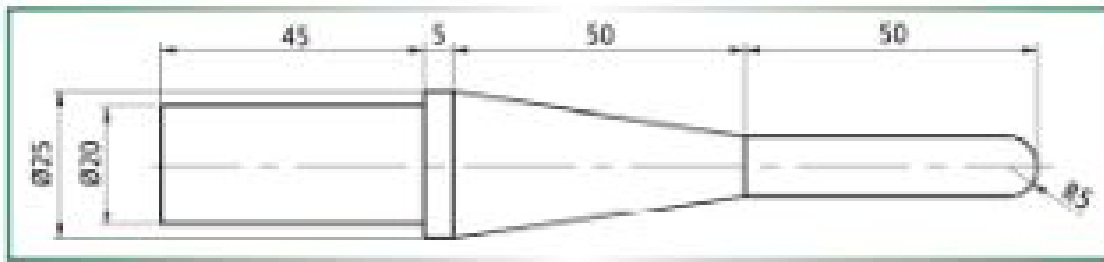


Fig. 7 – Ferramenta de estampagem utilizada nos testes práticos(5)

A máquina utilizada para os testes práticos foi um centro de usinagem Romi Discovery 4022 com as seguintes características físicas: dimensões da mesa: 840 x 360 mm; curso do eixo X: 590 mm; curso do eixo Y: 406 mm; curso do eixo Z: 508 mm.

Para fazer a programação do centro de usinagem, foi utilizado um software CAD/CAM e o desenho da peça a ser estampada, na forma de um modelo CAD. Após exportar o desenho do software CAD para o CAD/CAM, foi gerado o caminho da ferramenta para realizar a estampagem incremental (figura 8, pág. 44). Em seguida, no software CAM, foi gerado o programa para a máquina CNC, enviado através de cabo RS 232 de maneira off-line (o programa é enviado inteiramente, de uma só vez, para a memória da máquina).

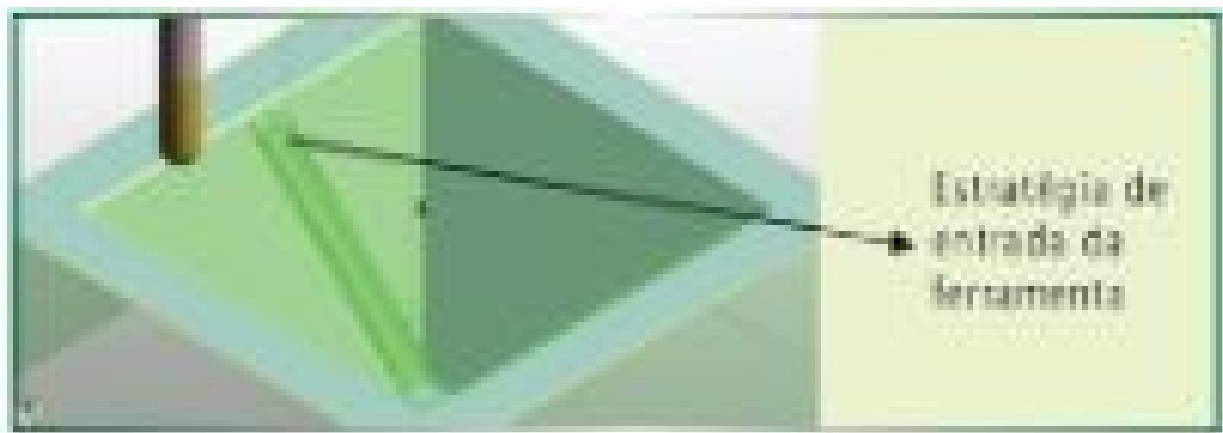


Fig. 8 – Modelagem da estratégia CAM no software EdgeCAM

Na figura 9 são mostrados todos os recursos (software, máquina CNC, ferramenta de estampagem e cabo de transmissão) utilizados nos testes.



Fig. 9 – Máquina e recursos usados nos testes práticos

Testes práticos

O objetivo dos testes práticos de estampagem incremental SPIF – estampagem sem ponto de apoio – é determinar o ângulo de parede limite para a chapa de titânio F67 – grau 2 com 0,5 mm de espessura e verificar a variação da espessura ao longo da chapa estampada. Foram realizados quatro testes, conforme mostra a tabela 2 (pág. 45).

