UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Rod. Washington Luís, km 235 - SP-310 São Carlos - CEP 13565-905
e-mail: ppgemec@ufscar.br site: https://www.ppgemec.ufscar.br/pt-br

PPGEMec
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Nome: _____ CPF:_____

1. De acordo com Gerhardt e Silveira (2009) a pesquisa científica é o resultado de um exame minucioso, realizado com o objetivo de resolver um problema, recorrendo a procedimentos científicos. Resumidamente, uma pesquisa científica pode ser classificada:

- **Quanto à natureza:**

  Pesquisa básica ou fundamental - Neste caso, o desenvolvimento da pesquisa fornece resultados para a ciência que ainda não apresentam uma aplicação prática imediata. Objetiva gerar conhecimentos novos e úteis para o avanço da ciência.

  Pesquisa aplicada - A pesquisa aplicada gera resultados com aplicação prática para problemas específicos e que podem ser utilizados, em geral, no curto prazo.

- **Quanto à abordagem:**

  Pesquisa qualitativa - A pesquisa qualitativa interpreta e analisa os fenômenos, atribuindo-os significados, que não podem ser analisados quantitativamente. Apresenta um caráter mais exploratório e subjetivo não se preocupando com a representatividade numérica do problema.

  Pesquisa quantitativa - A pesquisa quantitativa consiste na quantificação de dados coletados por meio de procedimentos estruturados e instrumentos formais. Em geral, faz-se uso de gráficos, tabelas, médias aritméticas e porcentagens traduzidas em números.

- **Quanto aos procedimentos:**

  Pesquisa experimental - A pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

  Pesquisa de campo - A pesquisa de campo caracteriza-se pelas investigações em que, além da pesquisa bibliográfica e/ou documental, se realiza coleta de dados junto a pessoas, com o recurso de diferentes tipos de pesquisa.

No desenvolvimento de uma pesquisa científica, é comum que ela apresente mais do que uma classificação ou característica. Com base nas definições apresentadas anteriormente, identifique e descreva as classificações que podem ser atribuídas à pesquisa desenvolvida por Marin *et al.* (2022), justificando os motivos de suas escolhas.

2. De acordo com o Guia para Apresentação de Trabalho Acadêmico (UFSCAR, 2018), o resumo de uma pesquisa científica deve apresentar, de forma concisa, os pontos relevantes do trabalho (como por exemplo, a motivação da pesquisa, a metodologia empregada, os principais resultados obtidos e conclusões). Desta forma, o resumo deve permitir uma visão rápida e clara do conteúdo e das conclusões da pesquisa.

A partir desta descrição, faça a leitura do artigo de Silva *et al.* (2022) e redija um resumo com aproximadamente 15 linhas.

3. A revisão bibliográfica ou revisão da literatura é elemento textual fundamental de trabalhos técnico-científicos como monografias, dissertações, teses e artigos e apresenta um conjunto de referências citadas ao longo do texto e listadas ao final do trabalho. Segundo Gerhardt e Silveira (2009), a revisão bibliográfica tem a função principal de "expor resumidamente as principais ideias já discutidas por outros autores que trataram do problema, levantando críticas e dúvidas, quando for o caso" e "explicar no que o trabalho vai se diferenciar dos trabalhos já produzidos sobre o problema a ser trabalhado e/ou no que vai contribuir para seu conhecimento".

No artigo de Silva *et al*. (2022), o tópico "1. Introdução" apresenta uma sequência de 22 citações de referências relacionadas ao tema abordado pelos autores. Ao final, nesse mesmo tópico, são apresentadas informações específicas sobre a pesquisa desenvolvida. O encadeamento lógico dessas informações segue convenções da redação técnico-científica.

Descreva e discuta como as citações corroboram as justificativas e os objetivos da pesquisa desenvolvida por Silva *et al*. (2022).

4. Uma pesquisa não consiste em um processo estanque, perfeito e definitivo, podendo estar sujeita a erros ou fragilidades. De forma geral, em um artigo científico são trazidos os estudos pelo(s) autor(es) que foram realizados a partir de uma estratégia que abrange os vários tipos de pesquisas classificadas. As dificuldades, usualmente relacionadas a limitações dos recursos materiais, humanos e de tempo, podem ser mitigadas por meio de um processo de melhoria contínua. Esta é uma forma tradicional de trabalho, cuja evolução ao longo do tempo é proposta por meio da aplicação de boas práticas a partir das experiências anteriores e pelas reflexões que se fazem sobre o próprio processo científico.

A partir de sua percepção crítica em relação ao artigo apresentado por Marim *et al*. (2022), identifique os pontos frágeis do trabalho e proponha uma nova estratégia de pesquisa para que estes sejam resolvidos ou mitigados em uma pesquisa futura.

Referências Bibliográficas

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (org.). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/52806. Acesso em: 01 fev. 2023.

MARIM, T. E. *et al*. Previsão de forças na estampagem incremental de chapa fina metálica por meio de experimentos e análises por elementos finitos. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p 24638-24651, 2022.

SILVA, G. V. F. da *et al*. Avaliação da influência das condições de usinagem sobre o estado de superfície obtido no fresamento de ligas de titânio. **Revista Matéria**, v.27, n. 2, 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. Biblioteca Comunitária. **Guia para Apresentação de Trabalho Acadêmico: de acordo com NBR 14724/2011.** São Carlos, 2018. Disponível em: https://www.bco.ufscar.br/arquivos/manual-bco-nbr-14724-2.pdf. Acesso em: 07 jul. 2021.

Previsão de forças na estampagem incremental de chapa fina metálica por meio de experimentos e análises por elementos finitos

Prediction of forces in incremental thin sheet metal stamping by experiments and finite element analysis

DOI:10.34117/bjdv8n4-128

Recebimento dos originais: 21/02/2022
Aceitação para publicação: 31/03/2022

Tony Emerson Marim
Mestrando em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Federal de São Carlos
Endereço: Rua Sebastião Conti, 80, Parque Fehr, São Carlos, SP, CEP:13563 – 757
E-mail: marim.tonyemerson@gmail.com

Jonatan Augusto da Silva
Mestrando em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Federal de São Carlos
Endereço: Rua Sebastião Conti, 80, Parque Fehr, São Carlos, SP, CEP:13563 – 757
E-mail: jonatan.silva@hotmail.com

Sérgio Henrique Evangelista
Doutor em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Federal de São Carlos
Endereço: Rodovia Washington Luís, km 235 – SP-310 – São Carlos, SP
CEP: 13565 – 905
E-mail: toddyprof@ufscar.br

Alessandro de Oliveira
Mestrando em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos
Instituição: Universidade Estadual Paulista
Endereço: Rua Tori Kitamura, 78, Jd. Tancredo de A. Neves, Araraquara, SP
CEP: 14808-215
E-mail: alessandro.oliveira@sp.senai.br

Fábio Eduardo de Oliveira Costa
Mestrando em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos
Instituição: Universidade Estadual Paulista
Endereço: Av. Eng. José dos Santos, 274, Jd. Tabapuã, Araraquara, SP
CEP: 14810-294
E-mail: fabio.oliveira@sp.senai.br

RESUMO

No presente trabalho é investigado o comportamento das chapas de alumínio de uso industrial QQ-A-250/5 'T3' (2024), com 0,40mm de espessura, quando exposto ao processo de Estampagem Incremental. Especificamente para a pesquisa, foi utilizada a modalidade de Estampagem Incremental de Ponta Única com uma ferramenta de ponta semiesférica. Foi elaborado um modelo em elementos finitos por meio do uso do software

ABAQUS (Dassault Systèmes) com dados materiais colhidos anteriormente em ensaio de tração, possibilitando aproximar na simulação os valores adquiridos nos experimentos reais. Experimentos e análises por elementos finitos foram executados sobre alguns casos que combinam raio da ponta de ferramenta e passo diferentes. Foi feito o cálculo das forças de processo por elementos finitos e estes valores foram comparados com um modelo matemático ajustado por outros autores sobre os parâmetros do processo para a liga de alumínio utilizada. Mostrou-se que com baixo tempo de processamento computacional com os presentes modelos foi possível obter uma previsão de forças cujos erros em relação ao modelo da literatura ficaram enquadrados em uma faixa restrita de previsão. Isto aponta para a viabilidade da técnica de previsão discutida às aplicações industriais com peças mais complexas.

Palavras-chave: estampagem incremental, alumínio, elementos finitos, conformação de chapas.

ABSTRACT
The present paper investigated the behavior of 0.40mm thick aluminum sheets for industrial use QQ-A-250/5 'T3' (2024) when exposed to the Incremental Sheet Forming (ISF) process. Specifically for the research, the Single Point Incremental Forming (SPIF) modality was used with a semi-spherical point tool. A finite element model was prepared to run on Abaqus software (Dassault Systèmes) for which experimental data from this alloy were used to get good adjustment in respect of experimental behavior. Experiments and finite element analyses were performed over specific designed cases comprising of different sets of tool tip radius and vertical feed. In the numerical analyses, the predicted vertical forces were picked up to be compared with calculated data from a mathematical model from other authors. The computational runs required low processing times and the calculated data produced a set of errors that fell in a restricted range of values. For the sake of industrial application of a set of complex parts to be formed, it is here emphasized the importance of the finite element model implementation as described in this work to get attainable results in reasonable processing times.

Keywords: incremental forming, aluminum, finite element, sheet forming.

1 INTRODUÇÃO

Para atender a necessidade de fabricação de componentes mecânicos que envolvem perfis complexos em pequenas quantidades busca-se constantemente por processos flexíveis que têm como objetivo minimização das perdas e aumento na rentabilidade. Uma solução que desperta o interesse e vem sendo investigada e desenvolvida durante os anos é a da estampagem incremental (ISF) pela qual em curtos períodos se realizam etapas desde a construção do modelo CAD até a obtenção do primeiro produto.

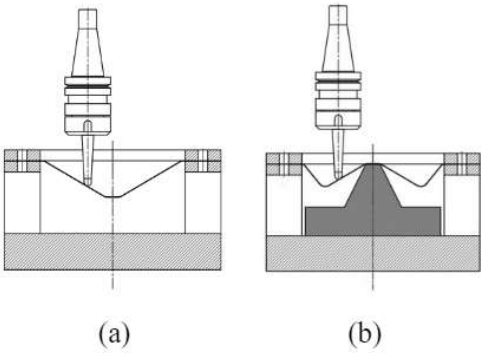
Na estampagem incremental, os custos envolvidos na fabricação de lotes de pequenas quantidades de peças ou protótipos podem ser reduzidos quando comparados

com estampagens convencionais, pois é possível conseguir peças complexas com o uso de ferramentas mais simples e de menor investimento. A implementação da estampagem incremental pode ser realizada por meio de máquinas específicas para a função, tais como máquinas com comando numérico computadorizado (CNC) ou com um braço robótico [7].

No processo, dentre as alternativas estão a estampagem incremental de ponta única e a estampagem incremental de duas pontas. Na estampagem incremental de ponta única, a ação da ferramenta se dá por incrementos progressivos sem apoio em sua parte de baixo, enquanto na estampagem incremental de duas pontas, é utilizada uma matriz posicionada abaixo da chapa metálica, servindo de apoio para adquirir estampagem de maior precisão dimensional ou perfis mais complexos. Tanto no primeiro quanto no segundo caso, as chapas são presas por meio de prensa chapas e sofrem ação de sucessivas deformações aplicadas por uma única ferramenta esférica em deslocamentos incrementais [8].

