

RUGOSIDADE E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE PEÇAS ESTAMPADAS PELO PROCESSO SPIF PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS

Felipe dos Anjos Rodrigues Campos

Pedro Henrique Pires França

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1O, Uberlândia/MG.
filipin_anjos@hotmail.com ; pedrohenriquepiresf96@gmail.com

Felipe Chagas Rodrigues de Souza

Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1O, Uberlândia/MG.
felipechagas@ufu.br

Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

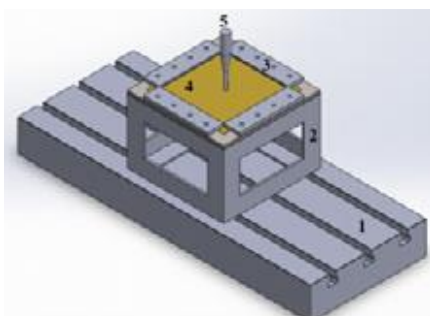
Univ. Federal de Uberlândia, Lab. de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Av. João Naves de Ávila, 2121, bloco 1O, Uberlândia/MG.
leo.rrs@gmail.com

Resumo. Importantes avanços tecnológicos na engenharia facilitam a produção de peças para a indústria médica, tendo como exemplo o processo de estampagem incremental de ponto simples (SPIF). Devido à complexidade inerente do processo, o controle das variáveis para obtenção de peças com rugosidade adequada é um dos principais desafios, especialmente para aplicação em implantes ósseos. Nestes produtos, a osseointegração é favorecida numa faixa específica de valores de R_a , com influência também da distribuição de picos, vales e composição química. Nesse sentido, testes de estampagem em chapas de titânio foram feitos em diferentes condições, e a rugosidade foi avaliada por diferentes parâmetros. O passo vertical foi a variável mais influente, e as superfícies indicaram predomínio de picos pouco achatados. A observação no MEV e análise de composição química por EDS indicaram fragmentos de TiO_2 espalhados irregularmente, sobretudo nas regiões de maior deformação plástica. Essas estruturas favorecem a adesão celular e indicam a capacidade do processo SPIF em produzir peças biomédicas sem tratamentos posteriores.

Palavras chave: rugosidade, estampagem incremental, espaço morfológico, osseointegração, implantes

1. INTRODUÇÃO

A evolução acelerada dos processos de prototipagem rápida nos últimos anos tem contribuído de forma intensa para a indústria de peças biomédicas, principalmente devido a facilidade em produzir peças personalizadas de acordo com as necessidades do paciente. Juntamente com as técnicas de digitalização e escaneamento 3D, o uso dessas tecnologias é cada vez maior nas intervenções cirúrgicas comumente praticadas na odontologia e ortopedia (Kunrath, 2020). Dentre os processos de fabricação, destacam-se a manufatura aditiva e o processo de estampagem incremental de chapas. A primeira, é mais lembrada atualmente graças à recente popularização das impressoras 3D de plásticos comerciais pela tecnologia FDM (*fused deposition modelling*). No entanto, a produção de peças metálicas acabadas com boas tolerâncias dimensionais requer processos mais complexos e muitos mais caros em termos de matéria prima e, principalmente, equipamento. Dessa forma, o segundo processo se apresenta como excelente alternativa para produção de peças a partir de chapas metálicas finas (Souza et. al., 2019).



(a)



(b)

Figura 1. Fixação da chapa e ferramenta em máquina CNC para o processo de estampagem incremental de ponto simples. Adaptado de Oliveira et. al. (2019).

A variante mais comum, conhecida como SPIF (*single point increment forming*), se baseia na utilização de uma ferramenta de ponta semiesférica montada em máquina CNC para percorrer o material do branco no plano horizontal com pequenos incrementos verticais a cada passe, deformando progressivamente a peça. A trajetória é definida computacionalmente através de sistemas CAD-CAM, de acordo com o formato da peça digitalizada. Como não requer a fabricação de matrizes de aço endurecido, esse processo apresenta custo relativamente baixo para produção de pequenos lotes e possibilita entrega mais rápida dos pedidos (Mateus et. al., 2019). Um esquema simplificado do processo pode ser visualizado na Fig. 1.

Embora o processo SPIF tenha óbvias vantagens para fabricação de peças médicas sob demanda, a obtenção de rugosidades e desvios geométricos adequados requer ajuste delicados dos vários parâmetros de processo (Campos et. al., 2020). Gandla et. al. (2020) realizaram estampagem de alumínio e observaram o aumento do parâmetro Ra com o passo vertical, e sua diminuição ao se elevar o ângulo de parede e diâmetro da ferramenta. No entanto, esse comportamento pode se alterar dependendo do material e espessura da chapa. Já de acordo com Cheng et. al. (2020), o acabamento depende principalmente do atrito na interface com a ferramenta e da rugosidade da própria ferramenta. Segundo Hussain et. al. (2008), outro fator importante é a lubrificação, cuja eficiência depende não só da forma de aplicação e do tipo de lubrificante, mas também da velocidade de rotação e avanço da ferramenta, além do passo vertical na direção vertical. O domínio dessas variáveis também é importante para evitar a fratura das peças, fenômeno comum em altas condições de deformação devido ao encruamento contínuo e esgotamento plástico.

