

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

USO DE SCANNER 3D NA DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE UMA PLACA CERÂMICA INFESTADA COM MEXILHÃO DOURADO

Leirisson Patrick Santos¹; Tâmara Rita Costa de Souza¹; Stênio Augusto de Souza Coelho¹; Felipe Laffiti Assis Soares²; Jorge Luis Zegarra Tarqui³ & Edna Maria de Faria Viana^{1,2}

l.patricksantos@gmail.com; tamararccosta@hotmail.com; stenio-augusto@hotmail.com; laffiti@gmail.com; jlztarqui@yahoo.com.br; ednamariafaria@bol.com.br

RESUMO – A presença do mexilhão dourado (MD) em usinas hidrelétricas, gera diversos problemas como exemplo a obstrução parcial das tomadas d'água e grades protetoras, tendo como consequência perda de carga significativa pelo aumento da rugosidade superficial e redução da secção transversal da passagem do fluido. Portanto, o estudo da rugosidade de uma superfície infestada com MD tem grande validade para pesquisas relacionadas às consequências geradas em ambientes demarcados pela presença desse molusco. Este trabalho tem como fundamento propor uma metodologia para o cálculo da rugosidade e caracterização de uma superfície infestada com MD, mediante a utilização de um scanner 3D. A rugosidade média calculada com essa metodologia foi de 10,15 mm, sendo validada pela comparação com outro estudo experimental, com condições de cultivo do molusco semelhantes.

Palavras-Chave – Mexilhão Dourado, Rugosidade, Perdas Hidráulicas.

ABSTRACT– The presence of the *Limnoperma fortunei*, also known as the golden mussel, in hydroelectric plants has many consequences, such as the partial obstruction of the intake grates, resulting in a significant loss of load due to the increase in surface roughness and reduction of the cross-section area where occurs the flow. Therefore, the study and determination of the roughness of a surface infested with the golden mussel is important for the development of other researches that focus on the consequences of the invasion of this species in water transfer systems. The objective of this paper is to propose a methodology for calculating the roughness and characterization of a surface infested with *Limnoperma fortunei* using a 3D scanner. The average roughness calculated was 10.15 mm, a value comparable to what was found in a different experimental study, with similar culture conditions.

Palavras-Chave – Golden Mussel, Roughness, Hydraulic Losses.

1) Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG – Brasil,

2) Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG – Brasil.

3) Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG – Brasil.

INTRODUÇÃO

O *Limnoperna fortunei*, popularmente conhecido como mexilhão dourado (MD) é um molusco bivalve de água doce com os primeiros registros da sua presença na América do Sul em 1991 no rio da Prata, Argentina (Darrigran, 1995). Já em território nacional (Brasil) os primeiros registros desse molusco ocorreram em 1998 no conjunto hidrográfico Delta do Jacuí, Rio Grande do Sul e posteriormente em 1999 ao sul do Lago Guaíba, Rio Grande do Sul (Mansur *et. al*, 2003). A hipótese que justifica a chegada do MD na América Latina, é que o mesmo veio por meio de lastros de navio oriundos do sudeste asiático (Darrigran *et al*, 2012).

Por não se tratar de uma espécie local nativa, o MD ainda não possui predadores naturais além de apresentar a característica de alta taxa de reprodução e de propagação, por esses motivos, geram diversos problemas ambientais e até mesmo econômicos. Nos estágios iniciais da vida do mexilhão, fase larval, é produzida uma substância denominada ‘bisso’ que permite a sua fixação nos mais diversos substratos como exemplos metal, madeira, couro e concreto, aglomerando-se em diversas camadas irregulares (Costa *et. al*, 2016).

Em instalações hidráulicas a presença do MD ocasiona diversos problemas, pois a sua fixação em regiões específicas influencia o desempenho do sistema, por exemplo, em tubulações ou grades de tomadas d’água em usinas hidrelétricas, os efeitos da perda de carga possuem intensidade para reduzir a potência do sistema e alterar os efeitos transientes do fluido de trabalho durante manobras de válvulas (Ferreira Junior *et. al*, 2017). Em condutos forçados, com a incrustação pelo ‘MD’ ocorre um efeito denominado ‘*macrofouling*’ que consiste na obstrução parcial ou total da seção transversal da tubulação, sendo um fenômeno grave principalmente em instalações de bombeamento por reduzir a eficiência do sistema exigindo o aumento na periodicidade de manutenções relacionadas à limpeza ou troca das tubulações (Ferreira Junior *et. al*, 2018).