No processo, as deformações plásticas alteram as propriedades mecânicas do material, cujas diferenças podem ser constatadas antes e depois de sua ação em termos de rugosidade superficial, ductilidade, tensões residuais, geometria e estampabilidade. Na estampagem incremental isso não é diferente, no que é bastante comum a redução da espessura, o retorno elástico e a retenção de tensões residuais do material [5]. As variações que podem ocorrer podem afetar o desempenho dos componentes elaborados no processo de conformação incremental, principalmente com relação à redução da espessura em que os ângulos maiores entre a superfície conformada e sua configuração inicial é fator relevante para a redução acentuada da espessura [9]. Outros parâmetros podem ser relacionados nos estudos de processo de estampagem incremental como temperatura [2], diâmetro da ferramenta [1], lubrificação [3], incremento vertical, avanço e rotação [4, 12, 6] e espessura da chapa em relação ao ângulo de parede resultante da estampagem [6].

Figura 1: Estampagem incremental de ponta única (a) e estampagem incremental de ponta dupla (b).



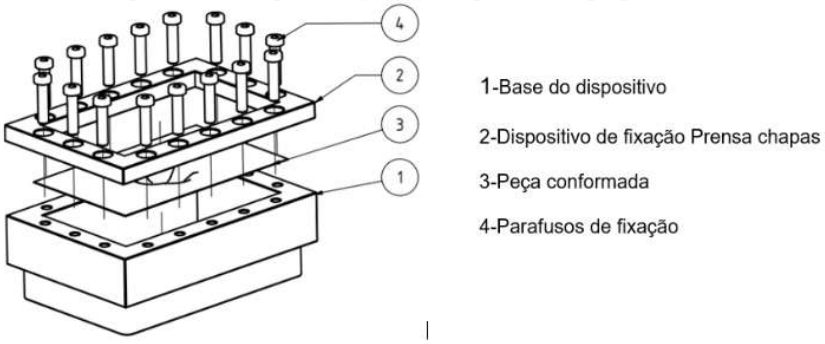
Fonte: próprio autor.

Este artigo apresenta uma avaliação da influência das ações das forças na estampagem incremental do tipo de ponta única, com ferramenta de ponta semiesférica rotativa simulada em um modelo elaborado em elementos finitos, a fim de prever as ocorrências na deformação obtida na estampagem de chapas finas do alumínio 2024.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para os experimentos de estampagem incremental de ponta única, foram construídos uma matriz vazada e um suporte tipo prensa chapas em aço carbono 1045, com fixações por meio de parafusos M6x1,25mm em 16 pontos da superfície.

Figura 2: Matriz para fixação das chapas. Fonte: próprio autor.



A estampagem foi feita em chapas de Alumínio QQ-A-250/5 'T3' (2024) com dimensões de 0,4 X 77 X 127 mm. Essa matéria prima é descrita como um material de resistência mecânica alta e boa usinabilidade e indicada para construção de peças do ramo aeronáutico, sendo objeto de estudo em diversas áreas do campo acadêmico das engenharias e que buscam um melhor aproveitamento de suas propriedades [11]. As

propriedades mecânicas das chapas de alumínio foram obtidas a partir de ensaio de tração realizado anteriormente.

Para cada experimento foi determinado o percurso e o incremento das ferramentas por programação em uma máquina CNC da marca Romi e modelo D800, com dados conforme a Tabela 2.

Tabela 1: Dados do material utilizados.

Propriedades do material	Alumínio 2024
Densidade	2,74 g/cm^3
Poisson	0,33
Módulo de Young	73 GPa
Tensão de escoamento	350 MPa
Tensão de ruptura	341 MPa
Tensão máxima	439 MPa
Alongamento (corpo de prova de 32mm)	19,8 %

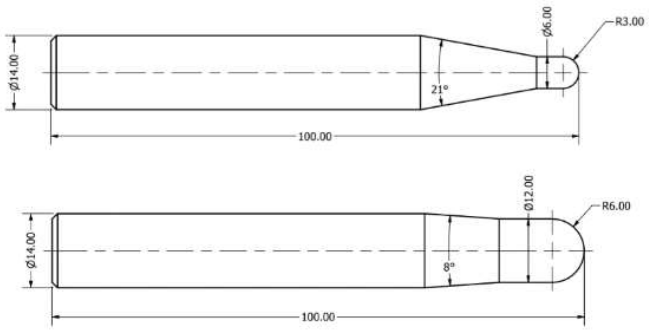
Tabela 2: Parâmetros da máquina CNC Romi D800.

Cursos dos eixos da máquina	Romi D800
Curso da mesa superior (eixo X)	800 mm
Curso de mesa inferior (eixo Y)	530 mm
Curso do cabeçote (eixo Z)	580 mm

Figura 3: Centro de Usinagem CNC Romi D800. Fonte: próprio autor.

Para a conformação das chapas foram construídas duas ferramentas com ponta semiesférica em aço ferramenta VC131 – AISI D6 – com corpo de diâmetro de 14 mm, raios de ponta de 6 mm e 12 mm com região procedente a ponta com ângulos de 21° e 8° respectivamente.

Figura 4: Ferramentas de pontas semiesféricas. Fonte: próprio autor.



Em todos os experimentos foi desenvolvida uma geometria cônica e em espiral, sendo mantidos a rotação da ferramenta em 1000 RPM e um avanço constante de F=200 mm/min. sobre a chapa nos eixos X, Y e Z. O incremento vertical inicial sobre o eixo Z iniciou-se em 0,5mm, percorrendo uma forma circular iniciada em um diâmetro de 60mm com profundidade de 15 mm, mantendo um ângulo de 45° de parede em relação a ferramenta. Na figura 5, é possível observar a representação da posição da ferramenta durante todo o percurso em relação ao ângulo da parede.

Figura 5: Trajetória da ferramenta para estampagem incremental. Fonte: próprio autor.

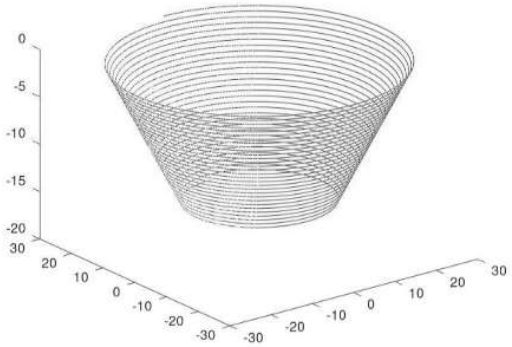
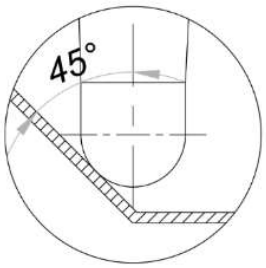


Figura 6: Inclinação de 45 graus da parede do material durante a estampagem. Fonte: próprio autor.



Os parâmetros e trajetória da ferramenta em relação ao material adotado foram determinados por uma programação e realizada no software GNU Octave, conforme a figura 4, ajustando-se o cabeçalho e a finalização do programa com dados inseridos manualmente.

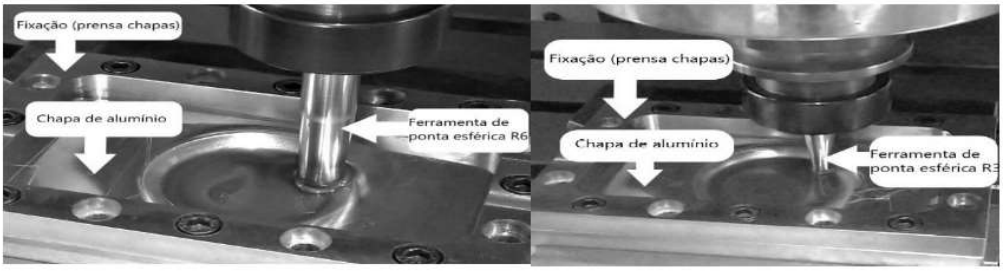
Durante os ensaios foi utilizado o óleo hidráulico mineral ISO 68, o qual apresenta propriedade lubrificante, antiespumante e possui boa estabilidade térmica para a aplicação.

Atentando-se para valores relevantes da temperatura durante a estampagem incremental [6], foi utilizada uma câmera termográfica da SKF modelo Therm TKTI10 para o acompanhamento de qualquer variação que pudesse ocorrer na chapa a ser conformada.

Figura 7: Análise de temperatura durante a estampagem incremental. Fonte: próprio autor.

Para levantar os dados dos resultados foram realizados oito experimentos, sendo quatro com a ferramenta de ponta semiesférica de raio de 6mm e quatro com a ferramenta de ponta semiesférica de raio de 3 mm.

Figura 8: Estampagem incremental: estampagem com uso de ferramenta com raio de 6 mm (a) e a estampagem incremental com uso de ferramenta de raio de 3 mm (b). Fonte: próprio autor.



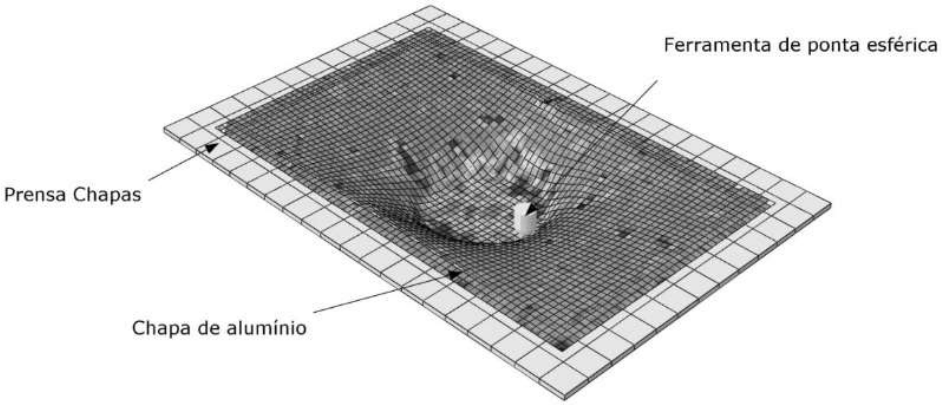
(a) (b)

Em ordem, foram realizados primeiramente as estampagens nas chapas de 0,4 mm de espessura e trajetória com incrementos de 0,5 mm em hélice, com rotação no cabeçote rotativo do centro de usinagem de 1000 RPM fixa e uma redução na trajetória a cada experimento até chegar em 0,2 mm de incremento.

O modelo para análises em elementos finitos foi construído com o auxílio do software da Dassault Systèmes ABAQUS, para analisar a influência do atrito, das tensões e forças aplicadas durante a estampagem incremental, fixando-se a malha e variando-se as condições de contorno.

A chapa de alumínio foi modelada em elemento de casca S4R, classificada como elemento em três dimensões de uso geral de 4 nós, discretizados com refinamento de malha com tamanhos mínimos de 0,1 mm e máximos de 2 mm, enquanto o prensa-chapas segue o refinamento de mesmo valor nos tamanhos mínimos e máximos de 7,5 mm. As ferramentas foram simplificadas em formas semiesféricas de 12 mm e 6 mm de diâmetro e assim como o prensa-chapas, as ferramentas foram determinadas como elementos rígidos.

Figura 9: Modelo de elementos finitos elaborado no ABAQUS. Fonte: próprio autor.



