

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - CCET
Departamento de Engenharia Mecânica - DEMec

Aluno: Gustavo Vinicius Ferreira da Silva

Avaliação do estado de superfície obtido no fresamento de ligas de titânio
com ferramentas comerciais

Orientador: Armando Ítalo Sette Antonialli



São Carlos - SP

2021

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - CCET
Departamento de Engenharia Mecânica - DEMec

Gustavo Vinicius Ferreira da Silva

Monografia

Avaliação do estado de superfície obtido no fresamento de ligas de titânio
com ferramentas comerciais

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
São Carlos, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli



São Carlos - SP

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 22/2021/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

GUSTAVO VINÍCIUS FERREIRA DA SILVA

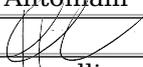
**AVALIAÇÃO DO ESTADO DE SUPERFÍCIE OBTIDO NO FRESAMENTO DE LIGAS
DE TITÂNIO COM FERRAMENTAS COMERCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos - Campus São Carlos

São Carlos, 09 de novembro de 2021

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Armando Ítalo Sette Antonjalli
Membro da Banca 1	Henrique Küll Neto 
Membro da Banca 2	Leonardo Contri Campanelli



Documento assinado eletronicamente por **Armando Italo Sette Antonjalli, Docente**, em 09/11/2021, às 14:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0513927** e o código CRC **A4BF685F**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.019831/2021-26

SEI nº 0513927

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

DEDICATÓRIA

“Porque dele, e por ele, e para ele, são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente. Amém.”

Romanos 11:36

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, digno de toda honra e glória, pois foi Ele quem me capacitou para que essa graduação se concretizasse. Em novembro de 2014, quando em um final de semana prestei o ENEM passando por um problema de saúde: Ele me capacitou. Durante cinco anos em São Carlos, longe de minha família, submetido a provas que em um primeiro momento excediam minha capacidade de entendimento: Ele me capacitou. Hoje compreendo o que o Senhor disse, escrito no livro do profeta Isaías capítulo 55:

“os meus pensamentos não são os vossos pensamentos, nem os vossos caminhos os meus caminhos, diz o Senhor.

Porque assim como os céus são mais altos do que a terra, assim são os meus caminhos mais altos do que os vossos caminhos, e os meus pensamentos mais altos do que os vossos pensamentos.”

Senhor, obrigado!

Agradeço ao meu pai José Maria e a minha mãe Renata, por sempre me incentivarem a estudar, para que eu não viesse a passar pelas dificuldades que passaram. Vocês são meus maiores exemplos. Com palavras não consigo descrever meu sentimento de gratidão para com vocês. Obrigado por todo apoio que me concederam para que eu viesse a me formar em engenharia. Amo vocês!

Agradeço a minha esposa Rebeca por ser minha companheira desde o início dessa caminhada. Você teve uma importância imensurável nessa conquista. Obrigado por ter entrado em minha vida em 2015, não de forma passageira, mas pra toda vida. Eu te amo demais!

Agradeço ao meu querido amigo, padrinho de casamento e principalmente orientador, professor Armando Antonioli, por desde 2016 compartilhar conhecimentos comigo e com maestria me orientar a como fazer pesquisa e desbravar o desconhecido para fortalecer algo de importância ímpar para a sociedade: a ciência!

Agradeço a meu irmão Guilherme por preencher o vazio que deixei em nossa família quando saí de casa em 2015 para estudar. Eu te amo e oro para que o Senhor te abençoe muito mais do que já me abençoou!

Agradeço a minha vó Francisca (querida vó Chiquita) pela preocupação que teve e

ainda tem comigo. Para a glória de Deus a senhora pela primeira vez terá um neto engenheiro. Espero ser o primeiro de muitos. Eu te amo!

Agradeço aos meus tios e tias pelo amor e cuidado que sempre tiveram comigo. Amo todos vocês!

Agradeço a todos os meus primos e primas que comigo cresceram e os tenho como irmãos. Amo todos vocês!

Agradeço aos meus sogros Jairo e Soledad por serem verdadeiras bênçãos em minha vida e terem me concedido uma esposa maravilhosa. Amo vocês!

Agradeço ao meu querido pastor Dirceu e todos os irmãos da Assembleia de Deus ministério de Madureira do Jardim São Miguel em Rio Claro, por todas as orações em que se lembraram de mim antes e durante minha graduação. Que o Senhor possa retribuí-los com as mais seletas bênçãos!

Agradeço aos meninos que dividiram o mesmo teto que eu em São Carlos: Lucas Ramos, Bruno Martins, Bruninho, Fazardo e Acácio. Obrigado pela companhia e amizade desde o ensino médio/fundamental para a vida.

Agradeço às empresas em que estagiei pelas oportunidades de aplicar meus conhecimentos e me desenvolver como profissional: ZF do Brasil, Faber-Castell e especialmente Andritz Hydro.

Agradeço aos técnicos Djalma Durici e Leonildo Pivotto pelo apoio técnico na execução dos ensaios. Agradeço a OSG Sulamericana na figura do engenheiro Gustavo Santos pelas ferramentas cedidas para execução deste trabalho de monografia. Agradeço ao professor Anderson Ubices pela contribuição com a avaliação de molhabilidade.

Por fim, agradeço a todos os professores das escolas SESI, SENAI, ETEC Bayeux e UFSCar que contribuíram para que eu aqui chegasse, muito obrigado!

RESUMO

O atendimento a critérios de desempenho fisiológicos que conduzem à devida conexão estrutural e funcional entre osso e implante, denominada osteointegração, está intimamente relacionado às características superficiais do biomaterial, as quais dependem dos processos envolvidos em sua fabricação. Assim sendo, o presente trabalho visa ampliar o entendimento acerca da influência de condições de usinagem sobre a integridade superficial de componentes em titânio comercialmente puro grau 4 e Ti-6Al-4V ELI submetidos à operação de fresamento. Para tanto, a partir de um planejamento fatorial completo 2^3 , foram selecionados como fatores de influência o tipo de ferramenta: fresa de alto desempenho e fresa convencional, a liga de titânio usinada e a velocidade de corte. Foram utilizadas como variáveis de resposta sobre o estado de superfície três parâmetros de rugosidade distintos, a saber: rugosidade média (R_a), assimetria (R_{sk}) e achatamento (R_{ku}) do perfil. Uma análise adicional verificou a molhabilidade das superfícies usinadas por meio de quatro diferentes formas de medição do ângulo de contato. A análise de variância (ANOVA) indicou que a ferramenta de corte corresponde ao principal fator de influência desse estudo, sendo significativa sobre todas as variáveis de resposta. A liga de titânio usinada também se mostrou influente sobre os resultados de rugosidade média, enquanto a velocidade de corte exibiu influência significativa tanto sobre a rugosidade média quanto sobre o parâmetro de assimetria. Justamente com relação ao *skewness*, destaca-se que as diferentes fresas empregadas produziram resultados consistentemente opostos, isto é: enquanto um modelo de ferramenta resultou em uma superfície composta preponderantemente por picos, o outro modelo resultou em superfícies compostas por vales. Finalmente, a análise de molhabilidade das superfícies indicou que o fresamento de Ti-6Al-4V ELI com fresa de alto desempenho e alta velocidade de corte resulta na superfície com maiores ângulos de contato entre os analisados, caracterizando a condição de máxima viabilidade celular dentro do limite de rugosidade média superficial obtido.

Palavras-chave: Usinagem. Biomateriais. Integridade superficial. Rugosidade. Molhabilidade.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

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. Therefore, the present work aims to expand the understanding about the influence of machining conditions on the surface integrity of commercially pure grade 4 titanium and Ti-6Al-4V ELI components submitted to the milling operation. For this purpose, based on a 2³ complete factorial design, was selected as influencing factors the type of tool: high-performance cutter and conventional cutter, machined titanium alloy and cutting speed. Three different roughness parameters were used as response variables on the surface state, namely: mean roughness (R_a), asymmetry (R_{sk}) and flatness (R_{ku}) of the profile. An additional analysis verified the wettability of the machined surfaces through four different ways of measuring the contact angle. The analysis of variance (ANOVA) indicated that the cutting tool corresponds to the main influencing factor of this study, being significant on all response variables. The machined titanium alloy was also influential on the average roughness results, while the cutting speed showed a significant influence on both the average roughness and the asymmetry parameter. Precisely regarding to skewness, it is noteworthy that the different cutters employed produced consistently opposite results, that is: while one tool model resulted in a surface composed predominantly of peaks, the other model resulted in surfaces composed of valleys. Finally, the surface wettability analysis indicated that the milling of Ti-6Al-4V ELI with high performance cutter and high cutting speed results in the surface with higher contact angles among those analyzed, characterizing the condition of maximum cell viability within the mean surface roughness limit obtained.

Keywords: Machining. Biomaterial. Surface integrity. Roughness. Wettability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Dimensionamento e projeção para o mercado de implantes ortopédicos na América do Norte no período de 2015 a 2026 (valores em bilhões de dólares).....	1
Figura 2. Mercado global de implantes ortopédicos por biomaterial.....	2
Figura 3. Principais operações executadas na fresadora.....	6
Figura 4. Fresamento (a) discordante e (b) concordante.....	7
Figura 5. Profundidade de usinagem (a_p) e penetração de trabalho (a_e) no fresamento frontal.....	8
Figura 6. Avanço por dente (f_z) no fresamento tangencial concordante.....	9
Figura 7. Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)	12
Figura 8. Correlação entre o perfil de rugosidades e a distribuição de valores de <i>skewness</i>	12
Figura 9. Correlação entre o perfil de rugosidades e a distribuição de valores de <i>kurtosis</i>	13
Figura 10. Fresa de topo de haste cilíndrica - principais dimensões e ângulos.....	14
Figura 11. Variação de R_a de uma superfície fresada em função do ângulo de hélice da ferramenta.....	15
Figura 12. Exemplos de produtos da indústria biomédica fabricados em titânio: (a) placa e parafuso para osteossíntese, (b) placas personalizadas para reconstrução facial e (c) hastes femorais de próteses de quadril.....	16
Figura 13. Método da gota sésil para obtenção do ângulo de contato.....	18
Figura 14. Espessura do revestimento WXL.....	21
Figura 15. Revestimento da fresa AE-VMS.....	22
Figura 16. Ilustração dos corpos de prova e suas dimensões padrão.....	24
Figura 17. Ilustração do caminho da ferramenta gerado pelo CAM.....	24
Figura 18. Centro de usinagem vertical ROMI® D 600.....	25
Figura 19. Representação do ângulo de contato (a) maior do que 90° , (b) menor do que 90° e (c) espalhamento total.....	26
Figura 20. Avaliação de molhabilidade das superfícies usinadas com fresa convencional e baixa velocidade de corte em (a) titânio comercialmente puro grau 4	

e (b) Ti-6Al-4V ELI.....	27
Figura 21. Programa para aquisição dos ângulos de contato das superfícies usinadas por meio de diferentes metodologias de avaliação.....	28
Figura 22. Distribuição de probabilidade (a) discreta e (b) contínua.....	29
Figura 23. Distribuição normal.....	30
Figura 24. Aresta principal de corte da (a) fresa convencional e da (b) fresa de alto desempenho.....	37
Figura 25. Gráfico do comportamento da rugosidade média em função do tipo de fresa, do material e da velocidade de corte.....	38
Figura 26. Gráfico de Pareto para o Teste de Significância: rugosidade média.....	39
Figura 27. 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.....	40
Figura 28. Gráfico do comportamento do fator de assimetria do perfil em função do material e velocidade de corte.....	41
Figura 29. Fotografia da superfície usinada com fresa de alto desempenho, $v_c = 50\text{m/min}$ e titânio comercialmente puro.....	42
Figura 30. Superfícies usinadas com (a) fresa convencional, $v_c = 90\text{m/min}$ e titânio comercialmente puro e (b) fresa de alto desempenho, $v_c = 90\text{m/min}$ e Ti-6Al-4V ELI.....	43
Figura 31. Gráfico de Pareto para o Teste de Significância: fator de assimetria do perfil.....	44
Figura 32. Gráfico do comportamento do fator de achatamento do perfil em função do material e velocidade de corte.....	45
Figura 33. Gráfico de Pareto para o Teste de Significância: fator de achatamento do perfil.....	46
Figura 34. Ângulo de contato em função do fator de assimetria (R_{sk}) para as diferentes metodologias de medição.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas: Titânio comercialmente puro (CP) e Ti-6Al-4V ELI.....	17
Tabela 2. Composição química: Titânio comercialmente puro (CP) e Ti-6Al-4V ELI.....	17
Tabela 3. Planejamento fatorial 2 ³ do presente estudo.....	20
Tabela 4. Características do revestimento WXL.....	21
Tabela 5. Características geométricas da fresa AE-VMS.....	22
Tabela 6. Características das fresas comerciais convencional e de alto desempenho.....	23
Tabela 7. Ferramentas comerciais e parâmetros de corte utilizados.....	25
Tabela 8. Análise de Variância para um modelo com três fatores fixos.....	33
Tabela 9. Médias das rugosidades dos corpos de prova após o processo de aplainamento.....	35
Tabela 10. Dimensões dos raios das arestas principais de corte.....	36
Tabela 11. ANOVA aplicada sobre os resultados de rugosidade média obtidos.....	39
Tabela 12. ANOVA aplicada sobre os resultados de assimetria do perfil obtidos.....	44
Tabela 13. ANOVA aplicada sobre os resultados de achatamento do perfil obtidos.....	46
Tabela 14. Ângulo de contato obtido por diferentes métodos em função da ferramenta de corte (em vermelho fresa de alto desempenho e em azul fresa convencional) para as combinações (a) Ti-CP e $v_c = 50$ m/min, (b) Ti-CP e $v_c = 90$ m/min, (c) Ti-6Al-4V ELI e $v_c = 50$ m/min e (d) Ti-6Al-4V ELI e $v_c = 90$ m/min.....	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Definição de usinagem	5
2.1.1 Conceituação do processo de fresamento	5
2.1.2 Considerações sobre os parâmetros de corte envolvidos no fresamento ..	7
2.2 Integridade superficial.....	9
2.2.1 Considerações sobre a relação entre parâmetros de corte e rugosidade	10
2.2.2 Rugosidade Média	11
2.2.3 Rugosidade <i>Skewness</i>	12
2.2.4 Rugosidade <i>Kurtosis</i>	13
2.3 Considerações sobre a geometria de fresas de topo	13
2.4 Biomateriais: Titânio comercialmente puro (CP) e Ti-6Al-4V ELI	15
2.5 Osteointegração	17
2.5.1 Molhabilidade	17
2.5.2 Viabilidade Celular	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1 Ferramentas de corte	20
3.2 Detalhamento dos materiais e geometria dos corpos de prova	23
3.3 Fresamento dos corpos de prova	24
3.4 Avaliação da integridade superficial	26
3.5 Avaliação de molhabilidade	26
3.6 Análise estatística dos resultados.....	28
3.6.1 Conceitos estatísticos introdutórios.....	28
3.6.2 Teste-t de Student.....	31
3.6.3 Análise de Variância (<i>Analysis of variance</i> - ANOVA).....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 Caracterização dos materiais e ferramentas empregados	35
4.1.1 Estado de superfície prévio ao processo de fresamento	35
4.1.2 Avaliação da influência de parâmetros geométricos e dimensionais das ferramentas de corte	35
4.2 Rugosidade obtida após o fresamento	37

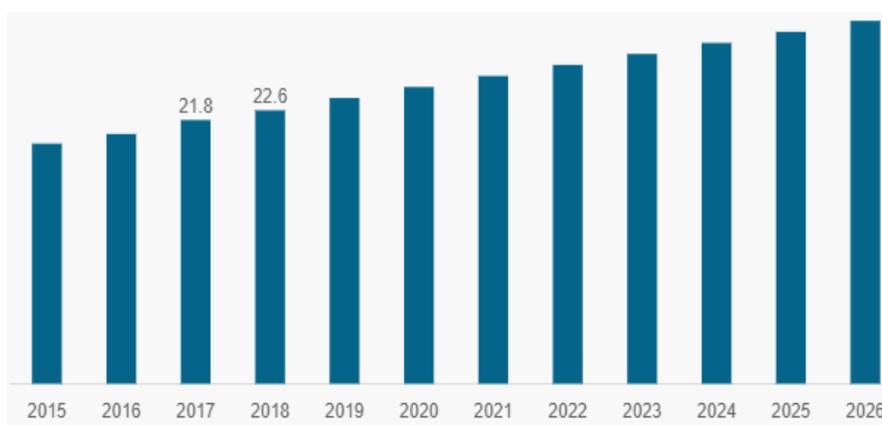
4.2.1 Rugosidade média (R_a)	37
4.2.2 Fator de assimetria do perfil (R_{sk})	41
4.2.3 Fator de achatamento do perfil (R_{ku})	44
4.3 Avaliação de molhabilidade das superfícies	47
4.4 Correlação entre rugosidade e molhabilidade	49
5. CONCLUSÕES	52
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1. INTRODUÇÃO

Observa-se que 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 (RATNER *et al.*, 2004).

