

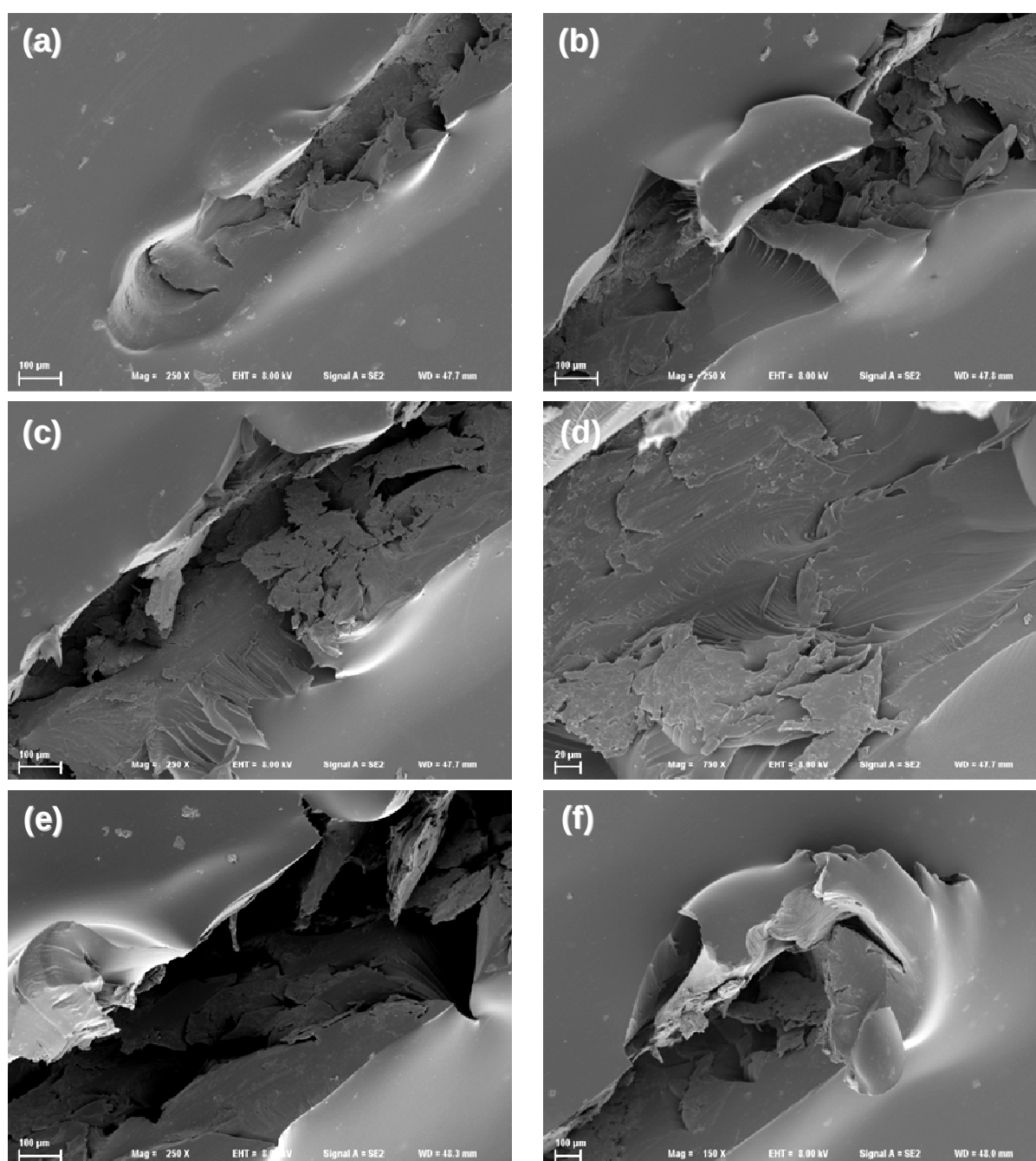


Figura 4.25 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 05 (penetrador cônico de 40° em PC). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.24. Micrografia (d) possui ampliação de 750x

Já no risco com penetrador cônico de 60° (ver Fig. 4.26), são notáveis trincas no fundo do risco devido ao *stick-slip* no início do ensaio (ver Fig. 4.27a) e trincas nas bordas, bem evidentes a partir da metade do ensaio (ver Fig. 4.27b). Neste caso, apenas frequências de pico abaixo de 50 kHz foram detectadas. Observa-se também que o sulcamento, evento tipicamente dúctil, foi bastante destacado quando comprado com os riscamentos apresentados anteriormente.

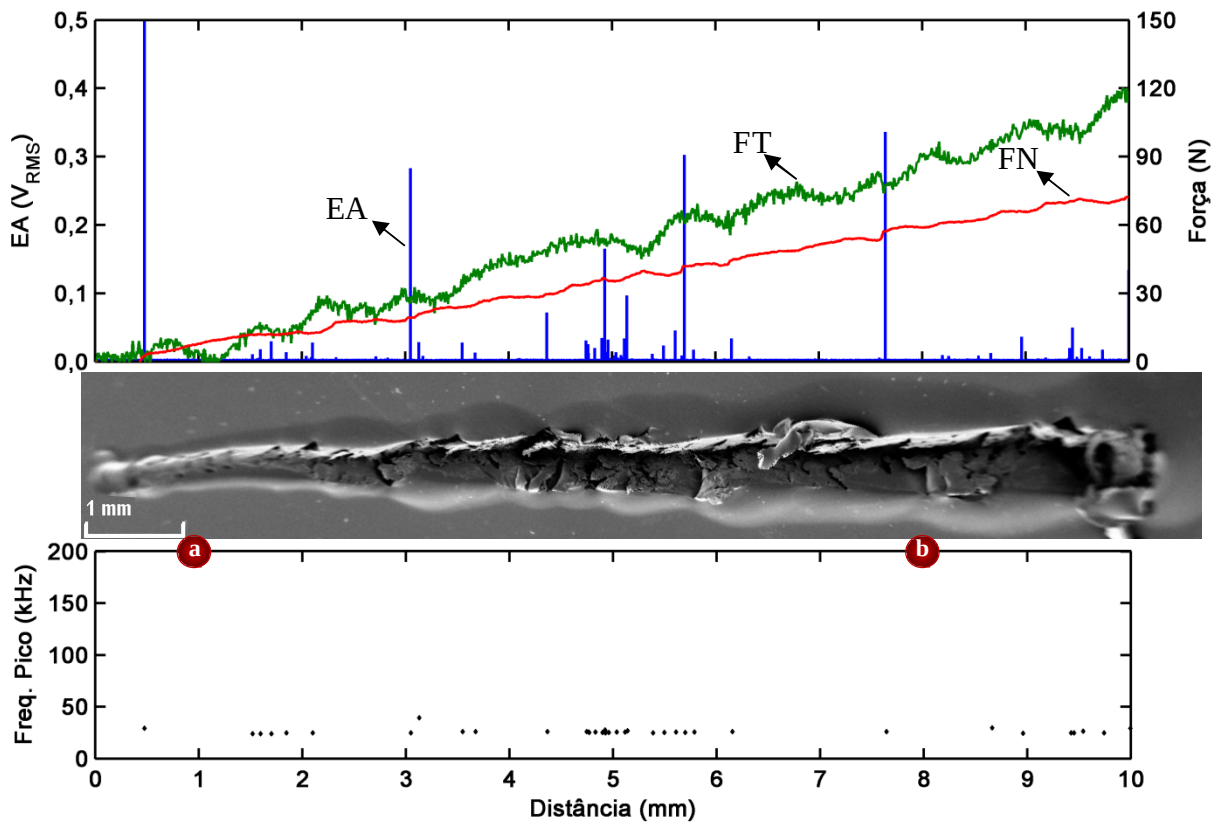


Figura 4.26 - Risco do ensaio 07 (penetrador cônico de 60° em PC), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (b) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.27)