Para análise da malha foram levadas em consideração as forças obtidas no final da simulação e as análises feitas nos elementos escolhidos conforme a realização do trajeto da ferramenta com a superfície da chapa. Na predição dos valores da força no eixo Z Fz, Aerens et al. [1] desenvolveram a variável dependente Fs, que é a força em Z dada em Newton.

$$F_s = 0{,}0716 Rmt^{1.57} dt^{0.4} \Delta h^{0.09} \propto \cos\alpha \qquad (1)$$

em que, Rm é o valor de resistência a tração (N/mm^2), t é a espessura da chapa (mm), dt é o diâmetro da ferramenta (mm), α é o valor do ângulo da parede e Δh é altura do *scallop* relacionado ao incremento de profundidade Δh1.

$$\Delta h = 2\,sin\,\alpha\sqrt{\Delta h^1(dt - \Delta h^1)} \qquad (2)$$

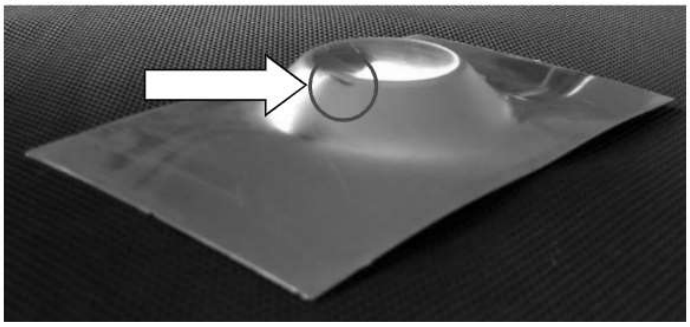
As análises do modelo simulado foram compatibilizadas com a trajetória realizada da ferramenta de ponta esférica com raio de 6 mm e uma trajetória com hélices de 0,5 mm sendo reduzida gradativamente, até ser realizada a trajetória com hélices de 0,2 mm de passo, tendo como parâmetro comparativo a deformação plástica empregado às forças horizontais e verticais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os experimentos realizados, os primeiros corpos de prova não demonstraram alterações de temperatura em sua superfície, permanecendo entre valores de 20 a 23 °C, o que permitiu dispensar o acompanhamento constante da variável.

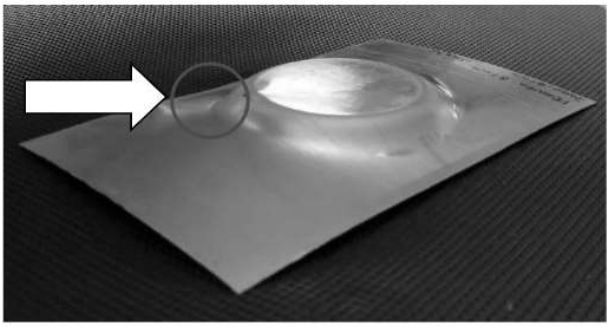
As figuras 10 e 11 apresentam o aspecto final das chapas extraídas em 2 casos que combinam raio da ferramenta e passos diferentes. Nota-se o detalhe de cada figura com a indicação da abertura da trinca, o que condicionou a interrupção do processo. Como informação levada às análises por Elementos Finitos, considerou-se a execução das mesmas com profundidade máxima de 15,0 mm.

Figura 10: Experimento realizado com ferramenta de raio 3 mm, passo 0,20 mm, profundidade de 15,0 mm.
Fonte: próprio autor



.

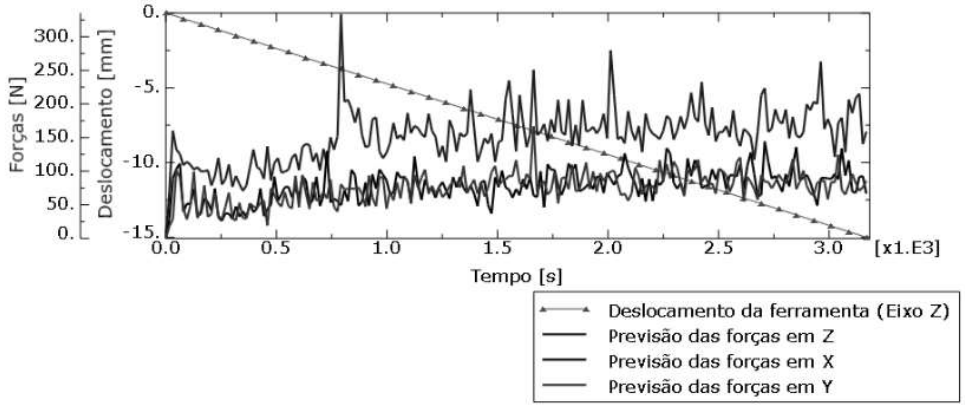
Figura 11: Experimento realizado com ferramenta de raio 6 mm, passo 0,50 mm, profundidade de 8,30 mm.
Fonte: próprio autor.



A Figura 12 ilustra em superposição as curvas de forças nas direções X, Y e Z, bem como os deslocamentos na direção Z, para o caso de Estampagem Incremental em que a ferramenta tinha raio de 3 mm, com passos de 0,20 mm. Esta configuração refere-se ao caso experimental demonstrado na figura 10. Não serão demonstradas as curvas para os outros casos. Elas foram obtidas numericamente para um deslocamento de 15 mm, mas os dados efetivos de forças contemplaram uma região de análise dos gráficos em que os deslocamentos eram menores ou iguais aos efetivos em seus respectivos experimentos.

De toda a maneira, a previsão de esforços nos vários casos demonstrou uma grande oscilação das cargas. É possível que isto seja uma penalização de caráter numérico devido ao fato de que simplificações foram adotadas na implementação do modelo de Elementos Finitos para que as análises durassem em torno de 20 minutos para serem executadas.

Figura 12: Previsão de forças por Elementos Finitos – Caso da ferramenta de raio 3 mm, passo 0,20 mm.



Fonte: próprio autor.

A tabela 3 traz um comparativo das forças aplicadas ao eixo Fz a partir da estimativa pela Equação (1) dos autores [1] e por elementos finitos. Observa-se que foi desconsiderada neste estudo a influência da rotação da ferramenta pois a presença dos valores de rotação empregados nas simulações em comparação com os cálculos realizados implicaram em uma redução média de apenas 5% da força final no eixo Z, conforme [13].

Tabela 3: Valores de forças em Z previstos para os casos citados. Fonte: próprio autor.

Raio da ferramenta	Passo (incremento)	Valores estimados conforme Eq. (1)	Valores obtidos por Elementos finitos	Erro % em relação ao estimado pela Eq. (1)
R 6mm	0,5	392,2 N	328 N	- 16,4 %
R 3mm	0,5	314,2 N	311 N	- 1,01 %
R 6mm	0,2	332,6 N	233 N	- 29,9 %
R 3mm	0,2	266,4 N	234 N	- 12,2 %

Da Tabela 3 observa-se que os valores obtidos por Elementos Finitos ficaram em geral menores que os valores obtidos de [1]. Verifica-se que o módulo de erros de previsão ficou abaixo de 30%.

São trazidas as seguintes considerações acerca destas comparações.

Dos valores obtidos por elementos finitos destacou-se na Tabela 3 o pico mais pronunciado em cada caso.

Por outro lado, das estimativas obtidas pela Eq. (1), consideram-se as investigações feitas pelos autores da equação [1]. Estes ponderaram pelo fato de que as equações apresentadas em seu trabalho para vários materiais referiram-se às curvas ajustadas a partir de uma quantidade grande de experimentos, com variações em suas condições. Disto, para a liga de Alumínio 2024 foi estimado que o erro de previsão da equação em relação aos seus experimentos ficou entre $+10\%$ e -24%. Estes autores trabalharam com ferramentas de raio maior ou igual a 10mm.

De maneira conservadora, pode-se estimar que os erros de predição de força neste trabalho poderiam ser estimados a partir de uma composição entre os valores da Tabela 3 e os valores obtidos por [1] para a liga de Alumínio utilizada. Assim, estima-se que o padrão de implementação por elementos finitos empregado neste trabalho deverão produzir erros compostos em relação a experimentos futuros que fique na faixa entre $+9\%$ e -45%.

Considerações adicionais podem ser feita acerca de melhorias ao modelo de Elementos Finitos empregado e que possam contribuir com uma previsão mais robusta dos esforços desejados. Destacam-se entre os fatores as condições de contorno impostas ao travamento à borda da chapa e a estimativa robusta para o coeficiente e modelo de atrito a serem impostos ao problema de Elementos Finitos.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados e discutidos alguns procedimentos simples relacionados à implementação por Elementos Finitos do problema da estampagem incremental de chapa fina de Alumínio 2024, segundo algumas condições de processo. Erros de predição da força em Z (direção da profundidade da estampagem) para o estudo foram estimados para ficarem entre $+9\%$ e -45% quando comparado com trabalho de outros autores [1]. A condição de implementação dos presentes modelos mediante esta faixa de erros de predição sugere a busca por melhorias discutidas. Dentre elas, destacam-se a melhoria, no âmbito do modelo de elementos finitos, sobre as condições de travamento da borda da chapa na matriz e também sobre a escolha do modelo de atrito e seu coeficiente. Vale enfatizar a importância em se manter o tempo de processamento computacional baixo (20 minutos) para que a disseminação em âmbito industrial da técnica seja atrativa, mesmo com erros de predição enquadrados na faixa acima citada.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR, ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PPGMEC, ao Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar – D.E.Ma pela concessão da licença para o uso do programa ABAQUS a este trabalho, a escola Senai "Henrique Lupo" e ao Capes pelo apoio fornecido.

REFERÊNCIAS

[1] AERENS, R.; EYCKENS, P.; BAEL, A. V.; DUFLOU, J. R. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and fem observations. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 46, n. 9, p. 969–982, Feb 2010.

[2] AL-GHAMDI K.A., HUSSAIN G. Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2015; 88:82–94.

[3] AL-OBAIDI A., KRÄUSEL V., LANDGREBE D. Hot single-point incremental forming assisted by induction heating. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2016; 82:1163–71.

[4] AZEVEDO N.G., FARIAS J.S., BASTOS R.P., TEIXEIRA P., DAVIM J.P., SOUSA R.J.A. Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 2015; 16:589–95.

[5] BHATTACHARYA A., MANEESH K., REDDY N.V., CAO J. Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2011;133.

[6] BRUSCHI, S.; ALTAN, T.; BANABIC, D.; BARIANI, P.F.; BROSIUS, A.; CAO, J.; GHIOTTI, A.; KHRAISHEH, M.; MERKLEIN, M.; TEKKAYA A.E. Testing and modelling of material behavior and formability in sheet metal forming. CIRP Annals – Manufacturing Technology. p 727 – 749. 2014.

[7] DUFLOU J.R., VERBERT J., BELKASSEM B., GU J., SOL H., HENRARD C., et al. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. CIRP Annals - Manufacturing Technology 2008; 57:253–6.

[8] JESWIET, J., MICARI, F., HIRT, G. et al. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. CIRP Annals - Manufacturing Technology 54(2), 88–114, 2005.

[9] KOPAC J., KAMPUS Z. Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool. Journal of Materials Processing Technology 2005;162–163:622–8.

[10] LI, J.; LI, C.; ZHOU, T. Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation. Transactions Of Nonferrous Metals Society of China, [s.l.], v. 22, p.54-60, out. 2012.

[11] MARTINS, P. A. F.; BAY, N.; SKJOEDT, M.; SILVA, M. B. Theory of single point incremental forming, CIRP Annals – Manufacturing Technology, v. 57, p. 247-252. 2008.

