

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados e discutidos a seguir, na mesma sequência do capítulo relativo aos Procedimentos Experimentais.

4.1. Ensaios de Esclerometria Retilínea

Ao todo, foram realizados 57 ensaios de riscamento, correspondentes a três réplicas de 19 configurações diferentes, conforme consta na seção 3.2.4. Entretanto, apenas um risco de cada uma das 19 configurações será apresentado no presente capítulo, sendo as duas outras réplicas deixadas para o Apêndice A. Além disso, os resultados destes ensaios foram subdivididos segundo o material da amostra riscada para simplificar sua apresentação. Contudo, os riscos realizados com penetradores com baixos ângulos de ataque (cônico 120°, Vickers/aresta e Vickers/face) foram apresentados em um subitem próprio por possuírem resultados bastante semelhantes.

4.1.1. Riscamentos em aço revestido com Níquel químico

A Figura 4.1 contém um conjunto de dois gráficos e uma micrografia relativos ao riscamento do ensaio 02 (amostra metálica e penetrador cônico de 120°). Eles foram dispostos de maneira a se poder associar com facilidade os eventos tribológicos que surgiram durante o riscamento com as forças normal (FN) e tangencial (FT), valores RMS da EA e frequências de pico associados à sua ocorrência. O sentido do riscamento é da esquerda para a direita. Alguns trechos considerados mais relevantes, tanto devido à presença de eventos tribológicos quanto devido à presença de atividade acústica, foram identificados com letras para permitir que sejam referenciados na Fig. 4.2.

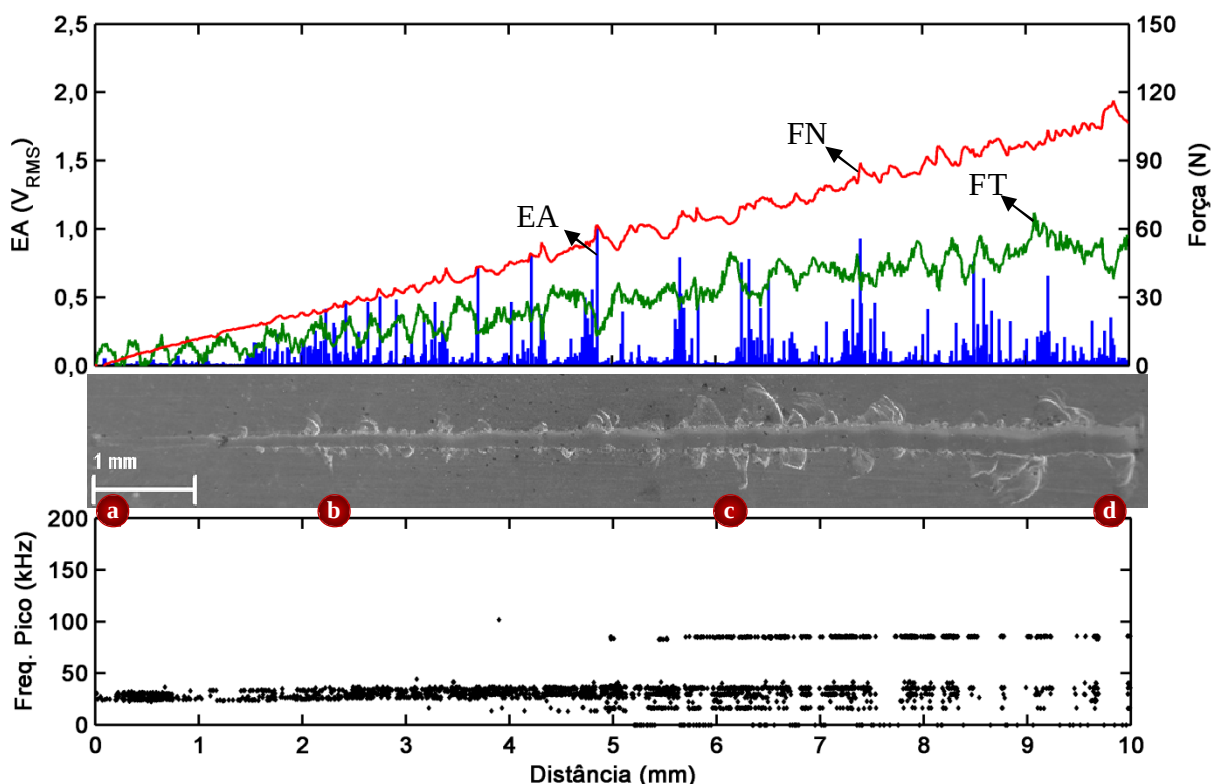


Figura 4.1 - Risco do ensaio 02 (penetrador cônico de 120° em aço revestido com Níquel químico), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (d) indicam as posições das ampliações (ver Fig. 4.2)

A primeira observação a ser feita ao se analisar a Fig. 4.1 é que de fato ocorreram trincas durante o deslizamento do penetrador (ver setas) e que sua posição coincide com os *bursts* de EA apresentados na tensão RMS. É notável como os picos de EA aumentam a amplitude bruscamente quando as trincas laterais começam a surgir, a partir de aproximadamente 1,5 mm de riscamento. Além disso, à medida que o tamanho das trincas e dos destacamentos aumenta, a intensidade da EA também aumenta.

Também é possível notar a presença de trincas hertzianas no detalhe da Fig. 4.2c, que surgem no fundo do risco sob o penetrador e não levam à perda de material, ao contrário das trincas laterais que surgem ao redor do penetrador e levam à perda de material. Tais trincas indicam a presença do efeito *stick-slip* durante o riscamento, sendo acompanhadas também de oscilações na força normal.

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.

