

# VIABILIZAÇÃO TECNOLÓGICA E PRODUTIVA DA TÉCNICA DE TRANSFERÊNCIA DA CAPACIDADE OMNIFÓBICA PARA FILME DE POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE USADOS EM EMBALAGENS INDUSTRIAIS

Luciano da Silva França Filho<sup>1</sup>; Susana Marraccini Giampietri Lebrão<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *Baseado no efeito Lótus (formação de um ângulo de contato de uma gota de água estática maior que 150° com o substrato), a superhidrofobicidade possui um grande potencial para agregar na indústria de embalagens. A oportunidade de permitir que as embalagens se transformem em superfícies autolimpantes internamente fornece um grande benefício para a redução de perda de produtos. Neste trabalho o objetivo foi viabilizar a aplicação da “característica autolimpante”, ou seja, reduzir a interação da água e outras substâncias com as embalagens poliméricas. Para tornar o procedimento possível foi dimensionada uma laminadora -baseada em dados provisórios- com rolos de aço inox (implementados numa extrusora) gravados a laser. Estes foram utilizados como “negativo” para reproduzir a textura omnifóbica no filme de polietileno “PEBD”. O intuito do projeto é que os rolos, quando aquecidos a uma determinada temperatura e com uma pressão de 8,1kN, serão capazes de transferir a textura desejada para o filme de PEBD.*

## Introdução

Com o avanço da tecnologia na área de embalagens, as superfícies hidrofóbicas e superhidrofóbicas ganharam bastante destaque recentemente, uma vez que suas aplicações industriais permitem a criação de embalagens que evitam ou diminuem o desperdício de produtos em diversos ramos da indústria, como por exemplo: alimentícia (alimentos pastosos e líquidos), farmacêutica (xaropes e princípios ativos), cosmética (shampoos, condicionadores, cremes para rosto e corpo e géis em geral) e até mesmo de materiais de construção (colas, tintas e massas).

Recentemente, a crescente busca pelo desenvolvimento de superfícies superhidrofóbicas aumentou consideravelmente devido ao fato da diminuição da molhabilidade do material - capacidade do líquido de manter contato com uma determinada superfície – proporcionar características autolimpantes ao produto. Estas superfícies possuem baixa interação com a água, ou seja, as gotículas quando entram em contato com o material não se espalham. Ao invés disso, as partículas de sujeira aderidas à superfície são removidas pelo arraste da água, que é expulsa da superfície ou com o vento, pois se encontram em formato esférico, uma vez que a rugosidade leva à má formação da gota de um determinado líquido, diminuindo assim a sua molhabilidade. (Nascimento, 2019) (CIT SENAI FIEMG, 2017).

O estudo da superhidrofobicidade, presente em diversas plantas e insetos, baseou-se na flor de lótus (*Nelumbo nucifera*). Com o maior destaque da microscopia eletrônica na década de 1970, o botânico alemão Wilhelm Barthott procurou este efeito de repelência à água, notando que a flor de lótus, independentemente do ambiente em que estava, permanecia seca. A alta rugosidade das folhas está ligada a baixa energia superficial. Além disso, presença de micronódulos está diretamente associada a hidrofobicidade da superfície das folhas. (Hochudt, 2019) (Barthlott, 1997) (Otten, 2004).

Considera-se uma superfície como hidrofóbica quando seu ângulo de contato é maior que  $90^\circ$ , e hidrofílica, quando menor que  $90^\circ$ . Para ângulos de contato superiores a  $150^\circ$ , a superfície é caracterizada como superhidrofóbica, ou seja, possui uma baixa afinidade com a água, permitindo que as gotas de água escoem pela superfície, tornando-a autolimpante (Michels, 2012) (Wei, 2013).