[12] SILVA, R. C; REIS, C. G. dos; SCHAEFFER, L. Análise do processo de estampagem incremental aplicado emu ma geometria tubular. 38th SENAFOR. 2019.

[13] SILVA, P. J. da. Estampagem incremental de ponto simples: uma análise de conformabilidade baseada em medição de força, desgaste de ferramenta e aquecimento. Tese de doutorado. Universidade de Brasília - DF, 2017.

[14] XU D., WU W., MALHOTRA R., CHEN J., LU B., CAO J. Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2013; 73:37–46

REVISTA MATÉRIA V.27 N.02
ISSN 1517-7076 artigo e13193, 2022

Avaliação da influência das condições de usinagem sobre o estado de superfície obtido no fresamento de ligas de titânio

Evaluation of the influence of machining variables on the surface condition after titanium alloys milling

Gustavo Vinicius Ferreira da Silva[1], Felipe Dias Monteiro[1], Carlos Eiji Hirata Ventura[1], Armando Ítalo Sette Antonialli[1]

[1]Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís, km 235, CEP: 13565-905, São Carlos, São Paulo, Brasil
e-mail: gustavo_viniciusfs@hotmail.com; felipe.dias.monteiro123@gmail.com; ventura@ufscar.br; antonialli@ufscar.br

RESUMO

Palavras-chave: Manufatura. Biomateriais. Implantes. Integridade superficial. Rugosidade.

ABSTRACT

The fulfillment of physiological performance criteria that lead to the proper structural and functional connection between bone and implant, called osseointegration, is closely related to the surface characteristics of the biomaterial, which depend on the processes involved in its manufacture. Thus, the present work aims to expand the understanding about the influence of machining conditions on the surface integrity of commercially pure titanium grade 4 and Ti-6Al-4V ELI components submitted to the milling operation. Therefore, from a complete factorial design 2^3, the type of tool, the machined titanium alloy and the cutting speed were selected as influencing factors. Three different roughness parameters were used as response variables on the surface state, namely: mean roughness (Ra), asymmetry (Rsk) and flatness (Rku) of the profile. The analysis of variance (ANOVA) indicated that the tool corresponds to the main influencing factor of this study, being significant over all response variables. The machined titanium alloy was also shown to have an influence on the results of mean roughness, while the cutting speed exhibited a significant influence both on the average roughness and on the asymmetry parameter. Precisely in relation to skewness, it is noteworthy that the different tools used produced consistently opposite results, that is: while one tool model resulted in a surface with wide peaks and deep valleys, the other model resulted in shallow and wide valleys. Thus, it is considered quite likely that the use of geometry tools and different materials will affect the biomaterial's response in terms of cell viability.

Keywords: Manufacturing. Biomaterial. Implants. Surface integrity. Roughness.

Autor Responsável: Gustavo V. Ferreira da Silva Data de envio: 25/11/2020 Data de aceite: 01/02/2022

10.1590/S1517-707620220002.1393

1. INTRODUÇÃO

A crescente capacidade de se lidar com condições médicas antigamente intratáveis, atrelada ao envelhecimento da população e à melhoria de sua qualidade de vida nos países em desenvolvimento, tende a promover o crescimento das aplicações médicas e seus insumos, dos quais se destacam os biomateriais [1]. A norma ISO 10993-1 [2], que define critérios para proteção dos seres humanos contra potenciais riscos biológicos decorrentes do uso de dispositivos médicos, estabelece duas características fundamentais associadas aos biomateriais: biofuncionalidade e biocompatibilidade. A biofuncionalidade é o conjunto de propriedades que permite ao material desempenhar uma função desejada, estando diretamente interligada a suas propriedades físicas; já a biocompatibilidade se refere à compatibilidade entre o material e o meio biológico no qual o mesmo será inserido, sendo as propriedades toxicológicas essenciais para que não ocorram reações adversas [3]. Próteses utilizadas na restauração de articulações, como as coxofemorais, por exemplo, exigem, além de resistência mecânica, baixa densidade, excelente resistência à corrosão, módulo de elasticidade relativamente baixo e biocompatibilidade, caracterizando seu desenvolvimento como extremamente complexo [4].

Dentre os materiais que atendem às especificações mencionadas, destacam-se os materiais à base de titânio [5]. As ligas de titânio apresentam elevadas temperaturas de fusão e dureza, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão, ótima razão resistência-peso e biocompatibilidade. O titânio tem um módulo de elasticidade mais próximo ao do osso, não causa interferência de sinal na ressonância magnética e é considerado mais biocompatível do que o aço inoxidável [6]. De acordo com Ezugwu e Wang [7, 8], comumente, classificam-se as ligas de titânio de acordo com as fases presentes em sua microestrutura. Ligas alfa apresentam apenas a fase hexagonal compacta (HC), como verificado no titânio comercialmente puro em temperatura ambiente e reforçado pela presença de elementos de liga alfagênicos; ligas beta apresentam a fase cúbica de corpo centrado (CCC), estável no titânio puro apenas em temperaturas elevadas, mas viabilizada com a presença de elementos betagênicos; ligas alfa-beta, por fim, apresentam ambas as fases, HC e CCC, graças à presença de elementos de liga alfagênicos e betagênicos. Titânio comercialmente puro (CP, liga alfa) e Ti-6Al-4V ELI (do inglês, *Extra Low Interstitial*, liga alfa-beta), normatizados, respectivamente, por ASTM F67 [9] e ASTM F136 [10], são os dois biomateriais à base de titânio mais comuns em implantes ortopédicos [1].

As características das ligas de titânio as fazem materiais ideais para aplicações nas indústrias aeroespacial, automotiva, petroquímica e biomédica [11, 12]. A maioria dos sistemas de placas ósseas e próteses para restauração de articulações é composta de ligas de titânio ou aço inoxidável. Para obtenção de tais aplicações, utiliza-se amplamente o processo de fresamento [13]. O fresamento consiste em uma operação de usinagem destinada à obtenção de superfícies planas, contornos, rasgos, cavidades, ranhuras, roscas, entre outras [14], caracterizada pelo movimento de corte proporcionado pela rotação da ferramenta ao redor do seu eixo. O movimento de avanço é geralmente feito pela própria peça em usinagem, a qual se encontra fixa na mesa da máquina, fazendo com que a mesma passe sob a ferramenta em rotação, dando-lhe as formas e dimensões desejadas [15]. Em razão de sua grande versatilidade e capacidade de proporcionar à peça praticamente qualquer forma geométrica, dentro dos processos de usinagem, o fresamento é um dos que apresentam também maior complexidade, em razão da grande quantidade de variáveis envolvidas no processo, como máquinas, ferramentas, estratégias e parâmetros [16].

Tendo em vista que na fabricação de determinados biomateriais o fresamento é empregado como processo de acabamento, vem à tona a questão da integridade superficial, que descreve a qualidade de uma superfície e engloba um grande número de alterações, como deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, tensões residuais e, às vezes, reações químicas [15]. A rugosidade sofre influência de diversos parâmetros de usinagem, que incluem a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, a rigidez da máquina-ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta. Dentre as condições de usinagem, Machado *et al.* [15] afirmam que o avanço é o parâmetro mais influente, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática. Quanto à velocidade de corte, Mersni *et al.* [17] verificaram que no fresamento da liga Ti-6Al-4V, baixos valores conduziram a baixos valores de rugosidade, sendo a velocidade de corte o segundo parâmetro de corte mais influente sobre a rugosidade média quando comparado com penetração de trabalho e avanço por dente, enquanto Krishnaraj *et al.* [18] avaliando os mesmos parâmetros de corte na usinagem da mesma liga verificaram que a velocidade de corte consiste no parâmetro de maior influência sobre a rugosidade média e independentemente da diferenciação nos valores atribuídos aos parâmetros de corte e aos diferentes tipos de fresas empregadas (*end mill* e *ball nose*) chegou-se à mesma conclusão de que baixos valores de velocidade de corte produzem baixos valores de rugosidade. Machado *et al.* [15] afirmam que baixos valores de velocidade de corte levam à formação de aresta postiça de corte (APC) e o resultado é um acabamento inferior, porém, deve-se atentar ao fato de que o aumento da velocidade de corte é obtido por meio da elevação da

rotação do eixo-árvore, que pode atingir valores nos quais as vibrações podem prejudicar o acabamento. Finalmente, com relação à profundidade de usinagem, seu aumento incrementa as forças e, portanto, a possibilidade de flexões, além do que as amplitudes das ondulações também são aumentadas com este parâmetro.

Rezende *et al.* [19] lembram que a superfície de um biomaterial responde diretamente pela qualidade e quantidade de tecidos reparacionais formados, já que constitui plataforma para a migração e crescimento celular. Assim, a resposta dos biomateriais quando inseridos em um organismo vivo não depende apenas da sua composição, mas, sobretudo de parâmetros associados à integridade superficial, como rugosidade, molhabilidade e mobilidade superficial, carga elétrica, cristalinidade e heterogeneidade a reações biológicas. Entretanto, ainda pairam dúvidas no que diz respeito às propriedades ideais das superfícies de implantes para se obter a biofixação adequada, fazendo com que as variáveis de controle devam ser independentemente analisadas [20]. Sun e Guo [21] destacam que, apesar de fundamental, a integridade superficial induzida pelo fresamento, que inclui rugosidade superficial, tensão residual, alterações da microestrutura da superfície e microdureza, tem recebido pouca atenção.

Observa-se na literatura muitos estudos envolvendo a relação entre a rugosidade superficial de ligas de titânio e a viabilidade celular, porém os resultados desses estudos não apresentam concordância [22]. Assim sendo o presente estudo pretende mitigar as discordâncias através da avaliação da influência direta de parâmetros particulares da manufatura de componentes biomecânicos sobre o aperfeiçoamento da rugosidade superficial final, que, conhecidamente, constitui um parâmetro fundamental no que diz respeito à osseointegração do biomaterial, a qual o presente estudo pretende preencher.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

De maneira a se compreender a influência do processo de usinagem na formação da topografia de ligas de titânio utilizadas na indústria biomédica, adotaram-se três variáveis de entrada: ferramenta, material do corpo de prova e velocidade de corte. Tomando as três variáveis com dois níveis representantes, compôs-se um planejamento fatorial 2^3, o que totalizou 16 testes, sendo 8 referentes ao teste principal e os demais à réplica.

As ferramentas de corte utilizadas foram duas diferentes fresas inteiriças de metal duro da fabricante OSG Sulamericana, com quatro cortes e diâmetro de 3 mm, ambas recomendadas para a usinagem de ligas de titânio. A primeira delas, denominada fresa convencional, apresenta ângulo de hélice fixo de 30° e classe WXL, correspondente a um metal duro micrograão com revestimento que confere elevada temperatura de oxidação e dureza superior a 3.000 HV. A outra, aqui chamada fresa de alto desempenho, apresenta ângulo de saída positivo, ângulo de hélice variável entre 30º e 40º, sendo assim denominada "antivibração", e revestimento Duarise, que evita o surgimento de trincas térmicas.

