

# EFEITO DA ALTERAÇÃO MICRO-ESTRUTURAL DO FERRO FUNDIDO NOS MECANISMOS DE DESGASTE DOS CONJUNTOS DE EMBREAGENS QUE FORAM SUBMETIDOS AO USO EM CAMPO<sup>1</sup>

Graciliano Pereira Fernandes<sup>2</sup>  
Walter Haertel Jr<sup>2</sup>  
Paulo Zanotto<sup>2</sup>  
Ivan Gregori<sup>2</sup>

## Resumo

Os materiais que constituem a embreagem têm que apresentar desempenho desejável, para possibilitar uma vida útil satisfatória e um coeficiente de atrito que seja suficientemente bom e estável, proporcionando uma transmissão de rotação regular e eficaz. Dependendo das condições de trabalho, esses materiais podem levar a falha prematura da embreagem, por não suportarem essas condições. Diversos estudos têm sido realizados, para melhorar o entendimento dos principais fenômenos envolvidos no desgaste prematuro dos discos de ferro fundidos cinzentos, utilizados em aplicações veiculares, como embreagens e sistema de frenagem. Este trabalho tem como objetivo identificar as causas que ocasionam o desgaste prematuro e excessivo, principalmente na borda externa de placas de pressão de embreagens automotivas, que foram submetidas a aplicações extremamente abusiva em campo. Foram analisados três conjuntos de embreagens que falharam em campo, apresentando desgaste prematuro e excessivo da placa de pressão.

**Palavras-chave:** Embreagem; Materiais de atrito; Placa de pressão; Geração micro-partículas metálicas.

## EFFECT OF CHANGE IN THE MICROSTRUCTURE OF GRAY CAST IRON ON THE WEAR MECHANISM OF CLUTCHES THAT WERE SUBMITTED TO USE ON THE FIELD

### Abstract

The materials used in the clutch have to ensure a smooth performance in order to provide it a satisfactory lasting life and friction coefficient that is sufficiently high and stable, thus providing regular and effective rotation transmission. Depending on the work conditions, these materials can lead to the premature failure of the clutch due to not standing such conditions. Several studies have been made to cause a better understanding of all the main phenomena involved in the premature wear of the grey cast iron discs, used in the clutch and brake system vehicles applications. The aim of this workshop is to identify the causes that are occasioning the excessive and premature wear mainly on the diameter external pressure plate used in clutch system and that were submitted to extremely abusive conditions on the field. Three clutches that failed in function due to the premature and excessive wear of pressure plates were investigated.

**Key words:** clutch; friction materials; pressure plate; metal pick-up.

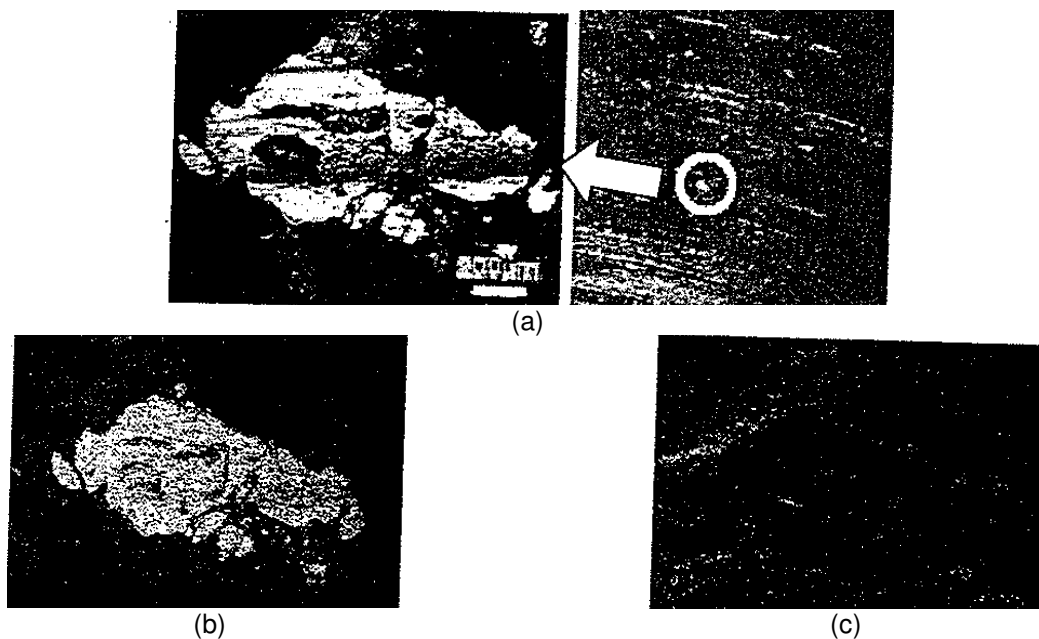
<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 64<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> ZF do Brasil – Divisão Sachs, graciliano.fernandes@zf.com

# 1 INTRODUÇÃO

Para que um veículo automotivo se desloque, é necessário que haja transmissão do movimento de rotação do eixo primário do motor ao eixo primário da caixa de marchas. Para isso, uma embreagem automotiva é montada entre o motor e a caixa de transmissão. A transmissão de rotação se faz pelo deslizamento entre o volante do motor, os discos de revestimento e a placa de pressão, durante determinado tempo. Este varia de acordo com a aplicação a qual o veículo é submetido. Certas aplicações são classificadas como abusivas, como veículos da linha extremamente pesada, utilizados no transporte da cana do canavial para as usinas. Essas aplicações exigem muito dos materiais da embreagem e em alguns casos, estes podem fazer a embreagem falhar prematuramente, por não suportarem as condições de trabalho.

Diversos estudos<sup>(1-5)</sup> têm sido realizados, com o objetivo de melhorar o entendimento, dos mecanismos responsáveis pelo desgaste prematuro dos discos de ferro fundido cinzento, utilizados nas aplicações veiculares, como embreagens e sistema de frenagem. Sanitate e Schimitt<sup>(4)</sup> e Nukumizu<sup>(5)</sup> investigaram as causas que ocasionam o desgaste acentuado nos discos de ferro fundido cinzento, utilizados nos sistemas de frenagem automotiva. Foram observados riscos profundos na superfície de trabalho dos discos, o que, conseqüentemente, reduz sua vida útil. Após identificarem os fenômenos envolvidos, os pesquisadores simularam no laboratório os mecanismos de falha, a fim de obter melhor entendimento. Durante as investigações, Sanitate e Schimitt<sup>(4)</sup> e Nukumizu<sup>(5)</sup> observaram a presença de micro-partículas metálicas incrustadas nos materiais de fricção. Estas foram caracterizadas morfológicamente, para identificar sua composição química e origem. A figura 1 mostra as análises realizadas por Nukumizu<sup>(5)</sup> utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de difração de raio-X (EDX), na caracterização das micro-partículas.