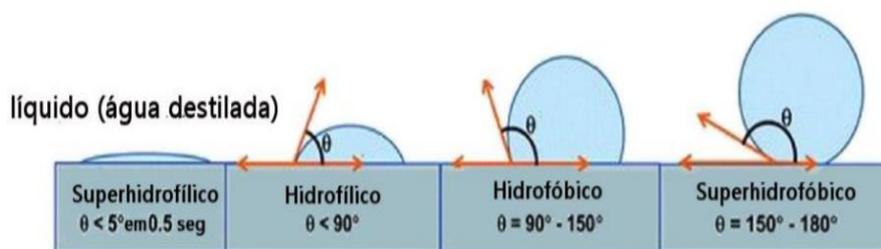


Figura 2. Representação esquemática da formação de ângulo de contato para materiais hidrofílicos e hidrofóbicos (BAČOVSKÁ, et al., 2016)

Nesse contexto, o trabalho em questão tem como objetivo a viabilização tecnológica e produtiva da técnica de transferência da capacidade omnifóbica (de escala laboratorial à industrial) para filmes de polietileno de baixa densidade usados em embalagens industriais junto a empresa Embaquim por meio do desenvolvimento de uma laminadora com rolos de aço inox em um processo de laminação, onde um rolo aquecido e gravado a laser é responsável por transferir esta propriedade ao polímero, obtendo-se assim uma característica química, porém, por meios mecânicos, viabilizando a implementação deste produto em outras áreas da indústria, pois não implica em alteração química do produto a ser acomodado no interior da embalagem. O padrão geométrico a ser implementado já foi determinado num processo laboratorial por meio de uma prensa segundo (Fiorese, G.G., Cordeiro, J.R. 2020) obtendo um ângulo de contato superior a  $145^\circ$  e, agora, o objetivo é passar este padrão para uma escala de linha de produção industrial para, assim, reduzir drasticamente o desperdício de produtos em big bags, a princípio e, posteriormente, aplicar o processo em diversas áreas da indústria, entre elas a alimentícia, farmacêutica e de cosméticos, por exemplo.

## Materiais e métodos

A seguir serão feitos os cálculos e análises de massas dos componentes que comporão a laminadora a ser dimensionada e implementada em uma extrusora. A máquina, por sua vez, será capaz de laminar filmes plásticos de PEBD a uma determinada pressão e temperatura a fim de transferir a característica omnifóbica para eles.

### 1º Etapa – Análise de massas

Com base na seleção do material para a construção da laminadora e cálculos a serem demonstrados posteriormente, foram calculadas as massas dos componentes da estrutura - com base na tabela 1, 2, 3 e 4.

Tabela 1 – Dados médios considerando diferentes aços inox

Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Limite de resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência ao escoamento (MPa)
8000	604	200000	270

Tabela 2 – Massas dos rolos principais

Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Massa (kg)	Comprimento (mm)
40	35	8000	0,00012	0,94	400
50	45	8000	0,00015	1,19	400
60	55	8000	0,00018	1,45	400

Tabela 3 – Massas dos rolos auxiliares

Diâmetro externo (mm)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Massa (kg)	Comprimento (mm)
30	8000	4,24E-05	0,34	60
30	8000	2,12 E-05	0,17	30
15	8000	5,30E-06	0,042	30

Tabela 4 – Massa do suporte

Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura do canal (mm)	Diâmetro Furo 1 (mm) x2	Diâmetro Furo 2 (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Massa (kg)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
100	150	13,5	21	24	0,00033	2,65	8000



