

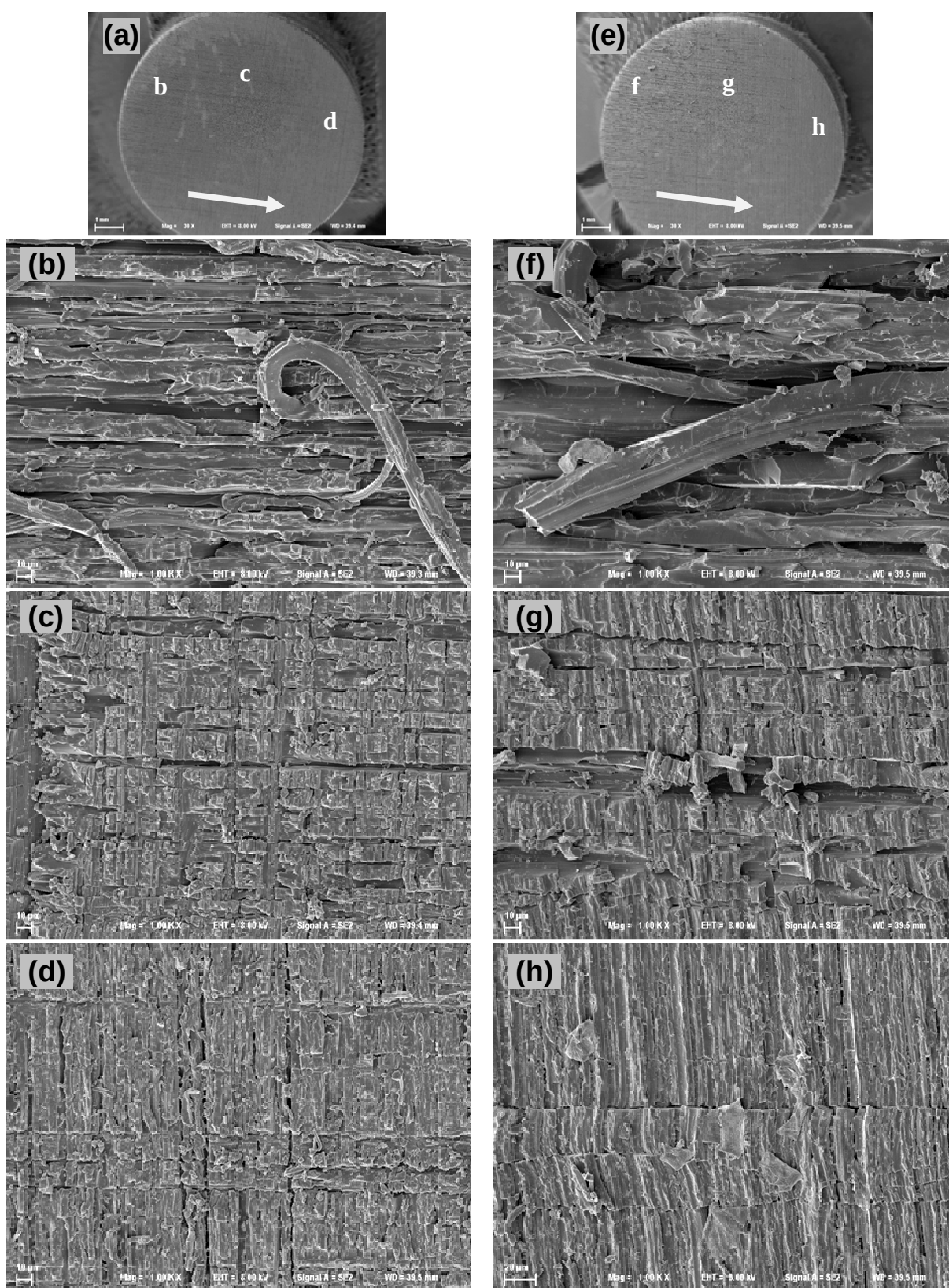


Figura 4.43 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de PU contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 13,7 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e)

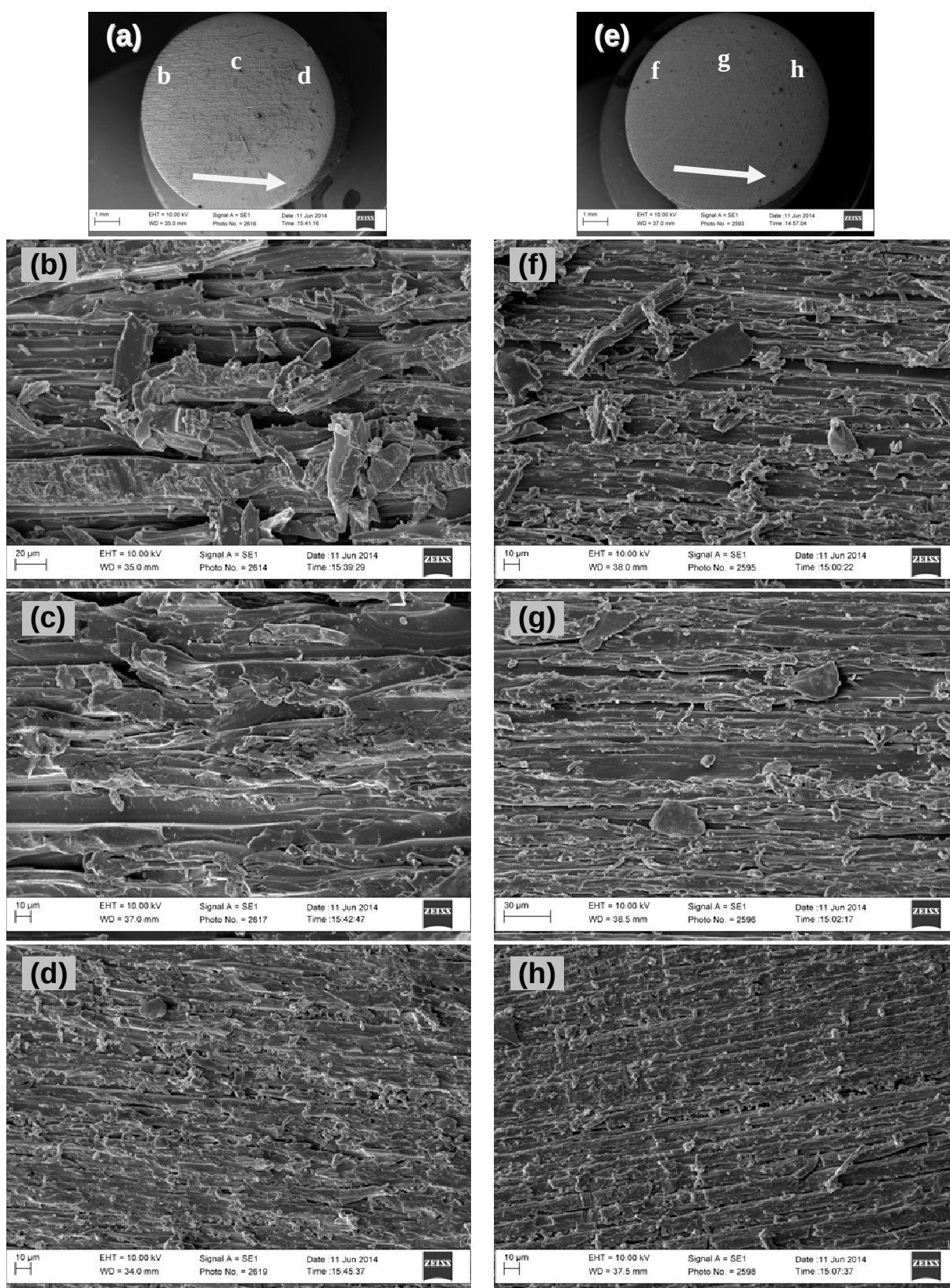


Figura 4.44 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de PU contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 49,0 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e)

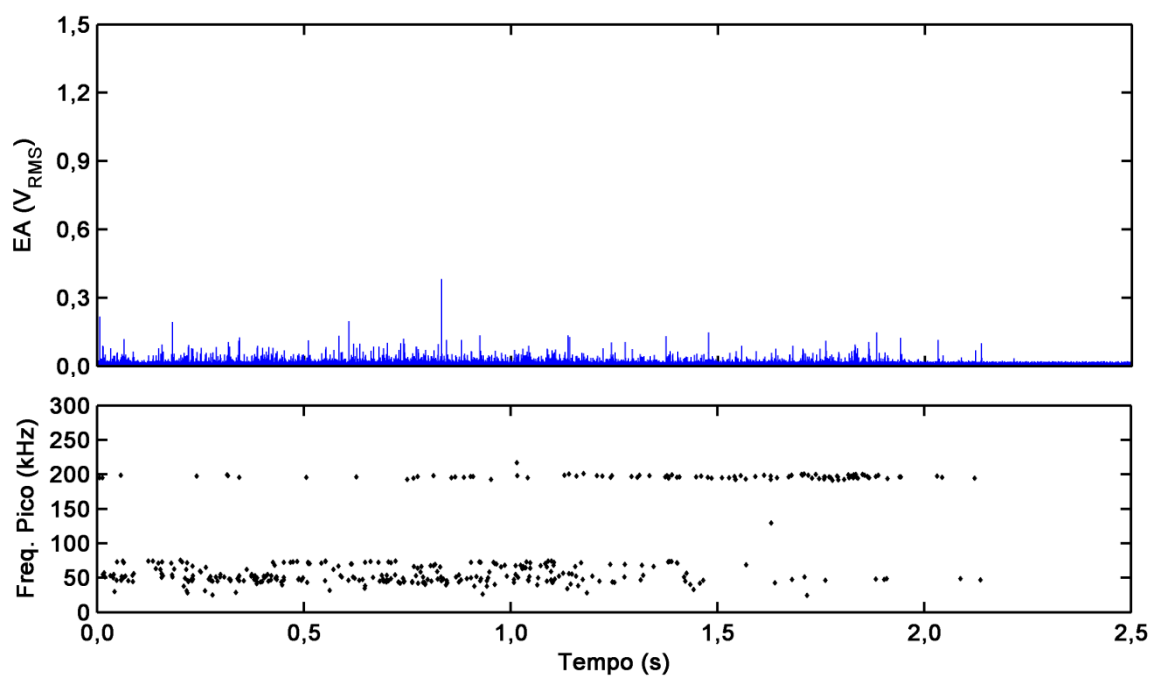


Figura 4.45 - Deslizamento 13 (PU, #400 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