**Figura 1:** (a)- micro-partícula metálica incrustada no material de fricção utilizado em frenagem automotiva, observada via MEV; (b)- mapeamento ferro; (c)- mapeamento oxigênio.<sup>(5)</sup>

Através do mapeamento dos elementos químicos, Nukumizu<sup>(5)</sup> puderam constatar que as micro-partículas são constituídas basicamente de ferro, conforme mostra a figura 1-b. Ainda, segundo Nukumizu,<sup>(5)</sup> há uma camada de óxido de ferro entre a superfície da micro-partícula metálica e a superfície do disco, pois foi encontrado oxigênio na micro-partícula como mostra a figura 1-c. Sanitate e Schimitt<sup>(4)</sup> e Nukumizu<sup>(5)</sup> concluíram que as micro-partículas originam dos discos de ferro fundido cinzento e que inicialmente sua micro-estrutura é similar a do disco. Sanitate e Schimitt<sup>(4)</sup> acreditam que os principais responsáveis pela geração das micro-partículas, são os elementos que compõe os materiais de atrito, pois sua dureza é maior do que a do disco. Na simulação laboratorial, Sanitate e Schimitt<sup>(4)</sup> utilizaram seis diferentes materiais de fricção e concluíram que todos os seis materiais arrancaram micro-partículas da superfície do ferro fundido cinzento, mas que em diferentes geometrias e intensidade e que alguns materiais eliminavam as micro-partículas durante os testes e que outros mantinham as micro-partículas por um longo período de tempo. Nukumizu<sup>(5)</sup> em seu trabalho concluíram que a quantidade de ferro que irá transferir para os materiais de atrito dependerá da temperatura de trabalho e do volume de vazios existentes nos materiais de atrito. Quanto maior for a temperatura de trabalho e o volume de vazios maior é a probabilidade de haver transferência de material. Com seus testes laboratoriais, Nukumizu<sup>(5)</sup> observaram que o arrancamento das micro-partículas está ligado ao limite de resistência a tração do ferro fundido, sendo que este reduz drasticamente com o aumento da temperatura.

Riahi e Alpas em 2003<sup>(6)</sup> fizeram um mapeamento de desgaste para os ferros fundidos cinzentos quando submetidos a diferentes forças normais e velocidades de deslizamento. Riahi e Alpas<sup>(6)</sup> identificaram diferentes regimes de severidade classificados como baixo, médio e severo e que esses regimes dependem das condições do sistema. Através dos estudos, os autores observaram que dependendo da pressão específica de contato e da velocidade de deslizamento, micro-partículas de ferro podem desprender devido a propagação sub-superficial de micro-trincas que se propagam por meio dos veios de grafita presentes no ferro fundido.

O objetivo desse trabalho é identificar as causas da agressividade que está ocorrendo em campo, nas aplicações abusivas, com veículos da linha extremamente pesada, ocasionando um desgaste acentuado na borda externa da placa de pressão.

## 2 MATERIAL E MÉTODO

Três conjuntos de embreagens utilizadas em condição extremamente abusiva em campo, apresentando desgaste excessivo na borda externa da placa de pressão, foram analisados. Um conjunto utilizado sob condição normal também foi submetido a análise. A tabela 1 apresenta as características e a designação das amostras.

**Tabela 1:** Descrição e características dos conjuntos de embreagens que foram analisados.

CONJUNTO	REVESTIMENTO	APLICAÇÃO CAMPO	MOTIVO DE TROCA
1	A	Abusiva	Desgaste excessivo na borda externa da placa de pressão
2	A	Abusiva	
3	B	Abusiva	
4	B	Normal	Fim de vida revestimento

Análises metalográficas foram realizadas nas superfícies de deslizamento e nas seções transversais das placas de pressão. As superfícies de deslizamento das placas de pressão foram limpas com acetona e álcool por um período de 10 minutos no minissom. Posteriormente foram atacadas com reativo de nital 2%. Para a caracterização micro-estrutural da seção transversal das placas de pressão, as amostras foram preparadas de acordo com as técnicas de preparação para análise metalográfica: corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque metalográfico, seguindo as normas ASTM E 03 - 07 e ASTM E 407 - 07. Foram realizadas medições de dureza Brinell (HB) com indentador esférico de 2,5 mm e carga de 187,5 Kgf e medições de micro-dureza Vickers (Hv) 0,5 gf, com o equipamento Durômetro Vickers, fabricante Shimadzu, modelo FCA 23544. As micro-partículas metálicas presentes no revestimento foram arrancadas com auxílio de uma pinça e em seguida embutidas a quente em resina epóxi com fibra mineral para medição de micro-dureza. Todo o trabalho de caracterização micro-estrutural foi realizado no Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais (IPEI), unidade de São Bernardo do Campo – SP.

Algumas amostras de placas de pressão com desgaste excessivo, foram submetidas a um processo de jateamento com areia por um período de 5 minutos a uma pressão constante. Após o jateamento as amostras foram atacadas com reativo de nital 2% e observadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV) - equipamento Modelo Leo 940 A, fabricante Zeiss e espectroscopia difração de raio-x (EDX) para caracterização. Amostras representativas de revestimentos também foram caracterizadas via MEV / EDX. Foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) operado pela Associação Brasileira de Tecnologia de Luz Síncrotron (ABTLuS).