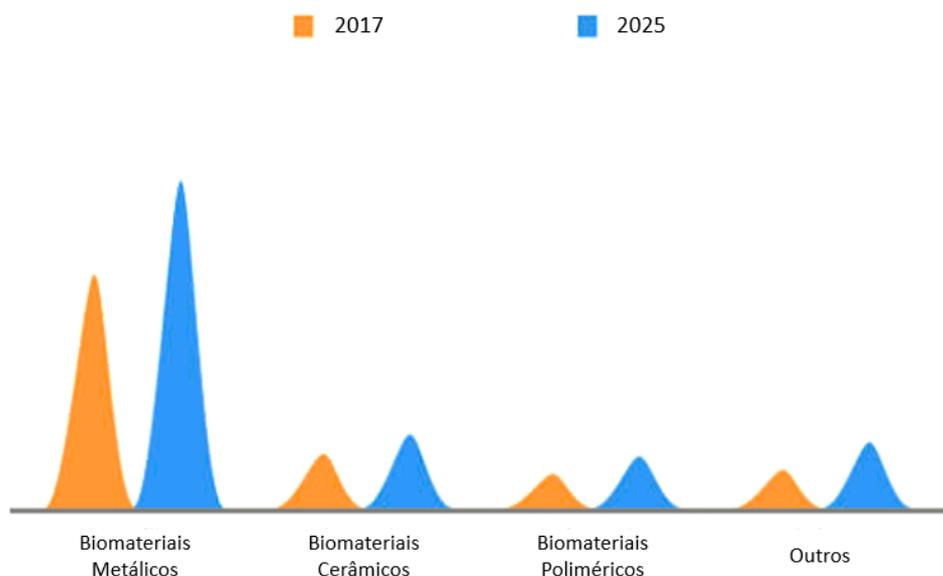
Há de se fazer a ressalva de que embora cirurgias ortopédicas, vinculadas fortemente à aplicação de biomateriais, continuem desempenhando papel crucial nos serviços de emergência, grande parcela de sua prática eletiva tem sido completamente suspensa por agências governamentais em virtude da pandemia COVID-19 (GIORDANO *et al.*, 2021). Porém, projeções elaboradas pré-pandemia como as da *Fortune Business Insights* (2019) apresentadas na Figura 1, evidenciando crescimento do mercado internacional de implantes ortopédicos de 37% entre 2018 (46,5 bilhões de dólares) e 2026 (64 bilhões de dólares), e da *Allied Market Research* (2019) exposta na Figura 2, sinalizando predominância de aplicação de biomateriais metálicos frente aos demais no mercado de implantes ortopédicos, tendem a invariavelmente se concretizar em um cenário futuro.

Figura 1. Dimensionamento e projeção para o mercado de implantes ortopédicos na América do Norte no período de 2015 a 2026 (valores em bilhões de dólares)



Fonte: FORTUNE BUSINESS INSIGHTS (2019).

Figura 2. Mercado global de implantes ortopédicos por biomaterial



Fonte: Adaptado de ALLIED MARKET RESEARCH (2019).

Nesse sentido, a norma ISO 10993-1 (2018), que define os critérios para proteção dos seres humanos contra potenciais riscos biológicos decorrentes do uso de dispositivos médicos, estabelece duas características impreteríveis dos biomateriais: biofuncionalidade e biocompatibilidade. A biofuncionalidade é o conjunto de propriedades que permite ao material desempenhar uma função desejada, sendo diretamente interligada com as propriedades físicas do material, já a biocompatibilidade se refere à compatibilidade entre o material e o meio biológico no qual o mesmo será inserido, consistindo nas propriedades toxicológicas essenciais para que não ocorram reações adversas (GONÇALVES, 2016).

Não há, entretanto, regra única que assegure o atendimento às abrangentes características normativas devido às especificidades das aplicações, de modo que os requisitos atribuídos aos biomateriais podem ser completamente opostos (HIN, 2014).

Na engenharia de tecido óssea, por exemplo, um *scaffold* polimérico, que consiste em um biomaterial que promove tanto o suporte físico quanto morfológico às células, podendo também, servir de meio para liberação de compostos químicos (antígenos, proteínas, fármacos, enzimas e partículas) (SILVA, 2018), necessita ser biodegradável de modo que à medida que as células geram suas matrizes extracelulares próprias, o biomaterial polimérico é completamente substituído pelo próprio tecido ósseo do paciente.

Em contrapartida, evidenciando a oposição em termos dos requisitos de biomateriais citada por Hin (2004), próteses utilizadas na restauração de articulações, como as coxofemorais, por exemplo, que exigem resistência mecânica, baixa densidade, excelente resistência à corrosão, módulo de elasticidade relativamente baixo e biocompatibilidade (OLIVEIRA *et al.*, 2017), geralmente suportam cargas cíclicas durante sua vida útil e, portanto, a resistência à fadiga dos biomateriais metálicos empregados tem um papel fundamental na identificação do desempenho à longo prazo do dispositivo (PAZOS, CORENGIA, SVOBODA, 2010), sendo assim necessária a realização de ensaios com o produto acabado. No Brasil tais ensaios são feitos conforme procedimentos descritos na norma ABNT NBR ISO 7206-4 (2011), para o processo de homologação realizado junto à Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA).

Ainda sobre o atendimento às exigências normativas de biomateriais, destacam-se as características superficiais sob o aspecto de que as respostas dos biomateriais quando inseridos num organismo vivo como adsorção de proteínas, adesão celular, crescimento celular, compatibilidade sanguínea, entre outros (RATNER *et al.*, 2004), não dependem apenas das suas composições, mas, sobretudo de parâmetros associados à integridade superficial como rugosidade, molhabilidade e mobilidade superficial, carga elétrica, cristalinidade e heterogeneidade à reações biológicas, de forma que está sacramentado que a superfície de um biomaterial responde diretamente pela qualidade e quantidade de tecidos reparacionais formados, uma vez que constitui plataforma para a migração e crescimento celular (REZENDE *et al.*, 2014).

Todavia, salienta-se o paradoxo descrito por Apachitei *et al.* (2011) envolvendo a rugosidade superficial de um componente protético e suas propriedades relacionadas à vida em fadiga, em que um acabamento superficial ruim, caracterizado por elevados níveis de rugosidade média, resulta em otimização da osteointegração, que corresponde ao eficiente atendimento a critérios de desempenho fisiológicos (YASZEMSKI *et al.*, 2004), porém o torna vulnerável à fadiga, definida como uma degradação das propriedades mecânicas que leva à falha de um material ou um componente sob carga cíclica (MEYERS, CHAWLA, 2009).

Concernente ao paradoxo anteriormente descrito, da Silva *et al.* (2017) propuseram um método matemático de previsão do efeito do acabamento superficial

da liga Ti-6Al-4V ELI sobre a resistência à fadiga e verificaram que pequenas variações das características superficiais resultaram em grandes variações em termos de vida em fadiga.

No tocante a integridade superficial, reverberam-se os processos de fabricação envolvidos na obtenção de biocomponentes, dentre os quais notabiliza-se o processo de fresamento, empregado, muitas vezes, como processo de acabamento e amplamente utilizado na manufatura de sistemas de placas ósseas e próteses para restauração de articulações (SUN, GUO, 2009). Sun e Guo (2009) destacam ainda que apesar de fundamental, integridade superficial induzida pelo fresamento, incluindo rugosidade superficial, tensão residual, alterações da microestrutura da superfície e microdureza têm recebido pouca atenção, de forma que ainda pairam dúvidas no que diz respeito às propriedades ideais das superfícies de biomateriais metálicos para se obter a biofixação adequada, fazendo com que as variáveis de controle devam necessariamente ser independentemente analisadas (COUTINHO, ELIAS, 2009), contribuindo assim para o desenvolvimento de novos processos e a adição de biofunções aos materiais metálicos que por sua natureza já apresentam excelentes propriedades mecânicas (HIN, 2004).

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 (MAJUMDAR *et al.*, 2012). Assim sendo o presente estudo pretende contribuir com a discussão acerca das 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 osteointegração do biomaterial, a qual necessita ser preenchida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os tópicos que seguem visam aprofundar o conhecimento a respeito do processo de fresamento, parâmetros de rugosidade e sua relação com variáveis de processo, ligas de titânio e o conceito de osteointegração atrelado a uma de suas formas de avaliação indireta: molhabilidade.

2.1 Definição de usinagem

Dentre as operações existentes na indústria metal-mecânica, encontra-se a usinagem, reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo (MACHADO *et al.*, 2015). Define-se como operações de usinagem aquelas que, ao conferir à peça a forma, as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco (FERRARESI, 1970). As indústrias automobilística, ferroviária, de construção naval, fabricação de aeronaves, eletrodomésticos, eletrônicos e construção empregam milhares de funcionários diretamente envolvidos com a usinagem (TRENT, WRIGHT, 2000).

2.1.1 Conceituação do processo de fresamento

A usinagem subdivide-se em diversos processos, dentre os quais encontra-se o fresamento, operação destinada à obtenção de superfícies planas, contornos, rasgos, cavidades, ranhuras, roscas, entre outras (STEMMER, 1995), caracterizada pelo movimento de corte proporcionado pela rotação da ferramenta, chamada fresa, provida de arestas cortantes, 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, denominada fresadora, fazendo com que a mesma passe sob a ferramenta em rotação, dando-lhe as formas e dimensões desejadas (MACHADO *et al.*, 2015).

A norma NBR 6175 (2015) que estabelece a nomenclatura, a definição e a classificação dos processos mecânicos de usinagem distingue dois tipos básicos de fresamento: tangencial e frontal. Essa divisão ocorre segundo a disposição dos dentes ativos da fresa. No fresamento tangencial, os dentes ativos encontram-se na superfície cilíndrica da ferramenta e é destinado à obtenção de superfícies planas

paralelas ao eixo de rotação da ferramenta. Já no fresamento frontal, os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta sendo destinado à obtenção de superfícies planas perpendiculares ao eixo de rotação da ferramenta. Exemplos desse grupo de operações são ilustrados na Figura 3.

Figura 3. Principais operações executadas na fresadora

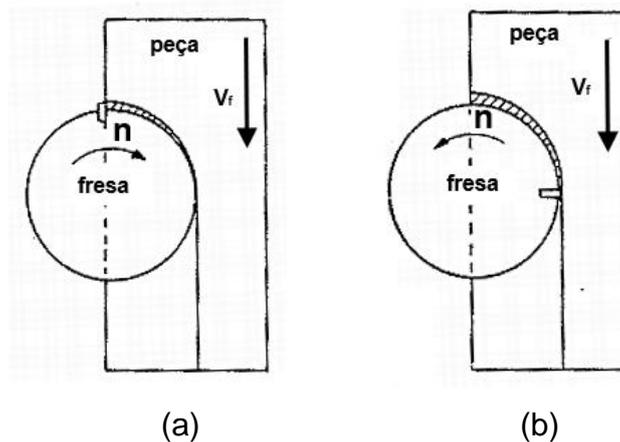


Fonte: MACHADO *et al.* (2015).

Além da divisão entre fresamento tangencial e frontal, pode-se distinguir ainda o fresamento segundo a direção de corte e avanço como concordante e discordante. No fresamento concordante, os movimentos de corte (da ferramenta) e de avanço (da peça) têm o mesmo sentido, conforme ilustrado na Figura 4a, de maneira que a saída da ferramenta da peça se dá com espessura mínima de corte. Já no fresamento discordante, os movimentos de corte e de avanço têm sentidos opostos, conforme apresentado na Figura 4b, de forma que a entrada da ferramenta na peça se dá com

espessura mínima de corte (STEMMER, 1995). Na Figura 4 n representa a rotação da ferramenta, enquanto que v_f consiste na velocidade de avanço, evidenciando assim a diferenciação entre os tipos de fresamento em função dos sentidos de rotação e avanço.

Figura 4. Fresamento (a) concordante e (b) discordante



Fonte: STEMMER (1995).

Devido a sua grande versatilidade e capacidade de proporcionar a peça praticamente qualquer forma geométrica, dentro dos processos de usinagem o fresamento é um dos que apresentam também maior complexidade em função da grande quantidade de variáveis envolvidas no processo, como máquinas, ferramentas, estratégias e parâmetros de corte (ZANUTO, 2012).

2.1.2 Considerações sobre os parâmetros de corte envolvidos no fresamento

Como regra fundamental para obtenção de superfícies fresadas com características finais específicas, deve-se providenciar o movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta. Assim sendo, no estudo do processo de corte, faz-se necessário a definição das principais grandezas envolvidas.

2.1.2.1 Velocidade de corte

No fresamento, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente, a velocidade de corte (v_c) consiste na velocidade tangencial

instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013), segundo a direção e o sentido do corte, sendo resultante da rotação da ferramenta em torno da peça (MACHADO *et al.*, 2015).

A velocidade de corte de corte, em m/min, é calculada pela Equação 1, em que d é o diâmetro da fresa, em mm, e n é a rotação da ferramenta, em rpm.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

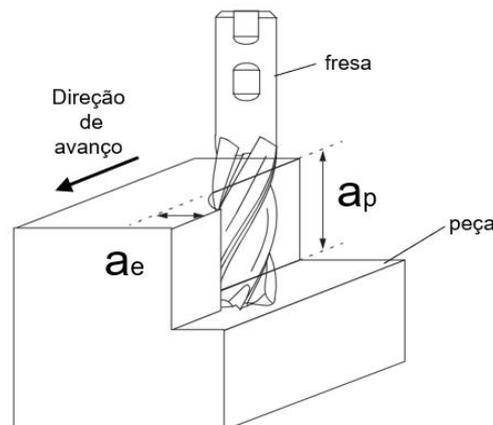
2.1.2.2 Profundidade de usinagem

A profundidade de usinagem (a_p), dada em mm, representa a profundidade ou largura de penetração da ferramenta de corte na peça, sendo medida perpendicularmente ao plano de trabalho (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013).

2.1.2.3 Penetração de trabalho

A penetração de trabalho (a_e), dada em mm, corresponde à penetração da ferramenta em relação à peça, sendo medida no plano de trabalho em uma direção perpendicular à direção de avanço (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013). A Figura 5 apresenta a diferenciação entre profundidade de usinagem e penetração de trabalho.

Figura 5. Profundidade de usinagem (a_p) e penetração de trabalho (a_e)



Fonte: Adaptado de Trent e Wright (2000).

2.1.2.4 Avanço e avanço por dente

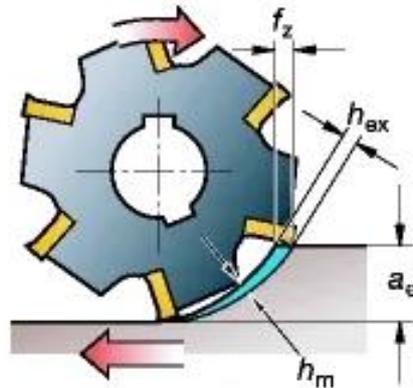
O percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta é definido como avanço (f), dado em mm (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013). Para ferramentas de corte que possuem mais de um dente, como as fresas, surge o avanço por dente (f_z), dado em mm, que consiste no percurso de avanço de cada dente e é medido na direção de avanço da ferramenta, correspondendo à distância entre duas superfícies em usinagem consecutivas.

O avanço por dente é calculado pela Equação 2, em que z é o número de dentes da ferramenta.

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (2)$$

A Figura 6 elucida o avanço por dente (f_z) no fresamento tangencial concordante em conjunto com as dimensões adicionais espessura máxima do cavaco (h_{ex}) e espessura média do cavaco (h_m).

Figura 6. Avanço por dente (f_z) no fresamento tangencial concordante



Fonte: SANDVIK COROMANT (2021).