Como materiais a serem fresados selecionou-se o titânio comercialmente puro (CP) grau 4 e a liga Ti-6Al-4V ELI, cujas propriedades mecânicas e composições químicas são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. A escolha do titânio comercialmente puro grau 4 se deu por consistir no titânio comercialmente puro com maior resistência mecânica, fator que tende a desfavorecer a usinabilidade do material [23], em razão do teor de elementos de liga residuais ligeiramente maior do que observado nos demais graus. A liga Ti-6Al-4V ELI, por sua vez, exibe maior resistência mecânica e consiste na liga de titânio mais comumente utilizada como biomaterial. Os corpos de prova consistem de blocos dos respectivos materiais, com dimensões 25 mm × 10 mm × 8 mm.

Tabela 1: Propriedades mecânicas: Titânio comercialmente puro (CP) e Ti-6Al-4V ELI.

MATERIAL	DUREZA [HV]	LIMITE DE ESCOAMENTO [MPa]	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO [MPa]	ALONGAMENTO [%]	REDUÇÃO DE ÁREA [%]
Ti-CP grau 4	260	483	550	15	25
Ti-6Al-4V ELI	300-400	795	860	10	25

Fontes: ASTM F67 [9], ASTM F136 [10] e Leyens e Peters [24].

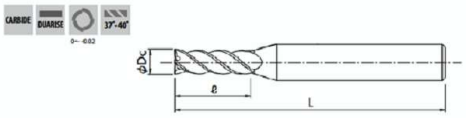
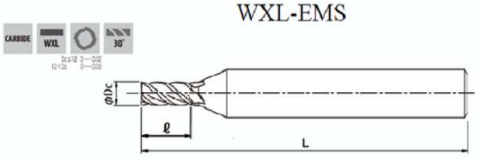
Tabela 2: Composição química: Titânio comercialmente puro (CP) e Ti-6Al-4V ELI.

	COMPOSIÇÃO (% EM MASSA)							
MATERIAL	**NITROGÊNIO, MÁX**	**CARBONO, MÁX**	**HIDROGÊNIO, MÁX**	**FERRO, MÁX**	**OXIGÊNIO, MÁX**	**ALUMÍNIO**	**VANÁDIO**	**TITÂNIO**
Ti-CP. grau 4	0,05	0,08	0,015	0,5	0,4	--	--	balanço
Ti-6Al-4V ELI	0,05	0,08	0,012	0,25	0,13	5,5 - 6,5	3,5 - 4,5	balanço

Fontes: ASTM F67 [9] e ASTM F136 [10].

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de corte necessários para a condução dos ensaios conforme as recomendações do fabricante: velocidade de corte (v_c), em m/min, que por sua vez, constitui a terceira variável de interesse do projeto, profundidade de usinagem (a_p), em mm, penetração de trabalho (a_e), em mm e avanço por dente (f_z), em mm.

Tabela 3: Ferramentas e parâmetros de corte OSG [25, 26].

FERRAMENTA	v_c [m/min]	Dc [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm]
AE-VMS 	50 ou 90	3	0,3	0,3	0,018
WXL-EMS 	50 ou 90	3	0,3	0,3	0,018

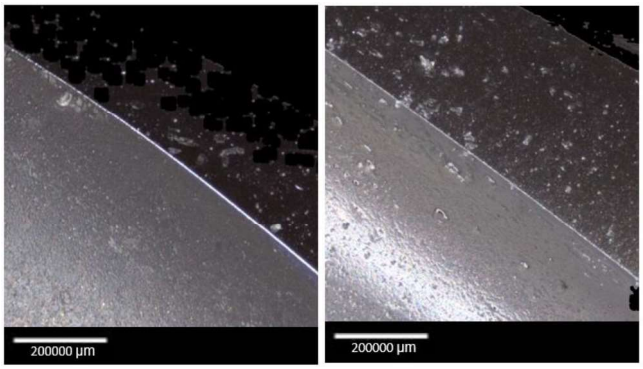
Utilizou-se o microscópio confocal Alicona InfiniteFocus SL para a caracterização do raio de aresta das duas fresas, de forma a analisar, de antemão, o risco de que essa grandeza pudesse configurar uma fonte de variabilidade sobre os resultados do trabalho. As dimensões obtidas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Dimensões dos raios das arestas principais de corte.

ARESTA	FRESA CONVENCIONAL [µm]	FRESA DE ALTO DESEMPENHO [µm]
1	r_n = 6,917	r_n = 7,042
2	r_n = 7,441	r_n = 6,983
3	r_n = 6,921	r_n = 9,072
4	r_n = 7,707	r_n = 6,870
Média ± desvio padrão	r_n = 7,247 ± 0,3934	r_n = 7,492 ± 1,056

Aplicou-se aos valores obtidos o teste de médias t de Student, concluindo-se que, estatisticamente, os raios de aresta das ferramentas são iguais e, portanto, as diferenças entre as fresas se limitam ao ângulo de hélice e ao revestimento. A Figura 1 contém imagens representativas das arestas principais de corte da fresa convencio-

nal (Figura 1(a)) e da fresa de alto desempenho (Figura 1(b)).



(a) (b)

Figura 1: Aresta principal de corte da (a) fresa convencional e da (b) fresa de alto desempenho (Fonte: próprio autor).

Tomando as três variáveis com dois níveis representantes, compôs-se um planejamento fatorial 2^3, conforme explícito na Tabela 5, o que totalizou 16 testes, sendo 8 referentes ao teste principal e os demais à réplica.

Tabela 5: Planejamento fatorial 2^3.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Ferramenta de corte	Fresa convencional Fresa de alto desempenho
Material do corpo de prova	Ti-6Al-4V ELI Titânio comercialmente puro grau 4
Velocidade de corte	v_c = 50 m/min v_c = 90 m/min

Realizou-se a simulação do processo usinagem dos corpos de prova para se obter o código para comando numérico (CN) por meio do módulo CAM (do inglês, *Computer-Aided Manufacturing*) do pacote Siemens NX™ 12, disponível no Núcleo de Laboratórios de Ensino de Engenharia (NuLEEn/UFSCar) considerando futuras usinagens de geometrias complexas de biomateriais a partir dos mesmos corpos de prova. Adotou-se o corte concordante, em que a direção da rotação da fresa e a direção de avanço são coincidentes, de forma que a espessura do cavaco diminui a partir do início do corte, chegando a zero ao final do corte e evitando desgastes prematuros da ferramenta.

Os ensaios e réplicas do processo de fresamento com estratégia concordante e ferramentas novas (a fim de se evitar o efeito do desgaste) foram realizados em um centro de usinagem vertical com quatro eixos ROMI® D600, com comando numérico Siemens Sinumerik 828D, potência máxima de 15 kW, rotação máxima de 10.000 rpm e velocidade de avanço máxima de 30 m/min. Em razão das elevadas temperaturas obtidas na usinagem de ligas de titânio, utilizou-se em abundância o fluido sintético refrigerante anticorrosivo MV AQUA® 180, com base aquosa translúcida, não tóxico, biodegradável e composto de matérias primas orgânicas que evitam resíduos sólidos em superfícies tratadas.

Após a usinagem dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos a uma caracterização de sua topografia no referido microscópio confocal, de modo a se obterem os parâmetros Ra (rugosidade média aritmética), Rsk (fator de assimetria do perfil) e Rku (fator de achatamento do perfil), empregando-se para isso um *cut off* de 0,25 mm, conforme especificação da norma NBR ISO 4288 [27] para superfícies com rugosidade média entre 0,02 µm e 1 µm.

A NBR ISO 4287 [28] que preza pelas especificações geométricas do produto do ponto de vista da rugosidade, com termos, definições e parâmetros de rugosidade associados ao método do perfil, define que o desvio aritmético médio do perfil avaliado consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas Z(x) no comprimento de amostragem, como o ilustrado na Figura 2.

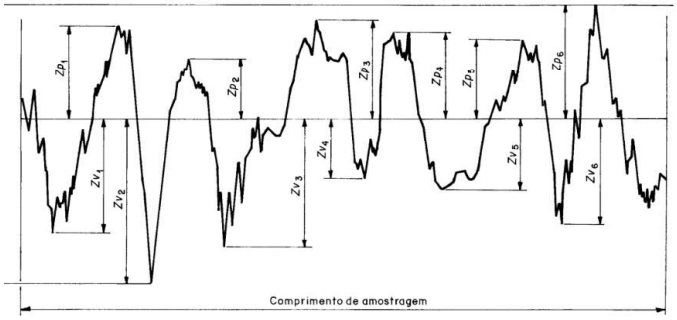


Figura 2: Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade) [28].

O fator de assimetria do perfil avaliado, *skewness*, é definido como o quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas Z(x) e o desvio médio quadrático ao cubo, no comprimento de amostragem. Fatores de assimetria com valores próximos de zero indicam uma distribuição simétrica, valores positivos, uma curva de distribuição assimétrica à direita, com predominância de picos e vales rasos e largos. Finalmente, valores negativos representam uma curva de distribuição assimétrica à esquerda, com perfil do tipo platô, com picos alargados e vales profundos. A Figura 3 ilustra o conceito associado ao *skewness*.

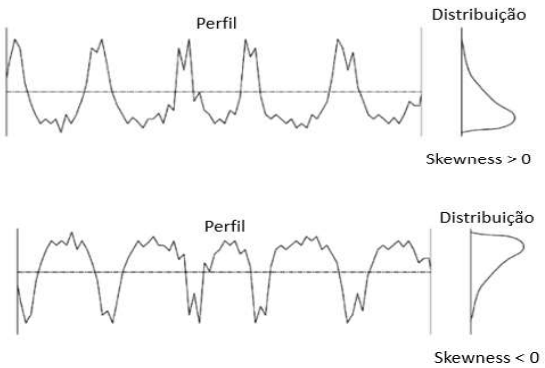


Figura 3: Correlação entre o perfil de rugosidades e a distribuição de valores de s*kewness* (Fonte: próprio autor).

O fator de achatamento do perfil avaliado, *kurtosis*, consiste no quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor do desvio médio quadrático à quarta potência no comprimento de amostragem. O fator de achatamento do perfil fornece um indicativo da forma da curva de distribuição de rugosidade. Fatores iguais ou maiores do que 3 representam uma curva com distribuição aproximadamente gaussiana, cujo perfil de rugosidade apresenta picos e vales afilados. Já para valores menores do que 3, a curva de distribuição tende a se alargar e o perfil de rugosidade passa a apresentar picos e vales mais largos. A Figura 4 ilustra o conceito associado ao *kurtosis*.

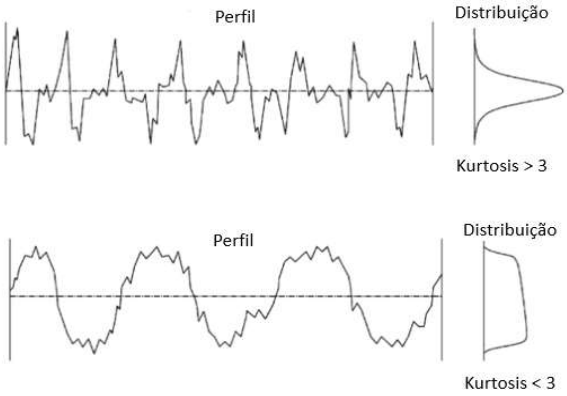


Figura 4: Correlação entre o perfil de rugosidades e a distribuição de valores de *kurtosis* (Fonte: próprio autor).

A fim de se identificar as variáveis de entrada e as respectivas interações cujas influências sobre os parâmetros de resposta obtidos apresentem significância que justifique sua análise em particular, utilizou-se a análise de variância (ANOVA) com um intervalo de confiança de 95%.

