

CAPÍTULO V

CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA

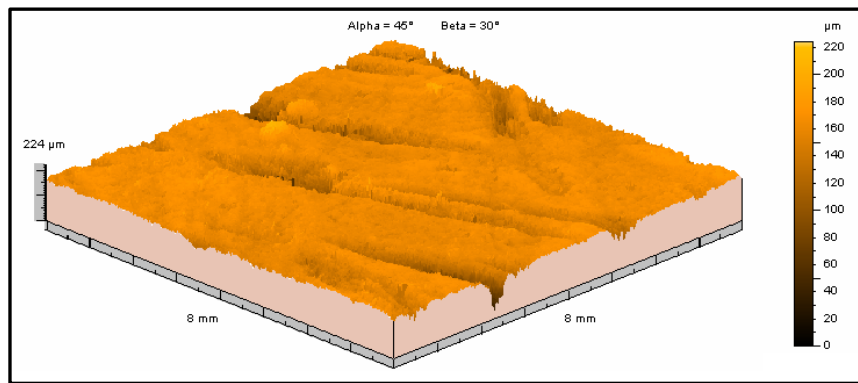
Após o desenvolvimento da metodologia que permite simular em laboratório as interações tribológicas semelhantes a da realidade, as amostras de revestimento e placa de pressão que foram utilizadas, foram caracterizadas topograficamente em termos de rugosidade quadrática média e capacidade de apoio. Foram caracterizadas somente as amostras que foram submetidas a ensaios com força normal de 200 N.

As figuras 5.1-a e 5.1-b apresentam aspectos típicos da topografia de superfície do revestimento A, antes e após a realização dos ensaios laboratoriais. De forma idêntica, as figuras 5.1-c e 5.1-d apresentam os aspectos típicos da topografia do revestimento B.

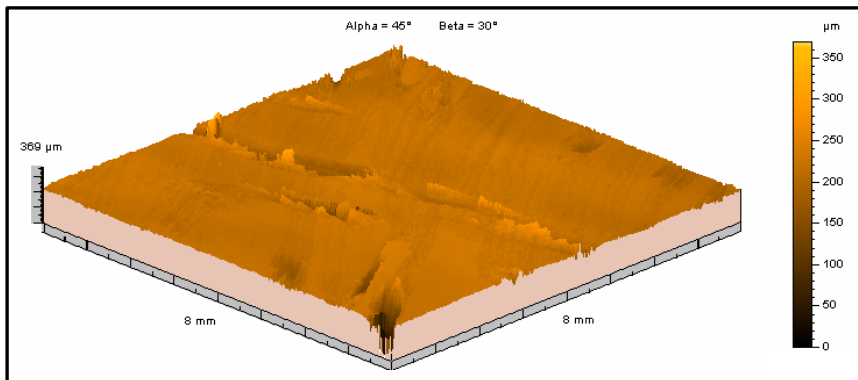
A figura 5.2 quantifica a topografia da superfície dos revestimentos A e B, antes e após a realização dos ensaios laboratoriais, em termos da rugosidade quadrática média (S_q). Observa-se que os revestimentos A antes da realização dos ensaios tribológicos apresentam, estatisticamente, maior rugosidade quadrática média em relação ao revestimento B. Observa-se, também, na figura 5.2, que, após a realização dos ensaios, a rugosidade quadrática média diminuiu, tanto para o revestimento A (cerca de 53%) quanto para o revestimento B (cerca de 50%), e que a rugosidade quadrática média do revestimento B é estatisticamente menor em relação ao revestimento A.

Decréscimo na rugosidade quadrática média foi também observado por Ost; Baets; Degrieck (2001), em seu trabalho. Os autores concluíram que, após a realização dos ensaios, os revestimentos apresentaram menor rugosidade quadrática média, e que a rugosidade final somente é influenciada pela rugosidade inicial.

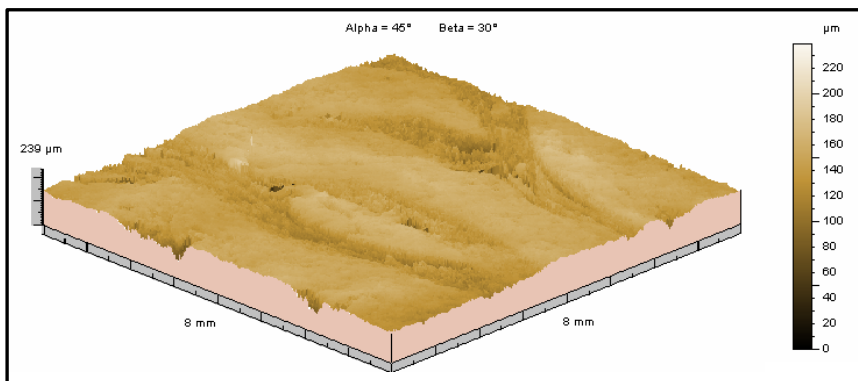
De fato, é esperado que haja uma diminuição da rugosidade quadrática média das amostras após a realização dos ensaios tribológicos, devido ao desgaste superficial e, com isso, à diminuição dos picos das irregularidades, tornando a superfície mais planificada e lisa, como foi observado na figura 4.15 e, também, como pode ser visto na figura 5.1.



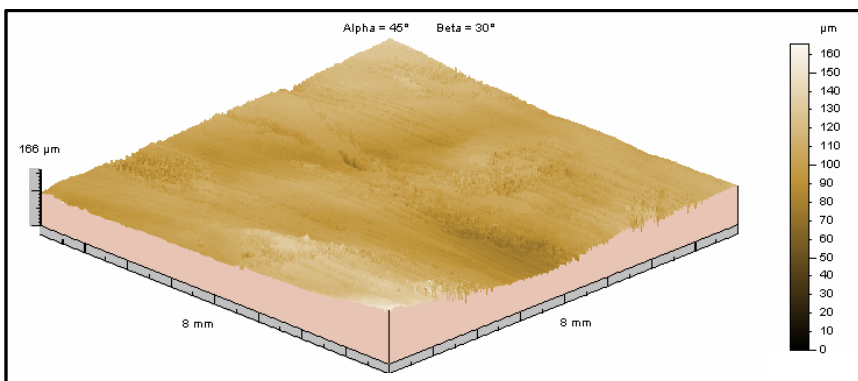
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.1: Topografia de superfície dos revestimentos submetidos a ensaios laboratoriais com força normal igual a 200 N. (a e b)- revestimento A, antes e após o ensaio; (c e d)- revestimento B, antes e após a realização do ensaio.

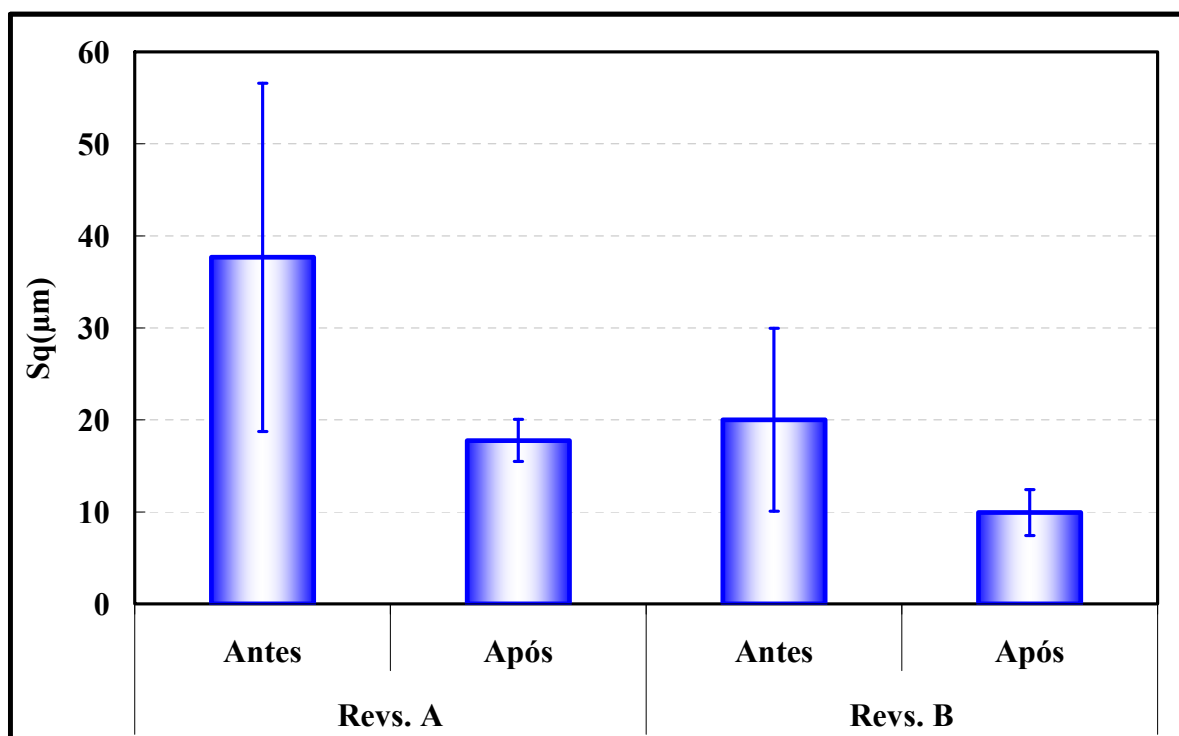


Figura 5.2: Quantificação da rugosidade quadrática média dos revestimentos A e B antes e após a realização dos ensaios tribológicos para uma força normal de 200 N.

A figura 5.3 mostra uma mesma região de uma amostra de revestimento B observada via MEV, antes e após a realização do ensaio tribológico. Observa-se, em menores aumentos, na figura 5.3-d que, após a realização do ensaio tribológico a superfície está mais lisa, planificada, devido o desgaste que ocorreu na superfície da amostra. As marcas de desgaste podem ser vistas claramente em aumentos intermediários, figuras 5.3-b e 5.3-e. Nos maiores aumentos, figuras 5.3-c e 5.3-f, tornam-se ainda mais claro as imperfeições que a superfície do revestimento apresentam antes da realização dos ensaios, como grande quantidade de trincas na matrix polimérica, que podem nitidamente ser vistas, e que, após o termino dos ensaios essas trincas desapareceram devido ao desgaste superficial.

Diferentemente de Ost; Baets; Degrieck (2001) que, em seu trabalho, quantificaram a topografia da superfície apenas com a rugosidade quadrática média, neste trabalho, buscou-se quantificar a topografia das amostras utilizando mais de um parâmetro topográfico, uma vez que, como já foi abordado por Dong et al (1994), superfícies com mesma rugosidade quadrática média podem apresentar diferentes aspectos topográficos.

A figura 5.4 quantifica a topografia de superfície das amostras de revestimentos A e B, antes e após a realização dos ensaios laboratoriais, em termos da capacidade de apoio (T_p).

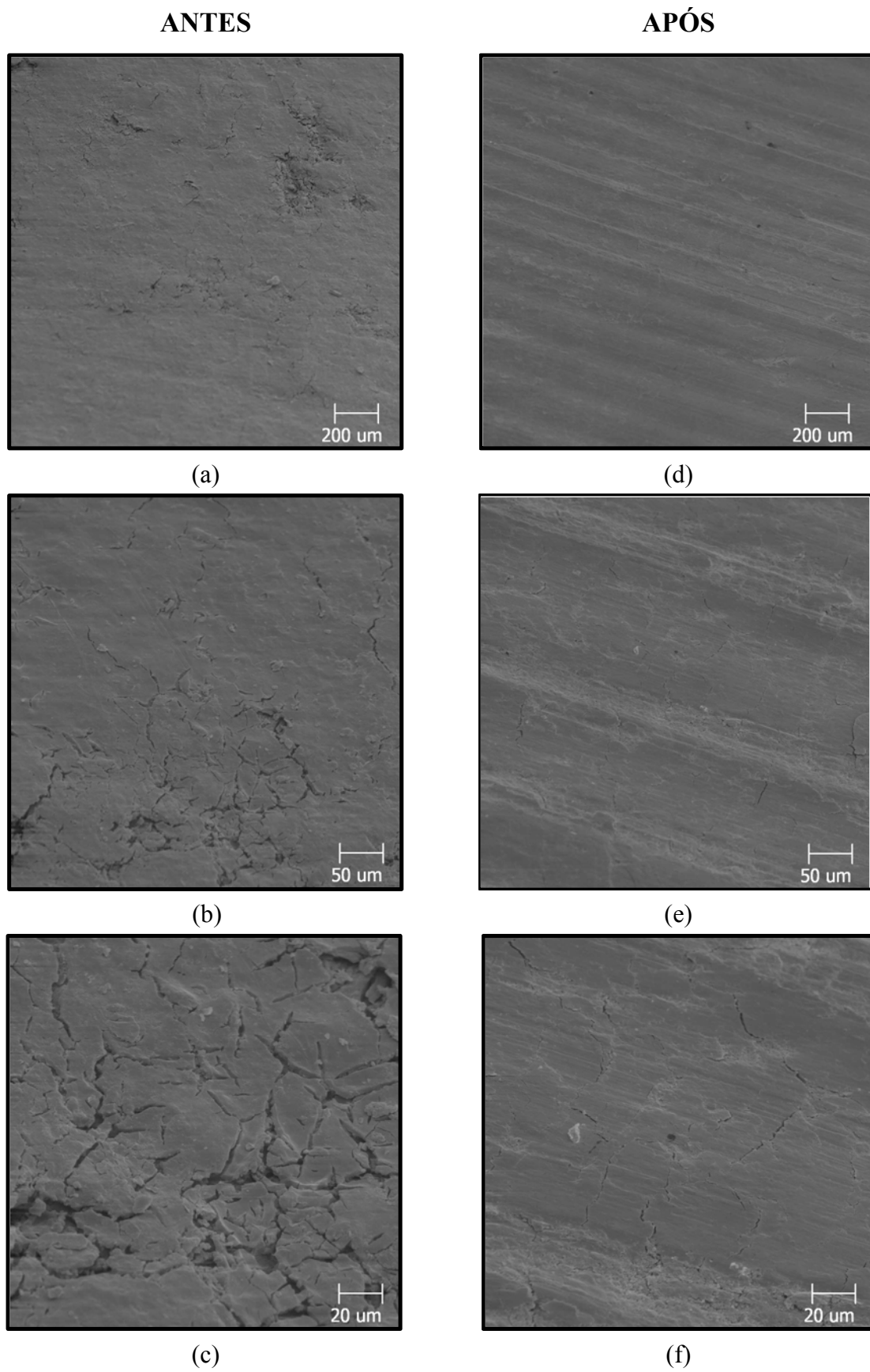


Figura 5.3: Topografia de superfície típica observada via MEV. Revestimentos B.

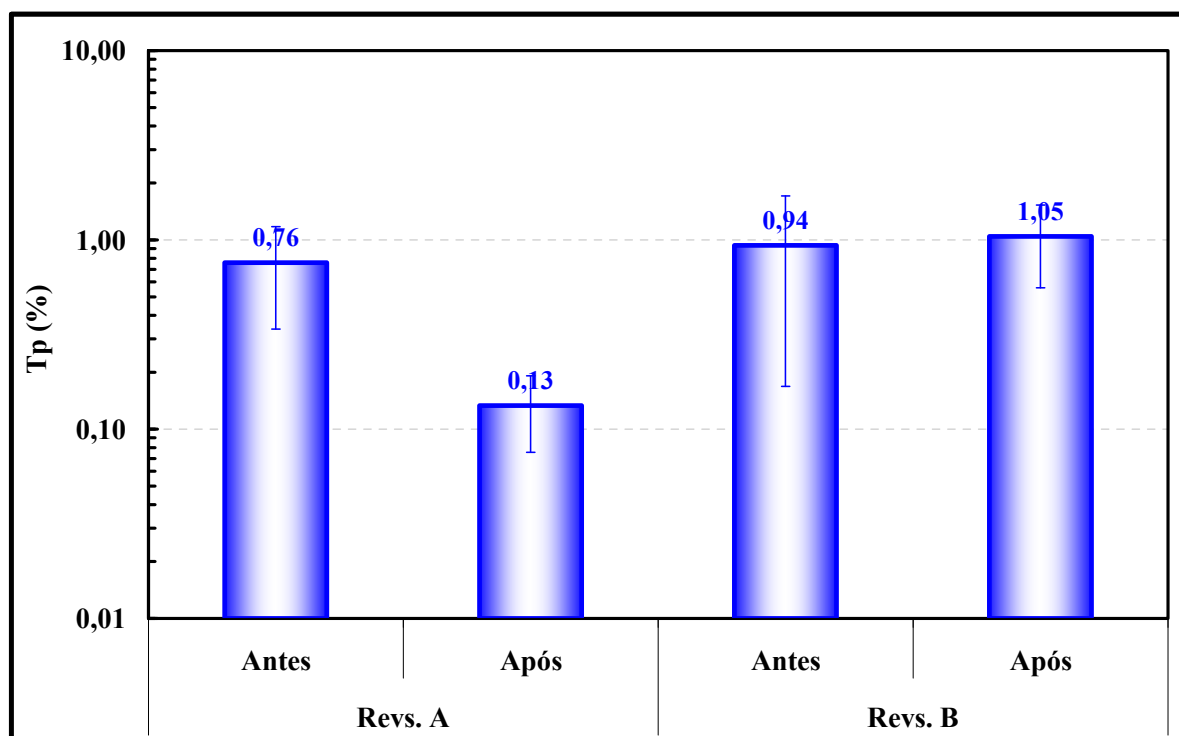


Figura 5.4: Quantificação da capacidade de apoio dos revestimentos A e B antes e após a realização dos ensaios tribológicos para uma força normal de 200 N.

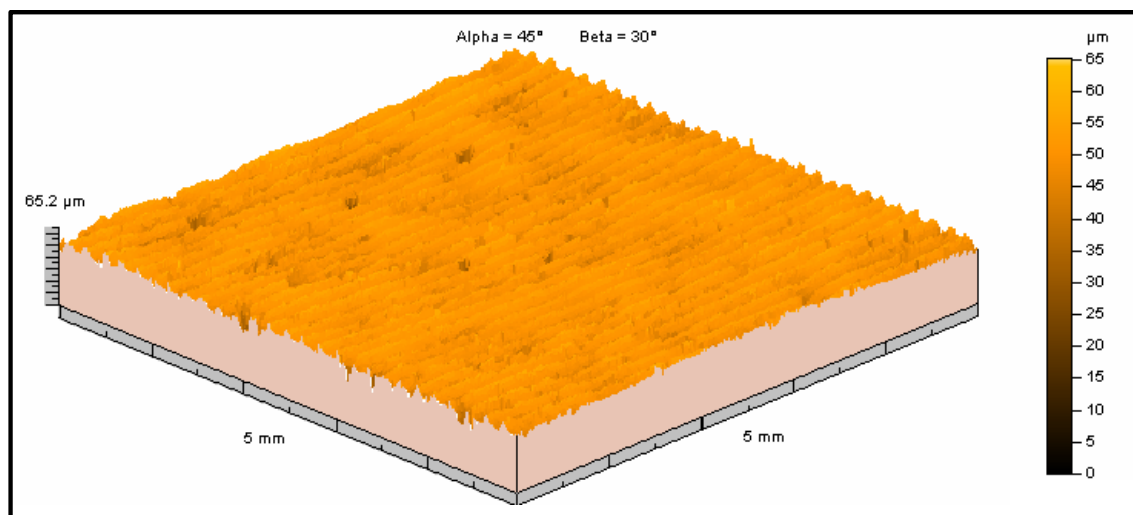
Observa-se na figura 5.4 que, após o ensaio tribológico, houve uma redução na capacidade de apoio do revestimento A (cerca de 80%), não havendo, estatisticamente, variação na capacidade de apoio da superfície do revestimento B antes e após o ensaio.

Dois fatos chamaram muita atenção neste ponto. Primeiro os valores absolutos da capacidade de apoio inicial serem muito baixos, tanto para o revestimento A, quanto para o revestimento B. Mas acreditou-se que estes valores iniciais pudessem ser os valores reais da capacidade de apoio inicial, já que as superfícies das amostras apresentam muitas irregularidades, como já mencionado. O segundo fato que despertou mais atenção é o decréscimo no valor da capacidade de apoio (80%) para o revestimento A, o que, obviamente, contraria fortemente com os aspectos topográficos observados na figura 5.1.

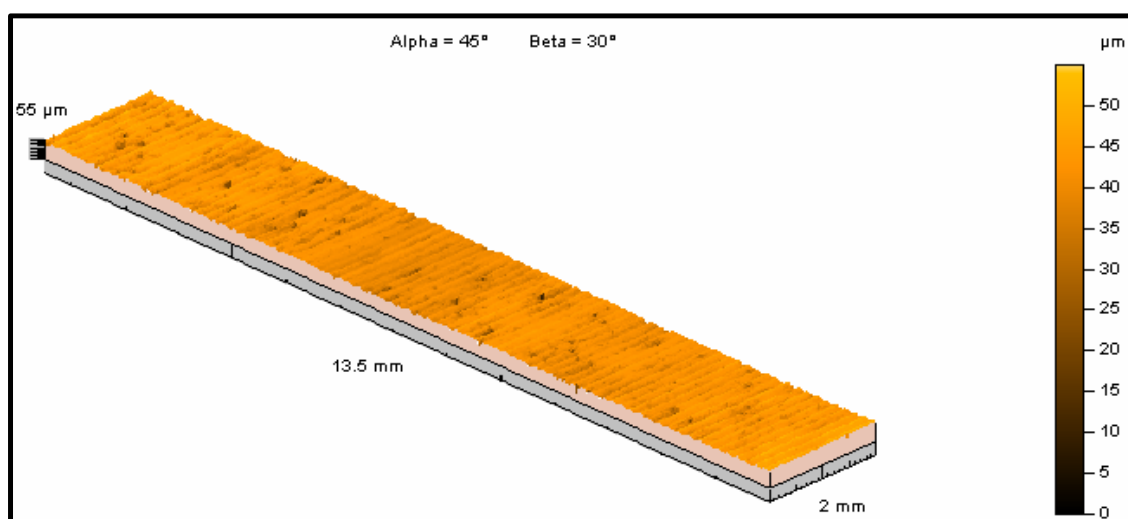
A figura 5.5 apresenta topografia típica da placa de pressão utilizada na realização do ensaio tribológico com revestimento A. As ranhuras observadas na superfície da placa de pressão no seu estado virgem, ou seja, antes da realização do ensaio, são ranhuras que foram geradas durante o processo de confecção da mesma.

A figura 5.6 quantifica a topografia de superfície das placas de pressão A e B, em termos de rugosidade quadrática média (Sq) e capacidade de apoio (Tp). Observa-se que, tanto para a placa de pressão A quanto para a B, após a realização dos ensaios laboratoriais, a

rugosidade quadrática média sofreu uma ligeira diminuição. Este mesmo comportamento foi também observado por Ost et al (2001). Era de se esperar que a rugosidade da placa de pressão diminuísse após a realização dos ensaios, devido o desgaste ocorrido na superfície, e conseqüentemente uma planificação da topografia. Por outro lado, quando se observa o comportamento da capacidade de apoio, pode-se ver que, para a placa de pressão A, a mesma teve um ligeiro acréscimo após a realização do ensaio, comportamento este inverso ao apresentado pelo revestimento A. Para a placa de pressão B, a capacidade de apoio é estatisticamente igual, não havendo variação entre antes e após a realização dos ensaios tribológicos.



(a)



(b)

Figura 5.5: Topografia de superfície da placa de pressão. Amostra Placa de pressão A. (a)- antes da realização do ensaio laboratorial; (b)- após a realização do ensaio laboratorial.

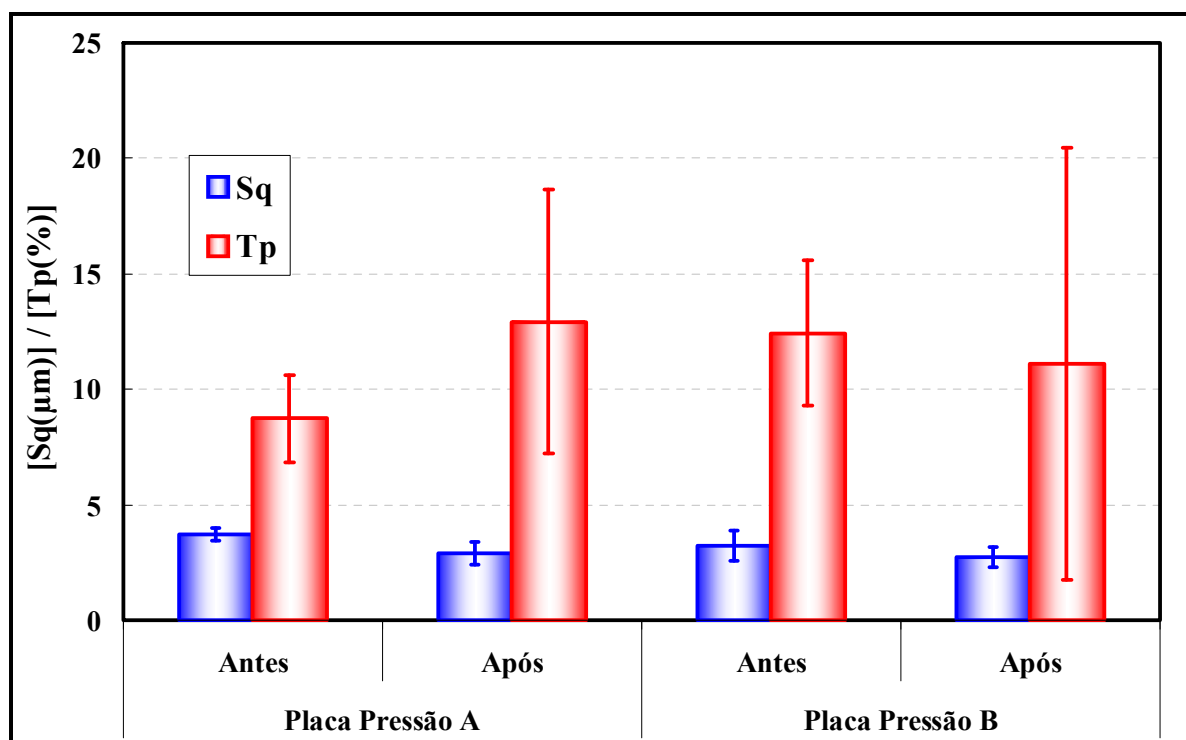


Figura 5.6: Parâmetros topográficos das amostras de placa de pressão A e B utilizadas nos ensaios laboratoriais, com força normal aplicada de 200 N.

