



USO DE TÉCNICAS ÓPTICAS PARA AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE: UMA REVISÃO

Ítalo Sanches Arantes, italosanchesarantes@gmail.com¹
Carlos Henrique Lauro, carloslauro@ufsj.edu.br^{1,2}
Davies William de Lima Monteiro, davies@cpdee.ufmg.br³
Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br¹
Robson B. D. Pereira, robsondutra@ufsj.edu.br¹
João Paulo Davim, pdavim@ua.pt²
Leopoldo Ferreira de Sousa, leopoldo.sousa@ifsudestemg.edu.br⁴

¹ Centro de Inovação em Manufatura Sustentável, Dpto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando 170, 36307-352, São João del Rei, Brasil

² Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Campus Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal

³ OptMA_lab, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-010, Belo Horizonte, Brasil

⁴ Núcleo de Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora, R. Bernardo Mascarenhas 1283, 36080-001, Juiz de Fora, Brasil

Resumo. No contexto da indústria 4.0, deve se estabelecer técnicas de acompanhamento que permitam alcançar a melhor sustentabilidade do processo. Países com grande influência na economia do setor de manufatura, como o Brasil, devem incentivar o desenvolvimento de técnicas inteligentes aplicadas ao setor para minimizar os impactos sociais e ecológico dos produtos a um preço justo. A inspeção total da produção pode aumentar o custo e tempo do produto, mas uma inspeção aleatória pode permitir que o consumidor adquira um produto defeituoso. Dessas premissas, este trabalho discute as técnicas para controle da qualidade em processo de usinagem que possam ser desenvolvidas com valor reduzidos, para não impactar no custo final ao consumidor. Entender como do uso de técnicas óticas podem permitir uma inspeção na totalidade da produção com uma redução no custo e no tempo.

Palavras chave: Sustentabilidade. Monitoramento de Processos. Fabricação inteligente. Indústria 4.0.

1. INTRODUÇÃO

A indústria atual de manufatura é o principal setor em desenvolvimento de países emergentes. A fabricação de peças para automóveis, por exemplo, tem sido uma grande contribuinte para o Produto Interno Bruto (PIB) de países como Brasil, Índia e China. O setor de produtos por injeção representa cerca de 70% de todos os produtos manufaturados no mundo, e no Brasil, estimava uma receita de R\$ 33,2 bilhões, ou 1,1% do PIB nacional em 2009 (MARSON, 2009). Meiners (2011) cita que a implantação da indústria automobilística no Paraná previa um aumento no PIB estadual de US\$ 5 a US\$ 6 bilhões (cerca de 12% do PIB, em cinco anos).

Embora ao mencionar os setores que impactam no PIB, a primeira referência sejam os automóveis ou as embalagens plásticas, deve salientar a importância de setores como o de usinagem (máquinas-operatrizes, ferramentas, serviços e outros), pois esse impacta diretamente no setor automobilístico e de produtos por injeção. Já na indústria automobilística, quase todos os componentes passam por um processo de usinagem, pelo menos para realizar o acabamento de peças.

A qualidade de componentes usinados, por fresamento, torneamento ou furação, depende em grande parte da condição da ferramenta de corte. Entre os muitos métodos para quantificar a integridade superficial, a rugosidade é um método amplamente utilizado e considerado como o principal indicador da qualidade do acabamento superficial (ULUTAN; ÖZEL, 2011).

Brandão *et al.* (2013) estudaram a influência de diferentes condições de lubrificação (seco, MQL, ar frio) na rugosidade (Ra) no torneamento da liga de titânio Ti-6Al-4V. Os autores observaram que o sistema de resfriamento influenciou menos do que o avanço na rugosidade, mas os sistemas refrigerando não apresentaram a mesma influência, sendo o MQL a melhor escolha.

García-Ordás *et al.* (2018) ressalta a importância de otimizar as operações de substituição de ferramentas melhora significativamente a eficiência e a competitividade dos sistemas de manufatura. Entretanto, a rugosidade é uma resposta do processo que é afetada pelas combinações de máquina, material, condição e geometria das ferramentas, parâmetros

de corte e outros (BENARDOS; VOSNIAKOS, 2003). Assim, a inspeção da qualidade dos componentes, total ou por amostragem, gera custos indiretos, aumentando o tempo improdutivo e reduz a produtividade.