2.2 Integridade superficial

Tendo em vista que, em muitos casos, 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 plástica, geração de calor, tensões residuais e, às vezes, reações químicas (MACHADO *et al.*, 2015).

2.2.1 Considerações sobre a relação entre parâmetros de corte e rugosidade

A rugosidade sofre influência de diversos parâmetros de usinagem, incluindo 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. Em geral, a rugosidade é menor (ou o acabamento é melhor) quando:

- As flexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas;
- A ferramenta apresenta um raio de ponta significativo;
- A ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas (evitando desvios);
- O material da peça é livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões);
- O eixo principal da máquina-ferramenta está corretamente alinhado e as guias estão sem desgastes;
- A aresta de corte está sem desgastes ou quebras;
- O corte ocorre sem aresta postiça de corte.

Tomando os três principais parâmetros de corte: avanço, velocidade de corte e profundidade de usinagem, Machado *et al.* (2015) afirmam que o avanço é o parâmetro mais influente sobre a rugosidade, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática conforme o cálculo teórico da rugosidade apresentado na Equação 3, que exprime apenas um indicativo uma vez que na realidade acrescenta-se outros fatores como vibração e desgaste das arestas de corte por exemplo. Na Equação 3, f_z é o avanço por dente, em mm, e R é o raio da aresta principal de corte, em mm, para fresamento frontal e raio da fresa para fresamento tangencial.

$$R_t = \frac{f_z^2}{8.R} \quad (3)$$

Quanto à velocidade de corte, Mersni *et al.* (2018) verificaram que no fresamento da liga Ti-6Al-4V, baixos valores de v_c 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.

Krishnaraj *et al.* (2014) avaliando os mesmos parâmetros de corte na usinagem de Ti-6Al-4V 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: baixos valores de velocidade de corte produzem baixos valores de rugosidade.

Machado *et al.* (2015) 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.

2.2.2 Rugosidade Média

A NBR ISO 4287 (2002) 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 ou rugosidade média (R_a), consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ no comprimento de amostragem, como o ilustrado na Figura 7.

Figura 7. Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)

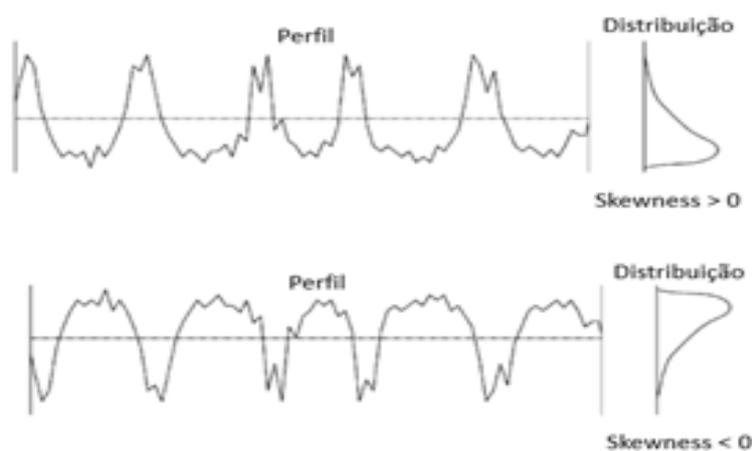


Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002).

2.2.3 Rugosidade *Skewness*

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 vales. Finalmente, valores negativos representam uma curva de distribuição assimétrica à esquerda, com perfil do tipo platô, caracterizado por picos. A Figura 8 ilustra o conceito associado ao *skewness*.

Figura 8. Correlação entre o perfil de rugosidades e a distribuição de valores de *skewness*

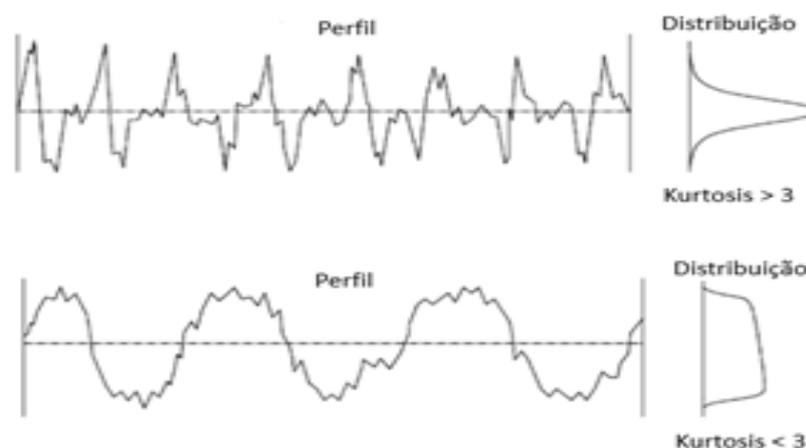


Fonte: Próprio autor.

2.2.4 Rugosidade *Kurtosis*

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 9 ilustra o conceitual teórico associado ao *kurtosis*.

Figura 9. Correlação entre o perfil de rugosidades e a distribuição de valores de *kurtosis*



Fonte: Próprio autor.

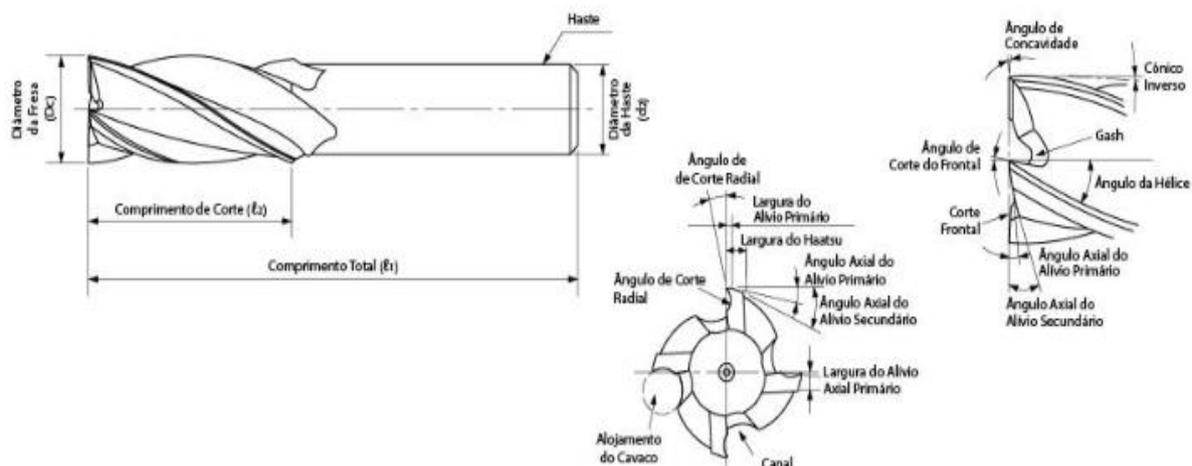
2.3 Considerações sobre a geometria de fresas de topo

As fresas de haste, também chamadas de fresas de topo, são utilizadas para facear, ranhurar, executar bolsões, rebaixos, matrizes, gravações, rasgos e contornos (STEMMER, 1995). Estão padronizadas pela norma DIN e devem atender às seguintes condições:

- pequena carga sobre cada dente individual;
- bom grau de recobrimento;
- passo grande para alojamento aos cavacos.

As fresas de topo de haste cilíndrica, em particular, são padronizadas pela norma DIN 844 (1989) e seus elementos dimensionais e ângulos principais são apresentados na Figura 10.

Figura 10. Fresa de topo de haste cilíndrica - principais dimensões e ângulos



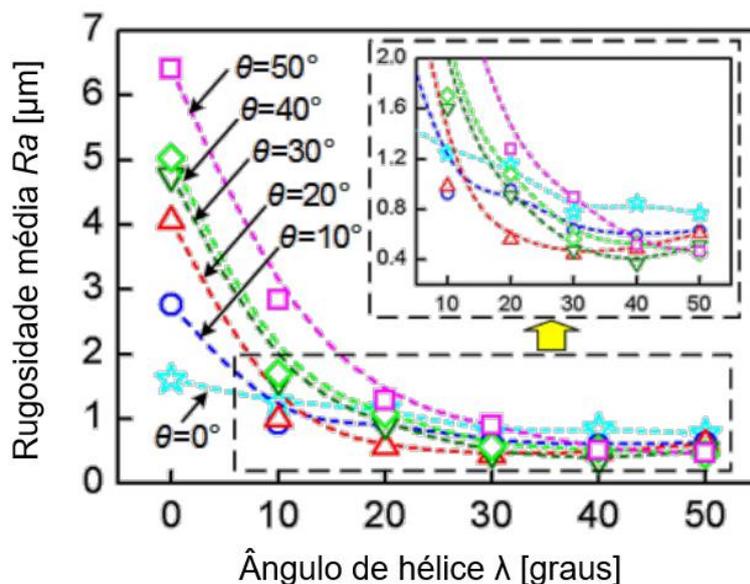
Fonte: OSG (2021).

Os ângulos mais importantes da fresa de topo são o ângulo de hélice λ_s - coincidente com o ângulo de inclinação da aresta - e o ângulo de saída ortogonal γ_o . Ressalta-se que ângulo de hélice e ângulo de saída ortogonal são independentes, porém imprescindíveis na definição da superfície de saída da ferramenta.

Essencialmente, quanto maior o ângulo de hélice, maior a força e a potência de corte. Quanto maior o ângulo de saída ortogonal, menor a força de corte. Este ainda influencia decisivamente no acabamento da superfície usinada e no calor gerado (CAVALER, 2003).

Chen *et al.* (2018) estudando a usinagem de placas finas, puderam afirmar que o ângulo de hélice da ferramenta durante o fresamento exerce grande influência sobre a componente da força de corte na direção de menor rigidez, de forma que é possível diminuir tal componente, mitigando vibrações e, portanto, tendo efeitos significativos na morfologia da superfície usinada, outra variável de importância nesse sentido consiste no ângulo de inclinação do eixo-árvore. Adicionalmente, foi verificado que, independentemente do ângulo de inclinação (na faixa investigada de 0° a 50°), quando o ângulo de hélice aumenta de 0° a 50°, a rugosidade superficial R_a tem uma queda inicial brusca e posterior declínio lento. Quando o ângulo de hélice é maior que 30°, a influência de λ sobre R_a torna-se insignificante conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11. Variação de R_a de uma superfície fresada em função do ângulo de hélice da ferramenta



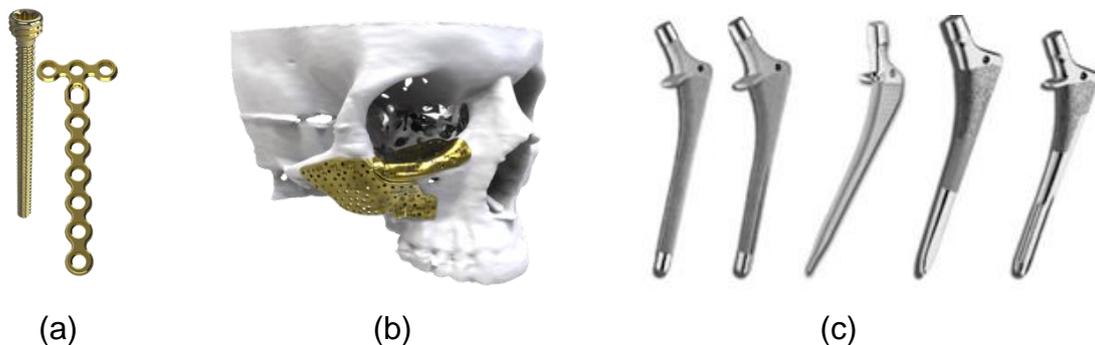
Fonte: CHEN *et al.* (2018).

2.4 Biomateriais: Titânio comercialmente puro (CP) e Ti-6Al-4V ELI

As ligas de titânio apresentam elevadas temperaturas de fusão e dureza, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão, ótima razão resistência-peso e biocompatibilidade, características que as fazem materiais ideais para aplicações na indústria aeroespacial, automotiva, petroquímica e biomédica (RAHMAN, WANG, WONG, 2006).

Para sistemas de placas ósseas e próteses para restauração de articulações, como os componentes ilustrados na Figura 12, ligas de titânio ou aço inoxidável se explicitam como os materiais mais atrativos (STRNAD *et al.*, 2015) devido à excelente combinação de propriedades mecânicas, resistência à corrosão e biocompatibilidade (SUMITA, HANAWA OHNISHI, 2003).

Figura 12. Exemplos de produtos da indústria biomédica fabricados em titânio: (a) placa e parafuso para osteossíntese, (b) placas personalizadas para reconstrução facial e (c) hastes femorais de próteses de quadril



Fontes: ENGIMPLAN (2021) e RATNER *et al.* (2004).

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 (YAFFE, SAUCEDO, KALAINOV, 2011).

De acordo com Ezugwu e Wang (1997), 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 na temperatura ambiente e reforçado pela presença de elementos de liga alfa-gênicos; 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 beta-gênicos; ligas alfa-beta, por fim, apresentam ambas as fases HC e CCC graças à presença de elementos de liga alfa-gênicos e beta-gênicos.

Titânio comercialmente puro (CP), liga alfa, e Ti-6Al-4V ELI (do inglês *Extra Low Interstitial*), liga alfa-beta, normatizados respectivamente por ASTM F67 (2017) e ASTM F136 (2021), são os dois biomateriais à base de titânio mais comuns em implantes ortopédicos (RATNER *et al.*, 2004) e suas propriedades mecânicas de interesse são apresentadas na Tabela 1, enquanto que suas composições químicas são explícitas na Tabela 2.

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 (2017), ASTM F136 (2021) e Leyens e Peters (2003).

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 (2017) e ASTM F136 (2021).

2.5 Osteointegração

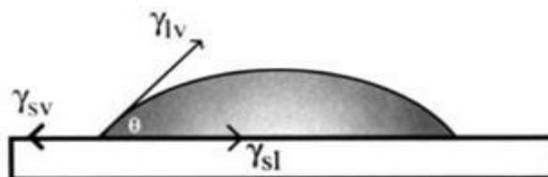
A osteointegração está associada às respostas celulares que resultam na formação de osso junto à superfície de implantes, a depender de fatores como: estado do hospedeiro, técnica cirúrgica, biocompatibilidade, desenho do implante, condições da superfície e controle de cargas após a instalação. Modificações na topografia, energia da superfície e molhabilidade dos implantes, podem modificar a resposta osteoblástica quanto ao número de células adsorvidas na superfície.

2.5.1 Molhabilidade

Para a análise da biocompatibilidade e da osteointegração de implantes, são necessárias informações quantitativas da energia livre, rugosidade e composição química da superfície dos implantes. Tais propriedades influenciam na atração, repulsão e interações das proteínas e das células com a superfície do biomaterial. Uma das formas de obter informações da energia livre superficial dos sólidos, ou

capacidade do líquido molhar o sólido, é por meio da medição do ângulo de contato (θ). Existem diferentes métodos para se obter o ângulo de contato; o mais simples consiste no método da gota sésil, ilustrado na Figura 13.

Figura 13. Método da gota sésil para obtenção do ângulo de contato



Fonte: RATNER *et al.* (2004).

Na situação de equilíbrio, a relação entre as tensões superficiais do líquido com o ar (σ_{La}), a tensão na interface do sólido com o líquido (σ_{sL}) e a tensão superficial sólido-ar (σ_{sa}) são correlacionadas pela Equação 4 proposta por Young:

$$\sigma_{sa} = \sigma_{sL} + \sigma_{La} \cdot \cos(\theta) \quad (4)$$

Nesta equação, a energia da superfície é o parâmetro empregado para quantificar a molhabilidade, a qual influencia nas interações biológicas. Infelizmente, σ_{sa} não pode ser diretamente calculado uma vez que existem dois termos desconhecidos e difíceis de serem quantificados, σ_{sL} e σ_{La} (COUTINHO, ELIAS, 2009). O valor de θ na equação representa a capacidade do líquido molhar a superfície do sólido, ou seja, determina se o material do sólido é hidrofílico ($\theta < 90^\circ$) ou hidrofóbico ($\theta > 90^\circ$). O estudo proposto por Ponsonnet *et al.* (2003) evidenciou que quanto maior o ângulo de contato, ou seja, quão mais hidrofóbico for o material, maior a capacidade de proliferação celular sobre a superfície.