Apesar da capacidade de apoio da placa de pressão A ter apresentado um acréscimo após a realização do ensaio, o seu valor absoluto foi considerado baixo para a aplicação em embreagem. Com isso, um novo estudo foi realizado buscando otimizar os parâmetros para caracterizar a topografia de superfície das amostras de revestimento e placa de pressão.

5.1 – Otimização dos Parâmetros Para a Caracterização Topográfica

Foram analisadas superfícies de amostras de revestimentos para embreagens fornecidas pela empresa ZF_Sachs do Brasil. As amostras foram fornecidas em dois estados de acabamento superficial: Normal e Polido. Os detalhes do processo de polimento não foram fornecidos pela ZF_Sachs do Brasil. Foram analisadas amostras de revestimentos produzidos na forma de pequenos discos (botões) especialmente fabricados e amostras cortadas de peças produzidas em série.

A tabela 5.1 apresenta as principais características e a designação das amostras analisadas.

Tabela 5.1: 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 quantificação da topografia foi feita por interferometria laser. As análises foram feitas no modo contínuo. As regiões analisadas dos botões tiveram dimensões de 6 X 8 mm sendo analisadas, no mínimo, quatro áreas por amostra. Nas amostras produzidas em série foram analisadas três áreas (6 X 7 mm) 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. Algumas amostras representativas foram analisadas via MEV.

As figuras 5.7-a e 5.7-b mostram a superfície do revestimento produzido na linha de produção sem nenhuma alteração da superfície. As figuras 5.7-c e 5.7-d, por sua vez, mostram a superfície destas amostras após polimento. Em ambos os casos, 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. A figura 5.8 corresponde às superfícies apresentadas pelos botões antes e após o mesmo tratamento estatístico.

A figura 5.9 quantifica a topografia de superfície das amostras fabricadas na linha de produção em termos da rugosidade quadrática média (S_q) e da capacidade de apoio (T_p). Observa-se 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.

A figura 5.10, por sua vez, apresenta o efeito do polimento na topografia de superfície das amostras produzidas laboratorialmente.

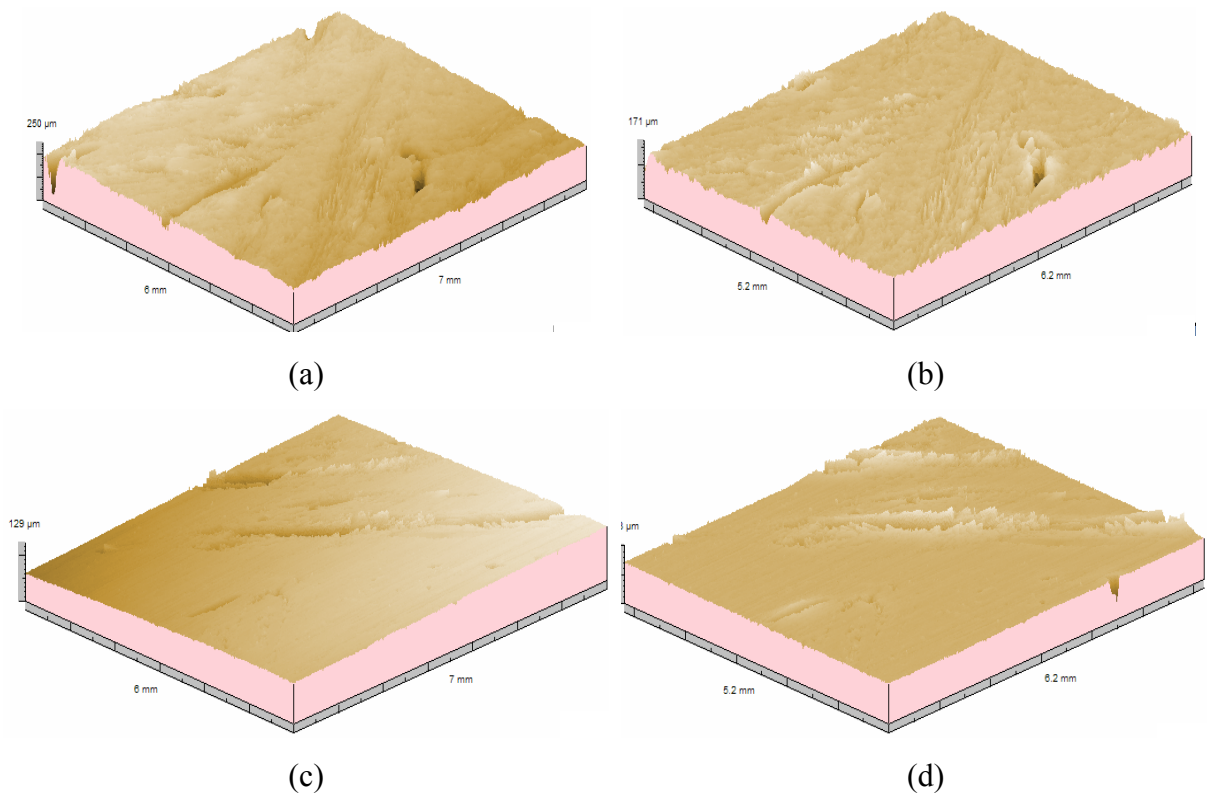


Figura 5.7: Topografia de superfície das amostras produzidas em serie. (a)- Amostra PN (superfície normal). (b)- superfície após eliminação da forma e ondulação. (c)- Amostra PP (superfície polida). (d)- superfície após eliminação da forma e ondulação.

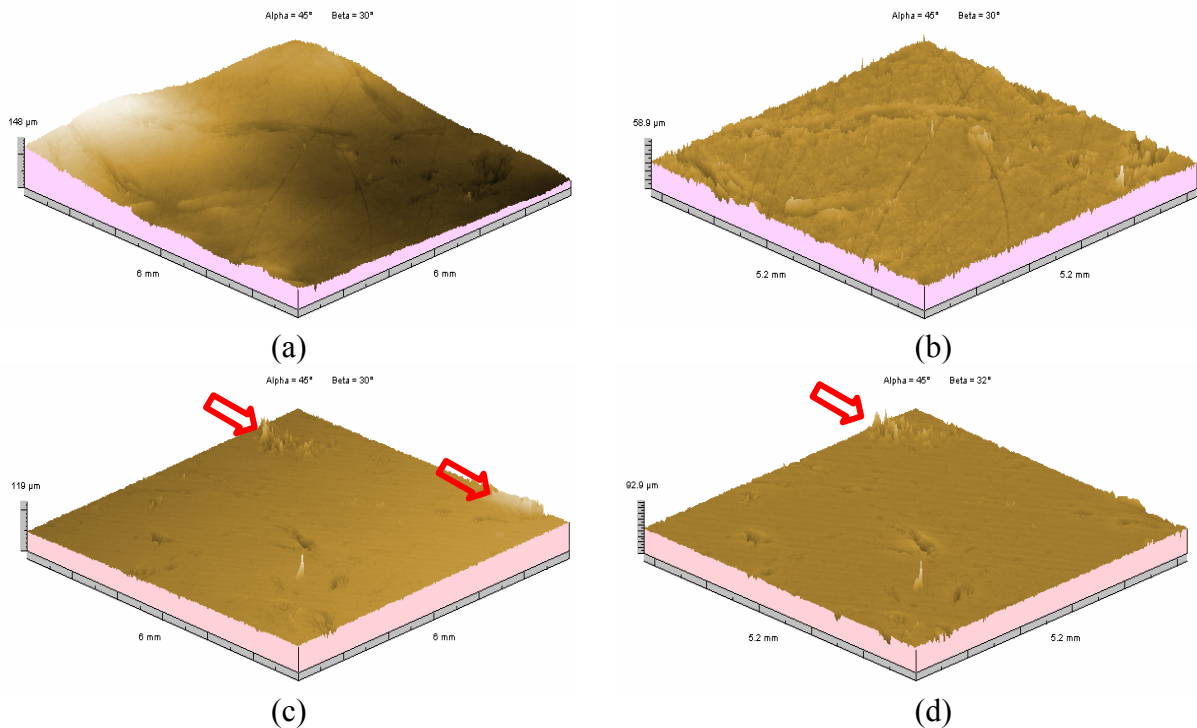


Figura 5.8: Topografia de superfície das amostras produzidas em laboratório. (a)- Amostra DN (superfície normal). (b)- superfície após eliminação da forma e ondulação. (c)- Amostra DP (superfície polida). (d)- superfície após eliminação da forma e ondulação.

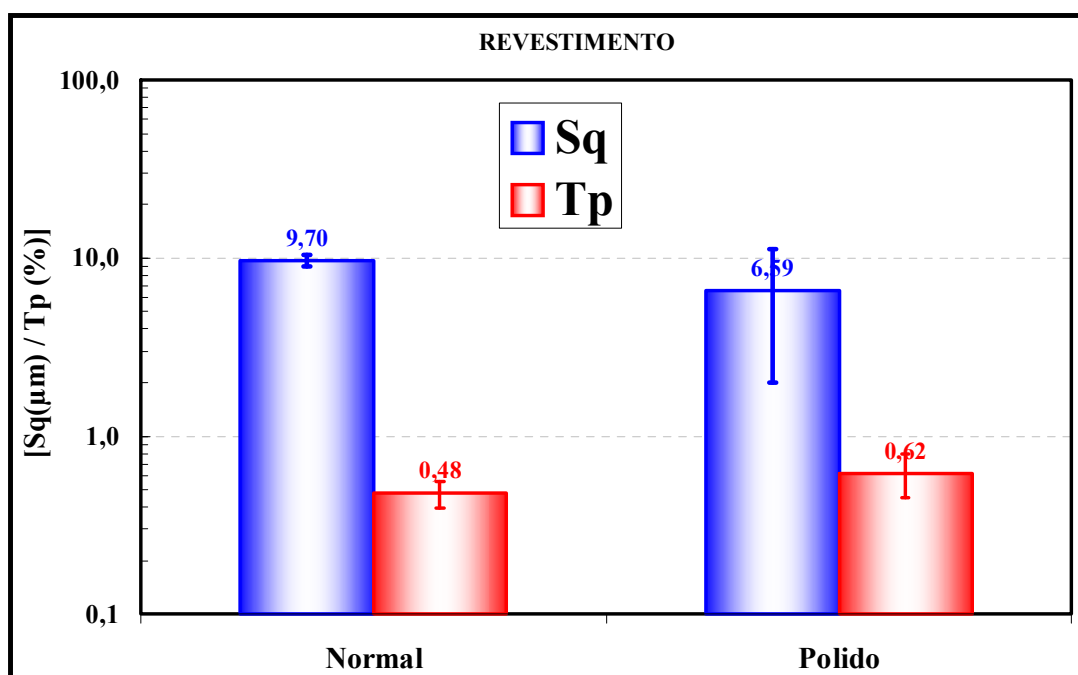


Figura 5.9: Parâmetros topográficos das amostras produzidas na linha de produção.

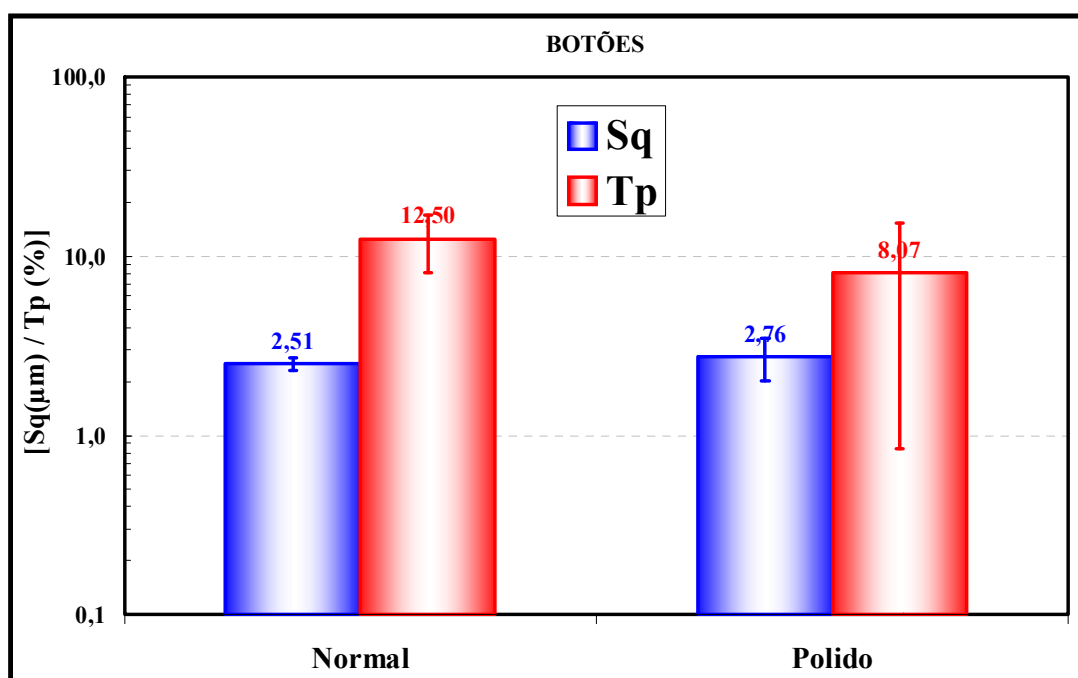


Figura 5.10: Parâmetros topográficos das amostras produzidas laboratorialmente.

Constata-se na figura 5.10 que o polimento além de aumentar, ainda que, ligeiramente, (10 %) a rugosidade quadrática média, o mesmo 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, o que se espera do polimento em termos de qualidade superficial ou seja uma melhoria da planicidade e

rugosidade da superfície. Inicialmente buscou-se uma causa física para explicar estes resultados.

A figura 5.11 mostra superfícies típicas de amostras produzidas laboratorialmente observadas no microscópio eletrônico de varredura. Pode-se observar nos menores aumentos, figura 5.11-a e 5.11-b, 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. Com aumentos intermediários, no entanto, fica claro que as imperfeições presentes nas amostras polidas são mais “acidentadas”. Para os maiores aumentos, figuras 5.11-c, 5.11-d, 5.11-g e 5.11-h, fica claro o efeito “destruidor” que o polimento produz tanto nas fibras de reforço, figura 5.11-f, como nos fios metálicos, figura 5.11-g, podendo explicar, ainda que localizadamente, o aumento da rugosidade. Note que este efeito também aparece claramente nas imagens obtidas por interferometria laser das superfícies polidas (setas vermelhas nas figuras 5.8-c e 5.8-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 botões não poderia estar na origem dos resultados inesperados. Para maior clareza, a figura 5.12 mostra uma superfície real decomposta nos seus diversos componentes (forma, ondulação e rugosidade).

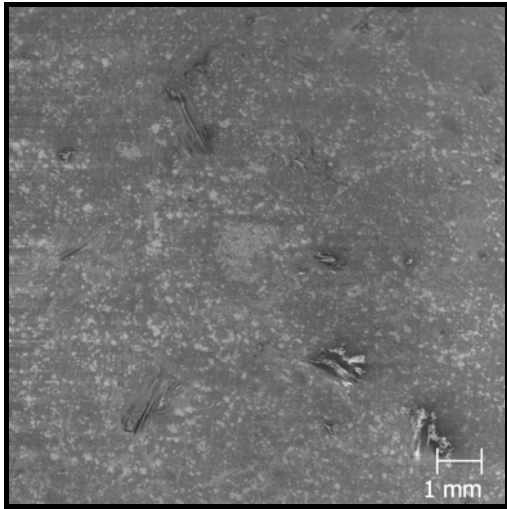
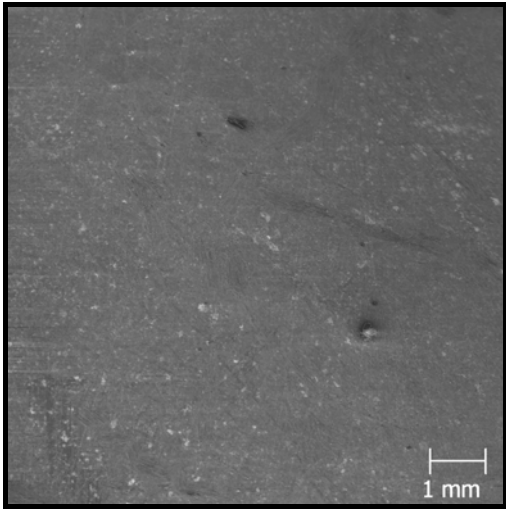
A figura 5.13 apresenta os valores da topografia de superfície das amostras produzidas laboratorialmente. Para a amostra normal, produzida laboratorialmente, observa-se que conforme se evolui da superfície original para a componente da rugosidade existe uma diminuição da rugosidade quadrática média associada a um aumento da capacidade de carga da superfície. Para a superfície polida das amostras produzidas laboratorialmente, 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 polidas, figura 5.14.

A forte componente de forma apresentada pelas amostras produzidas laboratorialmente (botões) 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.

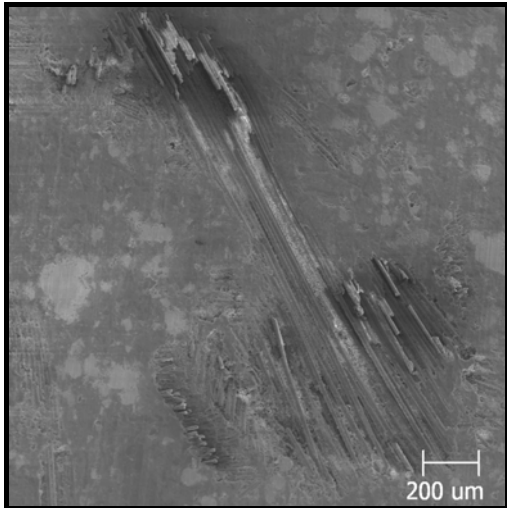
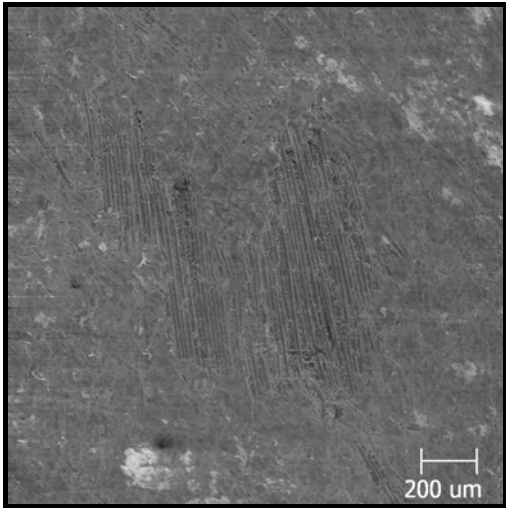
NORMAL

POLIDA



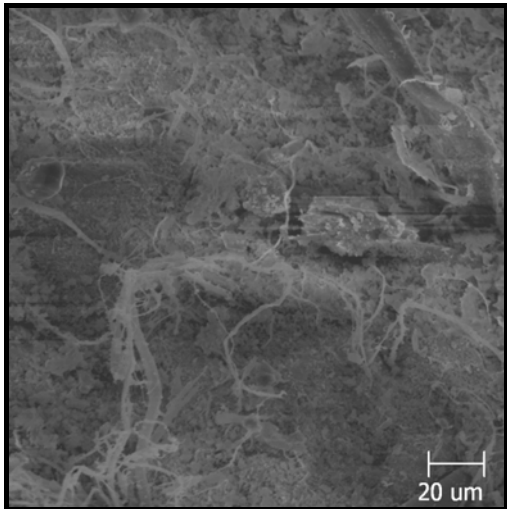
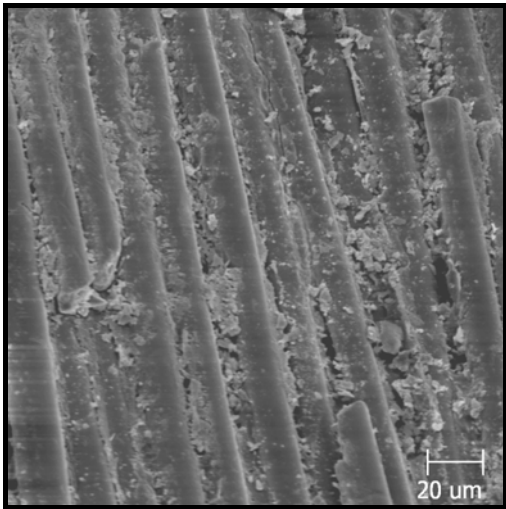
(a)

(e)



(b)

(f)



(c)

(g)

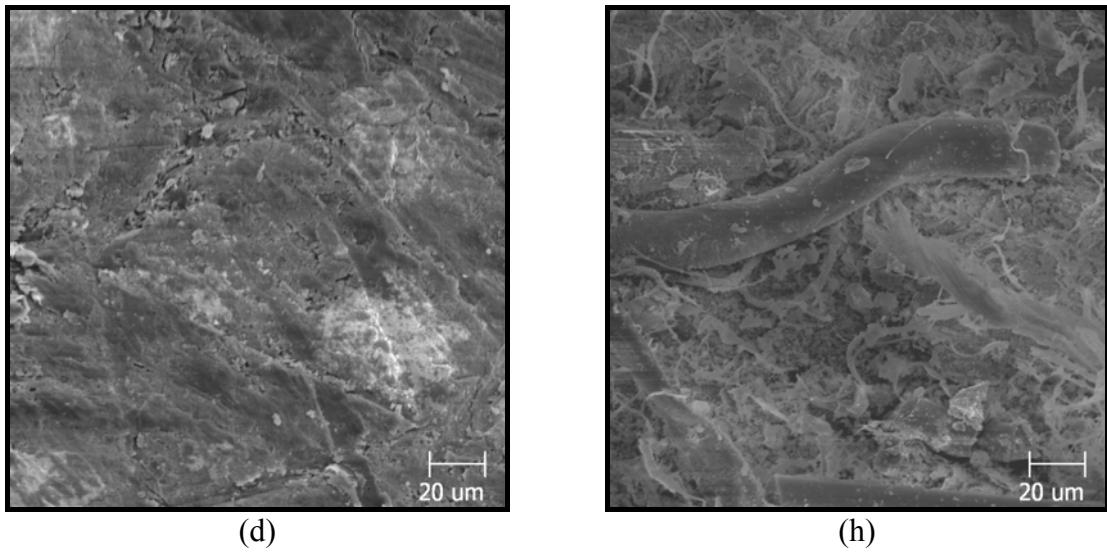


Figura 5.11: Aspecto típico de superfície das amostras produzidas laboratorialmente (Botões).

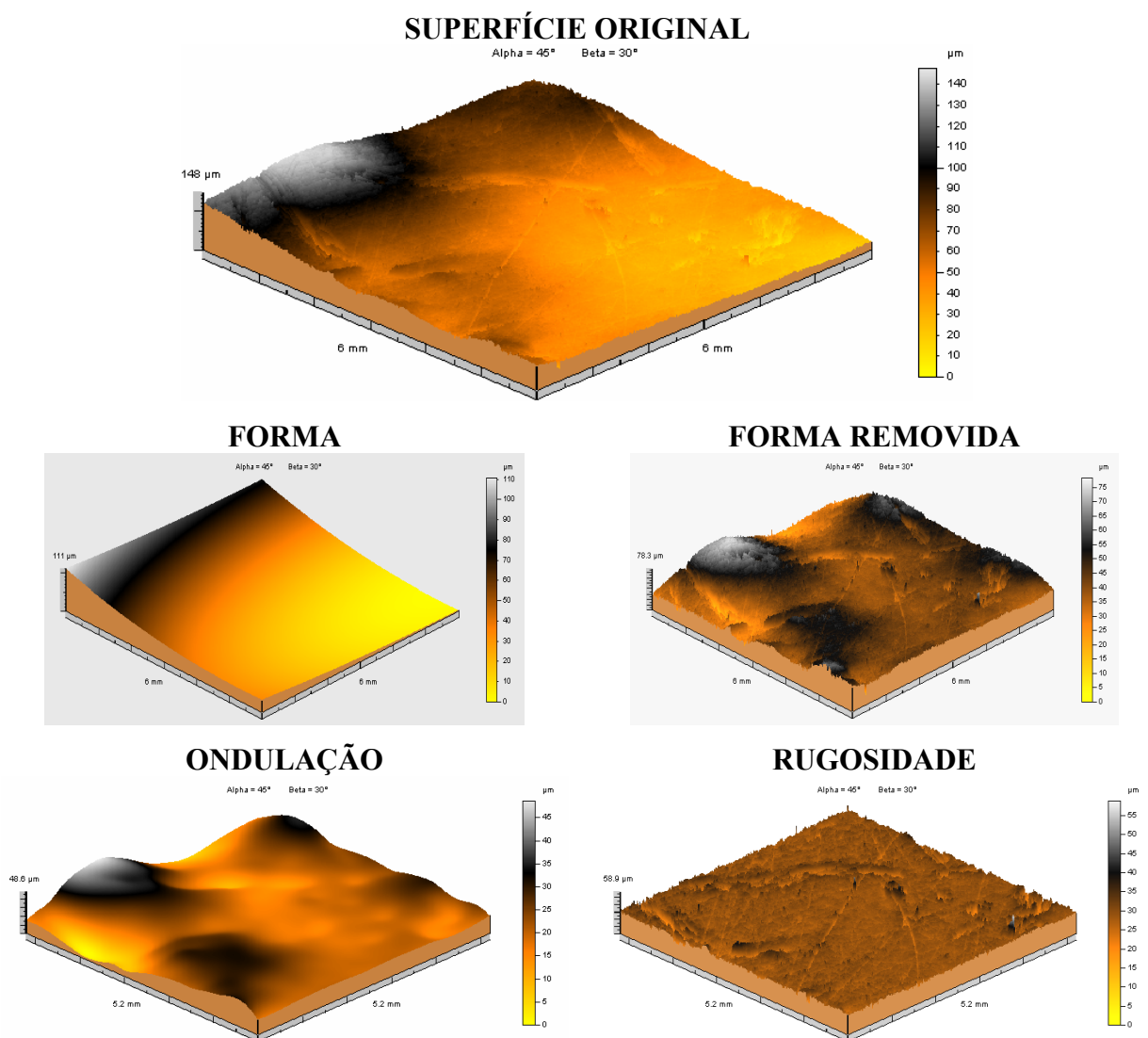


Figura 5.12: Componentes de uma superfície. Amostra DN-A2.