A princípio, a maioria dos estudos sobre acabamento superficial em estampagem incremental focam na redução da rugosidade da peça, seja por lubrificação, condicionamento da superfície da ferramenta ou ajuste dos parâmetros de processo. No entanto, do ponto de vista biomédico, as imperfeições micrométricas podem ser benéficas no caso de implantes ortopédicos. Civantos et. al. (2019) realizaram testes de crescimento celular in vitro em peças fabricadas por metalurgia do pó, mostrando maior proliferação em peças mais porosas com Ra na faixa de 3 a 10 μm quando em comparação com a peça maciça de rugosidade Ra igual a 0,7 μm . Além disso, técnicas de jateamento ou ataque químico também são favoráveis ao ampliar os sítios de adesão celular, como exposto nos testes in vivo de Hacking et. al. (2012), no qual melhor osseointegração foi obtida quando o parâmetro Rq subiu de 0,19 para 1,03 μm .

Nesse tipo de aplicação, o material mais utilizado é o titânio, graças a suas boas propriedades mecânicas e excelente resistência a corrosão. Além disso, a camada de dióxido de titânio que se forma naturalmente na superfície também induz a adesão e proliferação das células ósseas, acelerando a recuperação do paciente (Chen et. al., 2020). Embora o mecanismo exato ainda não seja perfeitamente conhecido, interações químicas do TiO_2 com os íons cálcio da matriz óssea atraem proteínas que estimulam a multiplicação e diferenciação dos osteoblastos, as células jovens do osso. Por esse motivo, vários tratamentos são feitos a fim de aumentar a proporção desse óxido na superfície do implante, tais como a oxigenação a plasma e deposição eletrolítica, ou jateamento supersônico em outros materiais (Agarwal e García, 2015).

Nesse sentido, se tornaria benéfico ajustar os parâmetros dos processos de fabricação de forma a produzir peças com características superficiais adequadas ao uso final sem a necessidade de tratamentos posteriores. Tendo em vista a aplicação de peças de titânio estampadas na indústria biomédica, foi investigado neste trabalho a influência dos parâmetros do processo SPIF na rugosidade e na composição química da superfície, avaliando a viabilidade dessas características para aplicação imediata da peça. Testes de estampagem foram feitos em quatro diferentes condições de rotação, avanço, e passo vertical, para produção de cones retos. Foi feita análise de composição química por espectroscopia de raios X por energia de dispersão e o aspecto superficial foi visualizado no Microscópio Eletrônico de Varredura. A rugosidade foi medida em rugosímetro de contato e avaliada não só pelo tradicional parâmetro Ra, mas também observado o espaço morfológico caracterizado pelos parâmetros skewness (Rsk) e kurtosis (Rku), que representam a simetria e o achatamento, respectivamente, do perfil da superfície. Os dados indicam a formação de partículas de TiO_2 esféricas espalhadas na superfície de forma irregular, provavelmente decorrentes da oxidação de partículas de titânio originadas do desgaste da chapa. As rugosidades mais próximas ao recomendado na literatura para peças médicas foram obtidas com os menores passos verticais.

2. METODOLOGIA

Os ensaios de estampagem incremental de ponto simples foram realizados com chapas de titânio puro de 1 mm de espessura, variando o passo vertical, a velocidade de rotação e avanço da ferramenta, conforme disposto na Tabela 1. Foi utilizado óleo de base mineral Havoline Superior SAE 20W-50 para lubrificar as chapas, sendo aplicado apenas no início do processo. Ferramentas de ponta semi-esférica com raio 5 mm foram empregadas nos ensaios, torneadas a partir de barras cilíndricas de aço SAE 52100. Os testes foram feitos num centro de usinagem universal ROMI Bridgeport 760 com 9 kW de potência máxima, e um suporte em ferro fundido foi usado para fixação das chapas. O trajeto helicoidal da ferramenta foi exportado a partir da interface CAD-CAM do software Solidworks 2018. O equipamento foi ajustado para produção de cones retos com ângulo de parede de 45° e diâmetro da base de 80 mm, exposto na Fig. 2(a). A Figura 2(b) mostra o aspecto da superfície estampada de um dos cones, com ampliação na Fig. 2(c), onde percebe-se as ondulações resultantes da deformação plástica do material com os passes sucessivos da ferramenta.