2.5.2 Viabilidade Celular

Tendo em vista que o osso apresenta sensibilidade à adaptações com relação às propriedades mecânicas de um implante, verifica-se em um nível microscópico que o implante impacta em respostas celulares. Os quatro tipos de células contidas no osso são: células osteoprogenitoras, osteoblastos, osteócitos e osteoclastos. A camada de células progenitoras se forma após três estágios: diferenciação,

proliferação e mineralização. A proliferação é o principal processo no que diz respeito ao crescimento celular no corpo humano, uma nova célula surge no momento em que outra se divide, este fenômeno é conhecido como proliferação celular. Diferenciação consiste no processo de transformação de célula tronco em célula especializada. Mineralização é o processo em que uma substância inorgânica resulta em uma matriz orgânica (SIVAKUMAR *et al.*, 2021).

A proporção entre células vivas e células totais, incluindo células mortas, pode ser calculada, evidenciando a chamada viabilidade ou saúde celular. A viabilidade celular pode ser analisada por meio de ensaios de avaliação da citotoxicidade pela redução de tetrazólio (ou MTT, referente a brometo de [3-(4,5-dimethyl-thiazol-2-yl)-2,5-diphenyl tetrazolium bromide]). No referido teste, a proliferação celular é baseada no monitoramento da conversão do MTT, sendo esse produto capaz de modificar o meio e apresentar cor roxa pelas células vivas. Para tanto, são empregados fibroblastos epiteliais conforme Locilento *et al.* (2019). Os dados obtidos fornecem informações que indicam o quanto o material analisado pode interferir na viabilidade celular.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

De maneira a se compreender a influência do processo de fresamento 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. Foram usinados dois diferentes materiais: titânio comercialmente puro (CP) e a liga de titânio Ti-6Al-4V ELI. Empregaram-se duas fresas inteiriças de metal duro de diferentes classes. Finalmente, as velocidades de corte escolhidas respeitaram as recomendações do fabricante de ferramentas, sendo assumidos os valores de 50m/min como mínimo e 90m/min como máximo. Tomando as três variáveis com dois níveis representantes, compôs-se um planejamento fatorial 2^3 , conforme explícito na Tabela 3, o que totalizou 16 testes, sendo 8 referentes ao teste principal e os demais à réplica.

Tabela 3. Planejamento fatorial 2^3 do presente estudo

Variável	Especificação
Ferramenta de corte	Fresa convencional Fresa de alto desempenho
Material do corpo de prova	Ti-6Al-4V ELI Ti CP grau 4
Velocidade de corte	$v_c = 50$ m/min $v_c = 90$ m/min

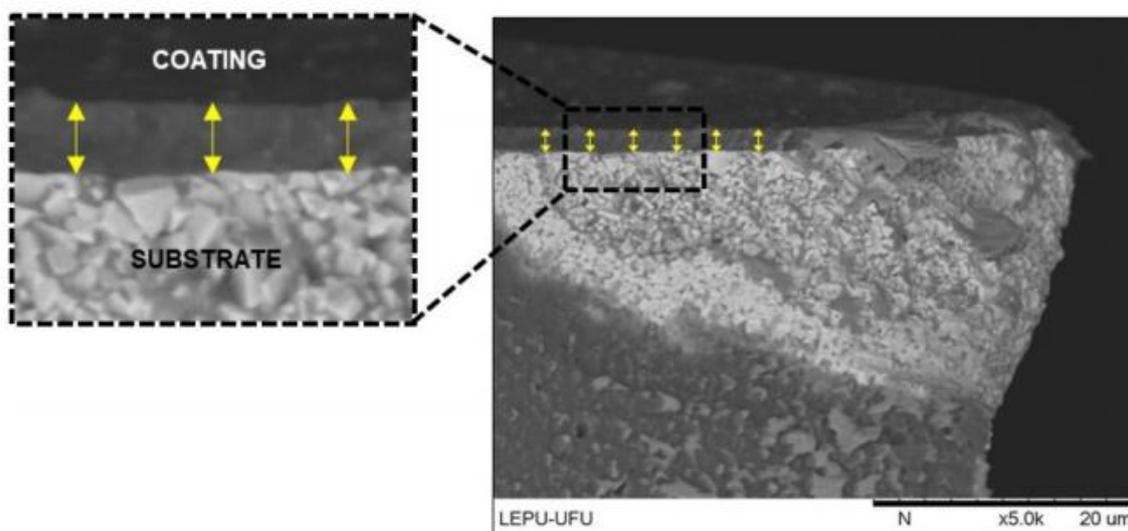
Fonte: Próprio autor.

3.1 Ferramentas de corte

As ferramentas de corte utilizadas foram duas diferentes fresas inteiriças de metal duro da OSG Sulamericana, com quatro cortes e diâmetro de 3 mm, ambas recomendadas para a usinagem de ligas de titânio segundo orientações do fabricante. A primeira delas, denominada fresa convencional, apresenta ângulo de hélice fixo de 30° e classe WXL, revestimento analisado via espectroscopia por dispersão de energia (EDS) por Silva e da Silva (2019) evidenciando a seguinte composição: 42,82% de cromo, 33,66% de alumínio e 17,94% de nitrogênio, sendo indicado para usinar aços endurecidos até 513HV. A Figura 14 ilustra a espessura do revestimento

WXL em uma microfresa.

Figura 14. Espessura do revestimento WXL



Fonte: Silva e da Silva (2019).

Adicionalmente pode-se afirmar que o revestimento WXL apresente resistência térmica à rachaduras, condutividade térmica favorável à usinagem, resistência à oxidação em alta temperatura e resistência ao desgaste, sendo altamente indicada para fresamentos em que se demanda alta eficiência sob alta velocidade de corte, usinagem a seco, estamparia e conformação e rosqueamento de ferro fundido. O fabricante OSG apresenta na Tabela 4 características técnicas adicionais do revestimento em questão.

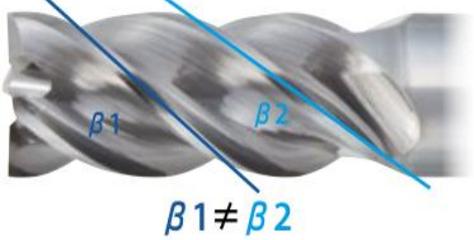
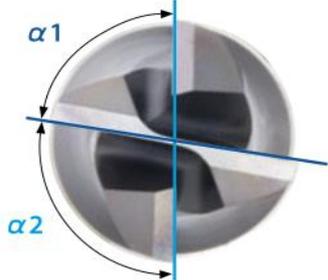
Tabela 4. Características do revestimento WXL

Estrutura	Dureza do Revestimento (GPa)	Espessura (μm)	Temperatura de Oxidação ($^{\circ}\text{C}$)	Coefficiente de atrito	Rugosidade Superficial (R_a)
Multicamadas	38	~3	1100	0,3	0,10-0,25

Fonte: Primus Coating OSG (2021).

A segunda ferramenta, aqui chamada fresa de alto desempenho, apresenta ângulo de saída positivo e ângulo de hélice variável entre 37° e 40° conforme exemplificado na Tabela 5, sendo assim denominada “antivibração”, adicionalmente possui revestimento Duarise, que evita o surgimento de trincas térmicas.

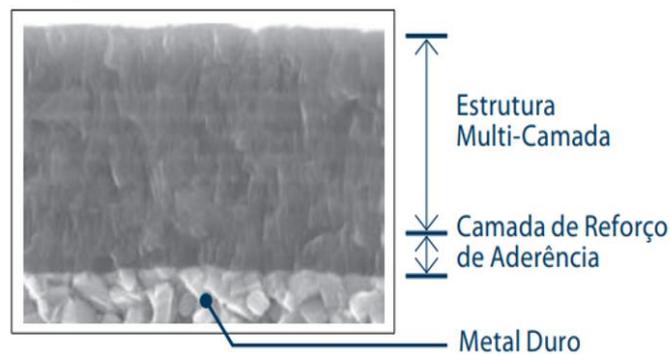
Tabela 5. Características geométricas da fresa AE-VMS

Ângulo de hélice variável	Espaçamento desigual entre os dentes
	

Fonte: Adaptado de OSG (2021).

A Figura 15 ilustra a estrutura do revestimento multicamadas Duarise presente na fresa de alto desempenho.

Figura 15. Revestimento da fresa AE-VMS

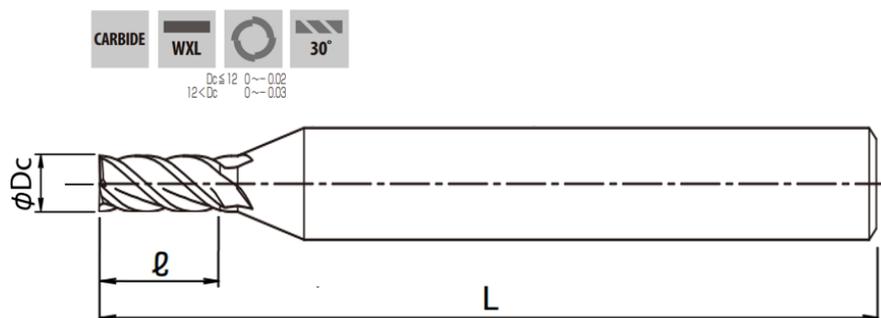


Fonte: OSG (2021).

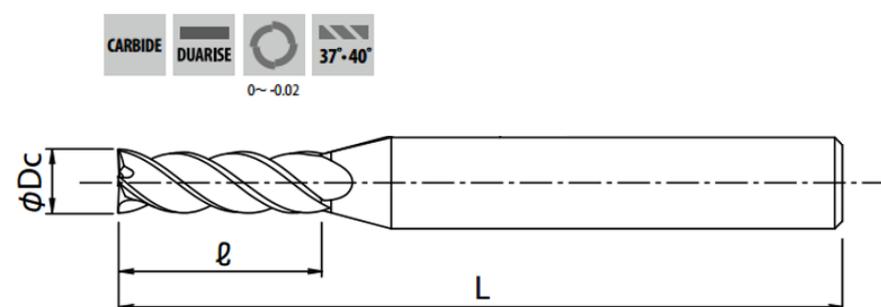
A Tabela 6 compara as ferramentas de corte utilizadas como variáveis no presente trabalho em termos construtivos gerais. Ressalta-se que de modo a eliminar variáveis adicionais que poderiam configurar influência sob as variáveis de resposta, utilizou-se o microscópio confocal Alicona InfiniteFocus SL para a caracterização do raio de aresta das duas fresas, de forma a verificar, de antemão, se essa grandeza configurava uma fonte de variabilidade sobre os resultados do trabalho.

Tabela 6. Características das fresas comerciais convencional e de alto desempenho

Fresa convencional



Fresa de alto desempenho



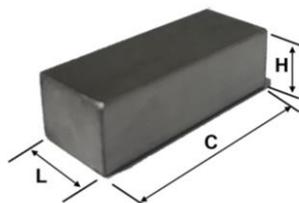
Fonte: Adaptado de OSG.

3.2 Detalhamento dos materiais e geometria dos corpos de prova

Como materiais a serem usinados selecionou-se o titânio comercialmente puro (CP) grau 4 e a liga Ti-6Al-4V ELI. A escolha do Ti-CP grau 4 se deu por consistir no titânio comercialmente puro com maior resistência mecânica, fator que tende a desfavorecer a usinabilidade do material (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013) 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 elevada resistência mecânica e consiste na liga de titânio mais comumente utilizada como biomaterial. Preliminarmente ao fresamento, realizou-se a preparação dos corpos de prova por meio do processo de aplainamento, obtendo-se blocos retangulares como o apresentado na Figura 16, com as dimensões médias $C = 25,04$ mm, $L = 10,09$ mm e $H = 8,06$ mm. Após o aplainamento dos corpos de prova, foram obtidos os parâmetros de rugosidade R_a (rugosidade média), R_q (Desvio Médio Quadrático), R_p (Pico mais elevado), R_v (Vale mais profundo), R_z (R_p+R_v) e R_t (Altura total do perfil) através de um rugosímetro portátil digital Mitutoyo SJ-210 com *cut-off* de 2,5 mm.

Dessa forma, possibilitou-se o levantamento de um histórico dos perfis de rugosidade das superfícies usinadas.

Figura 16. Ilustração dos corpos de prova e suas dimensões padrão

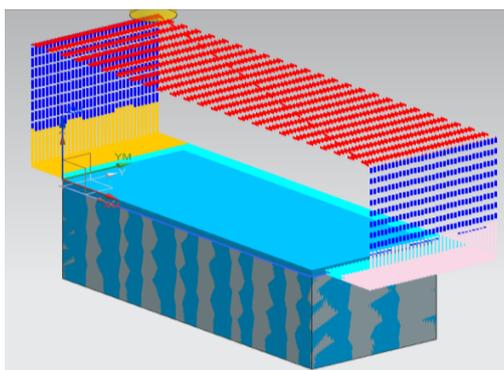


Fonte: Próprio autor.

3.3 Fresamento dos corpos de prova

Obtidos os corpos de prova necessários para os ensaios e respectivas réplicas, simulou-se o processo de faceamento via fresamento frontal com fresa de topo em máquina-ferramenta provida de três eixos 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), de modo a se obter o código G contendo os comandos da máquina-ferramenta. Adotou-se o corte concordante de forma a se evitar desgastes prematuros da aresta principal de corte. Na Figura 17 é possível observar a trajetória da ferramenta durante a usinagem.

Figura 17. Ilustração do caminho da ferramenta gerado pelo CAM



Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros de corte utilizados na condução dos ensaios e presentes de maneira explícita ou implícita no código G seguiram as recomendações do fabricante

das ferramentas de corte.

A Tabela 7 apresenta os principais parâmetros de corte: 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 7. Ferramentas comerciais e parâmetros de corte utilizados

Ferramenta	v_c [m/min]	D_c [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm]
AE-VMS e WXL-SEM	50 ou 90	3	0,3	0,3	0,018

Fonte: OSG (2021).

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem vertical com três eixos ROMI® D 600 (Figura 18), cuja potência máxima é de 15 kW, rotação máxima de 10.000 rpm e velocidade de avanço máxima de 30 m/min. O comando numérico computadorizado corresponde ao Siemens Sinumerik 828D.

Figura 18. Centro de usinagem vertical ROMI® D 600



Fonte: Próprio autor.

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.

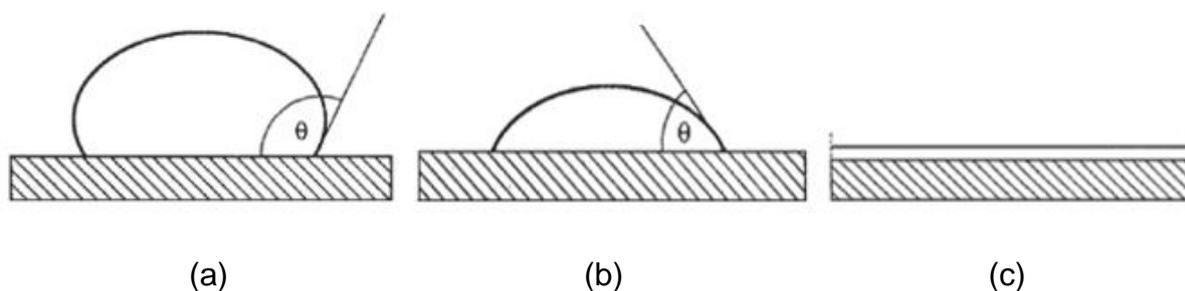
3.4 Avaliação da integridade superficial

Finalizada a usinagem dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos a uma caracterização superficial no microscópio confocal, de modo a se obterem os parâmetros R_a (rugosidade média aritmética), R_{sk} (fator de assimetria do perfil) e R_{ku} (fator de achatamento do perfil), empregando-se para isso um *cut off* de 0,25 mm, conforme especificação da norma NBR ISO 4288 (2008) para superfícies com rugosidade média entre 0,02 μm e 1 μm .

3.5 Avaliação de molhabilidade

A avaliação do ângulo de contato entre um líquido e a superfície na qual o mesmo é depositado promove a definição da característica superficial quanto a sua hidrofilicidade, conforme representado na Figura 19, ângulos de contato maior que 90° indicam que não há o molhamento do sólido pelo líquido, ou seja, não ocorre o espalhamento do líquido sobre a superfície caracterizada como hidrofóbica; ângulos de contato menores que 90° por sua vez indicam que há molhamento e a superfície é propícia para o espalhamento do líquido, ou seja, hidrofílica; enquanto que ângulos de contato nulos indicam que o líquido se espalha indefinidamente sobre a superfície, sendo o molhamento total.