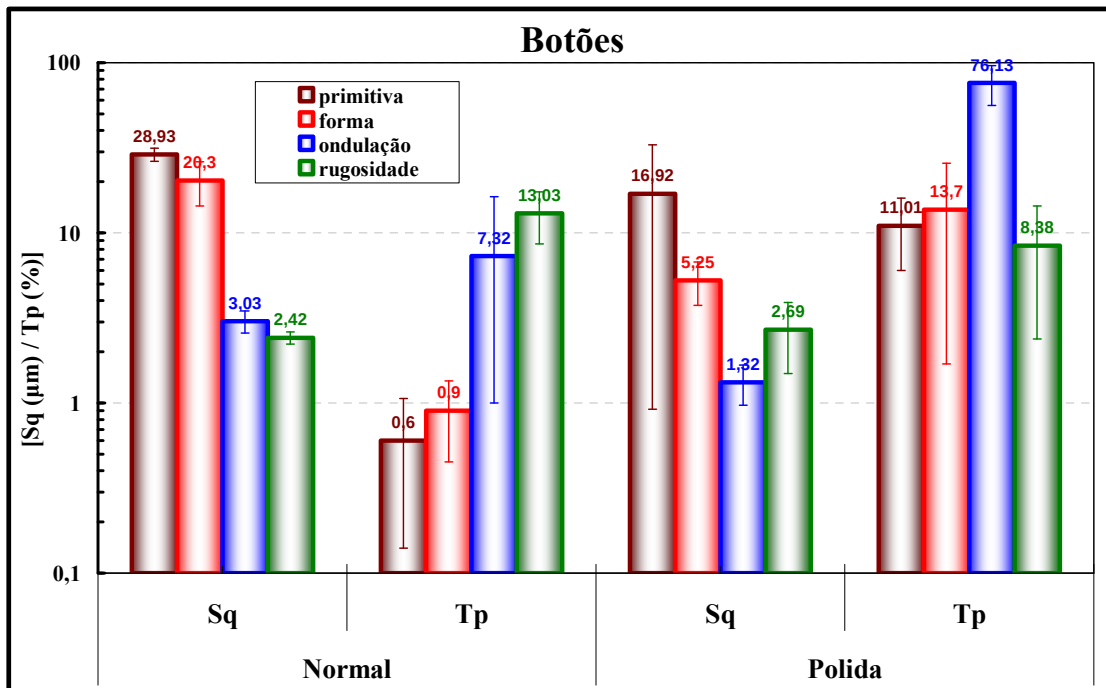


Figura 5.13: Componentes da topografia de superfície das amostras produzidas laboratorialmente.

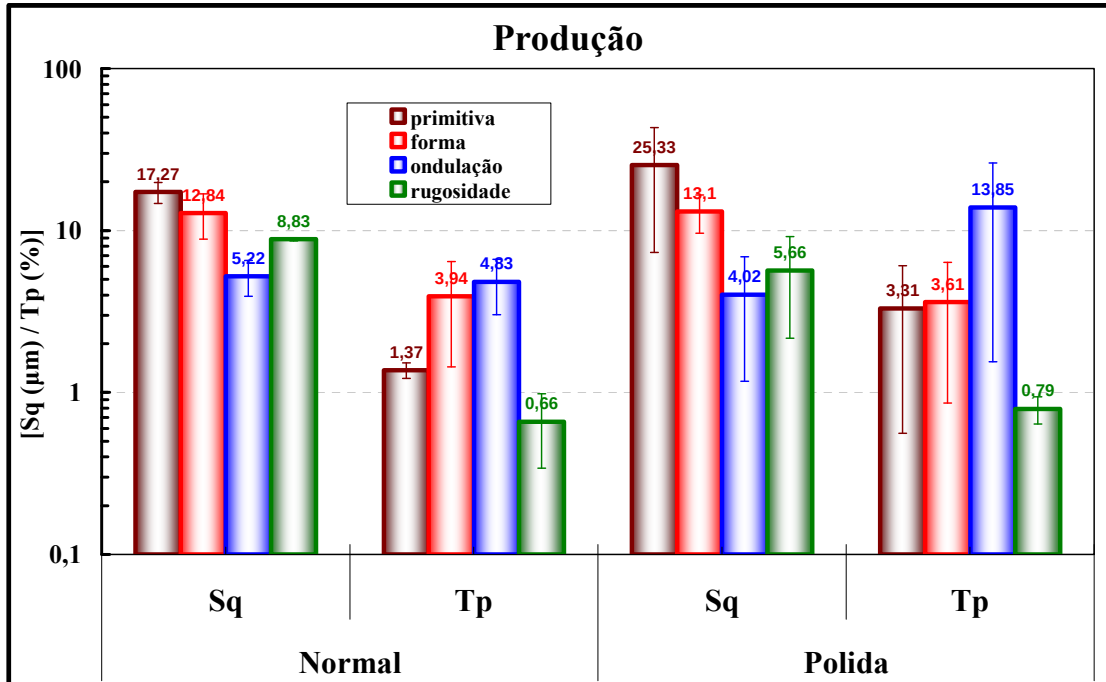


Figura 5.14: Componentes da topografia de superfície das amostras produzidas em série.

A figura 5.15 apresenta uma correlação entre os valores da topografia de superfície das amostras analisadas nas figuras 5.13 e 5.14. Por outro lado, pode-se constatar que as amostras produzidas laboratorialmente apresentam, após polimento, menor rugosidade

quadrática média e maior capacidade de suporte de carga. 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.

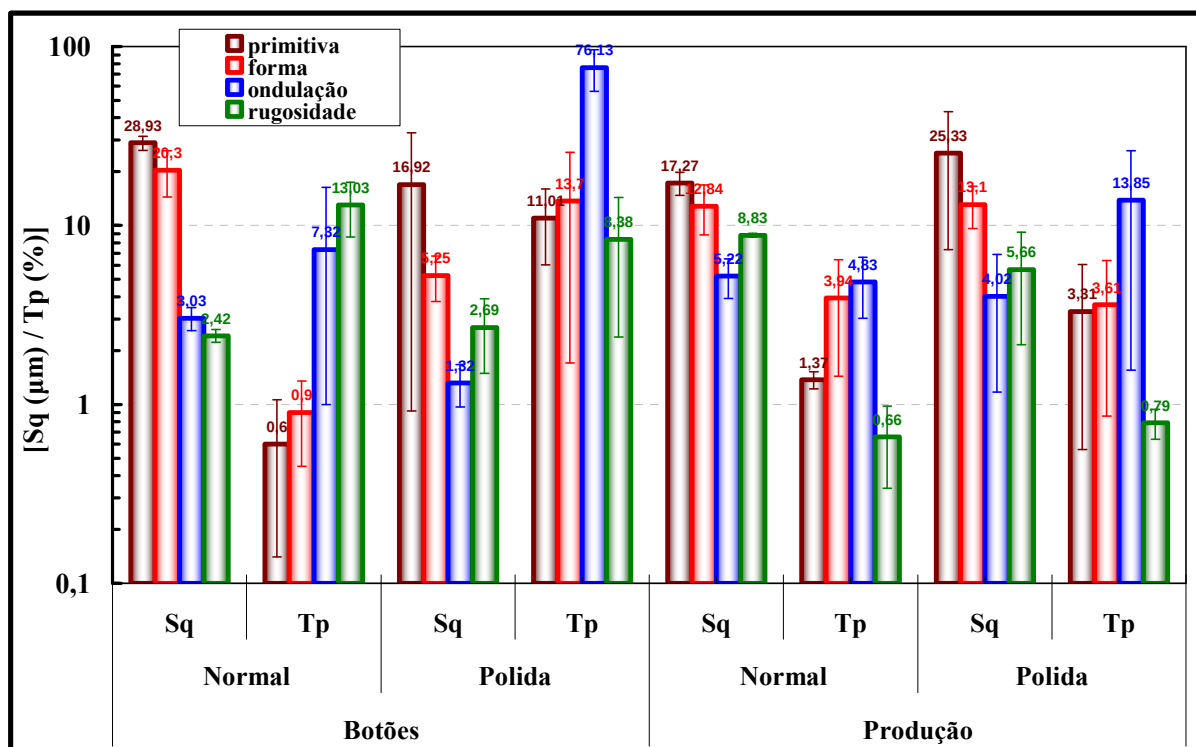


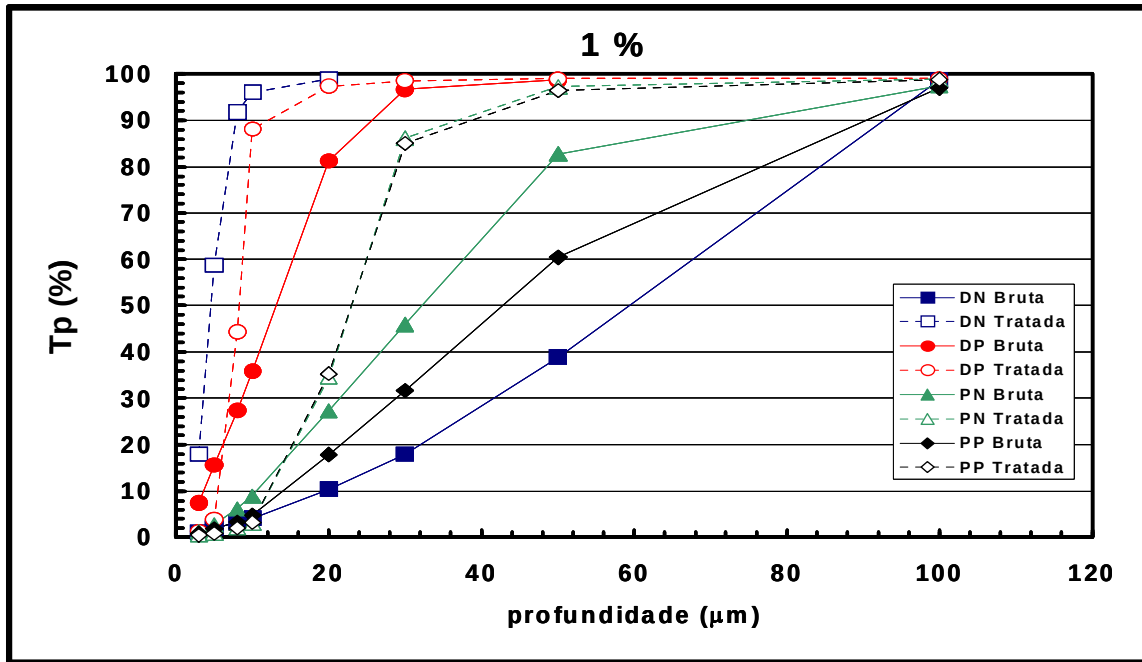
Figura 5.15: Componentes da topografia de superfície das amostras produzidas laboratorialmente e em série.

Como destacado anteriormente, a capacidade de apoio das superfícies, expresso pelo parâmetro Tp, tem apresentado valores significativamente baixos e não constantes para as superfícies estudadas.

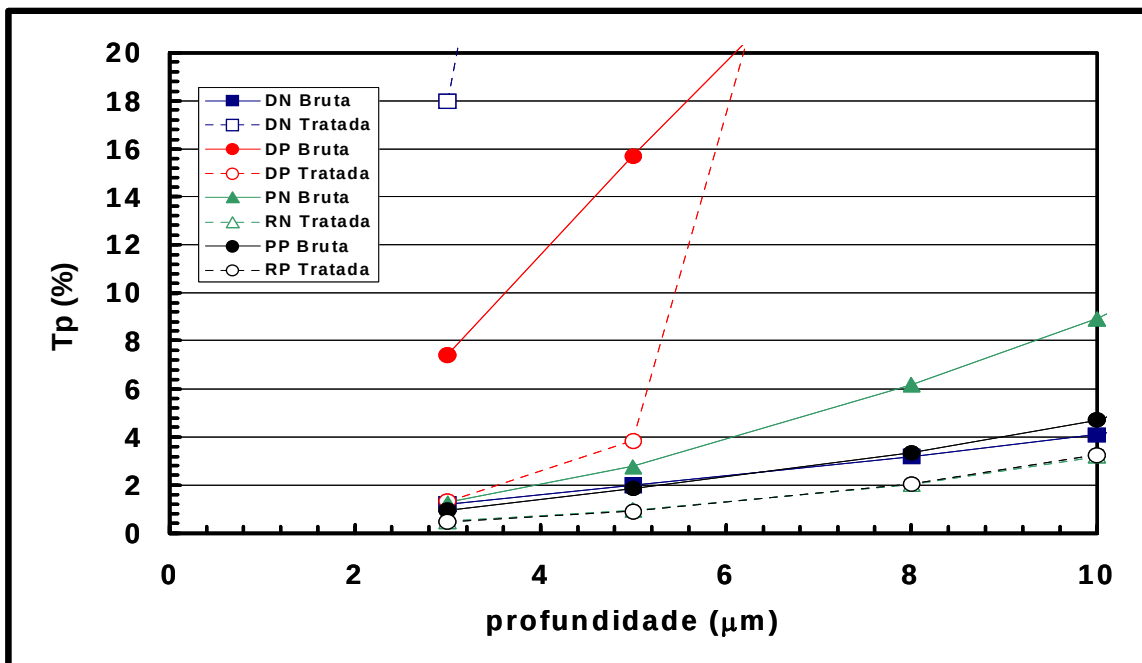
Em função disto, foram realizados vários experimentos procurando verificar o efeito dos parâmetros porcentagem inicial de apoio e a profundidade ativa na capacidade de apoio. Em particular, a profundidade da superfície ativa foi variada de 3 a 100 μm , com porcentagem de apoio inicial fixa em 1%. Numa 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 (DN, DP, PN, PP, veja tabela I) nas condições primitivas [brutas (sem tratamento estatístico)] e tratadas [componente rugosidade da superfície].

A figura 5.16 mostra o efeito da profundidade da superfície ativa nos valores de T_p .



(a)



(b)

Figura 5.16: Efeito da profundidade da superfície ativa nos valores da capacidade de apoio das superfícies. (a)- Geral. (b)- Detalhe.

Observa-se na figura 5.16-b que, 3 μm de profundidade, é um valor, a nosso ver, 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.

Finalmente, pode-se constatar que a porcentagem inicial de apoio não exerce influência significativa nos valores de T_p , como demonstrado na figura 5.17.

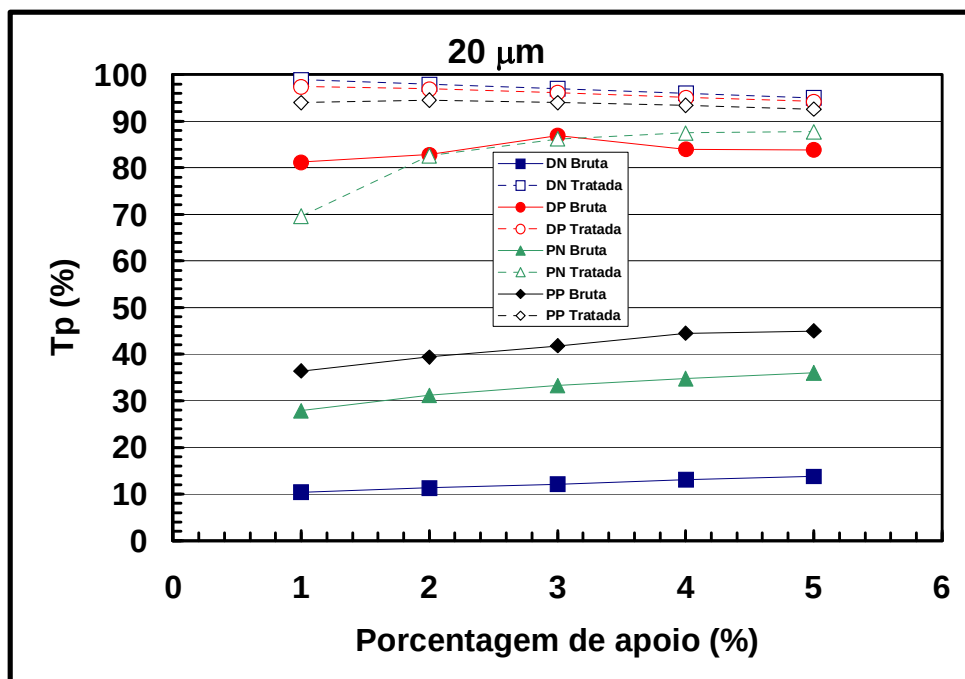


Figura 5.17: Efeito da porcentagem de apoio inicial na capacidade de apoio das superfícies.

Foi constatado que a porcentagem de apoio inicial não exerce influência significativa nos valores da T_p e que as superfícies tratadas estatisticamente apresentam valores de capacidade de apoio maior. Com isto, para determinar os valores dos parâmetros para calcular a T_p da placa de pressão, fixou-se o apoio inicial em 1%. Desta forma, foram realizados diversos cálculos variando-se a profundidade da superfície ativa de 3 a 5 μm , das superfícies tratadas e não tratadas estatisticamente, até que fossem encontrados os melhores parâmetros que pudessem ter uma melhor representatividade da capacidade de apoio da placa de pressão.

A figura 5.18 mostra o efeito da profundidade da superfície ativa nos valores da T_p da placa de pressão. Observa-se que o valor da capacidade de apoio aumenta quando a profundidade da superfície ativa é variada de 3 μm a 5 μm , tanto para a superfície primitiva, quanto para as superfícies tratadas estatisticamente.

Através do trabalho realizado visando estudar o efeito do polimento na topografia de superfície de revestimentos para embreagens, e dos diversos trabalhos preliminares realizados nas amostras laboratoriais da placa de pressão, ficou determinado que os parâmetros

topográficos (S_q e T_p) dos revestimentos seriam calculados na superfície primitiva. Sendo que, para T_p , a porcentagem inicial de apoio de 1% e a profundidade da superfície ativa fixada em 20 μm . Para as amostras da placa de pressão, os parâmetros topográficos serão calculados na componente rugosidade da superfície. Serão adotados 1% para a capacidade inicial de apoio e a profundidade da superfície ativa 4 μm para determinar o valor de T_p . A tabela 5.2 sintetiza esta análise.

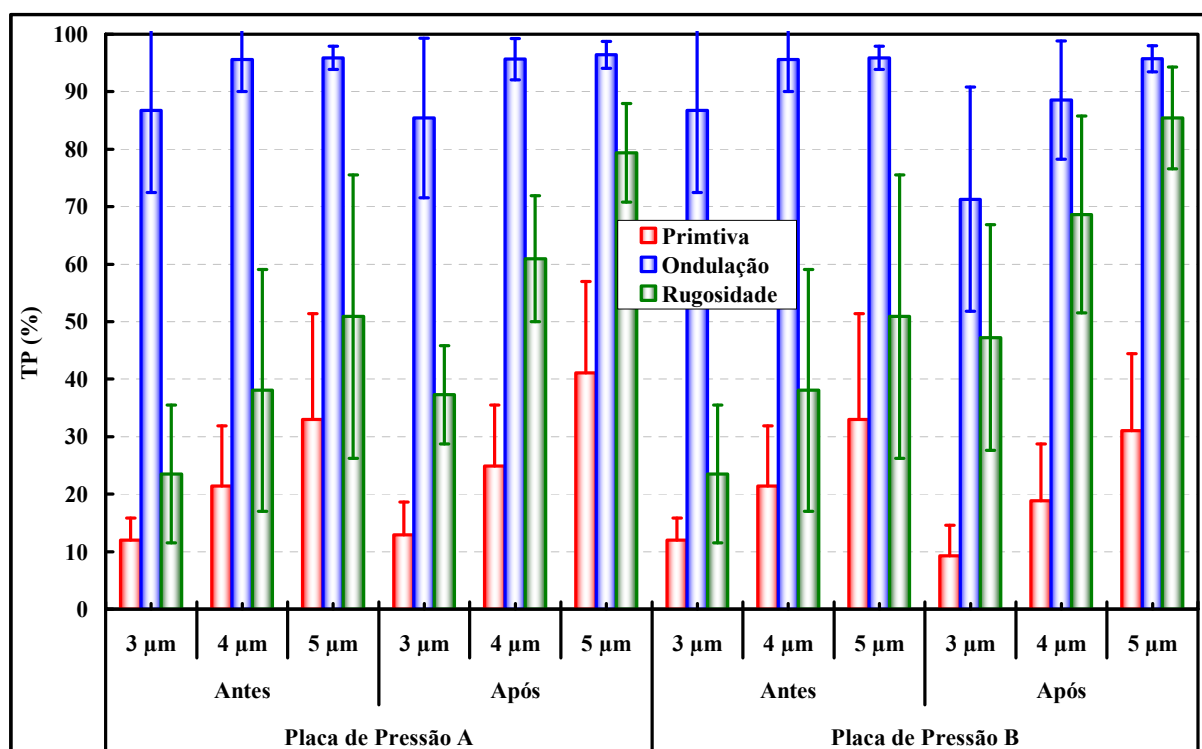


Figura 5.18: Capacidade de apoio da placa de pressão em função da variação da superfície ativa e das superfícies tratadas estatisticamente.

Tabela 5.2: Parâmetros para a caracterização topográfica das amostras de revestimento e placa de pressão.

CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA	REVESTIMENTO	PLACA DE PRESSÃO
SUPERFÍCIE	Primitiva	Rugosidade
APOIO INICIAL (%)	1	1
PROFUNDIDADE ATIVA (μm)	20	4

5.2 – Validação da Caracterização Topográfica

Como para os revestimentos a superfície não foi tratada estatisticamente para determinar os novos valores dos parâmetros topográficos, serão apresentados somente os valores da capacidade de apoio que foram calculados, devido à determinação de um novo valor da profundidade fixa ativa. Os valores da rugosidade quadrática média permanecem os mesmos apresentados na figura 5.2.

A figura 5.19 quantifica a capacidade de apoio da superfície dos revestimentos A e B.

