

Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de titânio comercialmente puro ASTM F-67 grau 2

Study of the incremental sheet forming in sheets of commercially pure titanium ASTM F-67 grade 2

DOI: 10.34117/bjdv8n4-373

Recebimento dos originais: 21/02/2022

Aceitação para publicação: 31/03/2022

Clauber Roberto Melo Marques

Mestrando em Engenharia Metalúrgica

Instituição: Cento Universitário Satc (UNISATC)

Endereço: Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma - SC

E-mail: clauber.marques@satc.edu.br

Anderson Daleffe

Dr. em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Instituição: Cento Universitário Satc (UNISATC)

Endereço: Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma - SC

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

Daniel Fritzen

Dr. em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Instituição: Cento Universitário Satc (UNISATC)

Endereço: Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma - SC

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

Carolina Resmini Melo Marques

Dra. em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Instituição: Cento Universitário Satc (UNISATC)

Endereço: Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma - SC

E-mail: carolina.melo@satc.edu.br

Gilson de March

Mestrando em Engenharia Metalúrgica pelo Cento Universitário Satc (UNISATC)

Instituição: Cento Universitário Satc (UNISATC)

Endereço: Rua Pascoal Meller, 73, Universitário, Criciúma - SC

E-mail: gilson.march@satc.edu.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da chapa de titânio puro ASTM F-67 grau 2 para o processo de estampagem incremental de chapas (ISF – Incremental Sheet Forming) baseado nos parâmetros: decida helicoidal da ferramenta, ângulo de parede (Ψ) e raio de canto. Os experimentos foram realizados utilizando a estampagem incremental de ponto simples. Foram realizados 18 experimentos no total, com os quais buscou-se alcançar o melhor ângulo de parede com decida helicoidal da ferramenta e avaliar a influência do raio de canto. O raio base

utilizado foi de 20 mm, com este, buscou-se atingir o melhor ângulo de parede possível. A partir disto variou-se o raio para avaliar a influência deste na estampagem incremental. Para os experimentos foram utilizados os seguintes recursos: softwares CAD/CAM, centro de usinagem CNC com três eixos, matriz incremental, ferramenta de estampagem incremental com inserto de titânio e um dispositivo prensa chapas. Foram avaliados a rugosidade superficial R_a , as deformações verdadeiras (ϕ) e a variação de espessura. Os resultados mostram que a estratégia de descida helicoidal da ferramenta proporcionou aumento do ângulo de parede comparado com estudos já realizados nesta área; o raio de canto influencia no rompimento da peça durante a estampagem. Os índices de rugosidade ficaram dentro dos valores indicados para a fabricação de próteses de titânio.

Palavras-chave: estampagem incremental, titânio, astm f67, próteses, estratégia helicoidal.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the behavior of ASTM F-67 grade 2 pure titanium sheet for the incremental sheet forming process based on the parameters: helical low down of the tool, wall angle (Ψ) and corner radius. The experiments were carried out using single point incremental forming. A total of 18 experiments were carried out, with which we sought to achieve the best wall angle with the helical descent of the tool and to evaluate the influence of the corner radius. The base radius used was 20 mm, with this, we sought to achieve the best possible wall angle. From this, the radius was varied to evaluate its influence on the incremental sheet forming. The following resources were used for the experiments: CAD/CAM software, CNC machining center with three axes, incremental matrix, a tool for incremental forming with titanium insert and a sheet-press device. The surface roughness R_a , the true strains (ϕ) and the thickness variation were evaluated. The results show that the helical descent strategy of the tool provided an increase in the wall angle compared to studies already carried out in this area; the corner radius influences the breakage of the part during stamping. The roughness indices were within the values indicated for the manufacture of titanium prostheses.

Keywords: incremental sheet forming, titanium, astm f67, prostheses, helical strategy.

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do mercado no sentido da personalização, a demanda criada de adaptação à introdução contínua de novos produtos exige o desenvolvimento de novas técnicas de produção de baixo custo e facilidade de implementação. Para suprir tais necessidades, o processo de Estampagem Incremental tem sido objeto de estudo, por ser um processo inovador e ainda pouco aplicado industrialmente, com os frequentes estudos relacionados a este assunto, a busca pela otimização do processo é incessante branco[1][2][3][4][5].

A Estampagem Incremental é um processo que tem como um de seus pontos fortes a alta customização aliada ao baixo custo, podendo realizar a conformação sem a necessidade de matrizes ou utilizando apenas matrizes de baixo custo, o que viabiliza a aplicação deste processo nas aplicações que apresentam grande variação de formatos. Sendo um forte processo a substituir os métodos tradicionais como usinagem e estampagem utilizando matrizes e prensas, processos esses que apresentam alto custo de fabricação para itens de baixa produtividade [6].

Inicialmente o processo de Estampagem Incremental foi aplicado principalmente na indústria automotiva, a fim de gerar prototipagem rápida de itens com geometria complexa. Com o desenvolvimento do processo outras aplicações surgiram para a Estampagem Incremental, como desenvolvimentos na área biomédica, aeroespacial e peças customizadas em geral[7][8][9][10].

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo para aumentar o ângulo de parede (ψ) durante o Processo de Estampagem Incremental de chapas - ISF (*Incremental Sheet Forming*). Castelan[11], em seus estudos, investigou a fabricação de implante craniano a base de chapas de titânio comercialmente puro por meio de processo de Estampagem Incremental. Em outra pesquisa, Daleffe [12] dedicou seus esforços na fabricação de prótese craniana personalizada em titânio puro, por meio da Estampagem Incremental. Visto os excelentes resultados alcançados nestas pesquisas, surge a possibilidade do desenvolvimento do processo de Estampagem Incremental para a fabricação de próteses para outras partes do corpo como face, mandíbula, entre outras, as quais necessitam de ângulos de parede maiores do que os necessários para as próteses cranianas.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste tópico serão descritas todas as metodologias utilizadas para caracterização da matéria-prima, como também do processo de Estampagem Incremental desenvolvido neste estudo.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE TITÂNIO PURO ASTM F-67 GRAU 2

Nesta seção serão abordados os ensaios de propriedades mecânicas realizados com a matéria-prima, titânio puro grau 2 (ASTM F-67 GRAU 2) com espessura de 0,5 mm, a fim de caracterizar o material. A chapa de titânio foi adquirida da Empresa Realum Soluções em Titânio.