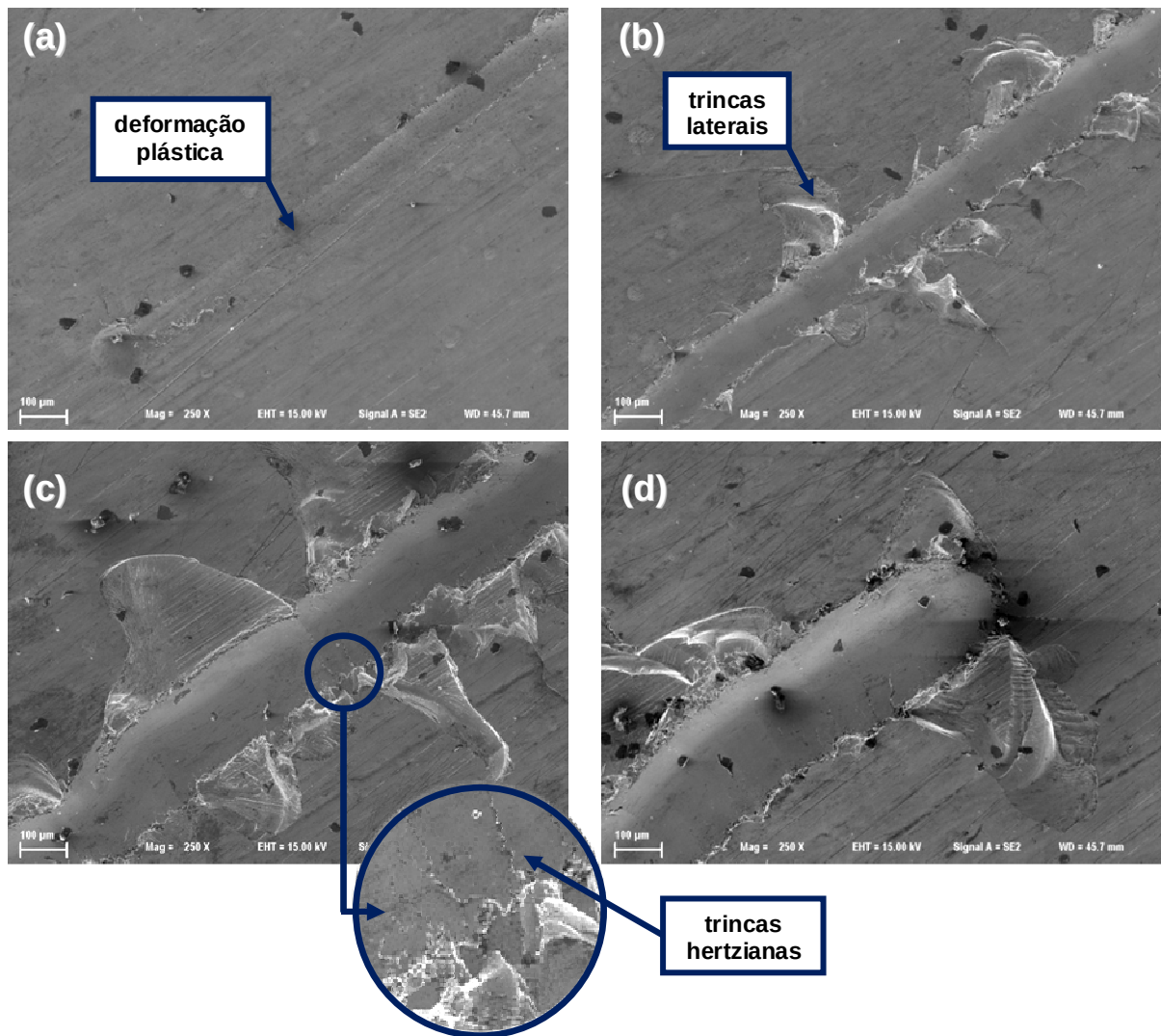


Figura 4.2 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 02 (penetrador cônico de 120° em aço revestido com Níquel químico). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.1

Analisando a EA no domínio da frequência presente na Fig. 4.1, podem-se notar duas bandas distintas nas quais as frequências de pico dos *bursts* se acumulam: uma abaixo de 50 kHz, e outra por volta de 85 kHz, claramente distinta do restante. Ao se comparar o gráfico de frequência de pico com o gráfico da Fig. 2.20 (pág. 29), tem-se uma indicação da presença de dois mecanismos de desgaste distintos em curso.

Na Figura 4.1, observa-se que a faixa de frequência de pico abaixo de 50 kHz permanece por quase todo o riscamento. Desta forma, acredita-se que essa faixa representa os eventos de trincamento lateral, que também predominaram em quase todo o riscamento. A literatura indica que microtrincamentos podem levar a eventos acústicos com frequências de pico ao redor de 100 kHz (HASE *et al.*, 2012; GUTKIN *et al.*, 2011) ou com

frequências de pico de até 50 kHz (GUTKIN *et al.*, 2011). Essas diferenças de frequência de pico são devidas a variações nas formas de propagação de trincas (GUTKIN *et al.*, 2011).

Entretanto, nota-se que na região inicial do riscamento (Fig. 4.2a) não há trincas laterais, mas mesmo assim há *bursts* de amplitude relativamente baixa e com frequências de pico na faixa abaixo de 50 kHz. É possível que tais *bursts* sejam relativos a pequenas trincas que ocorreram na frente do penetrador e que não se propagaram até as laterais, e que depois desapareceram graças à passagem do penetrador. Deste modo, acredita-se que somente a partir da posição 1,5 mm, as trincas superficiais começaram a se propagar pelas laterais, gerando EA de maior amplitude, porém frequências de pico na mesma faixa.

Já a faixa de frequência em 85 kHz surge a partir de posição de 5 mm, coincidindo com o surgimento do efeito *stick-slip*. A partir dessa posição, a força normal começa a apresentar oscilações e trincas hertzianas começam a surgir, ambas consequências típicas desse efeito. Esta tendência se repete nos riscamentos no metal revestido do Apêndice A (Figs. 8.1 e 8.2). Além disso, a literatura corrobora tal resultado, mostrando que eventos acústicos relacionados ao *stick-slip* possuem frequências de pico a partir de aproximadamente 100 kHz (FERRER *et al.*, 2010; ASAMENE; SUNDARESAN, 2012).

4.1.2. Riscamentos em polímeros utilizando baixos ângulos de ataque

Os riscos com penetrador cônico de 120° (ângulo de ataque de 30°) no PS, no PMMA e no PC podem ser vistos nas Figs. 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. Ao analisar as micrografias, não se nota nenhum mecanismo de degradação além da deformação plástica (microsulcamento). Esta ausência de perda de material é acompanhada de uma EA contínua e de baixa intensidade, não se notando nenhum *burst* de EA, mesmo alterando a escala da tensão RMS em relação ao gráfico anterior (Fig. 4.1).

Resultados semelhantes foram observados nos riscamentos com penetrador Vickers (ângulo de ataque de 22°) usando tanto uma das arestas voltada para frente, como mostrado nas Figs. 4.6, 4.7 e 4.8, quanto uma das faces voltada para frente, como apresentado nas Figs. 4.9, 4.10 e 4.11. Nessas figuras, também não se notam trincas ou corte, apenas sulcamento, além da intensidade da EA continuar não apresentando *bursts*. A pequena diferença nos valores RMS da EA relativos aos três últimos riscamentos (usando penetrador Vickers com face para frente) se deve apenas a alterações no ruído de fundo, não representando algum tipo de variação dos mecanismos tribológicos.

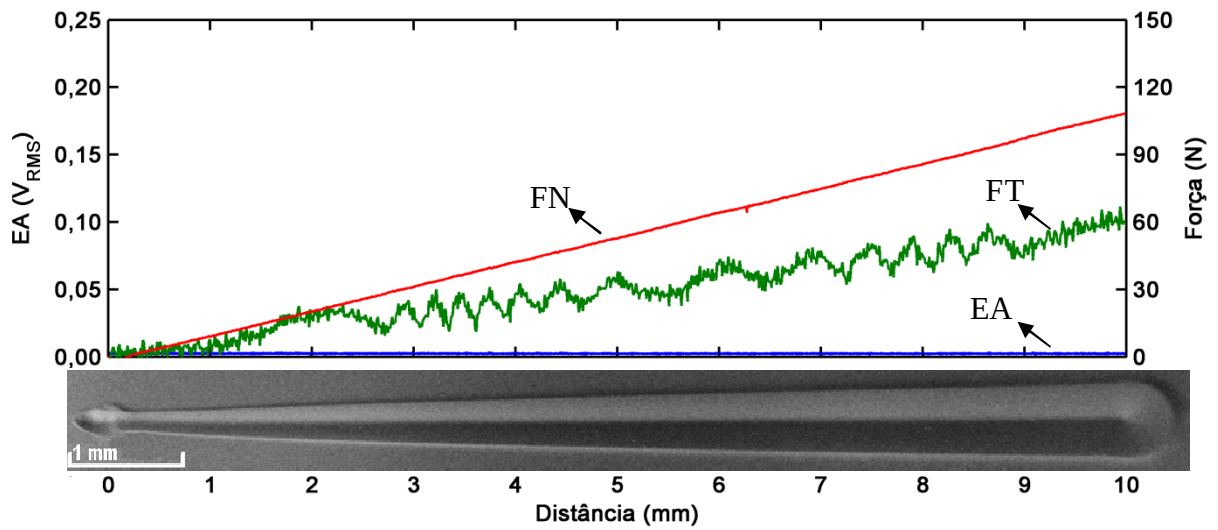


Figura 4.3 - Risco do ensaio 49 (penetrador cônico de 120° em PS), com forças e tensão RMS da EA