Figura 19. Representação do ângulo de contato (a) maior do que 90°, (b) menor do que 90° e (c) espalhamento total



Fonte: LUZ *et al.* (2008).

No presente estudo visando a determinação da molhabilidade das superfícies usinadas utilizou-se o método da gota séssil por meio da aplicação de um volume

equivalente a 1mL sobre cada corpo de prova com uma pipeta Pasteur, posteriormente, fotografou-se a gota resultante conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20. Avaliação de molhabilidade das superfícies usinadas com fresa convencional e baixa velocidade de corte em (a) titânio comercialmente puro grau 4 e (b) Ti-6Al-4V ELI



Fonte: Próprio autor.

Com as gotas devidamente fotografadas, determinou-se o ângulo de contato utilizando-se de um programa em LabView que apresenta como resultados os ângulos calculados via quatro diferentes metodologias: *fit* círculo, em que pontos mapeados na superfície externa em contato com o ar da gota fotografada são extrapolados para um círculo e a partir do primeiro ponto determina-se o ângulo de contato; *fit* elipse, onde de igual modo, através dos pontos mapeados extrapola-se uma elipse; método dois pontos, onde a inclinação da reta gerada por dois pontos subsequentes determina o ângulo de contato; e o último: método dois vetores, em que as inclinações de dois vetores tangentes ao perfil resultante da interpolação de ao menos três pontos subsequentes determina o ângulo de contato.

A Figura 21 elucida o ambiente onde avaliou-se a hidrofiliabilidade das amostras.

Figura 21. Programa para aquisição dos ângulos de contato das superfícies usinadas por meio de diferentes metodologias de avaliação



Fonte: Próprio autor.

3.6 Análise estatística dos resultados

O tratamento dos resultados obtidos em termos de integridade superficial, embasado em análises estatísticas consolidadas, foi de fundamental importância tanto para a compreensão da significância das variáveis analisadas e suas respectivas interações quanto para a definição da melhor estratégia a ser utilizada quando se objetiva otimizar osteointegração.

Nos tópicos a seguir é fundamentada a teoria utilizada para análise dos resultados.

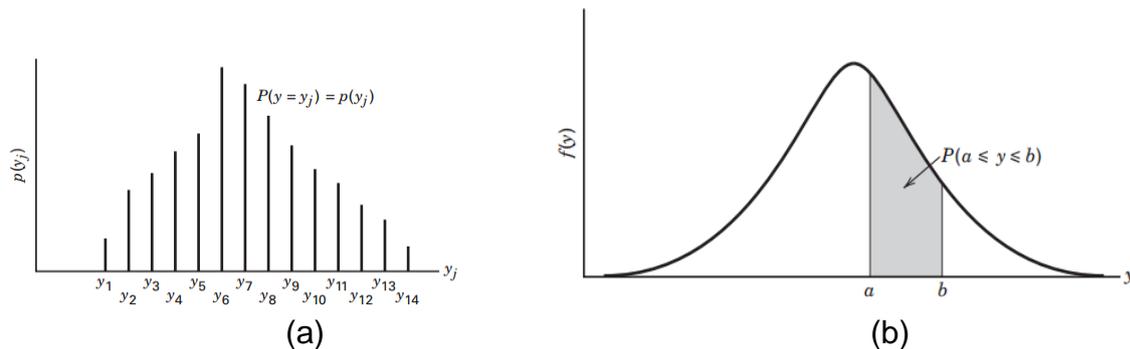
3.6.1 Conceitos estatísticos introdutórios

Conforme Montgomery (2017), a estrutura de probabilidade de uma variável aleatória, aqui chamada y , é descrita por sua distribuição de probabilidade. Se y for discreto, denomina-se a distribuição de probabilidade de y , $p(y)$, como função de

massa de probabilidade de y . Se y for contínuo, a distribuição de probabilidade de y , $f(y)$, é chamada de função de densidade de probabilidade para y .

A Figura 22 ilustra distribuições de probabilidade discretas e contínuas hipotéticas. Observa-se que na distribuição de probabilidade discreta da Figura 22a, é a altura da função $p(y_j)$ que representa a probabilidade, enquanto no caso contínuo da Figura 22b, é a área sob a curva $f(y)$ associada a um dado intervalo que representa a probabilidade.

Figura 22. Distribuição de probabilidade (a) discreta e (b) contínua



Fonte: MONTGOMERY (2017).

As propriedades das distribuições de probabilidade podem ser resumidas quantitativamente da seguinte forma:

➤ y como variável discreta:

$$0 \leq p(y_j) \leq 1, \text{ para todos os valores de } y_j \quad (5)$$

$$P(y = y_j) = p(y_j), \text{ para todos os valores de } y_j \quad (6)$$

$$\sum_{\text{todos os valores de } y_j} p(y_j) = 1 \quad (7)$$

➤ y como variável contínua:

$$0 \leq f(y) \quad (8)$$

$$P(a \leq y \leq b) = \int_a^b f(y) dy \quad (9)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(y) dy = 1 \quad (10)$$

A inferência estatística faz uso considerável de quantidades calculadas a partir das observações amostrais. Define-se uma estatística como qualquer função das observações em uma amostra que não contém parâmetros desconhecidos. Por exemplo, supondo que y_1, y_2, \dots, y_n representa uma amostra, então a média da amostra será:

$$\bar{y} = (\sum_{i=1}^n y_i) / n \quad (11)$$

A variabilidade ou dispersão de uma distribuição de probabilidade pode ser medida pela variância, definida como:

$$\sigma^2 = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} (y - \mu)^2 f(y) dy & y \text{ contínuo} \\ \sum_{\text{todo } y} (y - \mu)^2 p(y_j) & y \text{ discreto} \end{cases} \quad (12)$$

Para uma determinada amostragem, a variância é dada por:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (13)$$

Média e variância são medidas de tendência central e dispersão da amostra, respectivamente. A soma de quadrados de y_i observações é dada por:

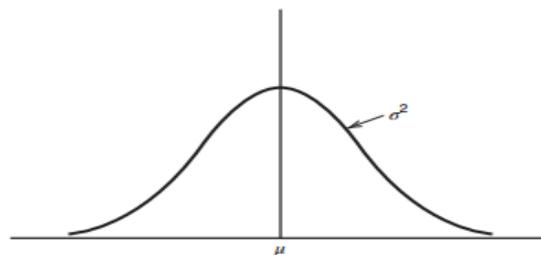
$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (14)$$

O número de graus de liberdade de uma soma de quadrados SS é dado por $(n-1)$, em que n é o número de amostras. Já com relação a distribuição estatística de determinada amostragem, pode-se afirmar que uma das distribuições mais importantes é a normal. De maneira geral, se y é uma variável aleatória normal, a distribuição de probabilidade de y é dada por:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)\left[\frac{(y-\mu)}{\sigma}\right]^2} \quad -\infty < y < \infty \quad (15)$$

em que $-\infty < \mu < \infty$ é a média da distribuição e $\sigma^2 > 0$ é a variância. A distribuição normal é apresentada na Figura 23.

Figura 23. Distribuição normal



Fonte: MONTGOMERY (2017).

3.6.2 Teste-t de Student

Uma hipótese estatística é uma declaração sobre os parâmetros de uma distribuição de probabilidade ou os parâmetros de um modelo. A hipótese reflete alguma conjectura sobre a situação do problema. Isso pode ser declarado formalmente como:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 &= \mu_2 \\ H_1: \mu_1 &\neq \mu_2 \end{aligned} \quad (16)$$

em que 1 e 2 são os diferentes parâmetros analisados.

A afirmação $H_0: \mu_1 = \mu_2$ é chamada de hipótese nula e $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ é chamada de hipótese alternativa. A hipótese alternativa especificada aqui é chamada de hipótese alternativa bilateral porque seria verdadeira se $\mu_1 < \mu_2$ ou se $\mu_1 > \mu_2$.

O teste estatístico apropriado a ser usado para comparar duas médias em uma amostragem aleatória é:

$$t_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (17)$$

Em que \bar{y}_1 e \bar{y}_2 são as médias das amostras, n_1 e n_2 são os tamanhos das amostras e S_p é uma estimativa da variância comum, calculada como:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (18)$$

S_1^2 e S_2^2 são as variâncias individuais das amostras. A quantidade $S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$ no denominador da Equação 18 é frequentemente chamada de erro padrão da diferença de médias no numerador.

Para se determinar quando rejeitar a hipótese nula, faz-se necessário comparar t_0 ao t da distribuição com $(n_1 + n_2 - 2)$ graus de liberdade. Se $|t_0| > t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$, em que $t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$ é o ponto percentual superior $\alpha/2$ da distribuição t com $(n_1 + n_2 - 2)$ graus de liberdade, pode-se rejeitar a hipótese nula e concluir que as médias são diferentes. Este procedimento de teste é usualmente chamado de teste-t para uma amostra dupla. Alfa (α) também conhecido como nível de significância.

Uma maneira de relatar os resultados de um teste de hipótese é afirmar que a hipótese nula foi ou não rejeitada em um α -valor ou nível de significância especificado. Isso geralmente é chamado de teste de nível de significância fixo.

O valor P é a probabilidade do teste estatístico assumir um valor que é pelo menos tão extremo quanto o valor observado da estatística quando a hipótese nula H_0 for verdadeira. Assim, um valor P transmite muitas informações sobre o peso da evidência contra H_0 e, portanto, um tomador de decisão pode tirar uma conclusão em qualquer nível de significância especificado. Formalmente, define-se o valor P como o menor nível de significância que levaria à rejeição da hipótese nula H_0 . Define-se o teste estatístico (e os dados) de significantes quando a hipótese nula H_0 é rejeitada; portanto, pode-se pensar no valor P como o menor nível α no qual os dados são significativos.

3.6.3 Análise de Variância (*Analysis of variance - ANOVA*)

O nome análise de variância é derivado do particionamento da variabilidade total nas partes que a compõem. Nesse sentido, em um planejamento fatorial 2^3 , em que três variáveis denominadas genericamente como A, B e C são analisadas em 2 níveis distintos, a análise de variância é resumida conforme exposto na Tabela 8.

A soma de quadrados total neste caso é dada conforme a Equação 19 abaixo.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (19)$$

Enquanto que a soma de quadrados para as variáveis individuais é dada por:

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (20)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{i=1}^b y_{i\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (21)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{i=1}^c y_{i\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (22)$$

Tabela 8. Análise de Variância para um modelo com três fatores fixos

Fonte de variabilidade	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	Soma quadrática esperada	F ₀
A	SS _A	a-1	MS _A	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS _B	b-1	MS _B	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_i^2}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS _C	c-1	MS _C	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \gamma_i^2}{c-1}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	MS _{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
AC	SS _{AC}	(a-1)(c-1)	MS _{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS _{BC}	(b-1)(c-1)	MS _{BC}	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS _{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	MS _{ABC}	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Erro	SS _E	abc(n-1)	MS _E	σ^2	
Total	SS _T	abcn-1			

Fonte: MONTGOMERY (2017).

Entretanto, para tornar a análise completa faz-se necessário computar as somas de quadrados das interações entre as variáveis analisadas, obtidas conforme segue.

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B = SS_{subtotais(AB)} - SS_A - SS_B \quad (23)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i.k.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C = SS_{subtotais(AC)} - SS_A - SS_C \quad (24)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{.jk.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C = SS_{subtotais(BC)} - SS_B - SS_C \quad (25)$$

Finalmente, a soma de quadrados para a interação entre as três variáveis é dada por:

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} =$$

$$= SS_{subtotais(BC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (26)$$

A soma de quadrados do erro, por sua vez, é dada pela subtração da soma de quadrados de cada variável principal e interações da soma de quadrados total, ou seja:

$$SS_E = SS_T - SS_{subtotais(ABC)} \quad (27)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando que as variáveis de resposta analisadas neste trabalho são: rugosidade média, rugosidade *skewness* e rugosidade *kurtosis*, os tópicos a seguir apresentarão o comportamento de tais parâmetros em função das variáveis de entrada. Adicionalmente, são apresentados resultados em termos de molhabilidade das superfícies usinadas.

4.1 Caracterização dos materiais e ferramentas empregados

4.1.1 Estado de superfície prévio ao processo de fresamento

A caracterização prévia dos corpos de prova submetidos ao processo de aplainamento apontou superfícies em Ti-6Al-4V ELI com rugosidade média dentro da classe N8 (R_a entre 1,6 μm e 3,2 μm) e classe N9 para superfícies em Ti-CP (R_a entre 3,2 μm e 6,3 μm), conforme valores médios apresentados na Tabela 9, evidenciando que anteriormente ao processo de fresamento os corpos de prova em Ti-6Al-4V ELI possuíam, em média, rugosidade 32% menor do que aquela observada nos corpos de prova em Ti-CP, comportamento oposto ao esperado, dado que materiais mais duros tendem a dificultar a obtenção de superfícies com menor rugosidade média.

Tabela 9. Médias das rugosidades dos corpos de prova após o processo de aplainamento

Amostra	Material	R_a [μm]
1 a 8	Ti-CP	3,712 \pm 0,537
9 a 16	Ti-6Al-4V ELI	2,536 \pm 0,258

Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Avaliação da influência de parâmetros geométricos e dimensionais das ferramentas de corte

A caracterização do raio de aresta das duas fresas utilizadas como variáveis providenciou as dimensões apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10. 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 \pm desvio padrão	$r_n = 7,247 \pm 0,3934$	$r_n = 7,492 \pm 1,056$

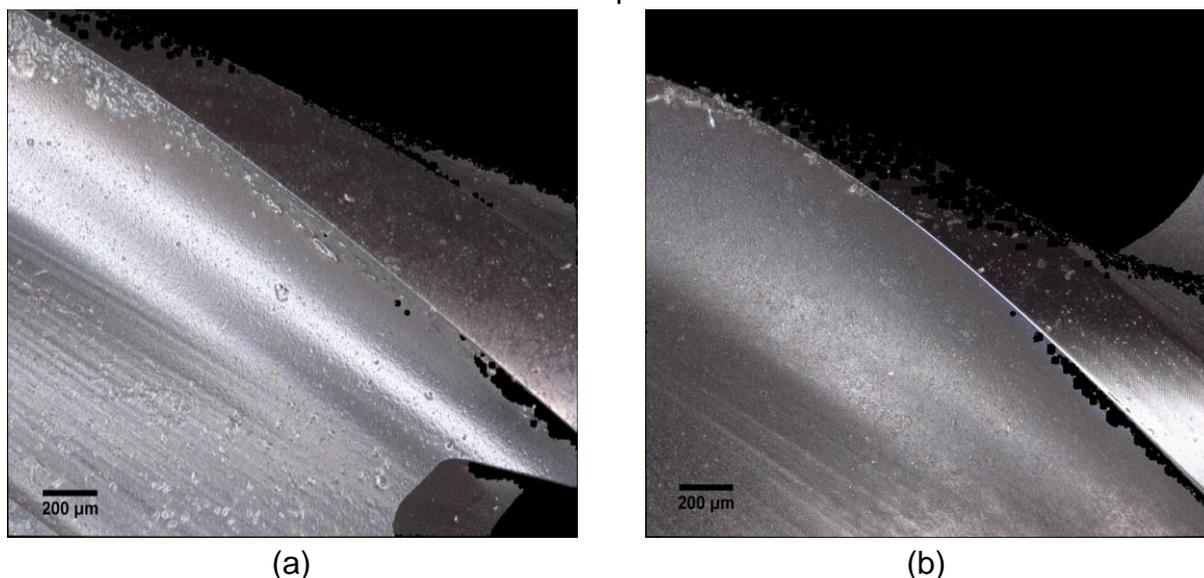
Fonte: Próprio autor.

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, ou seja, o raio da aresta principal de corte não configura fonte de variabilidade.

A Figura 24 contém imagens representativas das arestas principais de corte da fresa convencional (Figura 24a) e da fresa de alto desempenho (Figura 24b), nela é possível visualizar a diferenciação entre ângulo de hélice fixo e ângulo de hélice variável para as arestas principais de corte das fresas utilizadas.