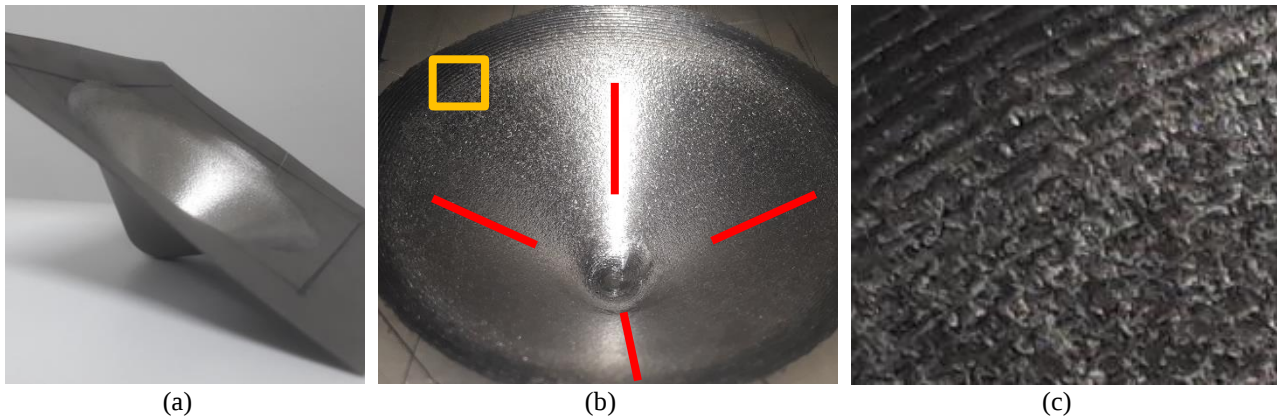


Figura 2. (a) Chapa estampada pelo processo SPIF. (b) Aspecto da superfície interna do cone, com as marcas em vermelho exemplificando as medições de rugosidade. (c) Região destacada em laranja com ampliação de 7x.

Tabela 1. Parâmetros de estampagem utilizados nos testes.

Teste	Rotação (rpm)	Velocidade avanço (m/s)	Passo vertical (mm)
1	75 (V-)	800 (f-)	0,8 (p+)
2	150 (V+)	800 (f-)	0,5 (p-)
3	75 (V-)	1200 (f+)	0,5 (p-)
4	150 (V+)	1200 (f+)	0,8 (p+)

A superfície rugosa de um dos cones foi observada num Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da fabricante Zeiss modelo EVO MA10, e análises de composição química foram feitas através de Espectroscopia de Raios X por Energia de Dispersão (EDS) com um detector INCAX-act modelo 51-ADD0048. As medições de rugosidade foram feitas através de um rugosímetro de contato Taylor Hobson Surtronic S-100, com resolução de 0,01 μm . O *cut-off* de 2,5 mm e o filtro gaussiano foram utilizados conforme recomendado pela ISO 4288 (2008), para realizar quatro medições igualmente espaçadas em cada chapa, como exemplificado na Fig. 2(b).

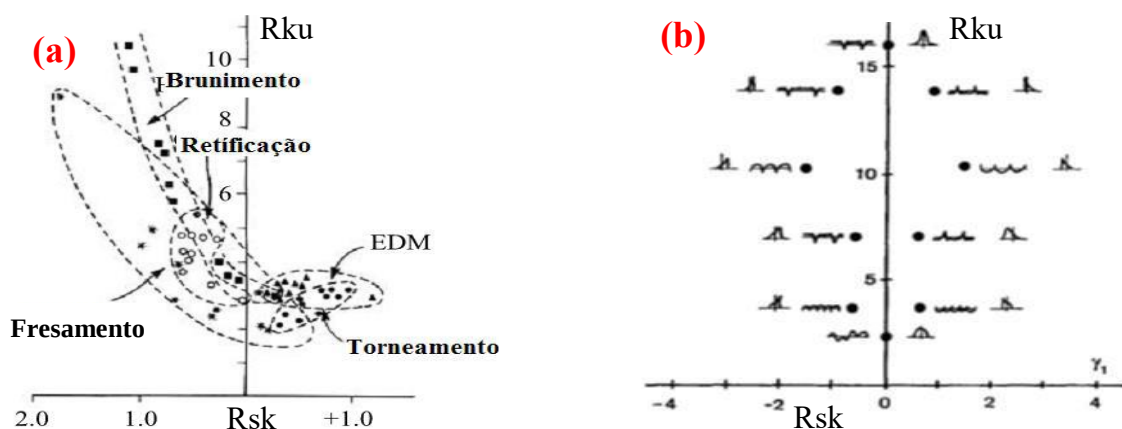


Figura 3. (a) Representação do espaço morfológico dos diferentes processos de fabricação. (b) Exemplos de perfil de acordo com a região do espaço morfológico. Adaptado de Mezari (2013).

A partir do software Talyprofile Lite versão 7.1, foi feita a seleção dos parâmetros de rugosidade para análise. Embora a maioria dos trabalhos em estampagem incremental verifique a superfície apenas através do parâmetro R_a ou R_q , é importante usar outros parâmetros para caracterizar a morfologia da superfície. Segundo Souza Ruzzi et. al. (2020), os parâmetros R_{sk} e R_{ku} também são bastante usados na engenharia de fabricação, dada sua capacidade de diferenciar, respectivamente, a predominância e o espaçamento de picos ou vales em perfis com valores semelhantes de R_a . Ainda, a representação gráfica de R_{sk} e R_{ku} permite observar o chamado espaço morfológico, proposto por Bhusan (2000), no qual o aspecto dos perfis de rugosidade resultantes de cada processo de fabricação ficam agrupados em regiões típicas, como exposto na Fig. 3. Ademais, como evidenciado por Gadelmawla et. al. (2002), parâmetros tais como R_p , R_v e R_dq

podem auxiliar a comparação das superfícies. As definições de cada parâmetro estão expostas na Tab. 2, e cabe ressaltar que os valores são automaticamente calculados no Talyprofile considerando desde a Eq. (1) até a Eq. (7), para os pontos de cada perfil medido pelo rugosímetro.

