Contemporânea
Contemporary Journal
Vol. 4 N°. 8: p. 01-16, 2024
ISSN: 2447-0961

Artigo

PARAMETROS DE ANÁLISE DE MORFOLOGIA EM NANOESCALA OBTIDAS POR AFM DE FILMES POLIMÉRICOS: UMA BREVE REVISÃO DE LITERATURA

PARAMETERS FOR NANOSCALE MORPHOLOGY ANALYSIS OBTAINED BY AFM OF POLYMERIC FILMS: A BRIEF LITERATURE REVIEW

PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DE LA MORFOLOGÍA A ESCALA NANO OBTENIDOS POR AFM DE PELÍCULAS POLIMÉRICAS: UNA BREVE RESEÑA DE LA LITERATURA

DOI: 10.56083/RCV4N8-085
Receipt of originals: 07/08/2024
Acceptance for publication: 07/26/2024

Daniel Sousa dos Santos
Doutorando em Biodiversidade e Biotecnologia
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
Endereço: Macapá, Amapá, Brasil
E-mail: danielsousa@unifap.br

Erveton Pinheiro Pinto
Doutor em Biodiversidade e Biotecnologia
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
Endereço: Macapá, Amapá, Brasil
E-mail: erveton@unifap.br

Madson Jonhe da Costa
Mestrando em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)
Endereço: Macapá, Amapá, Brasil
E-mail: madson.jonhe.quimico@gmail.com

Tiago Marcolino de Souza
Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais
Instituição: Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR)
Endereço: Macapá, Amapá, Brasil
E-mail: tiago.souza@ueap.edu

RESUMO: A análise da morfologia em nanoescala de filmes poliméricos utilizando Microscopia de Força Atômica (AFM) é essencial para entender as propriedades físicas e topográficas desses materiais. Este artigo de revisão tem como objetivo explorar de forma detalhada os principais parâmetros de superfície obtidos por AFM na análise de filmes poliméricos. São discutidas as equações matemáticas associadas a parâmetros importantes como rugosidade média, rugosidade quadrática média, curtose, assimetria, dimensão fractal, lacunaridade fractal, entropia de superfície, sucolaridade fractal e índice de Moran. Essas equações fornecem uma base teórica robusta para a interpretação dos dados obtidos e permitem uma análise minuciosa das características superficiais dos filmes. O artigo também ressalta a importância desses parâmetros como indicadores cruciais para avaliar a qualidade e a funcionalidade dos filmes poliméricos, proporcionando uma visão abrangente sobre como esses parâmetros podem afetar a performance e as propriedades dos materiais analisados. Essa abordagem contribui significativamente para a compreensão e aplicação dos filmes poliméricos em diversas áreas.

PALAVRAS-CHAVE: microscopia de força atômica, morfologia em nanoescala, análise fractal, filmes poliméricos.

ABSTRACT: The analysis of the nanoscale morphology of polymer films using atomic force microscopy (AFM) is essential to understanding the physical and topographic properties of these materials. This review article aims to explore in detail the main surface parameters obtained by AFM in the analysis of polymer films. The mathematical equations associated with important parameters such as mean roughness, root mean square roughness, kurtosis, asymmetry, fractal dimension, fractal lacunarity, surface entropy, fractal susceptibility, and Moran index are discussed. These equations provide a robust theoretical basis for the interpretation of the obtained data and allow a thorough analysis of the surface characteristics of the films. The article also highlights the importance of these parameters as crucial indicators to evaluate the quality and functionality of polymeric films, providing a comprehensive view on how these parameters can affect the performance and properties of the analyzed materials. This approach contributes significantly to the understanding and application of polymer films in various fields.

KEYWORDS: atomic force microscopy, nanoscale morphology, fractal analysis, polymeric films.

