

CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA DE SUPERFÍCIE: ESTABELECIMENTO DE CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DA COMPONENTE EFETIVAMENTE REPRESENTATIVA NO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE MATERIAIS DE FRICÇÃO¹

Graciliano Pereira Fernandes²
Walter Haertel Junior²
Paulo Zanotto²
Ivan Gregori²
José Daniel Biasoli de Mello³

Resumo

A quantificação da topografia de superfície, definida como a forma geométrica composta pelas três principais componentes (forma, ondulação e rugosidade), é de grande importância para o entendimento de muitos fenômenos tribológicos. Quando se caracteriza quantitativamente a topografia de superfície, convencionalmente somente a componente rugosidade é medida. As outras componentes são eliminadas da topografia original, por métodos de filtragem. Para efetivamente caracterizar a topografia de superfície novas técnicas e metodologias capazes de filtrar e extrair da topografia original as diferentes componentes para que as mesmas possam ser estudadas e avaliadas individualmente, são necessárias. O presente trabalho tem como objetivo estabelecer critérios para a seleção do componente da topografia de superfície efetivamente representativo do comportamento tribológico de materiais de fricção e aplicá-los na caracterização (em termos de rugosidade quadrática média [Sq] e capacidade de apoio [Tp]) de superfícies obtidas por diferentes processos de fabricação.

Palavras-chave: Topografia de superfície; Componentes de superfície; Materiais de fricção; Embreagem.

SURFACE CHARACTERIZATION: CRITERION ESTABLISHMENT TO SELECT TOPOGRAPHICAL COMPONENT EFFECTIVELY REPRESENTATIVE OF THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF FRICTION MATERIALS

Abstract

The surface topographic quantification, defined as geometrical form composed by three mainly components (form, waviness and roughness), it is very important to understanding all of the most tribological phenomenon. Generally when a surface topographic is quantitatively characterized, only the roughness component is measured. The others components are eliminated from the original topography through filtering methods. To characterize the surface topographic effectively are necessary new techniques and methodologies to make them able to filter and extract from the original topography the different components, so that the same components can be individually studied and valued. The aim of this workshop is to establish criteria to select the surface topography effectively representative of the tribological behavior of friction materials and apply them on the characterization (Root Mean Square Roughness [Sq] and Bearing Area Curve [Tp]) obtained from surface through different manufacturing processes.

Key-words: Surface topographic; Surface components; Friction materials; Clutch.

1 *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

2 *ZF do Brasil – Divisão Sachs, graciliano.fernandes@zf.com*

3 *Universidade Federal de Uberlândia (UFU), itm-demello@ufu.br*

1 INTRODUÇÃO

Stout e Blunt, em 1995,⁽¹⁾ e Stout et al. em 2000.⁽²⁾ definiram topografia de superfície como a forma geométrica composta pelos três principais componentes que são a forma, ondulação e a rugosidade. De acordo com Stout e Blunt,⁽¹⁾ geralmente, quando se caracteriza quantitativamente a topografia de superfície, somente a componente rugosidade é medida. As componentes forma e ondulação são eliminadas da topografia original, por métodos de filtragem.

Ainda segundo Stout e Blunt⁽¹⁾ e Raja, Muralikrishnan e Fu⁽³⁾ o que difere as componentes, rugosidade, ondulação e forma são os comprimentos de onda ou os espaçamentos entre os picos das irregularidades.

A Figura 1 mostra a topografia de superfície e as respectivas componentes de forma, ondulação e rugosidade que foram extraídas da superfície primitiva.

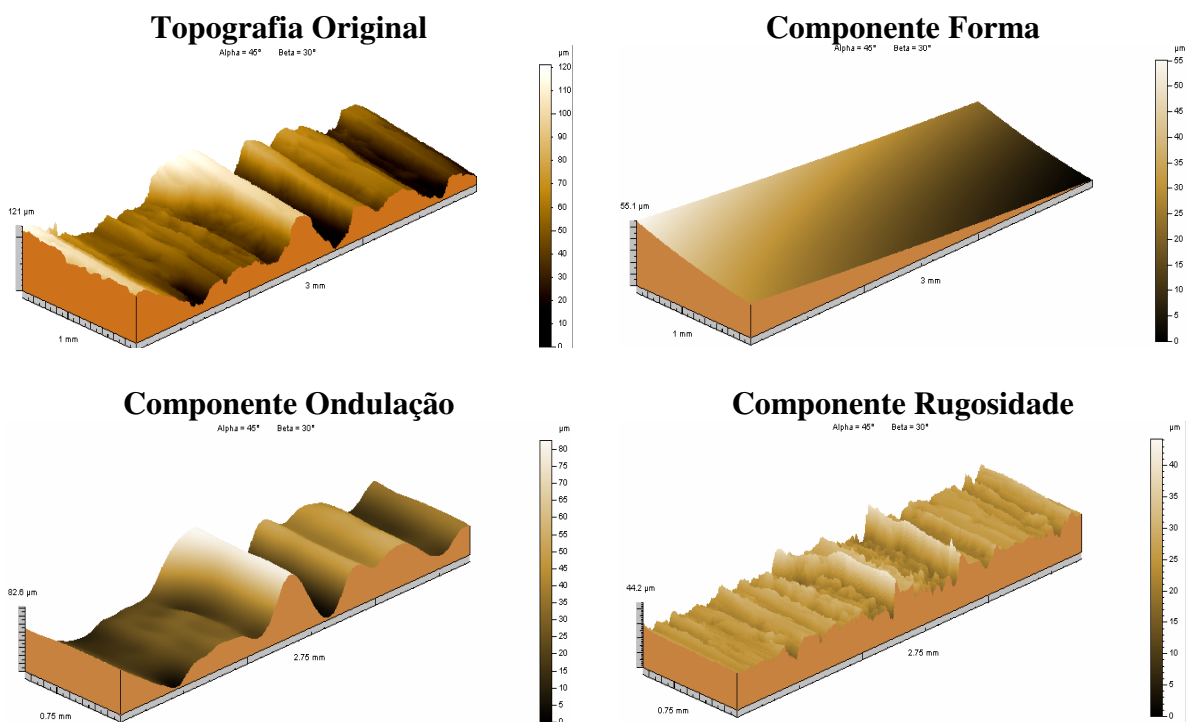


Figura 1: Decomposição das componentes (forma, ondulação e rugosidade) de uma superfície primitiva.