Testes	Estratégia de estampagem	Tempo de simulação EdgeCAM (h)	Tempo de estampagem CNC (h)	Incremento vertical (mm)	Avanço XY (mm/min)	Avanço Z (mm/min)	Rotação (rpm)	Ângulo de parede (°)
1	Paralela	00:15:51	00:16:05	1	800	300	0	45
2	Paralela	00:17:51	00:08:00	1	800	300	0	50
3	Paralela	00:16:44	00:18:00	1	800	300	0	47
4	Paralela	00:17:07	00:11:00	1	800	300	0	48

Todos os testes foram realizados com o formato de peça tronco de pirâmide, com dimensões de 110 x 110 mm, e profundidade de estampagem de 50 mm.

O ângulo de parede foi mudado de acordo com cada teste realizado. A estratégia de entrada da ferramenta adotada foi de 90° em Z; em X e Y, entrada em raio no valor de 5 mm, mesmo raio da ferramenta de estampagem (mostrado na figura 8), porque nos três primeiros testes esta estratégia de entrada mostrou melhores resultados para a chapa de titânio.

Resultados e discussões

Os resultados dos quatro testes mostram qual é o ângulo máximo de parede antes da ruptura da chapa e também o formato das rupturas para a chapa de titânio

O primeiro teste realizado, estampagem com ângulo de parede de 45°, mostrou que a chapa não rompe. Houve um rompimento no final da estampagem (figura 10, pág. 45), mas este foi ocasionado pela estratégia de entrada da ferramenta, que ao formar o raio de entrada em X e Y colidiu com as paredes da chapa.

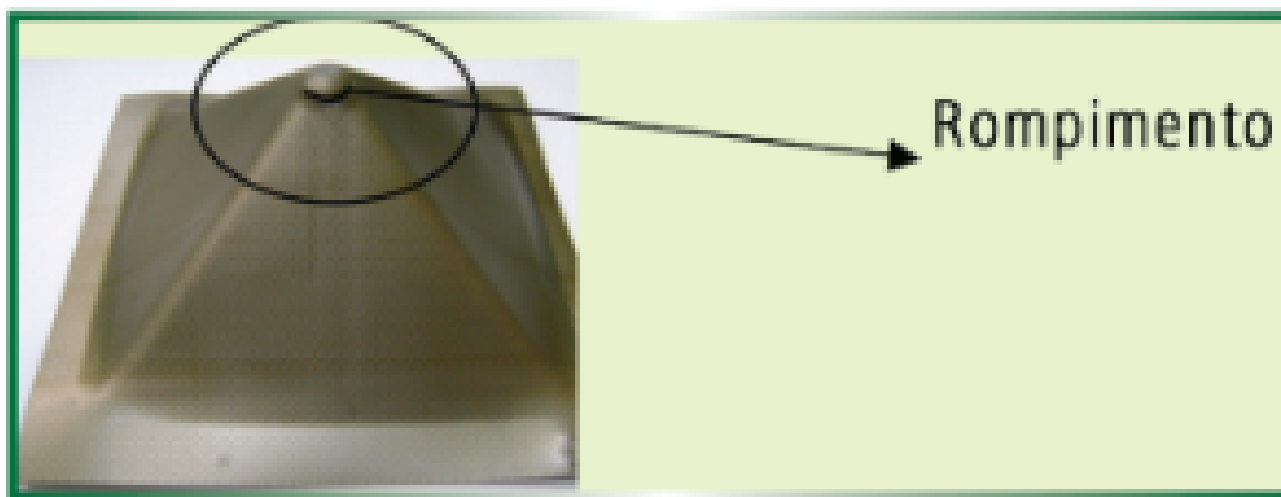


Fig. 10 – Teste de estampagem SPIF com 45° de ângulo de parede

O segundo teste foi realizado com ângulo de parede de 50° e houve o rompimento da chapa com profundidade de estampagem de 16 mm. O rompimento da chapa ocorreu em um dos cantos, conforme figura 11 (pág. 45).

