

QUALIDADE SUPERFICIAL E ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NA USINAGEM DE IMPLANTES DENTÁRIOS

Rodolfo da Silva Manera, rdm518@bham.ac.uk¹
Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br²
Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br³
Juno Gallego, gallego@dem.feis.unesp.br³

¹Machining Research Group, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, Reino Unido

²Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, São Carlos-SP, 13566-590, Brasil

³Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-FEIS/UNESP, Av. Brasil, 56, Ilha Solteira-SP, 15385-000, Brasil

Resumo. Ligas metálicas aplicadas em implantes têm sido pesquisadas com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, microestruturais e de biocompatibilidade, sendo o titânio e suas ligas, apesar do desenvolvimento de vários outros materiais, amplamente utilizados na implantologia. O titânio é considerado um material de difícil usinabilidade, por gerar altas tensões e temperaturas em uma pequena área de corte (2/3 menor do que para outros materiais), demandando que os parâmetros de corte e as ferramentas sejam especificadas corretamente, uma vez que tanto a matéria-prima como o processo de fabricação aumentam os custos do produto final. Esta pesquisa determinou os efeitos da velocidade de corte e da profundidade de usinagem sobre a energia específica de corte e a rugosidade de implantes dentários fabricados com titânio comercialmente puro (ASTM F67 grau 4) durante a usinagem dos filetes da rosca. Os testes de usinagem foram realizados em um torno CNC tipo-suíço com ferramentas de metal duro revestidas com TiAlN e fluido de corte abundante. Usando ANOVA, níveis baixos e altos de profundidade de usinagem afetaram a energia específica de corte, danificando a rugosidade dos flancos da rosca. Menor velocidade de corte tende a aumentar a energia de corte específica, danificando o acabamento da rosca. Os parâmetros de rugosidade Skewness e Kurtosis indicaram o predomínio de picos na superfície, que é favorável à osseointegração. Testes em alta velocidade de corte (HSC) mostraram que é possível usinar implantes nessas condições, porém a profundidade de usinagem não pode ser alta para evitar vibrações nas roscas.

Palavras-chaves: Titânio, implantes dentários, roscamento, energia específica de corte, rugosidade.

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

O estudo dos implantes metálicos é um desafio complexo e multidisciplinar (Ishida et al, 2013), pois são requisitos necessários a alta relação resistência/densidade, resistência à corrosão, o fato de ser inerte aos tecidos, porém, ser bioativo, propiciando o crescimento ósseo em sua superfície como apresentado na Fig. (1a). Assim, o uso do titânio e suas ligas ganharam destaque depois que experimentos comprovaram a sua osseointegração em tratamento de fraturas na ortopedia, na odontologia e em demais ciências médicas (Davim, 2010).

O processo de osseointegração está diretamente ligado à qualidade da superfície do implante. Gemelli et al (2007) e Mathieu et al (2013) demonstram que a rugosidade e morfologia da superfície afetam a taxa de osseointegração e a fixação biomecânica (torque de remoção). Diversos estudos científicos e tecnológicos, incluindo fabricantes de implantes, têm proposto tratamentos de superfície, como jato de areia, ataque ácido, eletropolimento, texturização a laser e por plasma, entre outros, buscando promover um melhor desempenho do implante (Hung et al, 2013).

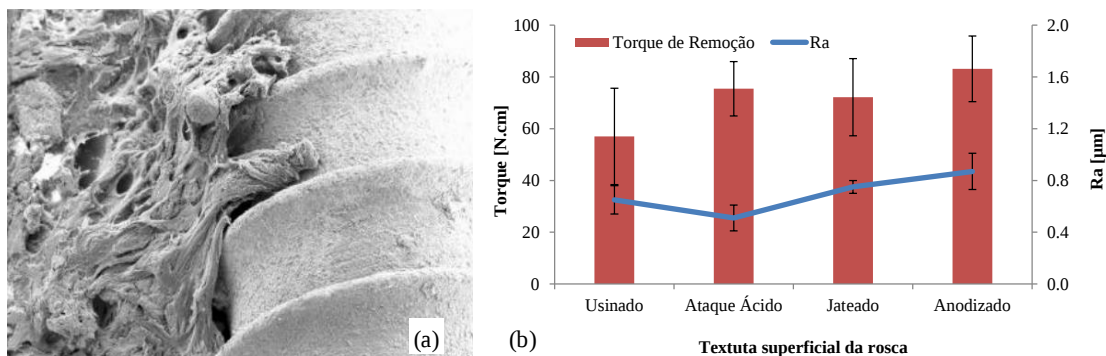


Figura 1. (a) Interface osso/implante na osseointegração (Garcia, 2006) e (b) rugosidade e torque de remoção de implantes dentário.

Conforme apresentado na Fig. (1b), para comparar valores do torque de remoção e parâmetros de rugosidade, Elias et al (2008) testaram quatro superfícies diferentes: (1) usinado, (2) com ataque ácido, (3) jateado com areia e (4) anodizado. Entretanto, não foi possível chegar a uma conclusão, devido ao grande desvio estatístico dos valores. Wong et al (1995) e Carlsson et al (1988) concluíram que a rugosidade média (R_a) entre 1 e 10 μm foi propícia para a osseointegração.

Tomando-se em referência o desempenho da superfície, esta pode ter suas propriedades modificadas pelo processo de transformação do estado bruto ao produto final. Em se tratando de implantes dentários, o processo de usinagem responsável pela formação dos filetes de rosca é o fator governante na geração de sua qualidade superficial. Ao contrário das excelentes características de aplicação do titânio e suas ligas, Shaw (2004) o classifica como material de difícil usinabilidade, gerando baixa integridade da superfície usinada e altos níveis de desgaste da ferramenta, contribuindo negativamente para a qualidade do implante fabricado e para o desempenho econômico do processo. Este artigo determina o efeito da velocidade de corte e da profundidade de usinagem na energia específica de corte e na qualidade superficial da rosca de implantes dentários de titânio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de roscamento, apresentados na Tab. (1), foram realizados em um torno CNC STAR® SR-20RII, com potência de 2,2 kW, nas dependências da Implalife - Indústria de Produtos Médico Odontológico LTDA, de Jales/SP, seguindo a ANOVA, com fatorial completo, quatro réplicas e nível de significância de 5%.