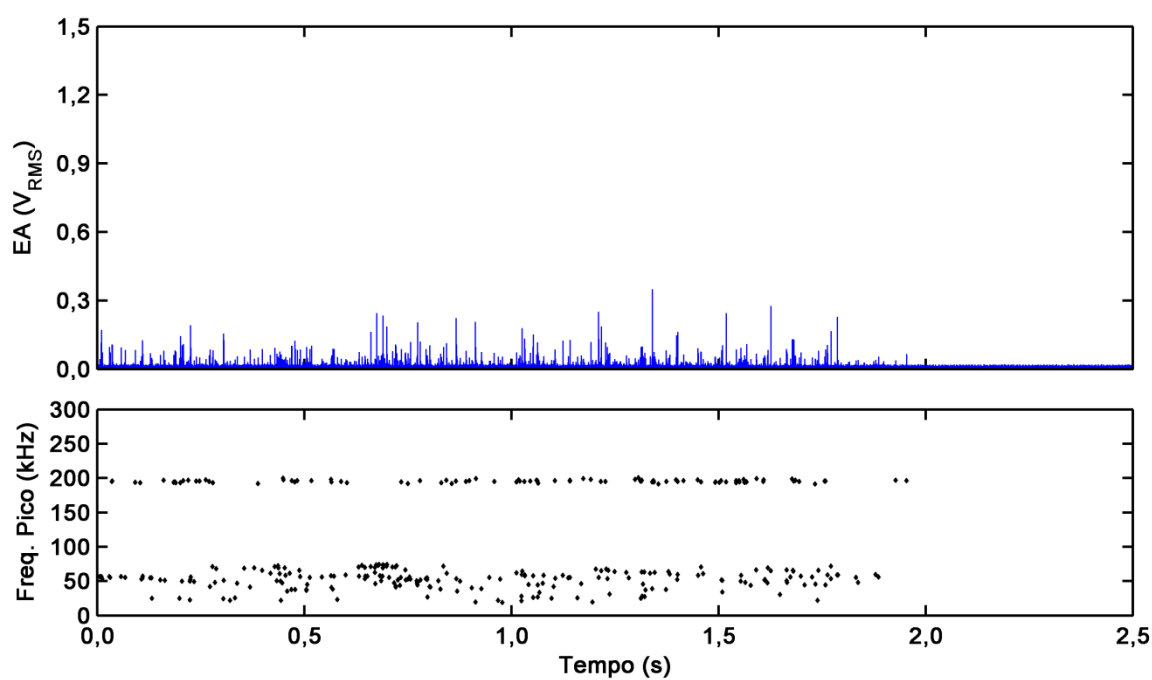


Figura 4.46 - Deslizamento 16 (PU, #220 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

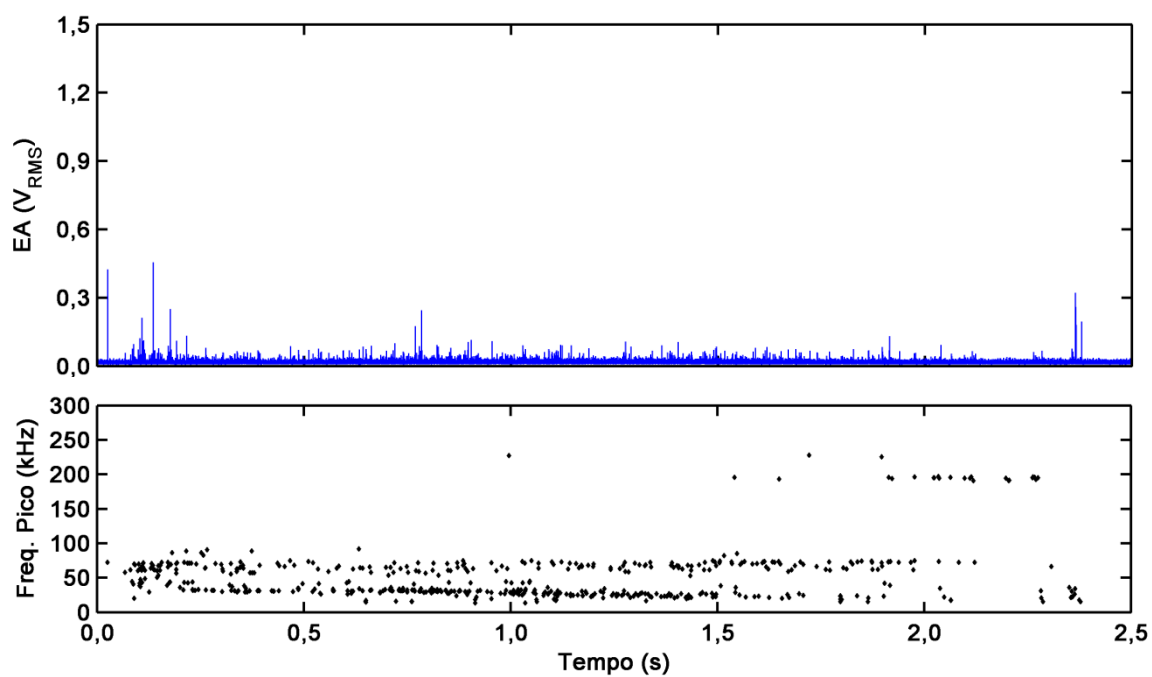


Figura 4.47 - Deslizamento 31 (PU, #400 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

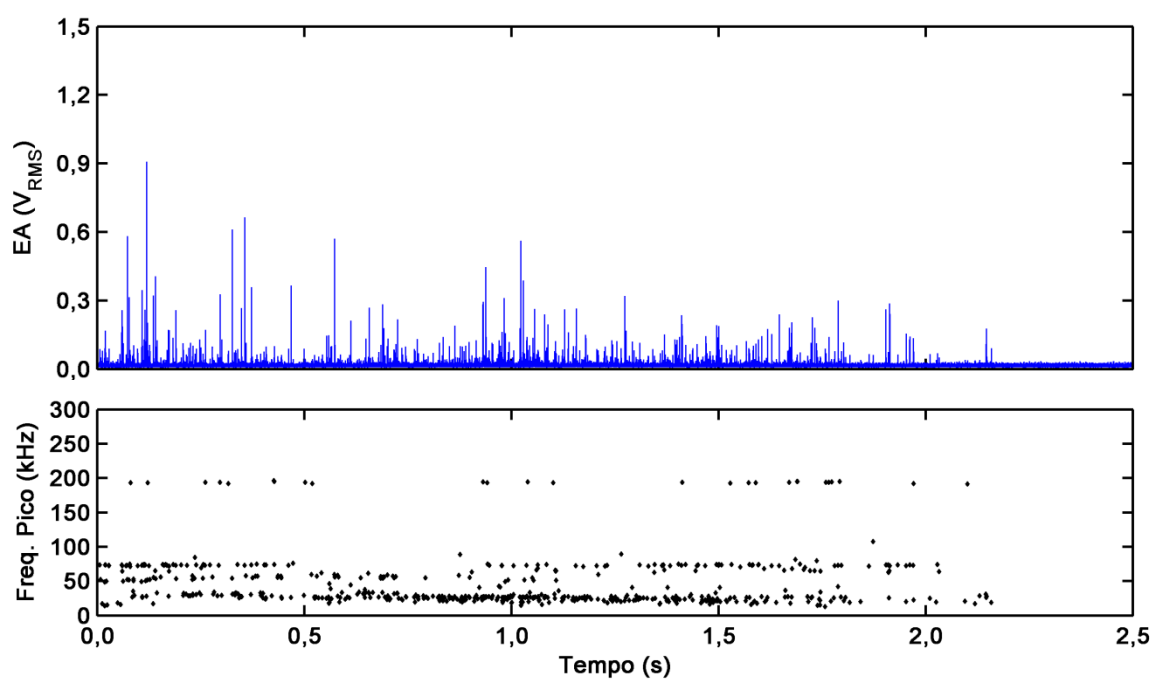


Figura 4.48 - Deslizamento 34 (PU, #220 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

A utilidade desta análise é saber se é possível distinguir qual dos materiais está se desgastando, caso se faça deslizar um contra o outro. Apesar da literatura apontar que o material tem baixa influência sobre o espectro da EA, é possível que ainda assim seja possível discernir os materiais através da análise de conglomerados por dois motivos: em primeiro lugar, porque pequenas variações existem e, em segundo lugar, porque a análise de conglomerados também leva em conta a energia do sinal acústico (que é proporcional à sua amplitude), e é sabido que o material possui grande influência sobre a amplitude da EA.

Os gráficos de conglomerados foram confeccionados da seguinte forma: primeiramente, foram usadas duas bandas de frequência para cálculo da energia, uma de 35 a 100 kHz e outra de 180 a 240 kHz, escolhidas de acordo com a localização dos picos de frequência vistos nas figuras anteriores. O intuito foi o de avaliar qual delas trás os melhores resultados. Além disso, foram avaliados dois tipos de frequência, a frequência centroide e a de pico balanceada. Os gráficos gerados foram confeccionados a partir de todos os deslizamentos de cada configuração e separados de acordo com a força e a granulometria do abrasivo.

Além disso, a análise dos conglomerados formados foi realizada visualmente, sem o auxílio de programas computacionais. Foi adotado nas análises realizadas neste trabalho que dois conjuntos de pontos formam conglomerados distintos quando existe pouca ou nenhuma sobreposição entre eles. Em outras palavras, quanto menor a sobreposição entre dois grupos, maiores as chances de eles formarem dois conglomerados diferentes.

Ao observar as Figs 4.49 a 4.52, fica claro que a energia dentro da banda de frequência de 35 a 100 kHz separa cada material melhor do que a energia dentro da banda de 180 a 240 kHz, uma vez que esta última apresenta alta sobreposição entre cada grupo de pontos. Por outro lado, tanto a frequência centroide quanto a de pico balanceada se mostraram adequadas para as análises, motivo pelo qual se encontra na literatura trabalhos usando os dois parâmetros, sem haver nenhuma preferência.