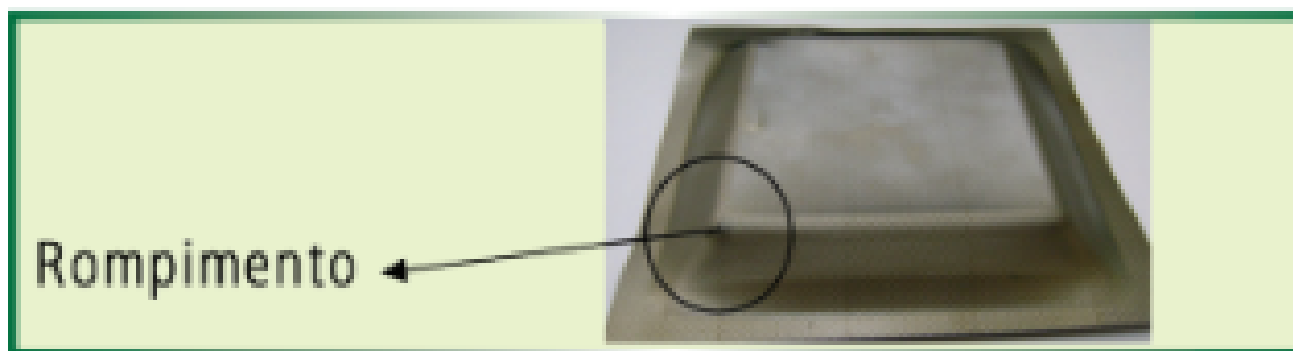


Fig. 11 – Teste de estampagem SPIF com 50° de ângulo de parede

No terceiro teste, o ângulo de parede usado foi de 47°. Com este ângulo, a estampagem ocorreu até o final sem haver o rompimento da chapa, conforme mostrado na figura 12 (pág. 46).

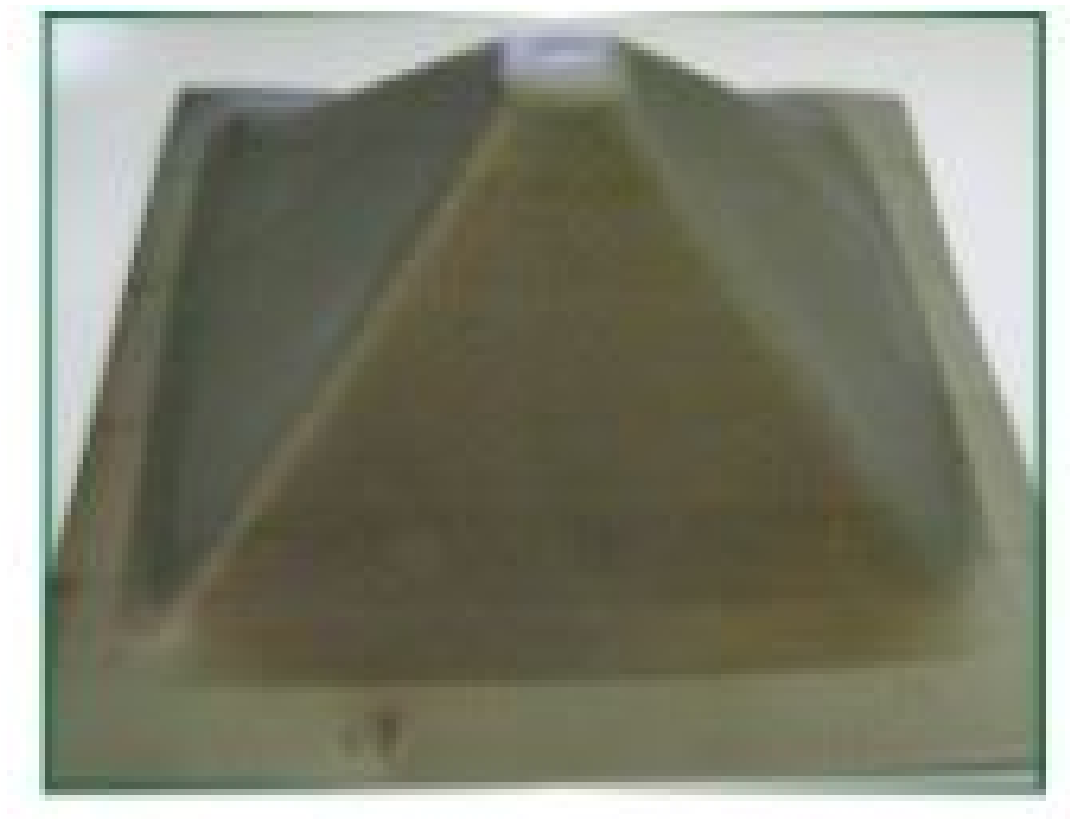


Fig. 12 – Teste de estampagem SPIF com 47° de ângulo de parede

No quarto e último teste, feito com ângulo de parede de 48°, foi constatado o rompimento da chapa com uma profundidade de estampagem de 22 mm. O rompimento da chapa também ocorreu em um dos cantos, conforme mostra a figura 13 (pág. 46).