Tabela 1. Planejamento experimental empregado na pesquisa.

Fase	Fatores de controle (Variáveis de entrada)*	Níveis			Resposta (Variáveis de saída)
1	v_c [m/min]	20	35	50	u [J/mm ³]
	a_p [μm] (por passe)	25	50	100	
2	v_c [m/min]	20	70		R_a [μm], S_a [μm], S_{sk} [-], S_{ku} [-] e rugosidade qualitativa
	a_p [μm] (por passe)	25	50	100	

*Avanço de 1,6 mm (rosca com entrada dupla)

Para medição da força de corte, foi utilizado um dinamômetro extensométrico projetado para suportar cargas de 900 N nas direções da força de corte e de avanço (ambos com correlação linear $R^2=1$). A aquisição dos sinais de força deu-se com um condicionador de sinais AC/DC de 100 kHz, placa A/D USB-6009 National Instruments® e o uso software Labview 12.0.1, apresentados na Fig.(2).

A energia específica de corte foi determinada integrando-se numericamente a força de corte (F_c) no tempo de corte (t_c), através de regra 1/3 de Simpson, multiplicando pela velocidade de corte e dividindo pelo volume de cavaco removido (razão entre a densidade do material e da diferença de massa bruta e após a usinagem).



Figura 2. Montagem experimental para os ensaios de roscamento e medição da força de corte.

Os raios de aresta da ferramenta e os parâmetros de rugosidade foram medidos utilizando microscópio confocal Olympus OLS4000. As imagens de microscopia eletrônica de varredura foram feitas no microscópio Jeol JSM 5410 e Carl Zeiss EVO. A ferramenta escolhida foi de codificação 16 ER 0.80 ISO IC 908 (ISCAR®), metal duro (ISO S15-S25) revestida com TiAlN através do processo PVD, com raio de ponta de projeto de 90 μm (r_{e1}). Como dimensões adicionais, e devido a sua importância para a formação de cavaco em condições de corte onde a espessura de corte é muito reduzida, a ferramenta apresenta raio de aresta (r_e) de $20,071 \pm 1,529$ μm na ponta, $14,481 \pm 0,949$ μm na aresta principal e $13,437 \pm 0,629$ μm na aresta secundária de corte. As mesmas foram ensaiadas em condição isenta de

desgaste, sendo uma aresta para cada condição, adotando a estratégia de avanço radial com profundidade fixa por passe (Sandvik Coromant, 2009), com fluido de corte integral ECOCUT 910 (FUCHS®) em abundância em forma de jorro.

Os corpos de prova têm dimensões em mm conforme Fig. (3), baseadas nas características dimensionais e geométricas de um implante dentário comercial, fabricados em Titânio ASTM F67 Grau 4.

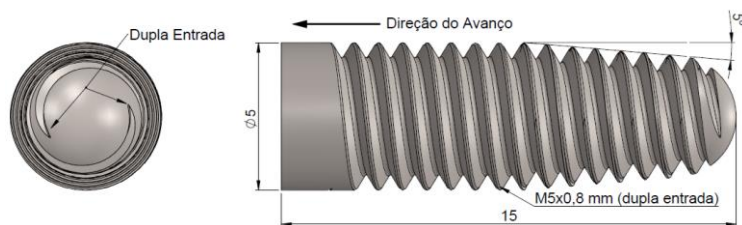


Figura 3. Desenho do corpo de prova baseado em um implante comercial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Energia Específica de Corte

É possível interpretar o gráfico da Fig. (4a) com base nos fatores de controle separadamente. Analisando-se inicialmente a influência da velocidade de corte (eixo x), constata-se que o aumento deste parâmetro minimiza a energia específica de corte, alcançando uma redução média de 19%. O aumento da profundidade de usinagem também causa o mesmo efeito de queda da energia específica, porém de forma mais pronunciada, atingindo uma redução média de 46%. A diminuição da energia específica de corte devido ao aumento da velocidade de corte e da profundidade de usinagem está associada ao aumento do ângulo de cisalhamento, à diminuição da espessura do cavaco e à consequente redução do seu grau de recalque, ou seja, a energia necessária para deformá-lo e removê-lo da peça é menor (Ferraresi, 1970).

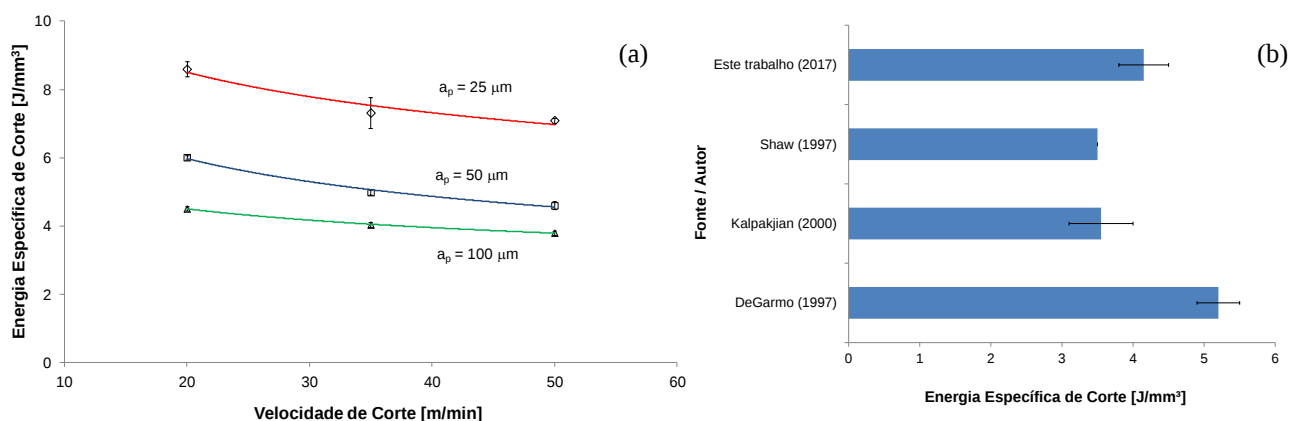


Figura 4. (a) Energia específica de corte versus velocidade de corte para as profundidades de usinagem (Variabilidade: 0,4 a 6,2%. Variabilidade média: 2,0%) e, (b) Energia específica de corte medida neste trabalho comparados aos apresentados pela literatura (Variabilidade: 11,5 a 25,4%. Variabilidade média: 17,9%).