Figura 1 – Rolos

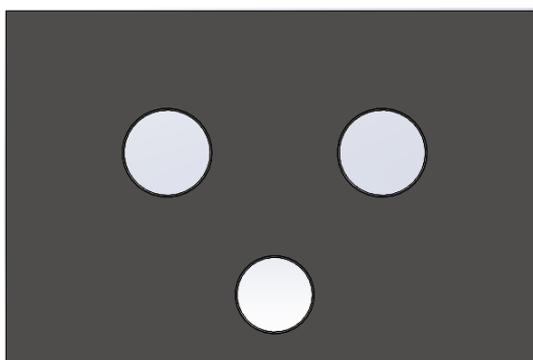


Figura 2 – Suporte

## 2º Etapa – Dimensionamento do mancal e rolamento

Para escolha do mancal de rolamento que será implementado no rolo principal (50 mm de diâmetro), primeiramente foi realizado o dimensionamento do eixo auxiliar e, posteriormente, a verificação das cargas estáticas e dinâmicas do mancal no catálogo da SKF (SKF, 2021, P12 - TF Caixas de mancal de rolamento de esferas). Em seguida, foram utilizados os parâmetros de seleção e cálculos encontrados na literatura (Norton, R.L., 2013) (Budynas, R.G; Nisbett, J.K, 2011). As imagens do mancal e rolamentos selecionados são apresentadas na figura 3, 4 e 5, respectivamente.

- Área da seção transversal:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

- Diâmetro do eixo auxiliar:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot P}{\sigma_{admissível} \cdot \pi}}$$

Logo, substituindo os valores do projeto, tem-se:

$$d \cong 28,56 \text{ mm}$$

Levando em conta os esforços internos solicitantes e as reações de apoio, tem-se que o diâmetro pode ser calculado pelo critério de Von Mises:

$$d = \left\langle \frac{16}{\pi S_y} \sqrt{[4(K_t M)^2 + 3(K_{ts} T)^2]} \right\rangle^{\frac{1}{3}} \cong 14,20 \text{ mm, ou sejam } 15 \text{ mm}$$

Onde:  $k_t$  e  $k_{ts}$  = fatores de concentração estáticos

Vale ressaltar que para um diâmetro de 15 mm a flecha resultante seria maior que a profundidade da gravura, ou seja, maior que 75 micrômetros. Com isso, não haveria possibilidade de transmitir a geometria desejada para o filme plástico, logo, optou-se por um eixo auxiliar de diâmetro 30 mm, uma vez que este possui uma flecha menor que a flecha limite do projeto.

Como os eixos de 15 mm servem apenas como apoio para os seus respectivos rolos, eles precisam apenas resistir às cargas estáticas solicitantes, o que ocorre de fato, pois o rolamento W 63802 possui limite de carga de fadiga de 0,048 kN, classificação de carga dinâmica básica de 1,65 kN e classificação de carga estática básica de 1,08 kN. O mesmo critério vale para o rolo com 12 mm de diâmetro, porém, utilizando o rolamento de esferas 61801. Este possui limite de carga de fadiga de 0,039 kN, classificação de carga dinâmica básica de 1,74 kN e classificação de carga estática básica de 0,915 kN.

Como o eixo de 30 mm será apoiado em um mancal, é crucial que este suporte as cargas estática e dinâmica. Com base nisso, foi escolhido o mancal com rolamento de esferas P30 FM da SKF, o qual fornece um limite de carga de fadiga de 0,2 kN, classificação de carga dinâmica básica de 9,56 kN e classificação de carga estática básica de 4,75 kN, além de uma carga radial permitida de até 1,25 kN.