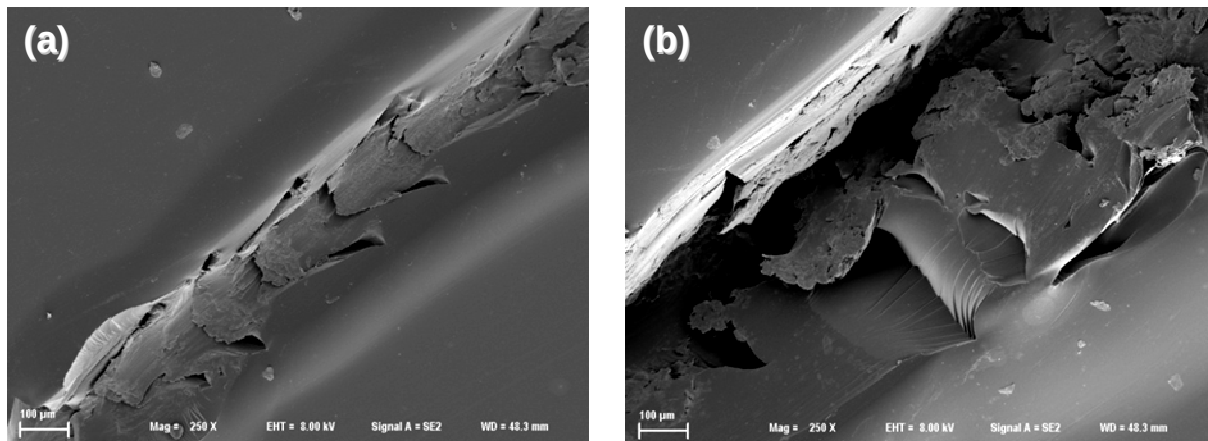


Figura 4.27 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 07 (penetrador cônico de 60° em PC). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.26

Por fim, no riscamento com penetrador cônico de 90° (ver Figs. 4.28 e 4.29), as trincas iniciaram no fundo por *stick-slip*, mas não chegaram sequer até a borda como no riscamento com penetrador de 60°. Não houve sequer sinal de trincas ocorrendo nas bordas

ou de material sendo destacado por adesão, entretanto o sulcamento foi bastante evidente neste riscamento, sendo comparável àquele encontrado nos riscamento com baixos ângulos de ataque. Como já se sabe que sulcamento não gera EA detectável pelo sensor de EA empregado, só foram registrados *bursts* com baixa frequência de pico.

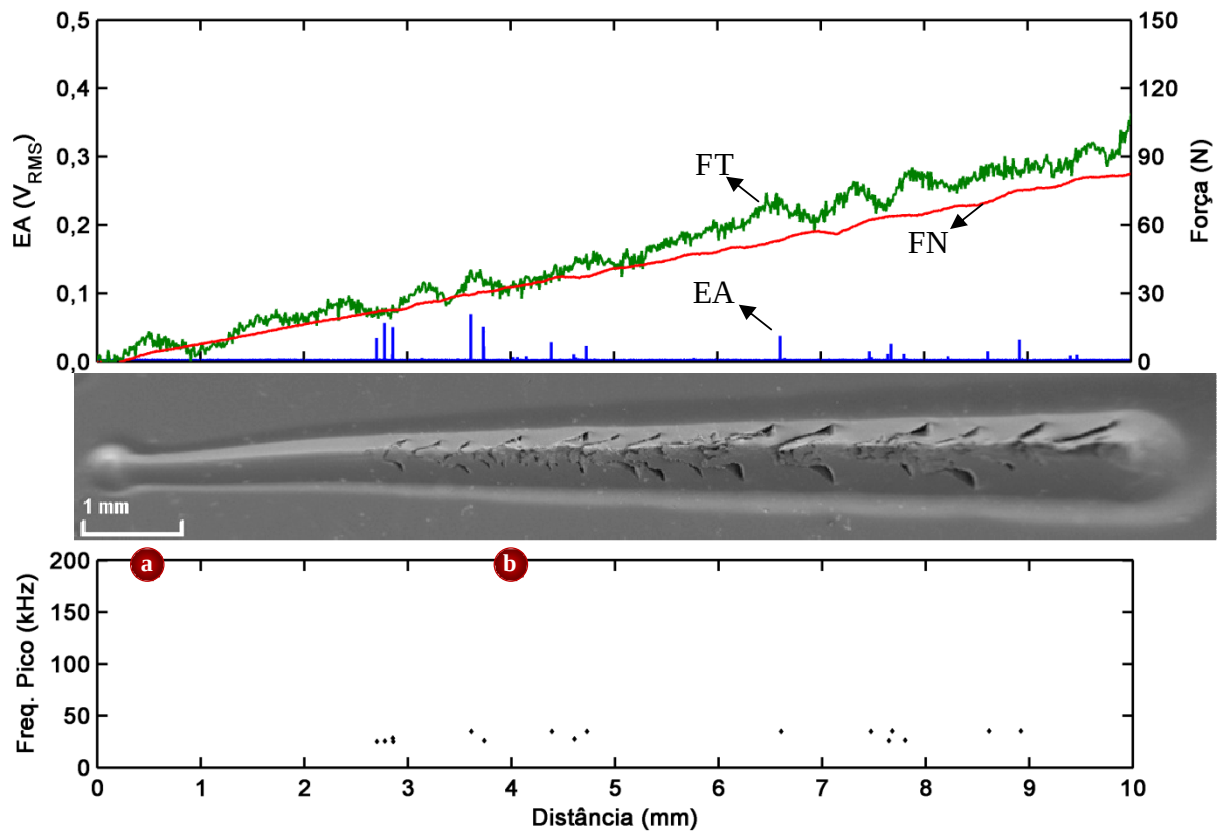


Figura 4.28 - Risco do ensaio 11 (penetrador cônico de 90° em PC), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (b) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.29)

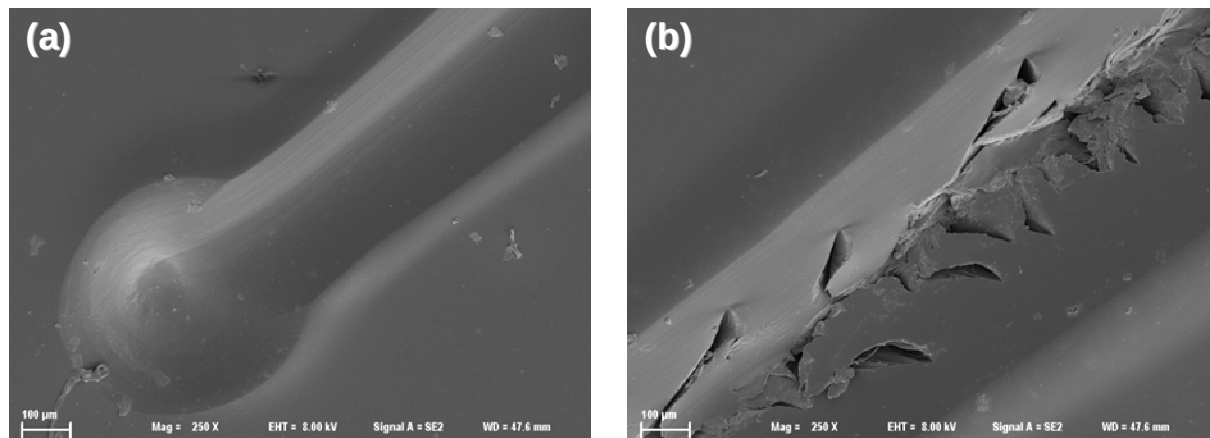


Figura 4.29 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 11 (penetrador cônico de 90° em PC). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.28.