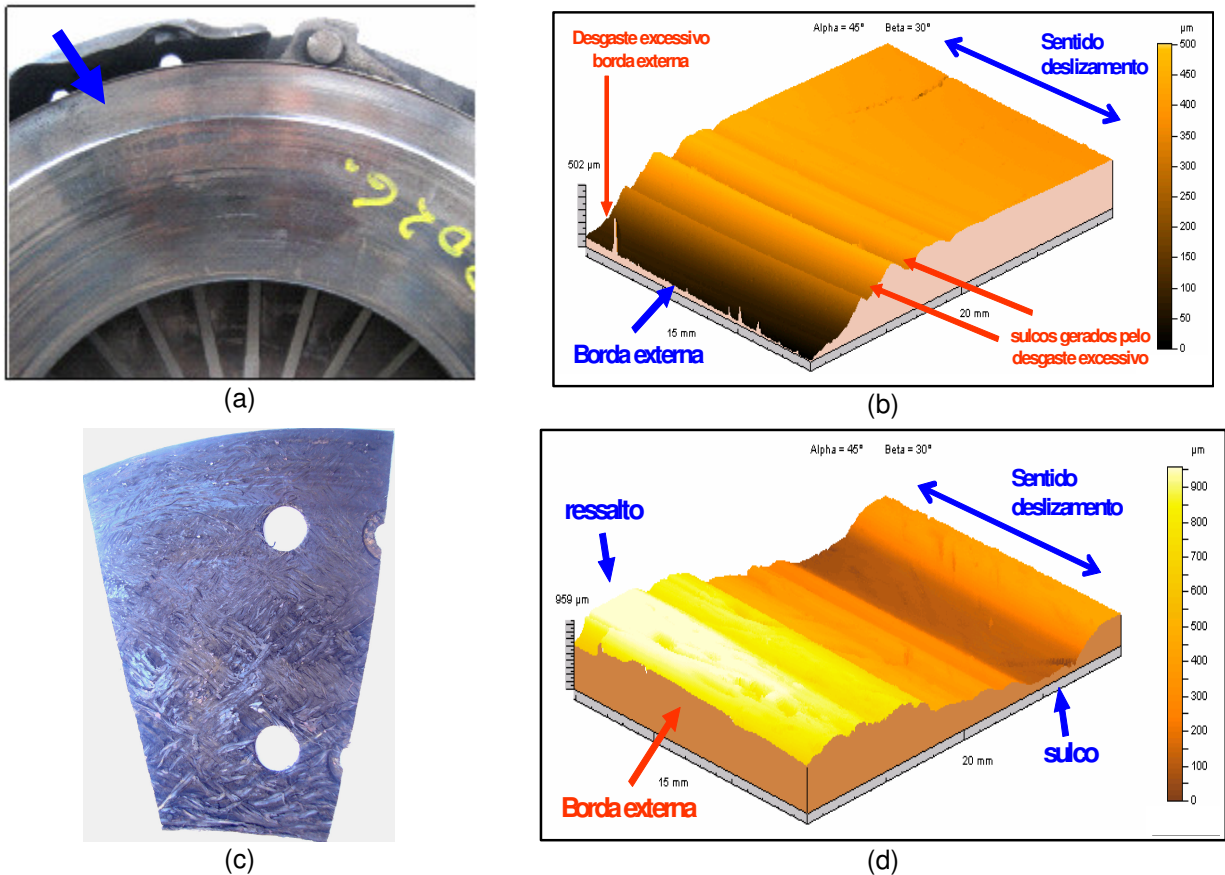
Foi também realizada a caracterização topográfica via interferometria a laser (IL) dos revestimentos e placa de pressão, principalmente na borda externa para traçar o perfil da superfície desgastada e ajudar no entendimento do fenômeno. O equipamento utilizado foi o Micro Focus Expert IV da UBM pertencente ao LTM. As regiões analisadas tiveram dimensões de 15 x 20 mm e densidade de pontos de 500 x 15 no eixo Y e X respectivamente. As análises foram realizadas no modo contínuo.

### **3 RESULTADOS**

Como os três conjuntos que falharam em campo apresentam características muito semelhantes, na Figura 2 será apresentado, apenas, o conjunto 1 (placa de pressão e revestimento tipo A) que apresentou desgaste excessivo na borda externa da placa de pressão. Fazendo-se uma análise visual na placa de pressão (Figura 2-a), sinais de super aquecimento, como existência de trincas térmicas, coloração azulada, marcas de queima como “hot spot” e em determinados locais escoamentos de material, são perceptíveis. Na borda externa (seta azul), o desgaste excessivo é nitidamente visível. Através da topografia de superfície, obtida via interferometria a laser (Figura 2-b), este efeito torna-se ainda mais claro. Riscos e sulcos profundos provavelmente gerados pela ação de partículas abrasiva também podem ser observados através da topografia.

Avaliando o revestimento A (Figura 2-c) observa-se que na borda interna há sinais de queima. Nota-se que ocorreu a degradação térmica da matriz, pois houve

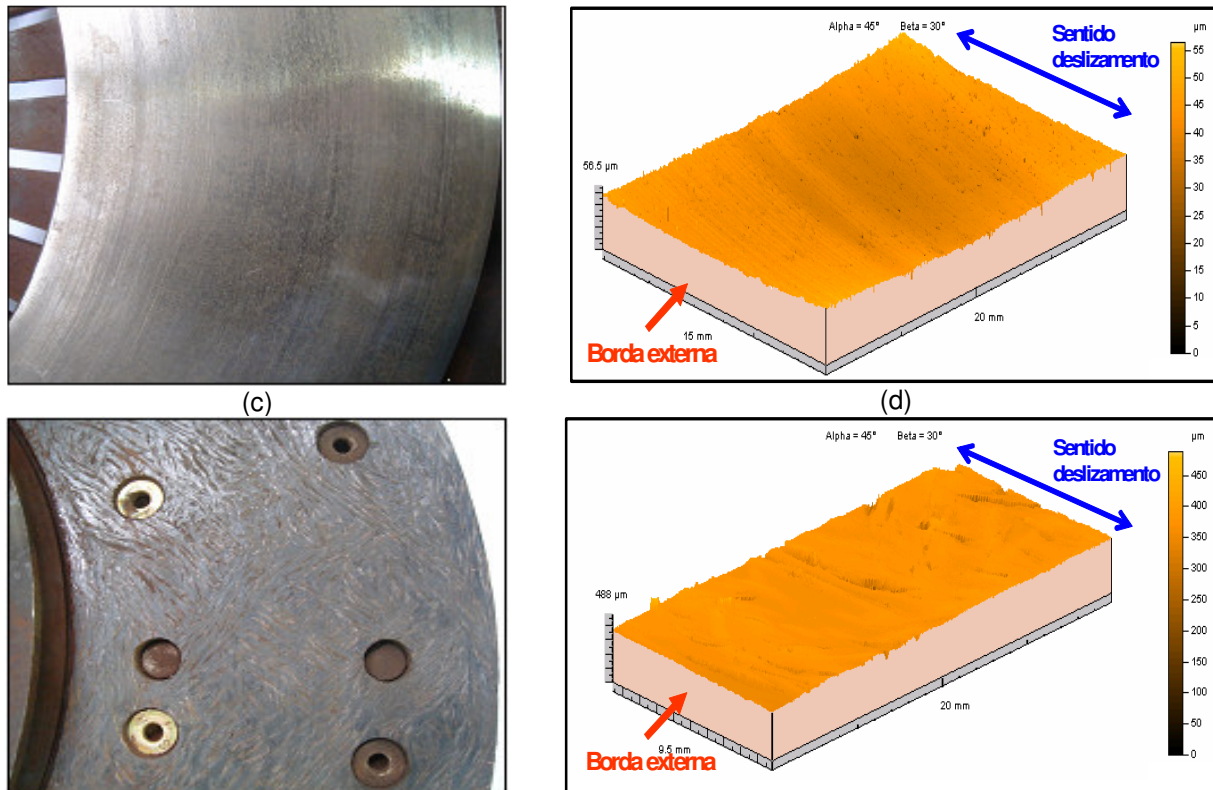
arrancamento e deformação dos fios de vidro e cobre, tornando-os expostos. Na borda externa observa-se a formação de um ressalto (Figura 2-d) que pode ter sido gerado devido a elevada carga térmica que a placa pressão foi submetida. Com a carga térmica, após o resfriamento e em função das tensões que são geradas na placa, há uma inversão térmica da placa de pressão. Pressupõe-se que, em função disto, em determinados instantes o contato entre a placa de pressão e o revestimento torna-se mais acentuados na borda externa. Observa-se também na borda externa do revestimento uma grande concentração de micro-partículas metálicas incrustadas (setas vermelhas na Figura 2-c).