Vários trabalhos⁽⁴⁻¹³⁾ têm sido desenvolvido na tentativa de obter novas técnicas e metodologias capazes de filtrar e extrair da topografia original as componentes, forma, ondulação e rugosidade, para que as mesmas possam ser estudadas e avaliadas individualmente. Através destes estudos esperavam-se obter novos conhecimentos sobre o efeito que efetivamente cada componente exerce no comportamento tribológico dos materiais. Como exemplo cita-se o efeito das diferentes componentes em relação ao contato elástico / plástico entre superfícies, desgaste, atrito e lubrificação. Busca-se também obter uma melhor compreensão da influência dos diferentes processos de manufatura na geração das componentes de superfície, podendo assim ter um controle rigoroso desses processos, para que haja menor variação da topografia da superfície.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do processo de acabamento superficial na geração das diferentes componentes forma, ondulação e rugosidade, bem como a influência destas componentes na topografia de superfície. Este trabalho também objetiva estabelecer critérios para a seleção da componente de superfície efetivamente representativa no comportamento tribológico de materiais utilizados na fabricação de materiais de fricção, em particular embreagem a seco.

2 MATERIAL E MÉTODO

Foram analisadas superfícies de amostras de revestimentos para embreagem, fornecidas pela ZF do Brasil - divisão Sachs. As amostras foram fornecidas em dois estados de acabamento superficial: Normal e Polido. Foram analisadas amostras de revestimentos produzidos na forma de pequenos discos especialmente fabricados no laboratório, bem como amostras constituídas de discos cortadas de peças produzidas em série.

A Tabela 1 apresenta as principais características e a designação das amostras analisadas.

Tabela 1: Designação e características das amostras

Denominação	Método de fabricação	Geometria	Superfície
PN	Linha de produção	prismática	Normal
PP	Linha de produção	prismática	Polida
DN	Laboratório	disco	Normal
DP	Laboratório	disco	Polida

A caracterização topográfica foi feita por interferometria laser (IL) utilizando o equipamento Micro Focus Expert IV da UBM. As análises foram feitas no modo contínuo. As regiões analisadas nos pequenos discos tiveram dimensões de 6 X 8 mm sendo analisadas, no mínimo, quatro áreas por amostra. Nas amostras produzidas em serie foram analisadas três áreas (6x7mm) por amostra. Na realização das leituras das superfícies foram utilizadas resoluções de 1000 pontos por milímetro no eixo x e 100 pontos por milímetro no eixo y. As amostras foram revestidas com uma fina camada de ouro.

As imagens obtidas por interferometria laser foram tratadas de modo a eliminar-se a forma e a ondulação das superfícies e, desta forma, quantificar-se apenas a rugosidade das mesmas. As superfícies foram caracterizadas em termos de rugosidade quadrática média (S_q) e capacidade de apoio (T_p). Inicialmente utilizou-se uma porcentagem de apoio inicial igual a 1% e uma profundidade ativa de 3 μm para determinar a capacidade de apoio das superfícies.

Extraíram-se das superfícies primitivas as componentes, forma, ondulação e rugosidade, quantificando topograficamente cada componente.

Foram realizados vários experimentos procurando verificar o efeito dos parâmetros porcentagem inicial de apoio e a profundidade ativa na capacidade de apoio. Em particular, a profundidade da superfície ativa foi variada de 3 μm a 100 μm ,

com porcentagem de apoio inicial fixa em 1%. Numa segunda série, com profundidade fixada em 20 μm foi variada a porcentagem inicial de apoio de 1% a 5%. Os dados correspondem a todas as amostras estudadas. Os parâmetros topográficos foram obtidos com o uso do programa Mountains Map Universal 3.0 Version. Para obter as diferentes componentes forma, ondulação e rugosidade da superfície primitiva utilizou-se um *cut-off* igual a 0,8 mm. Algumas amostras representativas foram analisadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV).

3 RESULTADOS

As Figuras 2-a e 2-c mostram as superfícies com acabamento normal e polido, respectivamente, dos revestimentos produzidos na linha de produção, sem nenhuma alteração da superfície. As Figuras 2-b e 2-d, por sua vez, mostram a superfície destas amostras tratadas de modo a eliminar-se a forma e a ondulação das superfícies e, desta forma, quantificar-se apenas a rugosidade das mesmas.

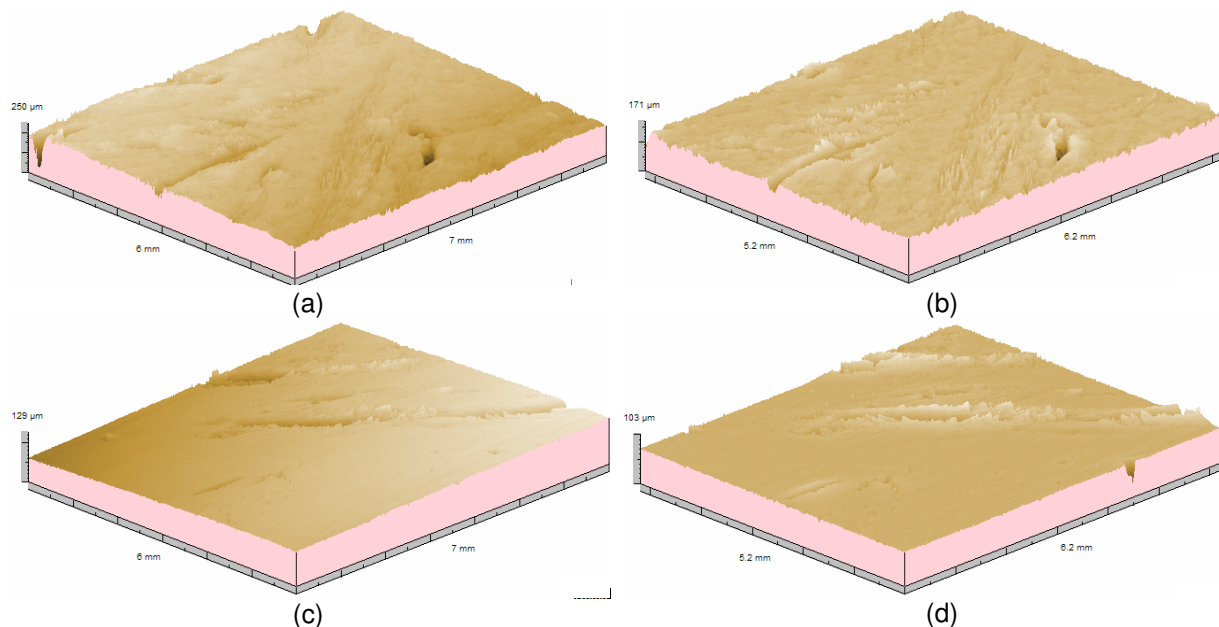


Figura 2: Topografia de superfície das amostras produzidas em serie. (a)- Amostra PN (superfície normal). (b)- superfície após eliminação da forma e ondulação. (c)- Amostra PP (superfície polida). (d)- superfície após eliminação da forma e ondulação.