4.1.6. Emissão Acústica em Ensaios de Esclerometria Retilínea

A seguir, é apresentado um resumo dos principais resultados e das principais observações relativas aos ensaios de riscamento:

1. Foram observados dois tipos de trincas nos ensaios realizados: a) as que ocorrem nas bordas do material e que às vezes se propagam lateralmente por grandes distâncias, e b) as que ocorrem no fundo do risco devido à concentração de tensões geradas pela fase "*stick*" do *stick-slip*, também conhecidas como trincas hertzianas;
2. Em geral, trincas nas bordas são favorecidas por ângulos de ataque altos, e trincas hertzianas por ângulos baixos, apesar de poderem ocorrer de modo simultâneo;
3. Existe uma correlação direta entre a presença de trincas, tanto nas bordas quanto no fundo do riscamento, e a intensidade da EA medida através do valor RMS;
4. A faixa de frequência de pico de 0 a 50 kHz no metal revestido é resultado do atrito e da iniciação de trincas, enquanto que a faixa de frequência a partir de 85 kHz é resultado da propagação das trincas hertzianas e ao efeito *stick-slip*;
5. A mera deformação plástica (submecanismo de sulcamento) de polímeros não pôde ser detectada através do valor RMS da EA, pelo menos não com o sensor utilizado. De qualquer forma, resultados semelhantes foram encontrados na literatura;
6. No caso dos polímeros, também houve destacamento devido à adesão durante o *stick-slip*, resultando em placas de material semi-destacado nas paredes internas;
7. Assim como no pino de aço, a faixa de frequência de pico de 0 a 50 kHz nos polímeros também é relativa a trincas, e a faixa de altas frequências de pico (a partir de 80 kHz) é relativa aos eventos de perda de material por *stick-slip*;
8. Materiais poliméricos amortecem as ondas acústicas bem mais do que metálicos. Pode-se notar que havia muitos *bursts* no início do riscamento do metal, mesmo havendo apenas microsulcamento e trincamento lateral. Já no caso dos polímeros, o início do ensaio era mais severo, apesar de pouca atividade acústica ser registrada;

4.2. Ensaio Abrasivos

Foram realizados 12 configurações diferentes de ensaios, sendo executadas três réplicas de cada e totalizando 36 deslizamentos sobre o papel abrasivo, conforme consta na seção 3.3.4. Contudo, apenas um deslizamento de cada uma das 12 configurações foi apresentada neste capítulo, sendo as duas outras réplicas apresentadas no Apêndice B.

Esta seção foi subdividida em duas partes: na primeira são apresentados os mecanismos de desgaste evidenciados através das micrografias, além dos resultados de EA tanto no tempo, quanto no domínio da frequência através da frequência de pico. Além disso, os resultados de cada um dos três materiais foram apresentados separadamente. Em seguida, os resultados foram organizados em conglomerados, ou gráficos de energia em função da frequência de pico balanceada, tentando descobrir se é possível distinguir as características acústicas dos três materiais empregados. É preciso atentar que, nestes ensaios, as regiões iniciais e finais dos pinos não correspondem às regiões iniciais e finais da aquisição da EA.

4.2.1. Avaliação tribológica e Frequências de pico

a) Pinos de aço

O primeiro material analisado foi o aço. As micrografias dos ensaios realizados são apresentadas nas Figs. 4.30 e 4.31 (cargas de 13,7 N e 49,0 N, respectivamente). Nessas figuras, à esquerda estão os resultados dos deslizamentos sobre papel abrasivo #400 e à direita sobre o papel #220. A primeira micrografia é sempre a vista geral, indicando tanto o sentido do deslizamento dos grãos abrasivos quanto os pontos que foram ampliados. Em seguida, são apresentadas três ampliações, todas com 1.000x, sendo que a primeira corresponde à região frontal do pino, a segunda à região intermediária e a última à final.

As micrografias foram padronizadas com a direção do deslizamento dos grãos abrasivos na horizontal. Consequentemente, pode-se afirmar com segurança que qualquer risco na vertical é decorrente do processo de preparação da amostra.

Observa-se, tanto na Fig. 4.30 quanto na Fig. 4.31, que predominam os mecanismos de abrasão por microsulcamento e microcorte no sentido do ensaio, com esporádicas marcas verticais em uma das bordas. Observa-se também que as marcas de abrasão dos papéis abrasivos #400 são menores que as do #220.

As Figuras 4.32 a 4.35, por sua vez, exibem os resultados de Emissão Acústica para o primeiro deslizamento sobre o papel abrasivo de cada uma das quatro configurações ensaiadas, sendo que os resultados do segundo e do terceiro deslizamentos estão no Apêndice B, Fig. 8.33. Com base na tensão RMS obtida, foram considerados bursts os trechos que excediam um limiar de 10 mV e que atingiam um valor máximo de pelo menos 20 mV, encerrando quando voltavam para um nível menor que 5 mV.

A primeira observação a se fazer é que a amplitude da EA foi maior no caso dos papéis abrasivos de #220, condizente com o maior desgaste observado nas micrografias. A literatura aponta a tendência de grãos maiores levarem a riscamentos com maior energia acústica (HASE et al., 2012). Entretanto, não houve diferença visível entre as amplitudes dos sinais RMS da EA dos ensaios realizados com carregamentos diferentes.

Analisando os bursts no domínio da frequência, através das frequências de pico, observa-se uma clara tendência de se manterem em uma faixa de frequências entre 25 e 75 kHz, aproximadamente. Como o evento predominante é o de abrasão por corte e sulcamento e os bursts possuem frequência de pico predominantemente a na faixa de 25 a 75 kHz, pode-se concluir que tal faixa caracteriza as ondas acústicas emitidas pelo mecanismo em questão. Esta faixa de frequências é bastante similar àquela na qual ocorrem as frequências de pico nos ensaios de esclerometria. Entretanto, tal sobreposição no domínio da frequência entre propagação de trincas e desgaste abrasivo também pode ser encontrada na literatura, como indicado na Fig. 2.6 (HASE et al., 2012).

Observa-se que alguns *bursts* tinham frequências de pico de aproximadamente 200 kHz, especialmente nas condições com maiores cargas e maiores grãos abrasivos. A literatura mostra que a abrasão leva a eventos acústicos com diversos picos dentro de uma faixa relativamente extensa, e que partículas o desgaste gerado por partículas soltas na interface geram frequências de pico em 200 kHz, conforme observado na Fig. 2.6 (HASE et al., 2012). Logo, acredita-se que tais *bursts* próximos a 200 kHz sejam devidos à abrasão.

De qualquer forma, os bursts com frequência de pico de 200 kHz possuem amplitude baixa quando comparada à amplitude dos bursts na faixa ao redor de 50 kHz. Isto pode ser visto na ampliação de um burst de 200 kHz da Fig. 4.35 e seu respectivo PSD, apresentado na Fig. 4.36. A FFT desse burst foi calculada tendo como base os parâmetros da Tab. 2.1. Foi utilizado um trecho de sinal de 2.000 pontos, equivalente a uma duração de 0,4 ms. Como a taxa de amostragem foi de 5 MHz, a resolução em frequência do PSD foi de 2,5 kHz. A pequena amplitude desse burst em relação aos demais que compõem o sinal adquirido indica que bursts como ele não se referem a algum evento facilmente identificável em micrografias, motivo pelo qual não é possível apontar o que são exatamente.