A caracterização do material foi realizada antes do processo de estampagem incremental.

2.1.1 Curva Tensão X Deformação

Foram confeccionados nove corpos de prova, seguindo o formato normatizado pela ABNT NBR ISO 6892-1:2013, tipo de corpo de prova 1.

Os corpos de prova foram cortados conforme o sentido de laminação da chapa, sendo três amostras para cada direção em relação à laminação (0°, 45°, 90°), cortados no processo de corte à laser.

Os ensaios de tração foram realizados no equipamento de marca EMIC modelo DL-10000, com capacidade de 100 KN. Os ensaios foram realizados segundo norma NBR 6673:1981 com velocidades constantes de 10,0 mm/min.

Após os ensaios os corpos de prova foram medidos manualmente para obtenção dos valores de alongamento.

2.1.2 Índice de Anisotropia

O índice de anisotropia foi determinado através dos ensaios de tração e representa a razão entre as deformações verdadeiras de comprimento e largura do corpo de prova, segundo o sentido de laminação.

2.1.3 Análise Química

A análise química da Chapa de Titânio Puro – ASTM F67 Grau 2 utilizada neste estudo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Análise química conforme certificado de qualidade do material utilizado.

Corrida	Liga	Lote MPR.	C	Fe	H	N	O	Ti
Hn0460	0102	17412	0,005	0,11	26Ppm	0,007	0,09	Balanço

Fonte: Do Autor

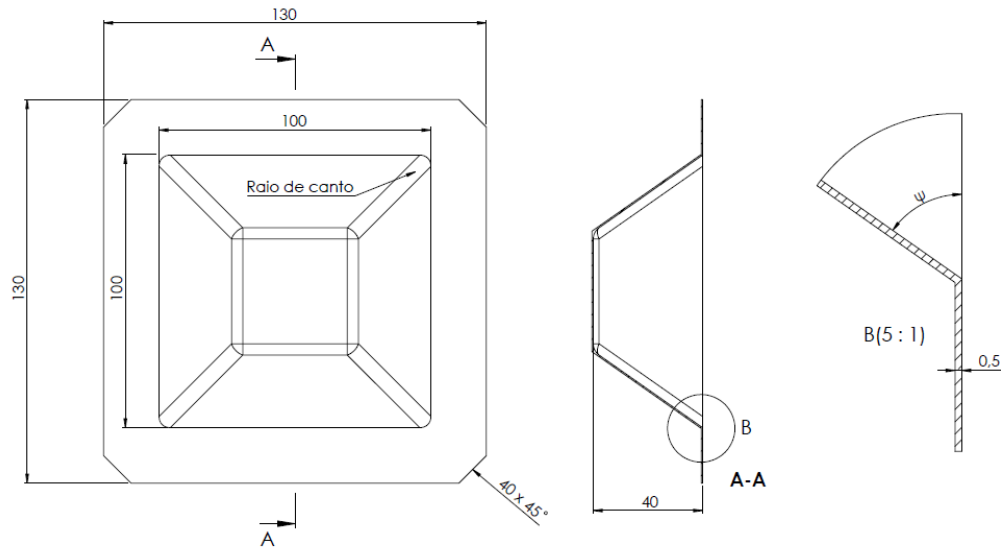
2.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Para a execução dos testes foi necessário o desenvolvimento do arquivo CAD com a forma geométrica para o presente estudo, a definição dos parâmetros a serem utilizados do processo de Estampagem Incremental, preparação dos corpos de prova, escolha da máquina-ferramenta e ferramenta e por fim programação CAM para o processo.

2.2.1 Modelagem da forma geométrica

O modelo de estudo foi baseado em um tronco de pirâmide de base quadrada com 100 mm de lado e 40 mm de profundidade como representado na Figura 1.

Figura 1: Detalhamento do modelo CAD.



Fonte: Do Autor

2.2.2 Preparação das peças para os experimentos

A chapa bruta (blank) foi cortada utilizando uma guilhotina, de acordo com as dimensões estabelecidas na base do modelo, ou seja, 130x130 mm - Chapa de Titânio Puro ASTM F-67 Grau 2 com 0,50 mm de espessura. Após o corte, as chapas foram gravadas na superfície inferior com círculos de diâmetro inicial (d_0) de 2,5 mm através de um processo eletroquímico. Para efetuar a gravação foi utilizado um gravador de metais Gravamet Ônix, uma tela de serigrafia com círculos de diâmetro 2,5 mm desenhados e um ácido para efetuar a marcação no titânio. A gravação teve como objetivo proporcionar a medição das deformações φ_1 e φ_2 após a estampagem.

2.2.3 Parâmetros utilizados no processo de estampagem

A Tab. 2 apresenta os dados referentes a todos os testes realizados.

Tabela 2: Parâmetros utilizados nos experimentos realizados.

Experimento	Ângulo de parede Ψ (°)	Estratégia
1	48	Helicoidal / R20
2	49	Helicoidal / R20
3	50	Helicoidal / R20
4	51	Helicoidal / R20
5	52	Helicoidal / R20
6	53	Helicoidal / R20
7	54	Helicoidal / R20
8	53	Helicoidal / R15
9	53	Helicoidal / R10
10	53	Helicoidal / R25
11	53	Helicoidal / R15
12	53	Helicoidal / R15
13	53	Helicoidal / R20
14	53	Helicoidal / R20
15	53	Helicoidal / R25
16	53	Helicoidal / R25
17	53	Helicoidal / R10
18	53	Helicoidal / R10

Fonte: Do Autor

Os testes realizados visaram obter ângulos de parede (Ψ) maiores que 47°, utilizando estratégia de decida helicoidal no processo ISF. Foram realizados 7 (sete) experimentos incrementando apenas o ângulo de parede (Ψ) até se obter o melhor resultado. Com o melhor resultado obtido variou-se o raio de canto da geometria estampada para avaliar a sua influência, para isso realizou-se mais 11 (onze) experimentos, totalizando 18 (dezoito) experimentos realizados.