Para ambos o acabamento superficial, observa-se que após a eliminação das componentes forma e ondulação, as superfícies apresentam um melhor aspecto topográfico tornando-se menos rugosa e mais plana (Figuras 2b e 2d). Observa-se também que a superfície polida apresenta um melhor acabamento superficial, onde visivelmente nota-se que ela esta mais lisa em relação a superfície normal.

A Figura 3 corresponde às superfícies apresentadas pelos pequenos discos antes e após o mesmo tratamento estatístico. Fazendo-se uma analogia entre a topografia normal e a polida, observa-se também que para este caso a superfície polida apresenta um melhor acabamento, pois esta mais lisa, embora apresente regiões onde há exposição das fibras, conforme indicado pelas setas vermelhas nas Figuras 3c e 3d.

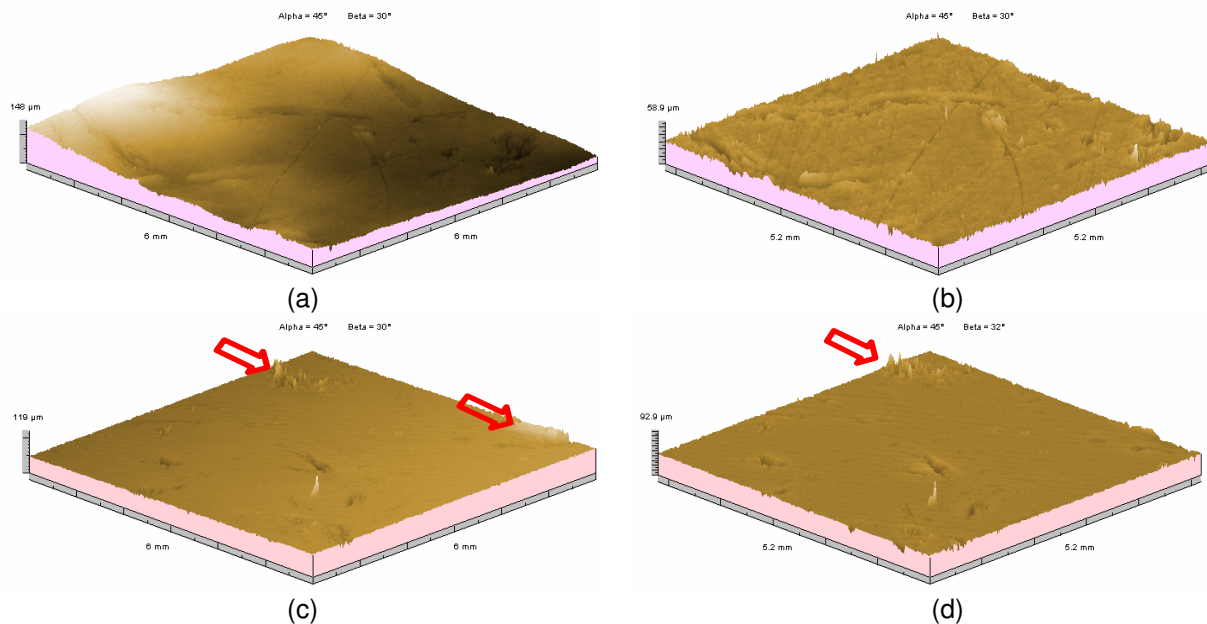
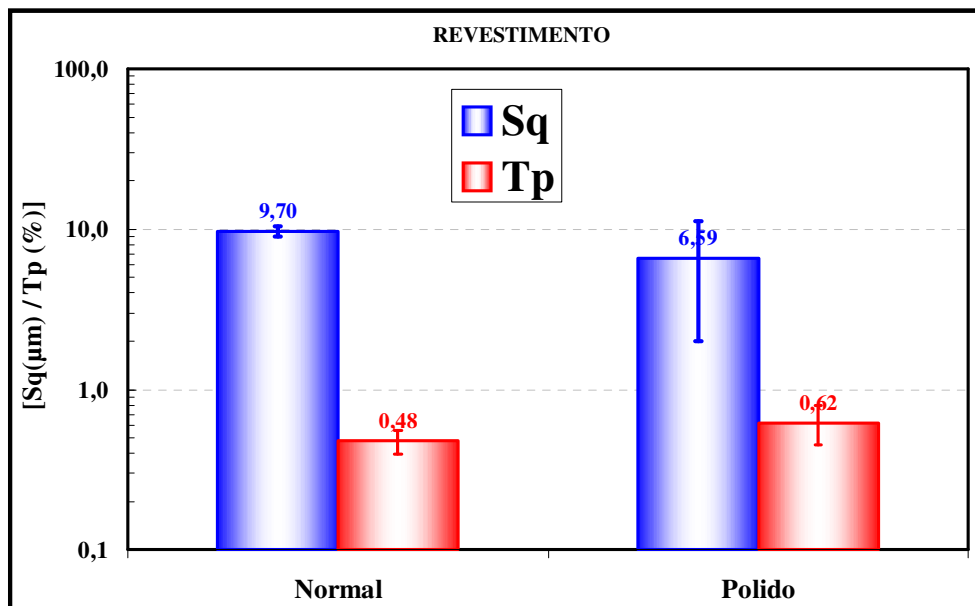
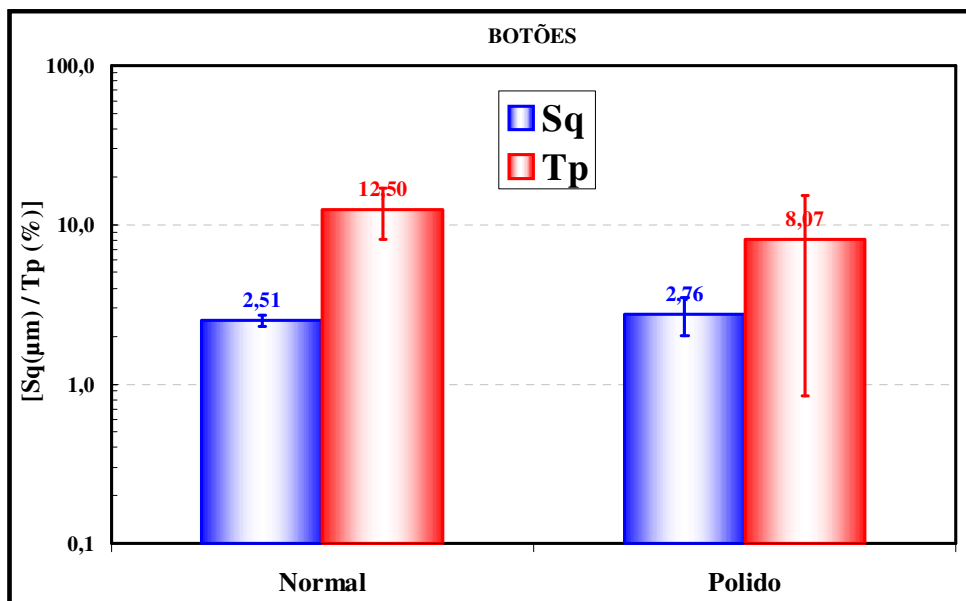