Pode-se inferir assim que um algoritmo computacional seria capaz de determinar qual dos três materiais está se desgastando ao analisar as Emissões Acústicas através de conglomerados da energia na banda de 35 a 100 kHz em função da frequência centroide ou da frequência de pico balanceada. Esta abordagem permite, por exemplo, monitorar um par tribológico de formado pelos dois polímeros, PA contra PU, e saber qual dos dois está se desgastando.

É importante ressaltar que, ao se basear a análise em gráficos de energia em função da frequência centroide, na verdade está sendo realizada uma análise conjuntamente no domínio do tempo e da frequência. A amplitude do sinal está associada à energia, ou seja, quanto maior a amplitude, mais energia ele possui na banda considerada. Além disso, variações na forma do espectro levam a variações do seu centroide. Deste modo, nota-se que, em geral, o metal tem amplitude maior energia e o PU tem menor, o que de fato foi observado nos gráficos de tensão RMS da EA. Além disso, a frequência centroide dos *bursts* gerados nos polímeros tende a ser um pouco maior do que a dos gerados no aço.

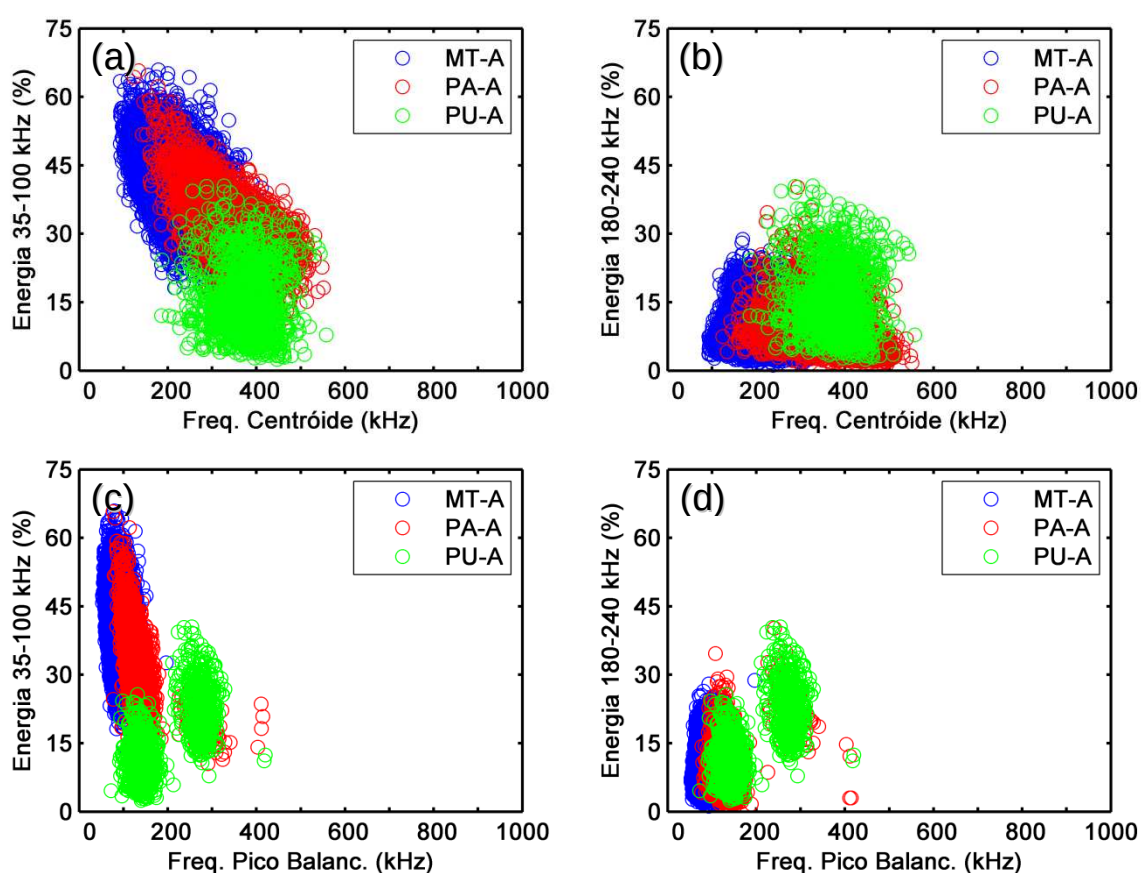


Figura 4.49 - Comparação entre EA do aço, da PA e do PU em ensaios abrasivos #400 e força de 13,7 N através de conglomerados e empregando energia entre 35 e 100 kHz (a/c) e entre 180 e 240 kHz (b/d) em função da frequência centroide (a/b) e da frequência de pico balanceada (c/d)

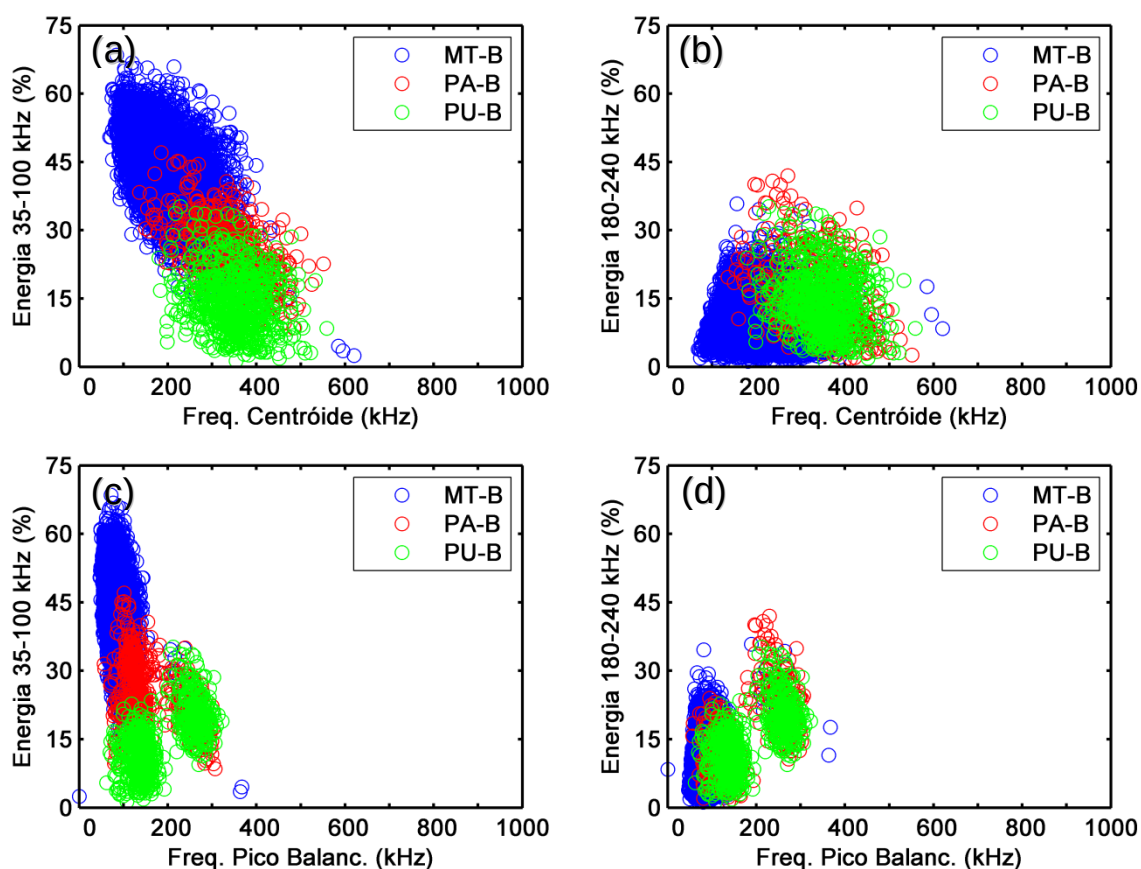


Figura 4.50 - Comparação entre EA do aço, da PA e do PU em ensaios abrasivos #220 e força de 13,7 N através de conglomerados e empregando energia entre 35 e 100 kHz (a/c) e entre 180 e 240 kHz (b/d) em função da frequência centroide (a/b) e da frequência de pico balanceada (c/d)

4.2.3. Emissão Acústica em Ensaios Abrasivos

Em seguida, é apresentado um resumo dos principais resultados e das principais observações relativos aos ensaios abrasivos:

1. O mecanismo predominante nos três materiais foi a abrasão por microcorte e microsulcamento. No PU, foi observado ainda microtrincamento;
2. Observando os resultados de cada material isoladamente, pode-se observar que as configurações com maiores taxas de desgaste realmente apresentaram maiores amplitudes no valor RMS da EA;
3. A Emissão Acústica nos deslizamentos dos pinos de aço apresentou as maiores amplitudes, mesmo tendo sido medida com a menor pré-amplificação. Isto ocorreu provavelmente porque o aço propaga melhor as ondas acústicas;