RESUMEN: El análisis de la morfología a nanoescala de películas poliméricas mediante la microscopía de fuerza atómica (AFM) es esencial para comprender las propiedades físicas y topográficas de estos materiales. Este

artículo de revisión tiene como objetivo explorar en detalle los principales parámetros de superficie obtenidos por AFM en el análisis de películas poliméricas. Se discuten las ecuaciones matemáticas asociadas con parámetros importantes como rugosidad media, rugosidad cuadrática media, curtosis, asimetría, dimensión fractal, lacunaridad fractal, entropía de superficie, susceptibilidad fractal e índice de Moran. Estas ecuaciones proporcionan una base teórica sólida para la interpretación de los datos obtenidos y permiten un análisis exhaustivo de las características superficiales de las películas. El artículo también destaca la importancia de estos parámetros como indicadores cruciales para evaluar la calidad y funcionalidad de las películas poliméricas, ofreciendo una visión integral de cómo estos parámetros pueden afectar el rendimiento y las propiedades de los materiales analizados. Este enfoque contribuye significativamente a la comprensión y aplicación de las películas poliméricas en diversas áreas.

PALABRAS CLAVE: microscopia de fuerza atómica, morfología a nanoescala, análisis fractal, películas poliméricas.

Artigo está licenciado sob forma de uma licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.

1. Introdução

A microscopia de força atômica (AFM) é uma ferramenta poderosa e uma das técnicas mais recentes no estudo de polímeros. No microscópio de força atômica, imagens topográficas de superfícies podem ser obtidas através da interação entre os átomos da sonda do aparelho e a camada atômica mais externa da amostra, tornando possível a produção de imagens de estruturas em escala nanométrica (1 nm = 10^{-9} m) (Pinto *et al*., 2013).

Nos dados de AFM algumas vantagens podem ser destacadas como alta resolução da imagem obtida, aliada com a praticidade na preparação de amostras para análise tornam possível desde o estudo da morfologia de superfície dos polímeros até o exame das características topográficas, estruturais e moleculares de propriedades de materiais poliméricos em nanoescala (Herrmann *et al*., 1997).

A combinação da Microscopia de Força Atômica (AFM) com métodos de processamento de imagem pode ser utilizada para investigar a complexidade tridimensional em nanoescala e fornecer dados relevantes sobre os padrões em diferentes escalas de comprimento (Ţălu *et al*. 2020a).

Dessa forma, com base nos dados das imagens de AFM é estatísticamente possível estimar diversos parâmetros de superfície, os quais são capazes de revelar padrões que podem ser utilizados como indicadores de qualidade para a nanotextura de filmes poliméricos, levando em consideração que a topografia da superfície influencia significativamente vários fenômenos físicos, como atrito, desgaste e adesão (Jeng; Gao, 2000; Sundararajan; Bhushan, 2000).

Assim, discutiremos neste trabalho diversos parâmetros importantes utilizados na caracterização de filmes, os quais podem servir como indicadores de qualidade na produção de filmes poliméricos e oferecer informações valiosas para otimizar processos de fabricação e garantir a performance dos desses materiais em diversas aplicações.

2. Metodologia

Este trabalho foi realizado por meio de uma revisão bibliográfica de literatura do tipo narrativa, onde buscou-se a seleção de estudos relevantes sobre a caracterização de superfícies poliméricas por AFM. A pesquisa foi realizada na base de dados "Google acadêmico" sem limitação de data e idioma por meio de estudos diretamente relacionados com as palavras-chave: microscopia de força atômica, morfologia em nanoescala, análise fractal, e filmes poliméricos. A revisão incluiu para a análise os estudos que abordam a descrição matemática e a compreensão detalhada das propriedades de superfície.

3. Resultados e Discussões

Os principais parâmetros encontrados estão listados no Quadro 1 e incluem: rugosidade Rms, rugosidade média, curtose, assimetria, dimensão fractal (DF), lacunaridade fractal (LF), entropia de superfície (ET), sucolaridade fractal (FS) e Índice de Moran (I).