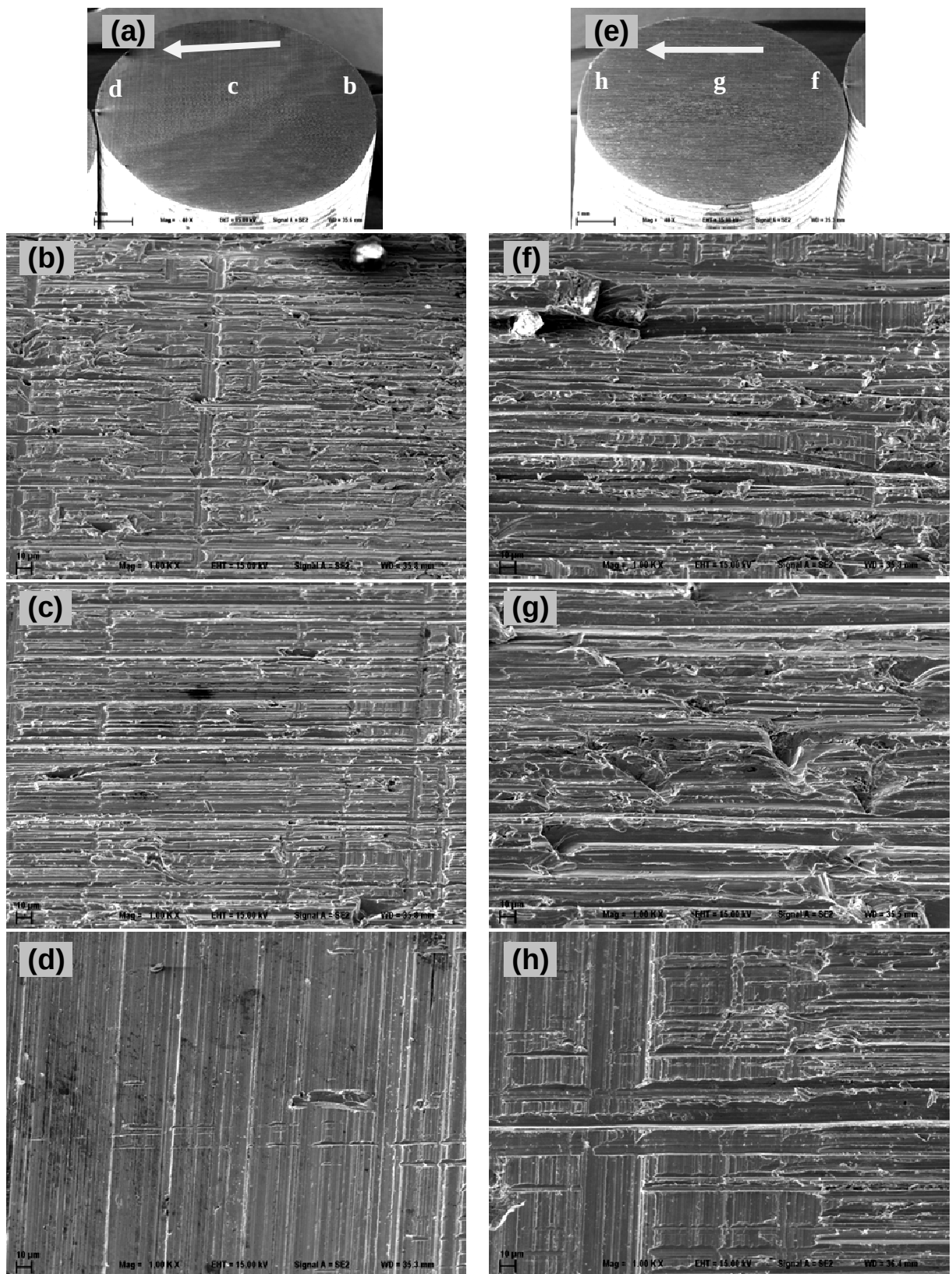


Figura 4.30 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de Aço contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 13,7 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e)

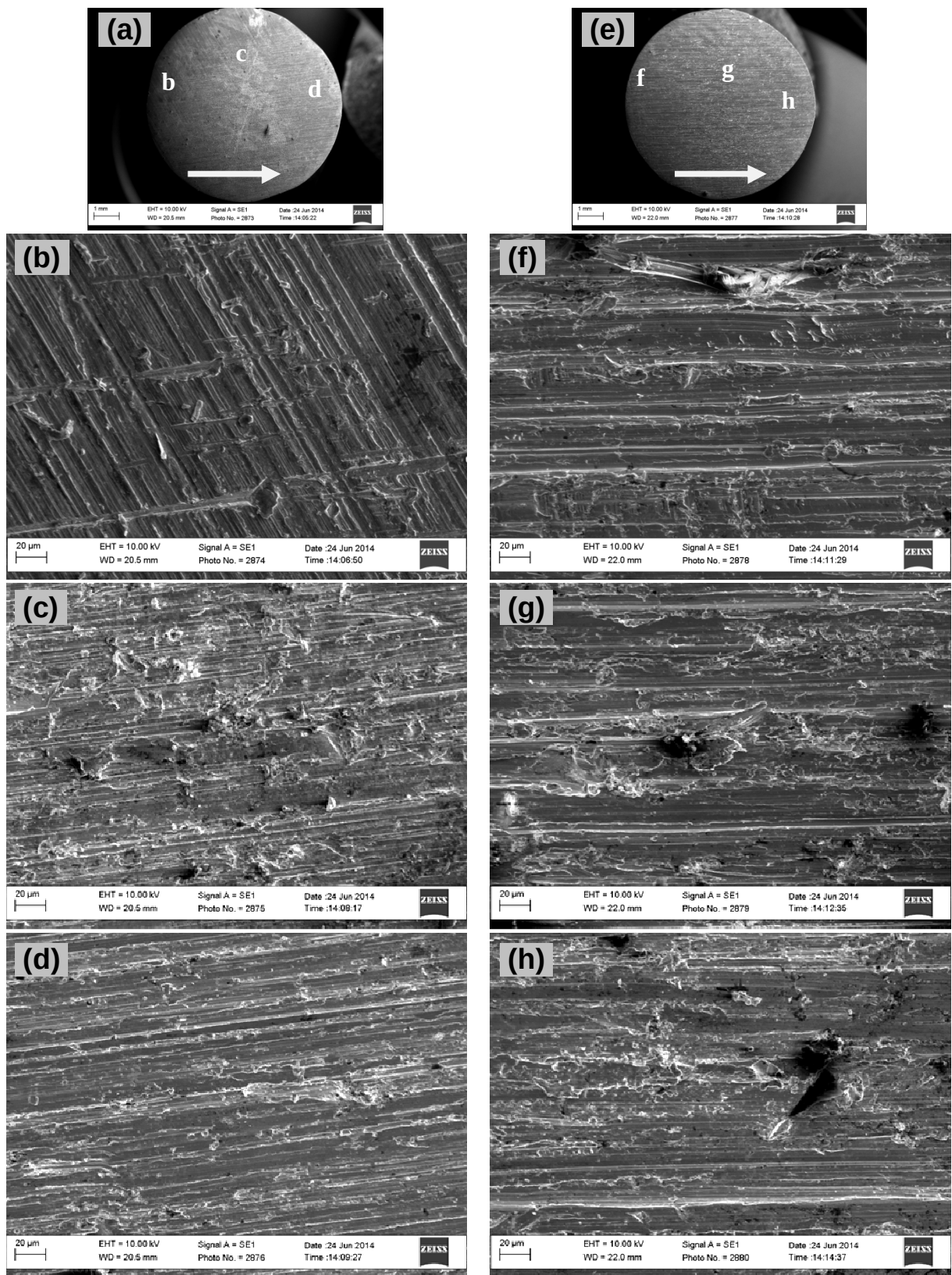


Figura 4.31 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de Aço contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 49,0 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e)

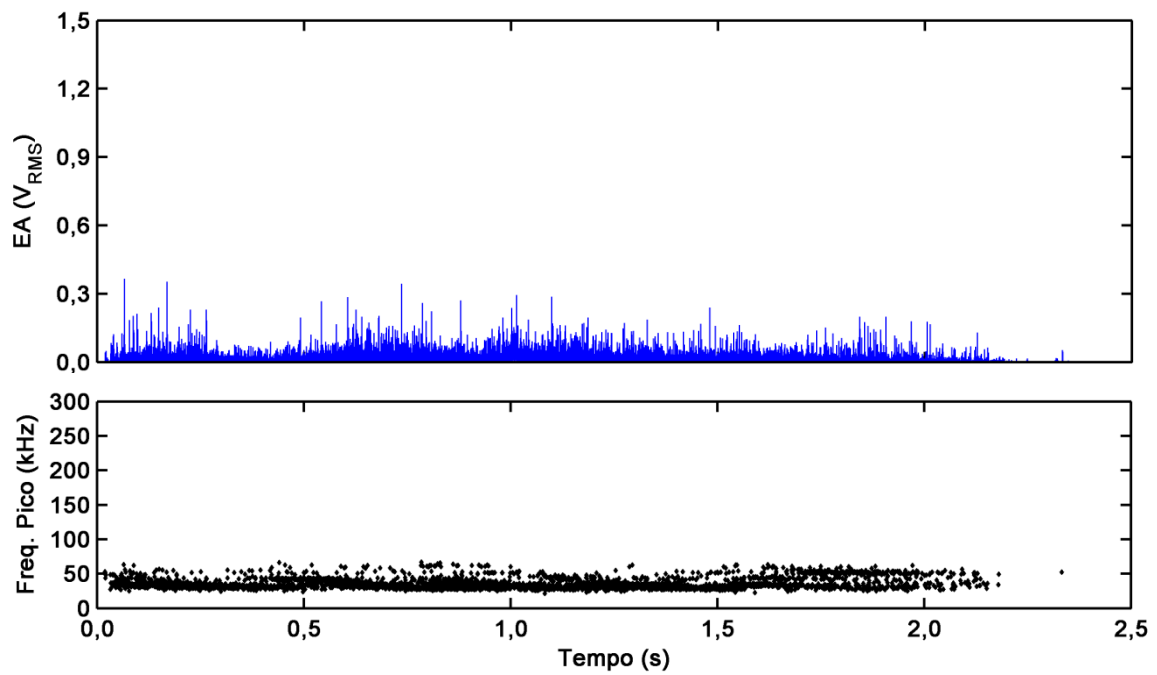


Figura 4.32 - Deslizamento 01 (aço, #400 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