**Figura 2:** Conjunto 1; (a)- placa de pressão com desgaste excessivo na borda externa da placa de pressão. Seta azul indica desgaste excessivo na borda externa da placa de pressão; (b)- topografia de superfície da placa de pressão; (c)- revestimento tipo A; (d)- topografia de superfície do revestimento.

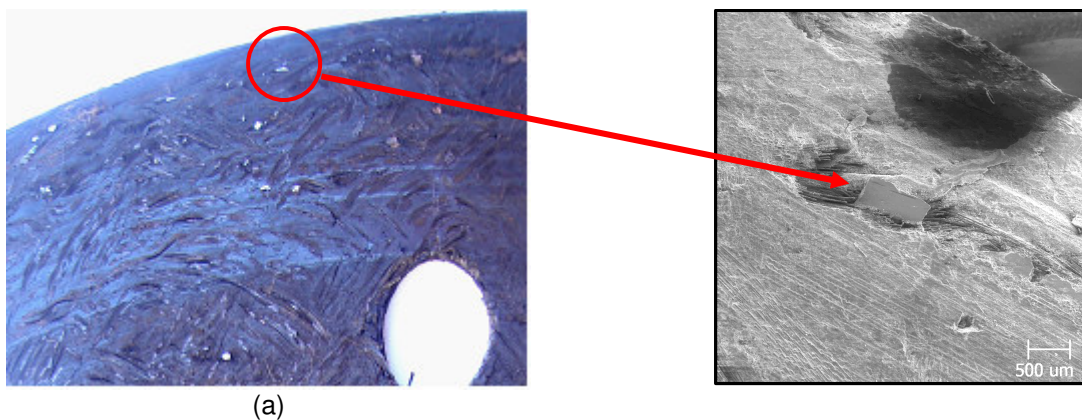
A Figura 3 apresenta o conjunto 4 (placa de pressão e revestimento tipo B) que foi submetido ao uso normal. Analisando a placa de pressão (Figura 3-a), não se observam características físicas que apontam para o uso abusivo. O que se vê é que em toda a superfície de deslizamento os aspectos topográficos são muito similares. Não há presença de trincas térmicas, coloração azulada, marcas de queima, escoamento de material e desgaste excessivo na borda externa da placa de pressão. Para o revestimento B (Figura 3-c) também constata que toda a superfície apresenta aspecto topográfico bastante semelhante, não havendo sinais de queima do revestimento na borda interna, com degradação térmica da matriz fenólica,

arrancamento e deformação dos fios de fibra e cobre. Através da topografia de superfície (Figura 3-d) observa-se que não houve inversão térmica do conjunto, pois não há formação de ressalto.



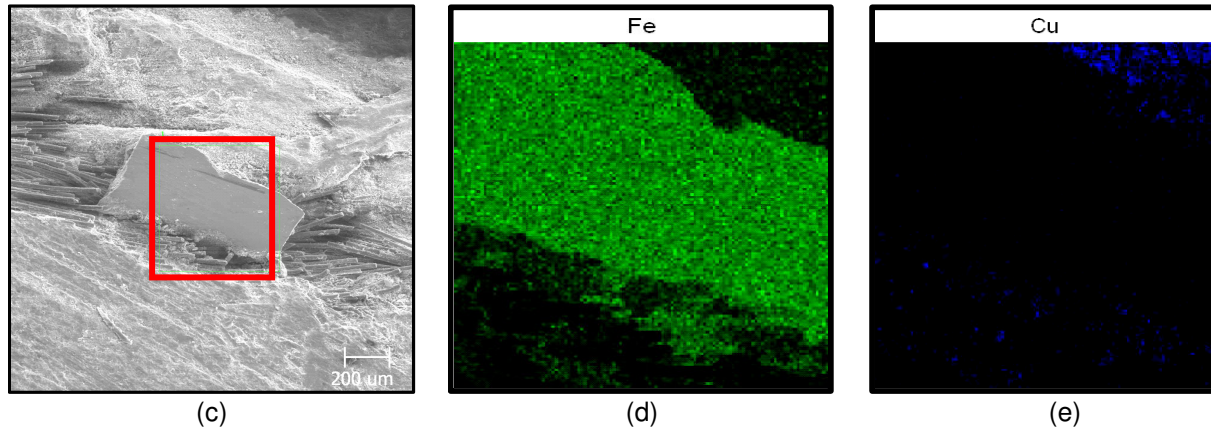
**Figura 3:** Conjunto 4 submetido ao uso normal. (a)- placa de pressão; (b)- topografia de superfície da borda externa da placa de pressão; (c)- revestimento tipo B; (d)- topografia de superfície do revestimento.

A Figura 4-a apresenta uma micro-partícula incrustada na borda externa do revestimento A, e a Figura 4-b mostra esta micro-partícula sendo observada via microscopia eletrônica de varredura.