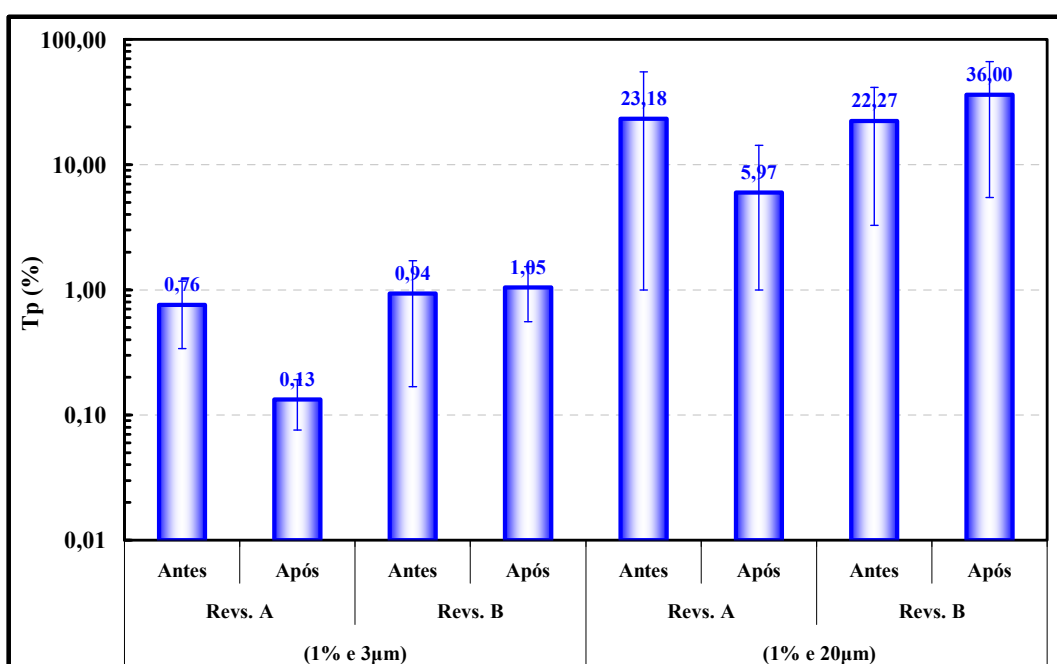
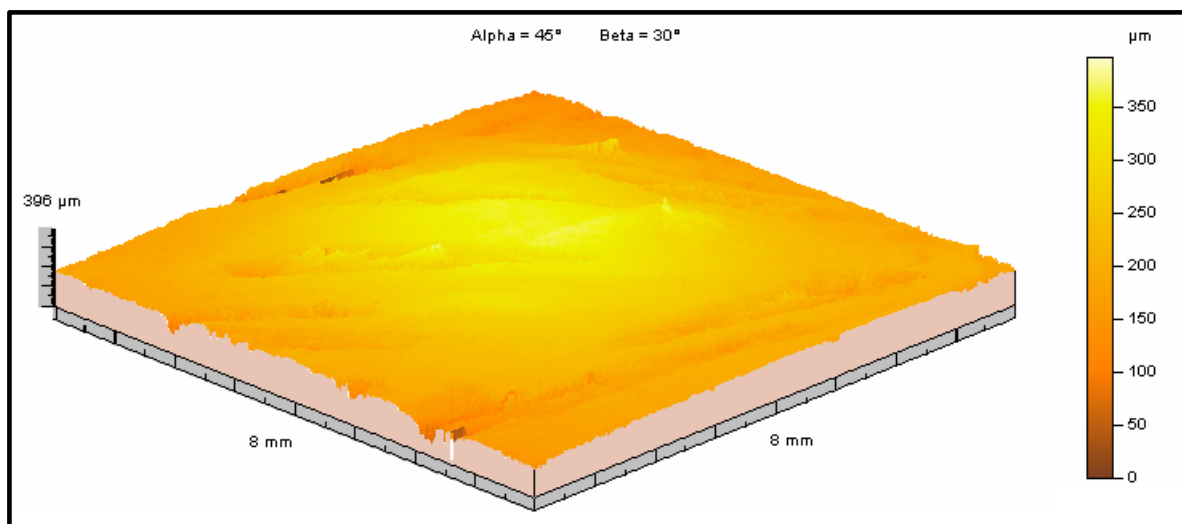


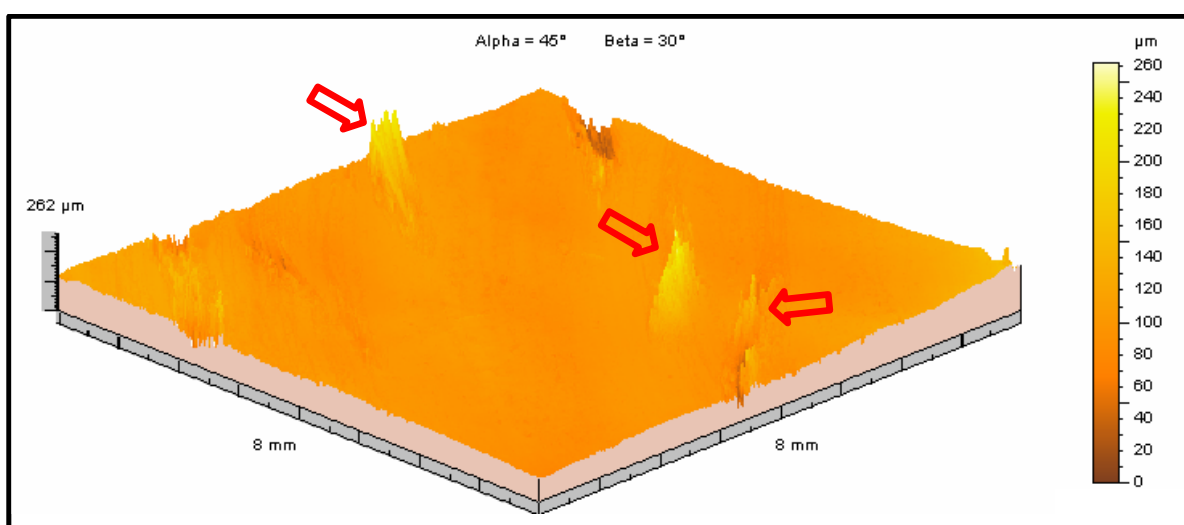
Figura 5.19: Novos valores da capacidade de apoio dos revestimentos A e B.

Observa-se na figura 5.19 que a capacidade de apoio inicial é muito superior para a profundidade ativa de 20 µm, tanto para o revestimento A quanto para o B. A figura 5.19 mostra também que, após o término do ensaio, a capacidade de apoio do revestimento B teve um acréscimo (cerca de 62%), para uma profundidade ativa de 20µm. Este valor era esperado, uma vez que já foi apresentado na figura 5.1 que, após o ensaio, a superfície do revestimento se torna mais planificada, devido ao desgaste que ocorre em função do ensaio tribológico. Por outro lado, o revestimento A para uma profundidade ativa de 20 µm a capacidade de apoio apresentou o mesmo comportamento após o término do ensaio quando a profundidade ativa era de 3µm, ou seja, a capacidade de apoio reduziu (cerca de 74% para a profundidade ativa de 20 µm). Com isto, acreditou-se que a complexidade da estrutura física dos revestimentos pudesse estar tendo uma forte influência nestes resultados. Então iniciou uma busca física na topografia da superfície do revestimento A que pudesse justificar estes resultados.

A figura 5.20 mostra uma topografia típica de superfície obtida via interferometria a laser de um revestimento A, antes e após ter sido submetido ao ensaio. Através da figura 5.20 nota-se, claramente que, após a realização do ensaio tribológico, a superfície do revestimento está mais lisa, planificada, mas pode-se observar também que há o aparecimento de imperfeições na topografia da superfície (setas vermelhas). Acredita-se que devido à severidade do ensaio, a sua ação causa a destruição nas fibras de reforço, fazendo com que as mesmas sejam arrancadas da matriz fenólica, ficando para fora e levantadas da forma como aparecem (setas vermelhas figura 5.20-b). Com isto, este efeito físico reduz o valor da capacidade de apoio do revestimento.



(a)



(b)

Figura 5.20: Topografia de superfície do revestimento A. (a)- antes da realização do ensaio tribológico; (b)- após a realização do ensaio tribológico.

Analisando os novos valores dos parâmetros topográficos da placa de pressão, notou-se que os parâmetros calculados na superfície rugosidade apresentaram uma redução da rugosidade quadrática média (cerca de 22% para o revestimento A e 21% para o B) e um aumento na capacidade de apoio (cerca de 153% para o revestimento A e 105% para o B) em relação aos parâmetros topográficos calculados na superfície primitiva, como pode ser comprovado pela figura 5.21. A figura mostra, também, que após a realização dos ensaios laboratoriais a rugosidade quadrática média diminuiu e que a capacidade de apoio aumentou, tanto para o revestimento A quanto para o B. Comportamento este já esperado, conforme já foi discutido anteriormente.

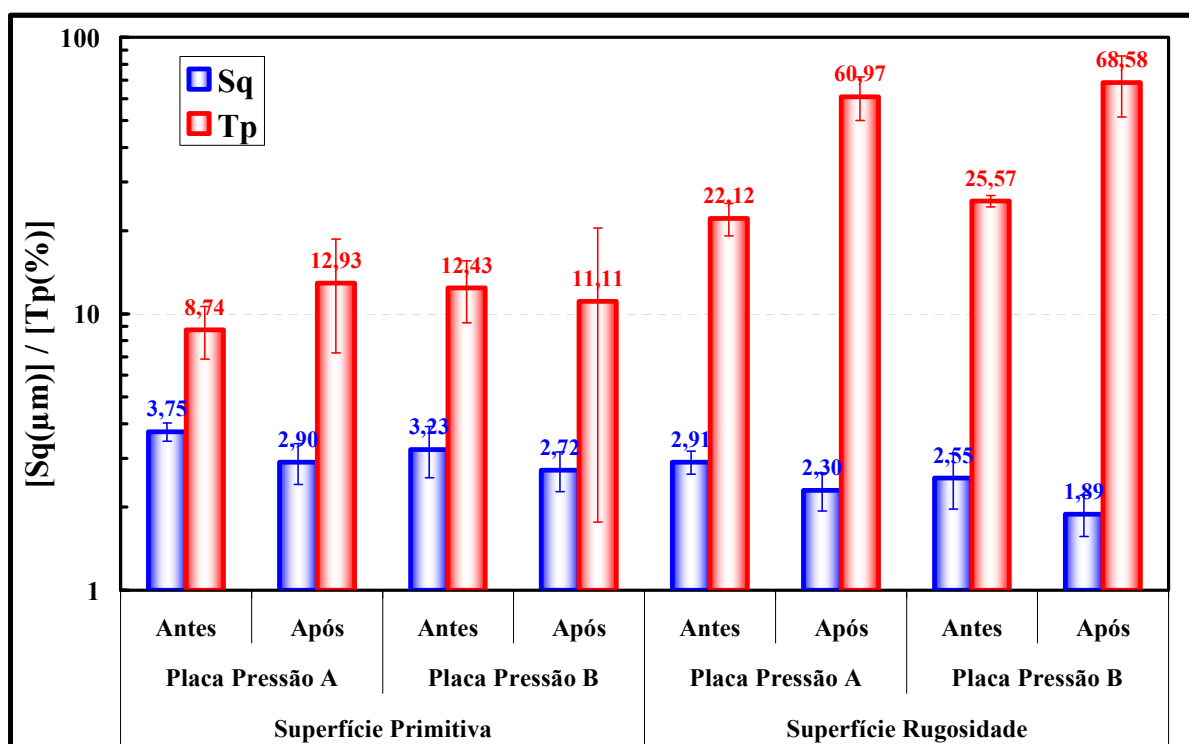


Figura 5.21: Correlação entre os valores dos parâmetros topográficos da placa de pressão na superfície primitiva e na componente rugosidade.

CAPÍTULO VI

PRÉ-CONDICIONAMENTO SUPERFICIAL

Os resultados dos ensaios tribológicos realizados no desenvolvimento da metodologia mostraram uma grande influência da natureza da topografia da superfície dos revestimentos no comportamento da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito. Os resultados mostraram também que o transiente inicial apresentado pelo comportamento tribológico (coeficiente de atrito e desgaste) está aparentemente associado ao condicionamento inicial da topografia de superfície, indicando grande potencialidade de otimização do sistema de embreagem, através do pré-condicionamento inicial da topografia de superfície do revestimento.

Deste modo, optou-se pela produção de amostras de revestimento com a topografia de superfície pré-condicionada, objetivando assim, eliminar a fase de regime transiente inicial da taxa de desgaste, conforme foi apresentado nos resultados dos testes preliminares. Eliminando esta fase de regime transiente inicial, busca-se obter revestimentos que apresentem menor taxa de desgaste e que possam proporcionar uma maior estabilidade do coeficiente do atrito. Obtendo-se menor taxa de desgaste do revestimento, espera-se que, conseqüentemente, aumente sua vida útil. Com o atrito mais estabilizado, por sua vez, será aumentada a eficiência do sistema de embreagem.

6.1 – Estudos Preliminares

Preliminarmente foi avaliado o efeito do pré-condicionamento na topografia de superfície, em termos de qualidade superficial. Para tal, amostras de revestimento A, que são utilizadas para a realização dos ensaios no tribômetro, foram lixadas no equipamento lixadeira Struers Knuth Rotor, nas lixas abrasivas de Sic de granulometria #80, #260 e #600. Neste processo de lixamento preliminares não houve um controle do tempo de lixamento. A força normal foi aplicada manualmente, procurando manter sempre a mesma pressão de contato.

Após o lixamento foram feitas análises topográficas via interferometria a laser. As áreas de varredura foram 8 x 8 mm, e a densidade de pontos de 1000 (x) x 50 (y) respectivamente.

A figura 6.1 apresenta os resultados dos parâmetros topográficos [rugosidade quadrática média (Sq) e capacidade de apoio (Tp)]. Comparando os valores das amostras que foram lixadas, com os valores de uma superfície virgem, observa-se que, após o lixamento houve uma redução na rugosidade quadrática média. Quando se observa o valor da Tp, nota-se que na lixa #80, a Tp diminuiu. Por outro lado, nas lixas #260 e #600, a Tp aumentou. A figura 6.1 mostra também que a amostra lixada na lixa #600 apresenta uma melhor qualidade topográfica, pois apresentou o menor valor da Sq e o maior valor da Tp. Para esta amostra, a rugosidade quadrática média teve uma redução de aproximadamente 600%, e o valor da Tp teve um acréscimo de aproximadamente 313%, em relação à superfície virgem.

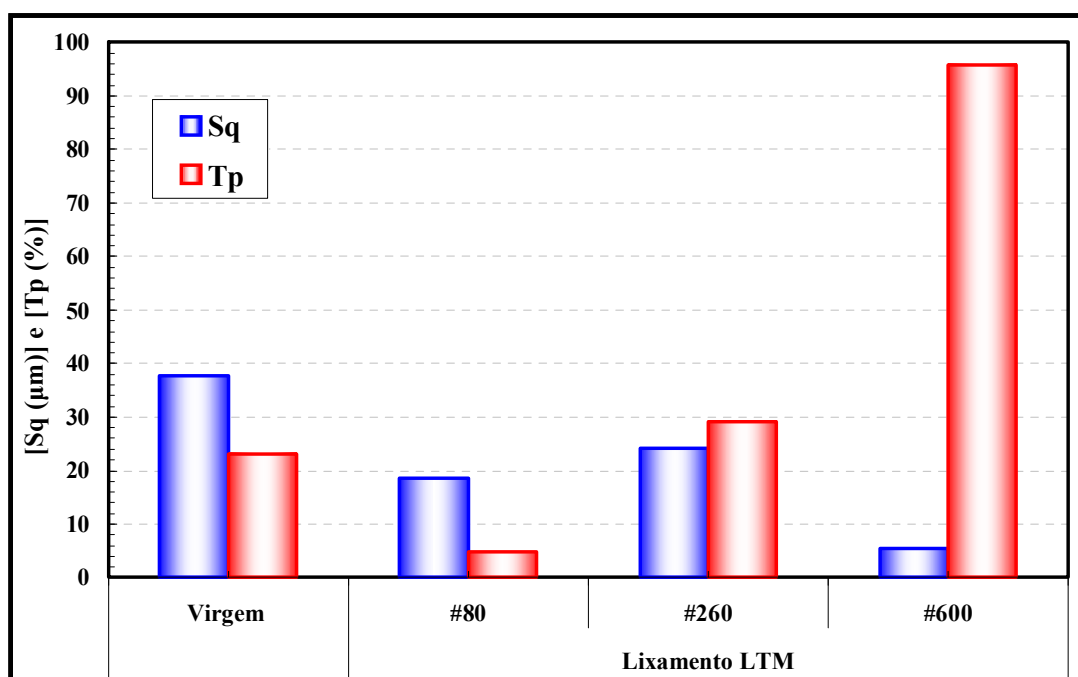


Figura 6.1: Parâmetros topográficos das amostras revestimento A após terem sido lixadas laboratorialmente.

Através da análise dos resultados deste trabalho preliminar, concluiu-se que o pré-condicionamento superficial obtido com o lixamento da superfície do revestimento, teve um efeito positivo no ganho da qualidade superficial. Em função disso, um novo trabalho foi desenvolvido no LTM, com a finalidade de estudar o efeito do pré-condicionamento superficial, no comportamento tribológico do conjunto embreagens quando submetidos a ensaios no tribômetro.

Para tal, dois tipos de revestimentos, A e D, foram condicionados em diferentes processos e condições, de forma a produzir amostras com diferentes qualidades superficiais. Os discos de revestimento foram pré-condicionados na fábrica através da retificação. Este processo foi realizado pela empresa ZF_Sachs do Brasil e neste trabalho será denominado de retificação industrial. Amostras de revestimento também foram pré-condicionadas laboratorialmente, no LTM, processo denominado de lixamento laboratorial.

6.2 – Pré-Condicionamento Industrial (Retificação ZF-SACHS)

A princípio, para avaliar preliminarmente a influência das diferentes condições de retificação industrial na topografia de superfície, foram caracterizados topograficamente somente discos de revestimentos do tipo D. Os discos de revestimento foram fornecidos em sete diferentes condições de retificação. Como o processo foi realizado pela empresa ZF_Sachs do Brasil, a mesma não forneceu os detalhes das condições de retificação.

Foram retiradas amostras dos discos de revestimento com dimensões de 3,5 x 3,5 cm (figura 6.2) para a realização do processo de caracterização topográfica, via interferometria a laser. As dimensões das áreas de varredura foram 15 x 15 mm. Foram utilizadas resoluções de 500 x 15 pontos por mm no eixo X e Y, respectivamente. A densidade de pontos determina a quantidade de pontos por unidade de comprimento. Uma maior quantidade de pontos aumenta a precisão da leitura. Contudo, o tempo de medição e o tamanho dos arquivos gerados aumentam enormemente. Para a realização das avaliações da topografia das amostras pré-condicionadas, estes e outros parâmetros foram otimizados.



Figura 6.2: Amostra de revestimento tipo D utilizada para a caracterização topográfica na condição de retificação industrial.

As figuras 6.3-a a 6.3-g mostram a topografia típica obtida por interferometria a laser de revestimentos D que foram retificados nas sete diferentes condições. Nota-se que todas as amostras apresentam características topográficas bastante semelhantes.

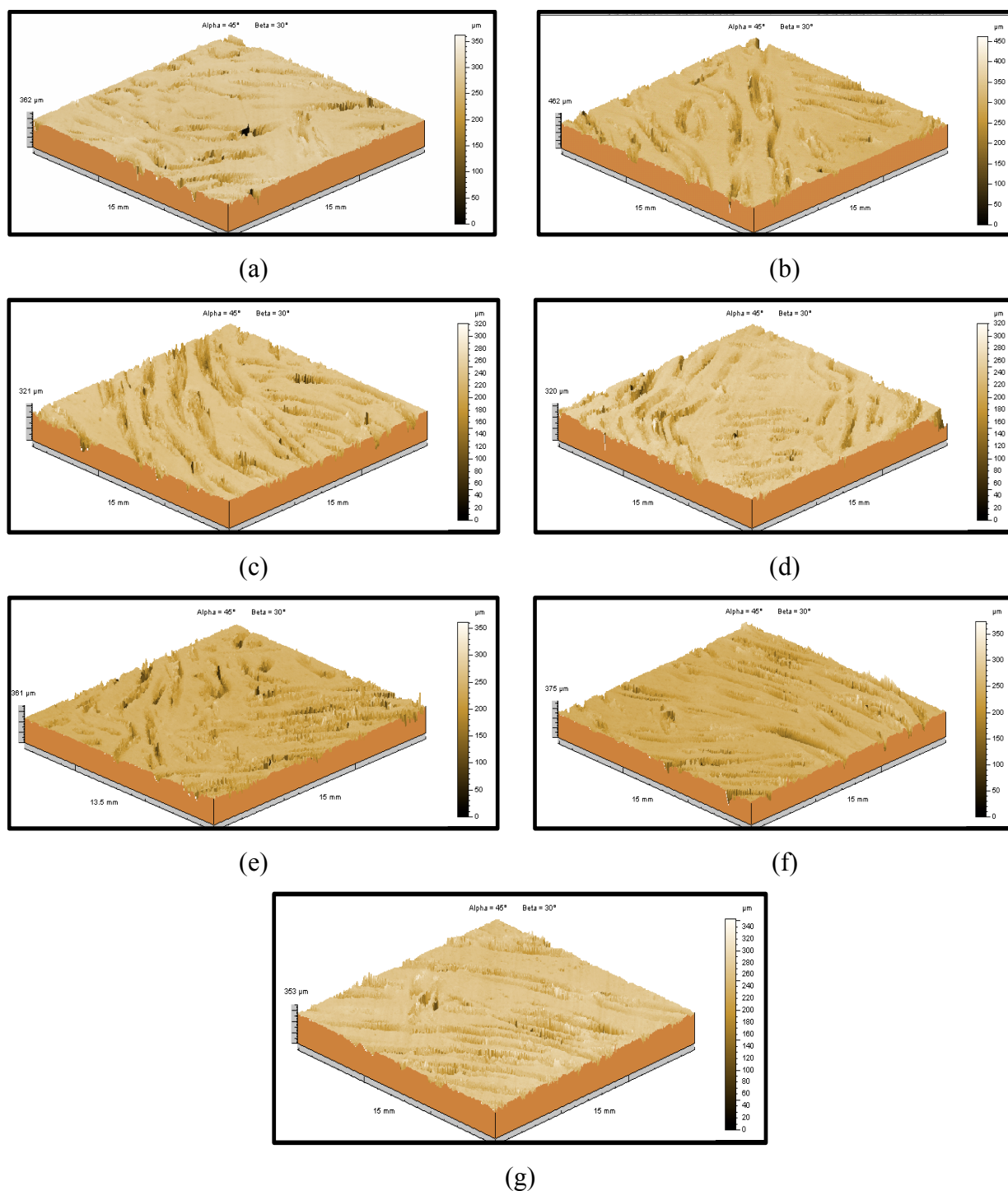


Figura 6.3: Topografias de superfície de amostras de revestimento do tipo D retificadas industrialmente: (a)- retificação 1; (b)- retificação 2; (c)- retificação 3; (d)- retificação 4; (e)- retificação 5; (f)- retificação 6; (g)- retificação 7.

A figura 6.4 mostra os valores dos parâmetros topográficos Sq e Tp dos revestimentos retificados. Analisando os resultados, concluiu-se que, de fato, os diferentes processos de retificação produziram para o mesmo tipo de revestimento, topografias de superfície semelhantes, pois apresentam valores de Sq e Tp, estatisticamente, iguais.

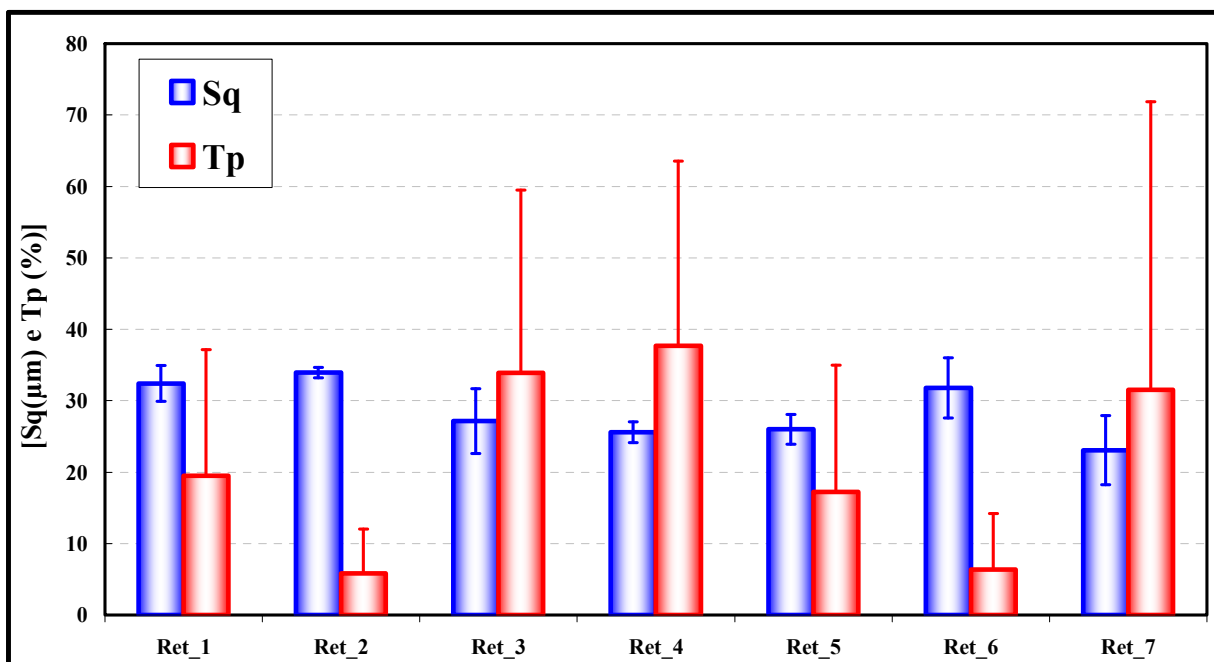


Figura 6.4: Parâmetros topográficos de revestimentos D retificados industrialmente.

Para classificar as condições de retificação em termos de melhor e pior, foi adotado o valor da média nominal de Sq e Tp, como critério de classificação. Desta forma, foram consideradas as condições de retificação três, quatro e sete, como as melhores, por apresentarem menores valores de média nominal da rugosidade quadrática média e maiores valores de média nominais da capacidade de apoio. Dentre essas três condições de retificação, a condição quatro foi a melhor, por apresentar um dos menores valores de média nominal da Sq (25,57 μm), e o maior valor da média nominal da Tp (37,67 %). Por outro lado, a condição dois foi a pior, por apresentar o maior valor da média nominal da Sq (33,93 μm) e o menor valor de média nominal da Tp (5,83 %).

Através desta avaliação topográfica, foram adotadas as condições dois e quatro para o estudo do efeito do pré-condicionamento industrial no comportamento tribológico. Como foi visto no ciclo de manufatura, as embreagens passam por um processo de retificação, e este processo foi adotado neste trabalho como condição de retificação normal. Foi também estabelecido este processo de pré-condicionamento industrial, para ser utilizado como referência.

Novos revestimentos do tipo D e desta vez revestimentos do tipo A foram retificados.

A figura 6.5 apresenta os valores dos parâmetros topográficos dos revestimentos A e D que foram retificados nas condições normal, dois e quatro. A figura 6.5 mostra que os revestimentos A e D apresentam valores da Sq e Tp, estatisticamente, iguais. A figura 6.5 mostra também que, para o revestimento A, a condição de retificação 2 foi a melhor, por apresentar a maior média nominal da Tp. Para o revestimento D, a condição 4 foi a melhor, por apresentar a maior média nominal da Tp. Observa-se mais uma vez que, para o revestimento D, a condição de retificação 2 foi a pior, por apresentar o maior valor de média nominal da Sq e o menor da Tp.

Estes resultados mostram que as condições de retificação são de caráter sistêmico, ou seja, para diferentes tipos de revestimentos submetidos às mesmas condições de retificação, a qualidade topográfica irá depender da natureza do material.