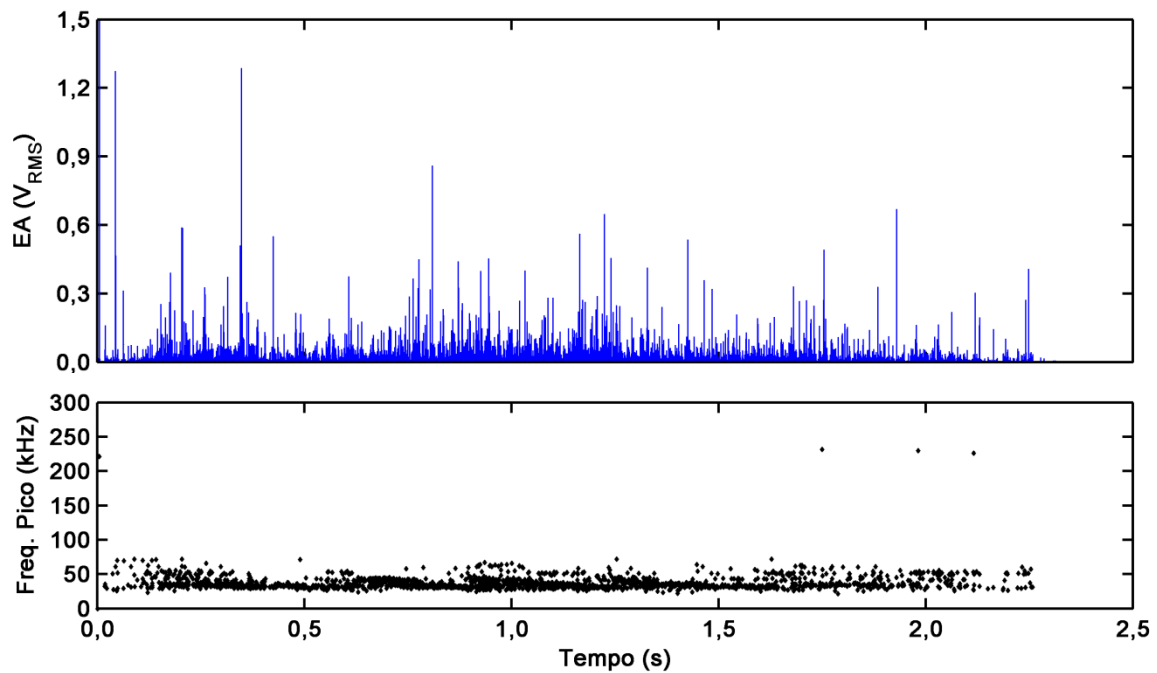


Figura 4.33 - Deslizamento 04 (aço, #220 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

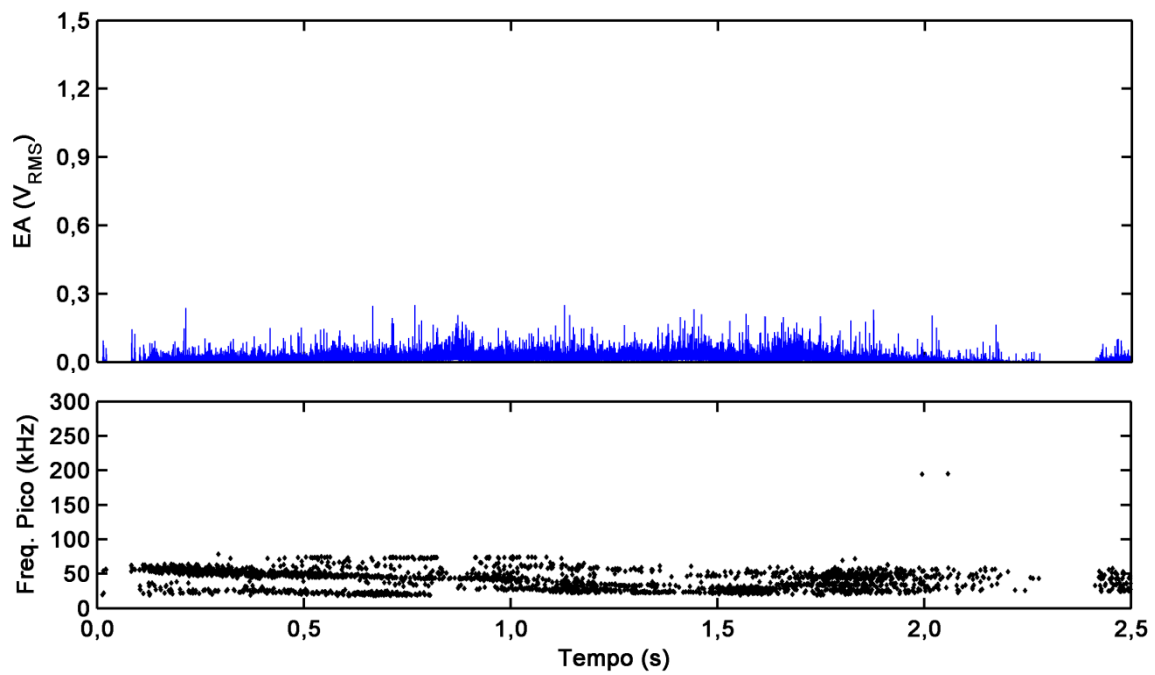


Figura 4.34 - Deslizamento 19 (aço, #400 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

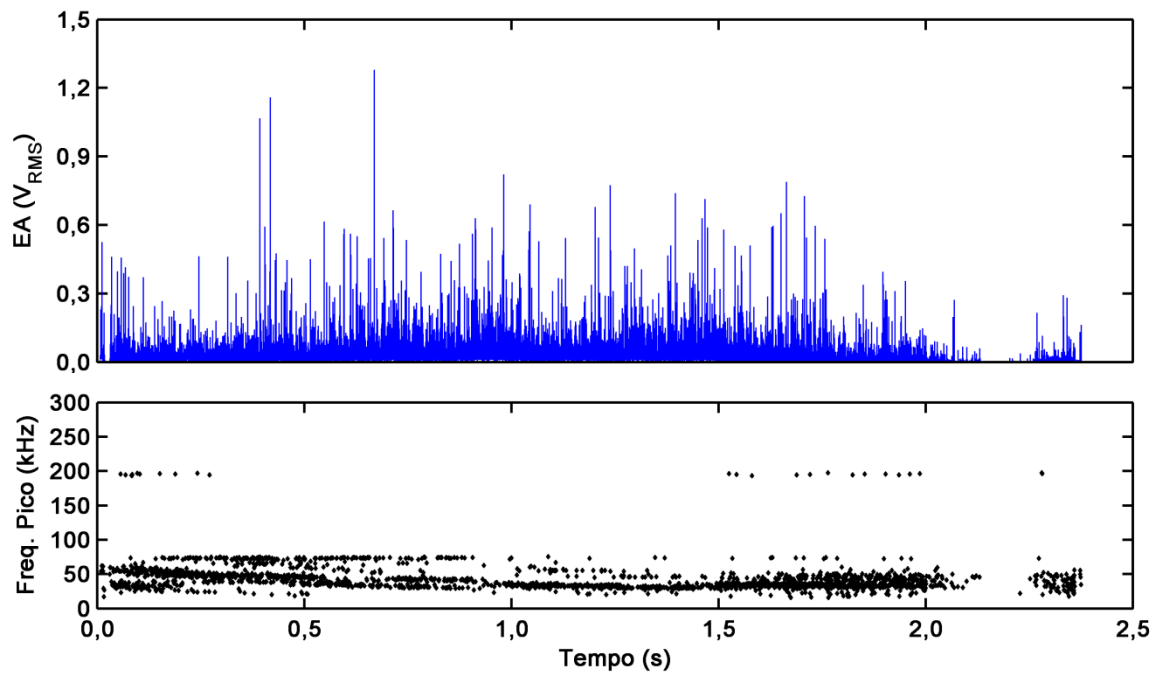


Figura 4.35 - Deslizamento 22 (aço, #220 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