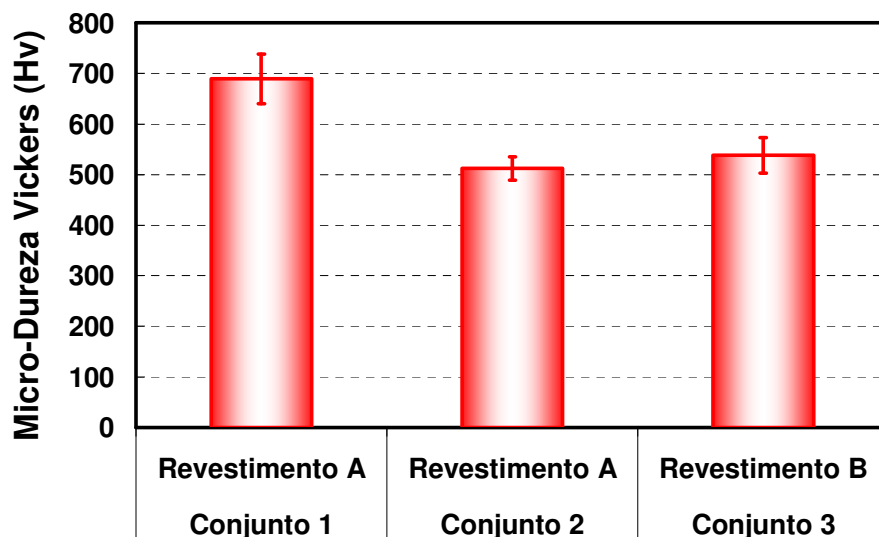
**Figura 4:** (a)- micro-partícula incrustada na borda externa do revestimento A do conjunto 1; b - micro-partícula observada via MEV.

A Figura 5-a mostra uma área na micro-partícula no qual foi realizado um mapeamento via EDX para identificar os elementos químicos presentes. A Figura 5-b mostra que há presença de ferro somente na micro-partícula. Como não foi detectada presença de cobre na micro-partícula, conforme mapeamento mostrado na figura 5-c, conclui-se que a micro-partícula não é um fio de cobre, e sim material que despreendeu da placa de pressão e incrustou no revestimento, pois a composição do revestimento não contém ferro, e que o ferro é um dos principais elementos que constitui a micro-estrutura da placa de pressão. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Nukumizu<sup>(5)</sup> em seu trabalho.



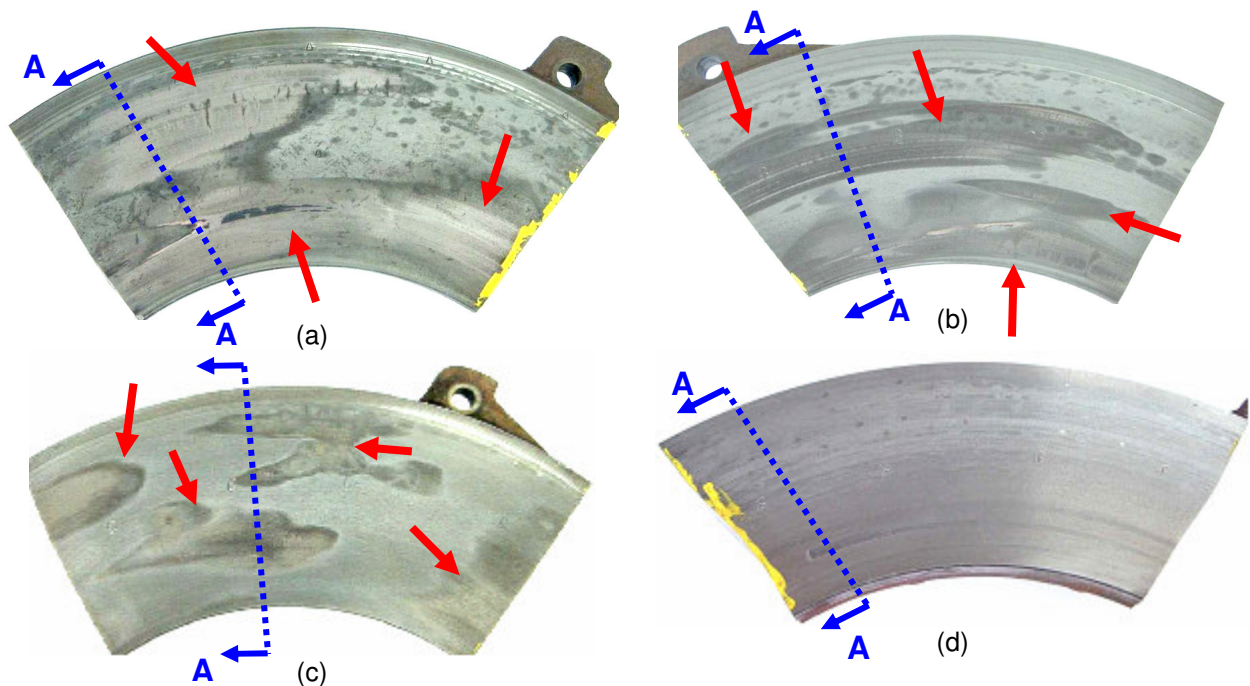
**Figura 5:** (a)- área na micro-partícula onde foi realizado mapeamento via EDX; (b)- mapeamento do ferro; (c)- mapeamento do elemento cobre.

A Figura 5 apresenta os resultados das medições de micro-dureza Vickers realizadas nas micro-partículas de ferro, que estavam incrustadas nos revestimentos dos três conjuntos que falharam no campo. Foram encontrados valores de micro-dureza médios de 689 Hv para o conjunto 1, 512 Hv para o conjunto 2 e 538 Hv para o conjunto 3.



**Figura 5:** Micro-dureza Vickers das micro-partículas de ferro incrustadas nos revestimentos.

A Figura 6 apresenta placas de pressão após ataque com reativo de nital 2% nas superfícies de deslizamento. Observa-se que as três placas de pressão com desgaste excessivo apresentam ao longo da superfície de deslizamento, regiões com diferentes tonalidades, conforme indica as setas vermelhas, dizendo que houve alteração na micro-estrutura nessas regiões distintas. Para a placa de pressão trabalhada na condição normal (Figura 6-d), não foi observada regiões distintas, o que indica que não houve alteração na sua micro-estrutura. O corte AA na Figura 6 indica onde foram realizadas as análises na seção transversal para identificar a micro-estrutura presente nas regiões transformadas. A Figura 7 apresenta os resultados. Como os resultados obtidos para os conjuntos que tiveram alteração da micro-estrutura são semelhantes, desta forma será apresentados os resultados obtidos para o conjunto 2.