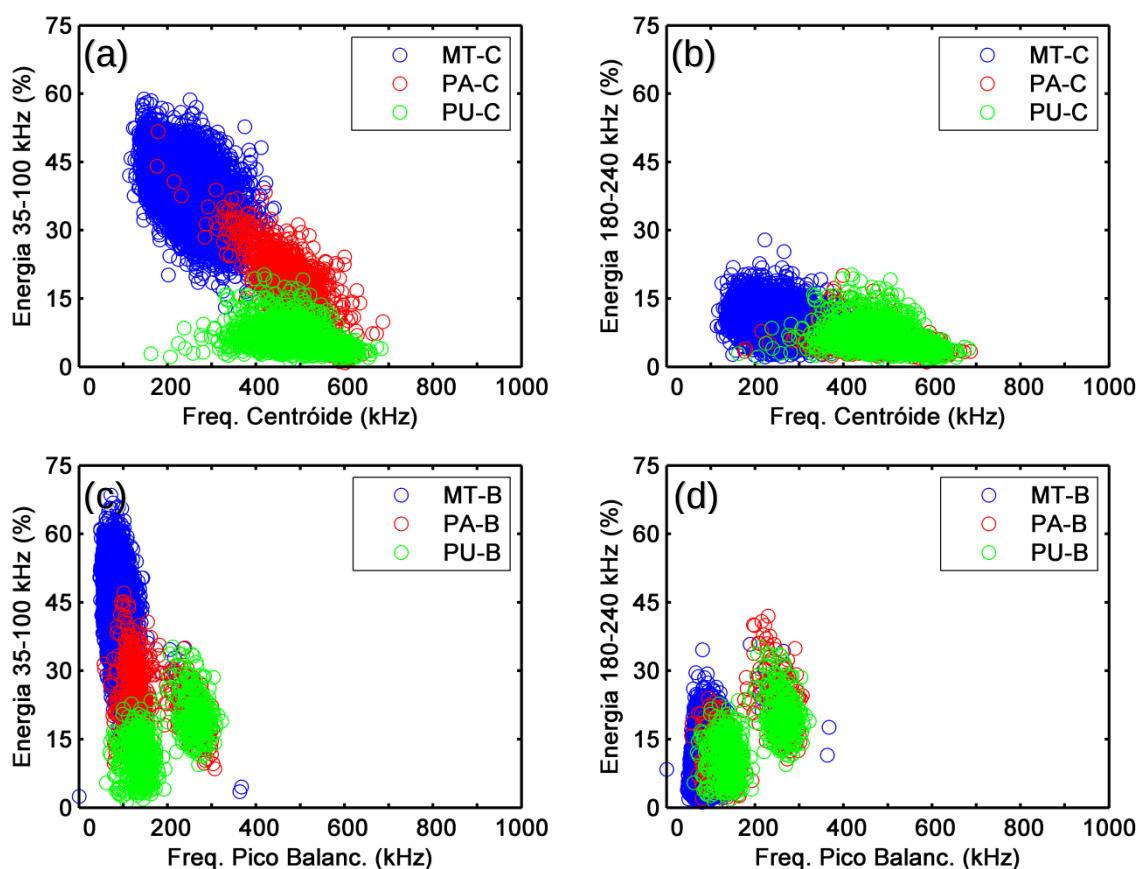


Figura 4.51 - Comparação entre EA do aço, da PA e do PU em ensaios abrasivos #400 e força de 49,0 N através de conglomerados e empregando energia entre 35 e 100 kHz (a/c) e entre 180 e 240 kHz (b/d) em função da frequência centroide (a/b) e da frequência de pico balanceada (c/d)

4. No caso dos ensaios de esclerometria, a frequência de pico ajudou a distinguir eventos frágeis como trincas de eventos mais dúcteis como *stick-slip*, mas neste caso tal parâmetro apenas caracterizou os eventos de abrasão. Os três materiais sofrem apenas abrasão, gerando eventos acústicos com diversos picos na faixa de 25 kHz a 225 kHz. Há indícios de que os *bursts* com frequência de pico acima de 200 kHz estejam associados a menores amplitudes, porém investigações mais aprofundadas são necessárias para confirmar e saber exatamente o que significa;
5. O uso da análise de conglomerados para se distinguir os materiais se mostrou uma possibilidade viável, mesmo para materiais como o PU e o PA. Tal análise leva em conta tanto a amplitude do sinal quanto a forma de seu espectro. A amplitude é representada pela energia, sendo que a faixa de energia de 35 a 100 kHz se mostrou bem melhor do que a de 180 a 240 kHz. Já a forma do espectro é representada pela frequência centroide ou pela de pico balanceada, sendo que ambas são igualmente adequadas na análise de conglomerados.

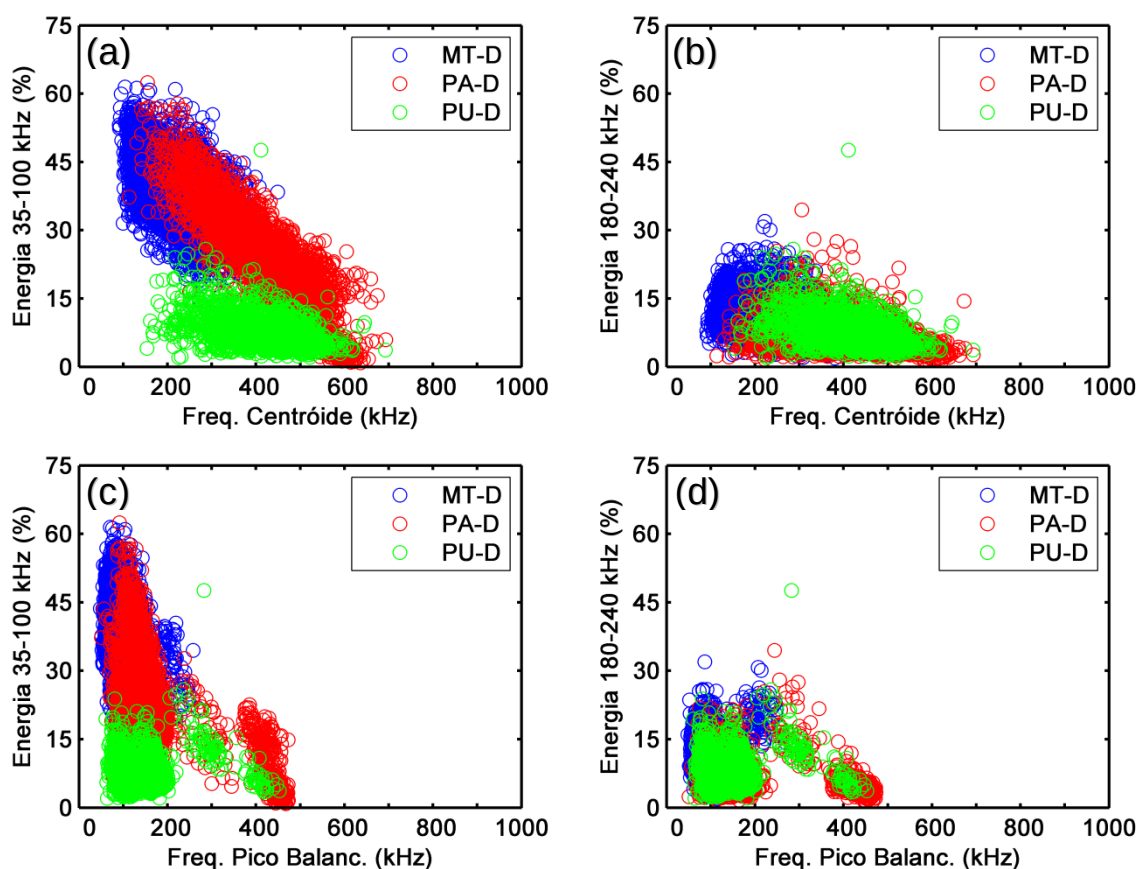


Figura 4.52 - Comparação entre EA do aço, da PA e do PU em ensaios abrasivos #220 e força de 49,0 N através de conglomerados e empregando energia entre 35 e 100 kHz (a/c) e entre 180 e 240 kHz (b/d) em função da frequência centróide (a/b) e da frequência de pico balanceada (c/d)

4.3. Ensaios de Deslizamento em Escala Reduzida

Foram realizados dois ensaios com diferentes cargas para avaliar os mecanismos de desgaste presentes e a existência de emissão de ondas acústicas gerada por eles. Para atingir tais objetivos, esta seção foi subdividida em duas partes: na primeira, foram apresentados os registros micrográficos dos ensaios, bem como o coeficiente de atrito, que possibilitaram uma avaliação dos mecanismos de desgaste presentes. Em seguida, foram apresentados os resultados das aquisições de Emissão Acústica usando o método da Transformada de Fourier de Tempo Curto.

4.3.1. Avaliação tribológica

A Figura 4.53 exibe o coeficiente de atrito (COF) em função de tempo para o ensaio de deslizamento 01, com pressão de 2 MPa e distância de 2 km, do pino de PA contra o plano de PU. Pode-se observar como o COF se estabilizou após aproximadamente 1,25 km percorrido, o que significa que o ensaio obteve êxito em atingir o regime permanente. Já a Figura 4.54 contém os registros da amostra de PU após o ensaio. Os pinos de PA não foram registrados porque, devido ao baixo desgaste, eles não apresentaram nenhuma informação relevante. A primeira imagem (Fig. 4.54a) apresenta uma fotografia da trilha de desgaste completa do PU. As demais imagens (Figs. 4.54b a 4.54e) são registros realizados no MEV.

As Figuras 4.55 e 4.56, por sua vez, exibem resultados similares para o ensaio 02, de 2 km e com pressão de 3 MPa. Elas também mostram um desgaste muito baixo, apresentando pouco material perdido ao longo do ensaio. Além disso, ele apresentou um COF de atrito menor, consequência do fato de polímeros não obedecerem à lei de Amontons, já que a área de contato real não é diretamente proporcional à carga normal aplicada (HUTCHINGS, 2003). Além disso, o atrito se estabilizou mais cedo, por volta dos 950 m, indicando um curto tempo de acomodação.

Ao analisar as micrografias do plano de PU, percebem-se poucos fragmentos de desgaste, não formando partículas grandes e nem numerosas, mesmo antes da peça ser limpa para a metalização. Esses dois fatores indicam a presença de um desgaste bastante baixo na peça de PU. O máximo que se observa, nas ampliações, são algumas partículas de desgaste soltas que aderiram à superfície da placa de PU através da ação de deslizamento do pino (ver setas nas Figs. 4.54d e 4.56b). Além disso, percebe-se a formação das ondas de Schallamac, evidenciadas pelas cristas ao longo da trilha.

As micrografias da Fig. 4.54 indicam a presença de três mecanismos de degradação. Em primeiro lugar, tem-se a quebra de cristas do padrão de Schallamac, formando pequenos fragmentos que passam a fazer parte do filme interfacial entre a PA e o PU. Tais partículas presas na interface do deslizamento acabaram riscando as superfícies dos materiais (ver setas nas Figs. 4.54c e 4.56e). Além disso, parte do material perdido se aderiu de volta na superfície do PU (ver setas nas Figs. 4.54e e 4.56d), gerando um leve *stick-slip*. Por fim, não houve indícios de outro mecanismo, tal como a fadiga.

Ressalta-se que a presença das ondas de Schallamac nestes experimentos, bem como a presença de leves eventos abrasivos e a ausência de fadiga e trincamentos, são similares aos encontrados na literatura (BERTHOLDI, 2014).