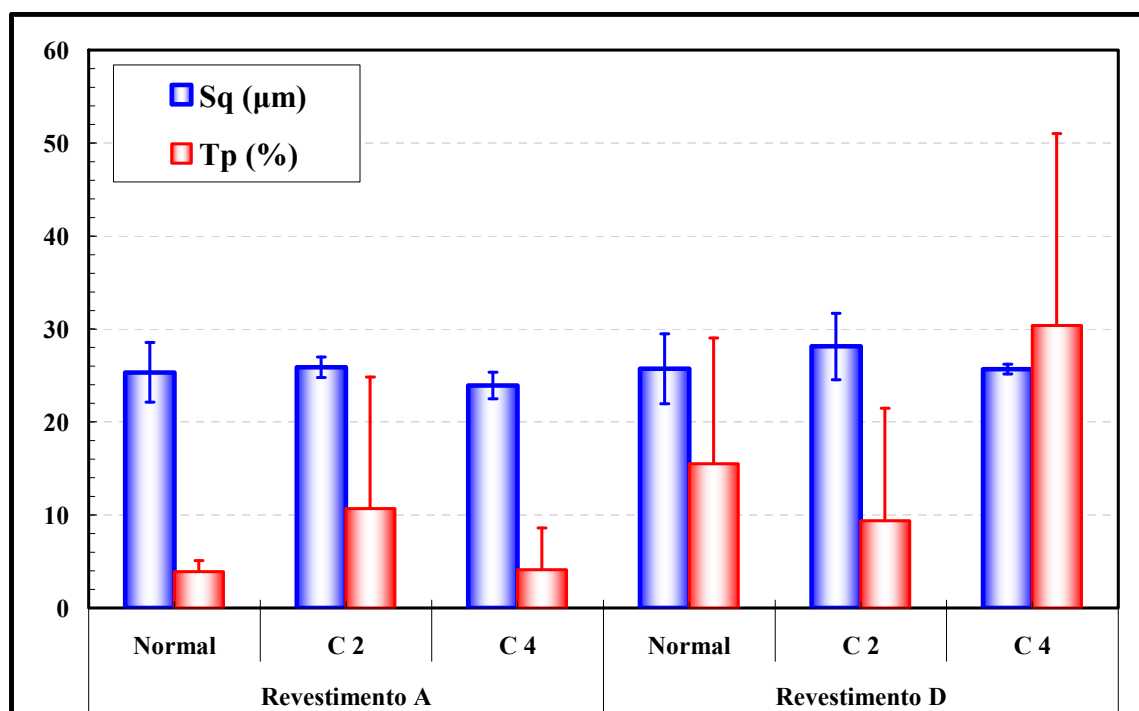


Figura 6.5: Correlação entre os parâmetros topográficos dos revestimentos A e D retificados nas condições C2, C4 e Normal.

6.2.1 – Ensaios Laboratoriais

Após a etapa de caracterização topográfica, as amostras de revestimento A e D foram confeccionadas para a realização de ensaios laboratoriais para avaliar a influência da retificação industrial no comportamento da taxa de desgaste e coeficiente de atrito dos revestimentos. As amostras de revestimentos tiveram as mesmas dimensões das amostras

utilizadas anteriormente. A tabela 6.1 apresenta os parâmetros para a realização dos ensaios laboratoriais.

Tabela 6.1 – Parâmetros laboratoriais utilizados nos ensaios tribológicos.

PARÂMETROS	VALORES
Velocidade de rotação (RPM)	750
Força Normal (N)	200
Tempo de Teste (h)	5 ensaios de 1 hora cada
Raio (mm)	27

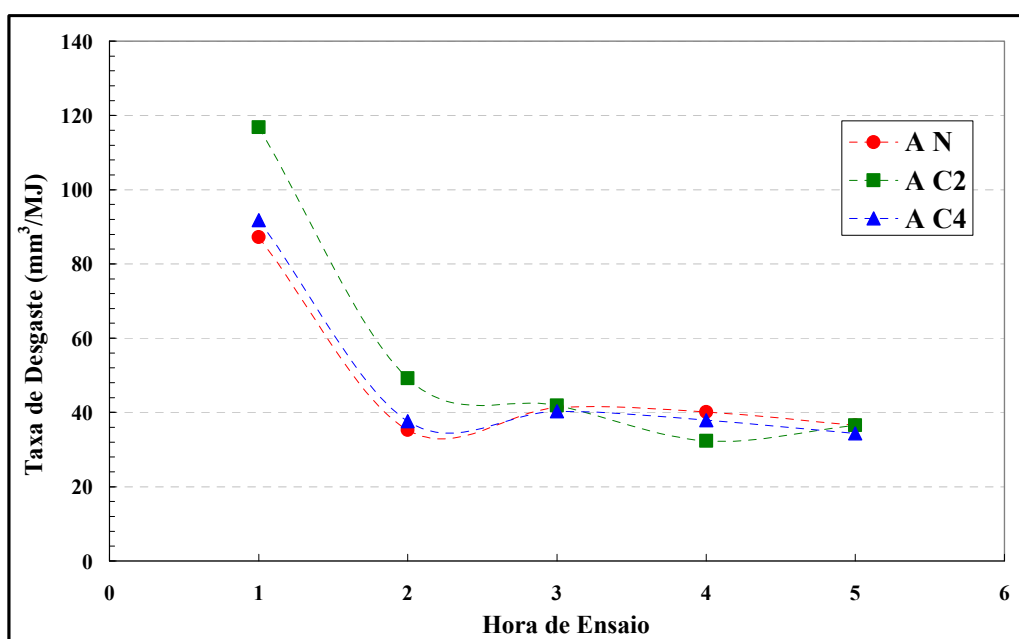
A figura 6.6 apresenta a taxa de desgaste dos conjuntos A e D respectivamente, cujos revestimentos foram retificados nas condições dois, quatro e normal. Na figura 6.6-a, pode-se observar, a princípio, que a retificação industrial não teve um efeito positivo em termos de melhoria da taxa de desgaste para o conjunto A. Observa-se que a taxa de desgaste do conjunto A, é maior nas primeiras horas de ensaio, tendendo a estabilizar a partir da terceira hora. Este comportamento foi observado para os três diferentes processos de retificação. Com o processo de retificação esperava-se que o regime transiente inicial da taxa de desgaste do conjunto fosse eliminado, o que de fato não aconteceu. Com isso concluiu-se, a princípio, que os processos de retificações industriais adotados não exerceram um efeito positivo, em termos de melhoria da taxa de desgaste do conjunto A.

Analisando a figura 6.6-b, observa-se que o comportamento da taxa de desgaste do conjunto D é um pouco diferente em relação ao apresentado pelo conjunto A. A figura 6.6-b mostra, a princípio, que a taxa de desgaste do conjunto D, retificado na condição dois, foi a maior, comparada às outras condições de retificação. Este comportamento pode ser justificado, pois conforme foi apresentado, a condição de retificação dois foi a pior. Observa-se que a taxa de desgaste do conjunto retificado na condição dois foi maior nas primeiras horas de ensaio, tendendo a estabilização a partir da terceira hora.

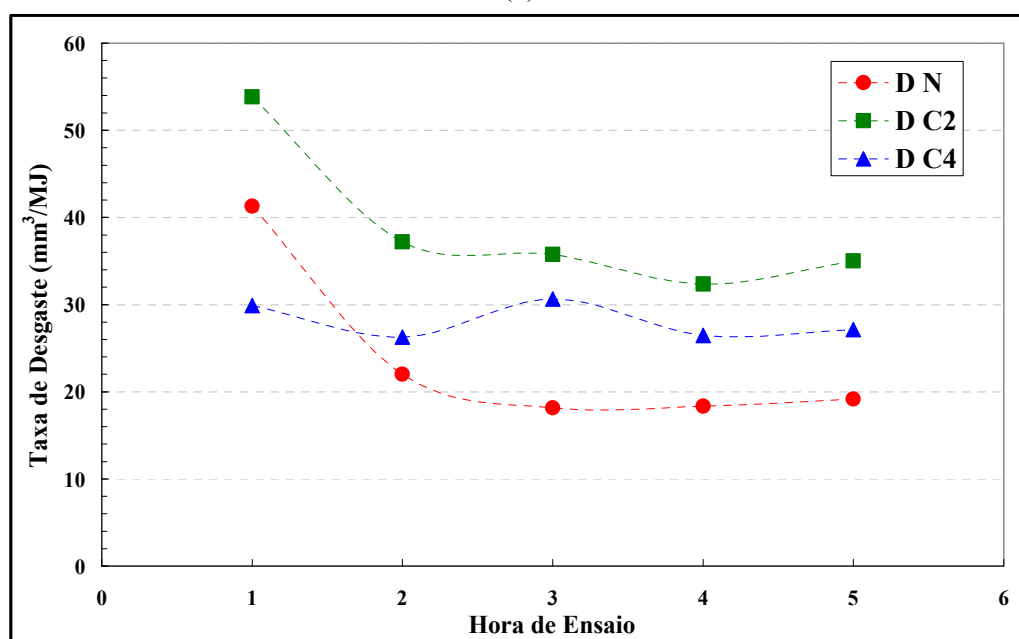
Quando se observa a taxa de desgaste do conjunto retificado na condição quatro, pode-se ver que o regime transiente da taxa de desgaste foi eliminado, condição esta buscada com o processo de retificação. Em longo prazo, no entanto, este efeito não foi benéfico, pois, observa-se na figura 6.6-b, que o conjunto normal apresenta menor taxa de desgaste no regime permanente em relação ao conjunto retificado na condição quatro, apesar do conjunto normal ter apresentado maior taxa de desgaste no regime transiente.

Através desta análise, concluiu-se, a princípio, que o processo de retificação na condição quatro para o conjunto D, eliminou o regime transiente da taxa de desgaste, mas em longo prazo, este processo não foi benéfico.

As conclusões aqui abordadas são conclusões baseadas nos resultados obtidos com apenas um único ensaio tribológico para cada condição de retificação, ou seja, é necessária a realização de um número maior de ensaios para se ter conclusões mais enfáticas.



(a)



(b)

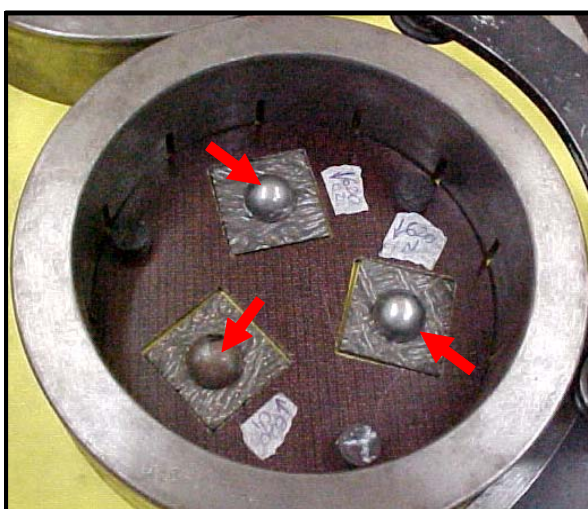
Figura 6.6: Comportamento da taxa de desgaste dos conjuntos A e D que tiveram os revestimentos retificados em diferentes processos de retificação industrial.

6.3 – Pré-Condicionamento Laboratorial (Lixamento LTM)

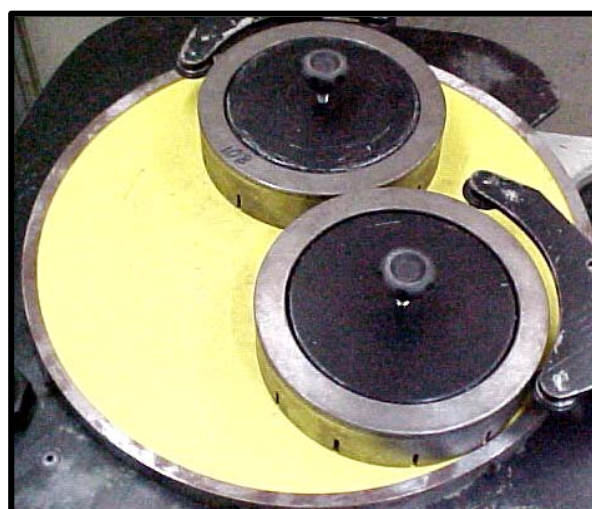
Para a realização do processo de pré-condicionamento laboratorial, foi utilizada uma lapidadora LAPMASTER Modelo 15" (figura 6.7-a), pertencente ao LTM. Este equipamento é uma lapidadora de precisão, que pode produzir superfícies planas menores que uma banda de luz (0,0000116"), cujo acabamento é medido em micrômetros. Este equipamento é dotado de um prato de lapidação de 15", e três anéis posicionadores que comportam as amostras a serem lapidadas. Geralmente o processo de lapidação é realizado utilizando um fluido.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.7: (a)- Lapidadora LAPMASTER Modelo 15" utilizada para a realização do pré-condicionamento laboratorial da superfície dos revestimentos: (b) e (c)– detalhes.

Para realizar o processo de lixamento laboratorial utilizando este equipamento, algumas adaptações tiveram que ser feitas. O prato de lapidação teve sua superfície protegida com um plástico, para evitar possíveis danos à superfície. Foi especialmente fabricado um anel (seta vermelha figura 6.7-a) para fixar a lixa abrasiva ao prato de lapidação.

As amostras com dimensões 3,5 x 3,5 cm, são acomodadas dentro dos anéis posicionadores. Dentro destes, é colocado um disco fabricado em celeron com três furos quadrados defasados de 120° e com dimensões de 3,7 x 3,7 cm (figura 6.7-b) para guiar as amostras e garantir que as amostras fiquem em posição equidistante em relação ao centro do disco e em relação uma as outras. Os anéis com as amostras são posicionados sobre a superfície do prato de lapidação. Um peso morto de 3,2 Kg atua sobre três meia-esferas (setas vermelhas figura 6.7-b) que estão diretamente sobre a superfície de cada amostra dentro do anel posicionador. Dessa forma, a carga normal é uniformemente distribuída sobre as amostras durante o movimento. O movimento do prato de lapidação é dado através de um motor elétrico que gira a uma rotação fixa de 350 rpm. O movimento do prato de lapidação faz com que os anéis posicionadores girem em torno do próprio eixo e isto, simultaneamente, faz com que as amostras também girem em torno do próprio eixo.

Para a realização do lixamento, lixas abrasivas com granulometria #180, #320 e #400 foram especialmente fabricadas pela empresa Saint-Gobain Abrasives, com dimensões de 40 x 40 cm, para atender às especificações e adaptações feitas no equipamento.

Neste trabalho, foram utilizados dois anéis posicionadores (figura 6.7-c), totalizando uma produção de 6 amostras por processo de lixamento laboratorial. Inicialmente foram realizados vários lixamentos preliminares para definir alguns parâmetros, tais como a carga a ser utilizada no processo de lixamento e a verificação do tempo de estabilização da perda de massa do revestimento, que foi adotada como critério para estabelecer o tempo do processo de pré-condicionamento laboratorial.

Para cada lixa abrasiva, foi feita uma série de 10 ensaios interrompidos. Cada ensaio teve a duração de um minuto. Entre o tempo de parada de cada ensaio, as amostras foram limpas com o auxílio de um jato de ar comprimido e pesadas para a quantificação do desgaste através da perda de massa. As lixas abrasivas também foram limpas com o auxílio de um jato de ar comprimido a cada interrupção dos ensaios.

O tempo estabelecido para o processo de pré-condicionamento laboratorial foi o tempo em que a perda de massa encontra-se em regime permanente, conforme mostra a figura 6.8.

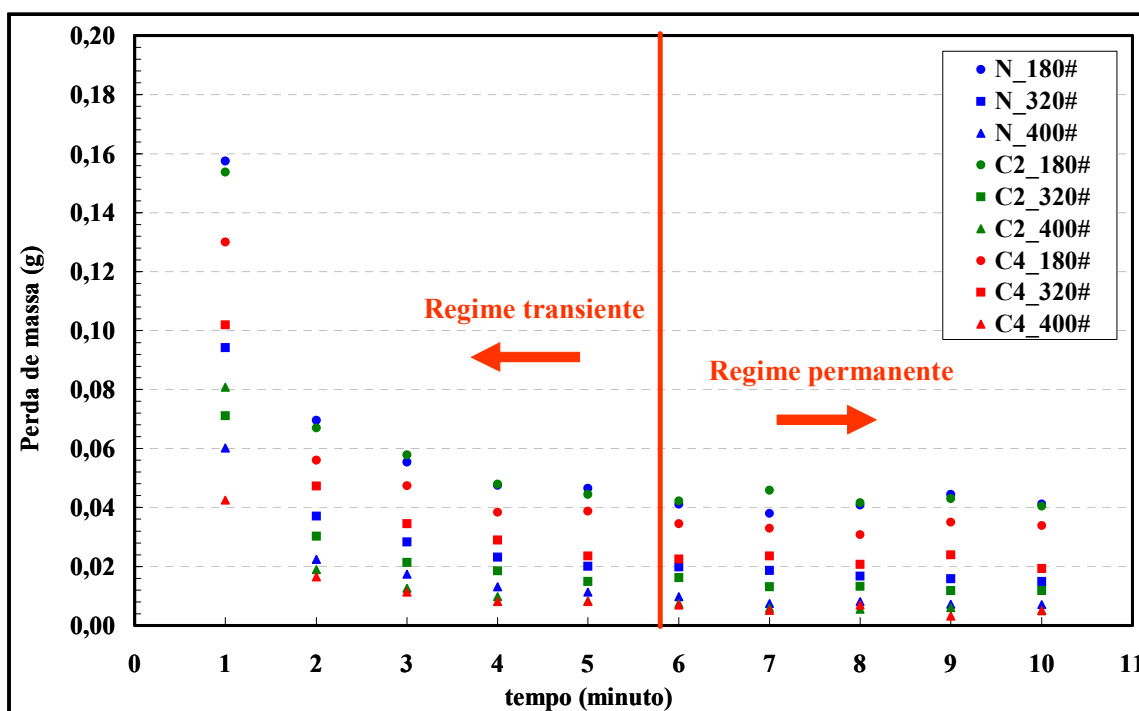


Figura 6.8: Gráfico da perda de massa do revestimento D para determinar o tempo do pré-condicionamento laboratorial.

Como pode ser visto na figura 6.8, a perda de massa do revestimento encontra-se em regime transiente até o sexto minuto de lixamento. A partir deste tempo, a perda de massa entra em regime permanente. Com esta análise, foi estabelecido o tempo de seis minutos para a realização do pré-condicionamento laboratorial dos revestimentos A e D. O comportamento da perda de massa do revestimento A foi similar ao comportamento apresentado para o revestimento D.

A figura 6.9 apresenta a topografia de superfície de algumas amostras de revestimento, após terem sido submetidas ao processo de lixamento.

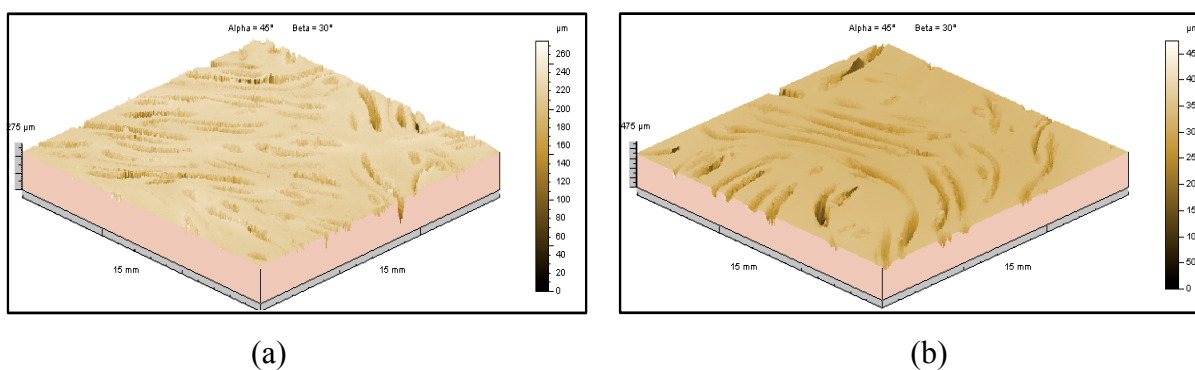
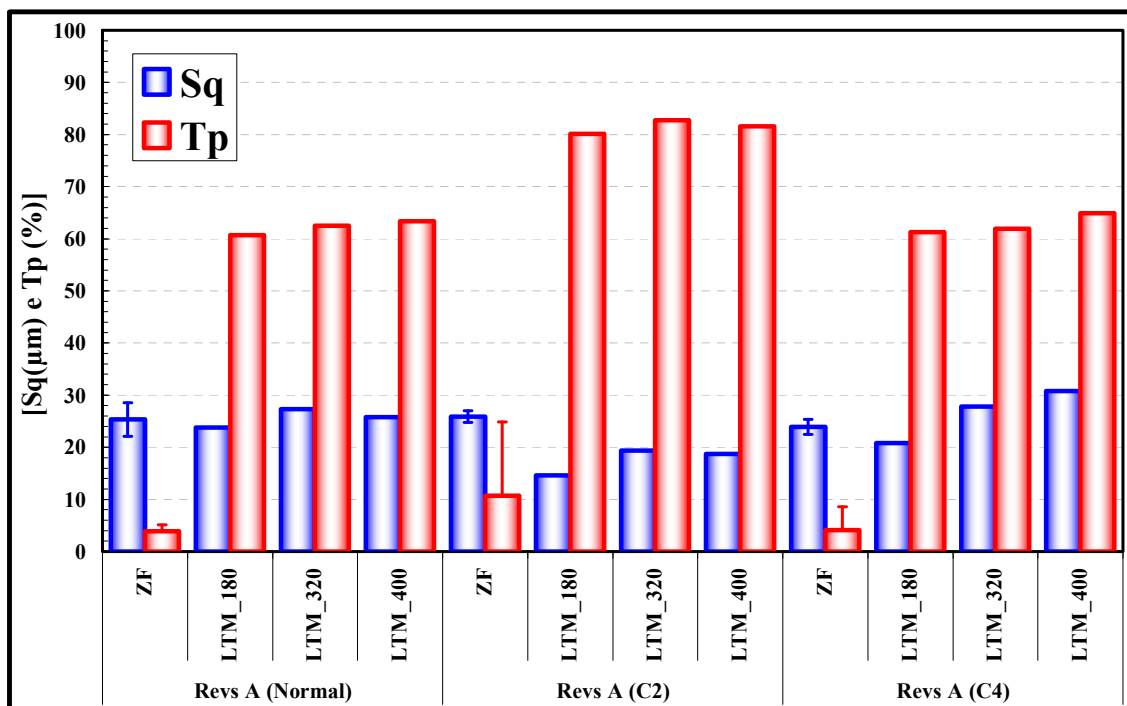
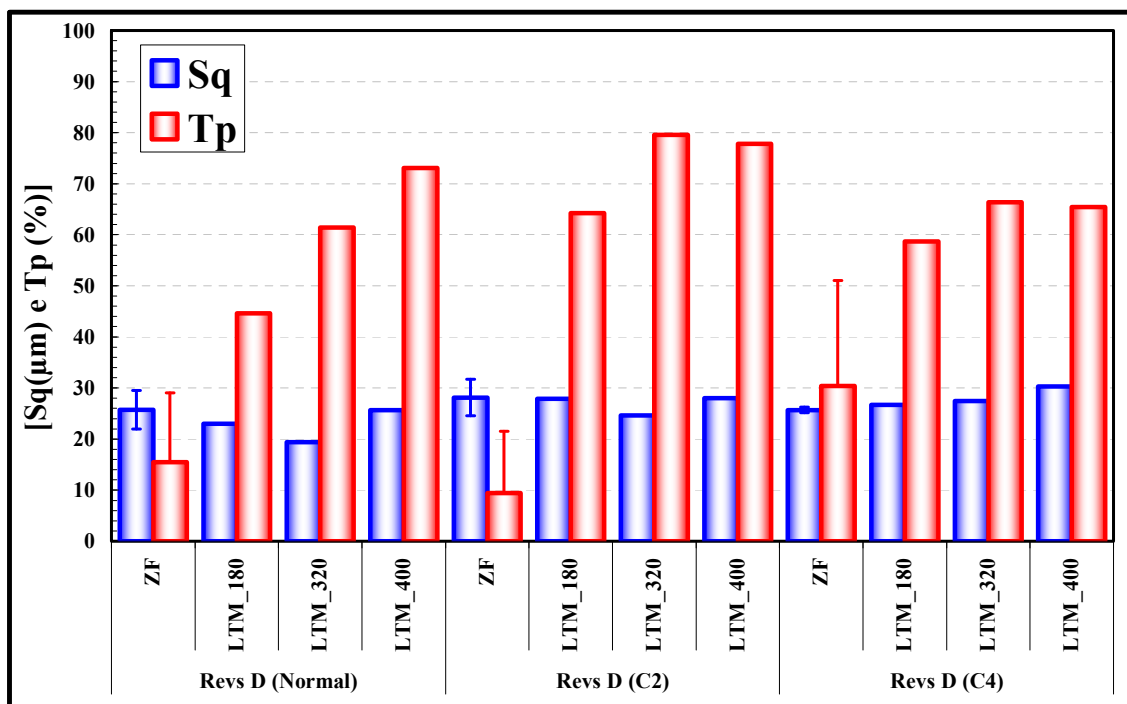


Figura 6.9: Topografias de superfície de revestimentos submetidos ao processo de lixamento laboratorial. (a)- Revestimento A Normal LTM #180. (b)- Revestimento D C4 LTM #400.

A figura 6.10 quantifica a topografia de superfície, em termos de rugosidade quadrática média (S_q) e capacidade de apoio (T_p), dos revestimentos A e D, respectivamente, que foram submetidos ao processo de lixamento laboratorial.



(a)



(b)

Figura 6.10: Parâmetros topográficos das amostras de revestimento submetidas ao processo de lixamento laboratorial: (a)- Revestimento A; (b)- Revestimento D.

Observa-se, através da figura 6.10-a, que o lixamento não produziu efeito em termos da rugosidade quadrática média para o revestimento A. Como pode ser visto, os valores da S_q dos revestimentos lixados são praticamente iguais aos valores da S_q do revestimento retificado, para os três diferentes tipos de lixas abrasivas. Por outro lado, o lixamento produziu um grande aumento na capacidade de apoio dos revestimentos. Observa-se que os valores absolutos da capacidade de apoio do revestimento lixado são muito superiores, quando comparados aos valores da capacidade de apoio do revestimento retificado. Este comportamento parece ser um comportamento típico, uma vez que, também são apresentados pelos parâmetros topográficos do revestimento D, figura 6.10-b. Este fenômeno era esperado, já que o que se espera do efeito do lixamento em termos de qualidade superficial é uma melhoria na planicidade e no alisamento da superfície e, conseqüentemente, havendo uma redução da S_q e um aumento da T_p .