3. RESULTADOS

Considerando que as variáveis de resposta apresentadas neste trabalho são a rugosidade média, a rugosidade *skewness* e a rugosidade *kurtosis*, a apresentação dos resultados é dividida em subseções conforme segue.

3.1 Rugosidade média (Ra)

O comportamento da rugosidade média para as duas ferramentas estudadas em função dos materiais dos corpos de prova e das velocidades de corte pré-estabelecidas é apresentado na Figura 5. Observa-se que, para a ferramenta convencional, independentemente do material e da velocidade de corte, obtém-se rugosidade média inferior a 0,3 μm, que, de acordo com a norma ISO 1302, se enquadra na classe de rugosidade N5 (para rugosidades médias inferiores a 0,4 μm). Para a ferramenta de alto desempenho, foram obtidas superfícies na classe de rugosidade N5 apenas na usinagem do titânio comercialmente puro. De maneira geral, a rugosidade média explicitou um desempenho vantajoso da fresa convencional para usinagem de ligas de titânio frente à fresa de alto desempenho, dado que rugosidades médias ligeiramente inferiores no fresamento do titânio comercialmente puro e significativamente inferiores no fresamento da liga Ti-6Al-4V ELI foram obtidas. Adicionalmente, para a ferramenta de alto desempenho, observou-se que a rugosidade média é significativamente menor (-72%) para o titânio comercialmente puro frente à liga Ti-6Al-4V ELI e para a combinação ferramenta de alto desempenho e material Ti-6Al-4V ELI, observou-se aumento de 49% da rugosidade média com o aumento da velocidade de corte, associado muito provavelmente a vibrações decorrentes da elevada rotação do eixo-árvore da máquina-ferramenta. Caberia ainda a hipótese de maior deformação plástica da superfície em decorrência do aumento da velocidade de corte e, consequentemente, elevação da temperatura [15]; porém, esperar-se-ia que o mesmo aumento observado no Ti-6Al-4V ELI ocorresse com o titânio comercialmente puro, material mais dúctil, fato que não se verificou.

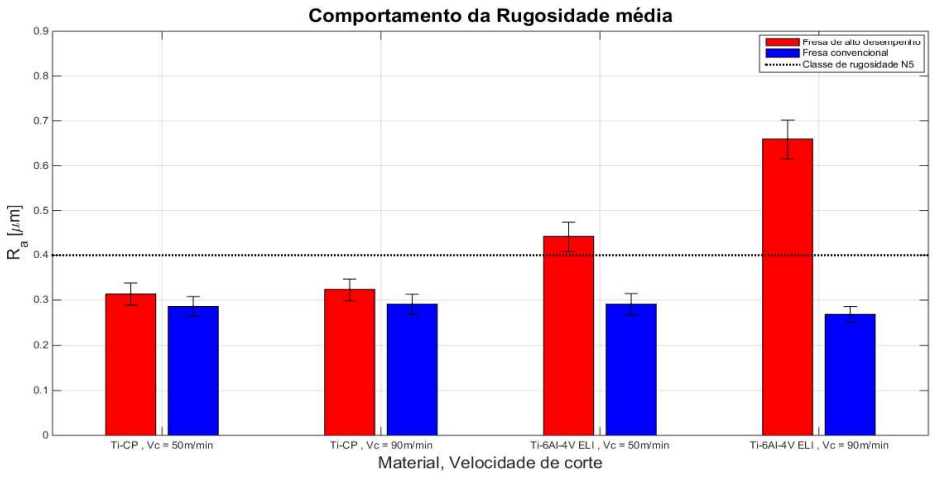


Figura 5: Gráfico do comportamento da rugosidade média em função do tipo de fresa, do material e da velocidade de corte (Fonte: próprio autor).

A Tabela 6 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a rugosidade média ao nível de confiança pré-estabelecido, de forma a aferir a influência das variáveis do trabalho (material, ferramenta e velocidade de corte) e suas interações sobre o referido parâmetro de rugosidade. O valor do teste estatístico F_0 explicitou que a um nível de significância de 5% (ou seja, intervalo de confiança de 95%), todas as variáveis são influentes, assim como suas interações, sendo, porém, a variável ferramenta a mais influente dentre as analisadas, conforme explicitado no gráfico de Pareto da Figura 6.

Tabela 6: ANOVA aplicada sobre os resultados de rugosidade média obtidos.

	RUGOSIDADE MÉDIA Ra				
VARIÁVEIS	**SOMA DOS QUADRADOS**	**GRAUS DE LIBERDADE**	**MÉDIA QUADRÁTICA**	**F_0**	**P-VALOR**
Material (A)	0,049506	1	0,049506	66,641427	0,000038
Ferramenta (B)	0,089401	1	0,089401	120,344607	0,000004
Velocidade de corte (C)	0,011025	1	0,011025	14,840989	0,004861
AB	0,057600	1	0,057600	77,536598	0,000022
AC	0,008100	1	0,008100	10,903584	0,010826
BC	0,014762	1	0,014762	19,871782	0,002117
ABC	0,013806	1	0,013806	18,584890	0,002577
Erro	0,005943	8	0,000743		
Total	0,250144	15	0,016676		

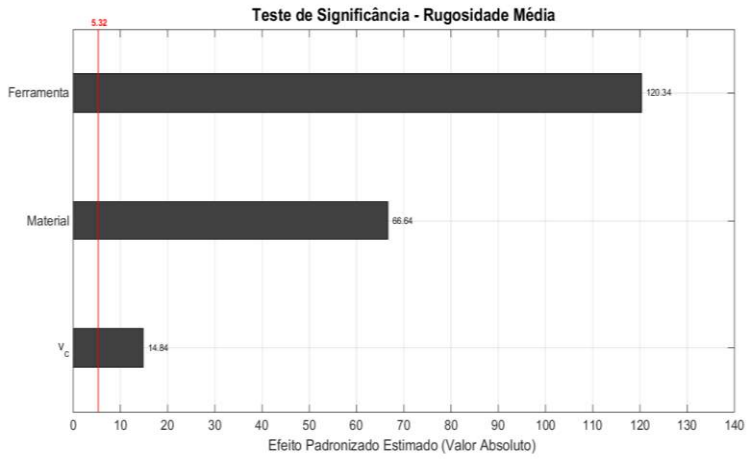
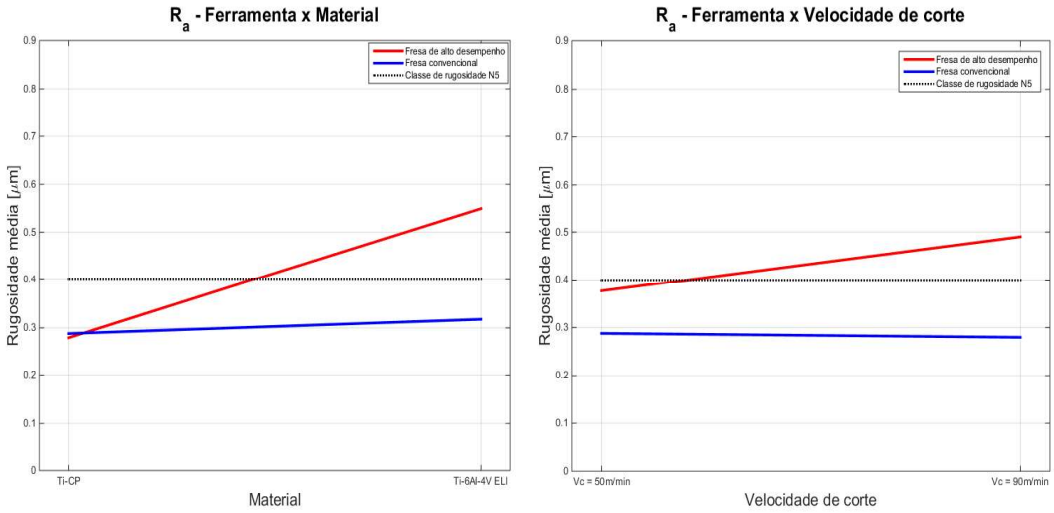
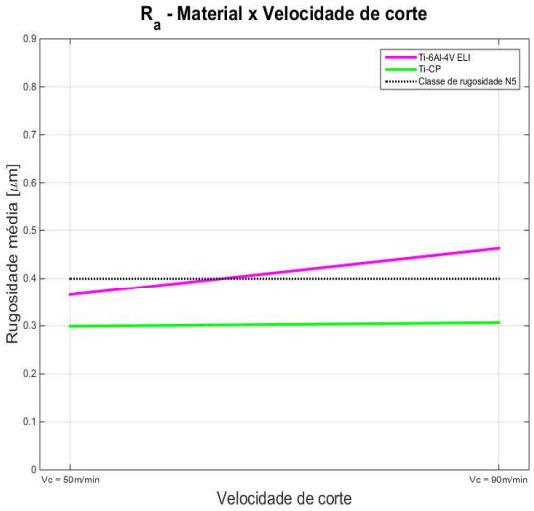


Figura 6: Gráfico de Pareto para o Teste de Significância: rugosidade média (Fonte: próprio autor).

O comportamento da rugosidade média dos perfis analisados em função das interações das variáveis do projeto, dado que a ANOVA explicitou a influência significativa também das interações, é apresentado nos diagramas de efeitos principais da Figura 7. Com eles, corrobora-se o exposto na análise da Figura 5, que demonstra resultado vantajoso da fresa convencional na usinagem das ligas de titânio quando se vislumbra otimizar a rugosidade média do perfil usinado.



(a) (b)



(c)

Figura 7: Diagrama de efeitos principais para a rugosidade média: (a) ferramenta versus material, (b) ferramenta versus velocidade de corte e (c) material versus velocidade de corte (Fonte: próprio autor).

3.2 Fator de assimetria do perfil (Rsk)

O comportamento da assimetria do perfil para as duas ferramentas estudadas em função dos materiais e das velocidades de corte pré-estabelecidas é apresentado na Figura 8. É possível identificar comportamentos opostos para as duas fresas analisadas, tomando-se as mesmas combinações de variáveis, o que implica em respostas distintas em termos de característica superficial. Para a ferramenta convencional, independentemente do material e velocidade de corte empregada, obteve-se Rsk positivo, o que representa uma superfície majoritariamente composta por vales mais largos, em especial, no fresamento do titânio comercialmente puro. Para a ferramenta de alto desempenho, independentemente do material e da velocidade de corte, obteve-se Rsk negativo, ou seja, superfícies predominantemente compostas por picos mais largos. Nota-se ainda que, para a fresa de alto desempenho, a velocidade de corte corresponde a um parâmetro significativo, de modo que quanto maior seu valor, mais negativo se torna Rsk. Vale destacar que a combinação entre fresa de alto desempenho, titânio comercialmente puro e velocidade de corte de 50 m/min produziu Rsk muito próximo de zero e, portanto, distribuição bastante simétrica de picos e vales.