Por se tratar de um fator biológico, as características dos mexilhões dependem amplamente das condições climáticas e ambientais do seu local de instalação, dificultando assim as pesquisas relacionadas à esses moluscos, além do fato de que essas devem ser realizadas em ambientes controlados e autorizados, para evitar contaminações de ambientes que ainda não são marcados pela presença do MD. Por esse motivo, o dimensionamento de montagens hidráulicas contaminados com larvas do MD devem prever a sua influência no comportamento do sistema para a correta elaboração de planos de manutenção e de manobras em acessórios (válvulas) como exemplo.

Um dos principais fatores que influenciam no desempenho de um sistema hidráulico é a rugosidade das superfícies com que o fluido de trabalho interage, por essa razão, ter a ciência de um valor aproximado da rugosidade superficial imposta por uma camada desenvolvida de mexilhão

dourado facilita a elaboração ou alteração de projetos e modos de operação de um sistema hidráulico com a presença desses moluscos.

Visto essa necessidade, este trabalho tem como objetivo obter a rugosidade superficial de uma placa cerâmica incrustada artificialmente por mexilhão dourado mediante o escaneamento tridimensional da peça e comparar os resultados com outro estudo experimental para validação.

METODOLOGIA

Uma placa cerâmica com dimensões de 31 x 31 cm foi infestada artificialmente com mexilhão dourado (MD), mediante a fixação com cola quente em uma disposição similar à encontrada na natureza.

Com o intuito de calcular a rugosidade superficial da placa infestada pelo MD, foi utilizado o scanner 3D, que tem por finalidade transformar a placa física em um modelo virtual tridimensional com a escala de 1:1, possibilitando assim a edição do modelo em um software CAD (Computer-Aided Design). A Figura 1 demonstra a placa cerâmica com mexilhões encrustados, a qual foi revestida com tinta spray branca, por possibilitar melhores resultados no processo de leitura do scanner.



Figura 1 – Placa cerâmica incrustada artificialmente com MD.

O arquivo gerado pela tecnologia de scanner 3D, transforma o corpo sólido em uma malha composta por superfícies triangulares. O software de código aberto MeshLab foi utilizado na leitura do arquivo gerado, sendo representado na Figura 2.

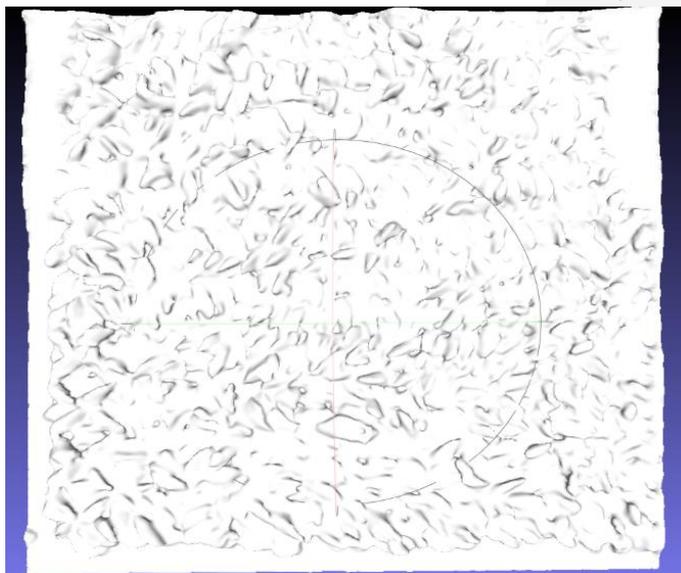


Figura 2 – Modelo Virtual 3D escaneado.

A quantidade de faces triangulares geradas para a representação do modelo virtual da placa foi de 2.730.064. Devido à limitação da capacidade computacional, softwares CAD sugerem para edição, arquivos com um valor máximo de 20.000 faces.