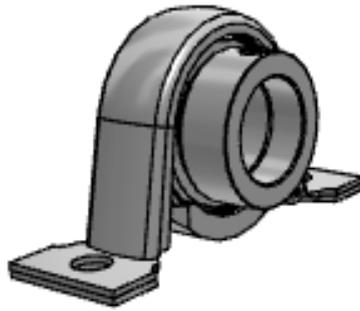


Figura 3 – Mancal com rolamento de esferas P30 FM

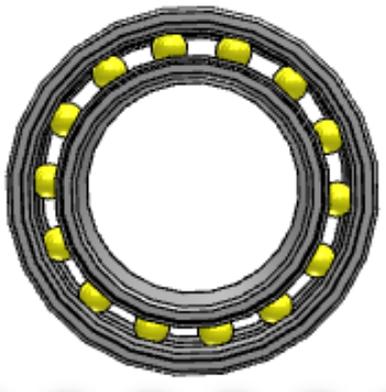


Figura 4 – Rolamento de esferas W 63802

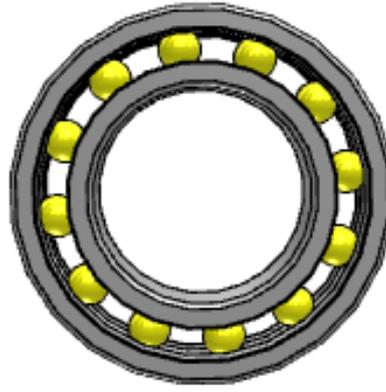


Figura 5 – Rolamento de esferas 61801

### 3º Etapa – Análise do parafuso de movimento

O parafuso de movimento, responsável pelo movimento de subir e descer do suporte de rolos, foi dimensionado para um caso crítico de flambagem onde este é submetido ao esforço de todos os componentes que o suporte comporta (incluindo o próprio suporte), como mostrado na figura 7.

- Índice de esbeltez limite do material:

$$\lambda_{limite} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0,5 \cdot S_y}} = 120,92$$

- Comprimento do parafuso:

$$l = l_{parafuso} - l_{"porca"} = 95 \text{ mm}$$

- Comprimento de flambagem:

$$l_{fl} = \beta \cdot l = 66,5 \text{ mm}$$

- Raio de giração

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 2,5 \text{ mm}$$

- Índice de esbeltez do parafuso:

$$\lambda = \frac{l_{fl}}{i} = 26,6$$

Logo, como  $\lambda < \lambda_{limite}$ , foi utilizado o critério de Johnson, ou seja, a flambagem ocorrerá no regime plástico do material.

- Tensão de flambagem de Johnson:

$$\sigma_{fl} = S_y \left[ 1 - 0,5 \cdot \left( \frac{\lambda}{\lambda_{limite}} \right)^2 \right] = 263,47 \text{ MPa}$$

Sendo  $S_y$  = Limite de resistência ao escoamento.

- Tensão de compressão do parafuso:

$$\sigma_c = \frac{P_{par}}{A} = 103,28 \text{ MPa}$$

Dessa forma, tem-se que  $\sigma_c < \sigma_{fl}$  e, assim, o parafuso não flambará.

- Tensão equivalente de Von Mises:

$$\sigma'_a = \sqrt{(k_f \cdot \sigma_a)^2 + (k_{fs} \cdot \tau_a)^2} = 76,98 \text{ MPa}$$

Onde:  $k_f = 1 + q \cdot (k_t - 1)$ ,  $k_{fs} = 1 + q_s \cdot (k_{ts} - 1)$

$k_t$  e  $k_{ts}$  = fatores de concentração estáticos

$q$  e  $q_s$  = fatores de sensibilidade ao entalhe

$k_f$  e  $k_{fs}$  = fatores de concentração dinâmicos

$\sigma_a$  = Tensão normal e  $\tau_a$  = Tensão de cisalhamento

- Limite de fadiga:

$$S'_e = 0,5 \cdot S_{ut} = 250 \text{ MPa}$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot S'_e = 140,34 \text{ MPa}$$

Onde:  $S'_e$  = Resistência à fadiga (limite) – medida em laboratório

$S_e$  = Resistência à fadiga (limite) – específica da peça

$k_a$  = Fator de superfície

$k_b$  = Fator de tamanho

$k_c$  = Fator de carregamento

$S_{ut}$  = Resistência à ruptura por tração

- Coeficiente de segurança:

$$n_f = \frac{S_e}{\sigma'_a} = 1,82$$

Com isso, pode-se perceber que o parafuso está dentro dos limites de dimensionamento, uma vez que  $1 \leq n_f \leq 4$  e  $n_f = 1,82$ .