Salienta-se que o ângulo de hélice variável característico da ferramenta AE-VMS não consistiu fonte de variabilidade do estudo pois a variação do ângulo em questão ocorre de maneira efetiva entre as diferentes arestas principais de corte ao longo do comprimento de corte da fresa, entretanto, a profundidade de usinagem adotada de 0,3 mm faz com que a variação seja desprezível e um ângulo aproximadamente constante esteja na região ativa da fresa durante o faceamento.

Figura 24. Aresta principal de corte da (a) fresa convencional e da (b) fresa de alto desempenho



Fonte: Próprio autor.

4.2 Rugosidade obtida após o fresamento

4.2.1 Rugosidade média (R_a)

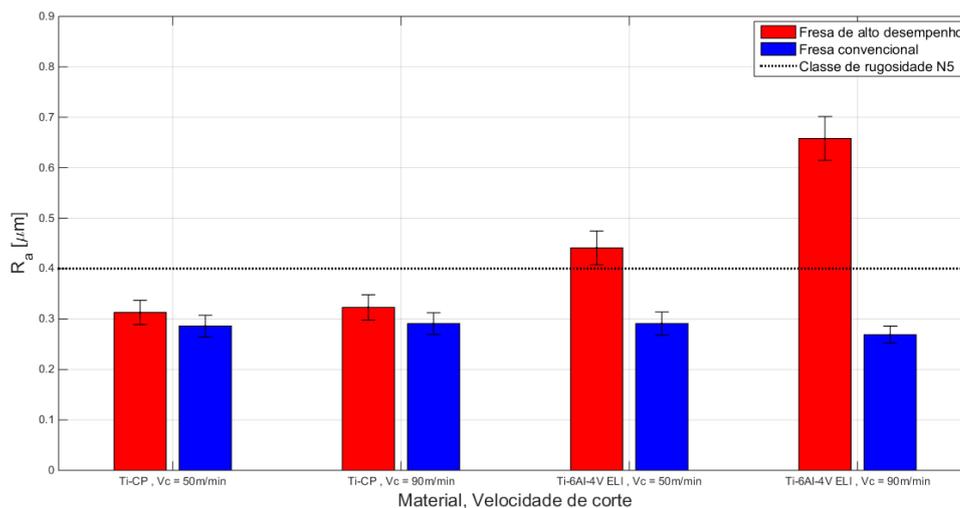
O comportamento da rugosidade média para as duas ferramentas estudadas em função dos materiais dos corpos de prova e das velocidades de corte pré-estabelecidas é apresentado na Figura 25. Observa-se que, para a ferramenta convencional, independentemente do material e da velocidade de corte, obtém-se rugosidade média inferior a $0,3 \mu\text{m}$ que, de acordo com a norma ISO 1302 (2002), se enquadra na classe de rugosidade N5 (para rugosidades médias inferiores a $0,4 \mu\text{m}$).

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 CP e significativamente inferiores no fresamento da liga Ti-6Al-4V ELI foram obtidas. Tal resultado pode ser explicado pela característica geométrica da fresa de alto desempenho relacionada ao passo diferencial, que ocasiona diferentes velocidades de avanço por dente entre as arestas principais de corte e conseqüentemente, distintos esforços de corte entre as arestas, demonstrando que para a usinagem de titânio, especialmente a liga Ti-6Al-4V ELI, constitui uma condição desvantajosa em

termos de qualidade da superfície final.

Adicionalmente, para a ferramenta de alto desempenho, observou-se que a rugosidade média é significativamente menor (-72%) para o Ti-CP 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, conseqüentemente, elevação da temperatura (Machado *et al.*, 2015); porém, esperaria-se que o mesmo aumento observado no Ti-6Al-4V ELI ocorresse com o Ti-CP, material mais dúctil, fato que não se verificou.

Figura 25. Gráfico do comportamento da rugosidade média em função do tipo de fresa, do material e da velocidade de corte



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 11 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.

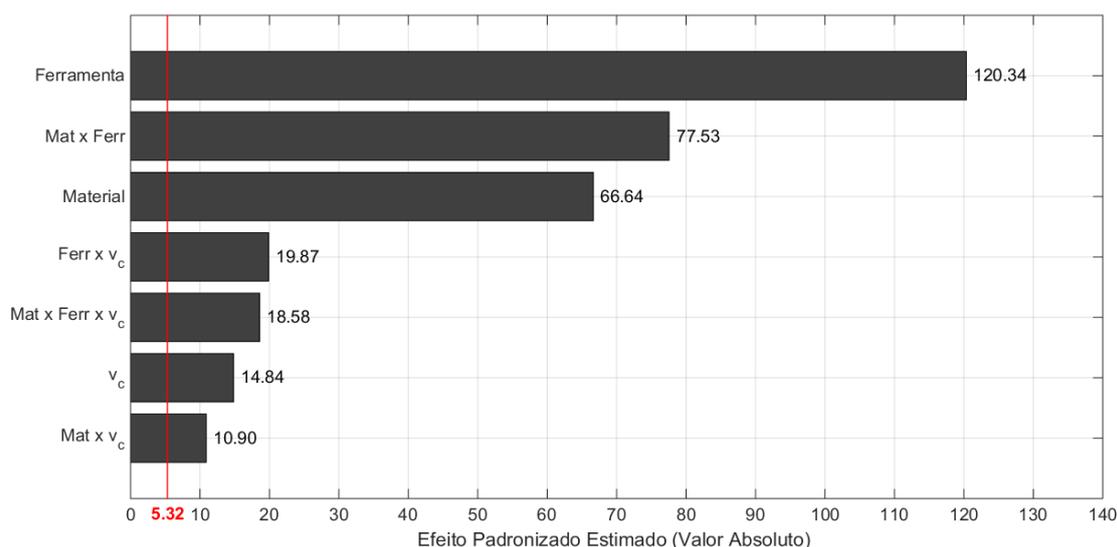
Tabela 11. ANOVA aplicada sobre os resultados de rugosidade média obtidos

Rugosidade Média R_a						
Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	F_0	p-valor	Contribuição percentual
Material (A)	0,049506	1	0,049506	66,641427	0,000038	19,8%
Ferramenta (B)	0,089401	1	0,089401	120,34461	0,000004	35,7%
Velocidade de corte (C)	0,011025	1	0,011025	14,840989	0,004861	4,4%
AB	0,0576	1	0,0576	77,536598	0,000022	23,0%
AC	0,0081	1	0,0081	10,903584	0,010826	3,2%
BC	0,014762	1	0,014762	19,871782	0,002117	5,9%
ABC	0,013806	1	0,013806	18,58489	0,002577	5,5%
Erro	0,005943	8	0,000743			2,4%
Total	0,250144	15	0,016676			

Fonte: Próprio autor.

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 com uma contribuição percentual de 35,7%, conforme explicitado no gráfico de Pareto da Figura 26.

Figura 26. Gráfico de Pareto para o Teste de Significância: rugosidade média

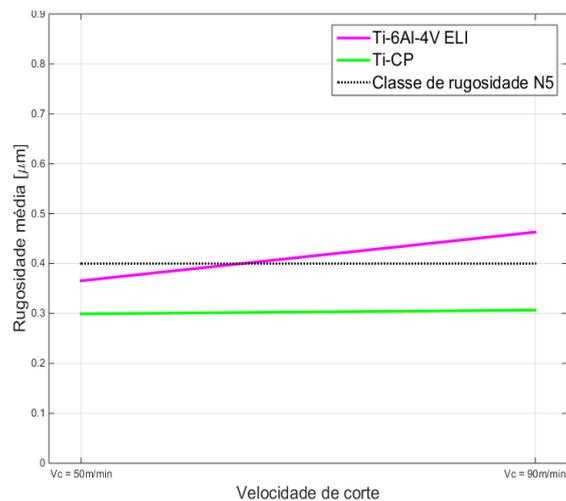
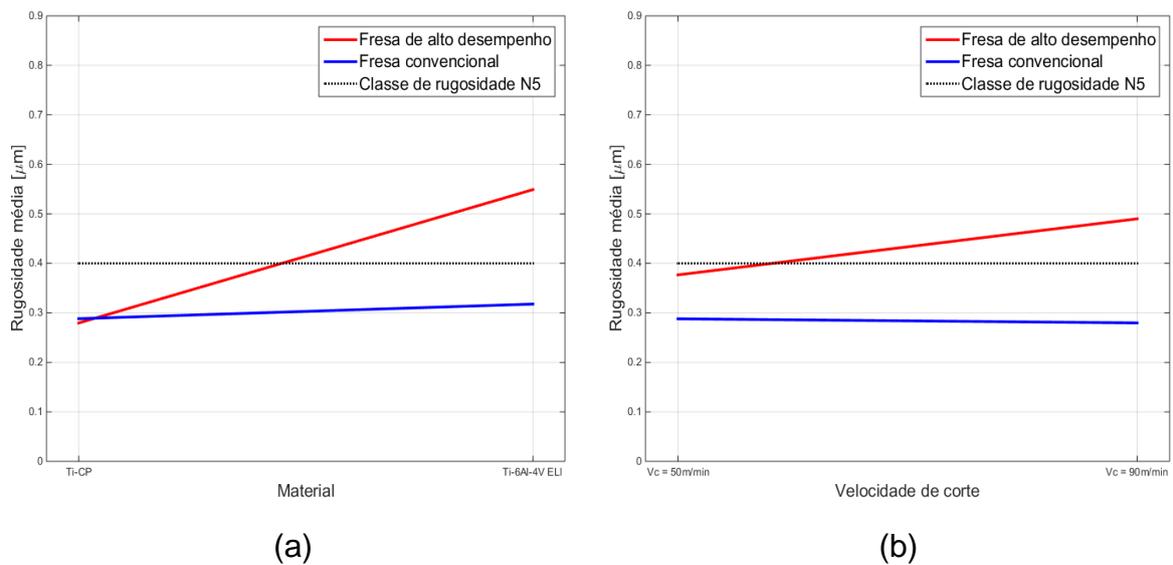


Fonte: Próprio autor.

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 27. Com eles, corrobora-se o exposto na análise da Figura 25, que demonstra resultado vantajoso em termos de rugosidade média quando se utiliza fresa convencional na usinagem de titânio comercialmente puro sob baixa velocidade de corte.

Figura 27. 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



(c)

Fonte: Próprio autor.

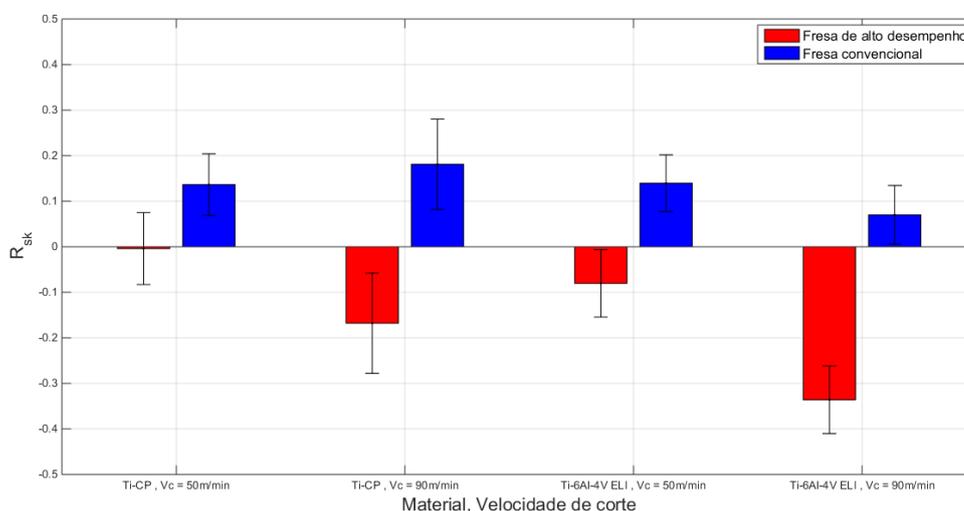
4.2.2 Fator de assimetria do perfil (R_{sk})

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 28. É possível identificar comportamentos completamente opostos para as duas fresas analisadas, tomando-se as mesmas combinações de variáveis, o que implica em respostas distintas em termos de características superficiais.

Para a ferramenta convencional, independentemente do material e velocidade de corte empregada, obteve-se R_{sk} positivo, o que representa superfícies majoritariamente compostas por vales, em especial, no fresamento do titânio comercialmente puro.

Para a ferramenta de alto desempenho, independentemente do material e da velocidade de corte, obteve-se R_{sk} negativo, ou seja, superfícies predominantemente compostas por picos. 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 R_{sk} .

Figura 28. Gráfico do comportamento do fator de assimetria do perfil em função do material e velocidade de corte



Fonte: Próprio autor.

Destaca-se que a combinação entre fresa de alto desempenho, titânio comercialmente puro e velocidade de corte de 50 m/min produziu R_{sk} muito próximo de zero e, portanto, distribuição simétrica de picos e vales conforme ratificado pela Figura 29, que ilustra a superfície obtida pela combinação dos parâmetros

supracitados.

Figura 29. Fotografia da superfície usinada com fresa de alto desempenho, $v_c = 50\text{m/min}$ e titânio comercialmente puro



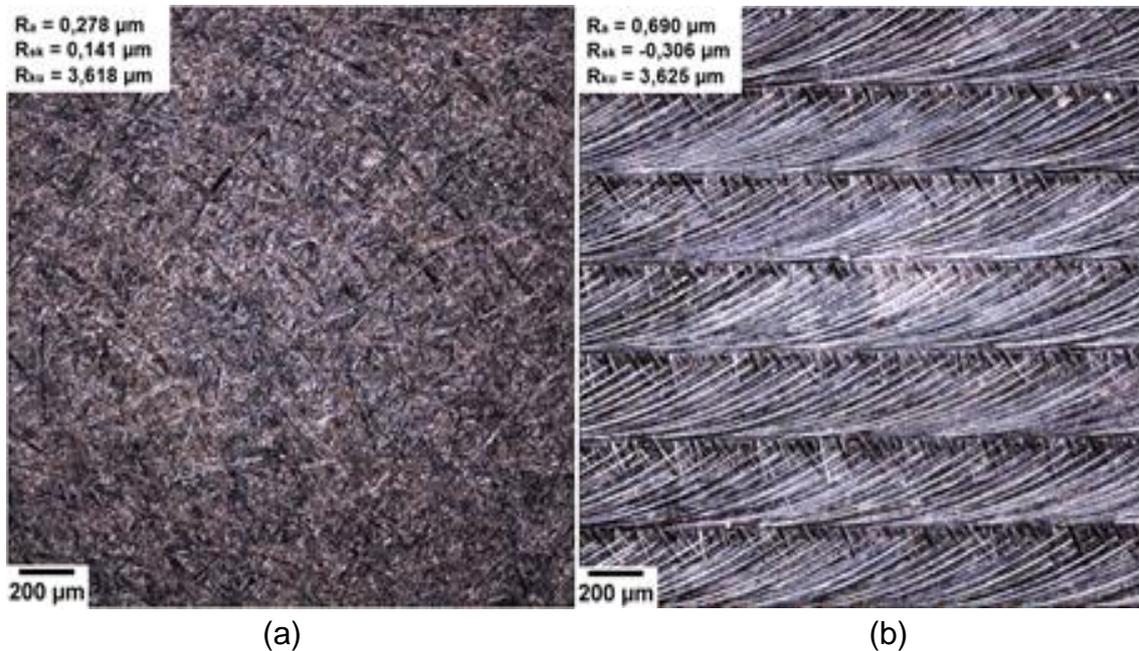
Fonte: Próprio autor.

A Figura 30 apresenta as superfícies com os resultados mais contrastantes em termos do parâmetro *skewness*, isto é, superfície com maior R_{sk} - usinada com fresa convencional, alta velocidade de corte e material do corpo de prova titânio comercialmente puro - e superfície com menor R_{sk} - usinada com fresa de alto desempenho, alta velocidade de corte e material do corpo de prova Ti-6Al-4V ELI - caracterizando distribuições de rugosidade assimétrica à direita e assimétrica à esquerda, respectivamente.

Fica evidente uma diferenciação em termos das topografias analisadas, em especial observa-se no caso em que o *skewness* é máximo (Figura 30b) uma marcação bem definida da penetração de trabalho, explicada pelas elevadas alturas dos picos, uma vez que essa superfície é predominantemente composta por tal topografia, explícita pela rugosidade média elevada. Tal marcação de a_e não é observada no caso em que o *skewness* é mínimo (Figura 30a), pois a superfície é caracterizada por vales largos de altura reduzida conforme demonstrado pela baixa

rugosidade média.