Deste modo, o software MeshLab foi utilizado para realizar uma simplificação na malha do arquivo, com o intuito de reduzir a quantidade de faces triangulares. Foram gerados, portanto, arquivos com 10, 20, 40 e 60 mil faces respectivamente, para o cálculo da rugosidade e posterior comparação para verificar a influência da simplificação nos resultados. A Figura 3 representa a malha com 20 mil superfícies triangulares.

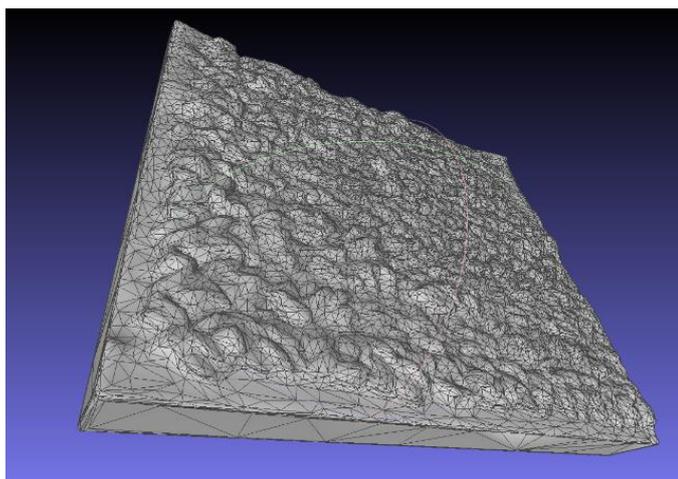


Figura 3 – Malha com 20 mil faces.

Na interseção de cada vértice adjacente das superfícies triangulares, é gerado um ponto com coordenadas espaciais representadas por (X,Y,Z), os quais foram utilizados como base para o mapeamento topográfico da superfície.

A fim de facilitar e garantir confiabilidade aos dados adquiridos, a superfície da cerâmica que foi infestada com mexilhão, foi utilizada como plano de referência, correspondendo ao plano cartesiano XY no software CAD SolidWorks®. Desse modo, a altura referente aos picos e vales formados pela incrustação do mexilhão na placa, correspondem à coordenada Z coletada no software CAD.

A rugosidade média de uma superfície (S_a), ou média aritmética das alturas, é calculada de acordo com a Equação 1, na qual 'z' representa a altura do ponto mensurado, e 'P' a quantidade de pontos tabelados no levantamento topográfico (Deleanu *et al.*, 2012).

$$S_a = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P z(x_i, y_j) \quad (1)$$

Outro parâmetro muito difundido na análise da rugosidade de superfícies, consiste na rugosidade média quadrática (S_q), demonstrada pela Equação 2. Tal parâmetro representa o desvio padrão da distribuição das alturas da área observada, sendo mais sensível à alturas com grande desvio em relação à rugosidade média (Gadelmawla *et al.*, 2002).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P z^2(x_i, y_j)} \quad (2)$$

Os parâmetros S_a e S_q , não caracterizam a suavidade e distribuição dos picos e vales existentes na superfície analisada, podendo existir amostras de materiais distintos com rugosidade similar mas com características geométricas dos picos e vales extremamente distintas. Portanto é importante avaliar os parâmetros de assimetria (S_{sk}) e curtose (S_{ku}) da distribuição de alturas topográficas, que podem ser calculados conforme As Equações 3 e 4 respectivamente (Sadowski, 2014).

$$S_{sk} = \sqrt{\frac{1}{PS_q^3} \sum_{i=1}^P z^3(x_i, y_j)} \quad (3)$$

$$S_{ku} = \sqrt{\frac{1}{PS_q^4} \sum_{i=1}^P z^4(x_i, y_j)} \quad (4)$$

O parâmetro S_{sk} é utilizado para mensurar a assimetria do perfil topográfico em relação ao plano principal (Gadelmawla *et al.*, 2002). Para casos nos quais o plano principal encontra-se entre as máximas coordenadas dos picos e vales, um valor positivo para esse indicador demonstra predominância de picos no perfil topográfico, simetria quando for igual a zero, e valores negativos

demonstram a predominância de vales (Naylor *et al*, 2016). No caso em questão, no qual o plano principal (altura zero) encontra-se abaixo dos demais pontos mensurados, o valor 1 para esse fator delimita tais características, podendo ser também utilizado como ferramenta qualitativa para comparações futuras em experimentos relacionados ao cálculo da rugosidade em superfícies enfiadas com mexilhão dourado.