Figura 3: Topografia de superfície das amostras produzidas em laboratório. (a)- Amostra DN (superfície normal). (b)- superfície após eliminação da forma e ondulação. (c)- Amostra DP (superfície polida). (d)- superfície após eliminação da forma e ondulação.

A Figura 4-a apresenta os resultados da rugosidade quadrática média e da capacidade de apoio da superfície das amostras fabricadas na linha de produção. A Figura 4-b, por sua vez, apresenta os resultados da topografia de superfície das amostras produzidas laboratorialmente.



(a)



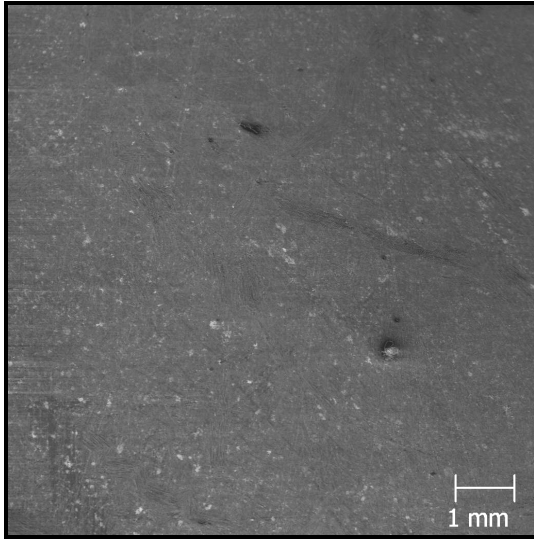
(b)

Figura 4: a -Parâmetros topográficos das amostras produzidas na linha de produção; b -Parâmetros topográficos das amostras produzidas laboratorialmente.

Observa-se através da Figura 4-a que o polimento das amostras produz uma sensível redução da rugosidade quadrática média (cerca de 32%) e um acréscimo na capacidade de apoio. Muito embora o acréscimo da capacidade de apoio seja significativo (22%), os valores absolutos são bastante baixos. Por outro lado, constata-se na Figura 4-b que o polimento além de aumentar, ainda que, ligeiramente, (10 %) a rugosidade quadrática média, produz uma sensível redução na capacidade de apoio da superfície (35%). Estes últimos valores, ainda que significativamente maiores, são bastante baixos. Obviamente, estes resultados contrariam, fortemente, pois conforme apresentado, após o polimento as amostras apresentaram melhor qualidade superficial. Esperava-se então com isso uma redução da rugosidade quadrática média e aumento na capacidade de apoio e não os resultados obtidos. Inicialmente buscou-se uma causa física para explicar estes resultados.

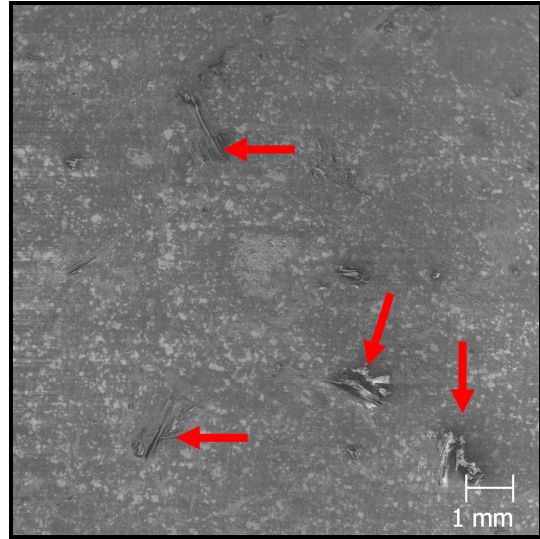
A Figura 5 mostra superfícies típicas de amostras produzidas laboratorialmente observadas no microscópio eletrônico de varredura. Pode-se observar nos menores aumentos (Figura 5-a e 5-e), que as superfícies têm aspectos bastante equivalentes sendo difícil de notar alguma variação significativa entre elas. Observa-se, ainda, que a superfície polida apresenta um maior número de imperfeições (setas vermelhas). Com aumentos intermediários (Figuras 5-b e 5-f), no entanto, fica claro que as imperfeições presentes nas amostras polidas são mais “acidentadas”. Para os maiores aumentos (Figuras 5-c, 5-g, 5-d e 5-h), fica claro o efeito “destruidor” que o polimento produz tanto nas fibras de reforço (Figura 5-g), como nos fios metálicos (Figura 5-h), podendo explicar, ainda que localizadamente, o aumento da rugosidade. Lembrando que este efeito foi observado claramente também nas imagens obtidas por interferometria laser das superfícies polidas (setas vermelhas nas Figuras 3-c e 3-d). Como os valores foram obtidos a partir de superfícies devidamente tratadas estatisticamente, ou seja, com a forma e a ondulação removidas, especulou-se se a forte componente de forma dos pequenos discos não poderia estar na origem dos resultados inesperados.