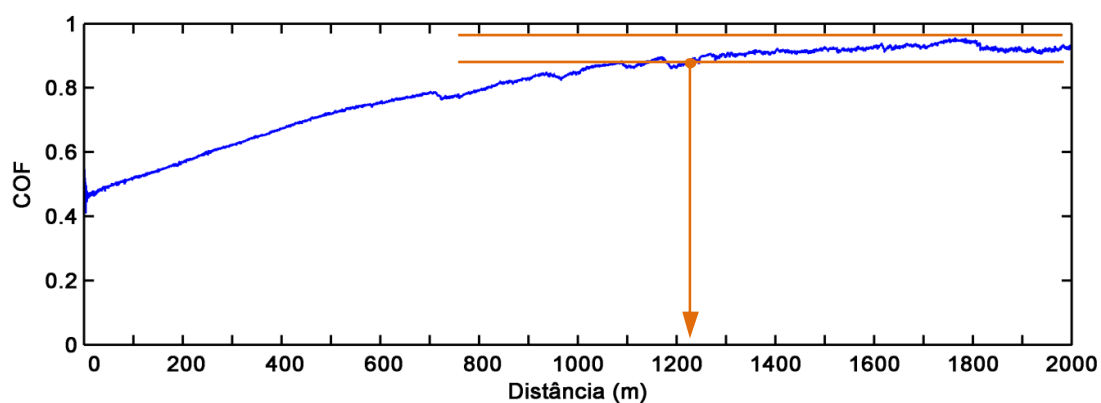


Figura 4.53 - Evolução do coeficiente de atrito em função da distância percorrida no ensaio em escala reduzida 01 (pino de PA contra plano de PU, 2 km e 2 MPa)

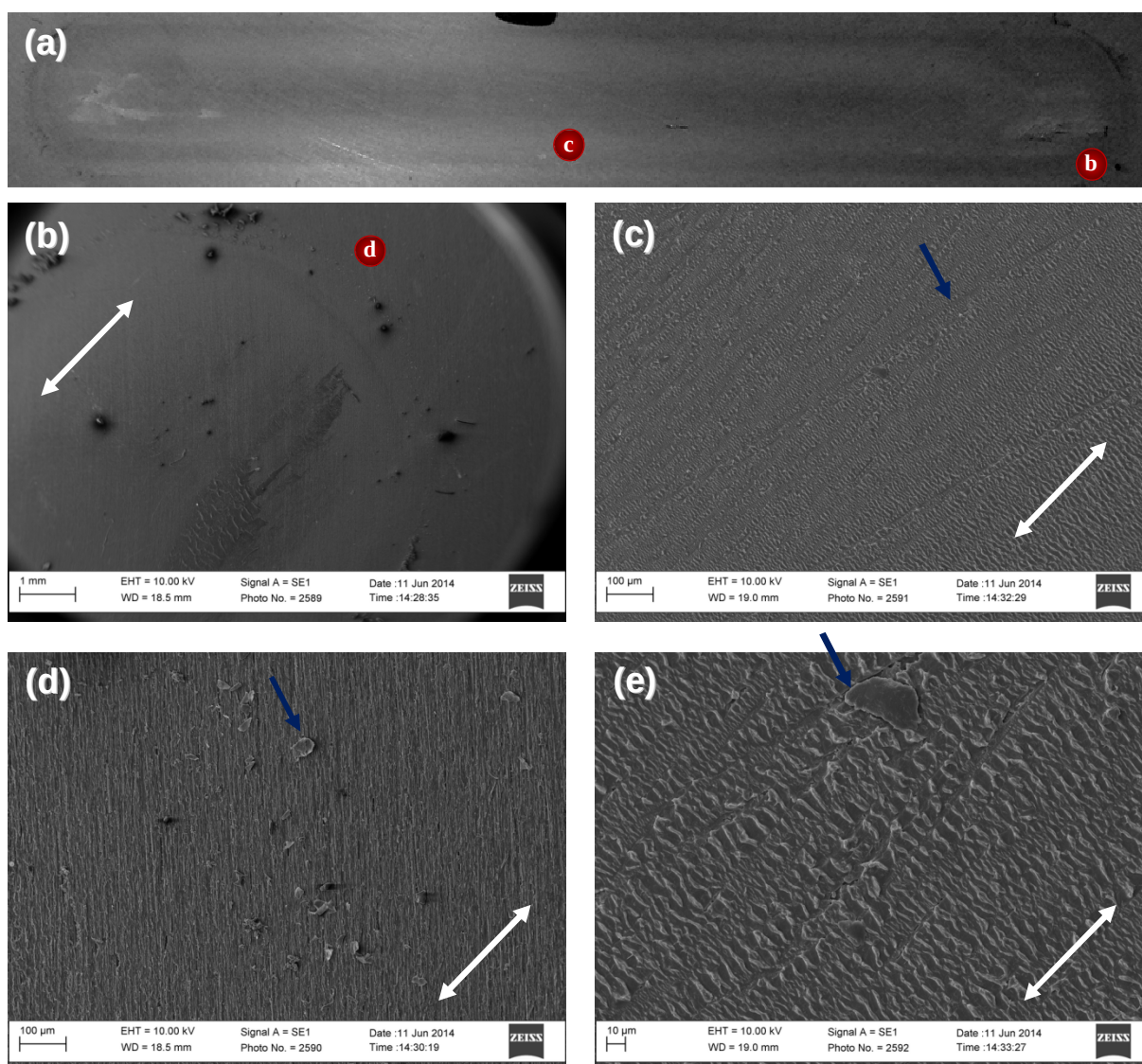


Figura 4.54 - Registros do plano de PU após o ensaio 01 (2 MPa). Registro fotográfico (a), e registros fotomicrográficos de trechos mais relevantes (b-c) e respectivas ampliações (d-e); setas brancas indicam sentido do deslizamento

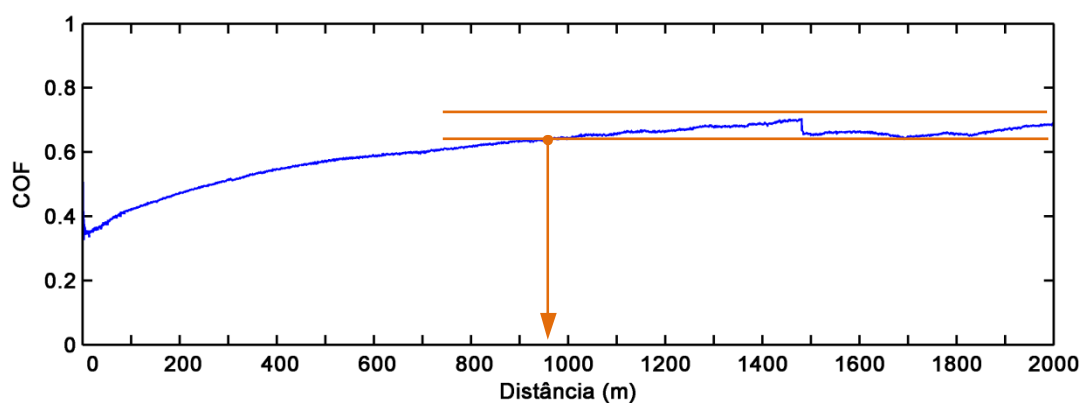


Figura 4.55 - Evolução do coeficiente de atrito em função da distância percorrida no ensaio em escala reduzida 02 (pino de PA contra plano de PU, 2 km e 3 MPa)

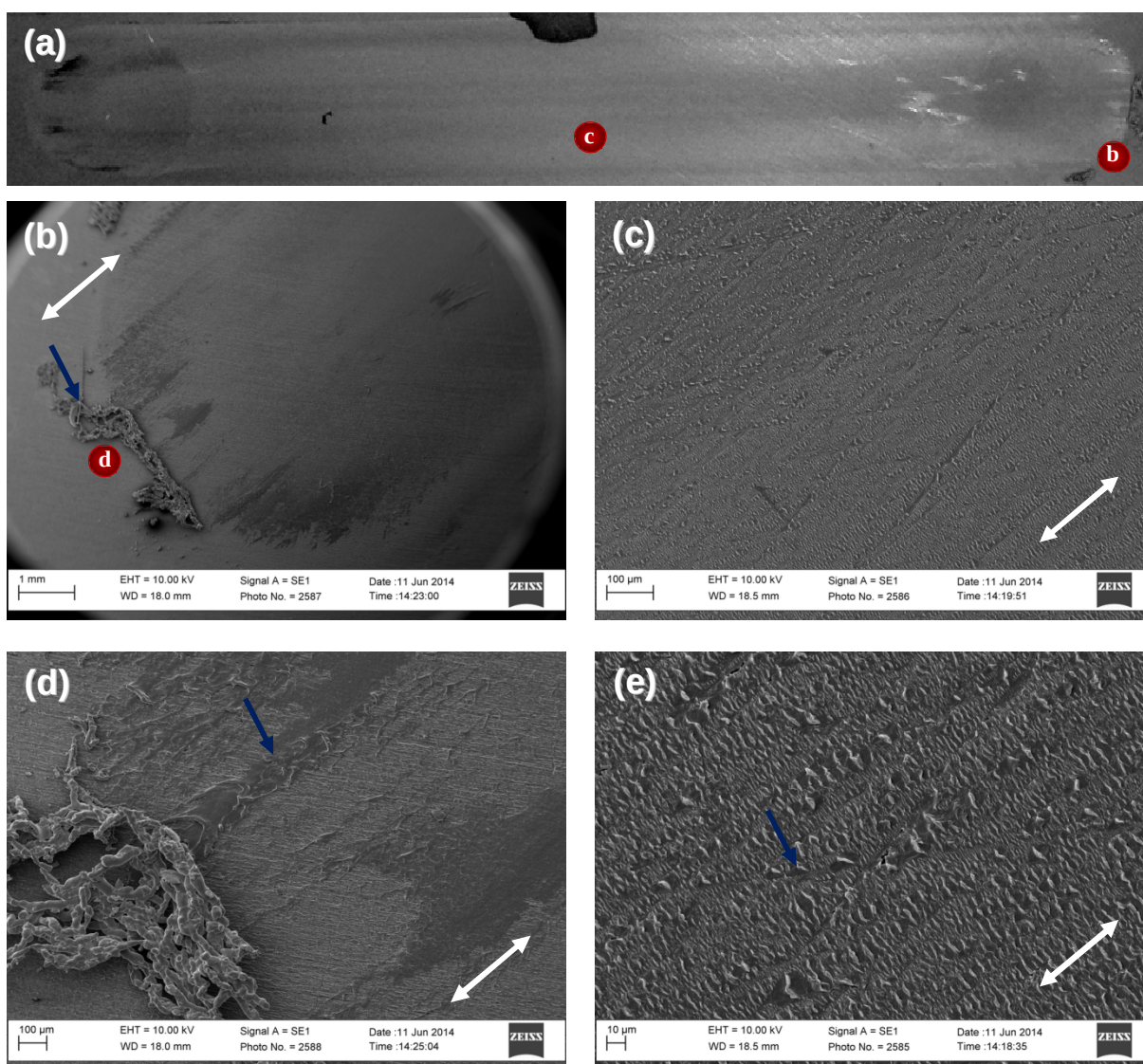


Figura 4.56 - Registros do plano de PU após o ensaio 02 (3 MPa). Registro fotográfico (a), e registros fotomicrográficos de trechos mais relevantes (b-c) e respectivas ampliações (d-e); setas brancas indicam sentido do deslizamento

4.3.2. Avaliação acústica

A Figura 4.57 exibe os resultados da EA durante o início do primeiro ensaio. Pode-se observar que o Abrasômetro foi ligado 2 s após o início da aquisição e que, a partir de então, já é possível visualizar alguns picos equivalentes a *bursts*. Com base na tensão RMS da EA obtida, foram considerados *bursts* os trechos que excediam um limiar de 10 mV e que atingiam um valor máximo de pelo menos 15 mV, encerrando quando voltavam para um nível menor que 3 mV.