Outro resultado extraído da Fig.(4a) é que obteve-se níveis de energia específica de corte para o titânio na usinagem com ferramentas de geometria definida entre 3,8 e 4,5 J/mm³ para $a_p = 0,1$ mm (mais condizente com o emprego de ferramentas de geometria definida). Apesar de ser dependente de diversos parâmetros de processo, ferramenta e material da peça, Kalpakjian (2000) declara estar 3,1 e 4,0 J/mm³, Shaw (2004) afirma encontrar níveis próximos de 3,5 J/mm³ e DeGarmo (1997) mediu na faixa de 4,9 a 5,5 J/mm³, como apresentado na Fig.(4b).

Na Figura (5) demonstram-se os resultados qualitativos e quantitativos da ANOVA sobre a influência dos efeitos principais na resposta. Verifica-se que o aumento da velocidade de corte e da profundidade de usinagem reduz a energia específica de corte. Entretanto, a profundidade de usinagem foi o fator de controle que mais oscilou em torno da média, indicando ser significativo na resposta. É possível ratificar, de fato, que os parâmetros de corte influentes na energia específica são a velocidade de corte e a profundidade de usinagem, uma vez que os respectivos valores de Probabilidade P são menores que o nível de significância adotado nos experimentos ($P < \alpha = 0,05$). Os Coeficientes de Correlação de Pearson indicam que as variáveis de entrada têm relação inversamente proporcional com a energia específica de corte, isto é, o aumento da velocidade de corte e da profundidade de usinagem diminuem a energia específica de corte. No entanto, somente a profundidade de usinagem apresenta uma correlação linear considerada forte com a resposta (-0,854 de a_p contra -0,323 de v_c).

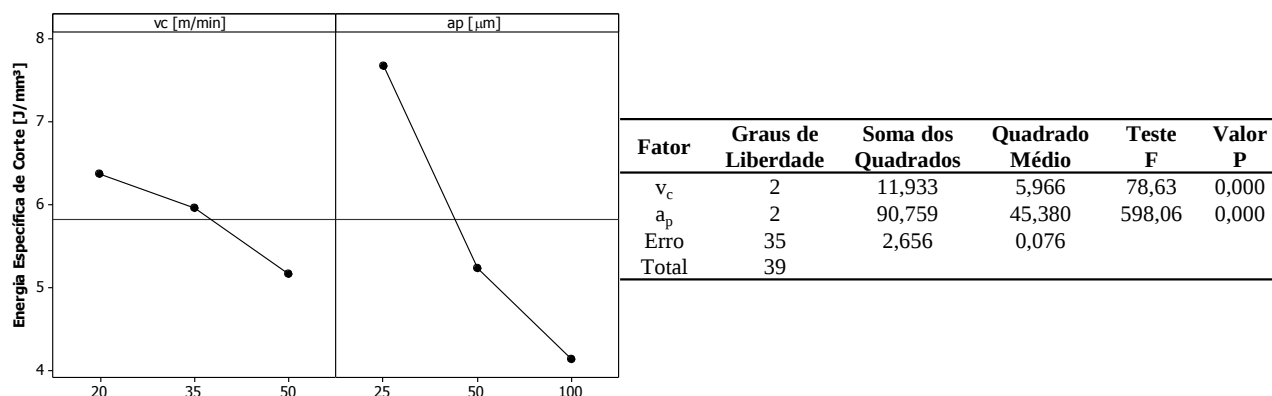


Figura 5. ANOVA qualitativa e quantitativa dos efeitos principais (velocidade de corte e profundidade de usinagem) sobre a resposta (energia específica de corte).

O tratamento estatístico realizado pela ANOVA foi validado pelo Teste de Normalidade Kolmogorov-Smirnov ($P > \alpha = 0,05$) e 97,17% dos dados são explicados (cobertos) pela análise. Por fim, um modelo estatístico de previsão do comportamento da energia específica de corte no roscamento de titânio também foi gerado através de um ajuste potencial, que explica (prevê) 91,24% dos dados (Eq. 1).

$$\mu \text{ [J/mm}^3\text{]} = 84,849 \cdot \text{TRM [mm}^3\text{/min]}^{-0,382} \quad (1)$$

O modelo potencial foi adotado, pois a energia específica de corte mostrou um comportamento hiperproporcional (Fig. 6) quando plotada contra a taxa de remoção de material, que considera simultaneamente a profundidade de usinagem e a velocidade de corte ($\text{TRM} = v_c \cdot a_p \cdot f$).

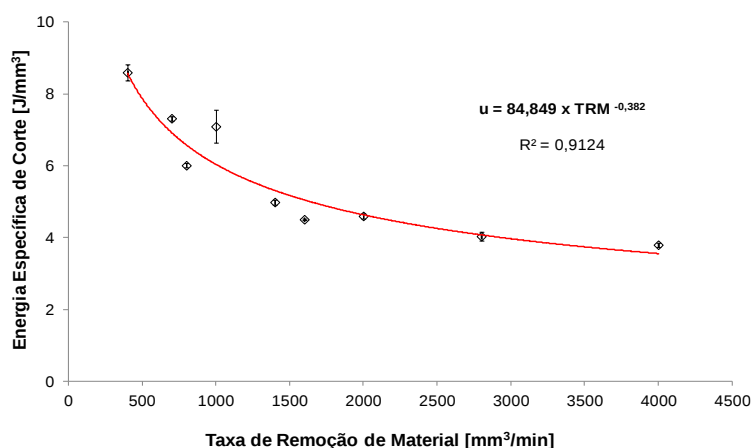


Figura 6. Variação da energia específica de corte em função da taxa de remoção de material (Variabilidade: 0,4 a 6,2%. Variabilidade média: 2,0%).