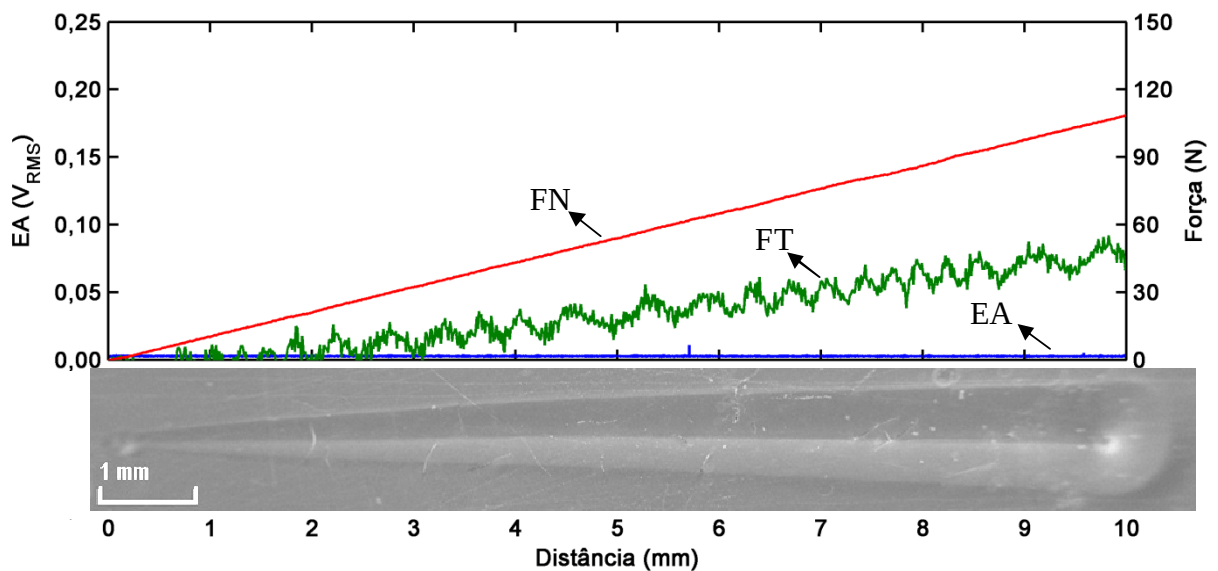


Figura 4.4 - Risco do ensaio 33 (penetrador cônico de 120° em PMMA), com forças e tensão RMS da EA

Uma análise do riscamento da amostra metálica pode levar a crer que as oscilações na força tangencial eram consequência unicamente do efeito *stick-slip*. Entretanto, tais oscilações estavam presentes mesmo quando havia apenas sulcamento, sem *stick-slip*, como se pode observar na Fig. 4.1 de 0 a 1 mm, bem nos riscamentos com baixos ângulos de ataque nos polímeros. Em outras palavras, é pouco plausível que o *stick-slip* tenha gerado todas as oscilações na força tangencial, presentes em todos riscamentos, e que certamente são decorrentes de acúmulos de material à frente do penetrador.

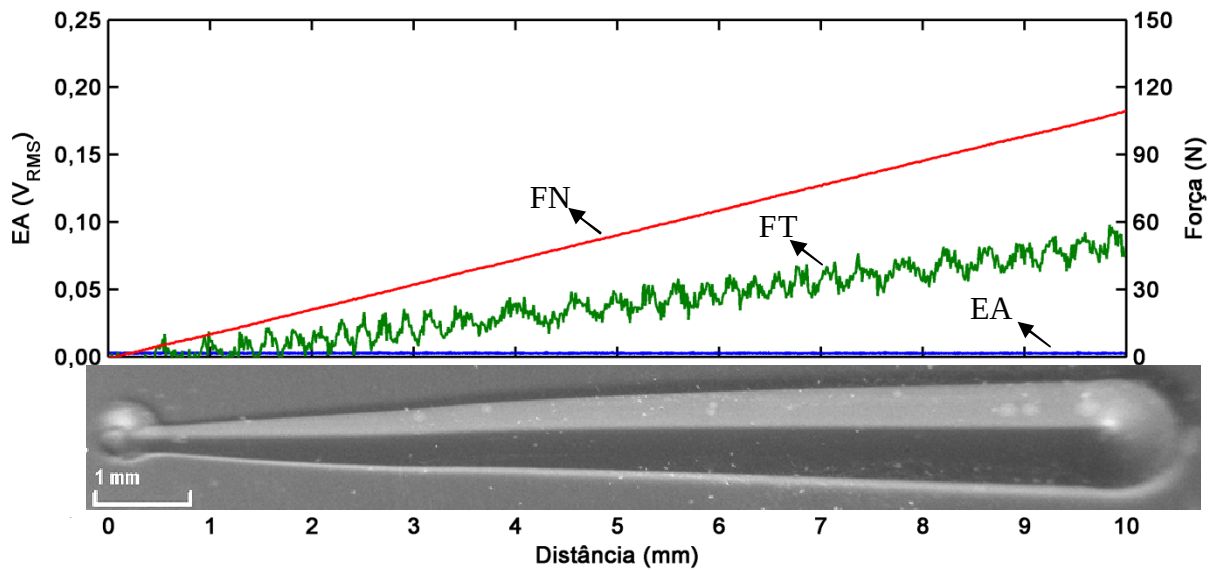


Figura 4.5 - Risco do ensaio 15 (penetrador cônico de 120° em PC), com forças e tensão RMS da EA

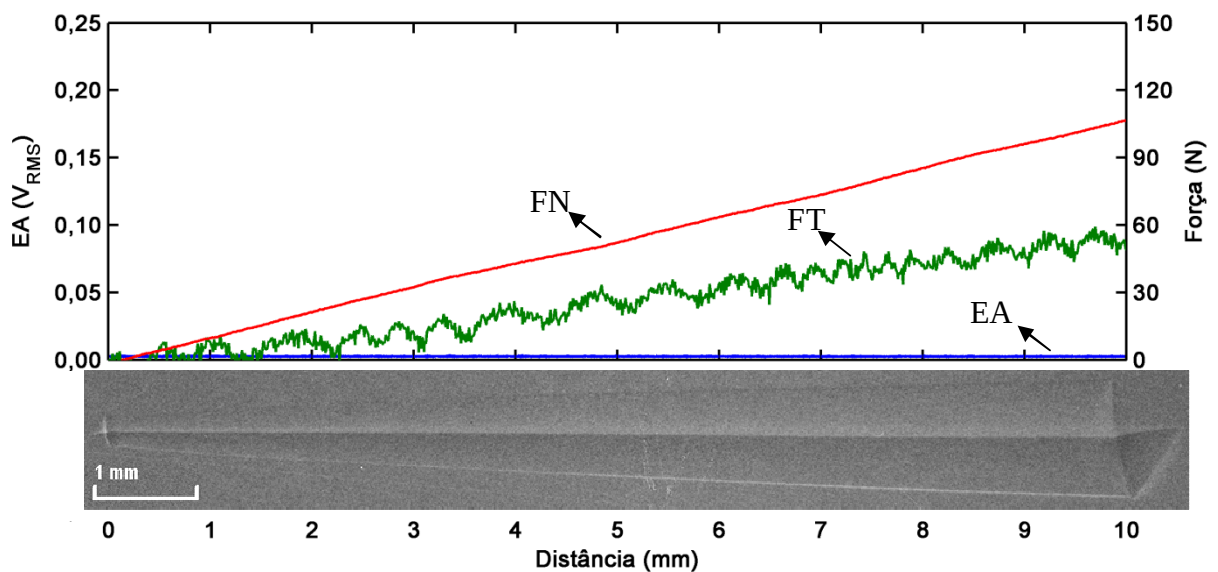


Figura 4.6 - Risco do ensaio 56 (Vickers com aresta para frente em PS), com forças e tensão RMS da EA

Entretanto, ao se analisar a força normal, nota-se como ela apresentou oscilações no caso do riscamento da amostra de metal revestido, mas não apresentou nos riscamentos dos polímeros com baixos ângulos de ataque. Nos riscamentos do aço revestido, quando o *stick-slip* surgiu, a força normal começou a apresentar oscilações. Isto indica que a força normal aponta a presença desse efeito melhor que a força tangencial.