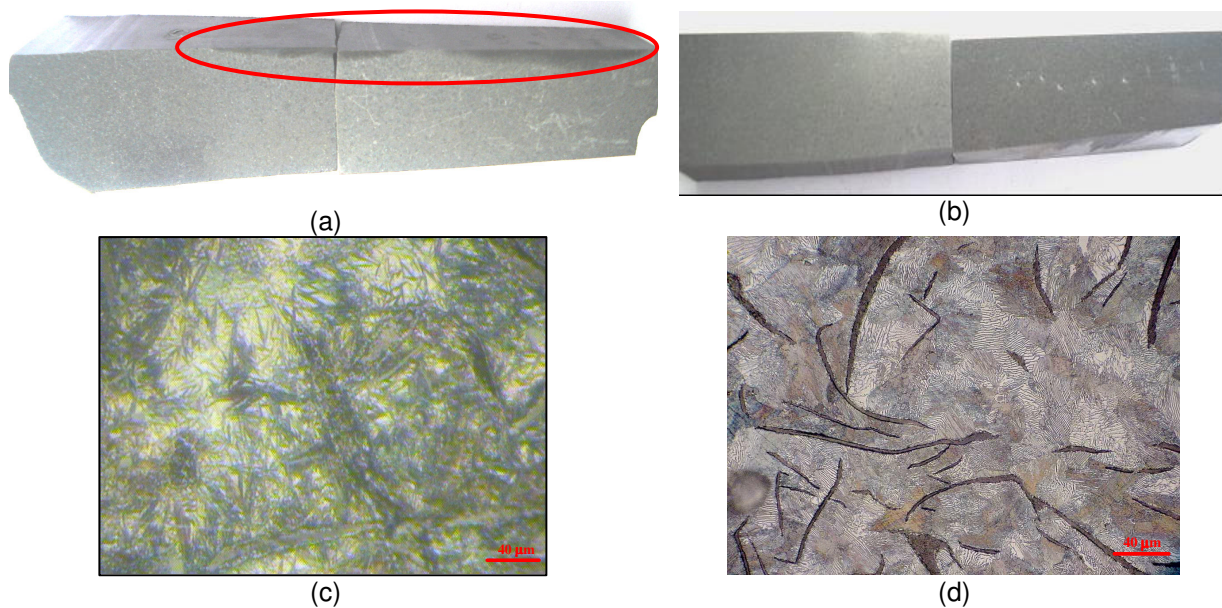


**Figura 6:** Superfície de trabalho das placas de pressão após ataque com reativo de nital 2%. Setas vermelhas indicam diferentes regiões onde ocorreu alteração da micro-estrutural; (a)- conjunto 1; (b)- conjunto 2; (c)- conjunto 3; (d)- conjunto 4, submetido condição normal.

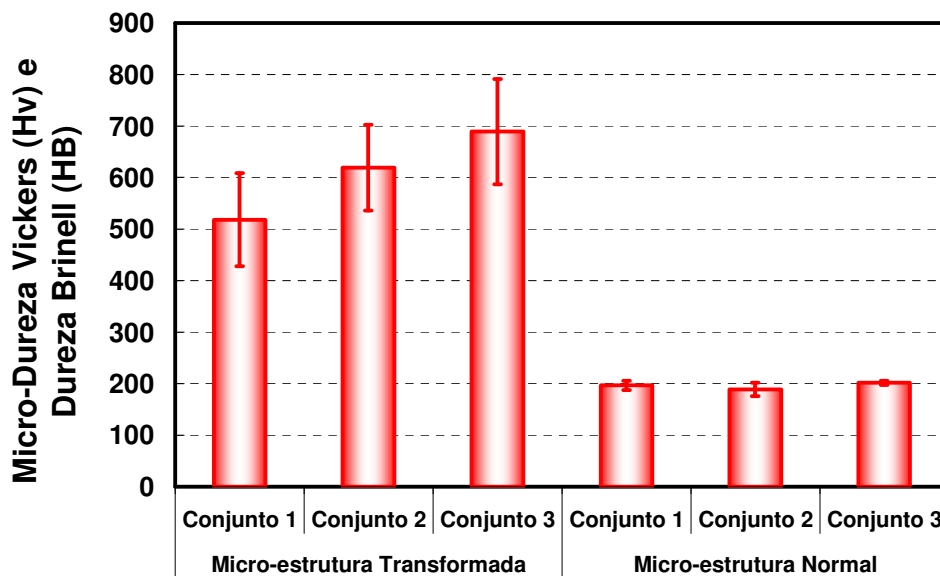
Através da seção transversal AA (Figura 7-a) observa-se que da borda interna para o centro da placa de pressão e bem próximo à superfície de deslizamento há regiões mais escuras (circulo vermelho), que são as regiões onde ocorreram as alterações micro-estruturais. Acredita-se que a alteração da micro-estrutura ocorreu apenas próxima à superfície de deslizamento porque esta região sofre maior aquecimento. Este superaquecimento é provocado pelo calor de atrito gerado quando a placa de pressão esta em contato por deslizamento com o revestimento. Por estar mais próximo do meio externo, isso proporciona uma maior dissipação de calor, acelerando o resfriamento. Nas regiões que sofreram alteração da micro-estrutura é observada a presença da martensita. A Figura mostra 7-c mostra a martensita, onde pode se ver uma micro-estrutura na forma de agulhas o que é uma característica típica deste constituinte.



A Figura 8 apresenta os valores de dureza médios das diferentes micro-estruturas presentes nas placas de pressão dos conjuntos 1, 2 e 3. Observa-se que os valores médios de micro-dureza Vickers medidas nas regiões onde houve alteração micro-estrutural são da ordem de 450 Hv a 600 Hv, enquanto que os valores médios de dureza Brinell medidos na micro-estrutura básica (perlítica) do ferro fundido cinzento são de 200 HB. Nota-se que o valor da micro-dureza da micro-estrutura alterada é na ordem de 2 a 3 vezes superior a micro-estrutural padrão da placa de pressão.



**Figura 7:** (a)- seção transversal da placa de pressão que falhou em campo mostrando regiões próximo a superfície de deslizamento onde ocorreram alteração da micro-estrutura; (b)- seção transversal da placa de pressão submetida ao uso normal não apresentando alteração da micro-estrutura; (c)- presença da martensita na região transformada; (d)- perlita.

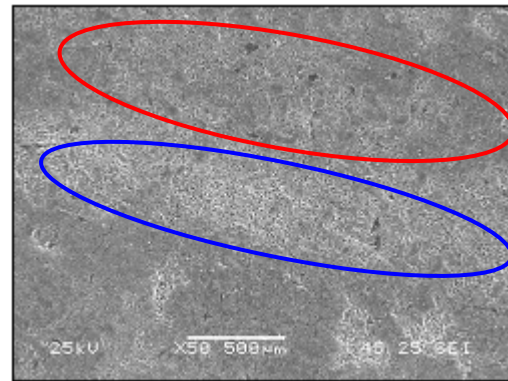


**Figura 8:** Médias das durezas Vickers e Brinell medidas nas regiões onde houve alteração de micro-estrutura e na micro-estrutura perlítica.