Figura 30. Superfícies usinadas com (a) fresa convencional, $v_c = 90\text{m/min}$ e titânio comercialmente puro e (b) fresa de alto desempenho, $v_c = 90\text{m/min}$ e Ti-6Al-4V ELI



Fonte: Próprio autor.

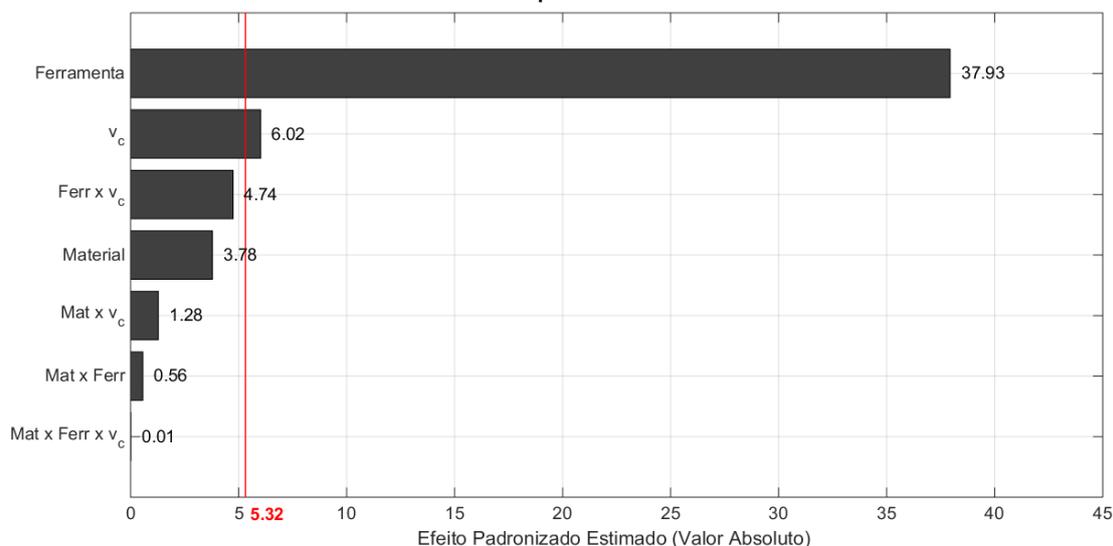
A Tabela 12 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a assimetria do perfil R_{sk} ao nível de confiança pré-estabelecido, de forma a aferir a influência das variáveis de entrada e suas interações sobre o referido parâmetro. O valor F_0 indica que a variável ferramenta é a mais influente, com uma contribuição percentual de 60,8% seguida pela variável velocidade de corte, conforme ilustrado no gráfico de Pareto da Figura 31.

Tabela 12. ANOVA aplicada sobre os resultados de assimetria do perfil obtidos

Fator de assimetria do perfil R_{sk}						
Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	F_0	p-valor	Contribuição percentual
Material (A)	0,031064	1	0,031064	3,787867	0,087498	6,1%
Ferramenta (B)	0,311085	1	0,311085	37,93287	0,000271	60,8%
Velocidade de corte (C)	0,049395	1	0,049395	6,023099	0,039676	9,7%
AB	0,004658	1	0,004658	0,567991	0,472654	0,9%
AC	0,010558	1	0,010558	1,28736	0,289385	2,1%
BC	0,038908	1	0,038908	4,744282	0,061039	7,6%
ABC	0,000127	1	0,000127	0,015433	0,904199	0,0%
Erro	0,065607	8	0,008201			12,8%
Total	0,511401	15	0,034093			

Fonte: Próprio autor.

Figura 31. Gráfico de Pareto para o Teste de Significância: fator de assimetria do perfil



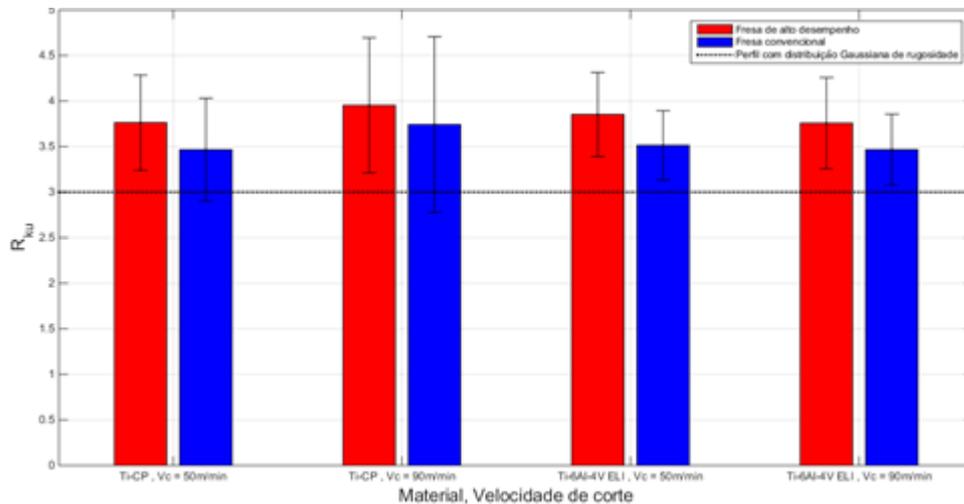
Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Fator de achatamento do perfil (R_{ku})

O comportamento do parâmetro de achatamento do perfil R_{ku} para as duas ferramentas estudadas em função dos materiais e das velocidades de corte é apresentado na Figura 32. Afere-se que em todas as condições testadas, foram obtidos valores de R_{ku} maiores que 3, caracterizando superfícies com picos e vales afilados com repetibilidade alta dentro do perfil analisado. Caso fossem obtidos valores de R_{ku} menores que 3, as superfícies caracterizariam-se por picos e vales

mais largos.

Figura 32. Gráfico do comportamento do fator de achatamento do perfil em função do material e velocidade de corte



Fonte: Próprio autor.

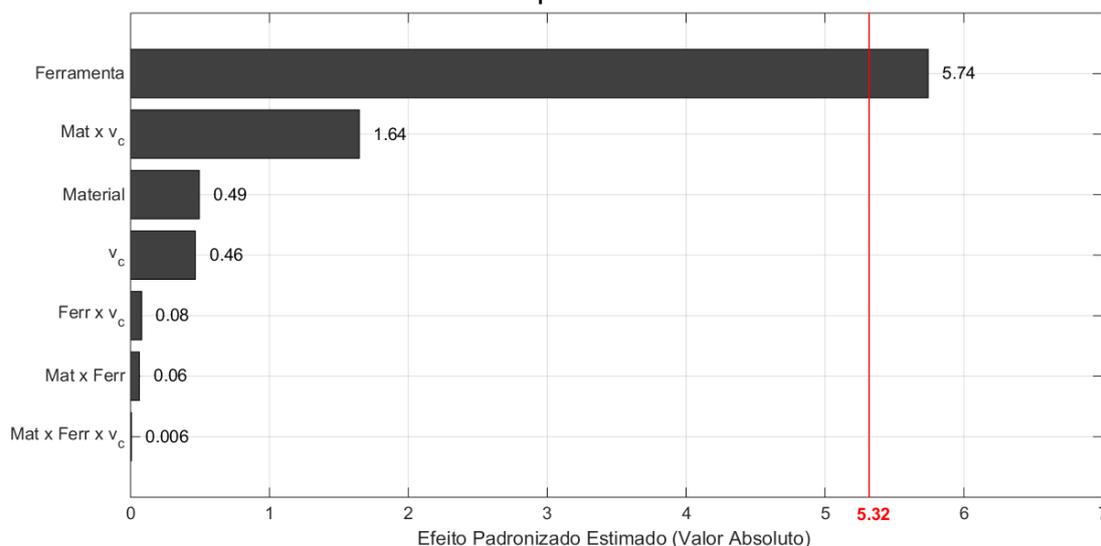
Assim como para as variáveis de resposta anteriores, a análise de variância (ANOVA) para o fator de achatamento do perfil ao nível de confiança pré-estabelecido é apresentada na Tabela 13, de maneira a avaliar a influência das variáveis e suas interações sobre o parâmetro mencionado. Similarmente, o valor F_0 indicou que a variável ferramenta corresponde à mais influente, conforme ilustrado no gráfico de Pareto da Figura 33. Omitiram-se os diagramas de efeitos principais, neste caso, pela significativa e exclusiva influência da variável ferramenta sobre R_{ku} .

Tabela 13. ANOVA aplicada sobre os resultados de achatamento do perfil obtidos

Fator de achatamento do perfil R_{ku}						
Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média	F_0	p-valor	Contribuição percentual
Material (A)	0,027889	1	0,027889	0,495581	0,501422	3,0%
Ferramenta (B)	0,323192	1	0,323192	5,743049	0,043416	34,8%
Velocidade de corte (C)	0,026244	1	0,026244	0,46635	0,513957	2,8%
AB	0,0036	1	0,0036	0,063971	0,806704	0,4%
AC	0,09272	1	0,09272	1,647617	0,235213	10,0%
BC	0,004489	1	0,004489	0,079768	0,784781	0,5%
ABC	0,000342	1	0,000342	0,006082	0,939755	0,0%
Erro	0,450203	8	0,056275			48,5%
Total	0,92868	15	0,061912			

Fonte: Próprio autor.

Figura 33. Gráfico de Pareto para o Teste de Significância: fator de achatamento do perfil



Fonte: Próprio autor.

Com exceção dos ensaios realizados sobre a liga Ti-6Al-4V ELI utilizando-se fresa de alto desempenho, obteve-se superfícies com rugosidade média inferior a $0,4 \mu\text{m}$, de forma muito similar ao reportado por Rao, Dandekar e Shin (2011) 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.

Andrukhov *et al.* (2020) 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.* (2002) 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 nesta liga é superior àquela verificada para o titânio puro e para a liga Ti-6Al-4V. Posteriormente, demonstraram que deve existir um valor limite de rugosidade, próximo a 1 μm , acima do qual a proliferação celular é dificultada (PONSONNET *et al.*, 2003).

Por outro lado, Rosales-Leal *et al.* (2010) 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. De forma complementar, as amostras polidas ou atacadas quimicamente, caracterizadas por $R_{sk} < 0$ e $R_{ku} > 3$, 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 $R_{sk} > 0$ e $R_{ku} < 3$, a proliferação celular demonstrou maior dependência da rugosidade média.

4.3 Avaliação de molhabilidade das superfícies

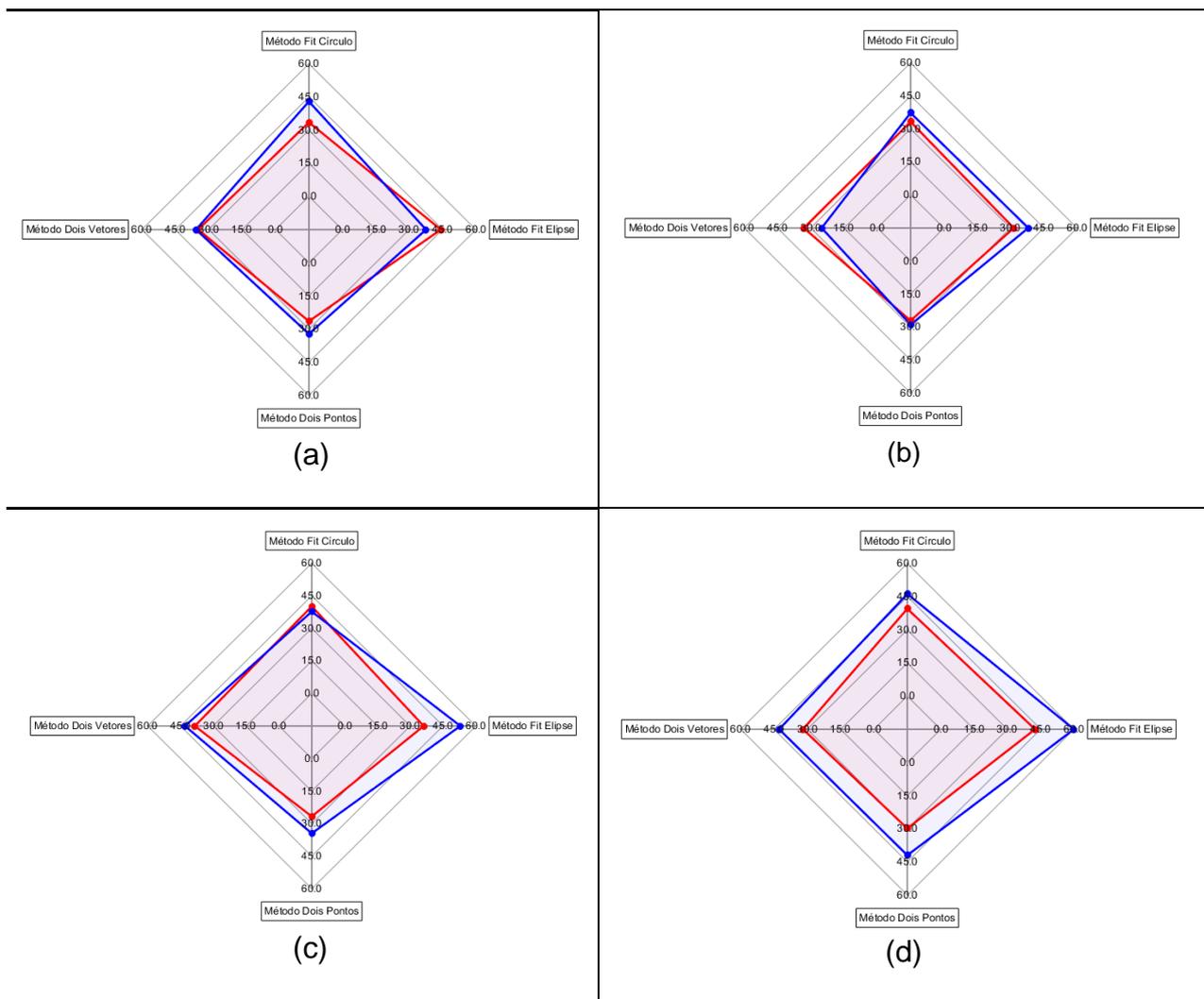
Os resultados obtidos pela avaliação do ângulo de contato resultante entre a interação da superfície usinada com a água por quatro diferentes métodos de medição são apresentados na Tabela 14 em função das ferramentas de corte, para as interações entre velocidade de corte e material do corpo de prova.

Foi evidenciado que para o método dos dois pontos utilizando-se fresa convencional são obtidos ângulos de contato maiores do que os obtidos sob as mesmas condições com a utilização da fresa de alto desempenho.

Adicionalmente, para o método dos dois pontos verificou-se para a fresa de alto desempenho que, independentemente do material usinado, aumentando-se a velocidade de corte obtém-se maior ângulo de contato, enquanto que para a fresa convencional observou-se comportamentos distintos em função da variação de

material e velocidade de corte, em resumo para o Ti-CP, observou-se diminuição do ângulo de contato com o aumento do parâmetro de corte, enquanto que para o Ti-6Al-4V ELI verificou-se o oposto: aumento do ângulo de contato com o aumento da velocidade de corte.

Tabela 14. Ângulo de contato obtido por diferentes métodos em função da ferramenta de corte (em vermelho fresa de alto desempenho e em azul fresa convencional) para as combinações (a) Ti-CP e $v_c = 50$ m/min, (b) Ti-CP e $v_c = 90$ m/min, (c) Ti-6Al-4V ELI e $v_c = 50$ m/min e (d) Ti-6Al-4V ELI e $v_c = 90$ m/min



Fonte: Próprio autor.

Para o método dos vetores, analisando o comportamento do ângulo de contato em função do material usinado observou-se uma clara oposição, pois para o Ti-CP houve aumento do ângulo de contato com o aumento da velocidade de corte, assim como alterando-se de fresa de alto desempenho para fresa convencional. Já para o

Ti-6Al-4V ELI, verificou-se diminuição do ângulo de contato com o aumento da velocidade de corte, de igual modo com a variação de fresa de alto desempenho para fresa convencional.

Tomando o método fit elipse atestou-se que aumentando-se a velocidade de corte e alterando de fresa de alto desempenho para fresa convencional é possível obter ângulos de contato menores, independentemente do material usinado. Entretanto, observou-se ângulos de contato a níveis menores nas amostras em Ti-CP quando comparadas às amostras em Ti-6Al-4V ELI.