Uma opção é o uso de inspeção por imagem. A visão computacional é uma técnica de monitoramento para medir a rugosidade da superfície em processos de fabricação que, em comparação com o método tradicional, é mais rápida. Tem baixo preço e baixo ruído ambiental, mas a obtenção de valores confiáveis de rugosidade superficial baseados em estimativas de visão computacional ainda é difícil (MORALA-ARGÜELLO; BARREIRO; ALEGRE, 2011). A dificuldade dessa técnica é como processar a imagem que requer mais efeito de pesquisa, especialmente sob várias operações de corte (LEE; TARNG, 2001).

Young, Vorburger e Teague (1980) publicaram um artigo sobre a medição da textura da superfície em tempo real usando as Técnicas de Medição de Superfície Ótica. Galante, Piacentini e Ruisi (1991) usaram um aparato experimental que emprega uma fonte de iluminação de fibra ótica, uma câmera de vídeo CCD e uma placa digitalizadora de vídeo empregado no torneamento do aço AISI 1040 com uma ferramenta de carboneto de tungstênio a uma velocidade de corte de 200 m/min.

Na indústria, o comum a inspeção de componentes por amostragem aleatória, o que pode gerar lacuna devido ao fato que a anomalia no processo pode ocorrer a qualquer momento entre as inspeções, aumentando o custo pelo desperdício da produção ou permitir comercializar componentes com baixa qualidade. Assim, este trabalho debate a viabilidade do uso das técnicas óticas, no meio industrial, para uma maior eficiência do processo de usinagem e averiguação da qualidade das superfícies usinadas, sem grandes investimentos, por meio do reconhecimento de imagem.

2. ESTADO DA ARTE

Nesta seção são apresentadas uma breve revisão sobre a rugosidade e sua importância para componentes mecânicos. Além disso são apresentadas as principais técnicas de medição de rugosidade usando técnicas óticas.

2.1. Rugosidade

De acordo com Guedes (2011), a superfície usinada pode apresentar dois tipos de irregularidades distintas, macro-geometria (ondulação e erro de forma) e micro-geometria (rugosidade). A medida da rugosidade é muito importante para o controle da qualidade da produção, sendo significativa para o atrito, desgaste, fadiga, corrosão, tensão no contato em juntas, exatidão da montagem, entre outros (LU *et al.*, 2006). Nelson (2011) classifica a rugosidade como pequenas protuberâncias (picos) e orifícios (vales) na superfície em relação a um plano de referência, sendo quantificada em análise bidimensional (2D) ou tridimensionais (3D), referenciadas pela letra R , para parâmetros relacionados à rugosidade, ou a letra S , para parâmetros relacionados ao perfil da superfície, respectivamente.

A rugosidade da superfície são pequenas saliências e recessos que caracterizam uma superfície e podem ser avaliados diversas formas. Entre esses perfis, pode-se destacar o seguinte perfil:

- ✓ Rugosidade média aritmética (R_a). É o valor da das quantidades de todos os valores medidos. Neste perfil não há diferença entre picos e vales e tem, portanto, um caráter de informação relativamente fraco (JENOPTIK, 2011).
- ✓ Rugosidade da altura total (R_t). Este perfil é a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo do perfil do comprimento total da avaliação (JENOPTIK, 2011).
- ✓ Rugosidade de altura máxima (R_z). Este perfil é a média de cinco partes do comprimento total da avaliação (JENOPTIK, 2011).

Ribeiro Filho (2016a, b) investigou a influência da rugosidade obtida em processos de usinagem no comportamento da corrosão da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando o simulado fluido corporal (*Simulated Body Fluid* - SBF). No processo de torneamento, os autores observaram a influência significativa do avanço e profundidade de corte na taxa de corrosão. A combinação do menor valor de avanço e profundidade de corte melhorou a biocompatibilidade devido à formação da camada passiva mais rapidamente.

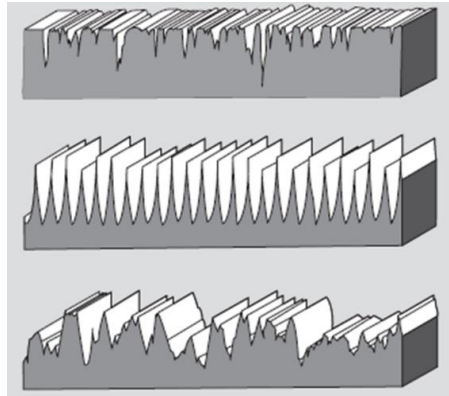
Rodríguez *et al.* (2017) destaca a importância da qualidade da superfície para assegurar e controlar as características de aderência da superfície. Os autores citam Otero (2012) que ressalta as tecnologias não convencionais como a texturização a laser podem melhorar o desempenho de materiais metálicos, fornecendo funcionalidades especiais, como melhorar a aderência, alterando a aspereza da superfície.