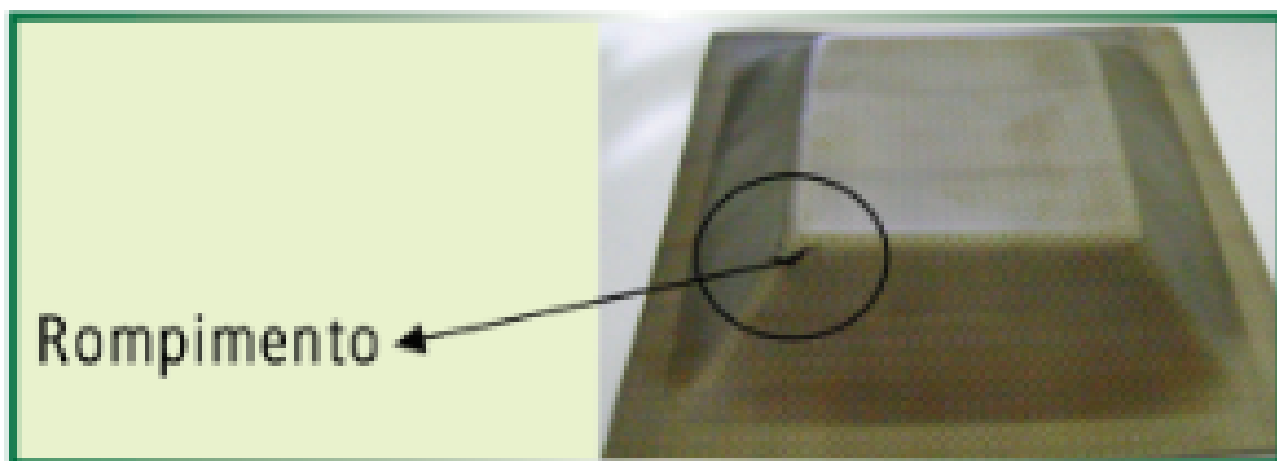


Fig. 13 – Teste de estampagem SPIF com 48° de ângulo de parede

Com a realização desses quatro testes foi possível determinar que o ângulo-limite de inclinação de parede para chapa de titânio F67 – grau 2 e espessura de 0,5 mm, com as condições de estampagem descritas na tabela 2, é de 47°, conforme mostrado na figura 12

Rugosidade

O valor da rugosidade (parâmetro R_z) depende do material da chapa e da ferramenta, do tipo de lubrificação e dos valores de passo vertical e avanço. Levandose em consideração o objeto de estudo deste trabalho (implantes cranianos), foram medidas as rugosidades

internas (onde houve contato com a ferramenta) e externas, considerando que o implante é posicionado entre os tecidos do corpo e a rugosidade superficial tem influência em ambos os lados da chapa.

Para definir a rugosidade externa foram feitas medições nas quatro faces planas da chapa estampada incrementalmente. As mesmas medições foram feitas na parte interna da chapa.

Foi medida a rugosidade de três chapas mudando o ângulo de inclinação de parede: 45°, 47° e 48°. A lubrificação, o passo vertical, o avanço e a ferramenta foram os mesmos para todos os testes realizados. Foi feita também uma medição da rugosidade em uma chapa sem estampagem – os resultados obtidos estão descritos na tabela 3.