NORMAL

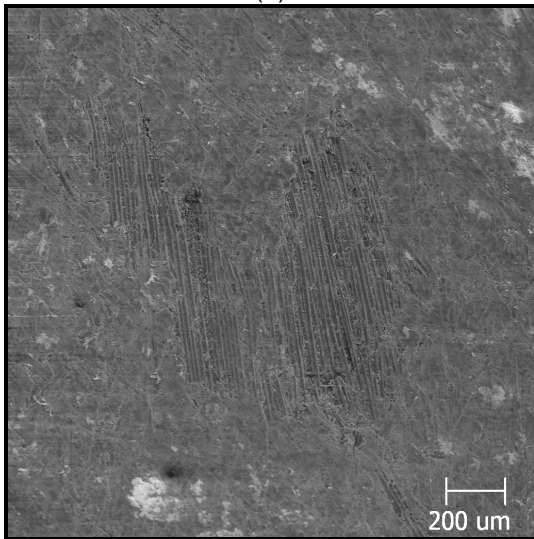


(a)

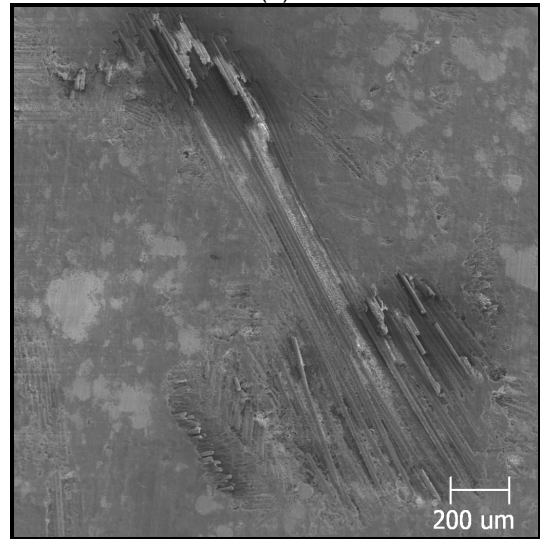
POLIDA



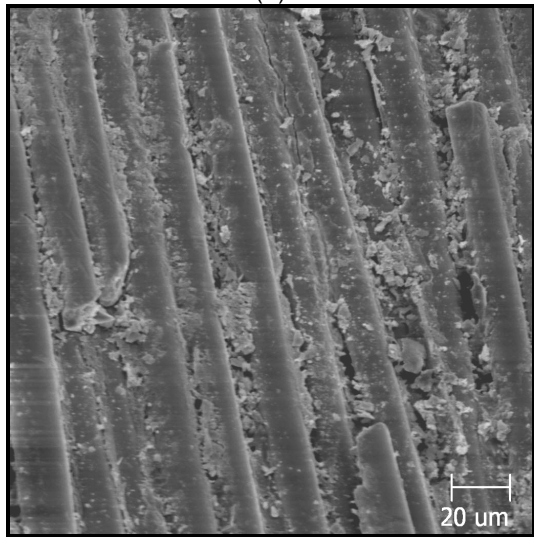
(e)



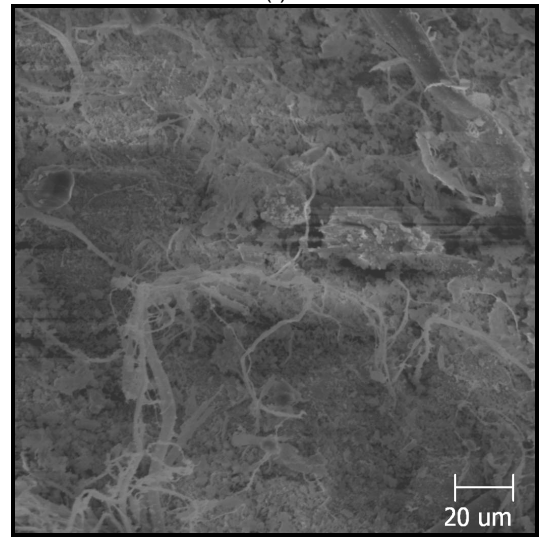
(b)



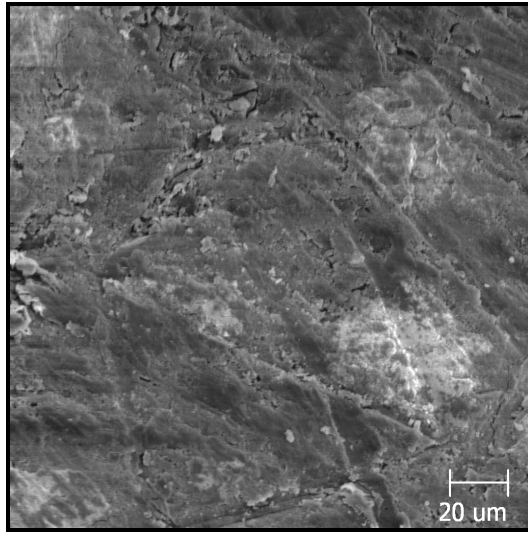
(f)



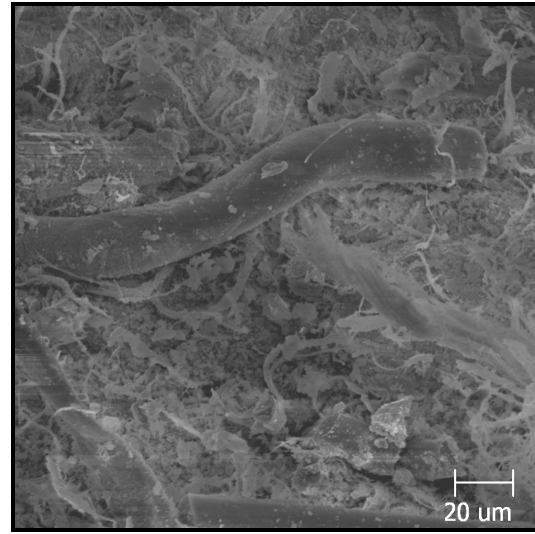
(c)



(g)



(d)



(h)

Figura 5: Aspecto típico de superfície das amostras produzidas laboratorialmente (pequenos discos).

A Figura 6 mostra uma superfície real decomposta nos seus diversos componentes (forma, ondulação e rugosidade).