Lahiff, Gordon e Phelan (2007) citaram que se o acabamento superficial (R_a) foi o parâmetro usado para definir a vida útil da ferramenta, o raio máximo da ponta é 0,8 mm, pois um raio menor da ponta tem um efeito negativo no acabamento superficial da peça. Segundo Mhamdi *et al.* (2012), na literatura é possível encontrar vários perfis empregados à rugosidade. A rugosidade aritmética média (R_a) é um perfil que apresenta o valor aritmético do da linha central, sendo o parâmetro mais popular da rugosidade em medição bidimensional. Numa medição tridimensional, os mais populares são o perfil médio aritmético (S_a) e o perfil superficial (S_q).

Entretanto, Machado *et al.* (2009) ressalta que mesmo sendo bastante utilizado pela indústria e ser vantajoso por ser um parâmetro estável, que não recebe influência de efeitos ocasionais, o perfil R_a não é suficiente, quando analisado

sozinho, para caracterizar importantes da superfície, pois superfícies geometricamente diferentes podem apresentar valores para R_a bem próximos, mas desempenhos em serviço bastante diversos, Fig. 1.

Figura 1. Superfícies com mesmo valor da rugosidade R_a .



Além da rugosidade e forma da superfície, o acabamento consiste também da ondulação da superfície, que é um tipo de imprecisão do comprimento de onda maior do que a rugosidade da superfície e menor do que o erro de forma. O comprimento de onda da rugosidade na direção de avanço é equivalente à taxa de alimentação em unidades de distância (MEYER; VELDHUIS; ELBESTAWI, 2009).

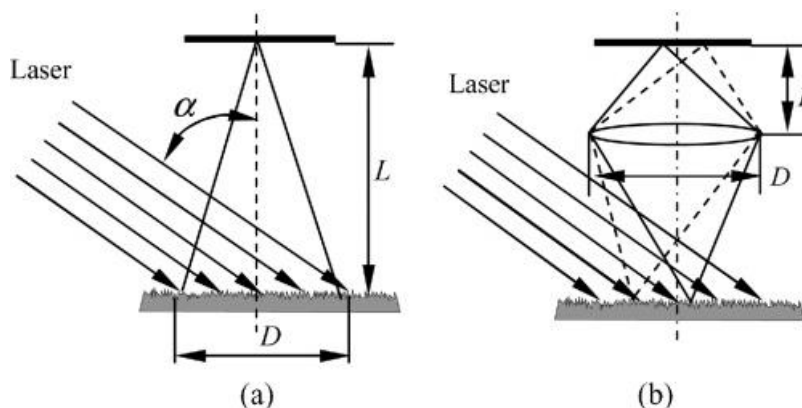
2.2. Técnicas Ópticas

Usualmente, para os requisitos de qualidade, as tecnologias de caracterização de superfície incluem perfilometria de contato, microscopia, técnicas ultrassônicas ou microscopia eletrônica de varredura atômica. Porém, essas técnicas forneçam dados superficiais com alta precisão, que são difíceis de aplicar, pois precisam de ajustes delicados, distâncias extremamente curtas ou contato com as superfícies medidas (RODRÍGUEZ *et al.*, 2017). Carou *et al.* (2017) analisou a frequência e amplitude do som emitido durante o torneamento do liga de magnésio UNS M11917. Os autores obtiveram bons resultados para essa análise, entretanto, esse método pode sofrer influências de fontes externas, ruídos oriundos de outras fontes presentes no ambiente.

Hoy e Yu (1991) empregou um sistema para aquisição de imagem digital para a medição do acabamento superficial, usando cinco amostras com rugosidade com valores de 0,82, 1,6, 3,2, 6,4 e 12.7 μm . as avaliações da qualidade da superfície utilizando um sistema de visão mecânica foram considerados úteis e ambos parecem promissores. Esses métodos podem ser usados para medir a aspereza da superfície, indicadores de desgaste da ferramenta e vibração da ferramenta. Os autores sugerem o desenvolvimento de software de análise apropriado para a implementação os métodos propostos, mas ressaltam as limitações para as técnicas em uma análise on-line tanto por software, como a implementação de hardware nessa época.