Quadro 1. Parametros de análise de morfologia em nanoescala

Parâmetros encontrados	Autor
Rugosidade Rms e Rugosidade Média	Blateyron (2013); Matos *et al*. (2020)
Curtose e Assimetria	Blateyron (2013); Matos *et al*. (2020)
Dimensão fractal (DF)	Mandelbrot (1975); Matos *et al*., (2021); Duan *et al*. (2021)
Lacunaridade fractal (LF)	Matos *et al*. (2021); Pinto el al., (2021); Anovitz; Cole (2015)
Sucolaridade fractal (FS)	Matos *et al*. (2021); Silva *et al*. (2021)
Entropia de superfície (ET)	Matos *et al*. (2021); Ţălu *et al* (2020b); Silva *et al*. (2021)
Índice de Moran (I)	Pinto *et al*. (2021); Pinto *et al*. (2023)

Fonte: Elaborado pelos autores

3.1 Rugosidade Rms e Rugosidade Média

De acordo com Blateyron (2013), a medida de rugosidade Rms (Sq) é matematicamente definida como o desvio padrão das alturas Z(x,y) distribuídas sobre a superfície real dentro da área de amostragem A da imagem de AFM, sendo calculada através da equação (1):

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A}\iint Z(x,y)dxdy} \quad (1)$$

Do mesmo modo, a definição matemática para a rugosidade média (Sa) é determinada através do cálculo da média aritmética do valor absoluto das alturas na área A e sendo calculada pela equação (2).

$$S_a = \frac{1}{a}\iint |Z(x,y)|dxdy \quad (2)$$

As medidas de Rugosidade Sq e Sa são cruciais na análise de filmes poliméricos. A rugosidade Rms fornece uma estimativa da variação das alturas da superfície, sendo sensível a picos e vales extremos, enquanto a rugosidade média (Ra) indica a média aritmética das variações de altura em relação à linha central. Essas medidas são essenciais para avaliar a uniformidade, adesão, e propriedades ópticas e mecânicas dos filmes.

3.2 Curtose e Assimetria

Para Blateyron (2013) a assimetria (Ssk) é matematicamente definida como a razão entre o terceiro momento estatístico dos valores de altura e o cubo de Sq dentro de uma área A de amostragem de acordo com a equação (3).

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3}\frac{1}{A}\iint Z^3(x,y)dxdy \quad (3)$$

É importante destacar que os valores de Ssk podem ser positivos, negativos ou zero, e não tem unidade, pois é normalizado por Sq. Geometricamente as medidas de Ssk descrevem a forma da distribuição da altura da topografia. Para uma superfície com uma distribuição de altura aleatória (ou gaussiana) a topografia é simétrica, Ssk = 0. Por outro lado, este parâmetro é fortemente influenciado por picos isolados ou vales isolados. As medidas de Ssk representam o grau de inclinação, seja na direção ascendente ou descendente de uma curva de distribuição de amplitude. Desse modo, um perfil simétrico fornece uma curva de distribuição de amplitude que é simétrica em relação à linha central e um perfil assimétrico resulta em uma curva inclinada. Portanto, a direção da

inclinação depende se a maior parte do material está acima da linha média (inclinação negativa) ou abaixo da linha média (inclinação positiva) (Blateyron, 2013; Matos *et al.,* 2020b).

Do mesmo modo, a curtose (Sku) é uma medida relacionada com o achatamento da distribuição de alturas na superfície, a qual matematicamente está definida como a razão entre o quarto momento estatístico dos valores de altura e a quarta potência de Sq dentro da área de amostragem, de acordo com a equação (4) (Blateyron, 2013).

$$Sku = \frac{1}{Sq^4}\frac{1}{A}\iint Z^4(x,y)dxdy \quad (4)$$

Ademais, em relação à curtose é importante destacar que os valores de Sku são estritamente positivos e não tem unidade, sendo um parâmetro que permite caracterizar a forma da distribuição de altura. Além disso, uma superfície com uma distribuição de altura gaussiana tem um valor de Sku = 3. Ao contrário do Ssk, o uso deste parâmetro não apenas detecta se os picos do perfil estão distribuídos uniformemente, mas também fornece uma medida da quão pontiaguda é a área de amostragem. Dessa forma, uma superfície pontiaguda terá um alto valor de curtose e uma superfície irregular terá um baixo valor de curtose. Contudo, vale ressaltar que os parâmetros Ssk e Sku podem ser menos estáveis matematicamente do que outros parâmetros, pois usam potências de alta ordem em suas equações, levando a uma propagação de erros mais rápida (Blateyron, 2013).

3.3 Parâmetros Fractais

A definição de fractal está relacionada ao gráfico, fenômeno ou processo com autossimilaridade. Dessa forma, em outras palavras, significa dizer que fractais são objetos em que cada parte apresenta uma similaridade ao objeto como um todo (Mandelbrot, 1975).