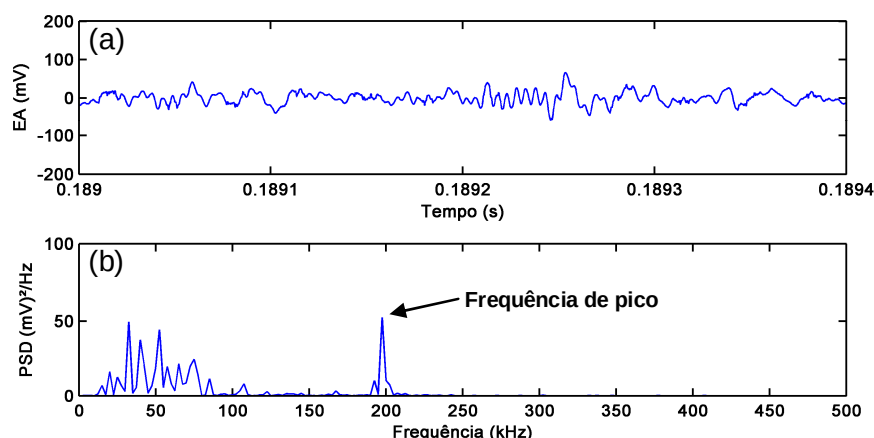


Figura 4.36 - *Burst* de EA presente no deslizamento 22 (ver Fig. 4.35), nos domínios do tempo (a) e da frequência (b)

b) Pinos de poliamida (PA)

Na Poliamida, predominaram os eventos de abrasão por microsulcamento e microcorte, como pode ser visto nas Figs. 4.37 e 4.38. Tais eventos levaram a um completo desaparecimento das marcas verticais referentes à preparação das amostras. Além disso, foram encontradas fibras (ver, por exemplo, a Fig. 4.37a) similares às encontradas por Iqbal *et al.* (2011) no riscamento de PEEK (ver Fig. 2.11f) e por Ramirez *et al.* (2004) no ensaio de tração de Polipropileno. Pode-se observar que, em geral, a região frontal e central dos pinos possuem riscos maiores do que a região posterior.

Em seguida, foram analisados os resultados das emissões acústicas nas Figs. 4.39 a 4.42, através do sinal RMS em conjunto com as frequências de pico. Mais uma vez, apenas o primeiro deslizamento de cada configuração foi apresentado, ficando o restante no Apêndice B, Fig. 8.34. Com base na tensão RMS obtida, foram considerados *bursts* os trechos que excediam um limiar de 25 mV e que atingiam um valor máximo de pelo menos 35 mV, encerrando quando voltavam para um nível menor que 15 mV. Estes valores foram maiores do que os que vinham sendo utilizados por que nestas aquisições as amplificações do sinal eram maiores.

Comparando-se as Figs. 4.39 e 4.42 com as Figs 4.40 e 4.41 e levando em consideração as micrografias, nota-se que quando a amplitude da EA foi maior, o desgaste também foi maior, como ocorreu nos pinos de aço. Observa-se também que predominaram os *bursts* com frequência de pico entre 25 e 75 kHz, juntamente com os eventos acústicos com frequência de pico na faixa acima de 200 kHz. Estes resultados foram bastante próximos ao que ocorreu no caso do pino de aço, o que já era de se esperar uma vez que os mecanismos de desgaste foram os mesmos.

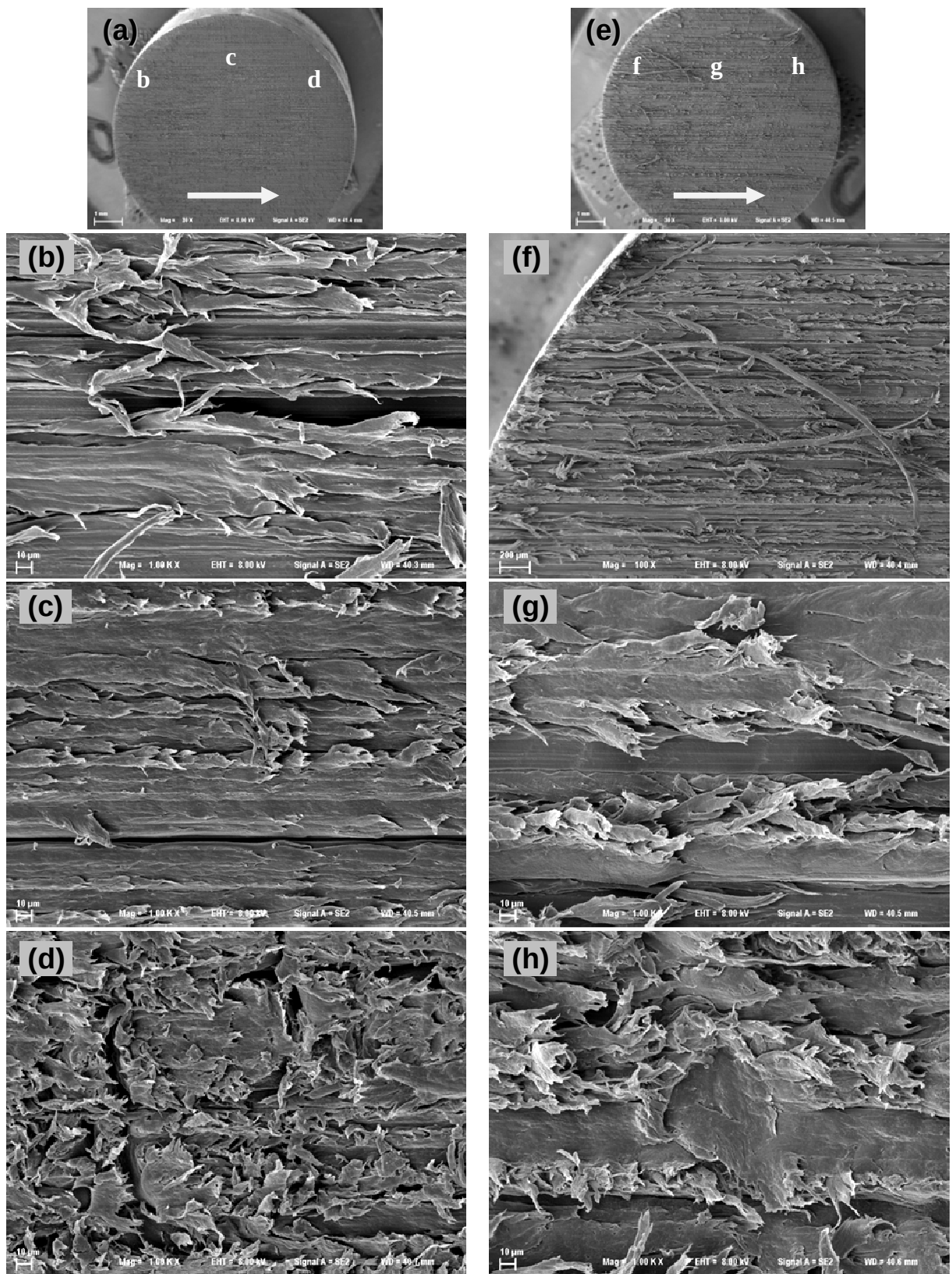


Figura 4.37 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de PA contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 13,7 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e)