Para as medições básicas de rugosidade por meio de imagens do padrão de *speckle* ocorre pela análise do espaço livre numa imagem, *speckle*, de objetivo, Fig. 2a. Alternativamente, é formado pela coleta da luz dispersa com uma lente e focando-o em uma tela é chamado padrão de *speckle* subjetiva, Fig. 2b. O tamanho de *speckles*, Eq. (1), uma média estatística da distância entre regiões adjacentes de intensidade máxima e mínima (LU *et al.*, 2006).

Figura 2. Esquemas básicos e configuração experimental da formação do padrão *speckle* (LU *et al.*, 2006).



$$z = 1,22 * \lambda * \rho * \frac{L}{D_r} \quad (1)$$

Onde, z é o tamanho de *speckles*; λ é o comprimento de onda da luz laser; ρ é o *speckles* (1 se objetivo e $1+M$ para subjetivo); sendo M a ampliação da lente.

Hamed *et al.* (2004) analisou diferentes corpos de prova em alumínio com superfícies rugosas através de configuração experimental usada para imagens do *speckle* com um feixe de laser de He-Ne de potência de 10 MW a $\lambda = 633$ nm para iluminação do sistema óptico. Segundo os autores, a imagem *speckle* (binária) obtidas para as diferentes rugosidades foram mais aglomeradas para maior rugosidade R_a , 4 μm , em comparação com a menor aglomeração que ocorre na rugosidade inferior. Isso ocorreu porque o número de pixels da imagem retidos na contagem é proporcional à rugosidade da superfície, estando em conformidade com os resultados de contraste das imagens de *speckle* que aumentaram com a rugosidade da superfície.

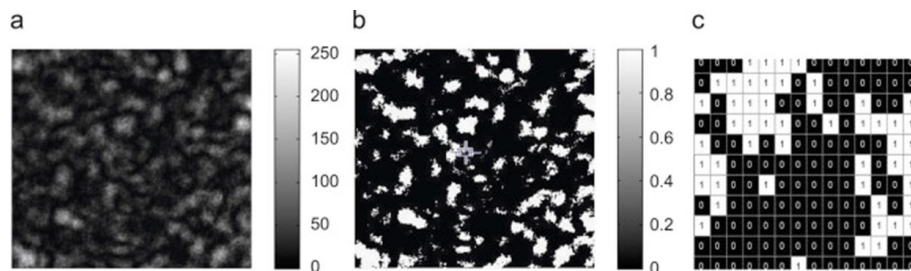
NICKLAWY *et al.* (2009) analisou a relação entre fonte de luz (laser He-Ne) com comprimento de onda de 0,6328 μm com a rugosidade de cinco amostras com diferentes valores de R_a (1,6, 2,3, 3,17, 4,5, 6,3 μm). A exatidão do método depende da fonte de luz usada para iluminação, efeito da condição ambiental, da rugosidade, resolução da câmera e repetibilidade das medições. Mas, os autores obtiveram bons resultados para caracterizar a rugosidade, usando transformação de Fourier.

Segundo Lu *et al.* (2006), pode-se constatar boa relação da rugosidade com as imagens do padrão *speckle*, em escala de cinza. A robustez das variações da potência do laser, distância da superfície e microestrutura da superfície é melhor representada pela curva exponencial normalizada, k , ou seja, é o melhor para caracterizar a rugosidade da superfície. Além disso, observou que as variâncias da potência do laser e a orientação da microestrutura da superfície têm influência significativa. O ângulo de incidência do laser, oblíquo, deve ser ajustado o mínimo possível devido a influência da microestrutura da superfície.

A correlação espectral do *speckle* (*Spectral speckle correlation* - SSC) foi estudada por Persson (1993) para medições relativas da rugosidade da superfície. A vantagem do SSC, além da rápida medição e facilidade de automação, é a possibilidade de medir rugosidades em uma faixa de 0,5 a 5 μm . Entretanto, a baixa exatidão do processo devido à alta sensibilidade ao desalinhamento e vibrações, como às variações de altura e à existência de diferentes comprimentos de onda de superfície, as comparações devem ser restritas a superfícies usinadas da mesma maneira.