Tab. 3 – Resultados da rugosidade							
Fases de medição	45° (µm)		47° (µm)		48° (µm)		Chapa plana R _a (µm)
	Face ext.	Face int.	Face ext.	Face int.	Face ext.	Face int.	
1	4,10	6,60	5,45	5,50	5,35	4,10	2,00
2	4,60	5,30	5,20	6,10	5,25	4,80	
3	3,30	5,15	4,20	3,90	4,60	5,30	
4	4,60	4,40	3,10	5,30	4,30	5,90	
Rugosidade média R _a (µm)	4,15	5,36	4,48	5,20	4,87	5,02	

Microdureza

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado com um microdurômetro Future Tech FM 700. Foram feitos ensaios de microdureza em três etapas: na chapa de Ti-CP F67 G2 normalizada, recozida e na chapa sem tratamento, na região estampada e na região não estampada. A carga aplicada no microdurômetro, para todos os ensaios, foi de 300g.

O resultado de microdureza da chapa de Ti-CP F67 G2 usada nos ensaios está descrito na tabela 4 (pág. 48). Todos os corpos de prova foram retirados da espessura da chapa e não da face plana.

Tab. 4 – Resultados dos ensaios de microdureza				
Nº do ensaio	Ti-CP F67 G2 sem tratamento (região estampada) (HV)	Ti-CP F67 G2 sem tratamento (região não estampada) (HV)	Ti-CP F67 G2 normalizado (região não estampada) (HV)	Ti-CP F67 G2 recozido (região não estampada) (HV)
1	149,9	156,8	152,5	149,1
2	217,5	159,7	158,7	165,8
3	193,9	160,6	165,2	158,5
Média dos ensaios	202,1	159,0	158,8	157,8

O valor de microdureza encontrado na literatura para chapas de Ti-CP F67 G2 laminadas foi de 160 HV(2). Isso indica que a estampagem incremental da chapa aumentou a dureza do material, conforme mostrado na tabela 4.

Na chapa normalizada, recozida e sem tratamento (região não estampada), os valores de microdureza foram praticamente os mesmos da literatura, girando em torno de 160 HV.

Deformações

Para medir as deformações $\phi 1$ e $\phi 2$ foi utilizada a peça estampada a 47° , na qual foi obtida a maior profundidade de estampagem sem rompimento. Antes da estampagem, foram gravados eletroquimicamente círculos com diâmetro de 2,5 mm sobre a superfície da chapa (figura 14, pág. 46).



Fig. 14 – Gravação eletroquímica na chapa de titânio

A deformação obtida foi do tipo plana, o que é comprovado pela maior deformação dos círculos em $\phi 1$ e a mínima deformação nos círculos em $\phi 2$, conforme mostrado na figura 15 (pág. 48).