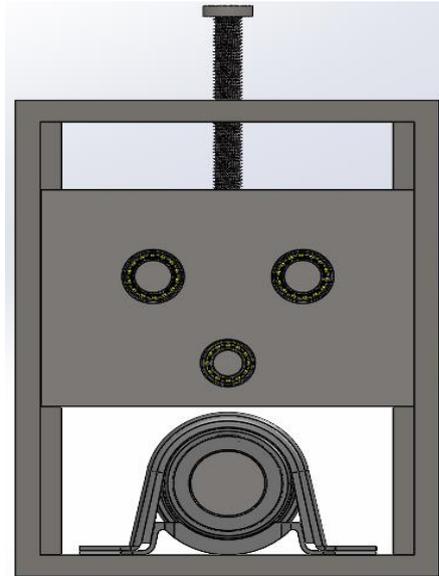


Figura 6 – Parafuso de movimento no suporte

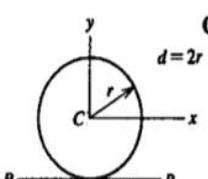
#### 4º Etapa – Análise da flecha ( $\delta$ ) do rolo suporte (30x60 mm)

Para análise da flecha nos eixos suporte do rolo giratório foi realizado o cálculo do valor da flecha de acordo com (Timoshenko, Gere, 1982) e, ao ser comparada com o valor do perfil geométrico, precisa ser menor para evitar quaisquer deformações no filme após o processo.

4.


$$v = \frac{Px^2}{6EI}(3L - x) \quad v' = \frac{Px}{2EI}(2L - x)$$
$$\delta_s = \frac{PL^3}{3EI} \quad \theta_s = \frac{PL^2}{2EI}$$

6.



Círculo. (Origem dos eixos no centro)

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi d^4}{64}$$
$$I_{xy} = 0 \quad J = \frac{\pi r^4}{2} = \frac{\pi d^4}{32}$$
$$I_{BB} = \frac{5\pi r^4}{4} = \frac{5\pi d^4}{64}$$

Figura 7 – Fórmulas para cálculo da flecha

Substituindo pelos valores do projeto, tem-se:

$$I = 39760,782 \text{ mm}^4$$

Dessa forma, chega-se em uma flecha de:

$$\delta = 73,45 \text{ micrômetros}$$

## Resultados e discussões

### *Prévia da gravação do padrão geométrico*

Com a análise encontrada na literatura (Fiorese, G.G., Cordeiro, J.R. 2020), observou-se que resultados satisfatórios foram obtidos com um padrão em forma de diamante (losangular) gravado na placa de inox em uma situação laboratorial. A partir disso, o intuito para os próximos dois anos é implementar este padrão em uma escala industrial a partir do maquinário dimensionado e, com isso, obter os resultados mostrados nas figuras 8, 9 e 10, porém, em rolos de laminação ao invés de uma prensa (placas).