Na indústria de embalagens, as propriedades da morfologia de superfície são amplamente investigas, de modo que geralmente todos os materiais poliméricos apresentam supefícies complexas e irregulares, mas à medida que a escala de topografia diminui esses materiais tendem a apresentar características de autossimilaridade, o que é muito interessante para análise desses materiais por teoria fractal. Diante disso, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos com a finalidade de calcular a dimensão fractal dos materiais de embalagem e estabelecer uma conexão com as propriedades macroscópicas do material (Duan *et al.,* 2021).

Para realizar uma análise completa do comportamento fractal de filmes finos de importância biológica, Matos *et al*., (2021) estabelecem quatro parâmetros fractais: dimensão fractal (DF), lacunaridade fractal (LF), entropia de superfície (ET) e sucolaridade fractal (FS).

A dimensão fractal é um parâmetro bem conhecido e avalia a complexidade de um objeto fractal, de modo que este parâmetro na análise de uma imagem real representa a medida da concentração que o conjunto de pixels ocupa no espaço métrico em que ele existe. A análise dos valores de DF permite a obtenção de índices estatísticos complexos que verificam como os detalhes de um padrão variam de acordo com a escala de medição. Portanto, quanto maior o valor da dimensão fractal mais forte é a persistência do padrão (Mandelbrot, 1983).

Neste contexto, a forma mais simples e instintiva de relacionar uma dimensão a um determinado conjunto, é quantificar o número mínimo de quadrículos N(s) de lado s, necessários para preencher completamente o conjunto. De acordo com Mandelbrot (1983), esse número obedece a uma lei de potência matematicamente definida por $N(s)= \gamma.s^{-DF}$, onde o expoente DF representa a dimensão de cobertura ou Dimensão Fractal e γ é uma constante de proporcionalidade. Dessa forma, para estimar DF é necessário que sejam variados progressivamente os valores de s e repetir a contagem de N(s) para cada s, onde a Dimensão Fractal será igual ao coeficiente

angular da reta, Equação (5), obtida como ajuste do gráfico Log[N(s)] versus Log[1/s], o qual deve ser plotado a partir dos dados obtidos para os diferentes valores de s.

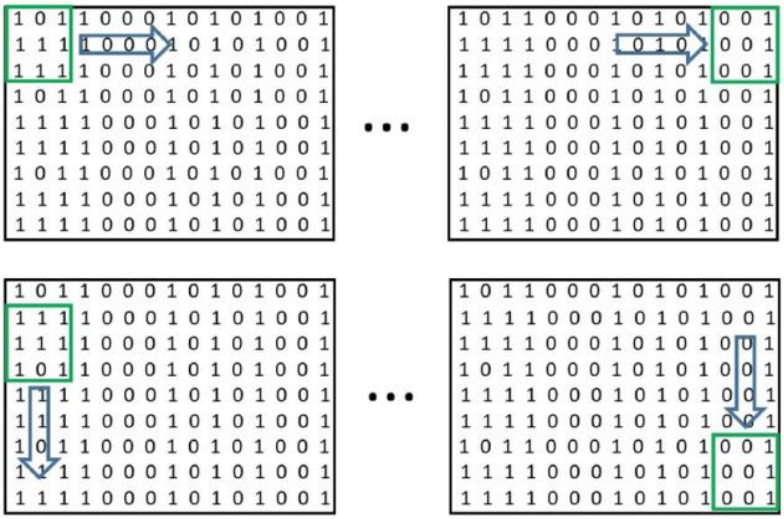
$$log[N(S)] = log\,\gamma + DF\,log[\frac{1}{s}] \quad (5)$$

A metodologia descrita acima vem sendo extensivamente utilizado na análise fractal de polímeros de importância biomédica e biotecnológica para o cálculo da Dimensão Fractal de superfícies reais através das imagens de AFM, sendo conhecida na literatura como algoritmo box-counting (Mandelbrot, 1983; Harrison, 1992; Ţălu *et al*., 2019).