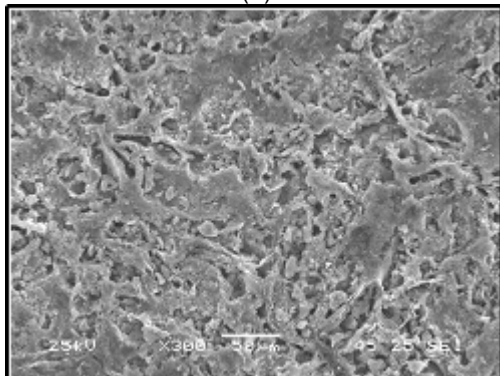
A Figura 9 mostra a superfície de uma placa de pressão após jateamento com areia e posteriormente atacada com reativo de nital 2%. Este processo tem como objetivo verificar a fragilidade da micro-estrutura transformada. Pode-se ver claramente na figura 9-a diferentes regiões com diferentes colorações. Quando essas regiões são observadas via MEV (Figura 9-b) observa-se na superfície diferentes aspectos topográficos, onde há regiões irregulares (circulo azul) e regiões mais lisas (circulo vermelho). Em maiores aumentos (Figura 9-c) os diferentes aspectos topográficos tornam-se ainda mais evidentes. A explicação para esta diferença de topografia é que nas regiões onde houve alteração micro-estrutural é de elevada dureza, conforme resultados apresentados na Figura 8. Quando estas regiões são submetidas ao jateamento com areia, devido a sua elevada dureza, tornam-se mais frágeis. Com a presença dos veios de grafita nas áreas onde houve a alteração, com o impacto dos grãos de areia sobre a superfície, elas se tornam quebradiças, havendo o desprendimento de material e gerando o aspecto topográfico apresentado.



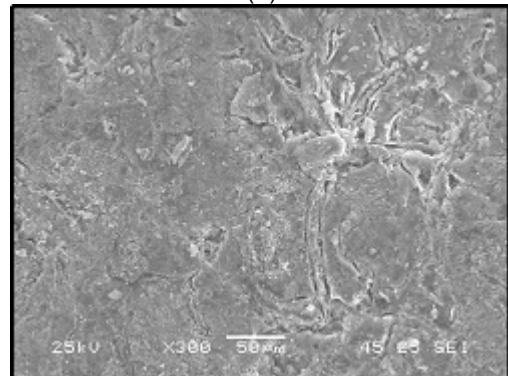
(a)



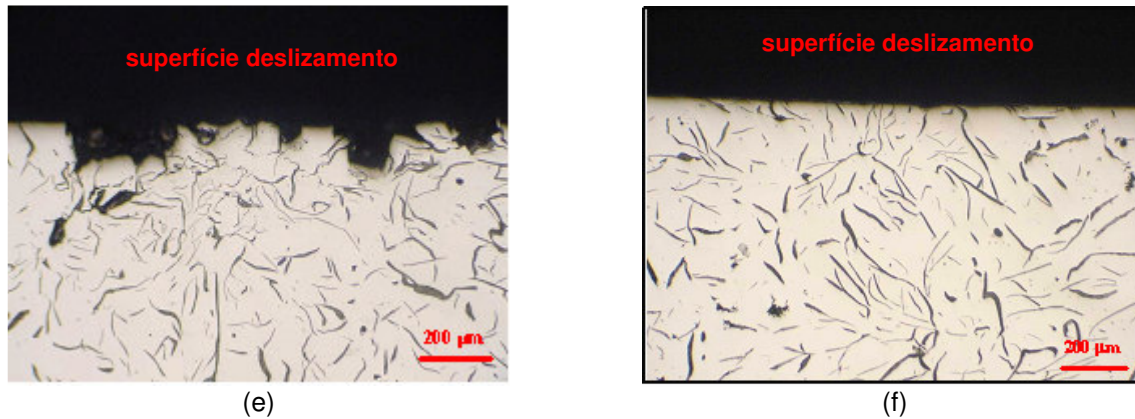
(b)



(c)



(d)



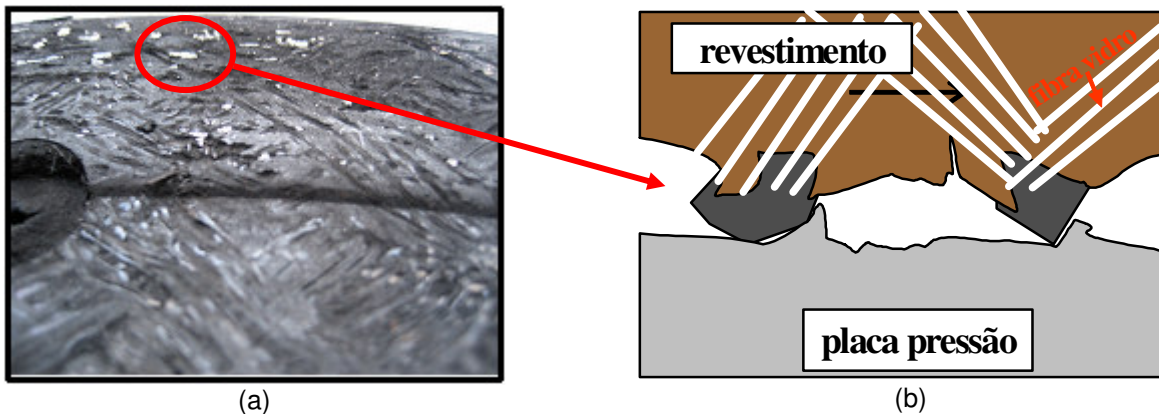
**Figura 9:** (a)- Superfície de deslizamento da placa de pressão após jateamento com areia e ataque com reativo de nital 2%; (b)- amostra observada via microscopia eletrônica; (c)- região transformada; (d)- região não transformada; (e)- seção transversal da região transformada sem ataque químico mostrando arrancamento das micro-partículas nos contornos dos veios; (f)- seção transversal da região não transformada sem ataque químico.