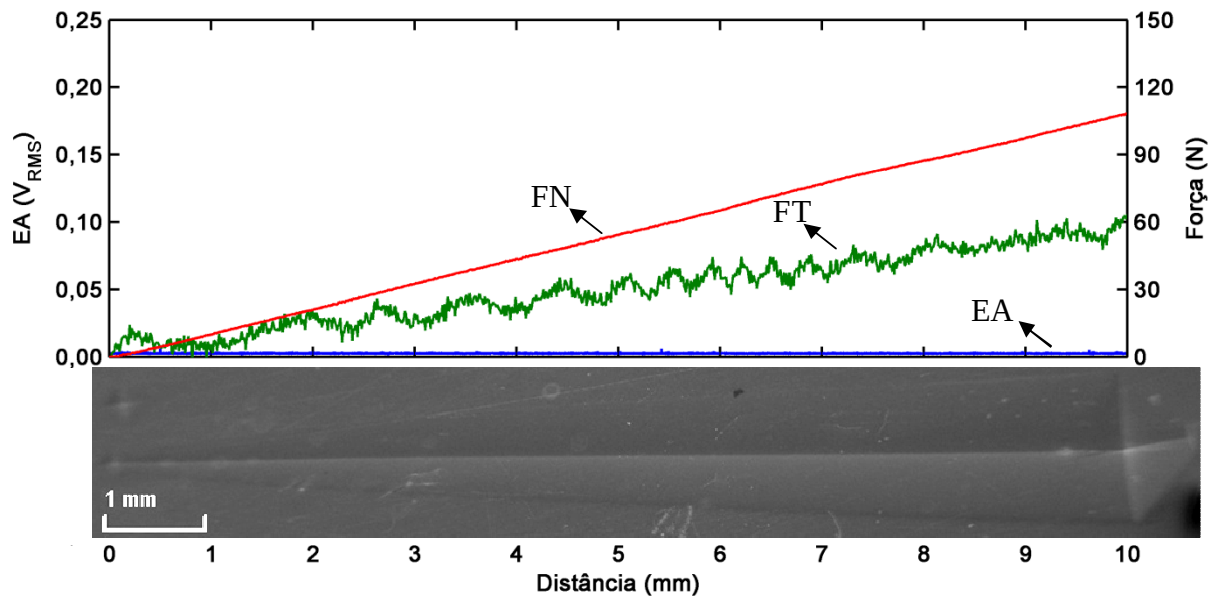


Figura 4.7 - Risco do ensaio 39 (Vickers com aresta para frente em PMMA), com forças e tensão RMS da EA

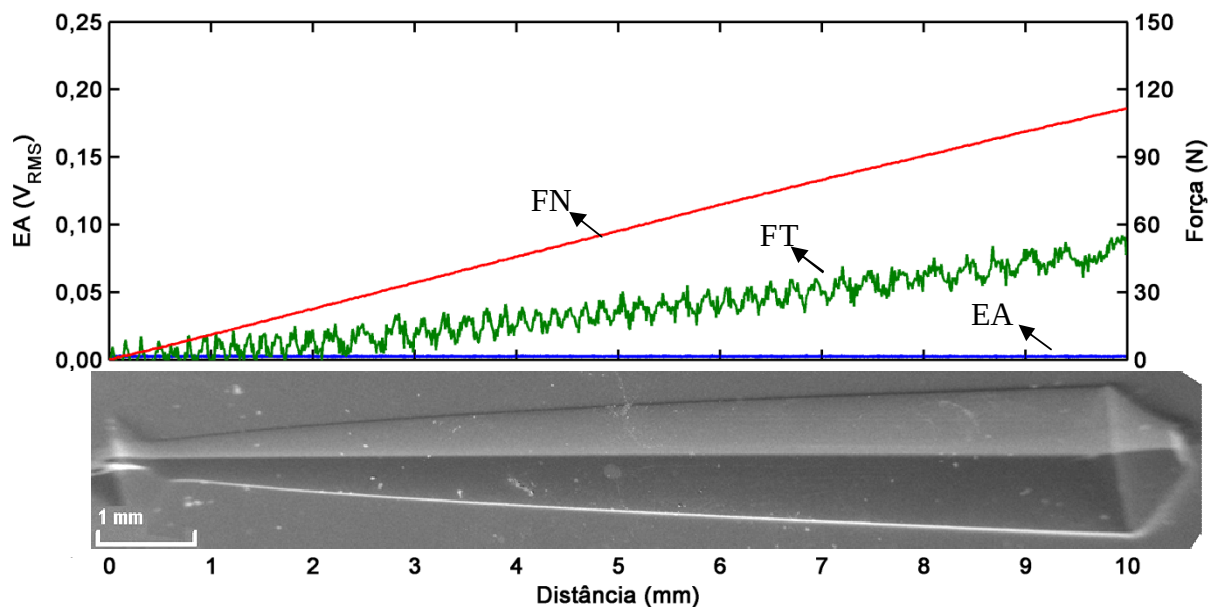


Figura 4.8 - Risco do ensaio 20 (Vickers com aresta para frente em PC), com forças e tensão RMS da EA

A maior diferença entre os riscamentos com o penetrador cônico com 120° e os com o penetrador Vickers é que os primeiros apresentaram mais material nas bordas, ou seja, apresentam uma maior deformação plástica. Isto significa que o penetrador cônico é menos agressivo do que o Vickers, mesmo tendo um ângulo de ataque maior. Tal fato é corroborado pela literatura (FERREIRA, 2010), e se deve provavelmente à diferença na geometria dos penetradores.

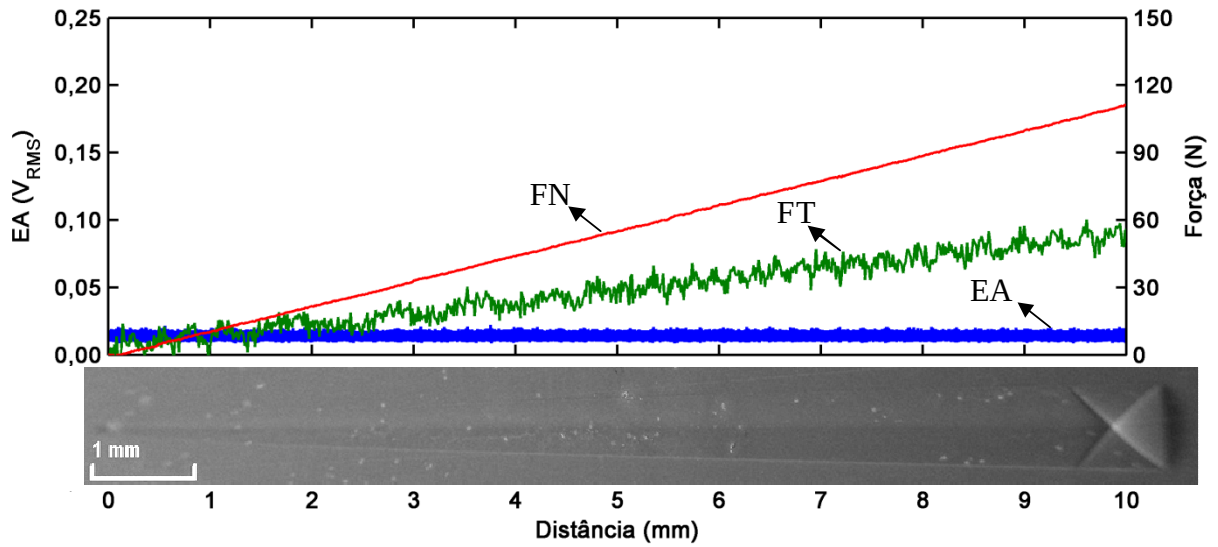


Figura 4.9 - Risco do ensaio 53 (Vickers com face para frente em PS), com forças e tensão RMS da EA