A lacunaridade fractal (LF) é uma medida complementar da dimensão fractal que possibilita quantificar a heterogeneidade translacional da distribuição de lacunas ao longo de uma superfície e está relacionada com a homogeneidade da textura da superfície. Do ponto de vista da compreensão da relação entre porosidade e permeabilidade, portanto, isso fornece uma quantificação de quão isolado cada poro, ou grupo de poros, está dos demais (Matos *et al*., 2021; Anovitz; Cole, 2015).

Os autores Pinto *et al*., (2021) utilizaram o algoritmo gliding-box (Figura 1), como ferramenta numérica para analisar a distribuição de pixels lacunares em imagens binárias. Nesta metodologia, uma caixa quadrada de comprimento r desloca-se sobre a imagem do canto superior direito para o canto inferior esquerdo, avançando uma coluna e uma linha por varredura, enquanto o número de pixels lacunares p dentro da caixa é contado.

Figura 1. Ilustração do algoritmo de caixa deslizante para uma caixa quadrada com comprimento r = 3 rodando em uma imagem binária de 15 × 9 pixels.



Fonte: Pinto *et al*., (2021).

O processo registra quantos pixels lacunares há na caixa, marca-o como p e o número de caixas como n(p, r), então divide pelo número total de caixas deslizantes para obter a função densidade de probabilidade Q(p, r) usando a equação 6. Para imagens auto-similares, Q(p, r) está relacionado com o comprimento r do lado da caixa e o comprimento L do lado da imagem.

$$Q(p,r) = \frac{n(p,r)}{N(p,r)} \tag{6}$$

Onde, N(r) = (Δa − r + 1) · (Δb − r + 1) matematicamente consiste no número total de caixas possíveis para determinado valor de r, e Δa e Δb é o número de pixels correspondente à altura e base da imagem, respectivamente. Assim, a lacunaridade L(p, r) pode ser calculada usando a equação:

$$L(p,r) = \frac{\sum p^2.Q(p,r)}{[p.Q(p,r)]^2} \tag{7}$$

A variação da lacunaridade em função do aumento de r pode ser

definida matematicamente por meio de uma lei de potência da forma L(p, r) = $\alpha.r^{-\beta}$, onde β é o expoente de lacunaridade e α é uma constante de proporcionalidade. Dessa forma, o expoente da lacunaridade (β) pode ser calculado a partir do coeficiente angular da curva ln [L (p, r)] versus ln [r], Equação 8 (Pinto *et al*., 2021; Matos *et al*., 2021).

$$ln[L(p,r)] = ln\alpha + \ln[r] \quad (8)$$

No mesmo contexto, outro parâmetro fractal interessante é a sucolaridade fractal (FS). Esta medida permite analisar o grau de conectividade entre as bandas da imagem obtida da superfície por meio de um modelo matemático capaz de simular o fluxo de um fluido hipotético por uma determinada direção de entrada na topografia analisada. Os valores de FS estão associados com a percolação superficial (Matos *et al*., 2021; De Melo; Conci, 2008) e podem ser obtidos matematicamente pela expressão (9):

$$FS = \frac{\sum_{k=1}^{n} P_r(k).P_0(k)}{P_0(n).\sum_{k=1}^{n} Pr(k)} \quad (9)$$

onde $P_0(n)$ corresponde ao número total de caixas por linha, enquanto Pr(k) representa a abcissa do centróide de pressão referente a cada caixa que pode ser ocupada na imagem e $P_0(k)$ é o número de caixas ocupadas por linha. A FS é estimada através de uma adaptação do algorítimo box-counting considerando caixas de tamanho 1 pixel. Para superfícies fractais o valor de SF é independente do tamanho das caixas.

Ademais, a uniformidade topográfica das amostras de filmes poliméricos também pode ser avaliada por meio do cálculo da entropia topográfica (Matos *et al*. 2018). O cálculo da entropia de superfície baseia-se na ideia de que valores de alturas considerados outliers não são representativos para uma superfície que pode ser representada por sua

matriz de alturas, ou seja, uma distribuição de alturas uniforme não deve apresentar outliers.