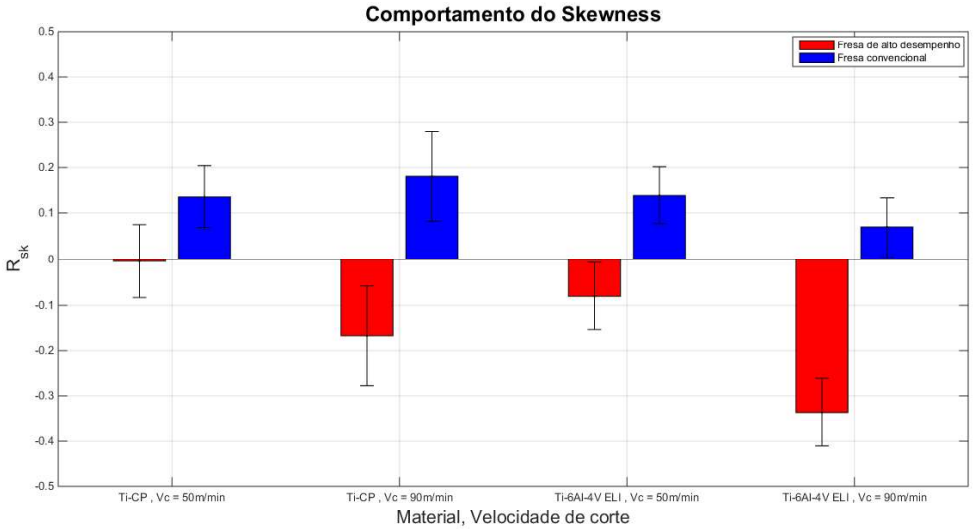


Figura 8: Gráfico do comportamento do fator de assimetria do perfil em função do material e velocidade de corte (Fonte: próprio autor).

A Tabela 7 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a assimetria do perfil Rsk ao nível de confiança pré-estabelecido, de forma a aferir a influência das variáveis de entrada e suas interações sobre o referido parâmetro. O valor F_0 indica que a variável ferramenta é a mais influente, seguida pela variável velocidade de corte, conforme ilustrado no gráfico de Pareto da Figura 9.

Tabela 7: ANOVA aplicada sobre os resultados de assimetria do perfil obtidos.

	ASSIMETRIA DO PERFIL Rsk				
VARIÁVEIS	**SOMA DOS QUADRADOS**	**GRAUS DE LIBERDADE**	**MÉDIA QUADRÁTICA**	**F_0**	**P-VALOR**
Material (A)	0,031064	1	0,031064	3,787867	0,087498
Ferramenta (B)	0,311085	1	0,311085	37,932866	0,000271
Velocidade de corte (C)	0,049395	1	0,049395	6,023099	0,039676
AB	0,004658	1	0,004658	0,567991	0,472654
AC	0,010558	1	0,010558	1,287360	0,289385
BC	0,038908	1	0,038908	4,744282	0,061039
ABC	0,000127	1	0,000127	0,015433	0,904199
Erro	0,065607	8	0,008201		
Total	0,511401	15	0,034093		

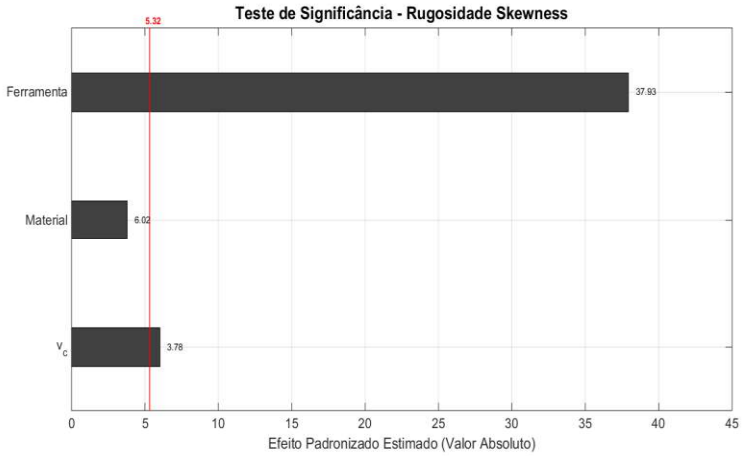


Figura 9: Gráfico de Pareto para o Teste de Significância: fator de assimetria do perfil (Fonte: próprio autor).

3.2 Fator de achatamento do perfil (Rku)

O comportamento do parâmetro de achatamento do perfil Rku para as duas ferramentas estudadas em função dos materiais e das velocidades de corte é apresentado na Figura 10. Afere-se que em todas as condições testadas, foram obtidos valores de Rku maiores que 3, caracterizando superfícies com picos e vales afilados com repetibilidade alta dentro do perfil analisado. Caso fossem obtidos valores de Rku menores que 3, as superfícies caracterizar-se-iam por picos e vales mais largos.

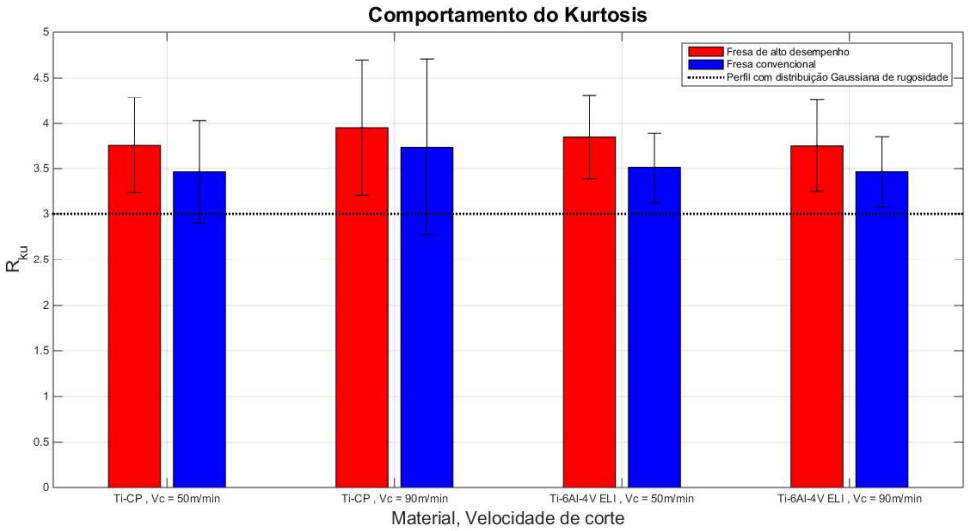


Figura 10: Gráfico do comportamento do fator de achatamento do perfil em função do material e velocidade de corte (Fonte: próprio autor).

Assim como para as variáveis de resposta anteriores, a análise de variância (ANOVA) para o fator de achatamento do perfil ao nível de confiança pré-estabelecido é apresentada na Tabela 8, de maneira a avaliar a influência das variáveis e suas interações sobre o parâmetro mencionado. Similarmente, o valor F_0 indicou que a variável ferramenta corresponde à mais influente, conforme ilustrado no gráfico de Pareto da Figura 11. Omitiram-se os diagramas de efeitos principais, neste caso, pela significativa e exclusiva influência da variável ferramenta sobre Rku.

Tabela 8: ANOVA aplicada sobre os resultados de achatamento do perfil obtidos.

	RUGOSIDADE KURTOSIS				
VARIÁVEIS	**SOMA DOS QUADRADOS**	**GRAUS DE LIBERDADE**	**MÉDIA QUADRÁTICA**	**F_0**	**P-VALOR**
Material (A)	0,027889	1	0,027889	0,495581	0,501422
Ferramenta (B)	0,323192	1	0,323192	5,743049	0,043416
Velocidade de corte (C)	0,026244	1	0,026244	0,466350	0,513957
AB	0,003600	1	0,003600	0,063971	0,806704
AC	0,092720	1	0,092720	1,647617	0,235213
BC	0,004489	1	0,004489	0,079768	0,784781
ABC	0,000342	1	0,000342	0,006082	0,939755
Erro	0,450203	8	0,056275		
Total	0,928680	15	0,061912		

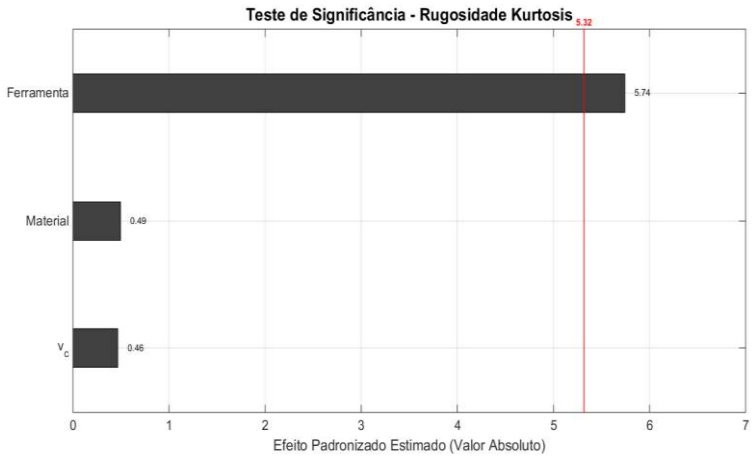
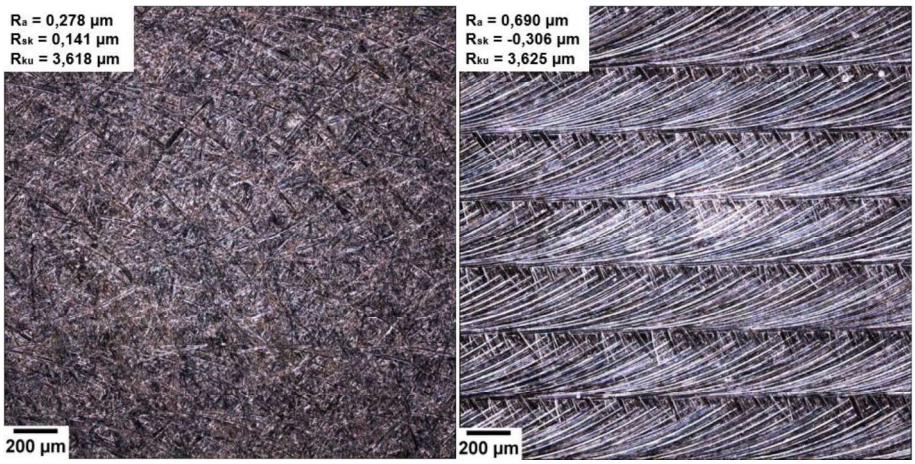


Figura 11: Gráfico de Pareto para o Teste de Significância: fator de achatamento do perfil (Fonte: próprio autor).

4. DISCUSSÃO

Com exceção dos ensaios realizados com a liga Ti-6Al-4V ELI utilizando-se fresa de alto desempenho, obteve-se superfícies com rugosidade média inferior a 0,4 µm, de forma muito similar ao reportado por Rao, Dandekar e Shin [29] em testes de faceamento dessa mesma liga utilizando insertos de metal duro sem revestimento, fluido de corte aquoso, velocidades de corte entre 76 e 183 m/min, avanço por dente entre 0,05 e 0,13 mm e profundidade de usinagem de 0,8 e 1,3 mm.

A Figura 12 apresenta as superfícies com os resultados mais contrastantes associados ao parâmetro *skewness*, isto é, superfície com maior Rsk e superfície com menor Rsk, caracterizando distribuições de rugosidade assimétrica à direita e assimétrica à esquerda, respectivamente. Tal oposição, em função da variação da ferramenta de corte empregada e material usinado, é observada também em termos de rugosidade média e corroborada pelo *kurtosis* em ambas as condições, evidenciando elevada repetibilidade das características obtidas.



(a) (b)

Figura 12. Fotografias das superfícies usinadas com (a) fresa convencional, alta velocidade de corte e material do corpo de prova titânio comercialmente puro e (b) fresa de alto desempenho, alta velocidade de corte e material do corpo de prova Ti-6Al-4V ELI, evidenciando diferenciação topográfica (Fonte: próprio autor).