6.3.1 – Ensaios Laboratoriais

Para a realização dos ensaios laboratoriais com a finalidade de avaliar o efeito do lixamento no comportamento tribológico, foram confeccionadas amostras de revestimentos A e D retificadas na condição dois e que foram lixadas nas lixas #180, #320 e #400, por terem apresentados os valores mais elevados da capacidade de apoio, conforme foi apresentado na figura 6.10. As amostras foram confeccionadas nas mesmas condições das amostras de revestimento retificadas. Os parâmetros laboratoriais foram os mesmos utilizados na realização dos ensaios laboratoriais das amostras que foram retificadas, exceto a sequência da hora de ensaio que, nestes ensaios, foram realizados apenas a primeira hora, fato que será justificado.

A figura 6.11 apresenta a taxa de desgaste do conjunto A. Observa-se, nesta figura, que a taxa de desgaste do conjunto, cujo revestimento foi lixado na lixa #180, apresentou uma taxa de desgaste aproximadamente 26% maior em relação ao conjunto cujo revestimento não foi submetido ao processo de lixamento. A princípio este resultado foi contraditório em relação ao resultado esperado, porque, após o lixamento, com a melhoria da qualidade superficial do revestimento, esperava-se que a taxa de desgaste diminuísse. Este comportamento foi apresentado pelos conjuntos que tiveram os revestimentos lixados nas lixas #320 e #400 respectivamente, conforme está apresentado na figura 6.11.

Analisando o comportamento da taxa de desgaste do conjunto D, figura 6.12, observa-se um resultado ainda mais contraditório. Observa-se que, para os conjuntos que tiveram os

revestimentos lixados nas lixas #180 e #320, a taxa de desgasta está próxima da taxa de desgaste apresentada pelo conjunto do revestimento não lixado, e que, a taxa de desgaste do conjunto cujo revestimento foi lixado na lixa #400 foi aproximadamente 36% maior.

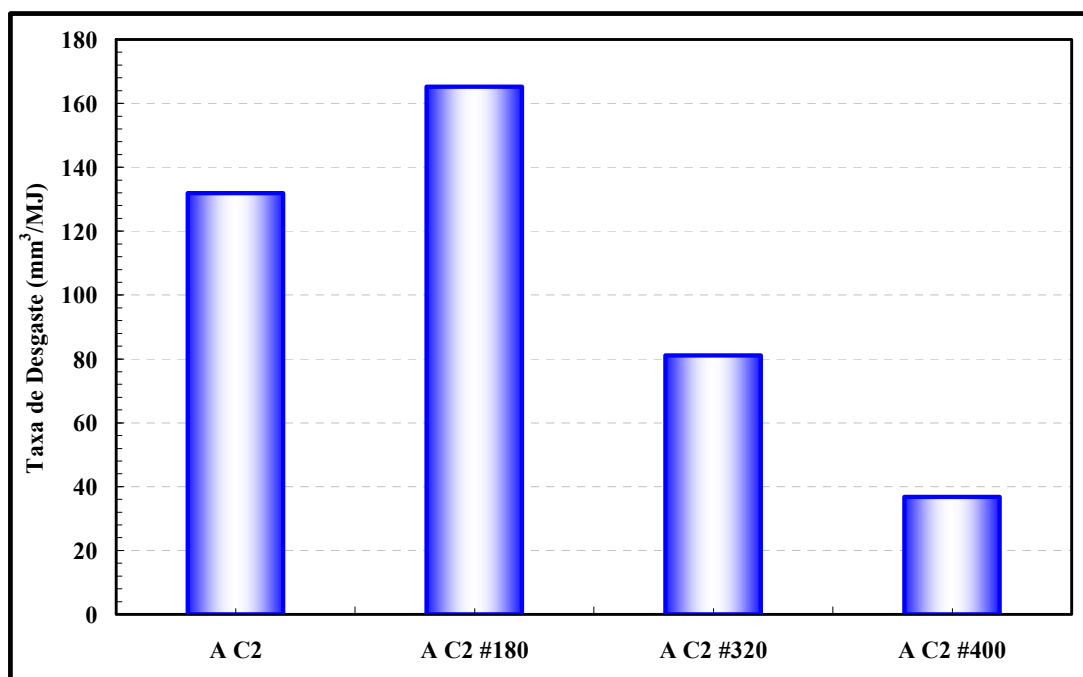


Figura 6.11: Comportamento da taxa de desgaste após a realização do ensaio laboratorial do revestimento A retificado na condição dois e lixado nas lixas #180, #320 e #400.

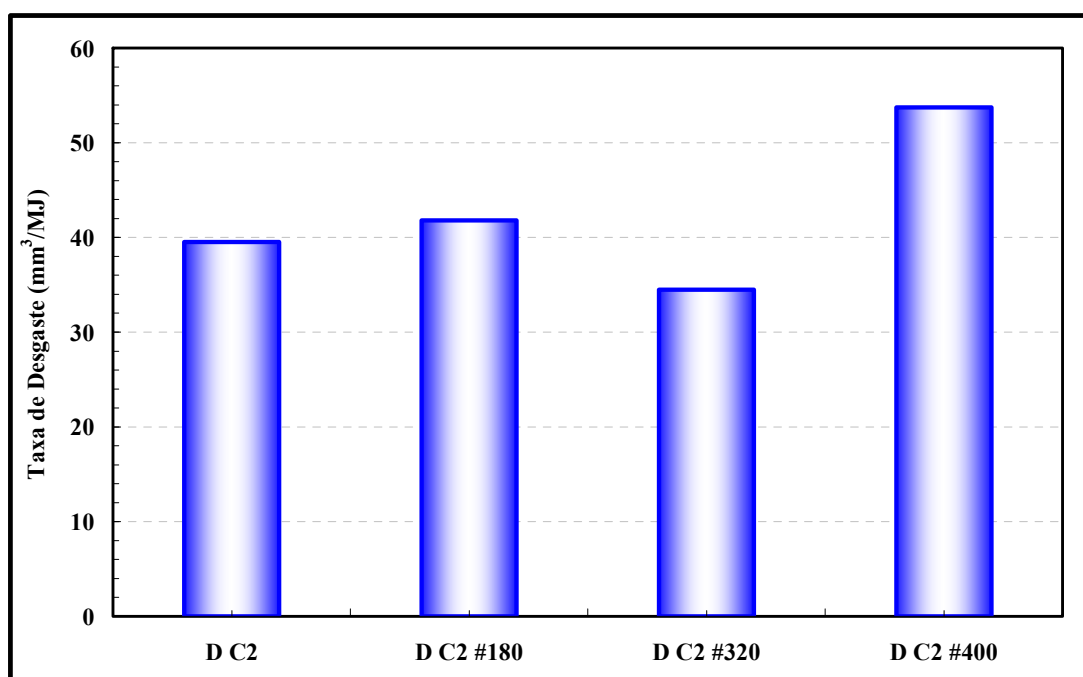


Figura 6.12: Comportamento da taxa de desgaste após a realização do ensaio laboratorial do revestimento D retificado na condição dois e lixado nas lixas #180, #320 e #400.

Inicialmente buscaram-se explicações físicas que pudessem justificar os comportamentos apresentados pelas taxas de desgaste dos conjuntos A e D. Observando a superfície dos revestimentos após o processo de lixamento, figura 6.9, pode ser vista claramente a presença de “buracos” na superfície das amostras.

Este efeito fez acreditar que a força normal inicialmente aplicada (peso morto 3,2 kg) estava atuando de forma muito severa no processo de lixamento, fazendo com que houvesse o arrancamento das fibras e, desta forma, a geração dos “buracos” na superfície das amostras, justificando então, os resultados apresentados pela taxa de desgaste. Com a finalidade de minimizar este fenômeno, utilizou-se peso morto de menor carga, 1 kg e que foi especialmente fabricado, e novas amostras de revestimento foram submetidas ao processo de lixamento, para avaliar o efeito da pressão de contato na qualidade superficial final.

Como foi apresentado na figura 6.10, os revestimentos A e D, retificados na condição dois e lixados nas lixas #180, #320 e #400 apresentaram os valores mais elevados da capacidade de apoio. Desta forma, foram selecionadas somente amostras de revestimento A e D (retificação 2) para serem submetidas ao processo de lixamento utilizando peso morto de 1 Kg. Neste processo de lixamento também foi adotado o regime de estabilização da perda de massa como critério de interrupção do processo de lixamento.

A figura 6.13 apresenta os parâmetros topográficos dos revestimentos D.

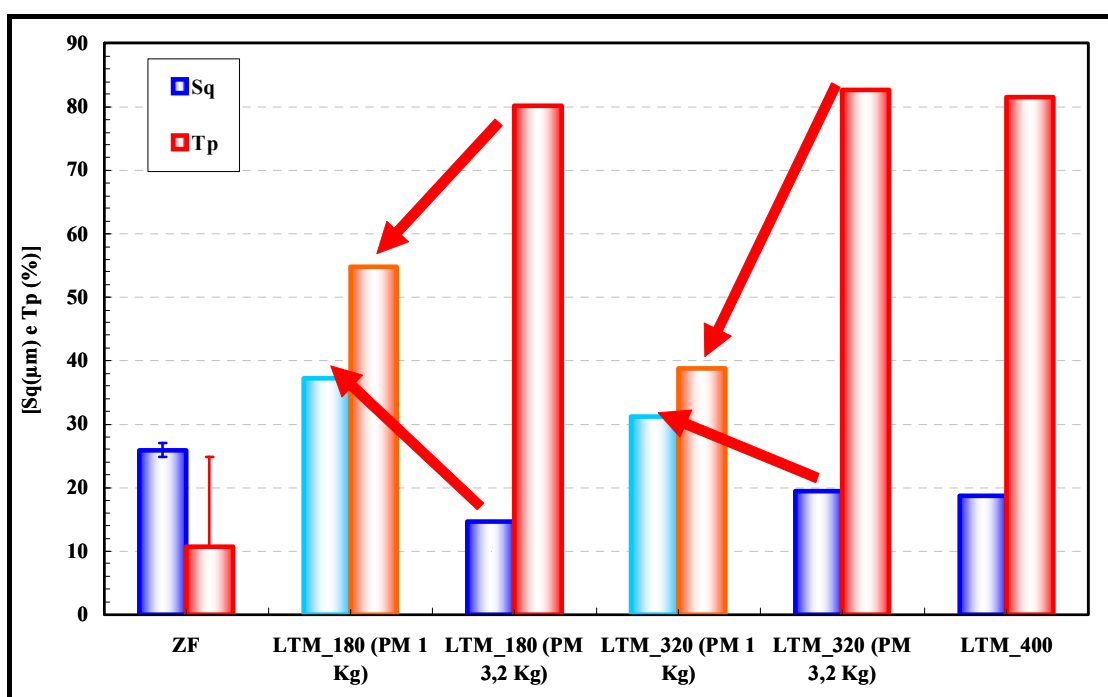


Figura 6.13: Correlação entre os parâmetros topográficos de revestimento D submetido ao processo de lixamento com peso morto de 1 kg e 3,2 kg.

Os resultados apresentados são ainda mais contraditórios. Observa-se na figura 6.13 que os revestimentos lixados nas lixas #180 e #320, com peso morto de 1 kg, apresentaram aumento da rugosidade quadrática média e redução da capacidade de apoio (setas vermelha), em relação aos revestimentos lixados com peso morto de 3,2 kg. Estes resultados foram o oposto, sendo que, com a diminuição da pressão de contato, esperava-se uma melhoria na qualidade superficial, diminuindo o valor da rugosidade quadrática média e elevando o valor da capacidade de apoio. Os valores dos parâmetros topográficos para o lixamento na lixa #400 não foram apresentados na figura 6.13, porque após um determinado tempo de lixamento foi observado que a superfície do revestimento não estava desgastada por igual, ou seja, as amostras ainda apresentavam regiões que não haviam sido desgastadas.

Comportamento similar ao apresentado pelo revestimento D, foi também observado para o revestimento A, ou seja, após o lixamento utilizando o peso morto de 1 kg, o valor da rugosidade quadrática média aumentou e o da capacidade de apoio diminuiu.

A figura 6.14 apresenta as topografias de superfícies obtidas via MEV do revestimento A retificado na condição dois e lixado na lixa #320, com peso morto de 1 kg (figuras 6.14-a a 6.14-d) e peso morto de 3,2 kg (figuras 6.14-e a 6.14-h).

Observando a superfície dos revestimentos em menores aumentos (figuras 6.14-a e 6.14-e), pode-se ver claramente que o revestimento submetido ao processo de lixamento utilizando peso morto de 3,2 kg, apresentou uma qualidade superficial melhor, em relação à amostra submetida ao lixamento com peso morto de 1 kg.

Nota-se que a amostra lixada com peso morto de 1 kg apresenta um arrancamento das fibras de reforço de forma mais desordenada, enquanto que a amostra lixada com peso morto de 3,2 kg apresenta uma superfície mais planificada, com menores quantidades de levantamento das fibras de reforço. Com os aumentos intermediários (figuras 6.14-b e 6.14-f) este efeito se torna ainda mais claro.

Em maiores aumentos (figuras 6.14-c e 6.14-g), pode-se ver ainda, mais claramente, que a amostra lixada com peso morto de 1 kg apresenta “buracos” profundos, havendo arrancamento de fibras de reforço nestes “buracos”, ficando as mesmas de forma desprendidas e desordenadas na matriz do revestimento.

Por outro lado, na superfície da amostra lixada com peso morto de 3,2 kg, os “buracos” estão mais “rasos”, indicando que houve arrancamento total das fibras de reforço na matriz, não deixando as fibras de reforço levantadas e de forma desordenada na matriz do revestimento.

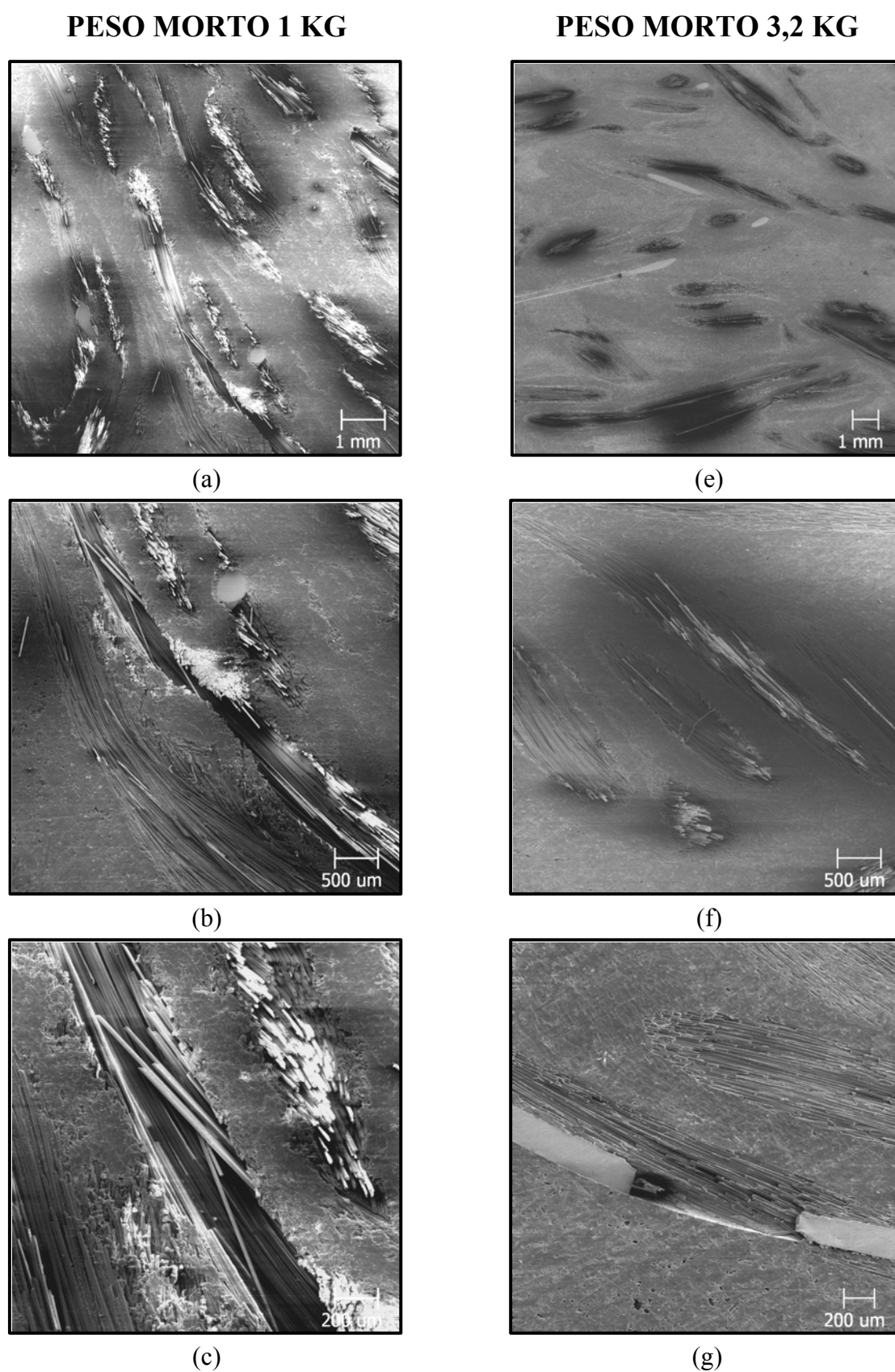


Figura 6.14: Correlação entre topografia de superfícies obtidas via MEV, do revestimento A na condição de retificação dois lixado na lixa #320, com peso morto de 1 kg e 3,2 kg.

Observando a topografia dos revestimentos no seu estado virgem obtida por interferometria ótica, nota-se claramente a presença dos “buracos” na superfície das amostras como mostrado pela figura 6.15 (setas vermelhas) e podem também ser vistos na figura 6.3. Com isso, acreditou-se que, quando as amostras são submetidas ao processo de lixamento, a severidade do sistema não causa a geração dos “buracos” na superfície das amostras, uma vez que, como foi visto, as amostras “herdaram” esses “buracos” durante o processo de produção.

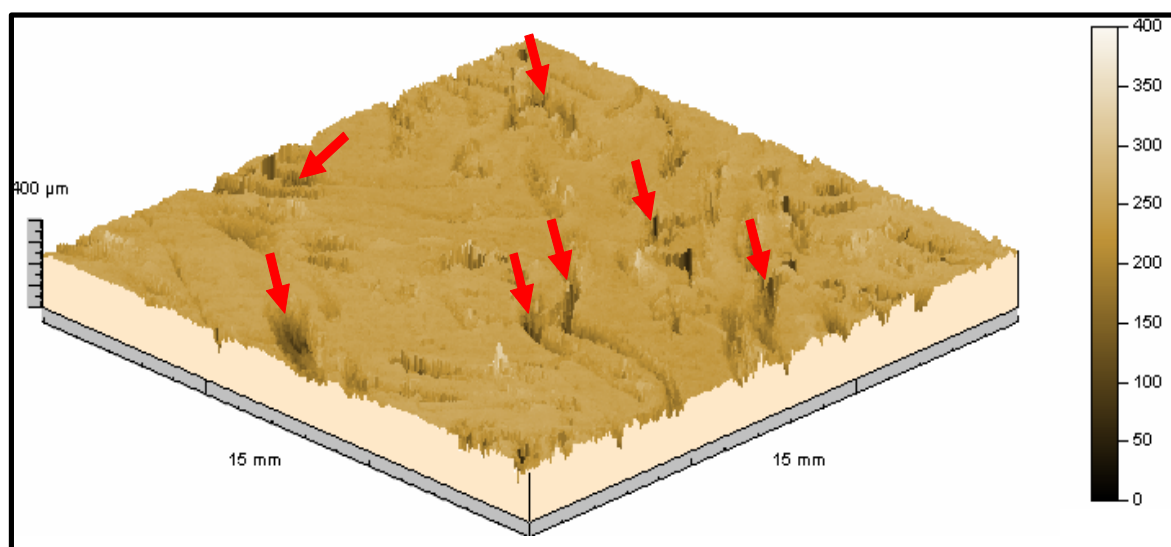


Figura 6.15: Topografia de superfície revestimento D retificado condição Normal antes de ter sido submetido ao processo de lixamento.

A figura 6.16 mostra uma representação esquemática que justifica os resultados apresentados nas figuras 6.13 e 6.14, onde foi mostrado que as amostras de revestimento lixadas com peso morto de 3,2 kg apresentaram uma melhor qualidade superficial em relação às amostras que foram lixadas com peso morto de 1 kg.

Na figura 6.16, o perfil referência representa um perfil de uma superfície virgem. A F_{ni} é a força normal individual em cada partícula abrasiva, ou seja, o que é verdadeiramente efetivo, e está em função do tamanho do abrasivo. Quanto maior for o diâmetro do abrasivo, maior será a F_{ni} , e quanto maior for a força normal aplicada (peso do contra-corpo), maior será a força efetiva na partícula abrasiva. A figura 6.16 mostra uma representação esquemática onde há atuação de três forças: F_{ni1} , F_{ni2} e F_{ni3} . Considerando F_{ni3} maior que F_{ni2} que é maior que F_{ni1} , pode-se ver que a superfície submetida a F_{ni3} (figura 6.16-d) apresentou uma maior espessura usinada (E_u), eliminando uma maior quantidade de irregularidades iniciais da superfície.

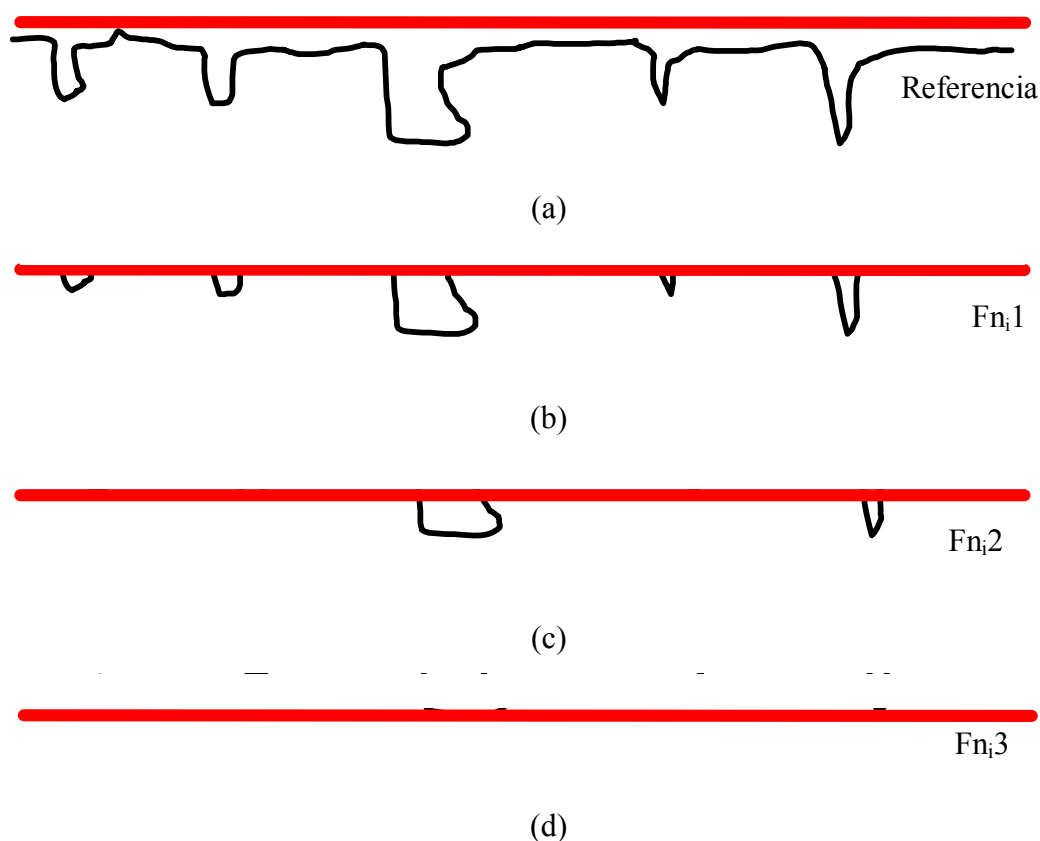
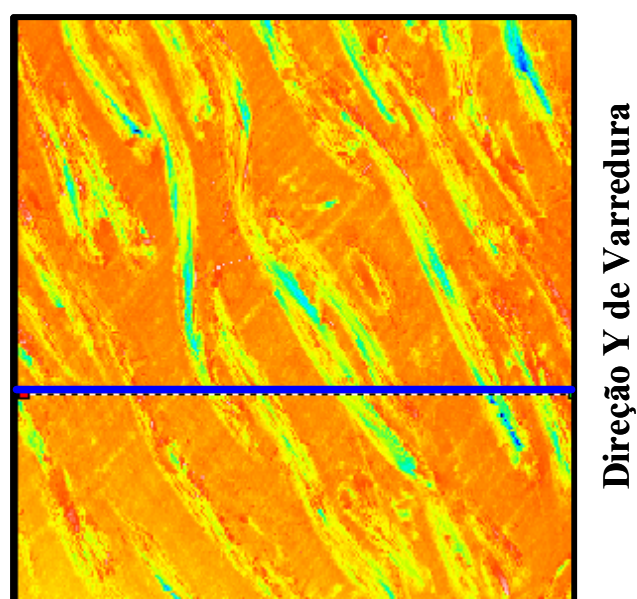


Figura 6.16: Representação esquemática do processo de lixamento na superfície das amostras.