Este resultado é compatível e equivalente ao apresentado por Shaw (2004), quando declara ser a energia específica inversamente proporcional à espessura de corte (h), elevada a um expoente (n), $u \propto h^{-n}$, sendo $n = 0,2$ (menor curvatura) para usinagens com ferramenta de geometria definida e $n = 0,8$ (maior curvatura) para usinagens com ferramenta de geometria indefinida. No caso deste trabalho, $n = 0,382$, que é maior que 0,2 (geometria definida) e menor que 0,8 (geometria indefinida), o que faz sentido, uma vez que a espessura de corte (h) participa da grandeza avanço da ferramenta (f), que por sua vez, compõe a taxa de remoção de material.

3.2 Rugosidade

Tendo sido a velocidade de corte o fator de controle menos influente na usinabilidade, a integridade superficial será estudada apenas nos níveis limítrofes (20 e 50 m/min), com a ressalva, baseada no modelo matemático apresentado na Eq. (1), em extrapolar a máxima velocidade de corte para a condição HSC (*High-Speed Cutting*), isto é, de 50 m/min para 70 m/min, visando minimizar a força de corte e a energia específica de corte. Dessa forma, poder-se-á também inferir sobre a integridade superficial da rosca ao empregar usinagem em alta velocidade de corte nas condições assim

assumidas de acabamento ($a_p = 25 \mu\text{m}$), semiacabamento ($a_p = 50 \mu\text{m}$) e desbaste ($a_p = 100 \mu\text{m}$). Valores de rugosidade média linear (R_a) e superficial (S_a) são apresentados na Fig.(7a) e (7b), respectivamente. Eles são inicialmente abordados neste trabalho por serem recomendados como parâmetro de rugosidade na área de implantes dentários (Albrektsson e Wennerberg, 2004b; Suzuki et al, 1997; Geis-Gerstorfer et al, 2003).

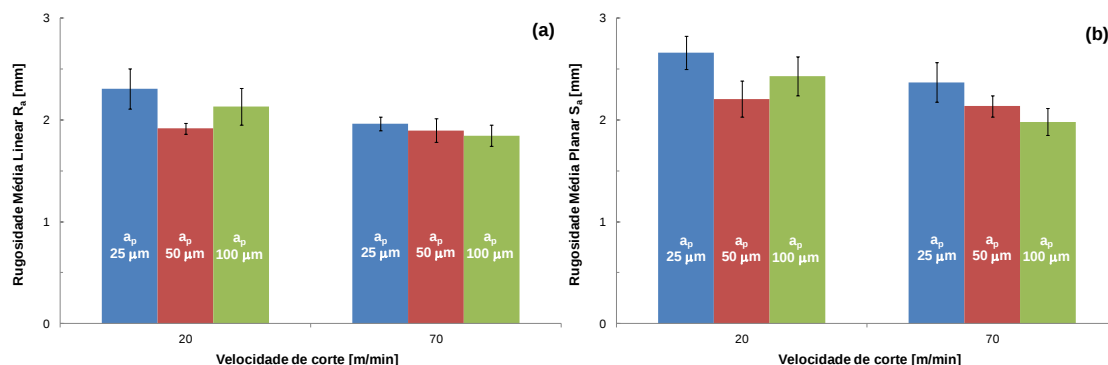


Figura 07. Variação da rugosidade média (a) linear e (b) planar dos flancos da rosca com a profundidade de usinagem e velocidade de corte (Variabilidade: 2,8 a 8,6%. Variabilidade média: 6,4%).

Em geral, verifica-se que a rugosidade média alcançou patamares na faixa de 1,8 a 2,6 μm , e que o parâmetro R_a foi menor que S_a , porém apresentando as mesmas tendências de comportamento. Isto ocorreu devido ao fato de que a rugosidade planar abrange uma maior área de análise ou, em outras palavras, a rugosidade linear é uma amostra unidimensional da rugosidade planar. Também significa que a rugosidade em toda a superfície dos flancos, desde a entrada até a saída da ferramenta, não contém discrepâncias. A literatura científica sugere níveis de rugosidade para roscas de implantes dentários de titânio na faixa de 0,5 a 1 μm , mas diversos pesquisadores têm obtido níveis de 2 μm ou superiores (Elias et al, 2008). Observa-se também que o aumento da velocidade de corte tende a diminuir a rugosidade dos flancos, porém a profundidade de usinagem não causa efeito na rugosidade, exceto ao comparar $a_p = 25$ e 50 μm sob $v_c = 20$ m/min.

Apesar de a área de implantodontia apontar a rugosidade média aritmética como parâmetro, este trabalho proporá a análise de outros parâmetros de rugosidade, dada o aspecto funcional da superfície da rosca. Os parâmetros R_a e S_a medem a rugosidade média da peça, mas não são sensíveis a picos e vales. Dessa forma, superfícies com os mesmos valores de rugosidade média podem conter perfis pontuais de rugosidade totalmente diferentes. Assim, para obter-se mais informações da textura superficial, recomenda-se empregar ou associar outros parâmetros perfilométricos. Com base no exposto, a Fig.(8) apresenta as rugosidades “Skewness” (S_{sk}) e “Kurtosis” (S_{ku}).