Tabela 2. Definição dos parâmetros de rugosidade utilizados na comparação das chapas estampadas.

Parâmetro	Definição	Unidade	Equação
Ra	Altura da linha média	μm	$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i $ (1)
Rq	Média quadrática da altura	μm	$Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$ (2)
Rsk	Simetria do perfil	-	$Rsk = \frac{1}{NRq^3} \sum_{i=1}^n y_i^3$ (3)
Rku	Achatamento do perfil	-	$Rku = \frac{1}{NRq^4} \sum_{i=1}^n y_i^4$ (4)
Rdq	Inclinação média	°	$Rdq = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\sigma_{y_i}}{\sigma_{x_i}}$ (5)
Rp	Altura máxima dos picos em relação a linha média	μm	$Rp = \max(y_i)$ (6)
Rv	Altura máxima dos vales em relação a linha média	μm	$Rv = \min(y_i)$ (7)

3. RESULTADOS

A variação dos parâmetros de rugosidade analisados pode ser vista na Fig. 4. O teste de variância ANOVA com intervalo de confiança de 95 % indicou que houve diferença estatisticamente significativa apenas nos parâmetros Ra ($p = 0,0007$), Rq ($p = 0,0011$), Rp ($p = 0,0359$) e Rv ($p = 0,0010$) para as quatro condições de estampagem. A fim de verificar qual dos parâmetros causou esta diferença, as médias e desvios padrões foram recalculadas para os dois níveis (+ e -) de cada variável (V, f, p), e o teste de significância entre médias foi feito no Statistica 12 para verificação dos *p-values*, conforme exemplificado na Fig. 5. Tal como pode ser visto na Tab. 3, dentre os valores de V, f e p utilizados nos testes, a variação do passo vertical foi o único fator estatisticamente significativo ($p < 0,05$) para a mudança na rugosidade superficial, com efeito também em Rku além de Ra, Rq, Rp e Rv. Este comportamento está em linha com o observado por Kumar et. al (2018) na estampagem incremental do alumínio AA2024, embora os autores tenham obtidos rugosidades médias menores, entre 0,6 e 1,4 μm , graças a combinação de baixos valores de passo vertical e altas rotações.

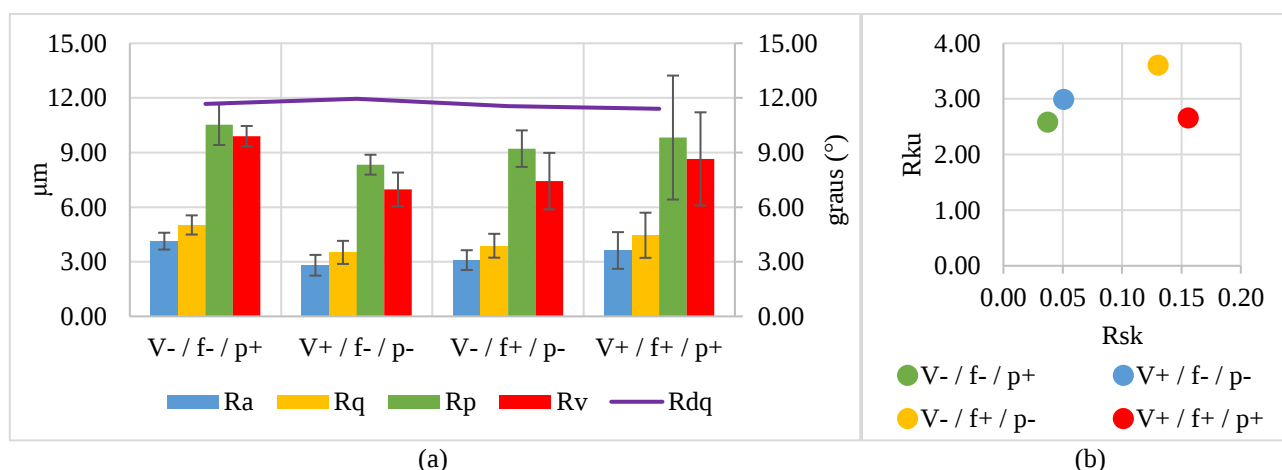


Figura 4. (a) Médias e desvios padrões dos parâmetros de rugosidade analisados para os quatro testes de estampagem. (b) Representação do espaço morfológico obtido nos testes SPIF.