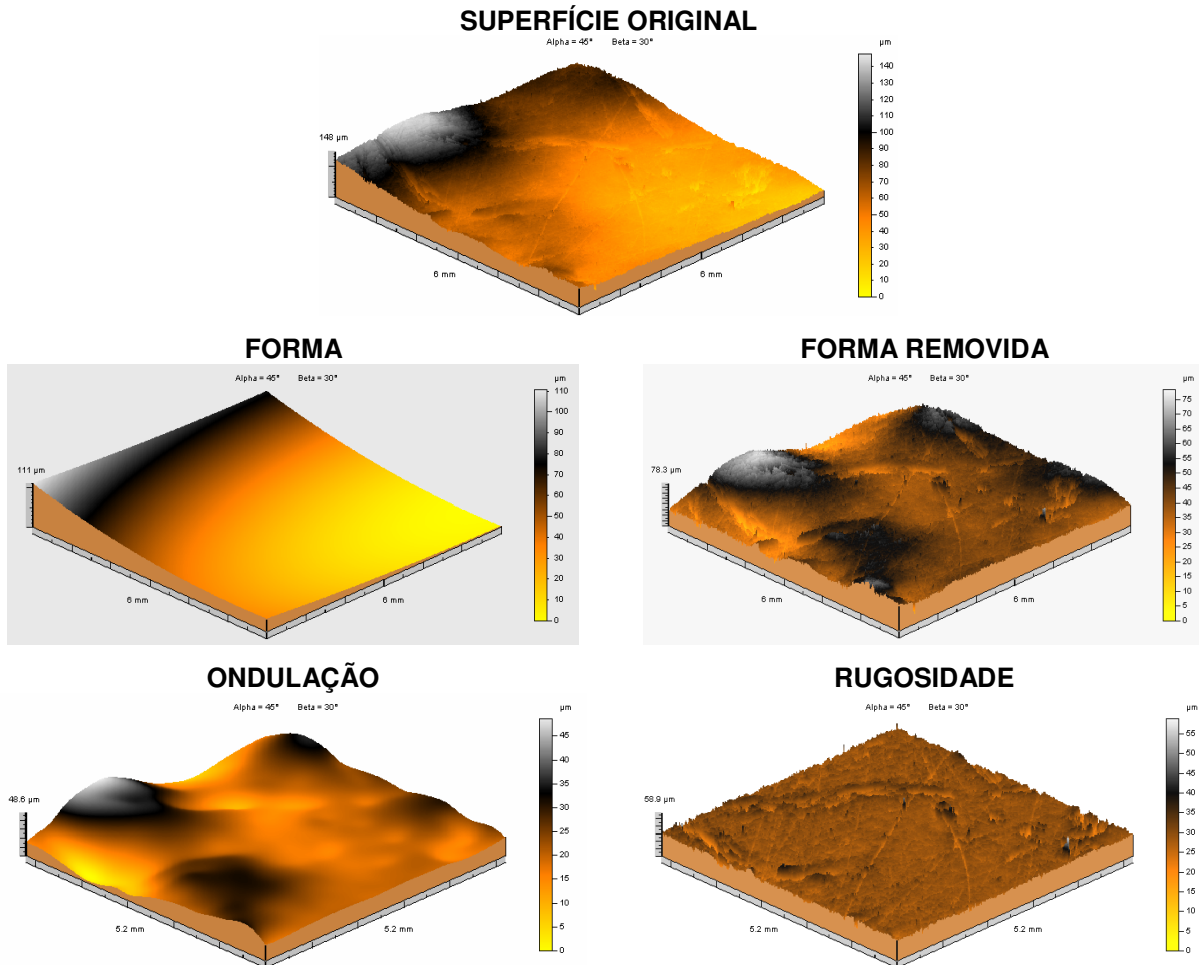


Figura 6: Componentes de uma superfície. Amostra DN-A2.

A Figura 7 apresenta os valores da topografia de superfície das amostras produzidas laboratorialmente. Para a amostra normal observa-se que conforme se evolui da superfície original para a componente da rugosidade existe uma diminuição da rugosidade quadrática média associada a um aumento da capacidade de carga da superfície. Para a superfície polida, no entanto, a rugosidade cai até a componente ondulação para em seguida aumentar na componente rugosidade. Efeito semelhante, porém no sentido inverso é apresentado pela capacidade de carga das superfícies. Este último comportamento parece ser o comportamento típico uma vez que também é apresentado pelas componentes superficiais das amostras da linha de produção tanto no estado bruto quanto polido, conforme pode ser visto na Figura 8.

A forte componente de forma apresentada pelas amostras produzidas laboratorialmente no seu estado bruto induz, juntamente com o aspecto físico já analisado, aumento da rugosidade quadrática média e diminuição da capacidade de apoio.

De uma maneira geral, pode-se constatar que o polimento das amostras diminui a rugosidade quadrática média e aumenta a capacidade de suporte de carga da superfície.

Na condição normal, como produzida, o mesmo comportamento é apresentado pelas componentes ondulação e rugosidade enquanto que a componente forma e a superfície primitiva (bruta) apresentam comportamento inverso, ou seja, as amostras laboratoriais apresentam maior rugosidade e menor capacidade de suporte de carga.

Através das análises dos resultados, pode-se concluir que a capacidade de apoio das superfícies, expresso pelo parâmetro T_p , apresenta valores significativamente baixos e não constantes para as superfícies estudadas.