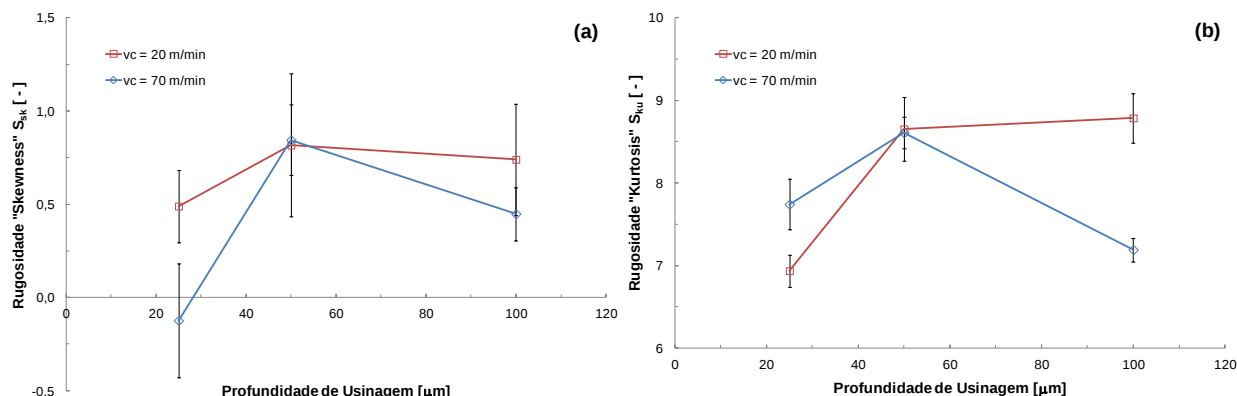


Figura 8. Rugosidades estatísticas (a) “Skewness” e (b) “Kurtosis” dos flancos da rosca com a profundidade de usinagem e velocidade de corte (Variabilidade média (S_{sk}): 36,2%. Variabilidade média (S_{ku}): 16,4%).

O parâmetro S_{sk} mede a assimetria do perfil de rugosidade sobre um plano médio. Valores negativos indicam predominância de vales e valores positivos, prevalência de picos. Em outras palavras, $S_{sk} < 0$ indica concentração de material da peça próximo à superfície (superfície tipo platô) e $S_{sk} > 0$ indica que a concentração de material da peça não é próxima à superfície (superfície com picos altos). Nota-se na Fig.(8a) que todas as condições de usinagem empregadas geraram $S_{sk} > 0$, excetuando-se a condição em HSC ($v_c = 70$ m/min) com menor profundidade de usinagem ($a_p = 25 \mu\text{m}$). Apesar da variabilidade relativamente elevada (36,2%), conclui-se que as demais condições de usinagem favoreçam a osseointegração do implante, por conter mais picos que vales para ancoragem do tecido ósseo. “Skewness”

maiores que $\pm 1,5$ indicam que a rugosidade média não é suficiente para caracterizar a superfície. Mesmo considerando a dispersão dos valores de S_{sk} , este trabalho não encontrou $S_{sk} > \pm 1,5$ (Fig.8a), validando os resultados de R_a e S_a utilizados. O parâmetro S_{ku} descreve a agudez de picos e vales. Se $S_{ku} > 3$, a superfície possui picos mais agudos. Se $S_{ku} < 3$, a superfície contém picos irregulares e mais achatados. Pode-se constatar na Fig.(8b) que todas as condições de usinagem geraram “Kurtosis” maiores que 3, que também sinalizam benéficamente para a ancoragem do tecido ósseo nas microirregularidades da rosca do implante.

Apesar da variabilidade dos resultados de rugosidade estatística, torna-se interessante observar na Fig.(8) que a profundidade de usinagem de 50 μm , independentemente da velocidade de corte empregada, gerou os mesmos valores médios de “Skewness” e “Kurtosis”. Isso demonstra, novamente, que a profundidade de usinagem intermediária seja mais indicada no roscamento de implantes de titânio, quanto ao requisito rugosidade ou textura superficial. A caracterização qualitativa dos flancos dos filetes da rosca foi realizada com base nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Fig.9).