Todos os experimentos foram realizados utilizando os mesmos parâmetros de velocidade conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros utilizados nos experimentos.

Estratégia de descida	Profundidade de descida/volta	Avanço lateral	Avanço Vertical	Rotação da ferramenta
Helicoidal	1mm	800mm/min	300mm/min	Livre

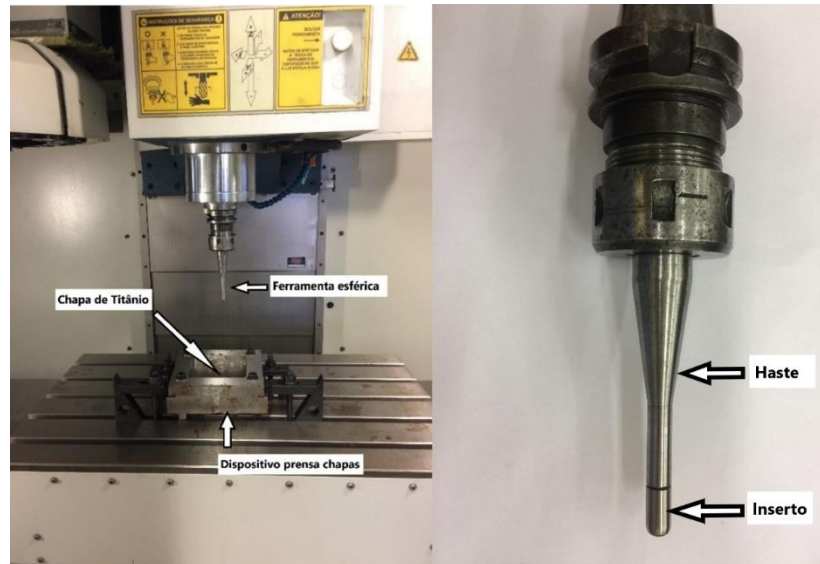
Fonte: Do Autor

2.2.4 Dispositivos utilizados nos experimentos

Para realizar a ISF foi utilizado um centro de usinagem vertical, uma ferramenta composta por duas partes, haste fabricada em aço 4340 e inserto fabricado em Titânio ASTM F-137, material biocompatível devido à baixa quantidade de oxigênio, nitrogênio e ferro, porém com elementos de liga como alumínio e vanádio. O inserto possui um perfil semiesférico de diâmetro de 10 mm, a ponta utilizada na ferramenta foi de titânio a fim de evitar contaminações da chapa a ser estampada. Para fixação da chapa na máquina foi utilizado um dispositivo prensa chapas, na

Figura 2 pode-se visualizar a ferramenta e o dispositivo de fixação utilizados nos experimentos.

Figura 2: (a) Equipamentos utilizados nos experimentos e (b) ferramenta utilizada para o processo de estampagem incremental.



Fonte: Do Autor

Com os equipamentos e parâmetros definidos foi possível executar a programação CNC através de software CAM, para a programação foi utilizada a estratégia de descida helicoidal a qual faz com que a ferramenta permaneça em constante contato com a peça, evitando marcas de entrada e saída da trajetória.

A fim de reduzir o atrito entre a ferramenta e a chapa a ser estampada foi utilizado como lubrificante gordura animal (banha de porco), para a escolha do lubrificante foi levada em consideração a não contaminação da chapa de titânio com lubrificantes sintéticos como graxas, visto que é um material muito utilizado em próteses.

2.3 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Após as peças passarem pelo processo de estampagem foi efetuada a medição da rugosidade superficial em todas as peças. A medição foi realizada seguindo o método de rugosidade R_a , sendo medidas duas superfícies internas da peça já estampada, uma superfície paralela ao sentido de laminação e uma superfície perpendicular ao sentido de laminação. Para cada superfície foram realizadas 3 (três) medições e feita a média aritmética destas.

Para as medições foi utilizado um rugosímetro digital marca Mitutoyo modelo SJ-310 e adotado como comprimento de medição 2,5 mm.

2.4 MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

O método utilizado para medir as deformações foi a gravação de uma malha de círculos com diâmetro inicial (d_0) 2,5 mm gravados antes do processo de estampagem através da gravação eletroquímica na parte inferior da chapa a ser estampada.

As deformações foram medidas utilizando um microscópio digital de lupa eletrônica modelo RoHS utilizando aumento de 40X, foram medidas as deformações (a), que corresponde à variação do comprimento, e (b), que corresponde à variação da largura, das elipses geradas com a deformação do processo.

Os experimentos analisados foram os números 6 e 8 (Tabela 2), ambos com ângulo de parede máximo alcançado nos experimentos, de 53° .

As medições foram realizadas em três sentidos, a 0° , 45° e 90° com relação ao sentido de laminação, sendo medidas 10 elipses para cada sentido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados todos os resultados obtidos no estudo, visando avaliar os parâmetros empregados no processo de estampagem incremental.