O indicador de curtose S_{ku} representa a homogeneidade ou não da distribuição de picos e vales na área observada, valores inferiores a 3 indicam uma distribuição mais homogênea dos picos e vales, a valores superiores a 3 relatam um maior grau de aleatoriedade desses pontos (Gadelmawla *et al.*, 2002). Foi relatado também a máxima altura de pico (S_p) e vale (S_v).

RESULTADOS

Diante da necessidade de simplificar o arquivo original criado pelo scanner 3D, devido à elevada quantidade de faces triangulares geradas na conversão do modelo real em virtual, torna-se necessário investigar o impacto de tal simplificação na sensibilidade dos resultados.

A quantidade de coordenadas X,Y,Z da placa escaneada (P), aumenta conforme o incremento das faces triangulares constituintes do modelo 3D.

Sendo assim, modelos com malhas mais refinadas apresentam maior precisão nos resultados, por ter uma quantidade maior de dados amostrais.

A Tabela 1 exibe os parâmetros relativos à rugosidade, calculados para a placa cerâmica incrustada escaneada com 10, 20, 40 e 60 mil faces respectivamente.

Tabela 1– Parâmetros de rugosidade calculados.

Faces	10x10 ³	20x10 ³	40x10 ³	60x10 ³
P	4990	9277	18612	27712
S_a (mm)	9,95	10,13	10,16	10,15
S_q (mm)	10,41	10,55	10,56	10,54
S_{sk}	1,12	1,11	1,11	1,11
S_{ku}	1,34	1,30	1,29	1,29
S_p (mm)	20,87	20,78	20,96	20,93
S_v (mm)	1,14	1,15	1,15	1,15

É possível observar pelos dados calculados e exibidos na Tabela 1, que conforme o aumento da quantidade de faces e conseqüentemente de pontos com coordenadas (X,Y,Z) tabelados, os parâmetros referentes à rugosidade tendem a convergir. A Figura 4 demonstra o erro relativo de cada parâmetro, conforme há o incremento da quantidade de faces nos modelos virtuais.

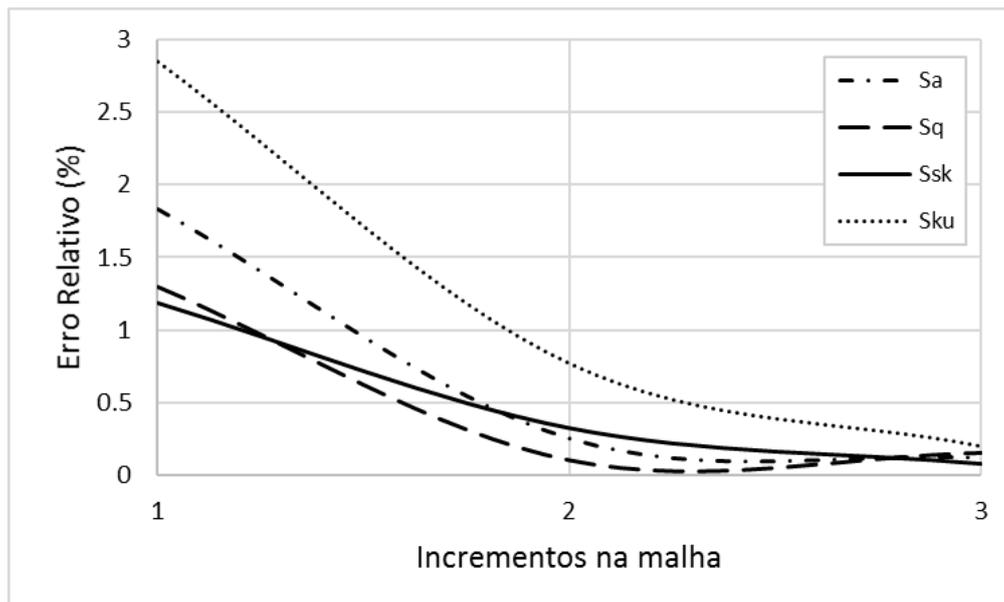


Figura 4 – Erro relativo a cada incremento de malha.