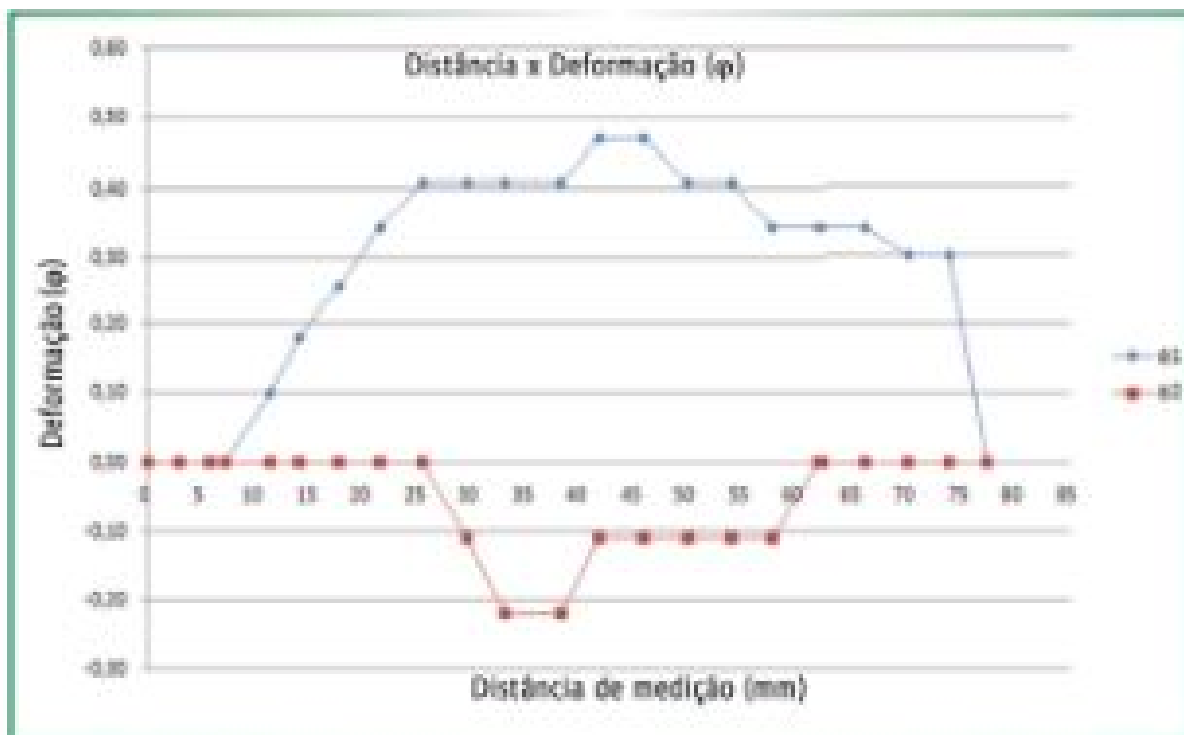


Fig. 15 – Gráfico das deformações $\phi 1$ e $\phi 2$

Os valores de $\phi 1$ e $\phi 2$ foram obtidos por meio de uma régua graduada flexível, impressa em papel poliéster (translúcido), com as deformações relativas e verdadeiras para a grade circular de 2,5 mm de diâmetro. A régua, por ser flexível, acompanha o formato do corpo de prova e a transparência do papel possibilita a visualização das linhas da malha.

Variação da espessura

A variação na espessura (s_1) é um dado muito importante quando se analisa a estampagem de uma chapa. Após o final dos testes, o corpo de prova no 3 (ângulo de parede 47°), foi cortado para medição das espessuras após o processo de estampagem incremental, como mostra a figura 16a. Para a execução das medições foi usado um micrômetro da marca Mitutoyo, com 0,02 mm de precisão.

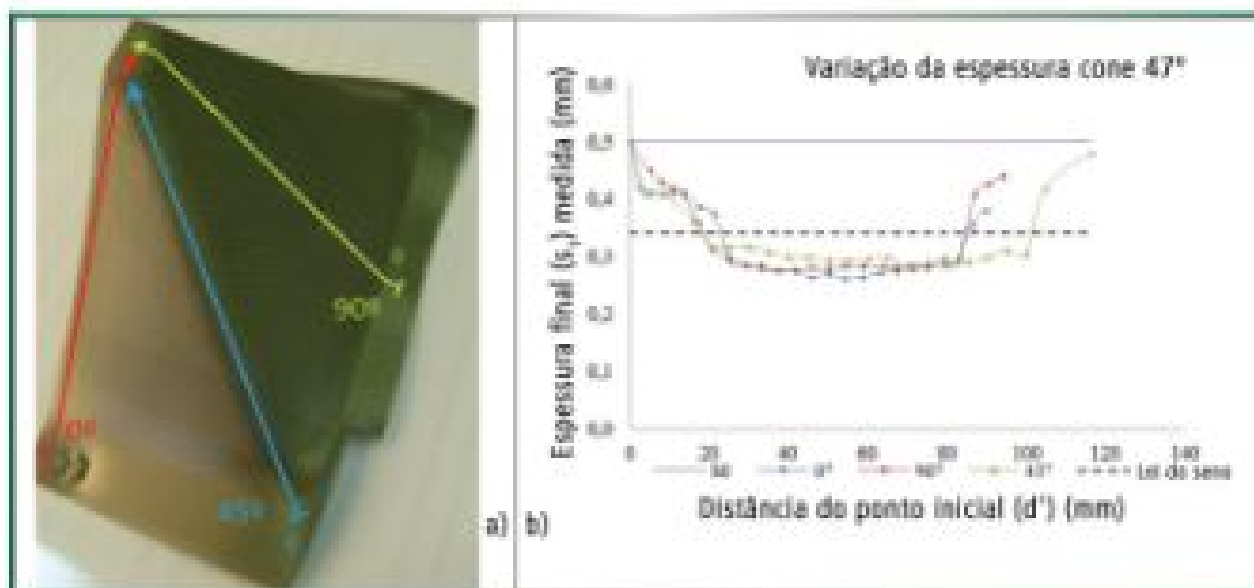


Fig. 16 – a) Sentido de laminação; b) gráfico da variação das espessuras

No gráfico da figura 16b é plotada a variação da espessura de acordo com as medições realizadas. O gráfico mostra a linha S0, que é a espessura inicial da chapa, e a linha pontilhada, calculada pela lei do seno. As demais linhas mostram a variação da espessura da chapa nas três direções, de acordo com o sentido de laminação.