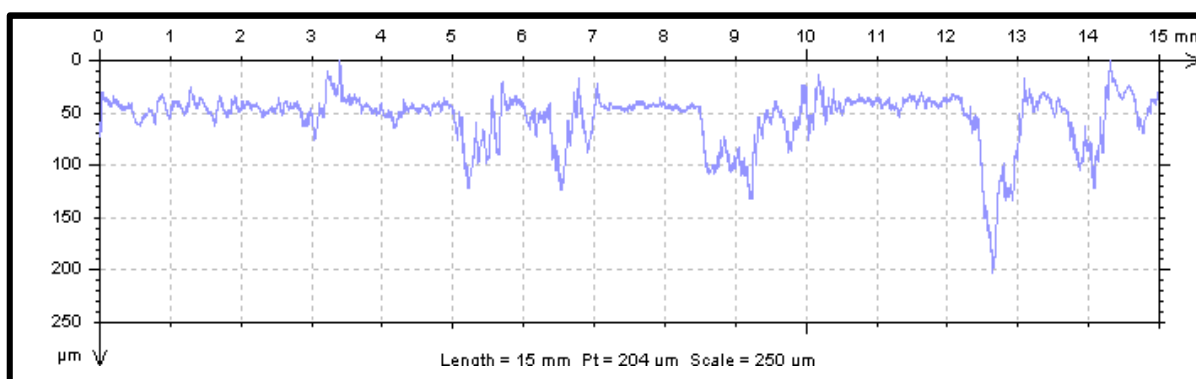
Com esta analogia, acredita-se que utilizando peso morto de 3,2 kg as irregularidades superficiais que as amostras herdaram durante o seu processo de fabricação, estavam sendo eliminadas e havendo a geração de uma nova superfície. Acredita-se também que o peso morto de 1 kg não foi suficiente para eliminar as irregularidades da superfície virgem que foram herdadas e gerar uma nova superfície. Este fenômeno físico justifica a razão das amostras lixadas com peso morto de 3,2 kg apresentarem melhor qualidade topográfica.

Para comprovar se, de fato, novas superfícies estavam sendo geradas após as amostras terem sido lixadas, foram extraídos todos os perfis topográficos da direção Y de varredura da superfície virgem, utilizando o programa Mountains Map 3.0 Version Demo. Em seguida, foi calculado o valor médio do parâmetro topográfico St , desses perfis. A figura 6.17 apresenta uma demonstração para um melhor entendimento deste procedimento. A figura 6.17-a mostra a topografia de superfície de uma amostra de revestimento virgem, e um único perfil (linha azul) que foi extraído da direção Y de varredura. A figura 6.17-b, por sua vez, apresenta este perfil topográfico, e a figura 6.17-c mostra a somatória de todos os perfis que foram extraídos da direção Y de varredura.

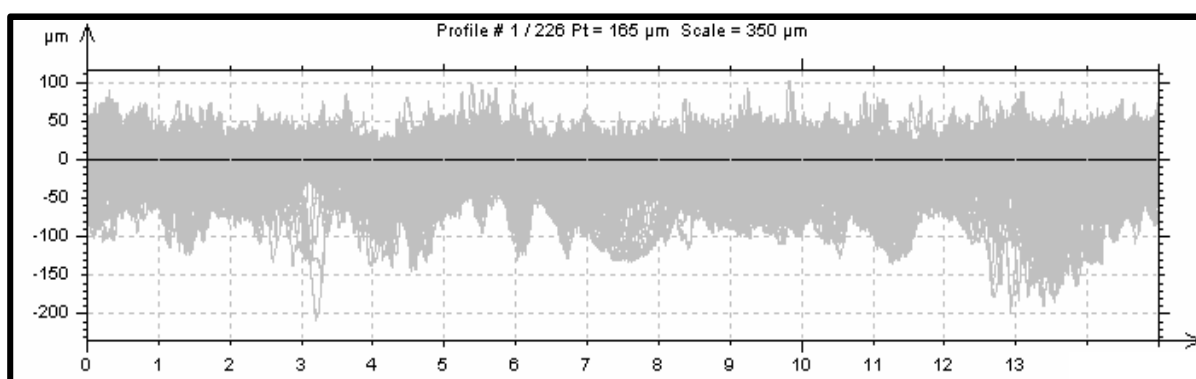


Direção X de Varredura

(a)



(b)



(c)

Figura 6.17: Representação da extração dos perfis topográficos da direção Y de varredura da análise interferométrica. (a)- perfil topográfico revestimento (vista superior); (b)- único perfil topográfico extraído da direção Y de varredura da superfície do revestimento; (c)- somatória de todos os perfis topográficos extraídos da direção Y de varredura.

Após ter sido determinado o valor médio de St, calculou-se, então, a espessura usinada das amostras de revestimento, que pôde ser obtida pela Eq. (6.1).

$$Eu = \frac{Volume_{desgastado}}{Área} \quad (6.1)$$

Onde:

$$Área = 1225 \text{ mm}^2 \text{ (Constante)} \quad (6.2)$$

$$Volume_{desgastado} = (\text{Perda de massa} / \rho) \quad (6.3)$$

$$\rho = \text{Densidade do revestimento}$$

Depois de obtidos os valores da espessura usinada das amostras lixadas com peso morto de 3,2 kg, os mesmos foram correlacionados com os valores médios de St, como está apresentado na figura 6.18. Observa-se, através da figura 6.18, que após dez minutos de lixamento, somente a amostra de revestimento A, retificada na condição normal e lixada na lixa #180, teve uma nova superfície gerada, pois apresenta uma espessura usinada maior do que o valor médio de St. Tendo-se uma espessura usinada maior do que o valor médio de St indica que o perfil topográfico original foi eliminado devido ao desgaste e um novo perfil foi gerado. Pode-se ver que todos os outros pontos para o tempo de lixamento igual a 10 minutos, se encontram abaixo da reta de correlação. Após 25 minutos de lixamento, somente o revestimento A retificado na condição normal e lixada na lixa #180 e o revestimento D normal e lixado na lixa #320 tiveram uma nova superfície gerada.

Através desta análise, concluiu-se que o tempo de seis minutos adotado para a realização do processo de lixamento, não foi suficiente para gerar uma nova superfície nas amostras de revestimento. Conforme está apresentado na figura 6.18, o tempo mínimo para o revestimento A retificado em condição normal e lixado na lixa #180 ter uma nova superfície gerada foi de 10 minutos.

Desta forma, foi realizado um outro trabalho, a fim de verificar o efeito da geração da nova superfície no comportamento tribológico.

Conforme foi apresentado na figura 6.1, a amostra de revestimento A apresentou uma melhor qualidade superficial em termos da Sq e Tp, após ter sido lixada na lixa #600. Fazendo uma análise via MEV nas amostras de revestimento A, que foram utilizadas nos estudos

preliminares, observa-se, de fato, que a amostra lixada na #600 apresenta uma melhor qualidade superficial, conforme pode ser comprovado pela figura 6.19.

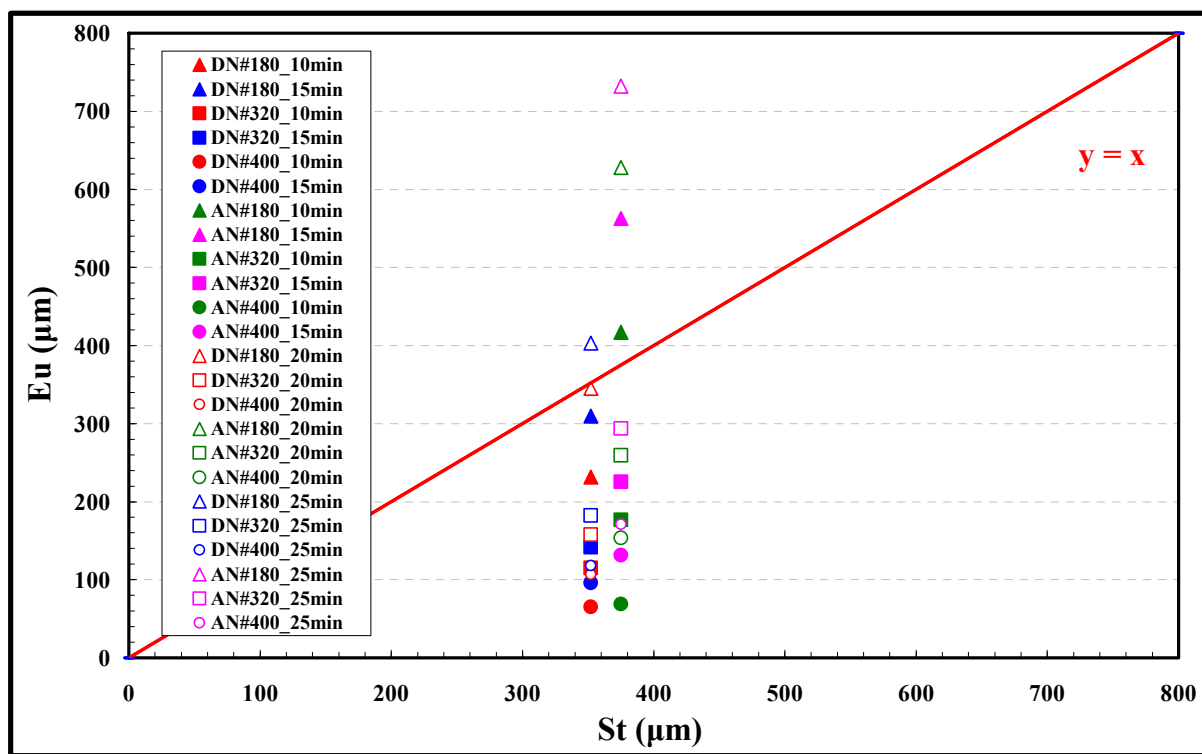


Figura 6.18: Correlação entre a espessura usinada e o valor médio de St, das amostras de revestimento A e D retificadas na condição normal e lixadas com peso morto de 3,2 kg.

A figura 6.19 apresenta a topografia de superfície das amostras de revestimento A que foram lixadas nas lixas #260 e #600 nos estudos preliminares e a topografia de superfície de uma amostra de revestimento virgem.

Em menores aumentos, pode-se observar que a amostra lixada na lixa #260 (figura 6.19-b) apresenta uma superfície da matriz polimérica mais lisa, planificada, em relação à superfície virgem (figura 6.19-a). Mas por outro lado, houve o arrancamento das fibras de reforço na matriz polimérica e conseqüentemente o levantamento dessas fibras, deixando-as para fora da matriz polimérica.

Quando se observa a superfície da amostras lixada na lixa #600, figura 6.19-c, pode-se ver um efeito similar em termos de planicidade e alisamento da matriz polimérica. Mas, por outro lado, não foi observado arrancamento e levantamento das fibras de reforço de forma severa, como foi apresentado pela superfície da amostra lixada na lixa #260. A superfície da amostra de revestimento lixada na lixa #600 apresenta algumas regiões onde houve o desprendimento das fibras de reforço da matriz, mas em uma quantidade bem inferior.

Nos aumentos intermediários, figura 6.19-d a 6.19-f, pode-se ver com mais clareza este efeito. Observa-se que a superfície da amostra lixada na lixa #600 apresenta arrancamento e levantamento das fibras de reforço da matriz polimérica, mas não de forma tão severa quanto foi o arrancamento na superfície da amostra lixada na lixa #260.

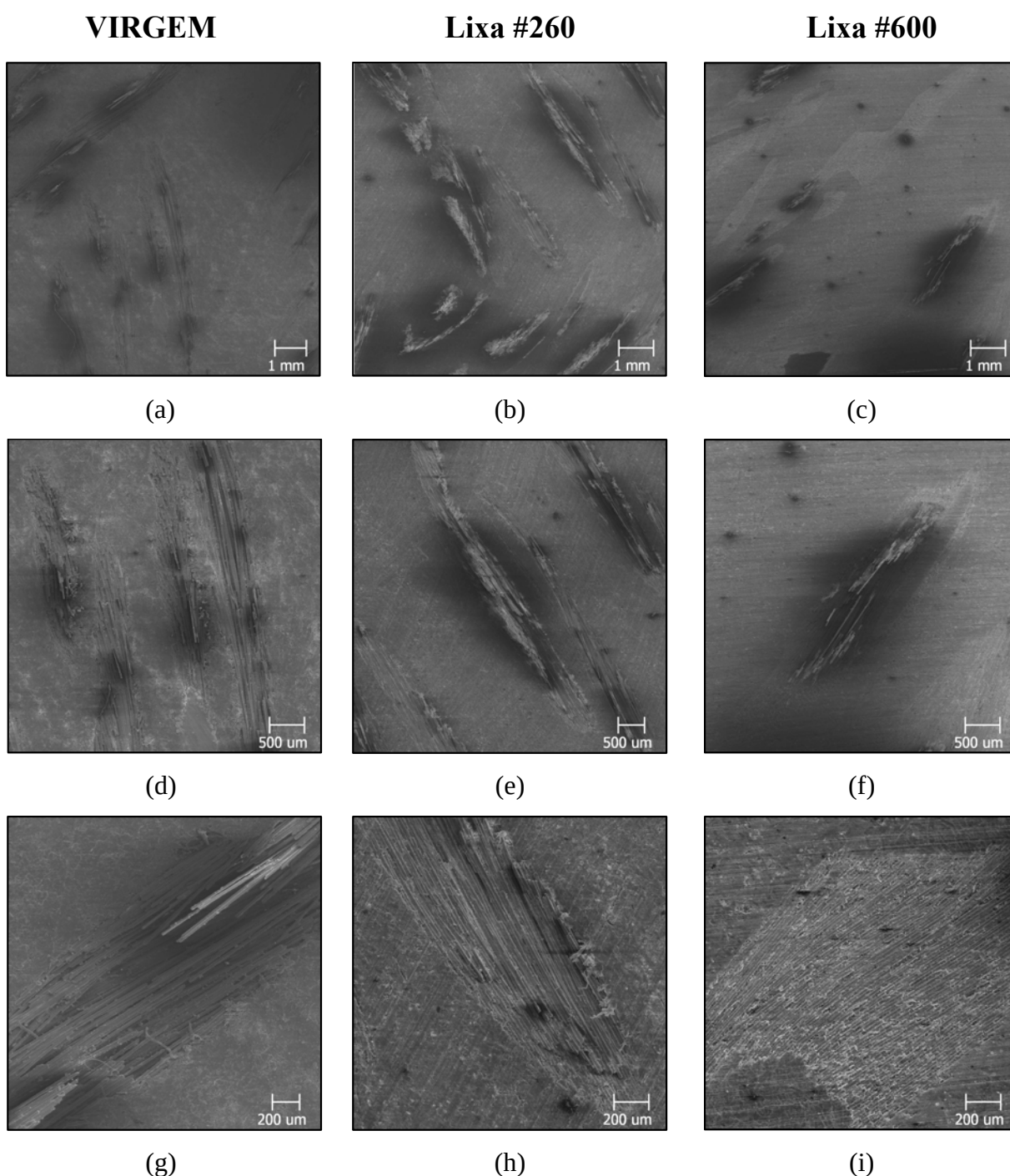


Figura 6.19: Correlação entre a topografia de superfície das amostras de revestimento, que foram lixadas no processo preliminar, para estudar o efeito do pré-condicionamento na qualidade superficial do revestimento.

Este efeito torna-se ainda mais claro em maiores aumentos, figuras 6.19-g a 6.19-i. Através da figura 6.19-i pode-se ver que a superfície da amostra lixada na lixa #600 apresenta, de fato, uma matriz polimérica mais lisa e planificada. Observa-se também que, apesar de haver arrancamento das fibras de reforço da matriz, as mesmas não ficam desprendidas e para fora da matriz polimérica, justificando então, os excelentes valores apresentados pelos parâmetros topográficos Sq e Tp na figura 6.1. Conforme foi apresentado na figura 6.1, houve uma redução de aproximadamente 600% da Sq e um aumento de 300% da Tp, em relação à superfície virgem.

Para avaliar o efeito da nova superfície gerada após o processo de lixamento no comportamento tribológico, amostras de revestimento A e D, retificadas na condição normal, que são utilizadas nos ensaios realizados no tribômetro, foram lixadas manualmente na lixadeira Struers Knuth Rotor. Foi escolhido este processo devido a alguns fatores. Primeiramente, conforme resultados já apresentados e justificados, amostras lixadas neste processo apresentaram excelente qualidade topográfica. Outro fator relevante foi o tempo de lixamento para gerar uma nova superfície. Os resultados apresentados na figura 6.18 mostraram que após 25 minutos de lixamento, somente algumas amostras tiveram uma nova superfície gerada.

Neste trabalho, o tempo de cada processo de lixamento foi estabelecido como o tempo necessário para gerar uma nova superfície. Foram utilizadas lixas abrasivas de SiC à prova d'água de granulometria #180, #320 e #600.

De acordo com a figura 6.20, o tempo necessário para a geração de uma nova superfície utilizando a lixa #180 foi de 30 segundos para o revestimento A e 45 segundos para o revestimento D. Tempo muito próximo a este foi obtido quando utilizada a lixa #320, tanto para o revestimento A quanto para o revestimento D. Observa-se que o tempo necessário para gerar uma nova superfície quando utiliza-se a lixadeira, é muito inferior quando comparado ao tempo de lixamento quando utiliza-se a lapidadora.

Para a lixa #600, o tempo de lixamento até a geração de uma nova superfície foi muito superior, quando comparado ao tempo de lixamento utilizando as lixas #180 e #320. Através da figura 6.20, observa-se que foi necessário o tempo de 36 minutos para o revestimento A e o tempo de 33 minutos para o revestimento D, apresentarem uma nova superfície gerada.

Após as novas superfícies terem sido geradas, as amostras de revestimentos A e D lixadas nas granulometrias #180 e #600, foram submetidas a ensaios no tribômetro, a fim de estudar o comportamento tribológico. Foi realizada uma série de quatro ensaios interrompidos

de uma hora cada, em cada amostra nas diferentes condições de lixamento. Foram mantidos os mesmos parâmetros laboratoriais utilizados nos outros ensaios.

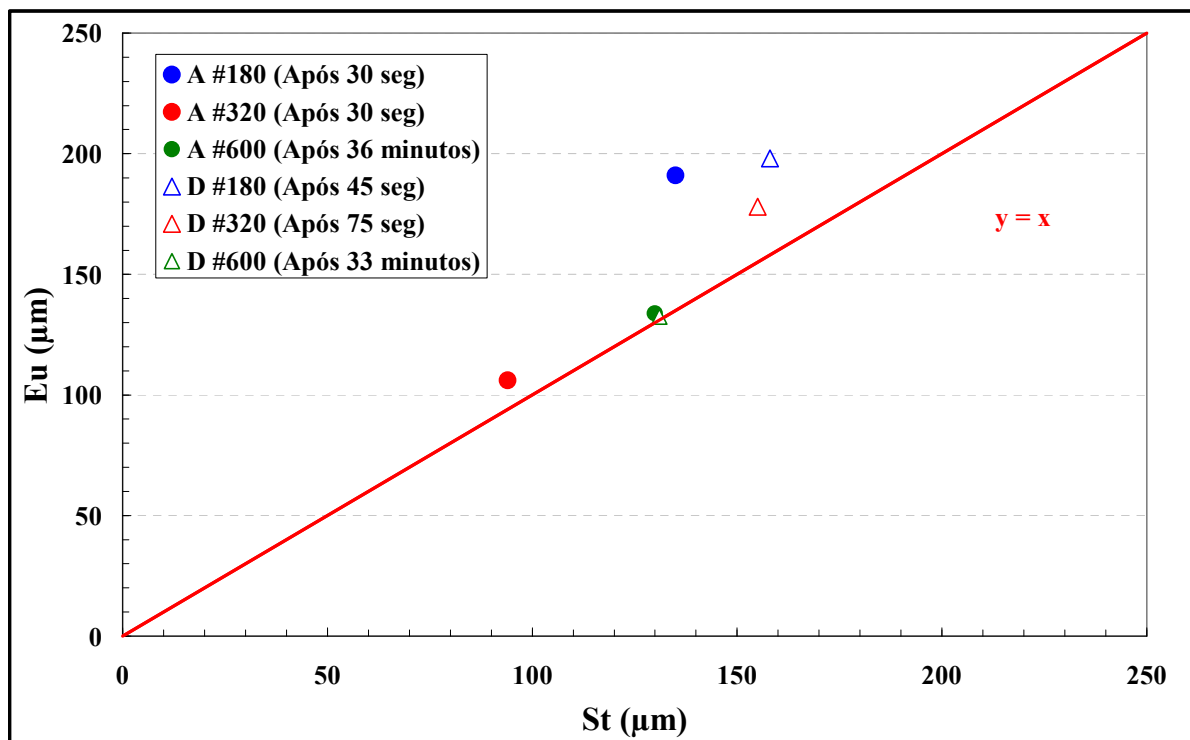


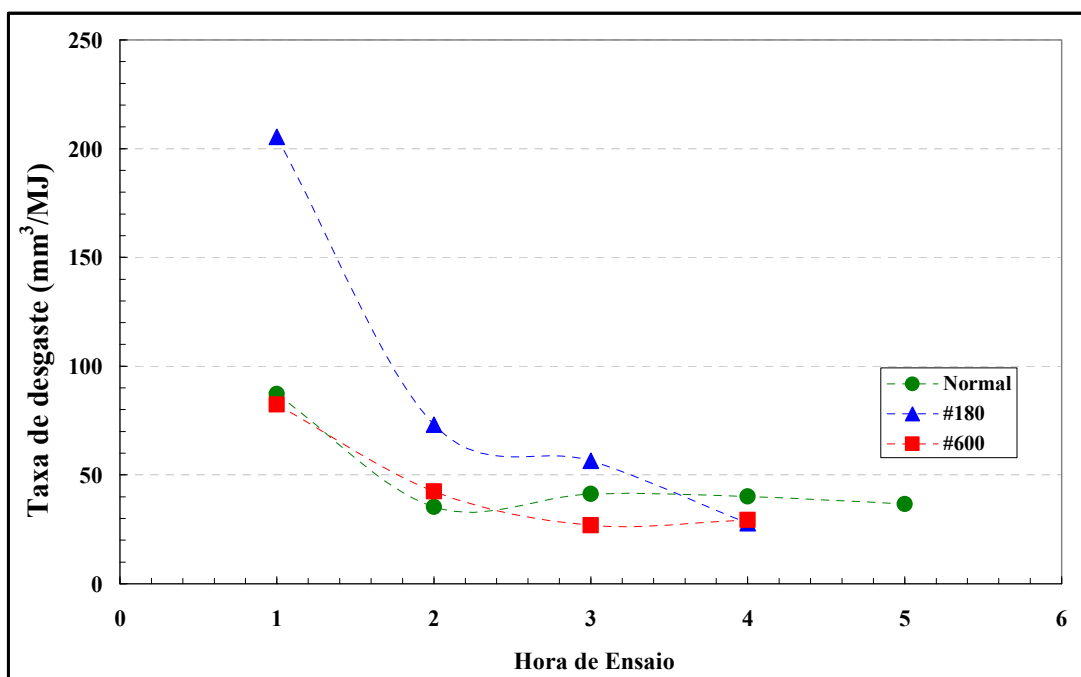
Figura 6.20: Correlação entre a espessura usinada e o valor médio de St, das amostras de revestimento A e D lixadas manualmente para a geração de uma nova superfície.

A figura 6.21 apresenta o comportamento da taxa de desgaste dos conjuntos A e D, correlacionados com a taxa de desgaste dos conjuntos A e D retificados na condição normal.

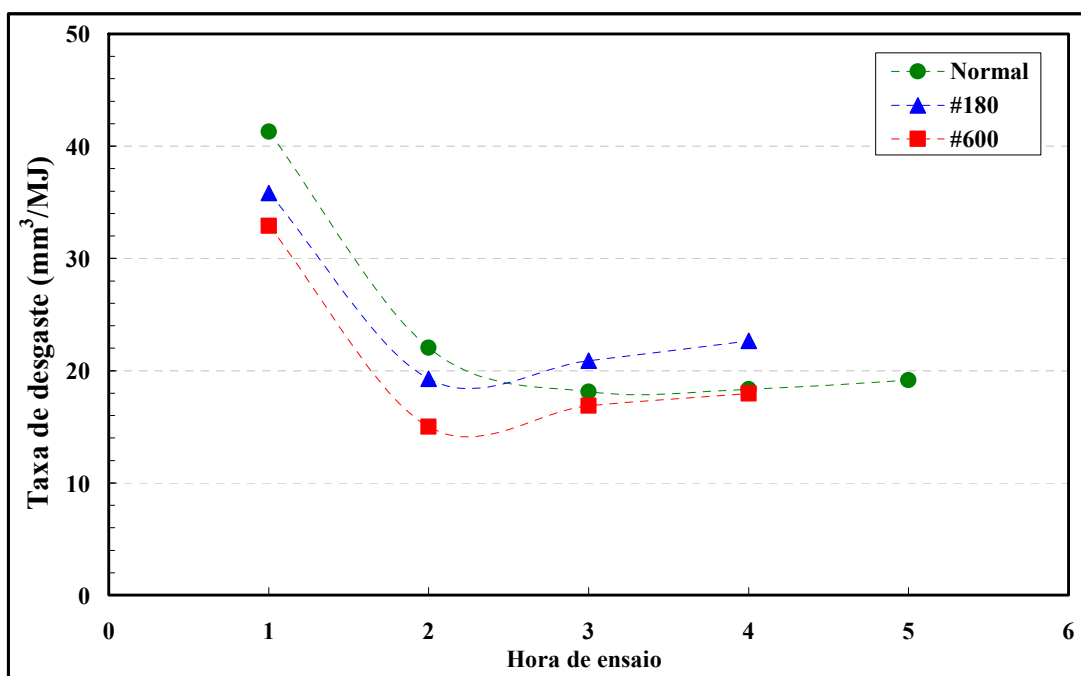
Na figura 6.21-a pode-se observar que o conjunto A lixado na lixa #180 apresentou um comportamento não esperado. Esperava-se que houvesse uma redução na taxa de desgaste, mas o conjunto apresentou uma maior taxa de desgaste nas três primeiras horas, em relação ao conjunto retificado. Já o conjunto A, lixado na lixa #600, apresentou uma pequena redução na taxa de desgaste nas duas primeiras horas de ensaio e, a partir da terceira hora apresenta uma taxa de desgaste igual a do conjunto retificado, ou seja, tendendo também à estabilização.