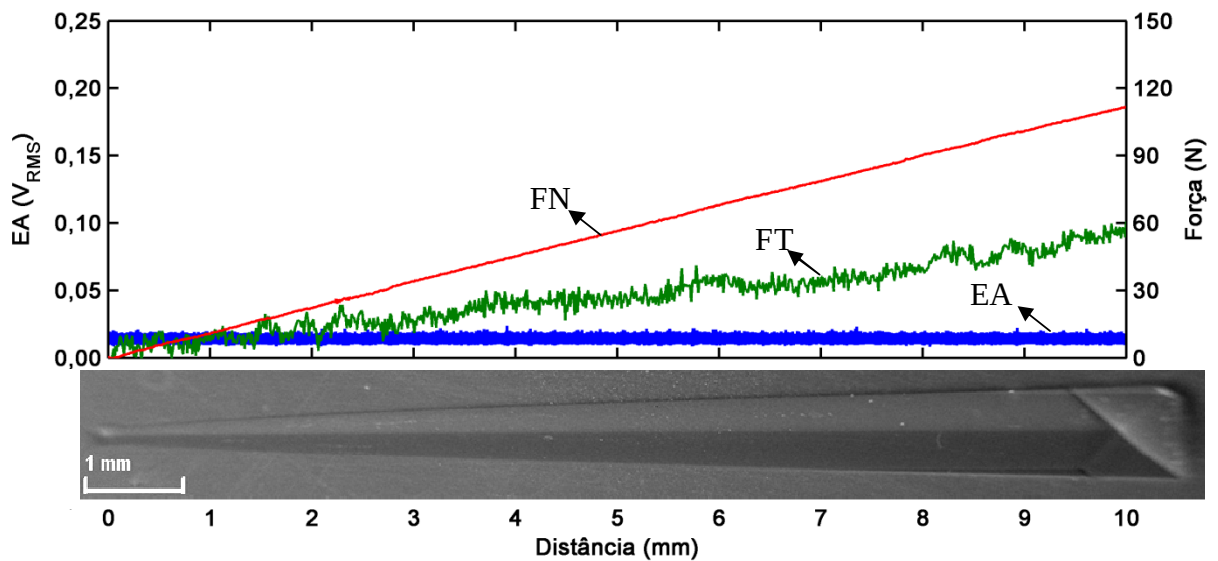


Figura 4.10 - Risco do ensaio 35 (Vickers com face para frente em PMMA), com forças e tensão RMS da EA

A ausência de trincas laterais e de destacamento de material nestes nove experimentos é corroborada pela literatura, que em geral aponta que baixos ângulos de ataque levam apenas ao surgimento de um microsulcamento (BRISCOE *et al.*, 1996; IQBAL *et al.*, 2011). Além disso, a ausência de *bursts* na EA durante o microsulcamento de polímeros é corroborada pela literatura (KURKCU *et al.*, 2014).

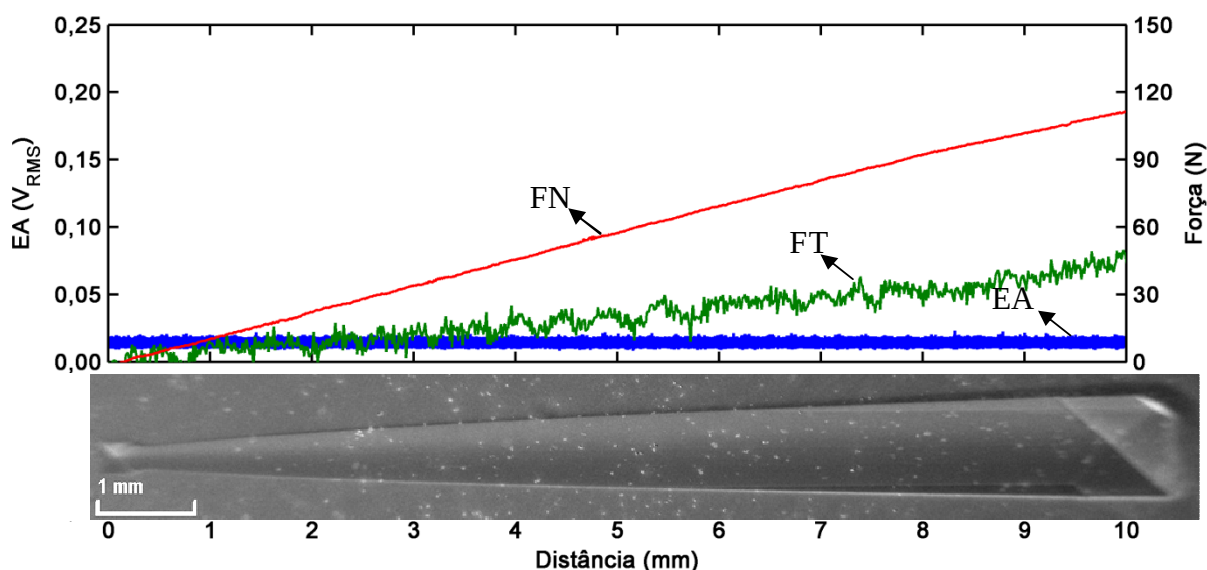


Figura 4.11 - Risco do ensaio 17 (Vickers com face para frente em PC), com forças e tensão RMS da EA

Observa-se em todos os riscamentos apresentados até então que o coeficiente de atrito é menor que um, ou seja, a força tangencial é menor do que a força normal. Isto é uma característica dos riscamentos realizados com baixos ângulos de ataque, em contraste com o que ocorre nos casos com maiores ângulos de ataque, fato corroborado pela literatura (BRISCOE *et al.*, 1996). Isto é reflexo direto da baixa profundidade alcançada pelo penetrador na amostra (FERREIRA, 2010).

4.1.3. Riscamentos em Poliestireno (PS)

O risco gerado com o penetrador cônico de 40° (ângulo de ataque de 70°) é apresentado na Fig. 4.12. Ao contrário do caso anterior, aqui ocorreram trincas, bem como adesão. A amplitude da EA aumentou gradativamente ao longo do ensaio, acompanhando o aumento progressivo da carga e da quantidade de mecanismos de desgaste. A atividade acústica se intensifica no decorrer do ensaio, primeiro quantitativamente, a partir dos 2,5 mm (ver aumento repentino da quantidade de *bursts* no gráfico de frequências de pico) e depois em amplitude, a partir dos 3,5 mm (ver o gráfico de tensão RMS da EA).