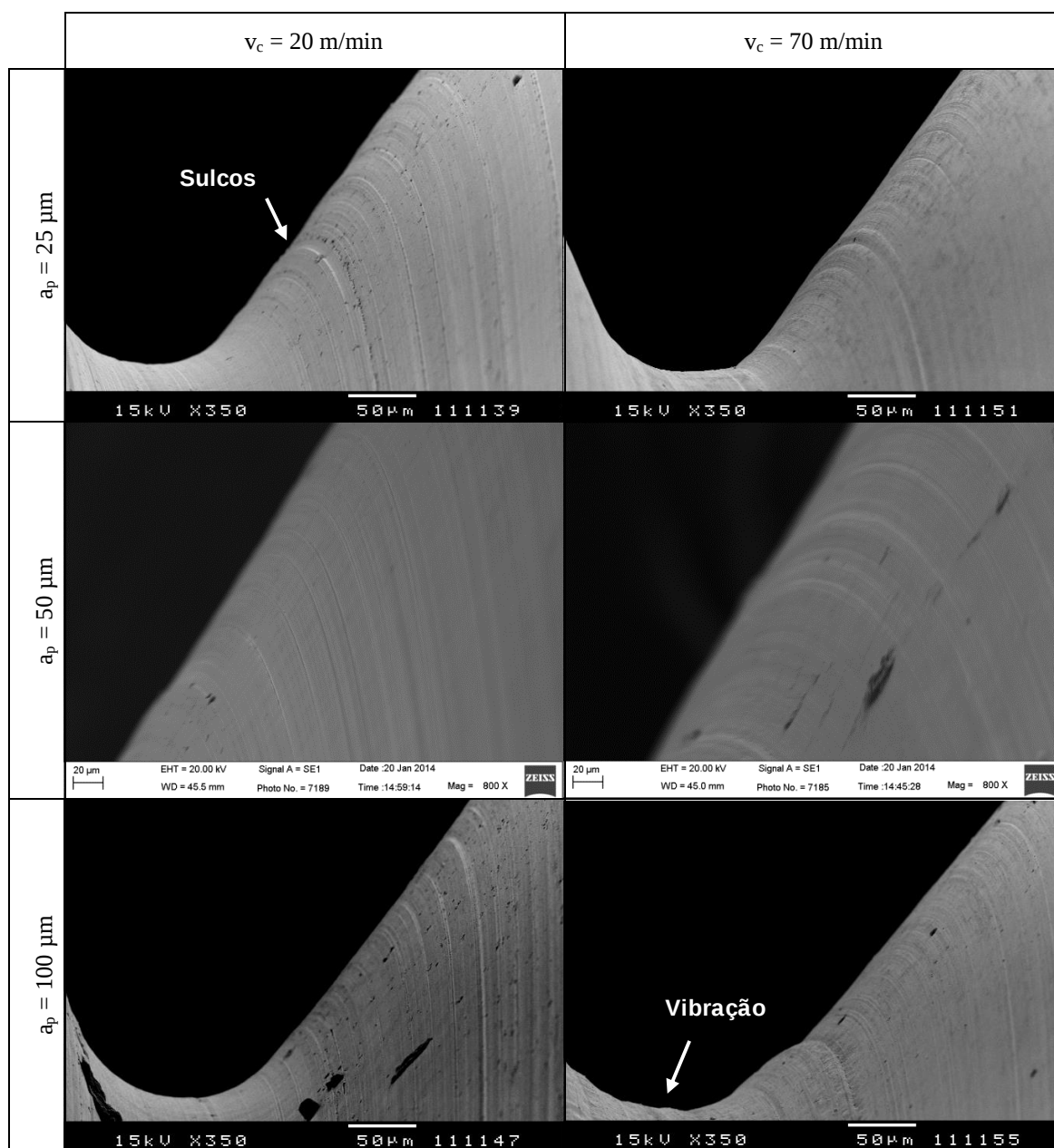


Figura 9. Imagens de microscopia eletrônica de varredura dos flancos da rosca dos implantes dentários em função da velocidade de corte e profundidade de usinagem.

Visualmente, é possível constatar que a menor velocidade de corte gerou maior ocorrência de sulcos circunferenciais nos flancos da rosca, ao passo que no roscamento HSC, esta textura foi minimizada. Este resultado

concorda com a rugosidade média R_a e S_a , apresentadas na Fig.(8), onde a rugosidade foi maior para $v_c = 20$ m/min. Embora a rugosidade média tenda a ser menor para o roscamento HSC (Fig.8), o parâmetro “Skewness” para $a_p = 25$ μ m ($S_{sk} < 0$, Fig.8a) mostra que o flanco usinado pode conter predominância de vales e isso pode ser deletério à osseointegração, devido à ausência de picos para ancoragem do tecido ósseo. A Figura (10) apresenta dois perfis de rugosidade, visando confrontar qualitativamente tal afirmação quantitativa.

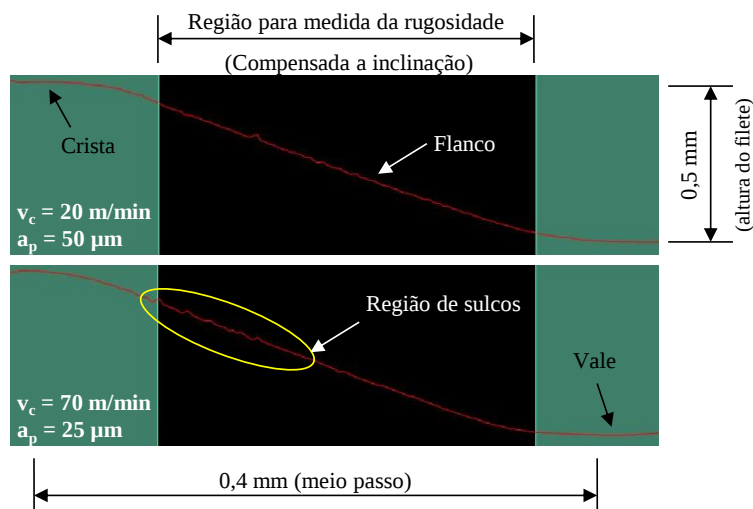


Figura 10. Imagens de microscopia confocal comparando perfis de rugosidade dos flancos da rosca.

Outro aspecto importante a observar na Fig. (10) é que a frequência dos sulcos é menor quanto maior a profundidade de usinagem utilizada. Isto ocorre, pois a ferramenta de corte penetra na peça um número maior de vezes para a menor profundidade de usinagem (20 vezes para $a_p = 25$ μ m, 10 vezes para $a_p = 50$ μ m e 5 vezes para $a_p = 100$ μ m). Dessa forma, a textura final dos flancos roscados deverá ser composta pelas sucessivas profundidades de usinagem, somadas (no passe final) à rugosidade da própria aresta de corte da ferramenta (rugosidade geométrica e cinemática) e à dinâmica do corte, tais como vibração, formação do cavaco, rigidez peça-ferramenta etc (rugosidade de processo). Para confirmar tal hipótese, medições via microscopia confocal da rugosidade média da aresta de corte das ferramentas resultaram em $R_a = 1,117 \pm 0,096$ μ m. Comparando este valor com os da Fig.(8), nota-se que as rugosidades médias finais dos flancos ficaram entre 1,8 a 2,7 vezes maiores.

A Figura (11) permite comparar a textura dos flancos roscados neste trabalho com os da literatura científica e observar mais detalhes dos sulcos circunferenciais. Elias et al (2008) usinaram implantes de titânio comercialmente puro (ASTM F67), para aplicações em implantes cirúrgicos, e obtiveram $R_a = 0,65 \pm 0,11$ μ m. Nota-se a ausência de sulcos circunferenciais significativos (Fig. 11a). A avaliação da osseointegração realizada pelos autores via torque de remoção dá conta de que a rosca usinada apresentou comportamento idêntico às roscas atacadas por ácido, jateadas e anodizadas, que visaram, em tese, melhorar a adesão do implante à estrutura óssea. A priori, isso significa que não há necessidade de se realizar pós-processamento da rosca usinada para melhorar a osseointegração.

A confirmação da ocorrência de sulcos circunferenciais gerados por este trabalho pode ser feita analisando-se a Fig. (11b). Nela, uma imagem do flanco da rosca obtida por microscopia confocal demonstra que os sulcos podem ser contínuos ou segmentados, estes últimos não perceptíveis por microscopia eletrônica de varredura.