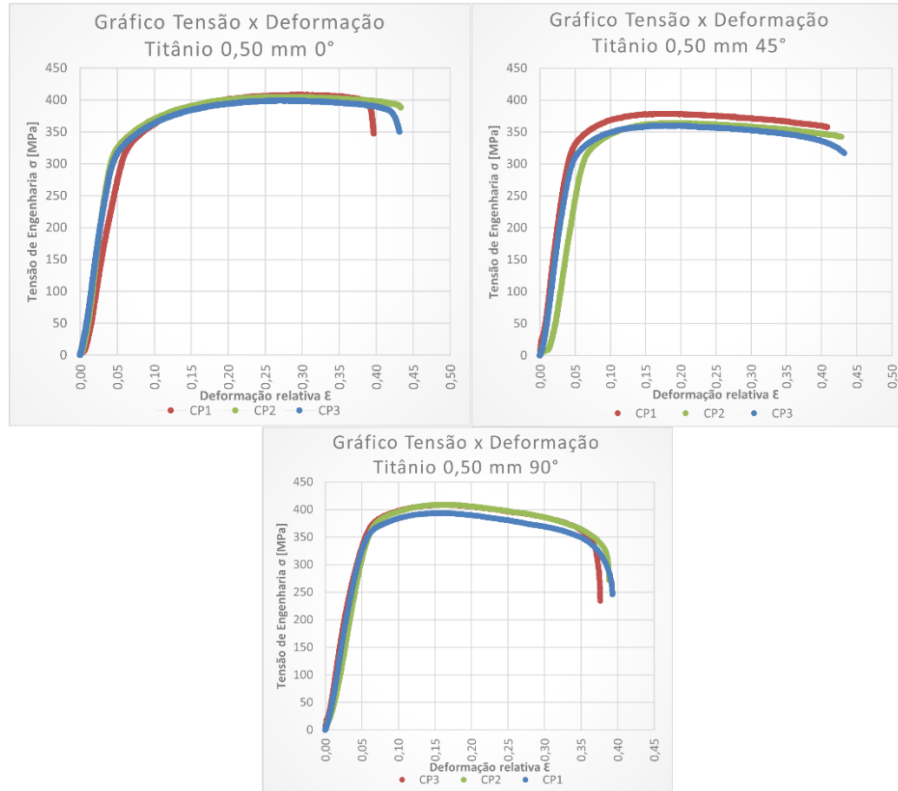
3.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE TITÂNIO PURO ASTM F-67 GRAU 2

Antes de efetuar os experimentos foi efetuada a caracterização da chapa de titânio puro ASTM F-67 grau 2.

3.1.1 Curva Tensão X Deformação

Com os parâmetros definidos foram executados os ensaios de tração afim de se obter as curvas tensão x deformação, com os ensaios realizados foi plotado um gráfico para cada direção dos corpos de prova retirados (0° , 45° e 90°) em relação a direção de laminação. A Fig. 3 apresenta a curva para os corpos de prova a 0° , 45° e 90° .

Figura 3: Curva tensão x deformação dos corpos de prova.



Fonte: Do Autor

Através dos ensaios de tração foi possível obter os valores de tensão máxima (σ_B), deformação relativa (ϵ) e alongamento (δ).

Os valores apresentados abaixo são referentes ao corpo de prova 1 retirado a 0° em relação ao sentido de laminação.

$$\sigma_B = 407,85MPa$$

$$\epsilon = 0,265$$

$$\delta = 15,90mm$$

O valor de tensão máxima obtido, 407,85MPa, está abaixo do encontrado na literatura [13], que é de 520 MPa, indicando que o material utilizado é mais dúctil.

3.1.2 Índice de Anisotropia

Com os valores obtidos através dos ensaios de tração, foi possível obter os índices de anisotropia (r) para os corpos de prova retirados paralelos ao sentido de laminação (0°), oblíquo ao sentido de laminação (45°) e perpendicular ao sentido de laminação (90°). Para obter os valores de (r) foi utilizada a equação definida por Shaeffer [14], a Tab. 4 apresenta os valores dos índices de anisotropia.

Tabela 4: Índices de Anisotropia.

Direção	Corpo de Prova	b_0 (mm)	b (mm)	l_0 (mm)	l (mm)	r	Média (r)
0°	1	12,5	11	60	75,90	1,19	1,19
	2	12,5	11,1	60	75,96	1,01	
	3	12,5	10,9	60	76,00	1,38	
45°	1	12,5	10,8	60	75,97	1,63	1,63
	2	12,5	10,8	60	75,71	1,69	
	3	12,5	10,9	60	75,92	1,39	
90°	1	12,5	11	60	75,94	1,19	1,26
	2	12,5	10,9	60	76,69	1,26	
	3	12,5	10,9	60	76	1,38	

Fonte: Do Autor

A anisotropia média (r_m) representa a capacidade de uma chapa metálica resistir a redução de espessura quando esta é submetida a forças de tração, a anisotropia média é calculada utilizando a Eq. (1) definida por Shaeffer [14]:

$$r_m = \frac{1}{4} (r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (1)$$

$$r_m = \frac{1}{4} (1,19^\circ + 2 * 1,63 + 1,26^\circ)$$

$$r_m = 1,427$$

Materiais que não apresentam variações nas propriedades mecânicas independente do sentido de laminação são denominados materiais isotrópicos, este apresenta $r_m=1$, quanto maior ou menor for o valor diferente de 1 indica que o material é anisotrópico, valores $r_m>1$ indicam que o material oferece maior resistência à deformação plástica na espessura.

A anisotropia planar Δr mede a variação de r entre as direções longitudinal e transversal de laminação. Para definir tal valor foi utilizada a Eq. (2) definida por Shaeffer [14].

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (2)$$

$$\Delta_r = \frac{1,19 + 1,26}{2} - 1,63$$

$$\Delta_r = -0,405$$

O valor de anisotropia planar Δ_r negativo indica, conforme visto na Tabela 4, que o índice de anisotropia a 45° é maior do que a 0° e 90° em relação ao sentido de laminação, o que indica a tendência ao orelhamento [15] no ângulo de 45° em casos de embutimento.

3.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes aos experimentos de estampagem incremental.

Os experimentos de 1 a 7 foram definidos como raio de canto o valor de 20 mm, variando apenas o ângulo de parede (Ψ) incrementando 1° a cada novo experimento até se obter o melhor resultado com este raio, com o melhor resultado obtido variou-se o valor do raio de canto afim de avaliar sua influência na estampagem incremental, a variação do raio de canto foi realizada com incremento/decremento de 5 mm. A Tab. 5 apresenta os resultados de rompimento dos experimentos realizados.

Tabela 5: Resultados dos experimentos de estampagem incremental.