Andrukhov *et al.* [30] verificaram por meio de ensaios in vitro que a rugosidade superficial e, em menor grau, o material de implantes dentários afetam a resposta de fibroblastos primários gengivais humanos sobre condições inflamatórias como a peri-implantite. De igual modo, Ponsonnet *et al.* [31] concluíram, por meio de ensaios in vitro, que a rugosidade superficial de ligas NiTi afeta a orientação e a proliferação de fibroblastos e que, para um mesmo nível de rugosidade, a taxa de proliferação nessa liga é superior àquela verificada para o titânio puro e para a liga Ti-6Al-4V. Posteriormente, demonstraram que acima da faixa de rugosidade média compreendida entre 0,08 e 1 μm, faixa esta observada nos resultados do presente estudo sob todas as condições de usinagem, a proliferação celular é dificultada [32].

Adicionalmente, Rosales-Leal *et al.* [33] afirmam que rugosidades mais elevadas, que levam a uma maior superfície de contato, podem aprimorar a capacidade de adesão de osteoblastos sobre o titânio comercialmente puro e de maneira similar Porreli *et al.* [34] demonstraram que a topografia superficial consiste em um fator preponderante sob adesão e proliferação celular, sendo que superfícies com rugosidade elevada apresentam maior propensão a viabilidade celular. De forma complementar, as amostras polidas ou atacadas quimicamente, caracterizadas por Rsk < 0 e Rku > 3, valores observados no presente trabalho quando do uso da fresa de alto desempenho preponderantemente sob alta velocidade de corte, demonstraram uma melhoria na proliferação dessas mesmas células. Outrossim, para as amostras simplesmente jateadas ou jateadas e atacadas quimicamente, com Rsk > 0 e Rku < 3, a proliferação celular demonstrou maior dependência da rugosidade média.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, realizou-se a variação dos parâmetros material usinado, características da ferramenta de corte e velocidade de corte empregada no fresamento de biomateriais metálicos de forma a aferir a influência dos mesmos sobre o estado de superfície obtido. A variável ferramenta se explicitou preponderantemente como a mais influente nesse estudo, sendo significativa sobre todas as variáveis de resposta (rugosidade média, fator de assimetria e fator de achatamento do perfil). A liga de titânio usinada também se mostra estatisticamente influente sobre os resultados de rugosidade média, enquanto a velocidade de corte exibe influência significativa tanto sobre a rugosidade média quanto sobre o fator de assimetria.

A ferramenta convencional, caracterizada por possuir ângulo de hélice fixo e revestimento Duarise, fornece rugosidade média menor que a ferramenta de alto desempenho com ângulo de hélice variável e revestimento WXL. Adicionalmente, a ferramenta convencional pode ser utilizada em processos de faceamento de ligas de titânio em que se requer classe de rugosidade N5, independentemente da velocidade de corte a ser aplicada, porém, a combinação que propicia o melhor acabamento superficial quando do uso da fresa convencional consiste na usinagem de titânio comercialmente puro com alta velocidade de corte, tal condição propicia otimização do acabamento superficial também para a fresa de alto desempenho.

As diferentes fresas empregadas produzem resultados consistentemente opostos quando da análise do fator de assimetria, isto é: enquanto a fresa de alto desempenho propiciou uma superfície com picos alargados e vales profundos, a utilização da fresa convencional resultou em superfícies majoritariamente compostas por vales rasos e largos. O fator de achatamento, por sua vez, evidenciou excelente repetibilidade de perfis compostos por picos e vales afilados independentemente das condições de usinagem empregadas. Dessa forma, considera-se bastante provável que a utilização de ferramentas de geometria e materiais distintos venha a influenciar significativamente a resposta do biomaterial em termos de viabilidade celular.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à fabricante de ferramentas de corte OSG Sulamericana, na pessoa do engenheiro Gustavo Santos, pela parceria e disponibilização das fresas utilizadas neste estudo. Adicionalmente, agradecem aos técnicos Leonildo Pivotto e Djalma Durici, do Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar, pelo apoio na realização dos experimentos.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] RATNER, B.D., HOFFMAN, A.S., SCHOEN, F.J., *et al.,* Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine, 3 ed., San Diego, Academic Press, 2013.

[2] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARD (ISO). ISO 10993-1: Biological evaluation of medical devices. Geneva. 2018.

[3] GONÇALVES, V.M., Estudo da molhabilidade da superfície de titânio modificada por anodização eletroquímica para crescimento de nanotubos, FOA/UNESP, Araçatuba, SP, Brasil, 2016.
[4] OLIVEIRA, B.J.S., CAMPANELLI, L.C., OLIVEIRA, D.P.O., *et al.,* "Surface characterization and fatigue performance of a chemical-etched Ti-6Al-4V femoral stem for cementless hip arthroplasty", Surface & Coatings Technology, v. 309, n.15, pp. 1126-1134, Jan. 2017.
[5] STRNAD, G., CHIRILA, N. PETROVAN, C., *et al.,* "Contact Angle Measurement on Medical implant Titanium Based Biomaterials", In: 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, pp. 946-953, Romênia, Out. 2015.
[6] YAFFE, M.A., SAUCEDO, J.M., KALAINOV, D.M., "Non-Locked and Locked Plating Technology for Hand Fractures", The Journal of Hand Surgery, v. 36, n.12, pp. 2052-2055, Dez. 2011.
[7] EZUGWU, E.O., WANG, Z.M., "Titanium alloys and their machinability - a review", Journal of Materials Processing Technology, v. 68, n.3, pp. 262-274, Ago. 1997.
[8] SANTOS, A.M., Usinabilidade de ligas de titânio: uma abordagem metalúrgica, Trabalho de Conclusão de Curso, DEMec/UFSCar, São Carlos, SP, Brasil, 2017.
[9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM F67 - 13. Standard Specification for Unalloyed Titanium, for Surgical Implant Applications. West Conshohocken, 2017.
[10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM F136 - 13. Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications. West Conshohocken, 2013.
[11] RAHMAN, M., WANG, Z.G., WONG, Y.S., "A review on high-speed machining of titanium alloys", JSME International Journal, v. 49, n.1, pp. 11-20, Mar. 2006.
[12] ANTONIALLI, A.I.S., Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V, Tese de M.Sc., FEM/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2009.
[13] SUN, J., GUO, Y.B., "A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti–6Al–4V", Journal of Materials Processing Technology, v. 209, n.8, pp. 4036-4042, Abr. 2009.
[14] STEMMER, C.E., Ferramentas de corte II, 2 ed., Florianópolis, Editora da UFSC, 1995.
[15] MACHADO, A.R., COELHO, R.T., ABRÃO, A.M., *et al.,* Teoria da usinagem dos materiais, 3 ed., São Paulo, Edgard Blücher Ltda., 2015.
[16] ZANUTO, R.S., Avaliação de diferentes estratégias de entrada no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH, Tese de M.Sc., FEM/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2012.
[17] MERSNI, W., BOUJELBENE, M., BEN SALEM, S., *et al.,* "Optimization of the surface roughness in ball end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using the Taguchi Method", Procedia Manufacturing, n.20, pp. 271-276, Fev. 2018.
[18] KRISHNARAJ, V., SAMSUDEENSADHAM, S., SINDHUMATHI, R., KUPPAN, P., "A study on high-speed end milling of titanium alloy", Procedia Engineering, n.97, pp. 251-257, Dez. 2014.
[19] REZENDE, M.C.R.A., CAPALBO, B.C., CURY, M.T.S., *et al.,* "Osseointegration of anodized implant: effect of compromised primary stability and fibrin adhesive/TEA", Dental Materials, v. 30, n.S, pp. e-145, Mar. 2014.
[20] COUTINHO, M.P., ELIAS, C.N., "Rugosidade e molhabilidade do titânio usado em implantes dentários com superfícies tratadas", Revista brasileira de odontologia, v. 66, n.2, pp. 234-238, Dez. 2009.
[21] SUN, J., GUO, Y.B., "A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti–6Al–4V", Journal of Materials Processing Technology, v. 209, n.8, pp. 4036-4042, Abr. 2009.
[22] MAJUMDAR, P., SINGH, S.B., DHARA, S., *et al.,* "Influence of in situ TiB reinforcements and role of heat treatment on mechanical properties and biocompatibility of β Ti-alloys", Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials, v.10, pp. 1-12, Fev. 2012.
[23] DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N.L., Tecnologia da usinagem dos materiais. 8 ed., São Paulo, Editora Artliber, 2013.
[24] LEYENS, C., PETERS, M., Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
[25] OSG. AE-VMS: The New Standard for Milling. Disponível em: <https://osg.icata.net/iportal/CatalogViewInterfaceStartUpAction.do?method=startUp&mode=PAGE&catalogId=165460000&pageGroupId=1&volumeID=OSGDCS01&designID=OSGD01/>. Acesso em: mai. 2019a.
[26] OSG. EXL/WXS End Mill Series. Disponível em: <https://osg.icata.net/iportal/CatalogViewInterfaceStartUpAction.do?method=startUp&mode=PAGE&catalogId=43920000&pageGroupId=1&volumeID=OSGDCS01&designID=OSGD01/>. Acesso em: mai. 2019b.
[27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 4288:Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro. 2008.
[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros de rugosidade. Rio de Janeiro. 2002.

[29] RAO, B., DANDEKAR, C.R., SHIN, Y.C., "An experimental and numerical study on the face milling of Ti–6Al–4V alloy: Tool performance and surface integrity", Journal of Materials Processing Technology, v. 211, n.2, pp. 294-304, Fev. 2011.
[30] ANDRUKHOV, O., BEHM, C., BLUFSTEIN, A., *et al.,* "Effect of implant surface material and roughness to the susceptibility of primary gingival fibroblasts to inflammatory stimuli", Dental Materials, v. 36, n.6, pp. e194-e205, Jun. 2020.
[31] PONSONNET, L., COMTE, V., OTHMANE, A., *et al.,* "Effect of surface topography and chemistry on adhesion, orientation and growth of fibroblasts on nickel–titanium substrates", Materials Science and Engineering: C, v. 21, n.1-2, pp. 157-165, Set. 2002.
[32] PONSONNET, L., REYBIER, K., JAFFREZIC, N., *et al.,* "Relationship between surface properties (roughness, wettability) of titanium and titanium alloys and cell behavior", Materials Science and Engineering: C, v. 23, n.4, pp. 551-560, Jun. 2003.
[33] ROSALES-LEAL, J.I., RODRÍGUZ-VALVERDE, M.A., MAZZAGLIA, G., *et al.,* "Effect of roughness, wettability and morphology of engineered titanium surfaces on osteoblast-like cell adhesion", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 365, n.1-3, pp. 222-229, Ago. 2010.
[34] PORRELLI, D., MARDIROSSIAN, M., CRAPISI, N., *et al.,* "Polyetheretherketone and titanium surface treatments to modify roughness and wettability – Improvement of bioactivity and antibacterial properties", Journal of Materials Science and Technology, v. 95, p. 213–224, Abr. 2021.

ORCID

Gustavo Vinicius Ferreira da Silva https://orcid.org/0000-0001-9183-4737
Armando ítalo Sette Antonialli https://orcid.org/0000-0002-3466-0416
Carlos Eiji Hirata Ventura https://orcid.org/0000-0002-3370-2979
Felipe Dias Monteiro https://orcid.org/0000-0001-8282-5425