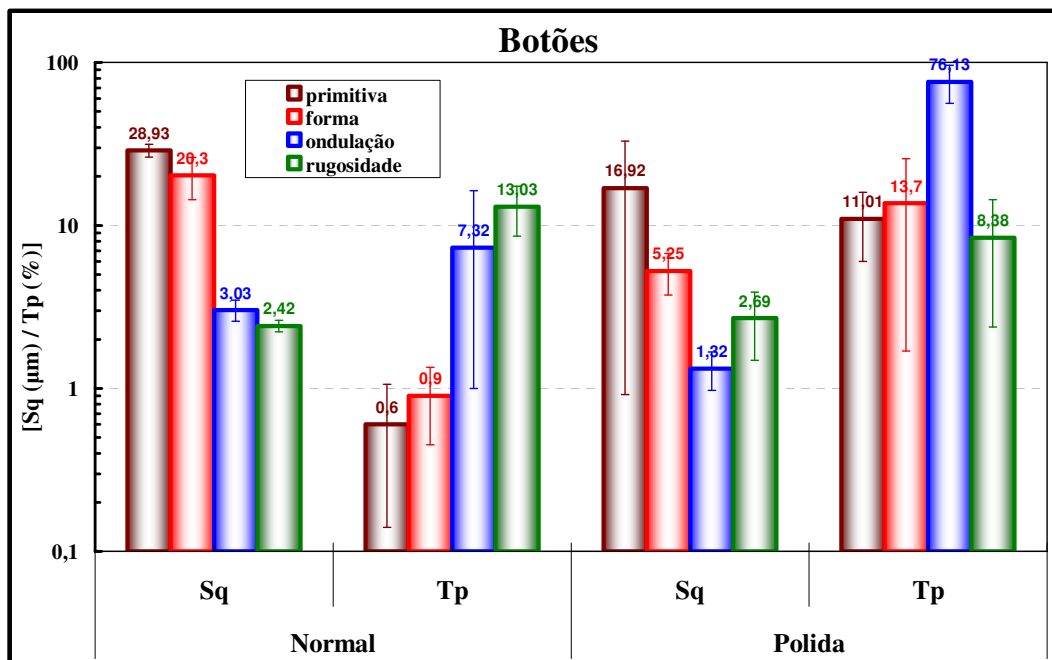


Figura 7: Componentes da topografia de superfície das amostras produzidas laboratorialmente.

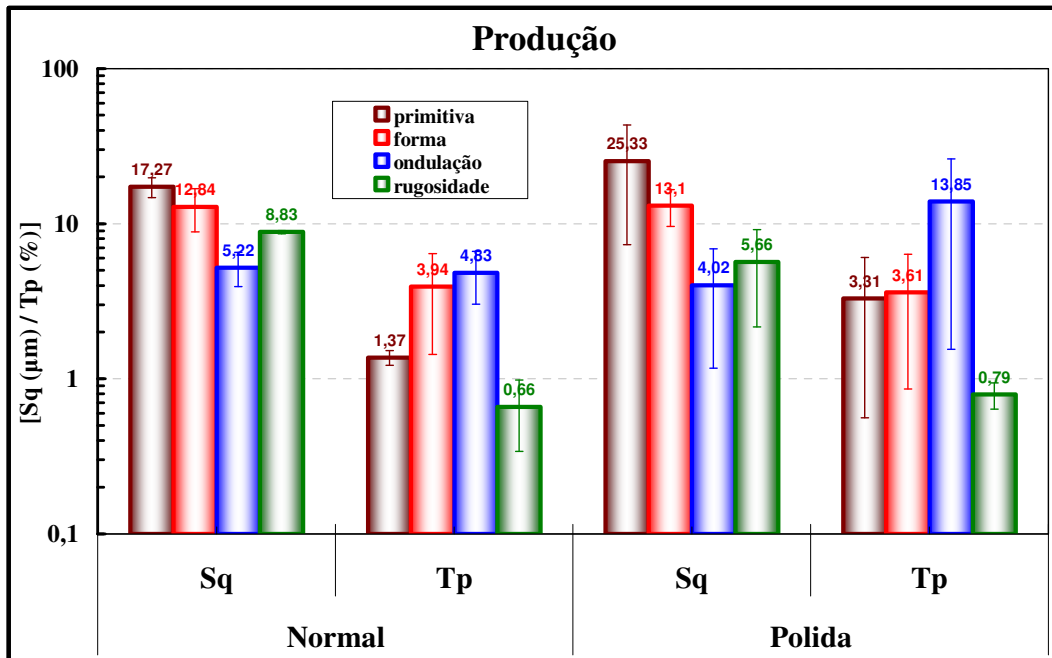
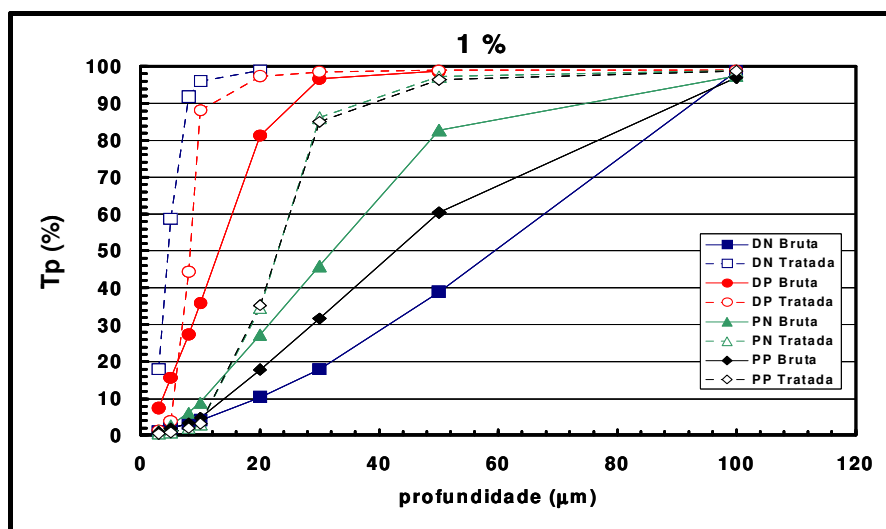
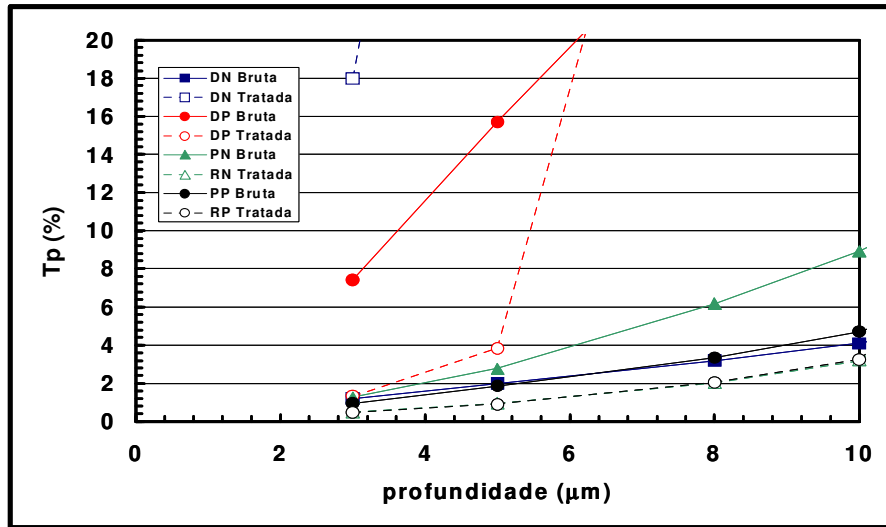


Figura 8: Componentes da topografia de superfície das amostras produzidas em série.