Observa-se que a amplitude dos *bursts* registrados, apesar de baixa (picos de amplitudes menores que 100 mV mesmo usando a pré-amplificação máxima, de 60 dB), foram condizentes com os ensaios abrasivos desses mesmos polímeros. Por exemplo, o deslizamento do PU contra papel abrasivo levou a uma EA com picos de amplitude na faixa de 100 a 300 mV (ver Fig. 4.45), apenas um pouco maiores do que as registradas aqui. Isto foi decorrente da existência das partículas abrasivas maiores contidas no papel abrasivo, resultando em maiores amplitudes de EA.

A Figura 4.57 também exibe um gráfico da frequência de pico dos *bursts*, que estão na faixa de 10 a 50 kHz. Este comportamento continua ao longo do restante do ensaio, como pode ser visto nas Figs. 4.58 a 4.60 (500, 1.000 e 2.000 m, respectivamente) e no Apêndice C (Fig. 8.36, demais aquisições). Consultar a Tabela 3.4, p. 57, para determinar a posição de cada aquisição.

A Figura 4.61, por sua vez, exibe os resultados da EA durante o início do segundo ensaio. Não se notaram diferenças entre o comportamento acústico deste ensaio e o do primeiro. Observa-se que o Abrasômetro também foi acionado aproximadamente 2 s após o início da aquisição e que, a partir de então, já é possível identificar a presença de alguns *bursts* de EA. A frequência de pico associada a esses *bursts* está predominantemente na banda de 10 a 75 kHz, apesar de terem surgido alguns *bursts* com frequências de pico entre 200 e 225 kHz. Tal comportamento continua ao longo do restante do ensaio, como pode ser visto nas Figs. 4.62 a 4.64 (500, 1.000 e 2.000 m, respectivamente) e no Apêndice C (Fig. 8.37, demais aquisições).

Observando-se os registros micrográficos das Figs. 4.54 e 4.56, nota-se que três eventos podem gerar EA e *bursts*: a quebra das cristas de Schallamach, a ação de riscamento das partículas interfaciais (abrasão), e a adesão das partículas interfaciais às duas superfícies.

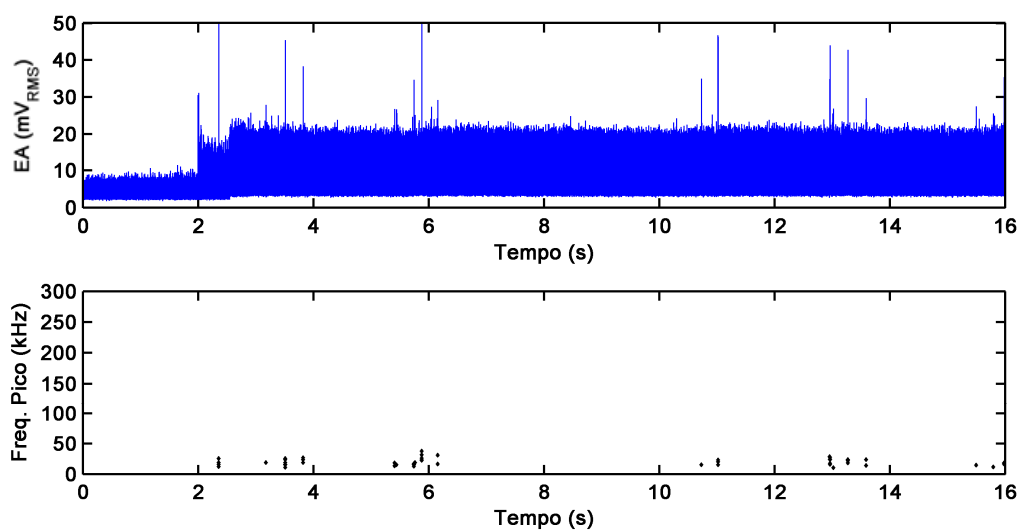


Figura 4.57 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 01 (ver Tab. 3.4)

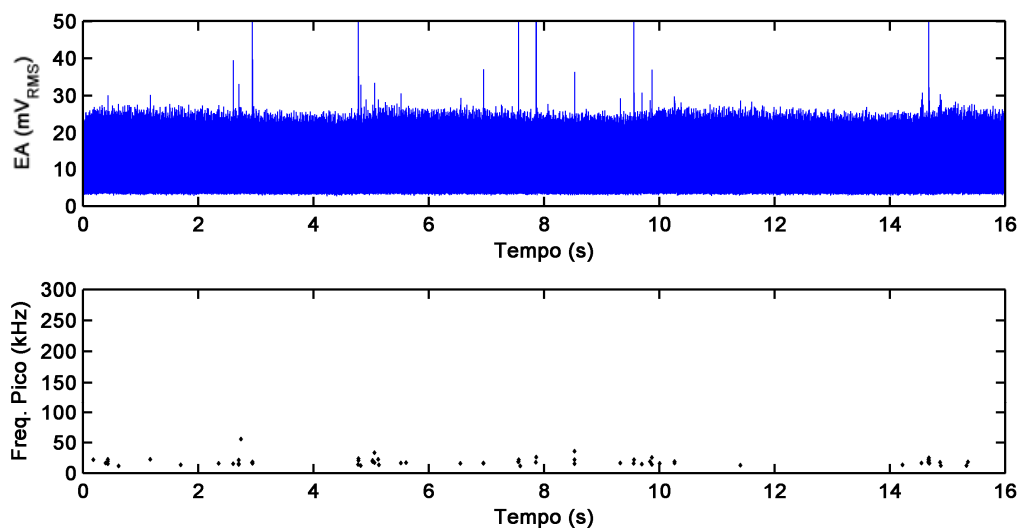


Figura 4.58 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 06 (ver Tab. 3.4)

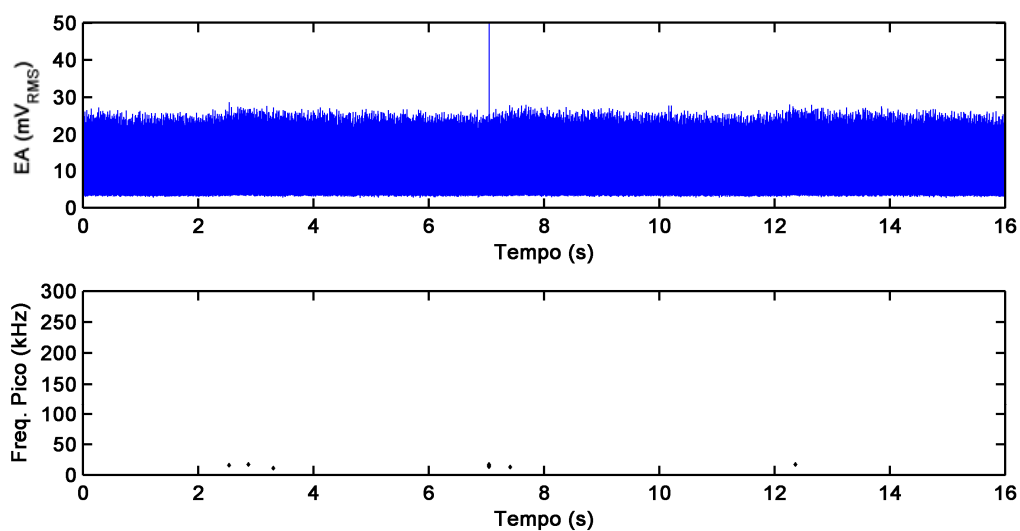


Figura 4.59 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 11 (ver Tab. 3.4)

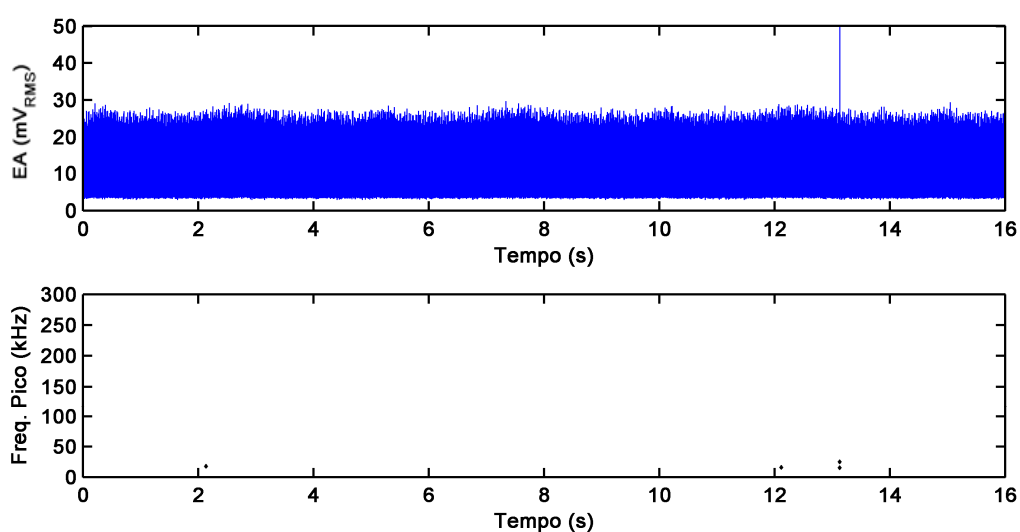


Figura 4.60 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 21 (ver Tab. 3.4)