Analisando o comportamento da taxa de desgaste do conjunto D, figura 6.21-b, pode-se ver que a taxa de desgaste é significativamente menor nas duas primeiras horas de ensaio, tendendo à estabilização a partir da terceira hora. Comportamento observado tanto para o conjunto A quanto para o conjunto D.

Com a análise destes resultados, concluiu-se que, apesar de gerar uma nova superfície após o lixamento, este efeito físico não eliminou o regime transiente inicial da taxa de desgaste.



(a)



(b)

Figura 6.21: Comportamento da taxa de desgaste dos revestimentos lixados manualmente nas lixas #180 e #600 e submetidos a ensaios no tribômetro. (a)- Revestimento A; (b)- Revestimento D.

Para confirmar e deixar ainda mais claro que a geração de uma nova superfície não exerce efeito sobre o regime transiente inicial da taxa de desgaste, foi determinado o valor médio de St e a espessura usinada (Eu) das amostras de revestimento D retificadas e que foram ensaiadas no tribômetro. É importante lembrar que estas amostras foram submetidas a uma série de cinco ensaios interrompidos, para avaliar o efeito da retificação industrial no comportamento tribológico. Foram determinados os valores de St e Eu para cada hora de ensaio, e a figura 6.22 apresenta a correlação entre os dados.

Observando a correlação entre o St médio e a Eu , na figura 6.22, nota-se que todos os pontos estão acima da reta linear de correlação, exceto para o revestimento D retificado na condição normal após a 5ª de ensaio e o revestimento retificado condição 4 após a 1ª hora de ensaio. Este comportamento mostra que a Eu para cada hora de ensaio foi maior do que o valor médio de St , o que significa que houve a geração de uma nova superfície.

Com esta análise, concluiu-se que, após cada hora de ensaio interrompido, uma nova superfície foi gerada, mas não exercendo influência no regime transiente da taxa de desgaste. Conforme resultados apresentados pela taxa de desgaste do conjunto D, figura 6.6-b, o transiente inicial da taxa de desgaste ocorreu nas três primeiras horas de ensaio.

Comportamento similar a este também foi observado para o revestimento A.

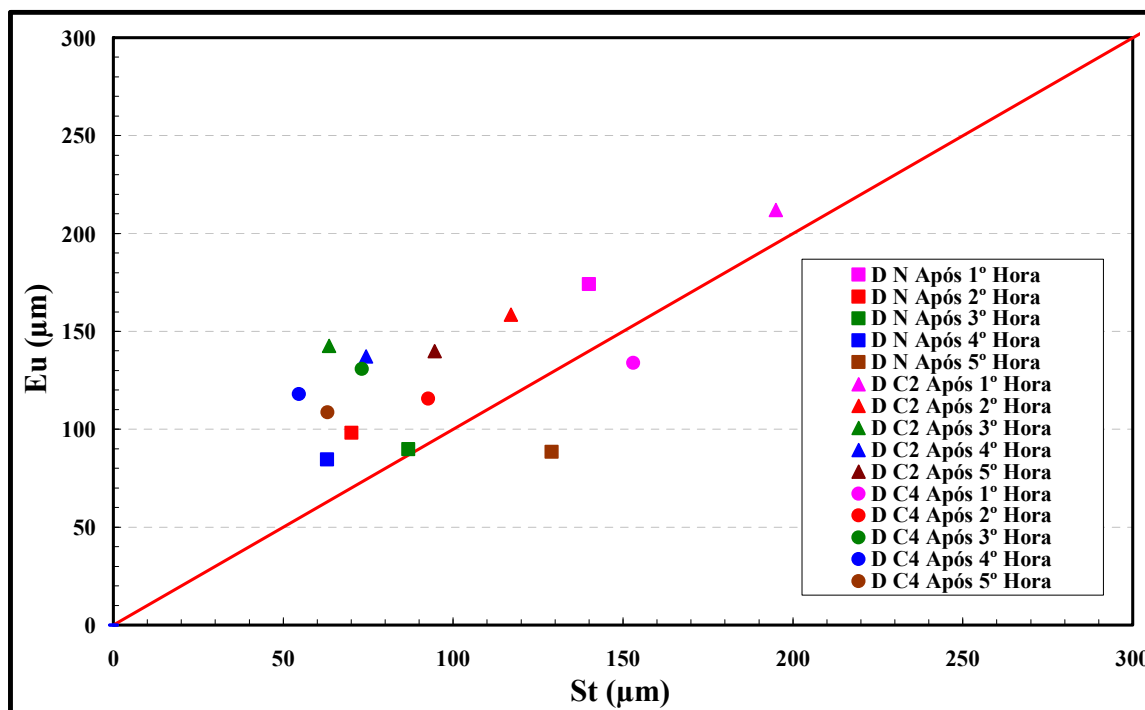


Figura 6.22: Correlação entre os valores médios de St e a Eu , das amostras de revestimento D retificadas e que foram submetidas a uma série de cinco ensaios interrompidos, no tribômetro.

Foi realizado um estudo para verificar se a nova superfície gerada influenciou no comportamento do coeficiente de atrito inicial. A figura 6.23 apresenta a evolução do coeficiente de atrito e da temperatura da primeira hora de ensaio do revestimento A lixado na lixa #180, em função do tempo de ensaio.

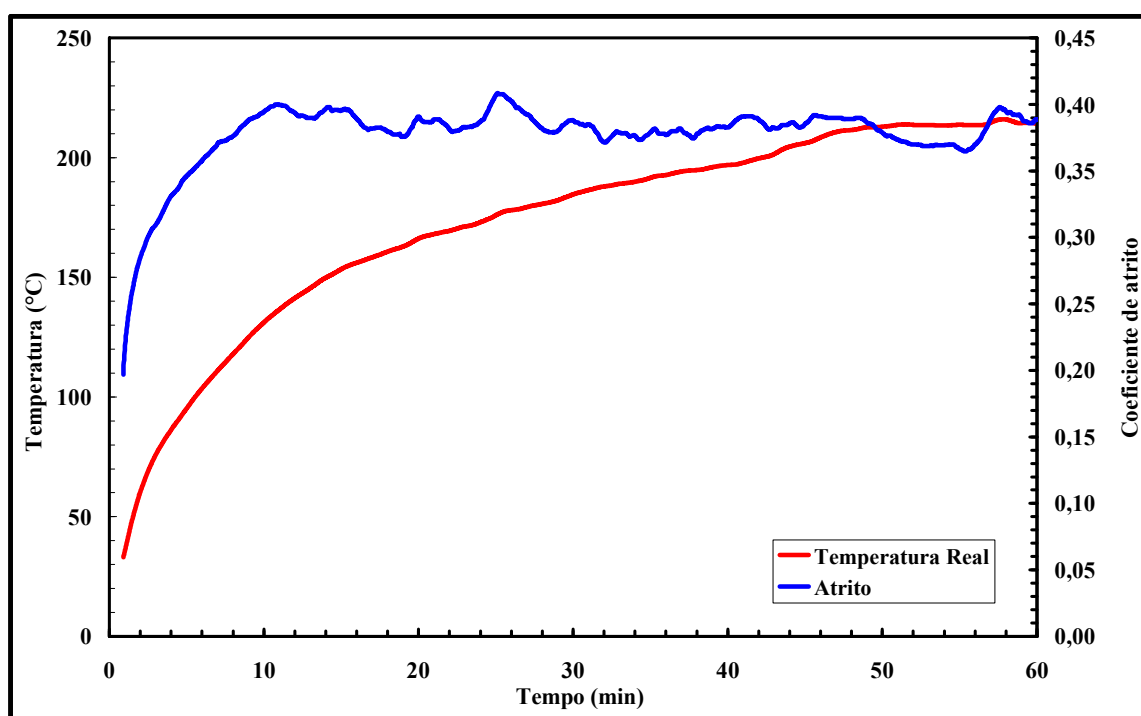
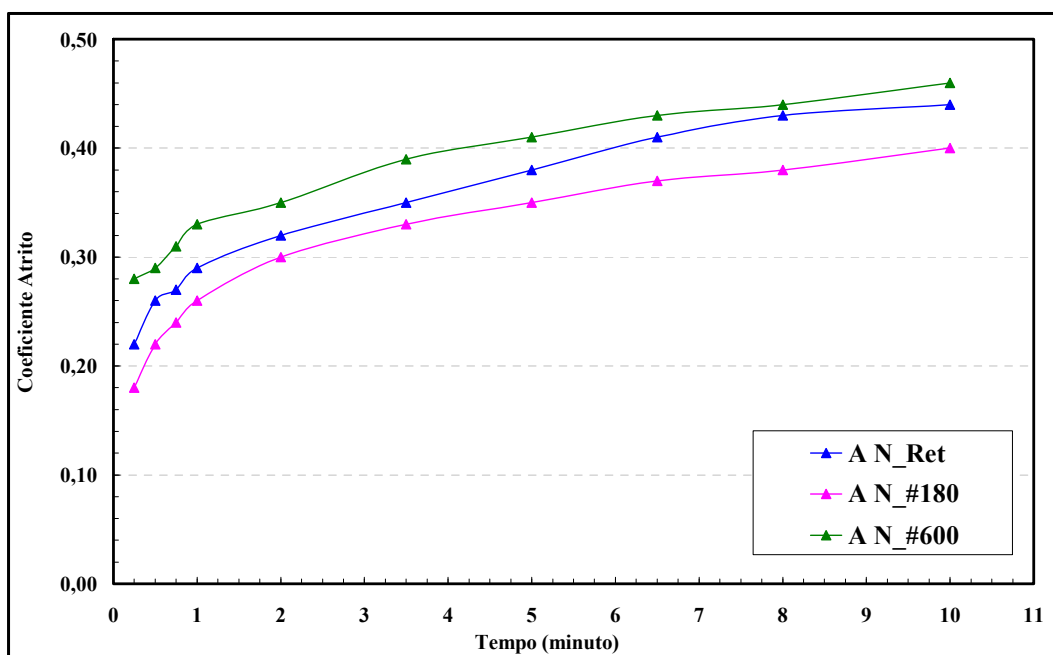


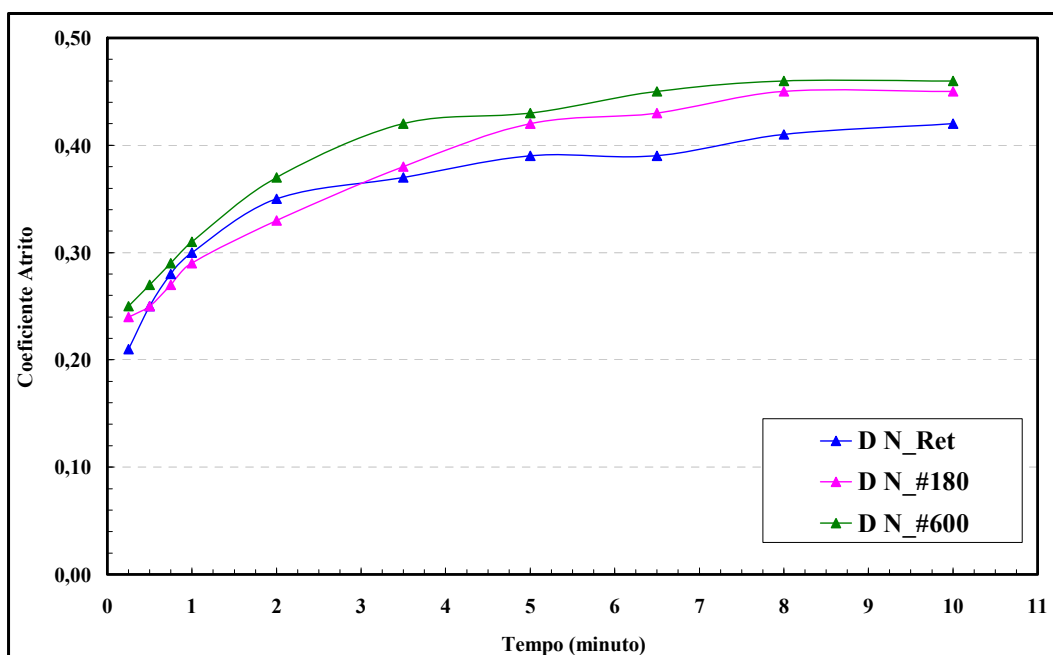
Figura 6.23: Evolução do coeficiente de atrito da primeira hora de ensaio do revestimento A lixado na lixa #180, que teve uma nova superfície gerada.

Para determinar o coeficiente de atrito inicial, obtiveram-se os valores do coeficiente de atrito após 15, 30, 45, 60, 120, 210, 300, 390, 480 e 600 segundos de ensaio. A figura 6.24 apresenta o comportamento do coeficiente de atrito inicial da primeira hora de ensaio das amostras de revestimentos A e D lixadas nas lixas #180 e #600, correlacionado com o coeficiente de atrito inicial dos revestimentos A e D retificados na condição normal. Observa-se na figura 6.24-a que, o coeficiente de atrito inicial do revestimento A lixado na lixa #180 é menor em relação ao coeficiente de atrito inicial do revestimento A retificado na condição normal. Por outro lado, o revestimento A lixado na lixa #600 apresenta um maior coeficiente de atrito inicial. Este último comportamento parece ser um comportamento típico, uma vez que, também é observado para o coeficiente de atrito inicial do revestimento D lixado na lixa #600, conforme está demonstrado na figura 6.24-b. Observa-se também nesta mesma figura que o revestimento D lixado na lixa #180, também apresenta um coeficiente de atrito inicial maior em relação ao revestimento que foi apenas retificado.

Com esta análise concluiu-se, a princípio, que a nova superfície gerada exerceu uma influência positiva no coeficiente de atrito inicial, uma vez que, é observado na figura 6.24 que os revestimentos que tiveram a nova superfície gerada apresentaram um maior coeficiente de atrito inicial, exceto para o revestimento A lixado na lixa #180.



(a)



(b)

Figura 6.24: Comportamento do coeficiente de atrito inicial da primeira hora de ensaio dos revestimentos lixados nas lixas #180 e #600, que tiveram uma nova superfície gerada. (a)–revestimento A; (b)– revestimento D.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

De acordo com a análise dos resultados, são apresentadas sinteticamente as conclusões mais significativas deste trabalho:

- A metodologia desenvolvida para caracterizar a topografia de superfície possibilitou quantificar topograficamente as superfícies das amostras de revestimento e placa de pressão.
- A tabela em seguida sintetiza os parâmetros desenvolvidos para a caracterização topográfica dos revestimentos e placa de pressão.

CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA	REVESTIMENTO	PLACA DE PRESSÃO
SUPERFÍCIE	Primitiva	Rugosidade
APOIO INICIAL (%)	1	1
PROFUNDIDADE ATIVA (µm)	20	4

- A metodologia desenvolvida para a realização de ensaios tribológicos utilizando um tribômetro na configuração pino sobre disco, além de reproduzir mecanismos de desgastes similares aos que foram observados em campo, também reproduz taxa de desgaste e coeficiente de atrito apresentados pelo dinamômetro tradicional.

- Com esta metodologia reduziu-se o tempo de testes de até 10 dias no dinamômetro para 3 horas no tribômetro, reduzindo também o custo dos ensaios, por utilizar protótipos mais simplificados e de fácil confecção.
- A tabela abaixo sintetiza os principais parâmetros laboratoriais que simulam, com ensaios tribológicos simplificados, comportamentos tribológicos similares aos apresentados pelo campo e pelo dinamômetro tradicional.

PARÂMETROS LABORATORIAIS	TRIBÔMETRO
Amostra revestimento (mm)	$\varnothing = 13$
Amostra placa de pressão (mm)	$\varnothing_{\text{ext}} = 76$ $\varnothing_{\text{int}} = 8$
Velocidade de Rotação (RPM)	750
Força Normal (N)	200
Tempo de Teste (h)	3
Raio (mm)	25
Meio	Ar ambiente
Condições de teste	a seco

- O processo de pré-condicionamento superficial melhora a topografia de superfície dos revestimentos em termos de rugosidade quadrática média e capacidade de apoio, mas não exerce influência no regime transiente da taxa de desgaste.
- O pré-condicionamento superficial obtido pelo processo de lixamento laboratorial elimina as irregularidades superficiais que as amostras de revestimento herdaram durante o processo de produção, gerando uma nova superfície topográfica.
- A geração de uma nova superfície não exerceu influência no regime transiente inicial da taxa de desgaste.
- A geração de uma nova superfície exerceu influência no coeficiente de atrito inicial. As amostras que tiveram uma nova superfície gerada apresentaram um maior coeficiente de atrito inicial em relação às amostras que não tiveram uma nova superfície gerada.

- A aplicação da tribologia ao estudo e desenvolvimento de materiais para embreagens permitiu desenvolver uma nova metodologia para caracterizar a topografia de superfície e para reproduzir em laboratório com ensaios simplificados resultados similares aos que são observados em campo.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade deste trabalho, sugere-se uma análise mais detalhada da microestrutura dos revestimentos, e uma caracterização mais aprofundada dos mecanismos de desgaste atuantes quando são realizados testes tribológicos com os parâmetros laboratoriais que foram desenvolvidos neste trabalho.

Sugere-se também que seja dada a continuidade nos estudos do efeito do pré-condicionamento superficial no regime transiente da taxa de desgaste, uma vez que, os ensaios realizados para este estudo não foram suficientes para se ter conclusões mais enfáticas. É sugerido que se faça um estudo do pré-condicionamento da superfície dos revestimentos através da lixamento laboratorial com lixas abrasivas de granulometria de #600 e #1000 mesh.

Sugere-se, ainda, um estudo mais aprofundado do coeficiente de atrito inicial, com a realização de testes laboratoriais mais detalhados e aprofundados no regime inicial do atrito, fazendo-se também uma caracterização via microscopia eletrônica de varredura e interferometria a laser.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bennett, J. M. “Recent developments in surface roughness characterization”, Measurement Science Technology, v. 3, p. 1119-1127, 1992.

Bezzazi, M. et al. “Experimental characterization of frictional behaviour of clutch facings using Pin-on-disk machine”, Materials & Design, v. 28, Issue 7, p 2148-2153, 2007.

Boz, M.; Kurt, A. “The effect of Al_2O_3 on the friction performance of automotive brake friction materials”, Tribology International, v. 40, p. 1161-1169, 2007.

Chen, Q.; Yang, S.; Li, Z. “Surface roughness evaluation by using wavelets analysis”, Precision Engineering, v. 23, p. 209-212, 1999.

Chiaverini, V., “Aços e ferros fundidos”, 7ª Edição, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 1996, 599p.

Costa, P. G. “Bíblia do carro”, Oficina e Cia, 2002. Disponível em: <<http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/biblia.asp?status=visualizar&cod=87>> Acesso em: 5 de out. de 2007.

Czichos, H. “A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear”, Elsevier, Tribology, Amsterdam, 1978.

Czichos, H. “Polymer wear and its control”. In: Lee LH, ACS Symp Series, p. 287–293, 1985.

Czichos, H. "Friction and Wear of Materials, Construction Elements and Constructions, Causes, Analyses, Optimisation", Ed. W. J. Bartz, Tribology International, v. 16, Issue 2, 1983, 119p.

Dagnall, H. "Exploring surface texture", 2° ed, Leicester, Rank Taylor Hobson, Nov., 1986.

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.

Dong, W. P.; Sullivan, P. J.; Sout, K. J. "Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography III: Parameters for characterizing amplitude and some functional properties", Wear, v. 178, p. 29-43, 1994.

Eriksson, M.; Bergman, F; Jacobson, S. "On the nature of tribological contact in automotive brakes", Wear, v. 252, p. 26-36, 2002.

Eriksson, M; Jacobson, S. "Tribological surfaces of organic pads", Tribology International, v. 33, p. 817-827, 2000.

Fernandes, G. P. et al. "Correlation between laboratory small scale pin on disc and full scale bench tests of dry clutches", V Encontro SBPMat, Florianópolis, Santa Catarina, 8-12 de out, 2006.

Gadelmawla, E. S.; Koura, M. M.; Maksoud, T. M. A.; Elewa, I. M.; Soliman, H. H. "Roughness Parameters", Journal of Materials Processing Technology, v. 123, p. 133 – 145, 2002.

Gregori, I.R.S.; Zanotto, P.S.; Haertel Jr., W. "Definition on the relationship between clutch facing on vehicle and bench testing using reliability and DOE (Experimental Design for Experiment)". SAE paper 2005-01-1766.

Hanada, H. “Sophisticated filtration technique for 3D surface topography data of rectangular area”, *Wear*, Accepted 28 August 2006, 2007.

Ho, S. C.; Chern Lin, J. H.; Ju, C. P. “Effect of carbonization on mechanical and tribological behavior of a copper-phenolic-based friction material”, *Carbon*, v. 43, p. 491-502, 2005.

Ho, S. C.; Chern Lin, J. H.; Ju, C. P. “Effect of fiber addition on mechanical and tribological properties of a copper/phenolic-based friction material”, *Wear*, v. 258, p. 861-869, 2005a.

Ho, S. C.; Chern Lin, J. H.; Ju, C. P., “Effect of phenolic content on tribological behaviour of carbonized copper-phenolic based friction material”, *Wear*, v. 258, p. 1764-1774, 2005b.

Hutchings, I. M. “Tribology: Friction and wear of engineering materials”, CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 1992, 273p.

Incropera, F. P.; DeWitt, D. P., “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, JC Editora, 5ª Edição, 2003, 495 p.

Jang, H. et al “The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials”, *Wear*, v. 256, p. 406-414, 2004.

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.

Josso, B.; Burton, D. R.; Lator, M. J. “Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation”, *Wear*, v. 252, p. 491-500, 2002.

Jost, H. P. “Lubrication (Tribology) Education and Research”, (‘Jost Report’) UK Department of Education and Science, HMSO (Her Majesty’s Stationery Office), 1966, 79p.

Kim, S. J.; Jang, H. “Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp”, *Tribology International*, v. 33, p. 477-484, 2000.

Kjeldsteen, P. “Tribological investigations of P/M Stainless steels mixed with HCX23 against Al_2O_3 & SiC”, Danfoss Research Report MUP2, 1997.

Kjeldsteen, P. “Wear resistance of PM materials and its dependency on surface topography”, Procs of Powder Metallurgy World Congress (PM '94), v. 1, Paris, France, 6-9 June 1994, Ed. de Physique (France), p. 657-660, 1994.

Lingadurai, K.; Shunmugam, M.S. “Metrological characteristics of wavelet filter used for engineering surfaces”, Measurement, v. 39, p. 575-584, 2006.

MountainsMap[®] Software from Digital Surf

www.mountainsmap.com

www.digitalsurf.com

Mutlu, I.; Eldogan, O.; Findik, F. “Tribological properties of some phenolic composites suggested for automotive brakes”, Tribology International, v. 39, p. 317-325, 2006.

Ost, W.; De Beats, P.; Degrieck, J. “The tribological behaviour of paper friction plates for wet clutch application investigated on SAE#II and pin-on-disk test rigs”, Wear, v. 249, p. 361-371, 2001.

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.

Raja, J.; Muralikrishnan, B.; Fu, S. “Recent advances in separation of roughness, waviness and form”, Precision Engineering, v. 26, p. 222-235, 2002.

Ripa, M. et al “Tribological Characterisation of surface topography using Abbott-Firestone Curve”, National Tribology Conference, 24-26 September 2003, The Annals of University “Dunarea de Jos” of Galati, Fascicle III, Tribology, 2003 ISSN 1221-4590.

Samyn, P.; De Baets, P.; Schoukens, G.; Van Peteghem, A.P. “Large-scale tests on friction and wear of engineering polymers for material selection in highly loaded sliding systems”, *Materials and Design*, v. 27, p. 535-555, 2006.

Silva Jr., W. M. “Tese de doutorado em andamento”, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W. “Engineering tribology”, Butterworth – Heinemann, 2^a edition, 2001, 744p.

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.

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.

Stout, K. J. et al. “Analytical Techniques in Surface Topography and their Application to a Running-in Experiment”, *Wear*, v. 43, p. 99-115, 1977.

Subaru, “Manual Transmission Clutch”, Subaru News, March 2002, Paper SNS 0204

Thomas, T.R. (editor), *Rough Surfaces*, Longman Group Limited, 1982.

Trautwein, R. “Characterization values for determining and evaluation the surface of cylinder bores” Mable GmbH, Stuttgart, 1981.

Uetz, H.; Sommer K; Khosrawi M. “Correlation between model and workshop tests using abrasive wear operation procedures”, *Wear*, v. 69, p. 25-41, 1981.

Uyyuru, R. K.; Surappa, M. K.; Brusethaug, S. “Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite/brake pad tribo-couple”, *Wear*, v. 260, p. 1248-1255, 2006.

Whitehouse, D. J. “Handbook of Surface and Nanometrology”, CRC Press, 2003, 1100 p.

ZF_Sachs do Brasil, Empresa.

ZF_Sachs, “Apostila Técnica de Sistema de Embreagem”, Sachs Aftermarket Center, 2006
Disponível em: <http://www.zfsachs.com.br/PO/documentos/SAC%20LO3_Apostila.pdf>
Acesso em: 10 de mar. de 2007.

ZF_Sachs, “A embreagem e seus componentes”, Sachs Aftermarket Center, 2006. Disponível
em: <<http://www.zfsachs.com.br/PO/documentos/AF%20fasciculo%201.pdf>> Acesso em: 10
de mar. de 2007a.