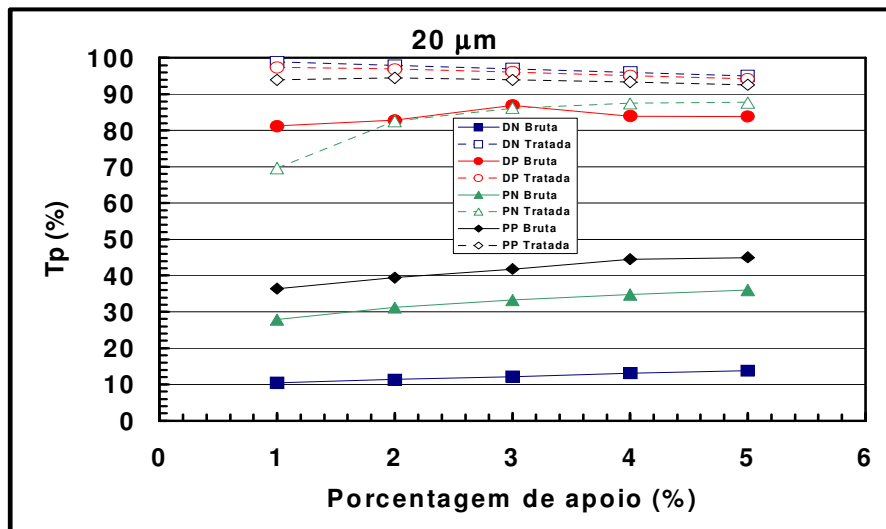
A Figura 9-a e 9-b mostram o efeito da profundidade da superfície ativa nos valores de Tp e a figura 9-c apresenta o efeito da porcentagem inicial na capacidade de apoio. Observa-se na Figura 9-b que, 3 μm de profundidade, é um valor, não realista para aplicação da embreagem, pois, todos os valores são baixos e não apresentam diferenças significativas nem consistentes entre as diversas amostras. Observa-se também que as superfícies tratadas estatisticamente apresentam maior capacidade de apoio. Analisando os resultados apresentados na Figura 9-c, pode-se constatar que a porcentagem inicial de apoio não exerce influência significativa nos valores da capacidade de apoio.



(a)



(b)



(c)

Figura 9: Efeito da profundidade da superfície ativa nos valores da capacidade de apoio das superfícies. (a)- Geral. (b)- Detalhe. (c)- Efeito da porcentagem de apoio inicial na capacidade de apoio das superfícies.

4 CONCLUSÕES

Com este estudo, avaliou-se a influência do processo de acabamento superficial na topografia de superfície dos revestimentos, bem como a influência das componentes na topografia de superfície. Para as amostras fabricadas na linha de produção o polimento produz uma sensível redução da rugosidade quadrática média e um acréscimo na capacidade de apoio. Para as amostras produzidas laboratorialmente o polimento além de aumentar, ainda que ligeiramente a rugosidade quadrática média produz uma sensível redução na capacidade de apoio da superfície. O efeito “destruidor” que o polimento produz tanto nas fibras de reforço como nos fios metálicos, pode explicar, ainda que localizadamente, o aumento da rugosidade. Aparentemente, as amostras produzidas laboratorialmente quando no seu estado bruto tem uma forte

componente de forma induzindo, juntamente com o aspecto físico o aumento da rugosidade e diminuição da capacidade de apoio. De uma maneira geral, o polimento das amostras diminui a rugosidade quadrática média e aumenta a capacidade de suporte de carga da superfície. Com isso estabeleceu como critério de caracterização topográfica dos revestimentos a ser realizados na superfície primitiva, uma vez que, foi visto a influência da componente forma. Como a porcentagem de apoio inicial não exerce influência na capacidade de apoio e a profundidade ativa igual a $3\mu\text{m}$ apresenta valores significativamente baixos e não constantes para as superfícies estudadas, foi definido a porcentagem de apoio inicial de 1% e profundidade ativa de $20\mu\text{m}$.

REFERÊNCIAS

- 1 S Stout, K. J.; Blunt, L. "Nanometers to micrometers: three-dimensional surface measurement in bio-engineering", *Surface and Coatings Technology*, v. 71, p. 69-81, 1995.
- 2 Stout, K. J. et al. "Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Tree Dimensions (Ultra Precision Technology) (Ultra Precision Technology Series)", England, 2000, 384p.
- 3 Raja, J.; Muralikrishnan, B.; Fu, S. "Recent advances in separation of roughness, waviness and form", *Precision Engineering*, v. 26, p. 222-235, 2002.
- 4 Josso, B.; Burton, D. R.; Lalor, M. J. "Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation", *Wear*, v. 252, p. 491-500, 2002.
- 5 Bennett, J. M. "Recent developments in surface roughness characterization", *Measurement Science Technology*, v. 3, p. 1119-1127, 1992.
- 6 Chen, Q.; Yang, S.; Li, Z. "Surface roughness evaluation by using wavelets analysis", *Precision Engineering*, v. 23, p. 209-212, 1999.
- 7 Dong, W. P.; Mainsah, E; Stout, K. J. "Reference planes for the assessment of surface roughness in three dimensions", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 35, No.2, p. 263-271, 1995.
- 8 Hanada, H. "Sophisticated filtration technique for 3D surface topography data of rectangular area", *Wear*, Accepted 28 August 2006, 2007.
- 9 Jiang, X.Q.; Blunt, L.; Stout, K.J. "Lifting wavelet for three-dimensional surface analysis", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 41, p. 2163-2169, 2001.
- 10 Josso, B.; Burton, D. R.; Lalor, M. J. "Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation", *Wear*, v. 252, p. 491-500, 2002.
- 11 Lingadurai, K.; Shunmugam, M.S. "Metrological characteristics of wavelet filter used for engineering surfaces", *Measurement*, v. 39, p. 575-584, 2006.
- 12 Pfeifer, T.; Kurokawa, S.; Meyer, S. "Derivation of parameters of global form deviations for 3-dimensional surfaces in actual manufacturing processes", *Measurement*, v. 29, p. 179-200, 2001.
- 13 Whitehouse, D. J. "Handbook of Surface and Nanometrology", CRC Press, 2003, 1100 p.