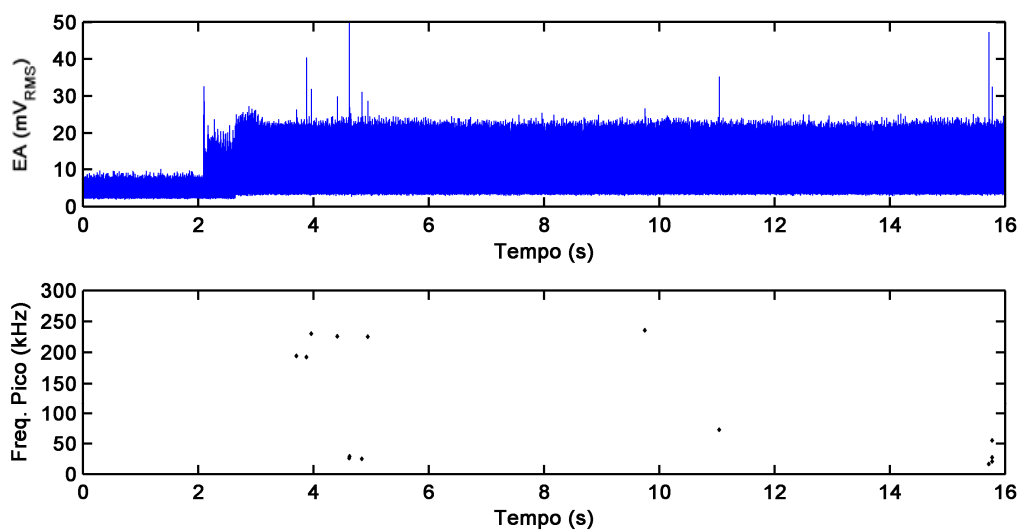


Figura 4.61 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 22 (ver Tab. 3.4)

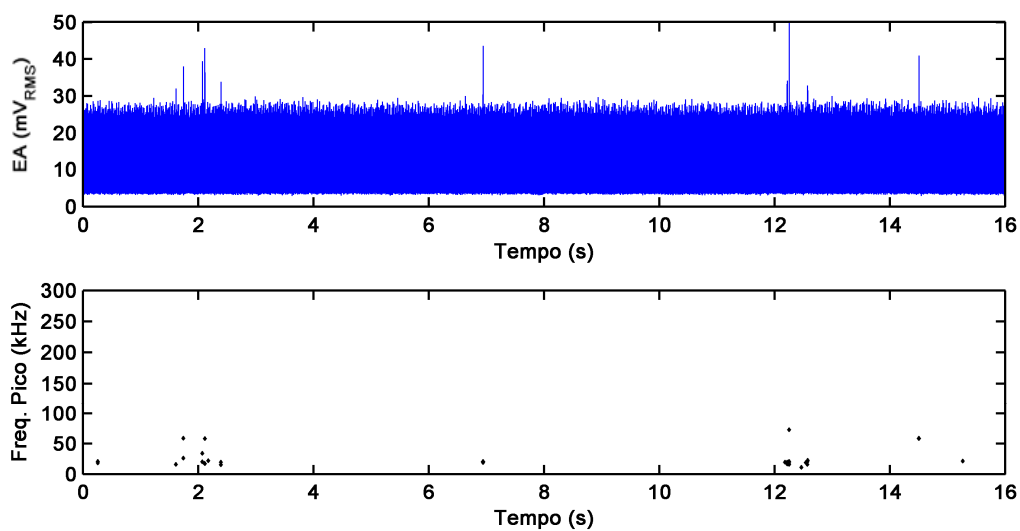


Figura 4.62 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 27 (ver Tab. 3.4)

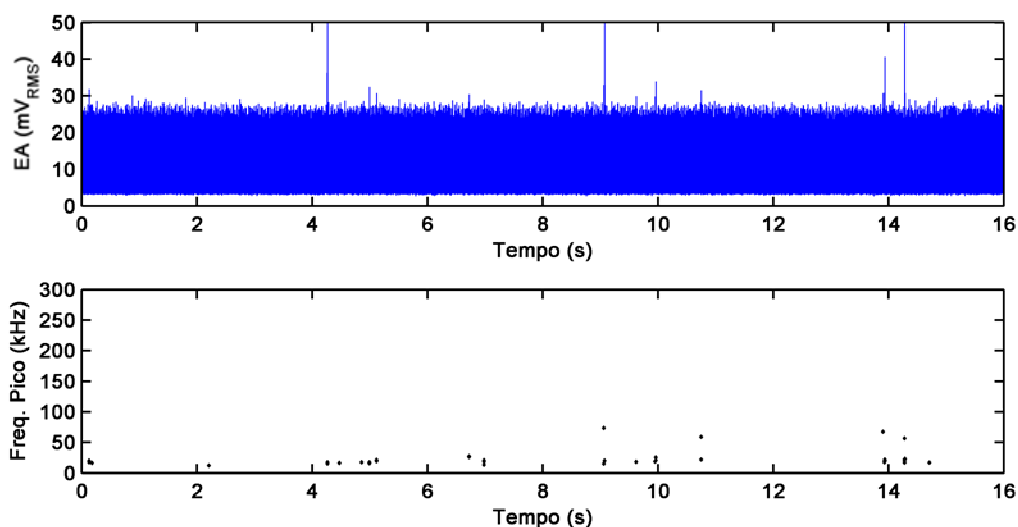


Figura 4.63 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 32 (ver Tab. 3.4)

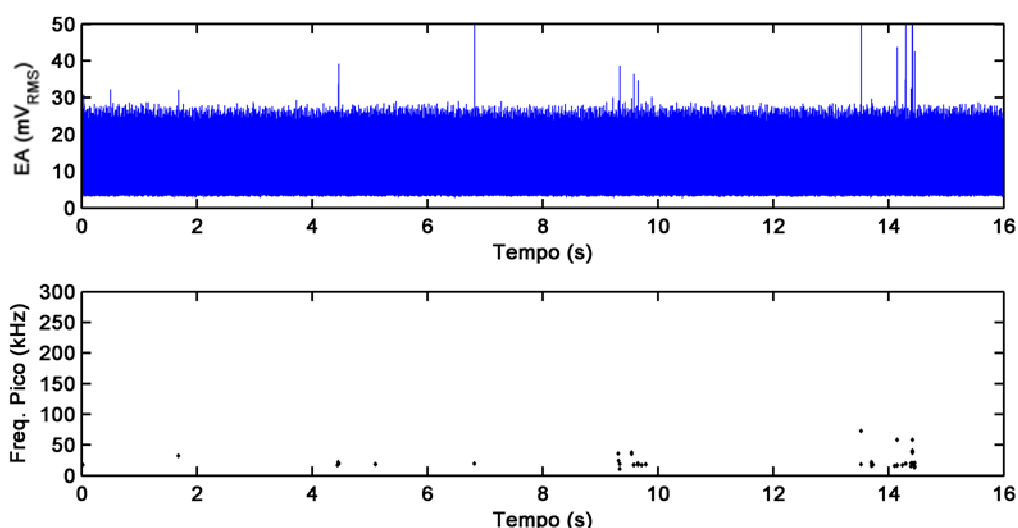


Figura 4.64 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 42 (ver Tab. 3.4)

É importante salientar que frequências de pico ocorrendo em duas faixas, uma próxima aos 50 kHz e outra entre 200 e 225 kHz, é aquela na qual ocorre a abrasão do PU usado nos ensaios (ver Figs. 4.45 a 4.48). Isto indica que os eventos acústicos relacionados aos riscamentos realizados por partículas interfaciais foram medidos. Estes pequenos riscos foram aqueles vistos nas Figs. 4.54c e 4.56c.

Além disso, dadas as pequenas dimensões das ondas de Schallamach, acredita-se que a quebra de suas cristas não gerou EA em um nível detectável pelo sistema de medição empregado. Entretanto, detectar sua presença parece não ser um problema pois, como apresentado na seção 4.4, tal evento não ocorre durante os ensaios em escala real.

As maiores diferenças entre as emissões acústicas dos ensaios abrasivos e os de deslizamento são a menor quantidade de *bursts*, certamente por conta de menores quantidades de ações de riscamento, uma amplitude ligeiramente menor, provavelmente por conta de riscamentos de menores dimensões, e a presença da quebra das cristas de Schallamach em detrimento da ausência de trincamentos nos ensaios de deslizamento. Entretanto, sabe-se que a quantidade e a amplitude dos *bursts* não influenciam na forma do espectro do sinal. Além disso, os eventos de microtrincamento nos ensaios abrasivos foram menores que os de microcorte e as quebras das cristas provavelmente não geraram EA. Provavelmente, estes motivos justificam a semelhança entre as frequências de pico que caracterizam os *bursts* dos ensaios de deslizamento e as que caracterizam os do ensaio de lixamento.

Além disso, a adesão nas superfícies em deslizamento das partículas de desgaste presentes na interface gera eventos acústicos com frequências próximas a 100 kHz (FERRER *et al.*, 2010, HASE *et al.*, 2012), como pode ser observado também na Fig. 2.6. Contudo, não foram detectados *bursts* nessa faixa de frequência, o que indica que tal mecanismo não gerou *bursts* que pudessem ser detectados.

Pode-se notar que o aumento da pressão levou ao surgimento de *bursts* com frequência de pico acima de 200 kHz e que não ocorreram no ensaio com menor pressão. Entretanto, os resultados dos ensaios abrasivos indicaram que tais frequências de pico mais elevadas não se referem a um novo mecanismo de desgaste. Isto é condizente com o fato de terem sido detectados os mesmos mecanismos nos ensaios com ambas as pressões de contato. Isto ocorre porque os ensaios realizados permitem muita dissipação de calor, atenuando a influência da variação da pressão de contato, como apontado na literatura (BERTHOLDI, 2014). Entretanto, nota-se que a partir de certo ponto, a quantidade de *bursts* de EA do ensaio com menor pressão diminuem, o que indica que a pressão não alterou os mecanismos, apenas sua intensidade.