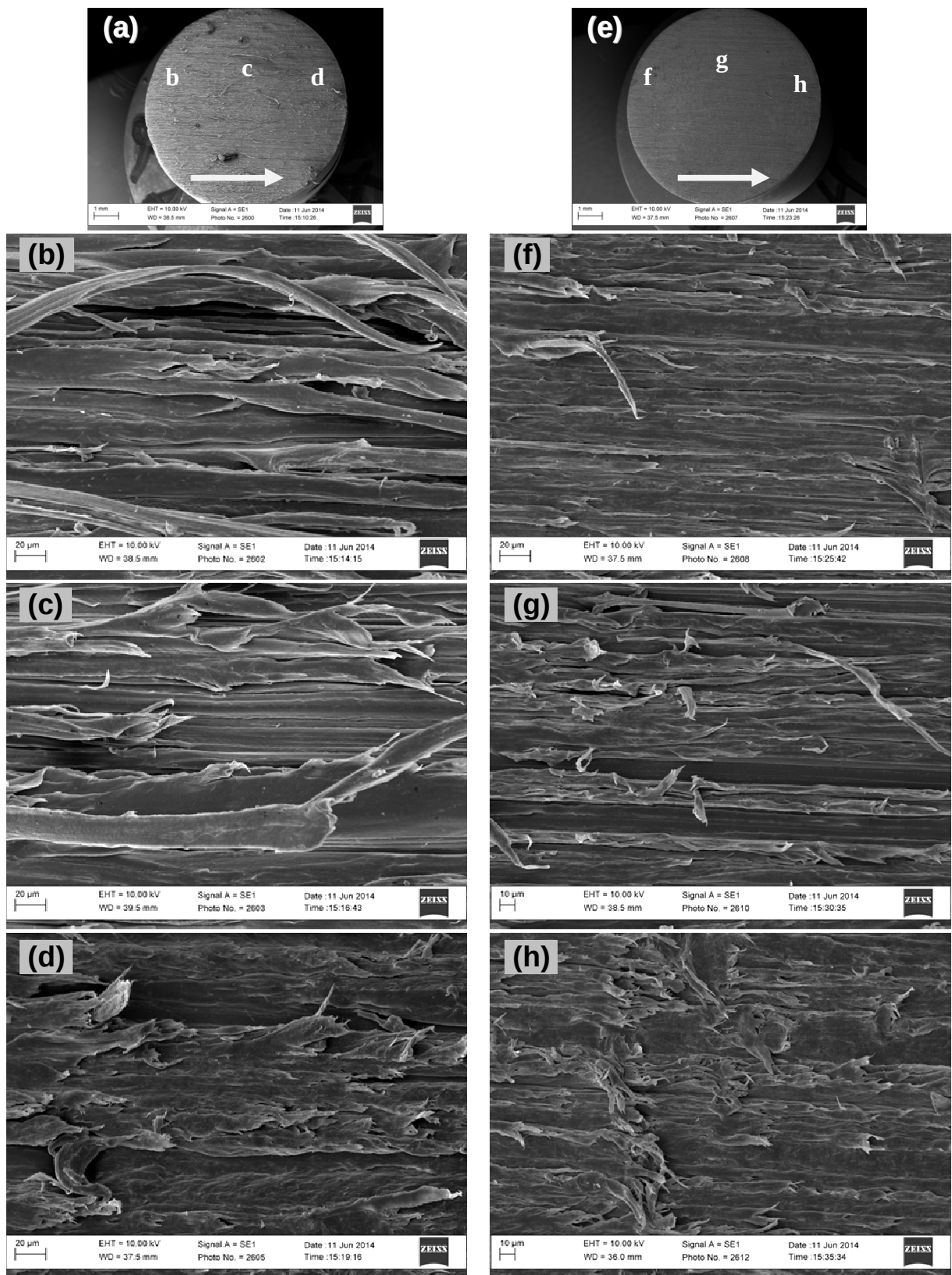


Figura 4.38 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de PA contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 49,0 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e)

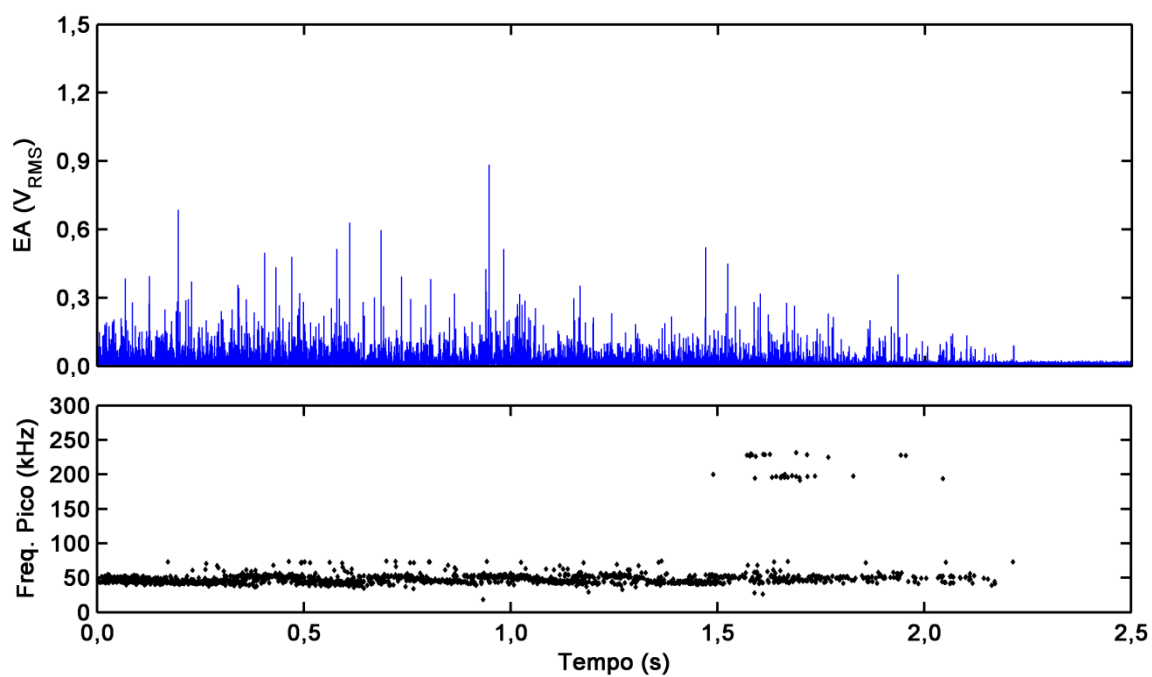


Figura 4.39 - Deslizamento 07 (PA, #400 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

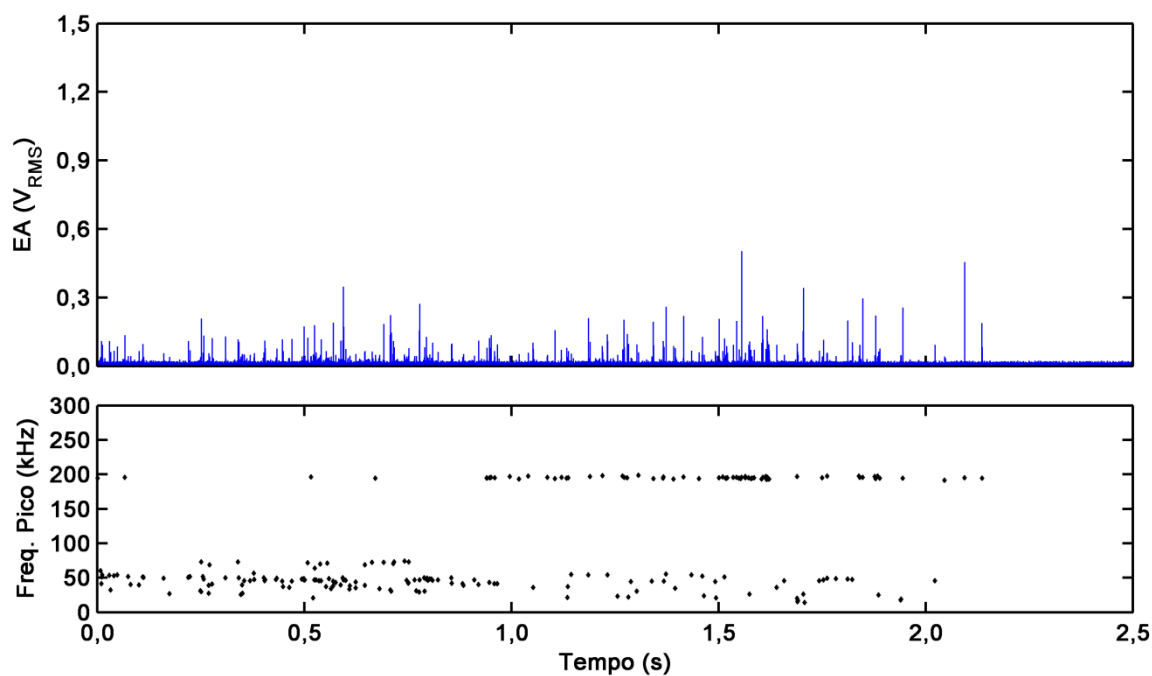


Figura 4.40 - Deslizamento 10 (PA, #220 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