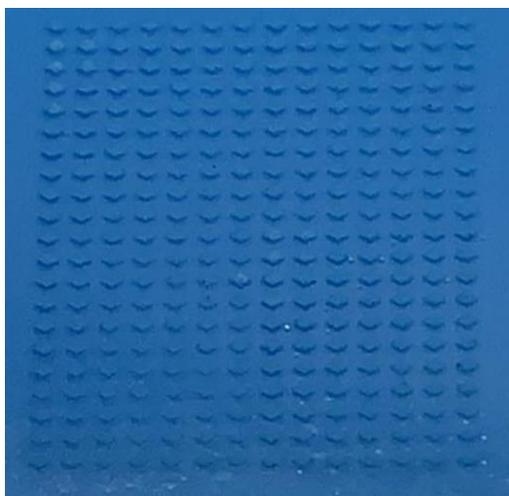


Figura 8 – Padrão geométrico no filme de PEBD

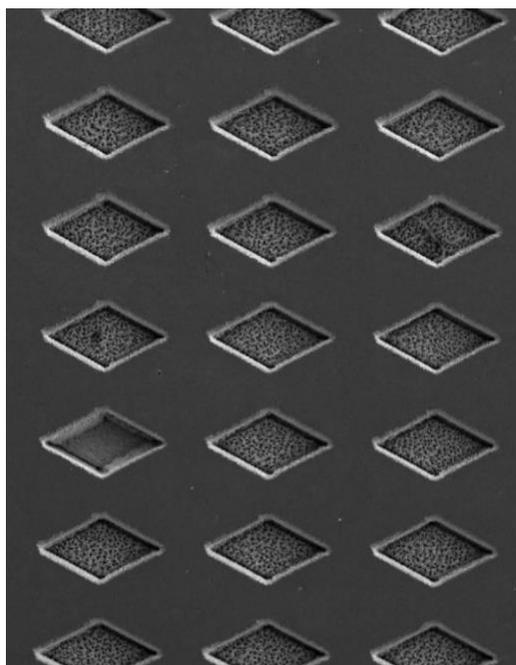


Figura 9 – Padrão geométrico

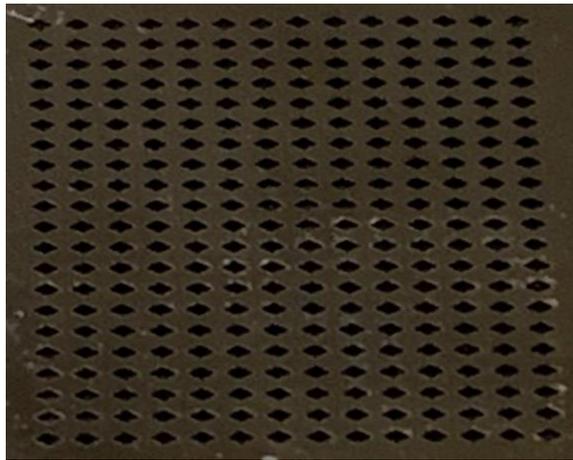


Figura 9 – Padrão geométrico na em uma chapa de aço inox

### Esquema “sanduíche” de laminação

Com auxílio da laminadora dimensionada e acoplada à extrusora da empresa em questão (Embaquim), o padrão dos rolos de aço inox serão impressos em uma determinada quantidade de folhas de PEBD sob determinadas condições de temperatura, pressão e tempo.



Figura 11 – Resumo do processo “sanduíche”