Desta forma, pôde-se concluir que a EA foi capaz de monitorar parte do desgaste presente nos ensaios em escala reduzida. O grande entrave para análises mais profundas foi a presença de poucos *bursts*, consequência do baixo desgaste ocorrido durante o ensaio. Entretanto, como houve uma consistência entre os resultados dos ensaios de deslizamento em escala reduzida e os abrasivos, acredita-se que o método possa ter utilidade no monitoramento do desgaste de polímeros. Além disto, existe a possibilidade de alterações nos parâmetros de ensaio levarem ao surgimento de mais mecanismos de desgaste, como trincamento e fadiga, e ao aumento de sua intensidade.

4.4. Ensaio de Deslizamento em Escala Real

Esta seção foi organizada da seguinte maneira: primeiramente, foram apresentados os registros fotográficos, bem como uma avaliação dos mecanismos de desgaste, durante os primeiros 250.000 ciclos do ensaio. Contudo, foi dado destaque para a amostra da direita, que é onde foi fixado o sensor de EA. Somente depois dessa análise é que foram apresentados os resultados das aquisições de EA.

4.4.1. Avaliação tribológica

O deslizamento em escala real da amostra do *liner* de PU contra um duto flexível levou basicamente a eventos de abrasão nos primeiros 50.000 ciclos, como se pode observar na Fig. 4.65. Nas amostras do *liner*, nota-se a presença de riscos verticais, no sentido do deslizamento, além da presença de partículas de desgaste alaranjadas no fundo do Tribômetro, ambas indicando eventos abrasivos. O duto flexível de PA também sofreu desgaste, porém em uma intensidade consideravelmente menor, como se vê na Fig. 4.66. É possível notar apenas que a camada mais externa do material, repleta de sujeira devido ao tempo que passou em atividade no mar, foi removida.

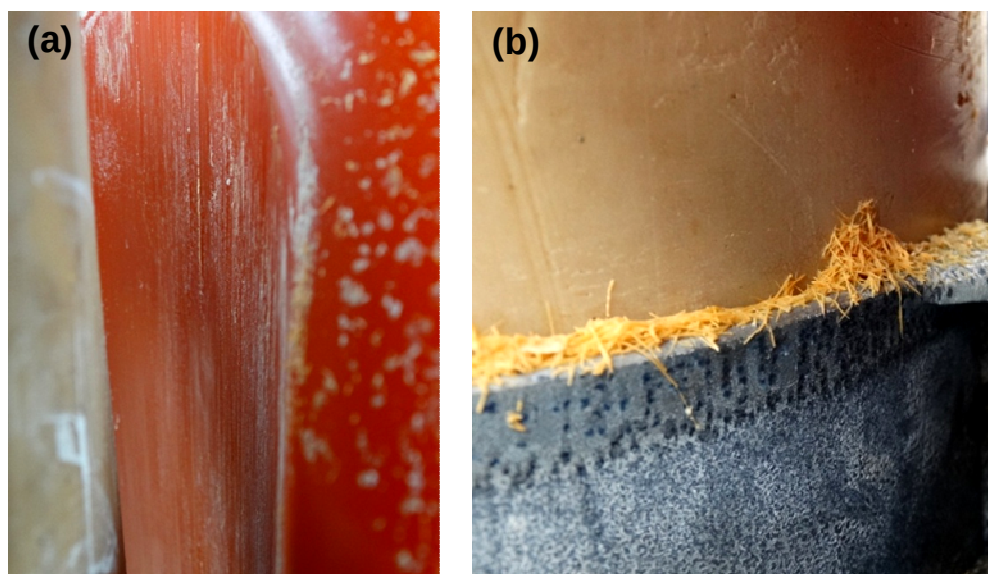


Figura 4.65 - Amostra de *liner* da direita após 50.000 ciclos (3 km) (a) e partículas de desgaste acumuladas no fundo do equipamento (b)



Figura 4.66 - Duto flexível na região em contato com a amostra de *liner* da esquerda, após 50.000 ciclos (3 km)

O desgaste na amostra de *liner* se desenvolveu inicialmente através de eventos abrasivos (ver Figs. 4.67a a 4.67d), surgindo fadiga superficial a partir de 100.000 ciclos (ver Figs. 4.67b a 4.67d). As partículas de desgaste, por sua vez, não sofreram grandes alterações nem nas dimensões e nem na quantidade, como pode ser visto na Fig. 4.68b. Já o duto flexível foi apenas levemente riscado pelas partículas de desgaste que foram se formando ao longo do ensaio, como mostra a Fig. 4.68a. Além disso, parte das partículas de PU arrancadas por abrasão se aderiram ao duto flexível, dando a ele o aspecto alaranjado (ver Fig. 4.68a).

Os mecanismos de desgaste identificados neste ensaio, que são abrasão e fadiga de contato no *liner*, além de uma leve abrasão no duto flexível, correspondem ao que foi encontrado na literatura, como pode ser observado na Fig. 2.24, p. 34 (PAES *et al.*, 2014). Estes resultados também são condizentes com o fato do sistema ter sido projetado para levar o *liner* ao desgaste em detrimento do duto flexível.

Estima-se que a temperatura de contato durante o deslizamento tenha sido bem maior do que 100 °C. Sabe-se disso porque quando o equipamento era desligado durante as paradas programadas, no momento em que as amostras de *liner* eram separadas do duto flexível, era possível enxergar linhas de convecção na água devidas ao calor armazenado no contato. A Figura 4.68c exibe as regiões onde as linhas de convecção registradas durante a interrupção dos 250.000 ciclos.

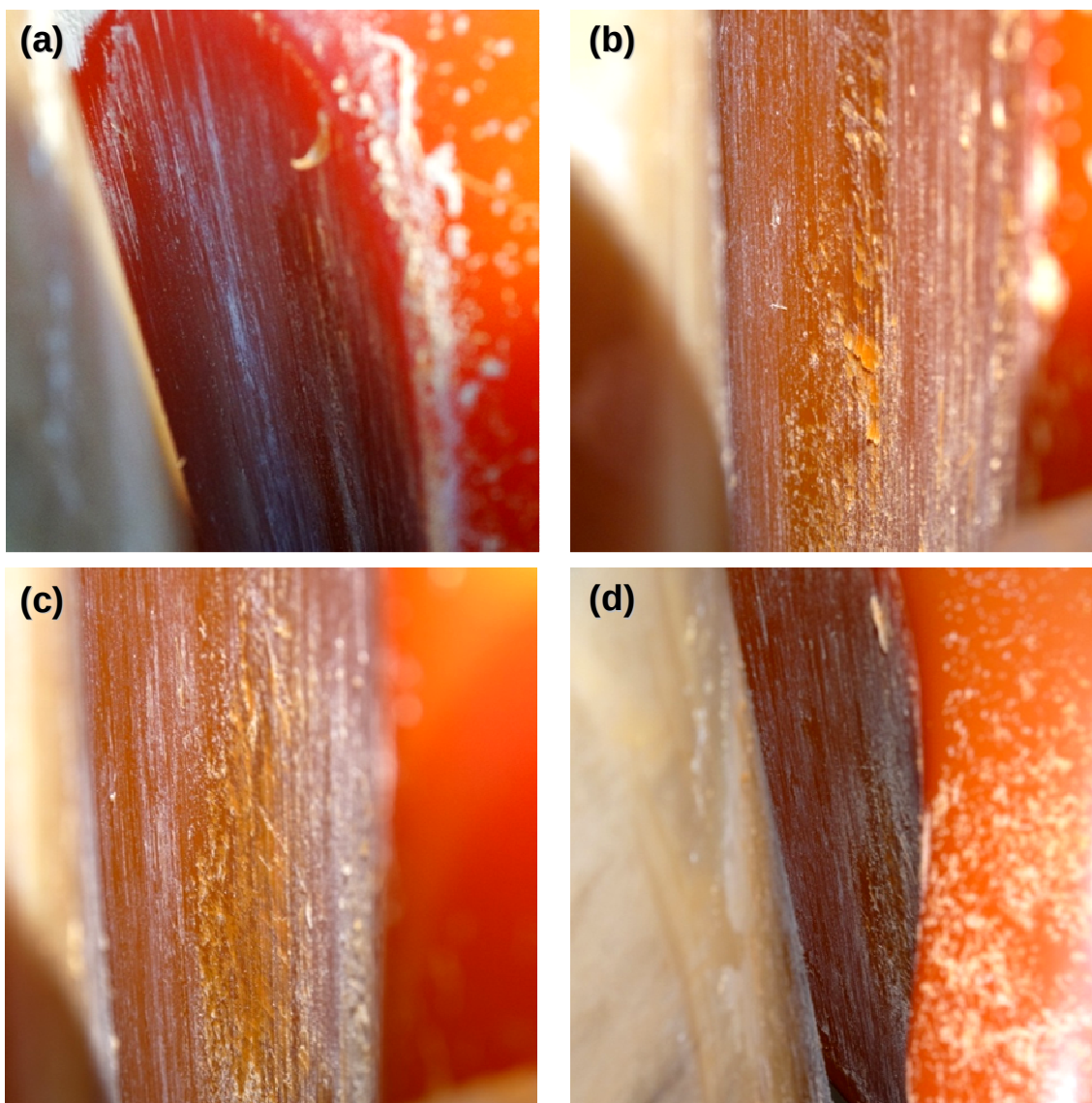


Figura 4.67 - Amostra da direita do PU após 100.000 ciclos (a), 150.000 ciclos (b), 200.000 ciclos (c) e 250.000 ciclos (d)

4.4.2. Avaliação acústica

Como o ensaio progride de uma situação na qual existe apenas desgaste abrasivo para uma na qual existem abrasão e fadiga superficial, um resultado satisfatório seria obter as características acústicas geradas por ambos os mecanismos para saber quando começaram e como se desenvolveram. Conforme discutido nos Procedimentos Experimentais, seção 3.5.3, foram realizadas 50 aquisições de 30 s ao longo de 15 km de deslizamento. A análise de cada uma dessas aquisições ocorreu inicialmente no domínio do tempo, através do valor RMS da EA, e apresentada na Fig. 4.69. As 20 primeiras aquisições