Kayahan *et al.* (2010) empregou a técnica óptica com o método das propriedades estatísticas de imagens binárias (*Statistical Properties of Binary Images* - SPBI) para a medição da rugosidade superficial usando o padrão *speckle* com um feixe de laser He-Ne de 633 nm. Os pixels das imagens assumem valor 0 para pontos preto (escuro) e valor de 1 para pontos em branco (brilhante), Fig. 3. Neste estudo, cinco diferentes superfícies fresadas de aço de SAE 1045 foram usadas para comparar a rugosidade com a interferência e dispersão da luz laser He-Ne. O método proposto é um método relativamente simples e tem grande potencial para ser usado para medição e automação em processo devido à simplicidade do sistema óptico requerido.

Figura 3. Esquema do método das propriedades estatísticas de imagens binárias



(a) Parte da imagem do padrão *speckle* em 8 bits ($R_a = 0,695$ μm). (b) Imagem de padrão de *speckle* binário da imagem mostrada em (a). (c) A área marcada com uma cruz em (b) é ampliada para mostrar os valores dos pixels.

3. COMENTÁRIOS FINAIS

A rugosidade é a principal resposta estudada em processos de usinagem e conformação. Obter uma superfície com valores baixos de rugosidade é o objetivo desses processos para garantir uma melhor montagem, resistência mecânica, resistência a corrosão, entre outros. A técnica mais comum para a medição da rugosidade é por meio da medição de contato. Os equipamentos para esse tipo de medição estão sujeitos a perda da calibração, influência da contaminação da superfície (óleos, gorduras, oxidações, entre outros), desgaste de agulha de medição, entre outros. Além disso, há um elevado tempo para medição e a exigência da capacitação técnica dos operadores. Assim, técnicas para a medição sem

contato podem apresentar redução de custos e melhores resultados, além de apresentar grandes vantagens como a facilidade para ser automatizada.

Baseando-se nas informações previamente apresentadas, pode afirmar que o uso do padrão de *speckle* e as suas derivações são uma excelente opção para a medição da rugosidade em superfícies planas. Essas técnicas além de reduzir o tempo de medição, tornam-se de baixo custo por não apresentarem desgaste dos componentes, como também pela facilidade do monitoramento em tempo real que permite reduzir o desperdício no processo de fabricação. Entretanto, essas técnicas ainda possuem lacunas que dificultam sua ampla utilização em meios industriais. A influência da microestrutura do material, das tensões residuais, oxidações, óleos e gorduras na superfície necessitam de maiores estudos, como também a forma da superfície.

Outra importante lacuna está na associação do padrão de *speckle* somente ao perfil de rugosidade R_a com valores acima de 1 μm . Pois embora seja muito utilizada, o perfil R_a não permite uma boa caracterização da superfície. Entender a relação do padrão de *speckle* para perfil como o R_z torna-se extremamente vantajoso para aplicações médicas, fabricação de implantes. Pois para uma melhor osseointegração a alturas dos picos deve ser a menor possível, sendo em muitos casos recomendado um número máximo de picos por área. Ainda dentro desse ideal, conhecer o comportamento do padrão de *speckle* perante a presença de microcavacos ou microrrebarbas também é essencial para a obtenção do aprimoramento do controle da rugosidade por meio de técnicas ópticas.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM) por possibilitar esta pesquisa por meio da concessão de bolsa de Iniciação Científica Edital 2018.