Este fenômeno pode ser melhor visualizado através da seção transversal da placa de pressão (Figuras 9-e e 9-f). Como nas regiões transformadas há presença dos veios de grafita, acredita-se que o desprendimento de material ocorre principalmente nos contornos dos veios, por serem micro-constituintes menos resistentes. As regiões que não sofreram transformação de fase (micro-estrutura perlítica) por serem mais tenazes têm uma melhor absorção dos impactos das partículas de areia durante o processo de jateamento. Por apresentarem menores durezas, são mais dúcteis e conseqüentemente permanecem menos quebradiças do que as regiões transformadas. Sendo assim, essas regiões apresentam uma melhor resistência mecânica para absorver os impactos dos grãos de areia, permanecendo mais lisas, conforme mostra as Figuras 9-b e 9-d.

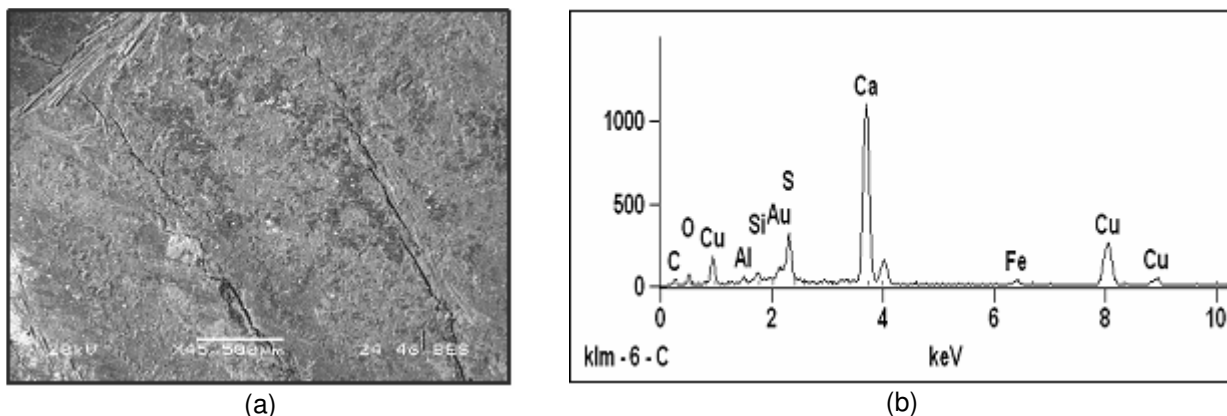
Riahi e Alpas<sup>(6)</sup> mostraram que dependendo da pressão específica de contato e velocidade de deslizamento ocorre desprendimento de material no ferro fundido cinzento, através da propagação de micro-trincas sub-superficial. Mostraram que os veios de grafita têm uma forte influência no desprendimento de material, pois propicia a propagação das micro-trincas. Acredita-se que em função da severidade da aplicação, a placa de pressão sofre uma inversão térmica fazendo com que a pressão específica de contato na borda externa aumente. Como a velocidade de deslizamento na borda externa é maior, e juntamente com as transformações da micro-estrutura, micro-partículas desprendem da superfície da placa e incrustam no revestimento. Como a dureza das micro-partículas é maior em relação a dureza da placa de pressão, elas riscam a placa causando o desgaste excessivo na borda externa. Através da representação apresentada na Figura 10, este efeito pode ser visualizado. A Figura 10-a mostra uma micro-partícula de ferro incrustada no revestimento, e a Figura 10-b, mostra a micro-partícula incrustada no revestimento riscando a placa de pressão. Com esta investigação concluí-se que o causador do desgaste excessivo na placa de pressão é a presença das micro-partículas incrustadas no revestimento, pois, através das análises realizadas via MEV e EDX no revestimento B submetido ao uso normal e que não houve desgaste excessivo na borda externa da placa de pressão, não se observa presença de ferro na forma de micro-partículas (Figura 11-a). Há presença de

ferro no revestimento, mas em uma quantidade muito pequena, como mostra o pico de ferro no espectrograma obtido via EDX apresentado na Figura 11-b. Este pequena quantidade de ferro é natural, pois com o uso a placa de pressão sofre desgaste.

Os resultados apresentados neste trabalho estão em coerência com os resultados obtidos por Sanitate e Schmitt<sup>(4)</sup> e Nukumizu<sup>(5)</sup> nas suas investigações.



**Figura 10:** Representação esquemática dos mecanismos de desgastes atuantes.



**Figura 11:** (a)- revestimento B submetido a uso normal observado via MEV para verificar presença de micro-partículas metálicas incrustadas; (b)- espectrograma obtido via EDX.

## 5 CONCLUSÕES

Constatou-se pelas análises realizadas nos conjuntos de embreagens que apresentaram desgaste excessivo e no conjunto que foi submetido ao uso normal, que as embreagens com desgaste excessivo, foram submetidas a uma condição extremamente severa de trabalho, havendo um superaquecimento. Este superaquecimento provoca uma alteração da micro-estrutura próximo à superfície de deslizamento da placa de pressão. Nestas condições ocorre também uma forte deformação na inclinação da placa de pressão. Isto aumenta a pressão de contato na área externa da placa e devido a severidade da aplicação, micro-partículas de ferro são arrancadas da placa e incrustam no revestimento. Depois de incrustadas, essas micro-partículas duras riscam a placa de pressão, gerando o desgaste excessivo que tem sido observado na borda externa.

Estão em desenvolvimento estudos em laboratório para simular os fenômenos investigados. Com isso, espera-se verificar se há influência de diferentes materiais de fricção na intensidade do fenômeno.

## REFERÊNCIAS

- 1 Durando et al., “A contribution for a better understanding of the automotive friction material characteristics connected to problems deriving from disc-scoring phenomena”, SAE Technical Paper 2005-01-3934, 2005.
- 2 Hesse, D., “Changes at interfaces of friction components during braking”. D0063 JMec E 2003.
- 3 Holinski, R.; Yamabe, J. et al ., “Development of disc brake rotors for heavy and medium duty trucks with high thermal fating strength, TECHNICAL REVIEW (Mitsubish Motors Corporation and Mitsubish Fuso Truck and Bus Corporation), No. 15, pp.45, 2003.
- 4 Sanitate, F.; Schimitt, O., “An investigation of metal pick-up generation on passenger car brake pads in correlation with deep rotor scoring”, SAE Technical Paper 2008-01-2540.
- 5 Nukumizu, K., “Study of the formulation mechanism for metal pick-up on the frictional surface of a disc brake pad”, SAE Technical Paper 2008-01-2541.
- 6 Riahi, A. R.; Alpas, A. T., “Wear map for gray cast iron”, Wear, v. 255, pp. 401-409, 2003.