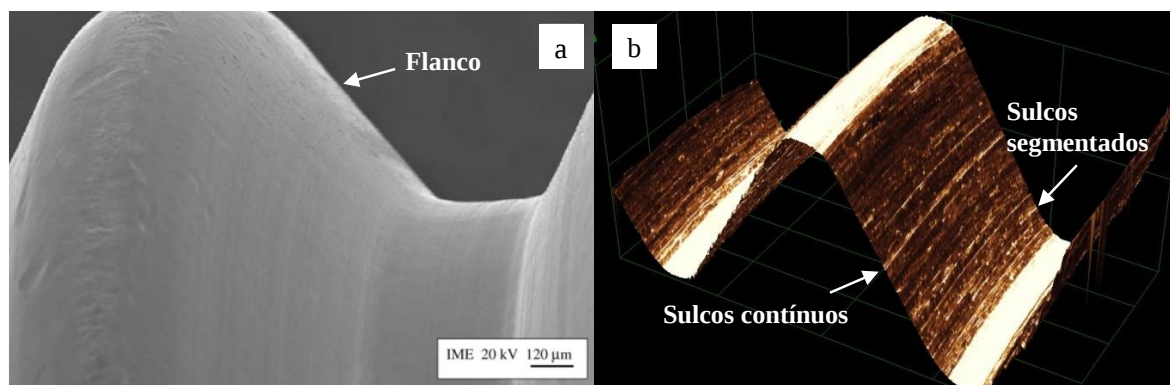


Figura 11. Imagens de (a) microscopia eletrônica de varredura (Elias et al, 2008) e (b) microscopia confocal dos filetes de rosca dos implantes dentários ($v_c = 20$ m/min, $a_p = 25$ μ m).

Por fim, embora os vales das roscas de implantes dentários não sejam considerados essenciais ao processo de osseointegração, observa-se na Fig. (9) que os vales podem sofrer um processo de vibração, em função do confinamento do raio de ponta da ferramenta no material da peça, dependendo das condições de usinagem empregadas. Particularmente, os vales das roscas usinadas na condição assumida de desbaste HSC ($v_c = 70$ m/min e $a_p = 100$ μ m) apresentaram níveis elevados de marcas de vibração, causados pela segmentação do cavaco e/ou pelo lascamento da ponta da ferramenta de corte, Fig. (12a) e (12b), respectivamente. Neto, Diniz e Suyama (2013) declaram que as altas temperaturas, baixa condutividade térmica, alta reatividade e baixo módulo de elasticidade contribuem com a vibração na usinagem de titânio.

Neste caso, a vibração eventualmente pode não comprometer o processo de osseointegração, mas se uma população de vales profundos agudos for criado devido à vibração excessiva no contato peça-ferramenta, o implante pode mecanicamente ser comprometido do ponto de vista estrutural, devido à amplificação de tensões nestas regiões decorrentes de carregamentos de compressão e flexão, característicos de processo mastigatório real.

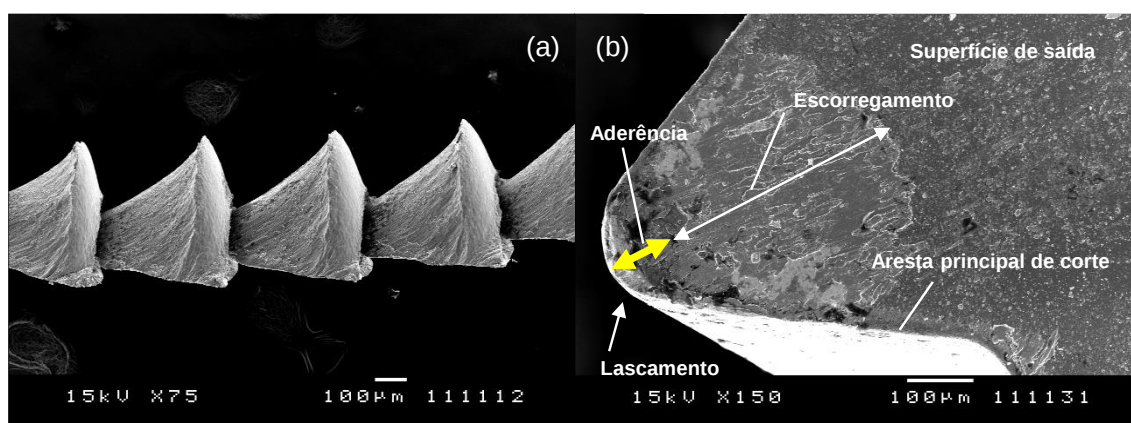


Figura 12. (a) Processo de formação de cavaco no roscamento do titânio e (b) estado da ferramenta de corte ($v_c = 70$ m/min, $a_p = 100$ μ m).

4. CONCLUSÕES

Os parâmetros velocidade de corte e profundidade de usinagem afetam significativamente a usinabilidade e a integridade superficial da rosca na usinagem de implantes dentários de titânio para aplicações cirúrgicas (ASTM F67).

A energia específica de corte é inversamente proporcional à profundidade de usinagem e à velocidade de corte, sendo a profundidade de usinagem o fator mais influente.

Profundidades de usinagem muito reduzidas ou elevadas prejudicam o acabamento dos flancos da rosca, enquanto velocidades de corte menores tendem a aumentar a energia específica de corte, prejudicando o acabamento da rosca. Velocidades de corte maiores causam efeito contrário.

É possível usinar a rosca de implantes na condição HSC, desde que a ferramenta de corte não se desgaste. Para tanto, sugere-se empregar velocidades de corte menores que 70 m/min, associadas a profundidades de usinagem não maiores do que 100 μ m.

Parâmetros de rugosidade estatística, como “Skewness” e “Kurtosis” sinalizam ser mais indicados para caracterizar a textura superficial dos flancos da rosca, já que a rugosidade média é insensível à variação de picos/vales e são estas microestruturas que governam a ancoragem do tecido ósseo.

Mesmo no roscamento do titânio, cavacos com baixo nível de segmentação (mesmo analisados via MEV) são obtidos a baixas velocidades de corte e sua forma acompanha o perfil métrico da ferramenta de corte. Para maiores velocidades de corte, o cavaco torna-se altamente segmentado e contribui com a redução da força e energia específica de corte, porém compromete a textura superficial dos vales da rosca, devido à vibração durante a usinagem.