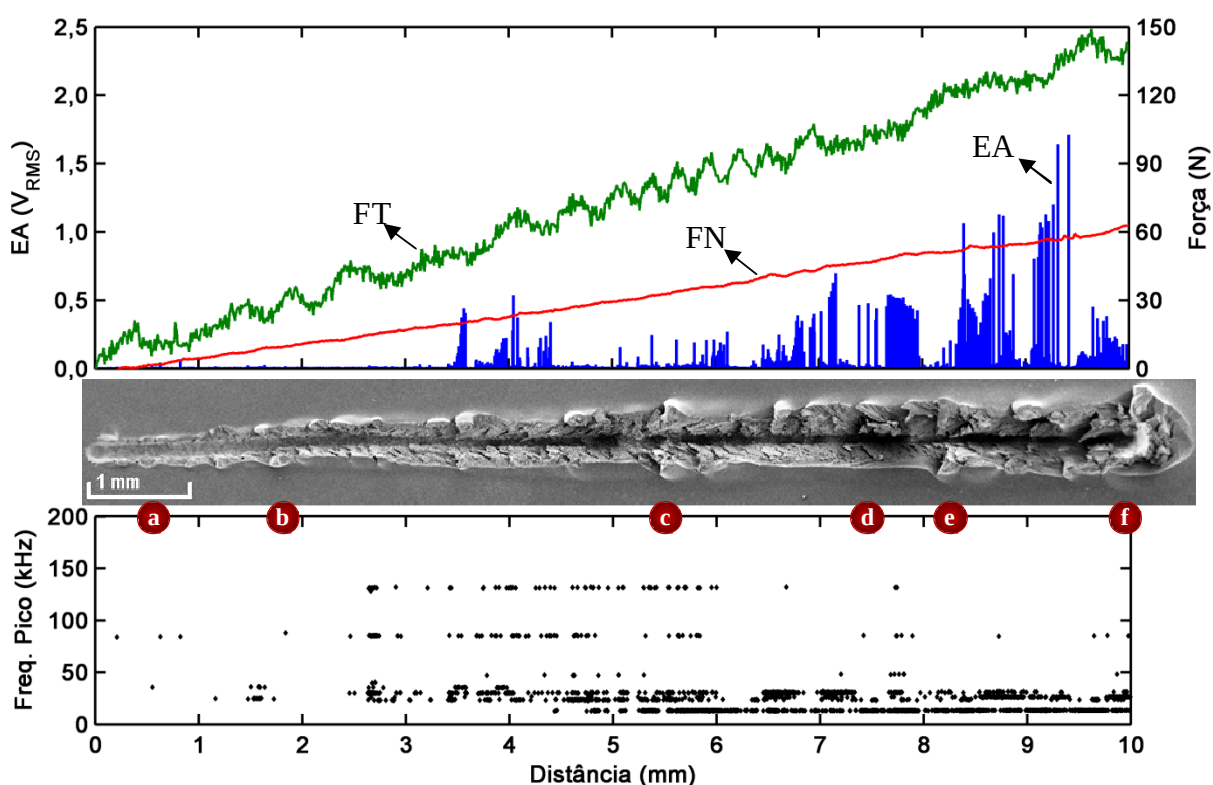


Figura 4.12 - Risco do ensaio 42 (penetrador cônico de 40° em PS), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (f) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.13)

Pode-se observar que, ao contrário do que ocorreu nos ensaios de riscamento da amostra de aço revestido e de riscamento de polímeros com baixo ângulo de ataque, o coeficiente de atrito foi maior do que o valor unitário. Sabe-se disto uma vez que a força tangencial (FT) é maior do que a força normal (FN). Isto é uma consequência natural do fato do penetrador ter adentrado mais na amostra (FERREIRA, 2010).

No domínio da frequência, observam-se bursts de EA em duas faixas de frequências distintas: uma com várias linhas abaixo de 50 kHz e outra formada por duas linhas de 85 kHz e 125 kHz. Como esta linha em 125 kHz normalmente surge junto com a linha em 85 kHz, ambas foram consideradas como representativas do mesmo fenômeno. Faixas de frequências compostas por duas linhas em frequências diferentes são comuns e podem ser encontradas na literatura, como, por exemplo, na Fig. 2.20 (GUTKIN et al., 2011).

Ampliações nas regiões mais relevantes do risco podem ser vistas na Fig. 4.13. Nela se observa a presença de trincas nas laterais do risco e de *stick-slip* no seu fundo (Figs. 4.13a e 4.13b) e nas suas paredes internas (Figs. 4.13d e 4.13e). Sobre a localização das

trincas, apesar de na Fig. 4.13e (e nas anteriores) elas serem vistas nas bordas laterais do risco, a Fig. 4.13f mostra que, na verdade, elas se iniciam na região à frente do penetrador.

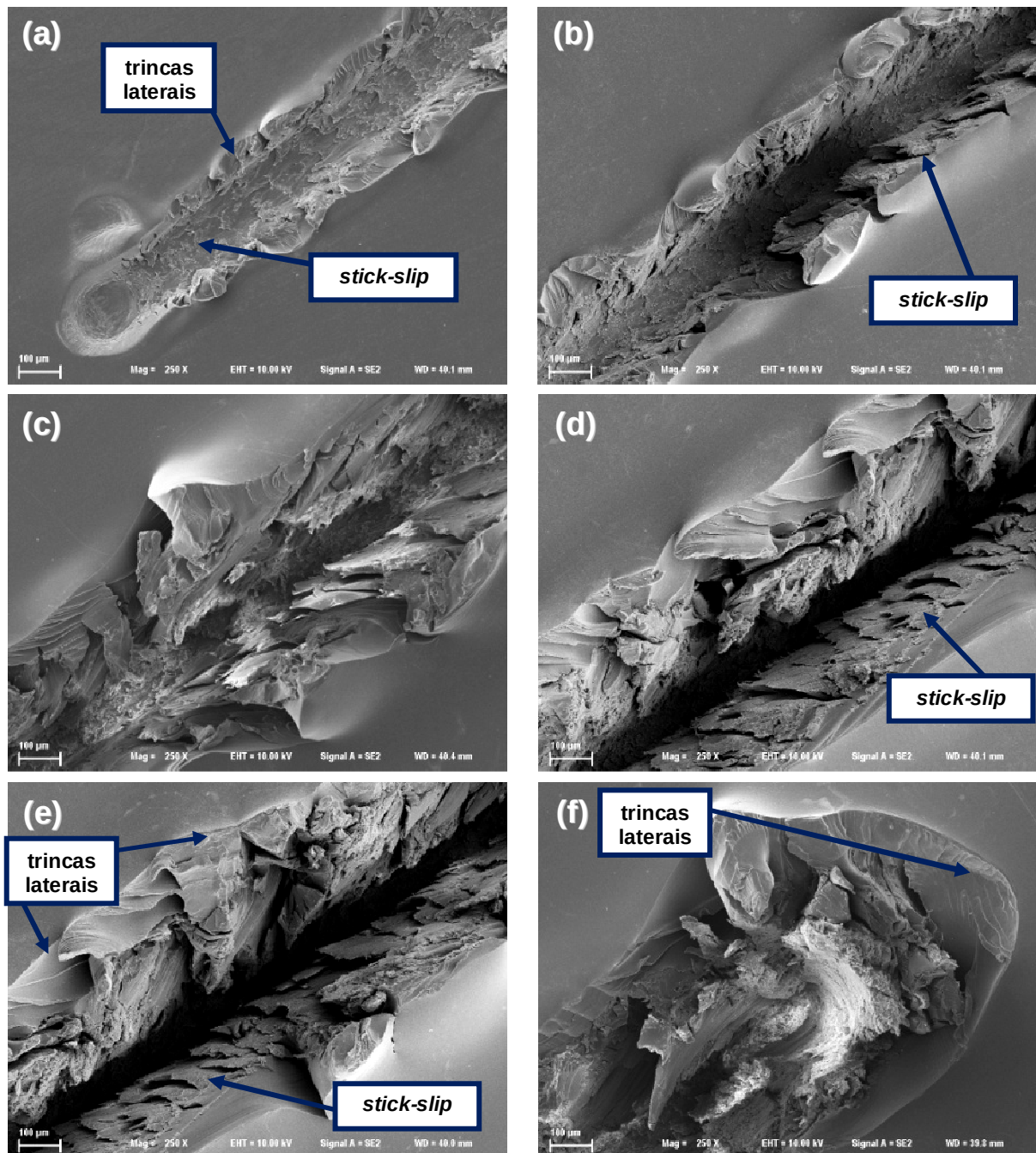


Figura 4.13 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 42 (penetrador cônico de 40° em PS). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.12