Nota-se que no último incremento, referente ao modelo com 60 mil faces triangulares, todos os parâmetros calculados apresentam erro relativo inferior a 0,2%, demonstrando o comportamento convergente, e garantindo por sua vez a confiabilidade dos resultados obtidos para a malha com maior refinamento.

A placa cerâmica ensaiada, com dimensões 30x30 cm, incrustada com mexilhão dourado, apresentou rugosidade média de 10,15 mm. De acordo com trabalho experimental realizado por Costa (2016), com condições de cultivo do MD similares à desenvolvida neste trabalho, o qual consistiu em analisar manualmente o perfil 2D de placas de uma grade incrustada artificialmente, encontrou uma rugosidade média equivalente a 10,25 mm. Os valores próximos da rugosidade para metodologias distintas contribuem para validar os resultados obtidos pelo escaneamento 3D da peça.

Por ressaltar melhor os picos e vales, é esperado que a rugosidade média quadrática calculada, seja superior à média aritmética S_a , conforme o obtido, correspondendo a 10,54mm. O parâmetro de assimetria S_{sk} calculado, por ser pouco superior a 1, denota que a presença dos picos é mais representativa em relação aos vales, no entanto, a dispersão das alturas apresenta uma boa simetria em relação à rugosidade média.

O valor calculado de 1,29 referente ao parâmetro S_{ku} , por ser inferior a 3 caracteriza a boa distribuição dos picos e vales na área analisada, conforme o esperado, por se tratar de uma placa infestada artificialmente com uma única camada de MD.

A metodologia desenvolvida utilizou como referência uma placa infestada artificialmente com MD coletados na região, o que pode ser uma fonte de propagação de erros quando aplicada a um caso de infestação real. Outra possível fonte de erros na metodologia é que por se tratar de fatores

biológicos, as dimensões de cada indivíduo podem apresentar uma grande variância quando extraídos de regiões distintas. No entanto, os resultados obtidos foram significativos para comprovar que a rugosidade de uma superfície infestada com MD é elevada e pode causar efeitos negativos consideráveis em instalações hidráulicas.

O estudo de caso desenvolvido por Ferreira Junior (2017), demonstrou que em uma tubulação de tomada d'água de uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH) com 550 mm de diâmetro e 600 m de comprimento, infestada com mexilhão dourado, representando uma rugosidade de 10,25 mm, pode ocorrer uma redução de 22,3% da potência gerada, podendo até inviabilizar a geração. O mesmo estudo mostrou que para os efeitos de transiente hidráulico em uma manobra de fechamento de válvula, o limite de segurança de 30% de sobrepressão é ultrapassado em uma tubulação infestada em todo o seu comprimento chegando a 34,1%, podendo causar problemas graves como ruptura da tubulação de tomada d'água.

Sendo assim, os valores da rugosidade de uma superfície infestada por mexilhão dourado são fundamentais no dimensionamento de sistemas hidráulicos na presença dessa espécie, como exemplo para o cálculo do tempo de manobra de válvulas e potência gerada ou consumida por um sistema.

CONCLUSÕES

O conhecimento da rugosidade de uma superfície infestada por mexilhão dourado, tem grande importância por exemplo em estudos hidráulicos relacionados à perda de carga. Com a metodologia desenvolvida nesse trabalho para a determinação da rugosidade, obteve-se resultados coerentes com demais pesquisas experimentais mediante situações de cultivo do molusco semelhante.

A utilização de um scanner 3D pode apresentar como benefício, agilidade nos resultados, além de possibilitar que a análise da rugosidade seja realizada sobre toda a superfície desejada e não somente em algumas secções transversais, sendo este o modo comumente realizado, o qual é mais suscetível a erros e exige maior tratamento estatístico.