Dessa forma, para avaliar a uniformidade global da superfície, calculamos a entropia topográfica (ET) utilizando as Equações 10 e 11, conforme descrito anteriormente na literatura (Pinto *et al*., 2023).

$$E_T = \frac{\Lambda^{(2)} - \Lambda_{min}{}^{(2)}}{\Lambda_{max}{}^{(2)} - \Lambda_{min}{}^{(2)}} \tag{10}$$

$$\Lambda^{(2)} = -\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} p_{ij} \cdot \log(p_{ij}) \tag{11}$$

onde $\Lambda^{(2)}$ é a entropia baseada em Shannon, p_{ij} é a probabilidade de cada elemento da matriz não ser um outlier da distribuição de alturas e N é o número total de pixels.

Outro parâmetro relevante de topografia é o Índice de Moran (I). Pinto *et al*., (2021) descrevem que os valores de I correspondem a uma medida padronizada ligada à autocorrelação espacial entre variáveis de áreas vizinhas, variando na faixa de -1 a 1. Os autores ainda detacam que, para dados de altura obtidos de imagens de AFM, um índice I = 0 revela independência espacial da distribuição de alturas ao longo da superfície (aleatoriedade perfeita). Enquanto valores positivos deste parâmetro (I > 0) indica o grau de agrupamento de alturas semelhantes e um agrupamento perfeito quando I = 1. De modo oposto, valores negativos do índice de Moran (I < 0) demonstra o grau de agrupamento de diferentes alturas e representa uma dispersão ideal quando I = −1.

O índice de Moran pode ser calculado de acordo com a Equação 12:

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j Wij} \frac{\sum_i \sum_j Wij.(Zi-\mu).(Zj-\mu)}{\sum_i (Zi-\mu)^2} \tag{12}$$

Onde W_{ij} é a matriz de pesos (igual a 1 se existe conexão entre áreas vizinhas e zero caso contrário); N é o número total de áreas; Zi e Zj são os valores de altura das áreas i e j, respectivamente; e μ é a média de altura das áreas i e j.

O índice de Moran (I) é capaz de medir a autocorrelação espacial e indicar como as características da superfície de filmes poliméricos estão distribuídas. Esse parâmetro é relevante para avaliar a qualidade do filme, identificar padrões e otimizar processos de fabricação, ajudando a garantir uma superfície uniforme e atender às especificações desejadas.

4. Conclusão

A análise de rugosidade RMS (Sq) e rugosidade média (Sa) é fundamental para caracterizar filmes poliméricos, fornecendo dados sobre a variação vertical da superfície em nanoescala.

Curtose e assimetria, por outro lado, fornecem informações sobre a forma da distribuição das alturas da superfície. Juntas, essas medidas ajudam a descrever a topografia em detalhes mais profundos, oferecendo uma compreensão mais completa da estrutura da superfície e de como ela pode impactar o desempenho dos filmes.

A análise fractal de superfícies poliméricas oferece insights valiosos sobre suas propriedades morfológicas e comportamentais. A dimensão fractal (DF) avalia a complexidade das superfícies, mostrando como os padrões se repetem em diferentes escalas. Uma alta DF indica uma estrutura mais detalhada e persistente, essencial para entender a complexidade das superfícies poliméricas em aplicações biomédicas e industriais.

A lacunaridade fractal (LF) complementa a DF ao quantificar a distribuição espacial de lacunas e poros na superfície. Esse parâmetro ajuda a avaliar a homogeneidade e a porosidade dos filmes poliméricos, o que é crucial para entender a permeabilidade e a textura dos materiais. A análise

da LF pode revelar padrões de porosidade que afetam a funcionalidade dos filmes.

A sucolaridade fractal (FS) permite avaliar a conectividade da superfície com fluidos, proporcionando informações sobre a capacidade de interação da superfície com diferentes meios. Este parâmetro é importante para aplicações onde a interação com fluidos é relevante, como em revestimentos e membranas.

O Índice de Moran (I) é útil para entender a distribuição espacial das alturas na superfície, indicando a presença de agrupamentos ou dispersões de alturas. Valores positivos de I indicam agrupamento de alturas semelhantes, enquanto valores negativos sugerem dispersão, o que pode ser indicativo de clusters na superfície.

Em suma, a combinação desses parâmetros fractais oferece uma visão abrangente da morfologia das superfícies poliméricas. Essa análise detalhada é fundamental para otimizar o desempenho e a qualidade dos filmes poliméricos em várias aplicações, fornecendo uma base sólida para ajustes e melhorias nos processos de fabricação.