A Figura 4.13a mostra que, desde o início do riscamento, podem ser identificados sinais de *stick-slip*, e de pequenas trincas se iniciando nas bordas. Entretanto, tais *bursts*

ocorrem em quantidade muito baixa. Mas já a partir de 1,5 mm é possível notar trincas maiores, conforme a Fig. 4.13b. Além disso, as marcas de *stick-slip* no fundo passaram a ocorrer com frequência maior. Estes resultados são esperados, pois uma vez que a força normal é crescente, a profundidade de riscamento aumenta na medida em que o ensaio é executado e, conseqüentemente, a severidade dos mecanismos tende a aumentar também. Contudo, continuam havendo poucos picos de EA, principalmente quando se compara esta região inicial com a região inicial do riscamento do metal (Fig. 4.1). Isto é consequência direta do fato de materiais poliméricos amortecerem as ondas acústicas mais do que os materiais metálicos.

As trincas laterais não se propagaram por grandes extensões, e se concentram próximas à superfície. Tais eventos podem ser vistos ao longo de todo o riscamento, mas em especial nas Figs. 4.13d e 4.13e pode-se notar a presença de material arrancado de maneira frágil nas proximidades da superfície. Como a faixa de baixa frequência de pico (até 50 kHz) é a única que permanece ao longo de todo o riscamento, pode-se deduzir que tal faixa represente justamente as trincas. Esta conclusão está em concordância com os ensaios realizados por Gutkin et al. (2011), que mostraram que a faixa de frequência de microtrincas no epóxi. era de 0 a 50 kHz (ver Fig. 2.20)

Em algumas regiões deste riscamento, porém, é notável como parte do material não se soltou por completo, se destacando parcialmente e em uma direção paralela à parede lateral do risco (ver setas na Fig. 4.13b a 4.13e). Tais eventos não são trincas, mas sim marcas de *stick-slip* que não levam ao arranque completo de material nestas regiões. Em especial, percebe-se na Fig. 4.12 que as regiões nas quais estes eventos são mais intensos (2 a 6 mm e 7 a 9 mm) são justamente aquelas que apresentam picos de alta frequência. Percebe-se que na região de 6 a 7 mm, quando houve uma diminuição neste evento, não surgiram picos de alta frequência. Estas observações levam a crer que para o PS, altas frequências significam adesão e *stick-slip*, mais especificamente entre a lateral da ponta do penetrador e a lateral do risco, um evento que só foi possível graças à alta profundidade de riscamento.

Apesar de haver *stick-slip* durante todo o risco, os picos de alta frequência (85 a 130 kHz) só podem ser vistos durante parte do tempo. Uma possível explicação para isso é que no início do ensaio a profundidade do penetrador não era suficiente para gerar *stick-slip* em uma intensidade que pudesse ser medida pelo sensor de EA. Além disso, à medida que as trincas foram aumentando, as tensões no entorno do penetrador foram sendo aliviadas mais frequentemente, tornando os eventos de *stick-slip* mais raros. Além disso, a literatura aponta

que a faixa de frequências de pico associada ao *stick-slip* começa próxima a 100 kHz, mas pode se estender até por volta de 400 kHz. Isto explica a existência de picos de frequência ainda maiores, por volta de 130 kHz.

A presença de adesão e um comportamento mais dúctil no fundo do risco, apesar do PS ser classificado como um material mais frágil, é explicada pelo fato do penetrador ter adentrado muito na amostra, gerando tensões elevadas e concentradas. Tal fato, junto com a baixa resistência do material, levou à formação das pequenas placas de material semi-destacado.

Em resumo, para o PS riscado com penetrador cônico de 40°, as trincas estão associadas aos *bursts* em baixas frequências (até 50 kHz) e o *stick-slip* está associado àqueles em altas frequências (85 kHz a 130 kHz).

O risco gerado com o penetrador cônico de 60° (ângulo de ataque também de 60°) é apresentado nas Figs. 4.14 e 4.15, organizadas da mesma maneira que nos riscos anteriores. Este riscamento apresentou um fenômeno inédito em relação ao risco gerado com o penetrador de 40°: a presença de grandes picos de EA acompanhados por quedas bruscas na força tangencial e aumentos bruscos na força normal. Tais eventos foram acompanhados de estouros audíveis durante a realização do ensaio. Estes eventos podem ser explicados como sendo o resultado de uma grande deformação na região à frente do penetrador, que gerou uma tensão elevada o suficiente para causar uma propagação de trinca rápida e brusca. Tais propagações rápidas geram um pico de EA com amplitude que se destaca das demais. Como a trinca levou a um destacamento de material, a superfície da amostra passou a oferecer instantaneamente menor resistência ao avanço do penetrador, o que explica a queda brusca da força tangencial.

Assim como no riscamento com penetrador 40°, houve trincas nas laterais de todo o riscamento. Entretanto, os destacamentos parciais nas paredes laterais foram menos frequentes. Considerando que a faixa de frequências de pico abaixo de 50 kHz é bem parecida com a anterior e que a faixa de frequências acima de 80 kHz praticamente desapareceu, conclui-se que estes resultados corroboram a conclusão de que trincas geram picos de baixa frequência e adesão gera picos de alta frequência.

Observando a Fig. 4.15c, nota-se uma trinca relativamente grande (indicada por seta), que se espalhou lateralmente a uma distância da região por onde passou o penetrador consideravelmente maior do que o comum. A Figura 4.14 mostra que, imediatamente antes dela, a atividade acústica se intensificou, havendo um acúmulo de

bursts. Entretanto, o fato desses *bursts* virem antes da trinca no gráfico não significa que tal atividade acústica não seja correspondente à trinca.