Experimento	Ângulo de parede Ψ ($^\circ$)	Estratégia	Resultado
1	48	Helicoidal / R20	Não rompeu.
2	49	Helicoidal / R20	Não rompeu.
3	50	Helicoidal / R20	Não rompeu.
4	51	Helicoidal / R20	Não rompeu.
5	52	Helicoidal / R20	Não rompeu.
6	53	Helicoidal / R20	Não rompeu.
7	54	Helicoidal / R20	Rompeu / 15mm
8	53	Helicoidal / R15	Não rompeu.
9	53	Helicoidal / R10	Rompeu / 15,5mm
10	53	Helicoidal / R25	Rompeu / 22,5mm
11	53	Helicoidal / R15	Não rompeu.
12	53	Helicoidal / R15	Não rompeu.
13	53	Helicoidal / R20	Não rompeu.
14	53	Helicoidal / R20	Não rompeu.
15	53	Helicoidal / R25	Rompeu / 30mm
16	53	Helicoidal / R25	Rompeu / 25,5mm
17	53	Helicoidal / R10	Rompeu / 14,6mm
18	53	Helicoidal / R10	Rompeu / 14,9mm

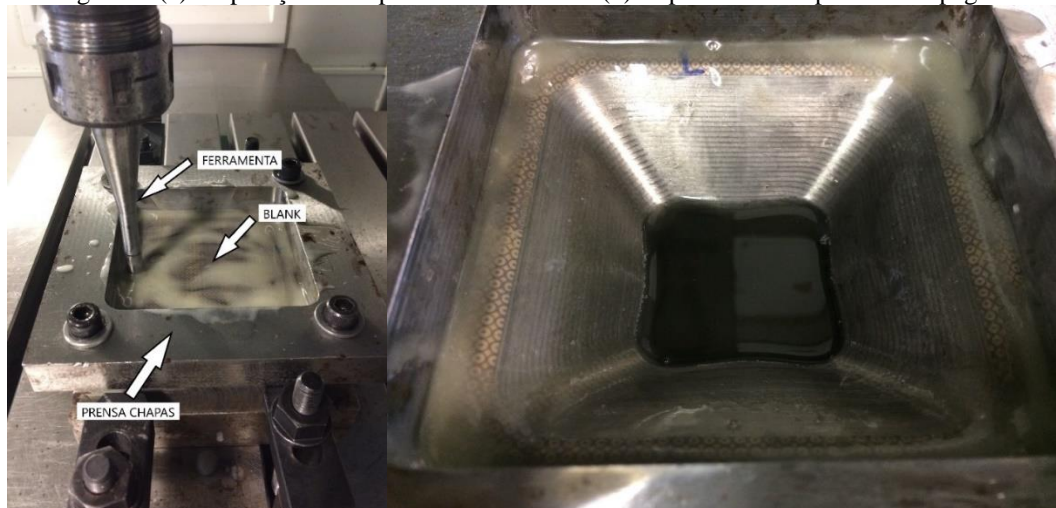
Fonte: Do Autor

No primeiro experimento, optou-se por um ângulo de parede (Ψ) de 48° baseado nos estudos de Daleffe [12], que obteve sucesso com 47° na estampagem incremental de chapas de titânio puro grau 2 de espessura 0,5 mm utilizando estratégia paralela de descida, a qual a ferramenta entra e sai do perfil a ser estampado a cada incremento de profundidade.

O experimento número 1, com ângulo de parede (Ψ) de 48° foi concluído com sucesso, validando a estratégia escolhida para os estudos. A Fig. 4 (a) mostra o método de fixação da chapa e a aplicação do fluido utilizado.

Durante a execução do experimento percebeu-se que o fluido de origem animal foi adicionado de forma pastosa, Fig. 4 (a), e após a execução do experimento ele se apresentou de forma líquida, como pode-se observar na Fig. 4 (b), o que demonstra leve aquecimento durante o processo.

Figura 4: (a) Preparação do experimento número 1 (b) Experimento 1 após a estampagem.

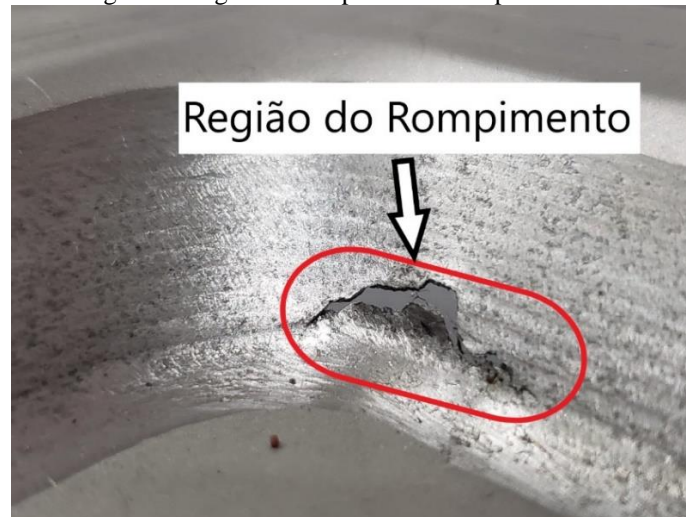


Fonte: Do Autor

Para o experimento número 2 incrementou-se o ângulo de parede em 1° , obtendo resultado positivo. Repetiu-se o procedimento até o experimento número 7, que com ângulo de parede (Ψ) de 54° rompeu durante a execução da estampagem incremental na profundidade de 15 mm, o valor da profundidade foi obtido através das coordenadas de movimentação disponíveis no painel da máquina utilizada, sendo abortado o experimento no momento do rompimento. O rompimento ocorreu na parede transversal ao sentido de laminação, próximo ao raio de canto.

O rompimento do experimento número 7 foi do tipo fratura, que aparenta ser uma trinca que se propaga à medida que a estampagem vai acontecendo. Na Fig. 5 pode-se observar o rompimento ocorrido no experimento 7.

Figura 5: Região de rompimento do experimento 7.