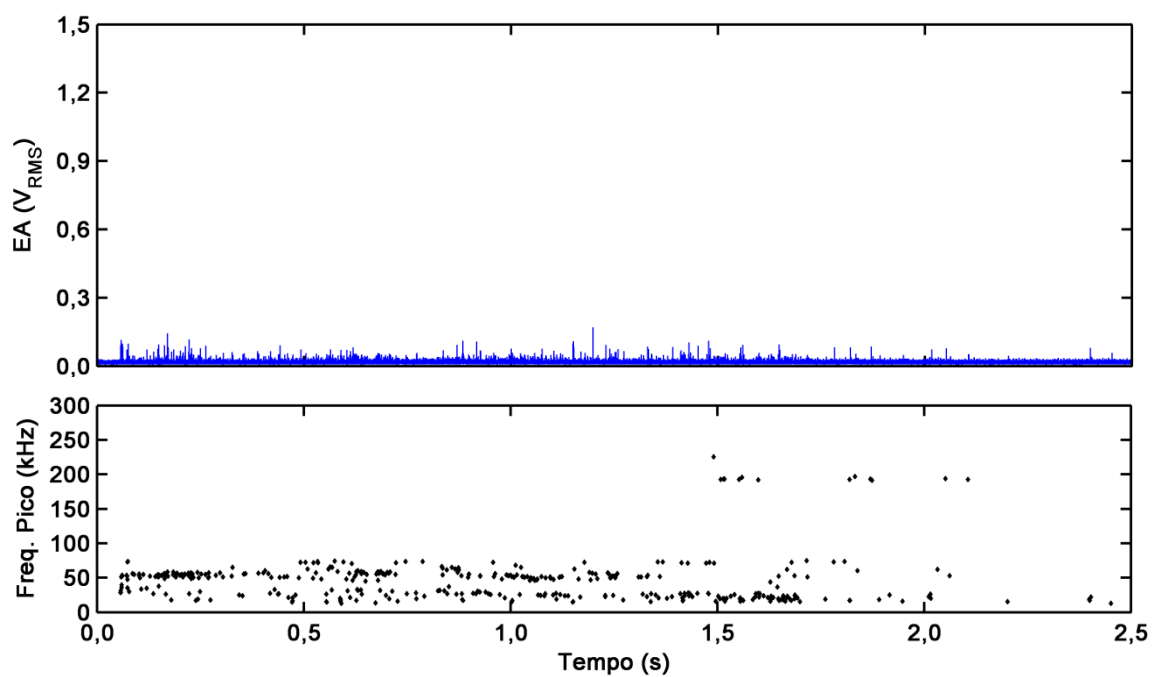


Figura 4.41 - Deslizamento 25 (PA, #400 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

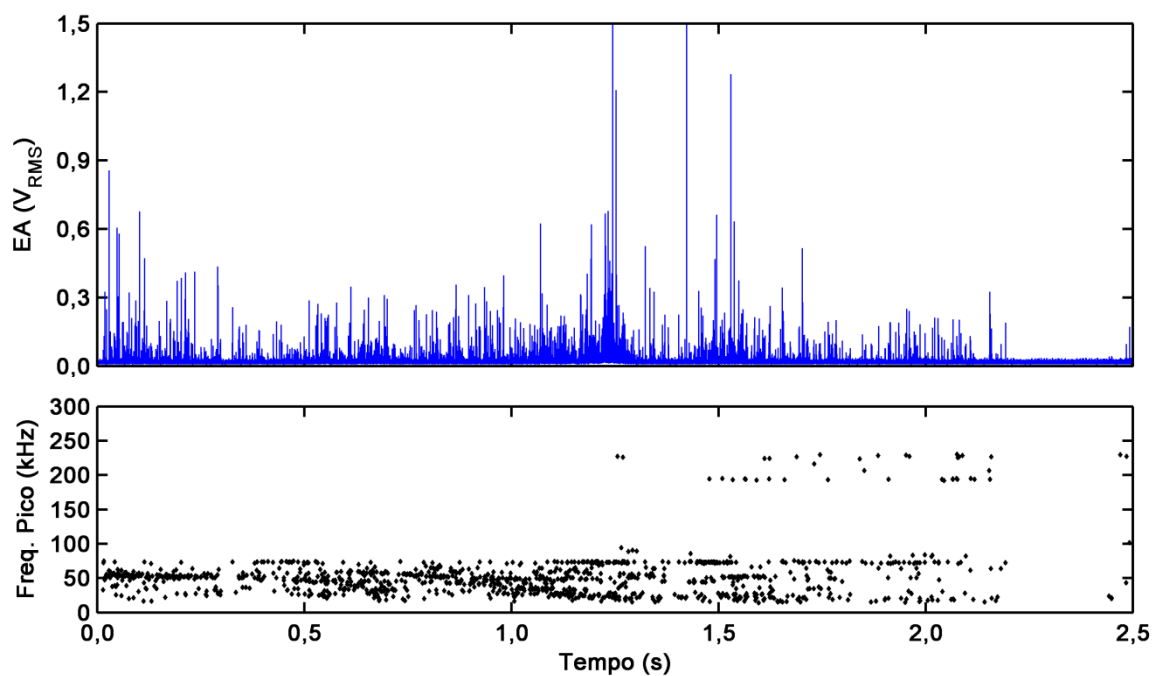


Figura 4.42 - Deslizamento 28 (PA, #220 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*

c) Pinos de poliuretano (PU)

No Poliuretano predominou o mecanismo de microcorte, havendo também microtrincamento, conforme indicado nas Figs. 4.43 e 4.44. Nos casos dos ensaios com carga mais elevada, tais eventos levaram a um completo desaparecimento das marcas verticais referentes à preparação das amostras, o que não ocorreu nos ensaios com menores cargas. Neste último caso, observou-se inclusive um aspecto aproximadamente reticulado, decorrente da sobreposição das linhas de desgaste do ensaio com as linhas de desgaste verticais pré-existent. Pode-se notar também que os mecanismos neste material tiveram um aspecto um pouco mais frágil, não apresentando aquelas fibras comuns na poliamida.

Em seguida, foram analisados os resultados das emissões acústicas dos primeiros deslizamentos de cada configuração nas Figs. 4.45 a 4.48, através do sinal RMS e das frequências de pico. Os resultados dos demais deslizamentos estão no Apêndice B, Fig. 8.35. Os *bursts* foram identificados através dos mesmos critérios usados no PA.

Quanto à amplitude das emissões acústicas, todas as quatro configurações apresentaram resultados similares, com exceção da última configuração. Esta observação é bem condizente com o fato de que a última configuração tem maior carga e maiores grãos abrasivos, sendo assim a condição mais severa.

Quanto à frequência de pico desses *bursts*, predominaram aqueles na faixa de 25 a 75 kHz, apesar de terem ocorrido uma certa quantidade de *bursts* na linha dos 200 kHz. Este resultado é condizente com o que foi encontrado nos pinos de aço e de PA.

4.2.2. Análise de conglomerados

Os gráficos de frequência de pico mostrados nas seções anteriores auxiliam na tarefa de identificar os mecanismos de desgaste. Contudo, eles não permitem saber, pelo menos de maneira fácil, qual material está sendo desgastado. Como o método da análise de conglomerados tem potencial para fazer tais distinções, foram confeccionados gráficos de energia em função da frequência para verificar se tal tarefa seria possível.