Os valores de Ra obtidos são próximos aos obtidos em trabalhos prévios relacionados às aplicações biomédicas do processo SPIF. Cheng et. al. (2020) reportaram a produção de implantes de titânio para joelho com Ra de 5,7 μm , valor mais baixo do que o normalmente obtido por fresamento e forjamento. Já Milutinović et. al. (2021) produziram próteses

ortodônticas em aço inox com Ra entre 3,5 e 5,5 μm . No entanto, segundo Deng et. al. (2015), os valores de Ra mais benéficos a osseointegração estão mais próximos de 2,5 μm , e valores superiores a 3 μm não melhoram a biocompatibilidade. Nesse sentido, os testes 2 e 3 apresentam os melhores resultados para Ra.

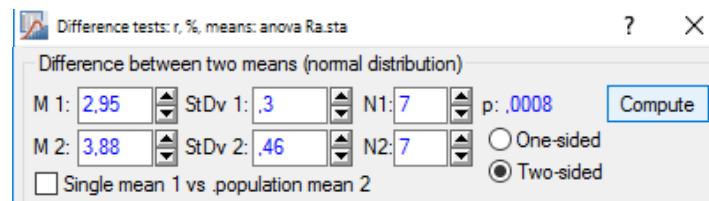


Figura 5. Teste de diferença estatística entre as duas médias obtidas para os níveis de Rku.

Tabela 3. *p-values* na comparação entre os níveis (+ e -) de cada variável para os diferentes parâmetros de rugosidade. O nível de significância de 5 % adotado requer que $p < 0,05$ para haver diferença estatisticamente significativa.

<i>p-values (two-sided dist.)</i>	Ra	Rq	Rsk	Rku	Rp	Rv	Rdq
V	0.2288	0.2265	0.8344	0.4252	0.2229	0.2625	0.8937
f	0.7480	0.7983	0.2842	0.2989	0.8934	0.6132	0.5259
p	0.0008	0.0010	0.9165	0.0493	0.0184	0.0010	0.6884

A análise do espaço morfológico indica que as superfícies têm leve predominância de picos ($R_{sk} > 0$) com achatamento intermediário (R_{ku} em torno de 3). Além disso, o teste 3 produziu superfícies com picos e vales mais acentuados em média, já que tanto o R_{ku} quanto a razão R_q/R_a são maiores neste caso (1,26) comparado com os testes 1, 2 e 4 (respectivamente, razões de 1,23; 1,25; 1,24). Vale ressaltar que, apesar dos valores mais elevados de R_p e R_v para os testes 1 e 4, estes parâmetros indicam apenas o maior pico e vale no comprimento de avaliação, enquanto o parâmetro R_q é mais sensível a presença de todos os picos e vales incluídos nos 5 comprimentos de amostragem. Segundo Han et. al. (2019), os vales são os sítios preferenciais para a adesão celular. Nessa perspectiva, os testes 1 e 2 seriam mais vantajosos dado os menores valores de R_{sk} .

Estas características, associadas a valores muito próximos de R_{dq} para os quatro casos, indicam que o perfil de rugosidade é gerado predominantemente pela deflexão da chapa ao longo dos movimentos sucessivos da ferramenta, como nos mecanismos da Fig. 6(b) e Fig. 6(c). Além disso, variações aleatórias podem surgir devido ao fluxo plástico do material que se desloca para as laterais. De acordo com Whitehouse (2003), esse tipo de superfície também pode ser obtido nos processos de torneamento, fresamento e EDM, o que reforça a capacidade do processo SPIF em substituir alguns dos implantes produzidos por estas técnicas tradicionais.

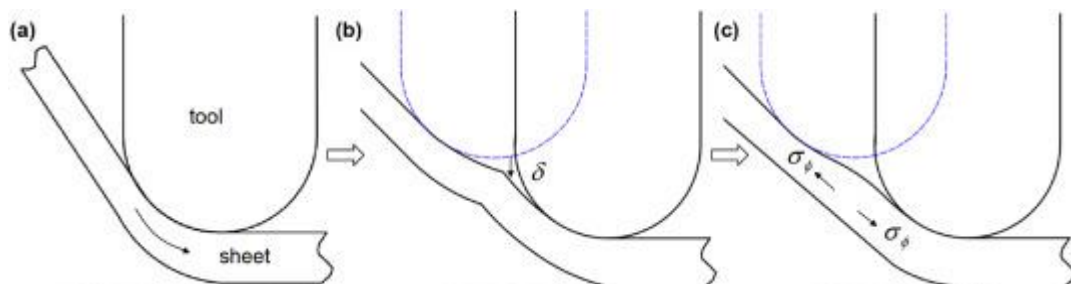


Figura 6. Mecanismos de deformação das chapas no processo SPIF que influenciam a rugosidade. (a) Espessura irregular. (b) Deflexão. (c) Estiramento. Adaptado de Chang, Z. e Chen, J. (2019).

A Figura 7 mostra o aspecto da superfície produzida no teste 3. Fica evidente a formação do fluxo plástico de material em determinadas regiões, mecanismo decorrente principalmente da velocidade de rotação. Segundo Hussain et. al. (2012), o cisalhamento na interface entre peça e ferramenta gera calor de forma localizada, que contribui para a maior deformabilidade do material. Isso é especialmente importante no caso do titânio, que apresenta baixa plasticidade em temperatura ambiente.