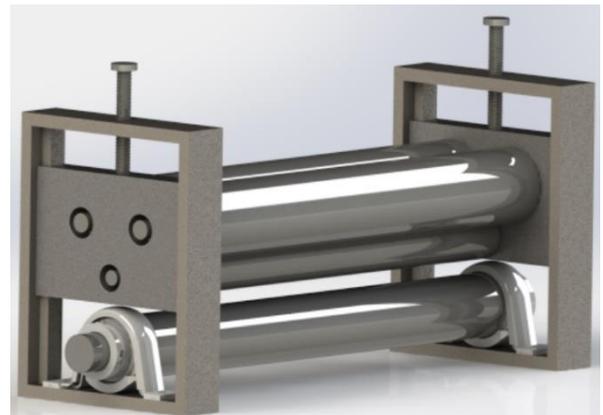


Figura 12 – Laminadora a ser acoplada na extrusora

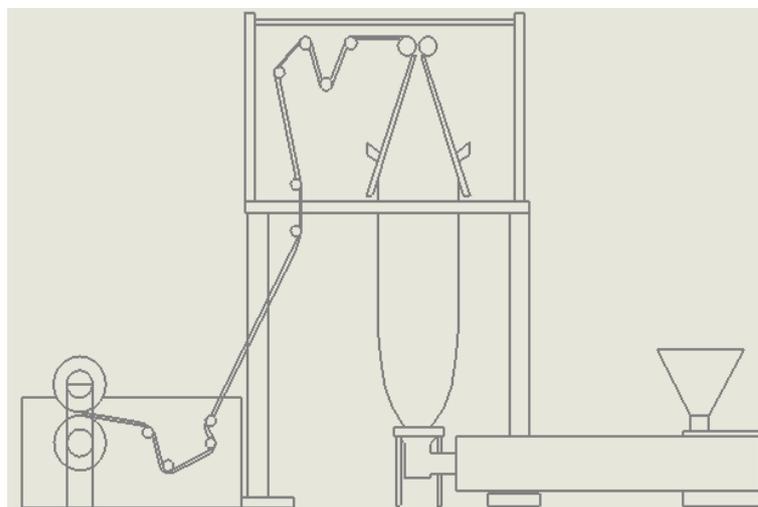


Figura 13 – Exemplificação do esquema completo

## Conclusões

O trabalho em questão descreve um procedimento de transferência da característica superhidrofóbica a filmes de PEBD por meio de um processo de laminação em uma laminadora - acoplada a uma extrusora - na qual os rolos foram responsáveis por imprimir a texturização omnifóbica. Após a construção da máquina serão realizados testes nas condições da empresa (Embaquim) para analisar as condições que o filme de PEBD terá e, além disso, o ângulo de contato de diversos líquidos com a parte interna do filme.

Por fim, entendeu-se que o trabalho se mostra útil para empresas do ramo de embalagens desde que a flecha seja melhorada para um valor por volta dos 30 *micrômetros* (dando profundidade suficiente para a gravura), uma vez que permite criar superfícies com maior poder de escoamento, ou seja, uma menor quantidade de perda de produtos líquidos e pastosos - característica química, porém, por meios mecânicos - por retenção em frascos e, principalmente, big bags de armazenamento.

## Referências bibliográficas

- Barthlott, W.; Neinhuis, C. (1997). *Purity of the sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces*. *Planta* 202, 1–8.
- Budynas, R.G; Nisbett, J.K. (2011) *Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica*; 8ª edição; Bookman.
- CIT SENAI FIEMG (2017) *Pesquisa Revestimentos Hidrofóbicos*. Minas Gerais, Sistema FIEMG. Disponível em: <https://www7.fiemg.com.br/noticias/detalhe/cit-senai-fiemg-pesquisa-revestimentos-hidrofobicos->.
- Fiorese, G.G., Cordeiro, J.R. (2020) Desenvolvimento de superfície superhidrofóbica em polietileno de baixa densidade.
- Hochudt, M. L. (2019) Estudo e caracterização das mudanças topográficas e molhabilidade de superfícies superhidrofóbicas submetidas à desgaste abrasivo. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/206097>
- Michels, A.F.; Weibel, D.E.; Horowitz, F; Zanchetta, M. (2012) *Processo de preparação de superfícies superhidrofóbicas e auto-limpantes*. Escavador. Disponível em: <https://www.escavador.com/patentes/261041/processo-de-preparacao-de-superficies-superhidrofobicas-e-auto-limpantes>
- Nascimento, P. A. (2019) *Superfícies superhidrofóbicas*. UFPR. Programa de Pós-graduação em Química. Disponível em: <http://www.quimica.ufpr.br/paginas/graduacao/wp-content/uploads/sites/16/2019/10/seminario-12-patricia-nascimento-superficies-sh.pdf>
- Norton, R.L. (2013) *Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada*; 4ª edição; Bookman.
- Otten, A.; Herminghaus, S.; Langmuir. (2004) *How Plants Keep Dry: A Physicist's Point of View*. American Chemical Society. ISSN 2405–2408.
- SKF. P30-FM Caixas de mancal de rolamento de esferas. 2021. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/mounted-bearings/ball-bearing-units/pillow-block-ball-bearing-units/productid-P%2012%20TF>. Acesso em: 15 de setembro de 2021.
- SKF. W 63802 Rolamento de esferas. 2021. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-W%2063802>. Acesso em 15 de setembro de 2021.
- SKF. 61801 Rolamento de esferas. 2021. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-61801>. Acesso em 15 de setembro de 2021.
- Timoshenko, Gere. (1982) *Mecânica dos Sólidos*; 1ª edição; Livros técnicos e científicos editora S.A.
- Wei, K., H. Zeng, and Y. Zhao. (2013) *Substrate material affects wettability of surfaces coated and sintered with silica nanoparticles*. *Applied Surface Science*, 273(0): p. 32-38.