A ferramenta de corte apresenta duas regiões distintas no contato cavaco-ferramenta. Na primeira, de menor extensão, ocorre aderência de titânio no revestimento da ferramenta. Na segunda região, de maior extensão, deslizamento do cavaco é o mecanismo preponderante.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa “IMPLALIFE - Indústria de Produtos Médico-Odontológicos” pelo fornecimento dos corpos de prova, ao CNPq pelo suporte na forma de bolsa de Mestrado e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da FEIS/UNESP.

6. REFERÊNCIAS

- Albrektsson, T., Wennerberg, A., 2004, "Oral implant surfaces: Part 1 – Review focusing on topographic and chemical properties of different surfaces and in vivo responses to them", *International Journal of Prosthodontics*, Vol. 17, No. 5, pp. 544-564.
- American Society For Testing And Materials, 2013, "ASTM F67-13: Standard Specification for Unalloyed Titanium, for Surgical Implant Applications". West Conshohocken, 6 p.
- Carlsson L, Rostlund T, Albrektsson B, Albrektsson T., 1988, "Removal torques for polished and rough titanium implants", *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, Vol. 3, No. 1, pp 21-24.
- Davim, J.P., 2010, "Surface integrity in machining", Ed. Springer-Verlag, London, United Kingdom, 222 p.
- Degarmo, E. P.; Black, J. T.; Kohser, R. A., 1997, "Fundamentals of chip type machining processes. In: Materials and processes in manufacturing. Prentice-Hall, ed. 8, p. 589-617, 1997.
- Elias, C.N.; Oshida, Y; Lima, J.H.C.; Muller, C.A., 2008, "Relationship between surface properties (roughness, wettability and morphology) of titanium and dental implant removal torque", *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials I*, Vol. 1, No. 3, pp.234-242.
- Ferraresi, D., 1977, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 751 p.
- Garcia, J.D.O., 2006, "Parafusos de pilar utilizados em implantes dentários", *Dissertação (Mestrado)*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 122 p.
- Geis-Gerstorfer, J., Lindmann, W., Scheider, L., 2003, "In vitro screening of microstructured titanium implant surfaces", *Proceedings of the 10th Int Friadent Symposium*, Mannheim, Germany.
- Gemelli, E., Scariot, A., Camargo, N. H. A., 2007, "Thermal Characterization of Commercially Pure Titanium for Dental Applications, *Materials Research*, Vol. 10, No. 3, pp. 241-246.
- Hung KY, Lo SC, Shih CS, Yang YC, Feng HP, Lin YC., 2013, "Titanium surface modified by hydroxyapatite coating for dental implants", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 231, pp. 337-345
- Iscar®, 2012, "Catálogo: Torneamento & Roscamento – Versão Métrica", Iscar®, São Paulo, Brasil, 465 p.
- Ishida, T.; Teramoto, K.; Nakamoto, K.; Takeuchi, Y., 2013, "Application of Ultraprecision Microgrooves to Dental Implant and Blood Inspection", *Procedia CIRP - First CIRP Conference on BioManufacturing*, Vol. 5, pp.147-151.
- Kalpakjian, S.; Schmid, S. R., 2000, "Manufacturing engineering and technology", Prentice-Hall, Lebanon, USA, 1148 p.
- Mathieu, V., Vayron, R., Richard, G., Lambert, G., Naili, S., Meningaud, J.P., Haiat, G., 2014, "Biomechanical determinants of the stability of dental implants: Influence of the bone-implant interface properties", *Journal of Biomechanics*, Vol. 47, No. 1, pp. 3-13.
- Neto, H. K.; Diniz, A. E.; Suyama, D. I., 2013, "Milling of titanium alloy: cutting forces and tool lives", *Proceedings of the 22nd International Congress of Mechanical Engineering*, Vol. 7, Ribeirão Preto, Brazil, pp. 5473-5479.
- Sandvik Coromant, 2009, "Manual técnico de usinagem", Sandvik Coromant, São Paulo, Brasil, 201 p.
- Shaw, M.C., 2004, "Metal Cutting Principles", Oxford Science Publications, New York, USA, 672 p.
- Suzuki, K., Aoki, K., Ohya, K., 1997, "Effects of surface roughness of titanium implants on bone remodeling", *Bone*, Vol. 21, No. 6, pp. 507-514.
- Wong, M., Eulenberger, J., 1995, "Effect of surface topology on the osseointegration of implant materials in trabecular bone", *Journal Biomedical Materials Research*, Vol. 29, No. 12, pp. 1567-1575.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SURFACE QUALITY AND SPECIFIC CUTTING ENERGY WHEN MACHINING DENTAL IMPLANTS

Rodolfo da Silva Manera, rdm518@bham.ac.uk¹

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br²

Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br³

Juno Gallego, gallego@dem.feis.unesp.br³

¹Machining Research Grupou, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, United Kingdom

²University of São Paulo, 400 Trabalhador São-Carlense Avenue, São Carlos-SP, 13566-590, Brazil

³Faculty of Engineering at Ilha Solteira-FEIS/UNESP, 56 Brasil Avenue, Ilha Solteira-SP, 15385-000, Brazil

Abstract. *Metallic alloys applied to implants have been researched aiming at improving their mechanical, microstructural and biocompatibility properties, being the titanium and its alloys, despite the development of several materials, the most widely used in implantology. Titanium is considered difficult-to-cut material, by generating high stresses and temperatures in a small cutting area (2/3 smaller than for other materials), requiring that the cutting parameters and tools need to be specified properly, since both raw material and manufacturing process increase the costs of the final product. This research determined the effects of cutting speed and depth of cut on specific cutting energy and the roughness of pure commercially dental implants (grade 4, ASTM F67) during the machining of the threads fillets. Machining tests were carried out in a swiss-type CNC lathe by applying TiAlN coated carbides and cutting fluid. Using ANOVA, low and high levels of depth of cut affected the specific cutting energy, damaging the roughness of the thread flanks. Lower cutting speeds trend to raise the specific cutting energy, damaging the screw finishing. Skewness and Kurtosis roughness parameters indicated the predominance of spiky surface on screw which is favorable to osseointegration. Tests at High-Speed Cutting (HSC) showed it is possible to machine implant screws, but depth of cut cannot be high to avoid vibration in threads.*

Keywords: *titanium, dental implants, threading, specific energy cutting, roughness*