Além disso, esses mecanismos também contribuem para a formação, arrancamento e incrustação de partículas na superfície. Conforme pode ser visto na Fig. 7(b) e Tab. 4, as partículas mais claras e/ou arredondadas espalhadas na superfície são constituídas de dióxido de titânio, provavelmente na forma TiO_2 . A Figura 8 ainda deixa mais evidente o aparecimento desses fragmentos em regiões mais intensamente deformadas. Como discutido anteriormente, essas estruturas são extremamente importantes no favorecimento da osseointegração. Porém, embora seja possível observar

partículas grandes e pequenas incrustadas em toda a superfície, sua distribuição não é uniforme. Ainda assim, sabe-se que o titânio exposto ao ar forma naturalmente uma camada de óxido de pelo menos algumas dezenas de nanômetros (Chen et. al., 2020), a qual dificilmente é capturada no espectro EDS, cujo sinal reflete predominantemente a composição química da região compreendida entre 1 e 2 μm abaixo da superfície. Esse fator indica a adequabilidade química da superfície formada no processo SPIF para aplicação em implantes sem necessidade de utilização de processos posteriores. Outro ponto de interesse é a possível reação do lubrificante com o material da chapa, indicado pelo teor de C nos espectros de EDS. De fato, a camada oxidada tem alta estabilidade química, mas a passagem da ferramenta pode removê-la e expor o Ti puro momentaneamente, o qual é muito mais reativo.

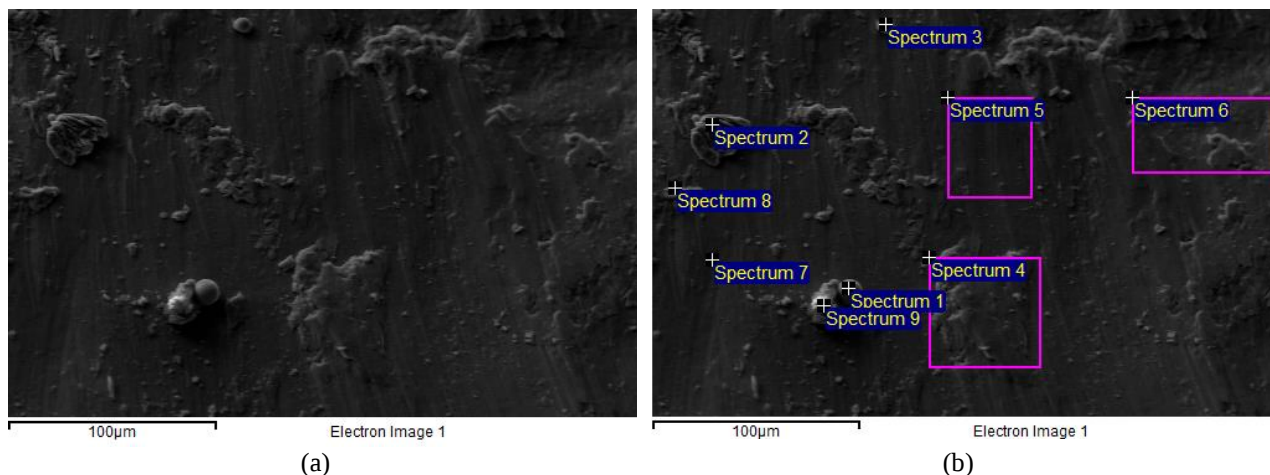


Figura 7. Imagens obtidas por MEV da chapa estampada no teste 3, com destaque para as regiões avaliadas por EDS.

Tabela 4. Composição química segundo os espectros EDS obtidos nas diferentes regiões.

Spectrum	C	O	Ti	Spectrum	C	O	Ti
1	4.6	41.5	54.0	6	6.0	0.4	93.5
2	1.3	0.3	98.5	7	6.8	0.3	92.9
3	9.2	23.8	66.2	8	4.6	0.4	95.0
4	6.6	0.5	92.9	9	5.5	0.5	94.1
5	3.0	0.5	96.5				