Fonte: Do Autor

Com o rompimento do experimento 7 com ângulo de parede de 54° , foi adotado o ângulo de parede do experimento anterior (experimento 6), 53° , como melhor resultado, mantendo este valor como padrão para os próximos experimentos.

Os experimentos 8, 9 e 10 foram realizados com ângulo de parede de 53° , porém variando o raio de canto afim de avaliar se este teria influência no resultado.

O experimento número 8 foi realizado com ângulo de parede de 53° e raio de canto de 15 mm, este experimento obteve sucesso e conseguiu ir até o final sem rompimento.

O experimento 9 foi variado o raio de canto para 10 mm, o mesmo apresentou rompimento do tipo fratura com 15,5 mm de profundidade após o início da estampagem. Assim como o experimento 7, o rompimento ocorreu na parede transversal ao sentido de laminação e próximo ao raio de canto.

O experimento 10 foi alterado o raio de canto para cima do raio de canto base que era 20 mm, sendo este executado com raio de canto de 25 mm. Porém, este experimento não obteve sucesso, tendo ruptura aos 22,5 mm de profundidade após o início da estampagem, o rompimento foi do tipo fratura, ocorrendo em duas faces da peça, ambas faces transversais ao sentido de laminação próximas ao raio de canto.

Com o experimento 10 realizado, não foi mais alterado o valor de raio de canto, sendo assim os experimentos de 11 a 18 foram repetidos duas vezes todos os experimentos com ângulo de parede de 53° .

Os experimentos 11 e 12 foram executados com raio de canto de 15 mm, tendo ambos sido concluídos sem nenhum tipo de rompimento assim como o experimento número 8.

Os experimentos 13 e 14 foram executados com raio de canto de 20 mm, e assim como o experimento número 6 foram concluídos sem apresentar nenhum tipo de ruptura.

Os experimentos 15 e 16 foram estampados com raio de canto de 25 mm e assim como o experimento número 10 apresentaram rompimento. Ambos os experimentos apresentaram rompimento no sentido transversal ao sentido de laminação e próximos ao raio de canto, o rompimento foi do tipo fratura nos dois experimentos.

Os experimentos 17 e 18 foram executados com raio de canto de 10 mm, assim como o experimento número 9 apresentaram rompimento tipo fratura. Ambos os rompimentos ocorreram no sentido transversal ao sentido de laminação e próximos ao raio de canto.

Com os experimentos concluídos os melhores resultados foram com ângulo de parede de 53° e raio de canto de 20 mm (experimentos 6, 13 e 14) e 15 mm (experimentos 8, 11 e 12).

As peças que apresentaram rompimento foram as realizadas nos experimentos 7, 9, 10, 15, 16, 17 e 18, todas apresentaram rompimento no sentido transversal ao sentido de laminação e próximas ao raio de canto. Isso indica que esta é a região de maior concentração de tensões, tendendo a ser o ponto de ruptura. Conforme a caracterização da matéria-prima, o sentido transversal ao sentido de laminação exige maior força para deformação; a região do raio se aproxima de movimentos de 45° , onde o índice de anisotropia é o maior, tendendo a gerar orelhamento; e tendo uma anisotropia média de 1,427 mostra que o material oferece maior resistência à deformação plástica colaborando com a hipótese de esta ser a região que tende a ocorrer a ruptura.

3.3 RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Com as peças estampadas foi realizada a medição da rugosidade conforme os parâmetros estabelecidos. Foram realizadas as medições em todas as peças que foram estampadas. A Tab. 6 apresenta a média aritmética de três valores obtidos com a medição.

Tabela 6: Resultados da medição de rugosidade superficial, Ra.

Experimento	Rugosidade no sentido longitudinal ao sentido de laminação (μm)	Rugosidade no sentido transversal ao sentido de laminação (μm)
1	0,827	0,889
2	1,007	0,747
3	0,912	0,824
4	1,200	1,227
5	0,958	0,824
6	0,717	0,778
7	0,955	0,980
8	0,946	0,873
9	0,820	0,837
10	0,895	0,928
11	0,794	0,768
12	0,727	0,817
13	0,760	1,010
14	1,009	0,784
15	0,789	0,680
16	0,919	1,006
17	0,907	0,871
18	0,845	0,844

Fonte: Do Autor

Segundo estudos realizados por Ponsonnet [16] a rugosidade em peças de titânio influencia na proliferação celular após o implante, em seus estudos constatou que a rugosidade ideal para que haja a proliferação é entre 0,08 e 1 μm .

Os resultados de rugosidade obtidos nas peças estampadas ficaram dentro da faixa citada como ideal para a proliferação celular, com exceção do experimento número 4, que ficou pouco acima de 1 μm , possivelmente neste caso isolado possa ter sido influenciado pela rugosidade da ferramenta,

De modo geral os resultados de rugosidade superficial utilizando a estratégia de estampagem incremental com descida helicoidal foram melhores do que os resultados encontrados por Daleffe [12] que utilizou a estratégia paralela de descida chegando a gerar valores de rugosidade na casa de 5 μm . Os resultados se aproximaram dos resultados obtidos por Filho [17] que aplicou o processo de usinagem em ligas de titânio, mostrando que o processo de estampagem incremental pode obter resultados de acabamento superficial semelhante aos resultados obtidos pelo processo de usinagem. Os valores encontrados, avaliando principalmente os experimentos com resultados positivos, indicam que a aplicação desta estratégia na fabricação de próteses elimina a necessidade de outros processos de acabamento após a estampagem como polimento.