Finalmente, para o método fit círculo pôde-se aferir que sob baixa velocidade de corte, independentemente do material consegue-se ângulo de contato menor utilizando-se fresa de alto desempenho, enquanto que para alta velocidade de corte o comportamento é o oposto, ou seja, consegue-se ângulo de contato menor utilizando-se fresa convencional. Ainda com relação às velocidades de corte, para materiais distintos, sob mesmo parâmetro de corte, observa-se aumento do ângulo de contato para as amostras em Ti-6Al-4V ELI frente às amostras de Ti-CP.

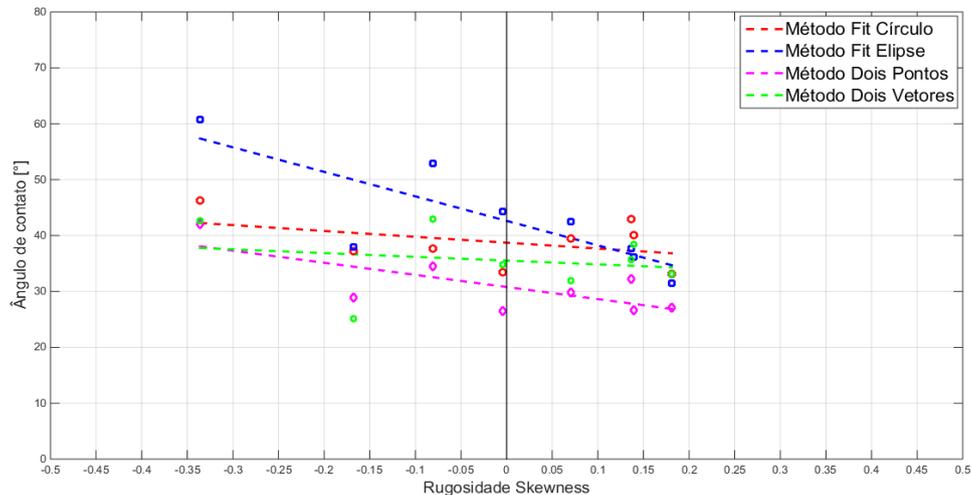
Analisando as ferramentas de corte verifica-se que para o Ti-CP usinado com fresa convencional aumentando a velocidade de corte, consegue-se diminuir o ângulo de contato, enquanto que para o Ti-6Al-4V ELI aumentar a velocidade de corte significa aumentar o ângulo de contato. Já para a fresa de alto desempenho o comportamento é o mesmo independente do material, isto é, aumentar a velocidade de corte resulta em aumento do ângulo de contato.

4.4 Correlação entre rugosidade e molhabilidade

Analisando-se os ângulos de contato obtidos através das diferentes metodologias em função da variável de resposta rugosidade *skewness* conforme Figura 34, verificamos um comportamento comum: diminuição do ângulo de contato com o aumento do *skewness*. Em outras palavras, quanto mais composta por vales é a superfície, maior sua molhabilidade, enquanto que superfícies preponderantemente compostas por picos apresentam menor molhabilidade. Uma última correlação baseada nos resultados em termos do fator de assimetria pode ser feita: utilização de fresa de alto desempenho propicia maiores ângulos de contato frente àqueles obtidos via fresa convencional, especialmente quando se utiliza como

material o Ti-6Al-4V ELI e velocidade de corte alta.

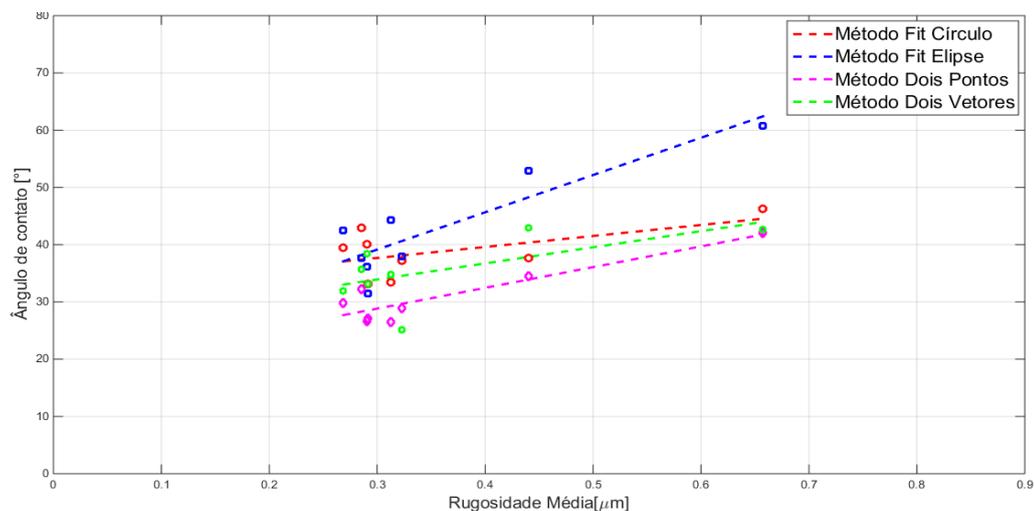
Figura 34. Ângulo de contato em função do fator de assimetria (R_{sk}) para as diferentes metodologias de medição



Fonte: Próprio autor.

Para a rugosidade média, verificou-se um comportamento comum para os ângulos de contato conforme evidenciado na Figura 35: quanto maior a rugosidade média, maior o ângulo de contato. Para a fresa convencional, a mudança de material e velocidade não impacta significativamente na variação da rugosidade média e, conseqüentemente, no comportamento do ângulo de contato. Entretanto, para a fresa de alto desempenho, quando se objetiva obter maior molhabilidade, o ideal é usar Ti-6Al-4V ELI sob alta velocidade de corte, pois assim consegue-se maior rugosidade média.

Figura 35. Ângulo de contato em função da rugosidade média para as diferentes metodologias de medição



Fonte: Próprio autor.

Dado que quanto maior o ângulo de contato, mais hidrofóbica caracteriza-se a superfície e conforme exposto na literatura, maior a capacidade de proliferação celular; quanto menor o fator de assimetria (*skewness*) maior o ângulo de contato e quanto maior a rugosidade média maior é o ângulo de contato obtido, pode-se aferir que a combinação que propicia a melhor condição entre as analisadas em termos de molhabilidade e conseqüentemente viabilidade celular facilitada consiste na usinagem de Ti-6Al-4V ELI com fresa de alto desempenho e alta velocidade de corte.

Tal resultado é especialmente interessante do ponto de vista de produtividade do processo em função da utilização de alta velocidade de corte, condição favorável para a eliminação da possibilidade de formação da aresta posição de corte (APC) pelo alto desgaste de flanco da ferramenta, entretanto, devem ser tomados os devidos cuidados e análise minuciosa das condições empregadas para garantir que os elevados valores de rotação da ferramenta utilizados não venham a desencadear elevado desgaste da ferramenta e conseqüentemente redução de sua vida útil, gerando dispêndios com ferramentais (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013).

Finalmente, é reconhecido que os resultados obtidos no presente trabalho possuem um domínio restrito de aplicabilidade, não sendo passíveis de serem assumidos como regra geral para o fresamento de ligas de titânio visando condicionar viabilidade celular.

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 ligas de titânio 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 WXL, fornece rugosidade média menor que a ferramenta de alto desempenho com ângulo de hélice variável e revestimento Duarise. 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 superfícies preponderantemente compostas por picos, a utilização da fresa convencional resultou em superfícies majoritariamente compostas por vales. O fator de achatamento, por sua vez, evidenciou excelente repetibilidade de perfis compostos por picos e vales afilados independentemente das condições de usinagem empregadas.

Verificou-se que o fresamento de Ti-6Al-4V ELI com fresa de alto desempenho e alta velocidade de corte implica na superfície com maiores ângulos de contato entre os analisados por diferentes métodos de medição, consistindo, portanto, na condição superficial de maior molhabilidade e conseqüentemente máxima viabilidade celular dentro dos limites de rugosidade superficial obtidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLIED MARKET RESEARCH. **Orthopedic Implants Market by Product Type (Reconstructive Joint Replacements, Spinal Implants, Dental Implants, Trauma, Orthobiologics, and Others), Biomaterial (Metallic, Ceramic, Polymeric, and Others), and Type (Knee, Hip, Wrist & Shoulder, Dental, Spine, Ankle, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2018 - 2025.** Disponível em: <<https://www.alliedmarketresearch.com/orthopedic-implants-market>>. Acesso em: fev. 2021.

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, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM F67 - 13. Standard Specification for Unalloyed Titanium, for Surgical Implant Applications. West Conshohocken, 2017.

ANDRUKHOV, O. *et al.* Effect of implant surface material and rough-ness to the susceptibility of primary gingival fibroblasts to inflammatory stimuli, **Dental Materials**, v. 36, n.6, p. e194-e205, Jun. 2020.

APACHITEI, I. *et al.* Enhanced fatigue performance of porous coated Ti6Al4V biomedical alloy. **Applied Surface Science**, v. 257, p.6941-6944, 2011.

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.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 6175:

Usinagem – Processos mecânicos. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 7206-4: Implantes para cirurgia - Próteses parcial e total de articulação de quadril - Parte 4: Determinação de propriedades de resistência à fadiga e desempenho de componentes femorais com haste. Rio de Janeiro, 2011.

CAVALER, L. C. C. **Fresamento periférico do aço AISI-SAI D6 temperado e revenido utilizando fresas de metal-duro**, Tese de M.Sc., PosMEC/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2003.

CHEN, M. *et al.* Effects of tool helix angles on machined surface morphology in tilt side milling of cantilever thin-walled plates. **Procedia CIRP**, v. 71, p. 93–98, 2018.

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, p. 234–238, 2009.

DA SILVA, P. S. C. *et al.* Prediction of the surface finishing roughness effect on the fatigue resistance of Ti-6Al-4V ELI for implants applications. **International Journal of Fatigue**, v. 103, p. 258-263, 2017.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8 ed., São Paulo: Editora Artliber, 2013.

DEUSTCHES INSTITUT FÜR NURMING. DIN 844-1: Parallel shank end mills: dimensions. Berlin.1989.

ENGIMPLAN. **Produtos**. Disponível em: <<http://engimplan.com.br/produtos/>>. Acesso em: ago. 2021.

EZUGWU, E. O., WANG, Z. M. Titanium alloys and their machinability - a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 68, n.3, p. 262-274, Ago. 1997.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, São Paulo: Blucher, 1970.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Orthopedic implants market size stood at USD 46.5 Billion in 2018 and is projected to reach USD 64.0 Billion by 2026, exhibiting a CAGR of 4.1% during 2019-2026.** Disponível em: <<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/orthopedic-implants-market-101659>>. Acesso em: fev. 2021.

GIORDANO, V. *et al.* The hidden impact of rapid spread of the COVID-19 pandemic in professional, financial, and psychosocial health of Latin American orthopedic trauma surgeons. **Injury**, v. 52, n. 4, p. 673–678, 2021.

GONÇALVES, V. M. **Estudo da molhabilidade da superfície de titânio modificada por anodização eletroquímica para crescimento de nanotubos**, FOA/UNESP, Araçatuba, SP, Brasil, 2016.

HIN, T. S. **Engineering of materials for biomedical applications**. Singapura: World Scientifica Publishing Co. Pte. Ltd., 2004.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARD (ISO). ISO 1302-1: Geometrical Product Specifications (GPS) — Indication of surface texture in technical product documentation. Geneva. 2002.

KRISHNARAJ, V., SAMSUDEENSADHAM, S., SINDHUMATHI, R., KUPPAN, P. A study on high-speed end milling of titanium alloy. **Procedia Engineering**, n.97, p. 251-257, Dez. 2014.

LEYENS, C., PETERS, M. **Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.

LOCILENTO, D. A. *et al.* Biocompatible and biodegradable electrospun nanofibrous membranes loaded with grape seed extract for wound dressing application. **Journal of Nanomaterials**, v. 2019, p. 1–12, 2019.

LUZ, A. P., RIBEIRO, S., PANDOLFELLI, V. C. Review article: Use of the wettability in the investigation of the corrosion behaviour of the refractory materials. **Ceramica**, v. 54, n. 330, p. 174–183, 2008.

MACHADO, A. R., COELHO, R. T., ABRÃO, A. M., DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**, 3 ed., São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2015.

MAJUMDAR, P., SINGH, S. B., DHARA, S., CHAKRABORTY, M. 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, p. 1-12, Fev. 2012.

MERSNI, W., BOUJELBENE, M., BEN SALEM, S., ALGHAMDI, A-S. Optimization of the surface roughness in ball end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using the Taguchi Method. **Procedia Manufacturing**, n.20, p. 271-276, Fev. 2018.

MEYERS, M. A., CHAWLA, K. K. **Mechanical Behavior of Materials**. New York: Cambridge University Press, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**, 9ed., Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2017.

OLIVEIRA, B. J. S. *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, p. 1126-1134, Jan. 2017.

OSG Sulamericana. **Catálogo Geral**. Disponível em: <https://osg.com.br/docs/catalogos/catalogo_geral_osg/web/html5/?pn=463>.

Acesso em: mai. 2020.

OSG Sulamericana. **Folheto OSG revestimento WXL**. Disponível em: <https://osg.com.br/docs/catalogos/folhetos_revestimento/folheto_osg_revestimento_WXL_low.pdf>. Acesso em: abr. 2021.

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.

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.

PAZOS, L., CORENGIA, P., SVOBODA, H. Effect of surface treatments on the fatigue life of titanium for biomedical applications. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 3, n. 6, p. 416–424, 2010.

PONSONNET, L. *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, p. 157-165, Set. 2002.

PONSONNET, L. *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, p. 551-560, Jun. 2003.

RAHMAN, M., WANG, Z. G., WONG, Y. S. A review on high-speed machining of titanium alloys. **JSME International Journal**, v. 49, n.1, p. 11-20, Mar. 2006.

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, p. 294-304, Fev. 2011.

RATNER, B. D., HOFFMAN, A. S., SCHOEN, F. J., LEMONS, J. E. **Biomaterials**

Science: An Introduction to Materials in Medicine, 2 ed., San Diego: Academic Press, 2004.

REZENDE, M. C. R. A. *et al.* Osseointegration of anodized im-plant: effect of compromised primary stability and fibrin adhesive/TEA, **Dental Materials**, v. 30, n.S, p. e-145, Mar. 2014.

ROSALES-LEAL, J. I. *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, p. 222-229, Ago. 2010.

SANDVIK COROMANT. **Fresamento**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>>. Acesso em: mai. 2021.

SILVA, L. C., DA SILVA, M. B. Investigation of burr formation and tool wear in micromilling operation of duplex stainless steel. **Precision Engineering**, v. 60, n. July, p. 178–188, 2019.

SILVA, T. R. **Produção de scaffolds poliméricos por Electrospinning a partir do polímero PLGA com adição de moléculas de interesse para o aprimoramento de tecidos biomiméticos**, Programa de Pós-Graduação em Bioquímica e Biologia Molecular EACH/USP, São Paulo, SP, Brasil 2018.

SIVAKUMAR, S. *et al.* A study on bio implants materials and machining. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, n. xxxx, p. 7317–7321, 2021.

STEMMER, C. E., **Ferramentas de corte II**, 2 ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

STRNAD, G. *et al.* “Contact Angle Measurement on Medical implant Titanium Based Biomaterials”, **In: 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering**, p. 946-953, Romênia, Out. 2015.

SUMITA, M., HANAWA, T., OHNISHI, I. Failure Processes in Biometallic Materials. **Comprehensive Structural Integrity**, p. 131–167, 2003.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**, 4th ed., Woburn: Butterworth–Heinemann, 2000.

VCI BRASIL. **MV Aqua® 181 - Fluido Anticorrosivo Base Água para Corte e Retífica**. Disponível em: < <https://www.vcibrasil.com.br/nossas-solucoes/metal-mecanico/usinagem-e-retifica/mv-aqua-180-fluido-anticorrosivo-base-agua-para-corte-e-retifica>>. Acesso em: abr. 2021.

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, p. 2052-2055, Dez. 2011.

YASZEMSKI, M. J., TRANTOLO, D. J., KAI-UWE, L., HASIRCI, V., ALTOBELLI, D. E., WISE, D. L. **Biomaterials in Orthopedics**. New York: Marcel Dekker Inc., 2004.

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.