5. REFERÊNCIAS

- Trindade, M.A. e Benjeddou, A., 2011b. "Evaluation of effective material properties of thickness-shear piezoelectric macro-fibre composites". In *Proceedings of the 21st International Congress of Mechanical Engineering - COBEM2011*. Natal, Brazil
- BENARDOS, P.G.; VOSNIAKOS, G.-C. "Predicting surface roughness in machining: a review". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 43, n. 8, p. 833–844, jun. 2003.
- BRANDÃO, L.C. et al. "Influence of Different Cooling Systems on Surface Roughness in the Turning of the Ti-6Al-4V Alloy Used as Biomaterial". *Advanced Materials Research*, v. 704, p. 155–160, jun. 2013.
- CAROU, D. et al. "Study Based on Sound Monitoring as a Means for Superficial Quality Control in Intermittent Turning of Magnesium Workpieces". *Procedia CIRP*, v. 62, p. 262–268, 2017.
- GALANTE, G.; PIACENTINI, M.; RUISI, V.F. "Surface roughness detection by tool image processing". *Wear*, v. 148, n. 2, p. 211–220, ago. 1991.
- GARCÍA-ORDÁS, María Teresa et al. "Tool wear monitoring using an online, automatic and low cost system based on local texture". *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 112, p. 98–112, 1 nov. 2018.
- GUEDES, P. Metrologia Industrial. Lisboa. ETEP. 2011.
- HAMED, A.M. et al. "Analysis of speckle images to assess surface roughness". *Optics & Laser Technology*, v. 36, n. 3, p. 249–253, 1 abr. 2004.
- HOY, D.E.P.; YU, F. "Surface quality assessment using computer vision methods". *Journal of Materials Processing Technology*, v. 28, n. 1–2, p. 265–274, set. 1991.
- JENOPTIK. *Roughness measuring systems from Hommel-Etamic – Surface parameters in practice*. 2011.
- KAYAHAN, Ersin et al. "Measurement of surface roughness of metals using binary speckle image analysis". *Tribology International*, v. 43, n. 1–2, p. 307–311, 1 jan. 2010.
- LAHIFF, C.; GORDON, S.; PHELAN, P. "PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 23, n. 6, p. 638–644, dez. 2007.
- LEE, B.Y.; TARNG, Y.S. "Surface roughness inspection by computer vision in turning operations". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 41, n. 9, p. 1251–1263, jul. 2001.
- LU, Rong-Sheng et al. "Grinding surface roughness measurement based on the co-occurrence matrix of speckle pattern texture". *Applied Optics*, v. 45, n. 35, p. 8839, 10 dez. 2006.
- MACHADO, Á.R. et al. Teoria da usinagem dos materiais. 1. ed. São Paulo: EDGARD BLUCHER, 2009.
- MARSON, D. Filão de moldes aberto para exportação. Revista Máquinas e Metais, set. 2009.
- MEINERS, W. E. M. de A. Impactos regionais dos investimentos automobilísticos no Paraná. Revista Paranaense de Desenvolvimento - RPD, v. 94, p. 29–48, 2011.
- MEYER, P.A.; VELDHUIS, S.C.; ELBESTAWI, M.A. "Predicting the effect of vibration on ultraprecision machining surface finish as described by surface finish lobes". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 49, n. 15, p. 1165–1174, dez. 2009.
- MHAMDI, M.-B. et al. "Surface Integrity of Titanium Alloy Ti-6Al-4V in Ball end Milling". *Physics Procedia*, v. 25, n. 0, p. 355–362, jan. 2012.

- MORALA-ARGÜELLO, P.; BARREIRO, J.; ALEGRE, E. “A evaluation of surface roughness classes by computer vision using wavelet transform in the frequency domain”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 59, n. 1–4, p. 213–220, 7 jul. 2011.
- NELSON, C. “Factors Affecting the Success of Dental Implants”. In: Turkyilmaz, I. “*Implant Dentistry - A Rapidly Evolving Practice*”. InTech. 544p. 2011.
- NICKLAWY, M. et al. “Characterizing surface roughness by speckle pattern analysis”. *Journal of Scientific and Industrial Research*, v. 68, n. 2, p. 118–121, 2009.
- PERSSON, Ulf. “Measurement of surface roughness on rough machined surfaces using spectral speckle correlation and image analysis”. *Wear*, v. 160, n. 2, p. 221–225, 1 fev. 1993.
- RIBEIRO FILHO, S.L.M. et al. “Effects of the Dynamic Tapping Process on the Biocompatibility of Ti-6Al-4V Alloy in Simulated Human Body Environment”. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 41, n. 11, p. 4313–4326, 24 mar. 2016a.
- RIBEIRO FILHO, S.L.M. et al. “Influence cutting parameters on the surface quality and corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in synthetic body environment (SBF) using Response Surface Method”. *Measurement*, v. 88, p. 223–237, jun. 2016b.
- RODRÍGUEZ, F. et al. “Speckle characterization of surface roughness obtained by laser texturing”. *Procedia Manufacturing*, v. 13, p. 519–525, 1 jan. 2017.
- ULUTAN, D.; ÖZEL, T. “Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 51, n. 3, p. 250–280, mar. 2011.
- YOUNG, R. D.; VORBURGER, T. V.; TEAGUE, E. C. “In-Process and On-Line Measurement of Surface Finish”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 29, n. 1, p. 435–440, jan. 1980.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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