O scanner 3D gera um corpo sólido virtual formado por superfícies triangulares. Devido à limitação da capacidade computacional, a quantidade dessas superfícies em relação ao arquivo original deve ser reduzida. A análise da independência das malhas simplificadas geradas, demonstrou um erro relativo dos parâmetros de rugosidade calculados inferior a 0,2% para o modelo virtual com 60 mil faces, sendo o resultado da rugosidade média para esse caso equivalente a 10,15 mm.

É importante ressaltar que por se tratar de uma pesquisa envolvendo fatores bióticos, os indivíduos podem apresentar tamanhos e formatos distintos entre diferentes regiões, alterando conseqüentemente a rugosidade média. Sendo assim essa metodologia é aconselhável a ser aplicada nos locais de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à UFMG, à CAPES, ao CNPq, ao Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG (PPG-SMARH/UFMG), ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG (PPGMEC/UFMG) e a toda a equipe do CPH/UFMG pelo suporte na elaboração do trabalho.

REFERÊNCIAS

- DARRIGRAN, G. (1995). “*Limnoperna fortunei: Um problema para los sistemas naturales de água dulce del Mercosur?*,” Museo La Plata, nº 1, pp. 85-87.
- MANSUR, M. C., SANTOS, C. P., DARRIGRAN, G., HEYDRICH, I., CALLIL, C. T., & CARDOSO, F. R. (2003). *Primeiros dados quali-quantitativos do mexilhãodourado, Limnoperna fortunei (Dunker), no Delta do Jacuí, no Lago Guaíba e na Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil e alguns aspectos de sua invasão no novo ambiente.* Revista Brasileira de Zoologia, 20, 75-84.
- DARRIGRAN, G.; DAMBORENEAR, C.; DRAGO, E. C.; DRAGO, I. E.; PAIRA, A.; ARCHUBY, F. (2012). *Invasion process of Limnoperna fortunei (Bivalvia: Mytilidae): The case of Uruguay River and emissaries of the Esteros del Iberá Wetland, Argentina*”. Zoologia (Curitiba). vol 29, nº 6, pp. 531-535.
- COSTA, T. R.; RICO, A. A. M.; JUNIOR, A. G. F.; MARTINEZ, C. B.; VIANA, E. M. F. (2016). “*Análise da perda de carga causada pela rugosidade, advinda da incrustação do mexilhão dourado,*” em XXVII Congresso LatinoAmericano de Hidráulica, Lima, Peru.
- FERREIRA JÚNIOR, A. G.; MARTINEZ, C. B. ; SALIBA, A. P. M. ; SERRANO, R. O. P. ; COSTA, T. R. ; SANTOS, L. P. (2017). *Simulação De Uma Rejeição De Carga E Os Efeitos Causados Pela Incrustação Do Mexilhão Dourado Nos Condutos Forçados Das Centrais Geradoras Hidrelétricas No Brasil: Um Estudo De Caso.* In: XII LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2017, Mar Del Plata - Argentina. GLAGTEE 2017. v. 1. p. 1-8.
- FERREIRA JUNIOR, A. G. ; SANTOS, L. P. ; MARTINEZ, C. B. ; FILHO, J. N.; VIANA, E. M. F. (2018) . *Os Efeitos Da Infestação Pelo Mexilhão Dourado Em Uma Instalação De Bombeamento Para Abastecimento De Água - Um Estudo De Caso.* Em: XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires. TRABAJOS COMPLETOS.
- DELEANU, L.; GEORGESCU, C.; SUCIU, C. (2012). “*Comparison Between 2D And 3D Surface*”. Ann. "dunarea de Jos" Univ. Galati- Fascicle v. 1. 5-12.
- GADELMAWLA, E.; KOURA, M. M.; MAKSUD, T. M. A.; ELEWA I. M.; SOLIMAN, H. H. (2002) “*Roughness parameters,*” Materials Processing Technology, pp. 133-145, 14 Janeiro.
- SADOWSKI, L. (20014). “*Application of three-dimensional optical laser triangulation method for concrete surface morphology measurement,*” Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, vol. 21, pp. 92-700.
- NAYLOR, A.; TALWALKAR , S. C.; TRAIL, I. A.; JOYCE, T. J. (2016). “*Evaluating the Surface Topography of Pyrolytic Carbon Finger Prostheses through Measurement of Various Roughness Parameters*”. Journal of Functional Biomaterials.