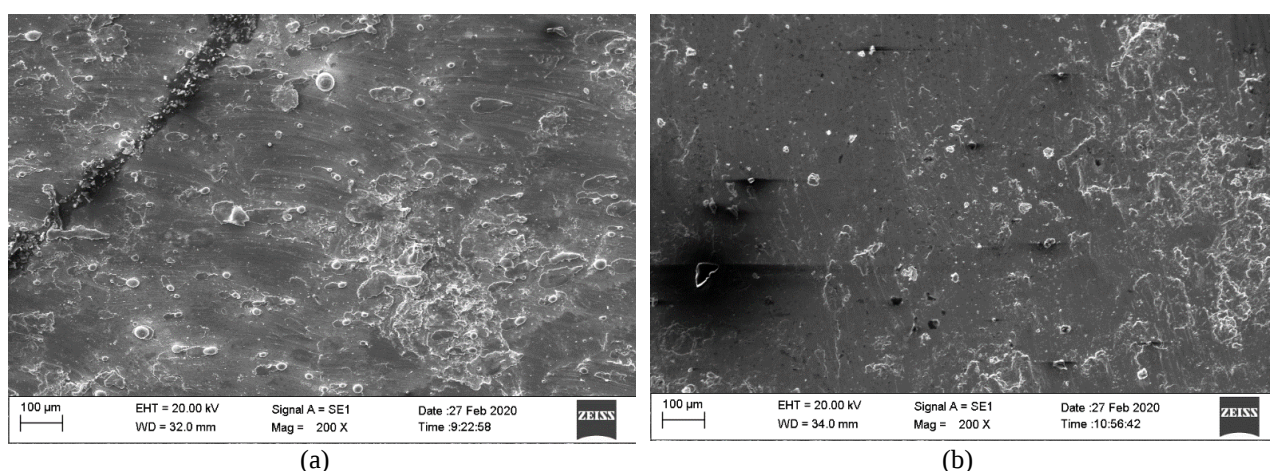


Figura 8. Predomínio dos fragmentos oxidados (partículas claras) nas regiões de maior deformação plástica do material.

4. CONCLUSÕES

Testes de estampagem incremental foram feitos em chapas de titânio sobre 4 diferentes condições. A análise da rugosidade obtida foi feita por diferentes parâmetros, enquanto as imagens de MEV e análise de composição química por EDS revelaram importantes características superficiais. Assim, as seguintes conclusões puderam ser verificadas:

- A principal variável de processo foi o passo vertical, com influência estatisticamente significativa nos parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rku, Rp e Rv;
- Os valores de Ra mais adequados para proliferação celular em possíveis implantes foram obtidos nos testes 2 e 3;
- A análise do espaço morfológico (relação entre Rsk e Rku) e da inclinação média do perfil (Rdq) indicaram que as superfícies apresentam predominantemente picos com achatamento intermediário;
- Considerando a distribuição de picos e vales segundo o espaço morfológico, os parâmetros mais adequados para aplicações biomédicas foram obtidos nos testes 1 e 2;
- As características superficiais obtidas são próximas as produzidas por torneamento, EDM e alguns casos de fresamento, indicando a capacidade do processo SPIF em substituí-los na manufatura de determinados implantes;
- As imagens de MEV revelaram algumas regiões de alto fluxo plástico do material, onde houve maior presença de partículas oxidadas.
- Apesar da distribuição irregular dos fragmentos de óxido de titânio na superfície, estas estruturas aumentam a biocompatibilidade das peças estampadas e indicam a capacidade do processo SPIF em produzir peças adequadas para implantes ósseos sem a necessidade de tratamento posteriores.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FAPEMIG e CAPES (Código de Financiamento 01) pelo fomento às bolsas de pós-graduação, ao Laboratório Multiusuário de Microscopia da Faculdade de Engenharia Química, ao Laboratório de Ensino em Metrologia e Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio na realização dos testes.

6. REFERÊNCIAS

- Agarwal, R. e García, A. J., 2015. "Biomaterial strategies for engineering implants for enhanced osseointegration and bone repair". *Advanced drug delivery reviews*, Vol. 94, p. 53-62.
- Bhushan, B., 2000. *Modern tribology handbook 1. Principles of tribology*. CRC press, Boca Raton, 1st ed.
- Campos, F. A. R., Souza, F. C. R., Silva, L. R. R. e França, P. H. P., 2020. "Study of different lubri-coolant conditions for incremental sheet forming of thin zinc sheets". *A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica*, Vol. 1, p. 21-34.
- Chang, Z. e Chen, J., 2019. "Analytical model and experimental validation of surface roughness for incremental sheet metal forming parts". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 146, 103453.
- Chen, C. S., Chang, J. H., Srimaneepong, V., Wen, J. Y., Tung, O. H., Yang, C. H., Lin, H. C., Lee, T. H., Han, Y. e Huang, H. H., 2020. "Improving the in vitro cell differentiation and in vivo osseointegration of titanium dental implant through oxygen plasma immersion ion implantation treatment". *Surface and Coatings Technology*, Vol. 399, 126125.
- Cheng, Z., Li, Y., Xu, C., Liu, Y., Ghafoor, S. e Li, F., 2020. "Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, No. 4, p. 7225-7251.
- Civantos, A., Domínguez, C., Pino, R. J., Setti, G., Pavón, J. J., Martínez-Campos, E., Garcia, F. J. G., Rodríguez, J. A., Allain, J. P. e Torres, Y., 2019. "Designing bioactive porous titanium interfaces to balance mechanical properties and in vitro cells behavior towards increased osseointegration". *Surface and Coatings Technology*, Vol. 368, p. 162-174.
- Deng, Y., Liu, X., Xu, A., Wang, L., Luo, Z., Zheng, Y., Deng, F., Wei, J., Tang, Z. e Wei, S., 2015. "Effect of surface roughness on osteogenesis in vitro and osseointegration in vivo of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone–nanohydroxyapatite composite". *International journal of nanomedicine*, Vol. 10, p. 1425.
- Gadellmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M. e Soliman, H. H., 2002. "Roughness parameters". *Journal of materials processing Technology*, Vol. 123, Ed. 1, p. 133-145.
- Gandla, P. K., Inturi, V., Kurra, S. e Radhika, S., 2020. "Evaluation of surface roughness in incremental forming using image processing based methods". *Measurement*, Vol. 164, 108055.
- Hacking, S. A., Boyraz, P., Powers, B. M., Sen-Gupta, E., Kucharski, W., Brown, C. A. e Cook, E. P., 2012. "Surface roughness enhances the osseointegration of titanium headposts in non-human primates". *Journal of neuroscience methods*, Vol. 211, No. 2, p. 237-244.
- Han, X., Yang, D., Yang, C., Spintzyk, S., Scheideler, L., Li, P., Li, D., Geis-Gerstorfer, J. e Rupp, F., 2019. "Carbon fiber reinforced PEEK composites based on 3D-printing technology for orthopedic and dental applications". *Journal of clinical medicine*, Vol. 8, No. 2, p. 240.
- Hussain, G., Gao, L., Hayat, N., Cui, Z., Pang, Y. C. e Dar, N. U., 2008. "Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, p. 193-201.
- ISO 4288, 2008. "Geometrical Product Specifications (GPS)--surface Texture: Profile Method--rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture". *International Organization for Standardization*.
- Kumar, A., Gulati, V. e Kumar, P., 2018. "Investigation of surface roughness in incremental sheet forming". *Procedia computer science*, Vol. 133, p. 1014-1020.