Conclusões

Através dos experimentos práticos, foi demonstrado que é possível adaptar recursos da área de usinagem (softwares CAD/CAM, equipamentos, ferramentas e centros de usinagem CNC) para a fabricação de peças por estampagem incremental.

Na estampagem incremental de chapas de TiCP F67 G2 com espessuras de 0,5 mm, o uso de geometrias com ângulos de parede superiores a 47° favorece a fratura da chapa.

Ficou comprovado, por meio da medição da rugosidade das peças estampadas, que na parte da chapa em que a ferramenta entra em contato a rugosidade é 5,19 µm maior (média das três peças). No lado oposto da chapa, a rugosidade é 4,50 µm menor, conforme mostra a tabela 3. De acordo com Castelan(2), a rugosidade interfere negativamente na funcionalidade de um implante feito em chapa de titânio e é proporcional ao passo e ao avanço da ferramenta.

Foi feito o recozimento e a normalização da chapa de Ti-CP F67 G2 com espessura de 0,5 mm, para que fosse verificado o seu comportamento após esses tratamentos térmicos. Por meio do ensaio de dureza, foi possível concluir que as propriedades mecânicas da chapa não foram alteradas, pois os resultados foram os mesmos da chapa sem tratamento – conforme tabela 4.

O ensaio de microdureza também fornece dados para concluir que, após a estampagem incremental do Ti-CP F67 G2, a dureza do material aumentou em função das deformações, conforme foi mostrado na tabela 4

O índice de anisotropia calculado mostra que a chapa de Ti-CP F67 G2 não apresenta boa resistência à diminuição da espessura, porque quando r_m é maior que 1, proporcionalmente, a resistência da chapa à diminuição de espessura é maior.

Após a medição das deformações, foi possível concluir que a deformação da chapa na estampagem incremental foi do tipo plana, de acordo com o descrito na literatura.

Por meio da análise da espessura da chapa, foi possível verificar que, pela lei do seno, a espessura fica em 0,35 mm. De acordo com as medições realizadas, foi possível perceber que a espessura fica em, aproximadamente, 0,30 mm.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS/LdTM), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e, em especial, à Faculdade da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (Faculdade SATC) pelo apoio financeiro e técnico no desenvolvimento deste projeto.

Referências

1. Allwood , J. M. et al . A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with made by incremental sheet forming. *Engineering Manufacture*, 220, 2005.
2. Castelan , J. Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano. Porto Alegre: UFRGS, 2010.
3. Castelan , J.; Schaeffer , L.; Daleffe , A. Desenvolvimento d e produtos personalizados através de estampagem incremental para aplicação na medicina ortopédica. *Ferramental*, 15-22, 2009.
4. Cavaler , L. C. Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, LdTM. Porto Alegre: UFRGS, 2010.
5. Daleffe , A. Estudo do Processo de Estampagem Incremental e m Chapas de Alumínio Puro. Porto Alagre: UFRGS, 2008.
6. Fritzen , D. Estudo do Processo Estampagem Incremental em Chapas de latão 70/30. Porto Alegre: UFRGS, 2011.
7. Marques , T. A. Estampagem Incremental de Polímeros. Lisboa: Instituto Superior Técnico de Lisboa – Universidade
8. Martins , P. A.; Bay , N.; Sk joedt , M.; Silva , M. B. Theory of single point incremental forming. *Theory of single point incremental forming*, 2008; 247-252.
9. Micari , F.; Ambrogio , G.; Filic , L. Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of the art and future trends. *J. Materials Processing Technology*, 2007; 390-395.
10. Moosruggger , C. Atlas of Stress - Strain Curves. Second Edition. ASM international, 2007.
11. Realum Comércio de Metais. Acesso em 11 de julho de 2011. Disponível em: <http://www.realum.com.br>
12. Schaeffer , L. Conformação Mecânica. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
13. Souza , S. A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teoria e Prática , 5ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.
14. S y , L. V. Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet. Università degli Studi di Padova, Innovazione Meccanica e Gestionale. Padova: Università degli Studi di Padova, 2009.