3.4 RESULTADO DA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

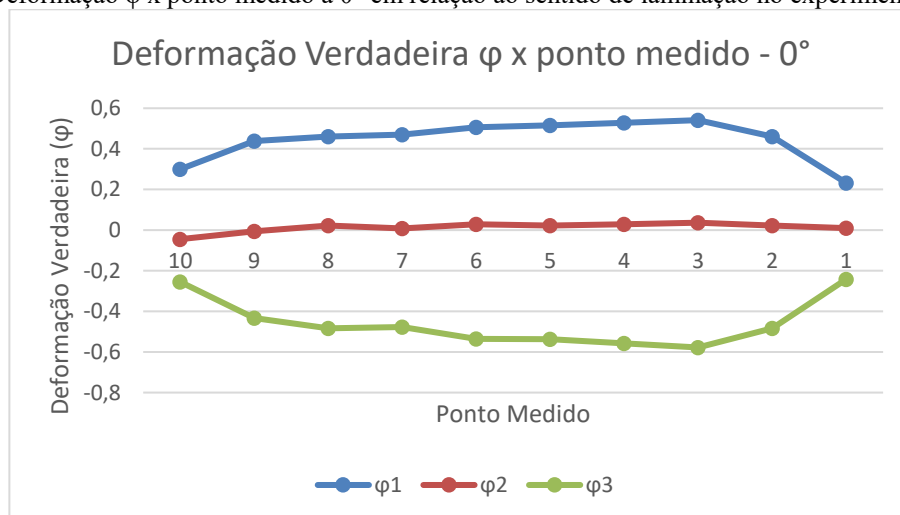
Com a medição das deformações através dos círculos gravados da chapa bruta foi possível calcular as deformações verdadeiras [15]. Foram medidos 10 pontos sendo o ponto número 1 o mais próximo da borda superior e o ponto número 10 o mais próximo do fundo da peça estampada. A Tab. 7 apresenta os valores das deformações encontrados para o experimento 6. Na Fig. 6 estão plotados os resultados apresentados na Tab. 7 a 0° em relação ao sentido de laminação. O gráfico mostra uma tendência que as deformações ocorrem de maneira semelhante à deformação plana ($\varphi_2=0$).

Tabela 7: Deformações verdadeiras de acordo com o sentido de laminação (0°, 45° e 90°) do experimento número 6.

Ponto medido	0°			45°			90°		
	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
1	0,23	0,01	-0,24	0,09	0,01	-0,10	0,18	-0,06	-0,12
2	0,46	0,02	-0,48	0,21	0,06	-0,28	0,38	-0,07	-0,31
3	0,54	0,04	-0,58	0,38	0,09	-0,46	0,39	-0,10	-0,29
4	0,53	0,03	-0,56	0,30	0,05	-0,35	0,38	-0,07	-0,31
5	0,52	0,02	-0,54	0,31	0,03	-0,34	0,37	-0,06	-0,31
6	0,51	0,03	-0,54	0,31	0,04	-0,35	0,34	-0,11	-0,23
7	0,47	0,01	-0,48	0,35	0,06	-0,42	0,37	-0,07	-0,30
8	0,46	0,02	-0,48	0,32	0,04	-0,36	0,40	-0,08	-0,32
9	0,44	-0,01	-0,43	0,29	0,04	-0,34	0,35	-0,08	-0,27
10	0,30	-0,04	-0,26	0,27	0,01	-0,29	0,18	-0,15	-0,04

Fonte: Do Autor

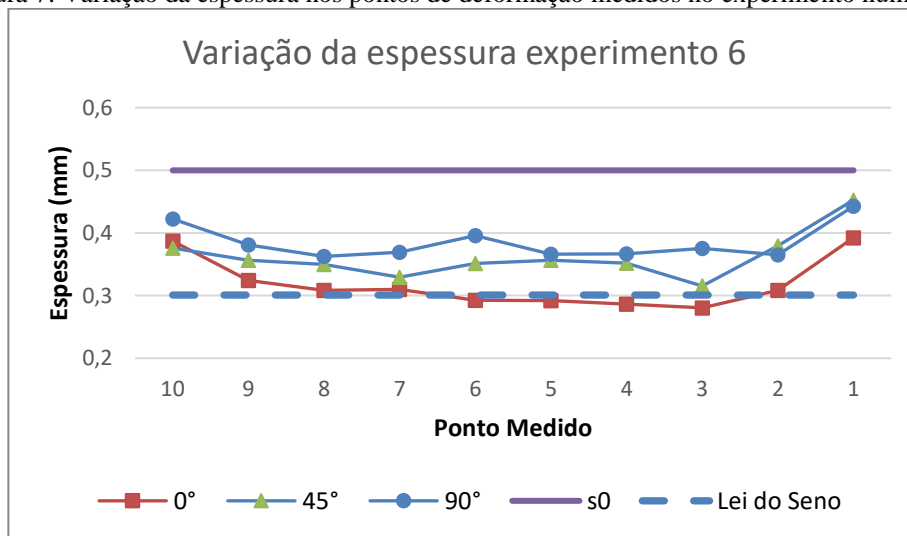
Figura 6: Deformação φ x ponto medido a 0° em relação ao sentido de laminação no experimento número 6.



Fonte: Do Autor

Considerando a lei de constância de volume foi determinada a espessura da chapa estampada em cada ponto de deformação medido. Considerando a Lei do Seno, para o ângulo máximo obtido, 53°, o valor limite da espessura da chapa é de 0,30 mm. Nos experimentos 6 e 8 observou-se que se atingiu espessura de 0,28 mm no sentido longitudinal de laminação da chapa, menor do que o estimado através da Lei do Seno, em seus estudos Fritzen [18] também observou um alcance maior do que o estabelecido pela lei do Seno na estampagem incremental de latão. Na Fig. 8 estão plotadas as relações de espessura para os sentidos 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação da chapa para o experimento 6.

Figura 7: Variação da espessura nos pontos de deformação medidos no experimento número 6.



Fonte: Do Autor

4 CONCLUSÕES

De acordo com os experimentos realizados, ficou evidente a possibilidade da adaptação de recursos de usinagem, tais como centros de usinagem, softwares CAD e CAM, ferramentas e sistemas de fixação para a execução do processo de estampagem incremental em chapas de titânio puro ASTM F-67 grau 2. A utilização destes recursos traz consigo a possibilidade de redução de custos na fabricação de peças estampadas em pequenas quantidades e que exigem customização, como é o caso das próteses fabricadas em titânio.