Referências

ANOVITZ, L.M.; COLE, D.R. Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 80, n. 1, p. 61-164, 2015.

BLATEYRON, F. The areal field parameters. *In*: LEACH, R. (Ed.). **Characterisation of areal surface texture**. USA: Springer Berlin Heidelberg, p. 15-43, 2013.

DUAN, Q. *et al*. Review about the application of fractal theory in the research of packaging materials. **Materials**, v. 14, p. 860, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma14040860.

DE MELO, R.H.C., CONCI, A., Succolarity: defining a method to calculate this fractal measure. *In*: **15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing**. p. 291–294, 2008. https://doi.org/10.1109/IWSSIP.2008.4604424.

HARRISON, A. **Fractals in chemistry**. Oxford: Science Publications, 1992

HERRMANN, P. S. P. *et al*. Microscopia de varredura por força: uma ferramenta poderosa no estudo de polímeros. **Polímeros**, v. 7, p. 51-61, 1997.

JENG, Y. E.; GAO, C. Changes of Surface Topography during Wear for Surfaces with Different Height Distributions. **Tribology Transactions**, v. 43, p. 749-757, 2000.

MANDELBROT, B.B. Stochastic Models for the Earth's Relief, the Shape and the Fractal Dimension of the Coastlines, and the Number-area Rule for Islands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 72, n. 10, p. 3825–3828, 1975.

MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. New York: W. H. Freeman and company, 1983.

MATOS, R. S. *et al*. Superficial characterization of Kefir biofilms associated with Açaí and Cupuaçu extracts. **Arabian Journal of Science and Engineering**, v. 43, p. 3371–3379, 2018. DOI: 10.1007/s13369-017-3024-y.

MATOS, R.S. *et al*. Advanced micromorphology study of microbial films grown on Kefir loaded with Açaí extract. **Micron**, v. 137, p. 102912, 2020.https://doi.org/10.1016/j.micron.2020.102912.

MATOS, R.S. *et al*. 3D micromorphology evaluation of kefir microbial films loaded with extract of amazon rainforest fruit cupuacu. **Micron**, v. 142, p. 102996, 2021. https://doi.org/10.1016/j.micron.2020.102996

PINTO, E. P.; RAMOS, G. Q.; FONSECA FILHO, H. D. O Microscópio de Força Atômica (AFM): importante ferramenta no estudo da morfologia de superfícies na escala nanométrica. Estação Científica (UNIFAP), v. 3, n. 2, p. 41-50, 2013.

PINTO, E. P. *et al*. Lacunarity exponent and Moran index: A complementary methodology to analyze AFM images and its application to chitosan films. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 581, p. 126192, 2021.

PINTO, E. P. *et al*. Comparing the nanoscale topography and interface properties of chitosan films containing free and nano-encapsulated copaiba essential oil: An atomic force microscopy (AFM) and Fractal Geometry study. **Materials Today Communications**, v. 35, p. 105765, 2023.

SILVA, M. R. P. *et al*. Advanced microtexture evaluation of dextran biofilms obtained from low cost substrate loaded with maytenus rigida extract. **Materials Research**, v. 24, p. e20200597, 2021.

SUNDARARAJAN, S.; BHUSHAN, B. Topography-induced contributions to friction forces measured using an atomic force/friction force microscope. **Journal of Applied Physics**, v. 88, n. 8, p. 4825-4831, 2000.

ŢĂLU, Ş.; MOROZOV, I. A.; YADAV, R. P. Multifractal analysis of sputtered indium tin oxide thin film surfaces. **Applied Surface Science**, v. 484, p. 892-898, 2019.

ŢĂLU, Ş. *et al*. Advanced fractal analysis of nanoscale topography of Ag/DLC composite synthesized by RF-PECVD. **Surface Engineering**, v. 36, n. 7, p. 713–719, 2020b. DOI: 10.1080/02670844.2019.1710937.

ŢĂLU, Ş. *et al*. Stereometric and fractal analysis of sputtered Ag-Cu thin films. **Surfaces and Interfaces**, v. 100650, 2020a. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100650.