- Kunrath, M. F., 2020. "Customized dental implants: Manufacturing processes, topography, osseointegration and future perspectives of 3D fabricated implants". *Bioprinting*, Vol. 20, e00107.
- Mateus, V. V. G., Silva, L. R. R., Campos, F. A. R., França, P. H. P., Barreto, J. C. N. e Sales, W. F., 2019. "Efeito da rotação na estampagem incremental de chapas de aço AISI 304". *Revista Sciencomm*, Vol. 8, p. 37-43.
- Mezari, R. A., 2013. *Mecanismos de remoção no processo de brunimento plano rotativo de porcelanatos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Milutinović, M., Lendjel, R., Baloš, S., Zlatanović, D. L., Sevshek, L. e Pepelnjak, T., 2021. "Characterisation of geometrical and physical properties of a stainless steel denture framework manufactured by single-point incremental forming". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 10, p. 605-623.
- Oliveira, B. J., Silva, L. R. R., Campos, F. A. R., França, P. H. P., Mateus, V. V. G., Barreto, J. C. N. e Sales, W. F., 2019. "Análise da velocidade de avanço na estampagem incremental do aço AISI 304". *Revista Sciencomm*, Vol. 8, p. 14-22.
- Souza Ruzzi, R., da Silva, L. R. R., da Silva, R. B., da Silva Junior, W. M. e Bianchi, E. C., 2020. "Topographical analysis of machined surfaces after grinding with different cooling-lubrication techniques". *Tribology International*, 141, 105962.
- Souza, F. C. R., Silva, L. R. R., Campos, F. A. R. e Peixoto, A. C. S., 2020. "Manufacture of complex parts in thin sheets of commercially pure aluminum using incremental sheet forming method". *A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica*. Vol. 1, p. 11-20.
- Whitehouse, D. J., 2003. *Handbook of Surface and Nanometrology*. Institute of Physics Publishing, Bristol, 1st ed.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ROUGHNESS AND CHEMICAL COMPOSITION OF PARTS PRODUCED BY SPIF FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

Felipe dos Anjos Rodrigues Campos

Pedro Henrique Pires França

Federal University of Uberlândia, Lab. for Teaching and Research of Machining, 2121, João Naves de Ávila av., Uberlândia/MG.

filipin_anjos@hotmail.com

pedrohenriquepiresf96@gmail.com

Felipe Chagas Rodrigues de Souza

Federal University of Uberlândia, Lab. for Teaching and Research of Machining, 2121, João Naves de Ávila av., Uberlândia/MG.

felipechagas@ufu.br

Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Federal University of Uberlândia, Lab. for Teaching and Research of Machining, 2121, João Naves de Ávila av., Uberlândia/MG.

leo.rrs@gmail.com

Abstract. Important technological advances in engineering facilitate the production of parts for the medical industry, taking as an example the process of incremental single point printing (SPIF). Requiring the inherent complexity of the process, controlling the variables to obtain the parts with adequate roughness is one of the main challenges, especially for application in bone implants. In these products, osseointegration is favored in a specific range of Ra values, with an impact also on the distribution of peaks and valleys and the chemical composition. In this sense, the stamping tests on titanium sheet were carried out under different conditions, and the roughness was evaluated by different parameters. The vertical step was the most influential variable, and the surfaces indicated a predominance of little flattened peaks. Observation of the surface in the SEM and analysis of chemical composition by EDS indicated fragments of titanium oxide scattered irregularly, especially in the regions of greatest plastic deformation. These structures favor cell adhesion and indicate the ability of the SPIF process to produce biomedical parts without the need for further treatment.

Keywords: roughness, incremental forming, morphological space, osseointegration, implants

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.