De acordo com os experimentos realizados, utilizando uma ferramenta de estampar com raio de 5 mm, os experimentos mostraram que o ângulo máximo (Ψ) de estampagem através do processo de estampagem incremental do titânio puro ASTM F-67 grau 2 com 0,5 mm de espessura varia conforme o raio de canto aplicado no modelo. Verificou-se que os melhores resultados relacionados ao ângulo de parede (Ψ) foram nas peças com raio de canto com 15 mm e 20 mm, sendo o melhor

resultado de 53°. Raios maiores que 20 mm e menores que 15 mm provocaram o rompimento na peça estampada com ângulo de parede de 53°.

Os valores de rugosidade Ra encontrados após a estampagem indicam vantagem da estratégia helicoidal com relação à estratégia paralela vistos nos estudos referenciados, chegando a valores que estão dentro da faixa indicada para a melhor proliferação celular que é entre 0,08 e 1 µm sem a necessidade de processos de acabamento. O cuidado com o acabamento da ferramenta utilizada para a estampagem é fundamental para garantir um melhor acabamento, estimando que melhores resultados com relação ao acabamento superficial serão encontrados caso a ferramenta seja polida.

A análise das deformações indica que no sentido longitudinal da laminação da chapa, o titânio puro ASTM F-67 grau 2 apresenta maiores deformações se aproximando da deformação plana ($\varphi_2 = 0$) apresentando ainda menores espessuras neste sentido, sendo assim maior alongamento nesta região, corroborando com os ensaios de tração realizados.

Com relação à espessura encontrada nas peças com melhores resultados, verificou-se que os valores encontrados no sentido longitudinal de laminação são menores do que os indicados como limite pela Lei do Seno.

O lubrificante, a base de gordura animal, utilizado na estampagem incremental se mostrou eficiente, reduzindo o atrito, possibilitando um bom acabamento superficial e eliminando uma possível contaminação com a utilização de lubrificantes sintéticos.

REFERÊNCIAS

- [1] I. V. C. Branco, R. G. Amaral, and L. A. Thesing, “CONFORMAÇÃO MECÂNICA POR TIXOCONFORMAÇÃO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA,” *Brazilian Journal of Development*, vol. 6, no. 8, pp. 62255–63260, 2020, doi: 10.34117/bjdv6n8-672.
- [2] I. Cerro, E. Maidagan, J. Arana, A. Rivero, and P. P. Rodríguez, “Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1–3, pp. 404–408, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.078.
- [3] A. Pohlak, M.; Küttner, R.; Majak, J.; Karjust, K. & Sutt, “EXPERIMENTAL STUDY OF INCREMENTAL FORMING OF SHEET METAL PRODUCTS,” in *4th International DAAAM Conference “INDUSTRIAL ENGINEERING – INNOVATION AS COMPETITIVE EDGE FOR SME” 29 - 30th April 2004, Tallinn, Estonia EXPERIMENTAL*, 2004, vol. 2, no. April, pp. 139–142.
- [4] L. Lamminen, “Incremental sheet forming with an industrial robot - Forming limits and their effect on component design,” *Advanced Materials Research*, vol. 6–8, pp. 457–464, 2005, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.457.
- [5] J. M. de C. Soeiro, “Enformabilidade Em Estampagem Incremental,” 2014.
- [6] J. Kopac and Z. Kampus, “Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 162–163, no. SPEC. ISS., pp. 622–628, 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.160.
- [7] S. B. M. Echrif and M. Hrairi, “Research and progress in incremental sheet forming processes,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 26, no. 11, pp. 1404–1414, 2011, doi: 10.1080/10426914.2010.544817.
- [8] I. Peter, E. Fracchia, I. Canale, and R. Maiorano, “Incremental sheet forming for prototyping automotive modules,” *Procedia Manufacturing*, vol. 32, pp. 50–58, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.182.
- [9] G. Centeno *et al.*, “Recent Approaches for the Manufacturing of Polymeric Cranial Prostheses by Incremental Sheet Forming,” *Procedia Engineering*, vol. 183, pp. 180–187, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.059.
- [10] S. Scheffler, A. Pierer, P. Scholz, S. Melzer, D. Weise, and Z. Rambousek, “Incremental sheet metal forming on the example of car exterior skin parts,” *Procedia Manufacturing*, vol. 29, pp. 105–111, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.112.
- [11] J. Castelan, “Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano,” *Tese de Doutorado*, 2010.
- [12] A. Daleffe, “Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio Através da Estampagem Incremental,” *Tese de Doutorado*, pp. 1–119, 2014.
- [13] M. C. Landuci, “Mecânicas De Biomateriais Metálicos,” 2016.

- [14] L. Shaeffer, *Conformação Mecânica*, 1ª edição. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999.
- [15] L. Shaeffer, *Conformação Mecânica*. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- [16] L. Ponsonnet *et al.*, “Relationship between surface properties (roughness, wettability) of titanium and titanium alloys and cell behaviour,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 23, no. 4, pp. 551–560, Jun. 2003, doi: 10.1016/S0928-4931(03)00033-X.
- [17] A. F. de L. Filho, N. W. Paschoalinoto, J. A. G. Ferrer, O. L. Padovan, C. O. Kenvyn, and J. R. de Camargo, “APLICAÇÃO DE UM PLANEJAMENTO FATORIAL PARA A PREDIÇÃO DE ACABAMENTO SUPERFICIAL DO PROCESSO DE FRESAMENTO DA LIGA TI-6AL-4V / APPLICATION OF A FACTORIAL PLANNING FOR THE PREDICTION OF SURFACE FINISHING OF THE MILLING PROCESS OF ALLOY TI-6AL-4V,” *Brazilian Journal of Development*, vol. 7, no. 2, pp. 20294–20310, 2021, doi: 10.34117/bjdv7n2-598.
- [18] D. Fritzen, “Estudo Do Processo De Estampagem Incremental Em Chapa De Latão 70/30,” *Dissertação de Mestrado*, vol. 1, p. 124, 2012, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.