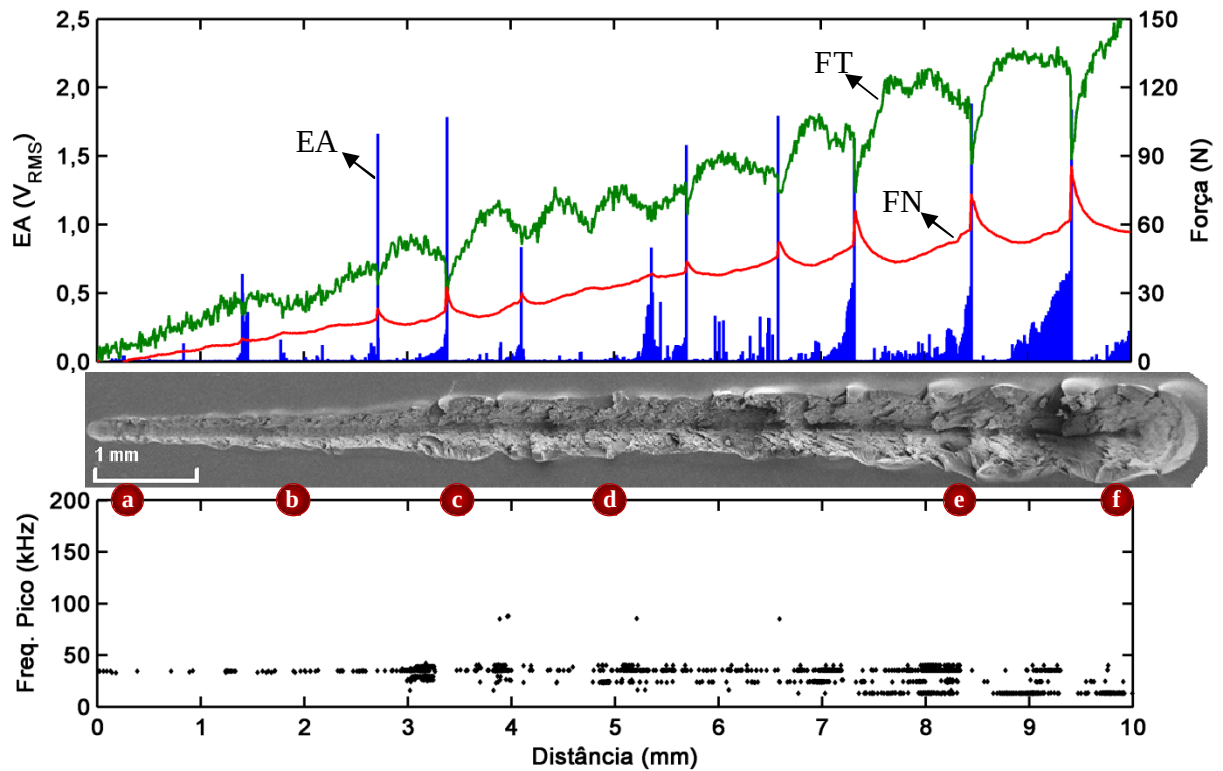


Figura 4.14 - Risco do ensaio 45 (penetrador cônico de 60° em PS), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (f) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.15)

Como discutido na Metodologia, a posição dos *bursts* no gráfico foi calculada com base na posição do penetrador e não na localização exata de sua fonte. Como os *bursts* ocorrem durante a propagação da trinca e esta ocorre na região à frente do penetrador, é natural que os *bursts* se acumulem antes das trincas. Também é notável que o valor da frequência de pico associada a estes *bursts* está em baixa frequência (entre 20 e 50 kHz). Essas observações corroboram a hipótese de que as trincas laterais estão associadas a faixa de baixas frequências.

A partir da posição correspondente a 8 mm de riscamento, as trincas tomam uma dimensão bem maior do que no restante do ensaio. Esse tipo de ocorrência não pôde ser vista no riscamento com penetrador de 40°. Tal mudança parece ter levado ao surgimento de *bursts* com frequências ainda menores.

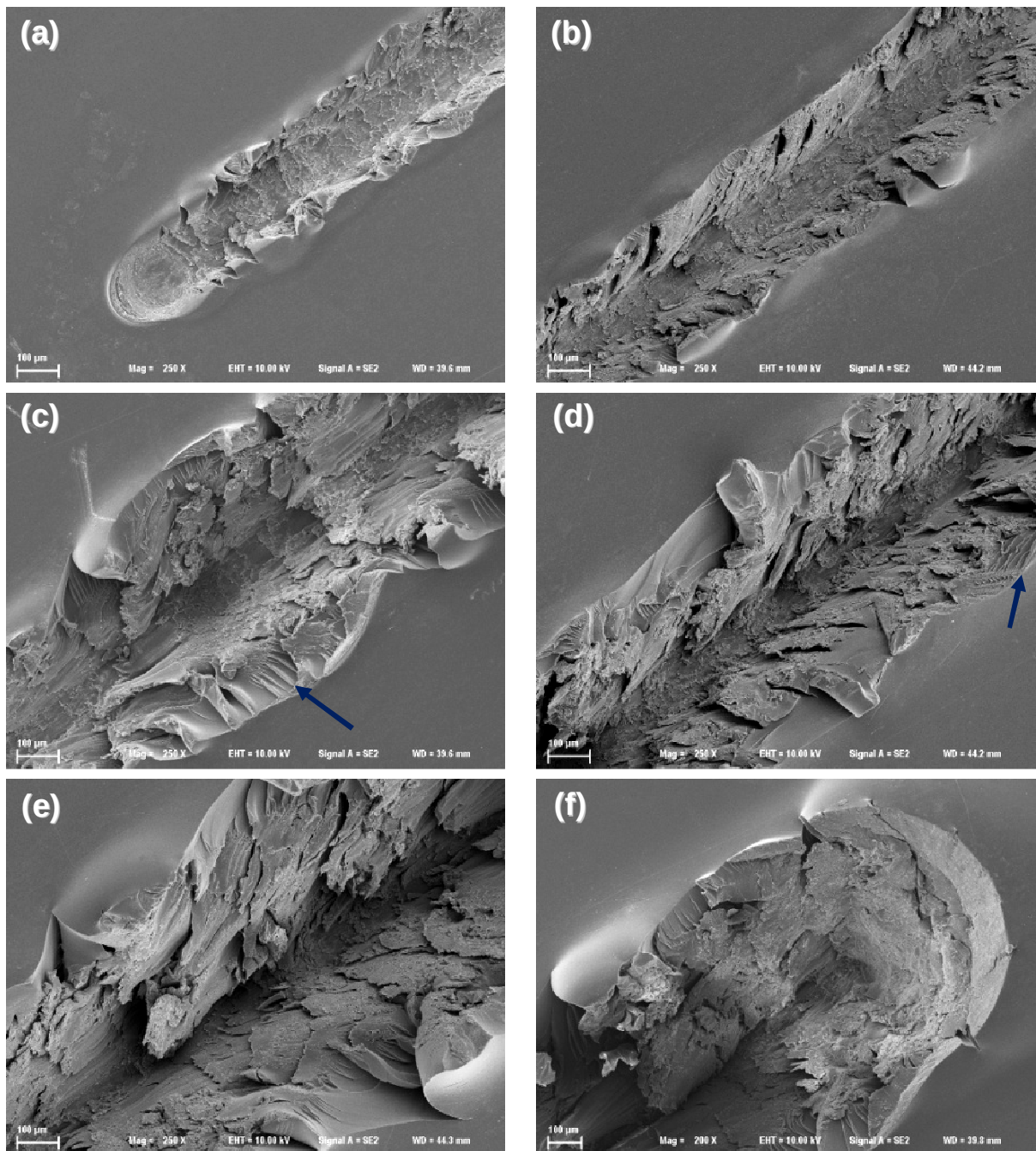


Figura 4.15 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 45 (penetrador cônico de 60° em PS). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.14

Apesar de possuírem frequências de pico bem semelhantes, é notável que as trincas no metal revestido parecem se propagar de maneira diferente do que nos polímeros. No metal, o destacamento ocorre todo de uma vez devido a uma trinca única, enquanto que no polímero se nota que a trinca avança em pequenos passos (ver setas nas Figs. 4.15c e 4.15d) devido à presença de múltiplas trincas (ver Fig. 2.16, p. 26). Isto indica que o amortecimento do material influencia mais a amplitude do que o espectro das ondas acústicas.

Neste risco também é possível detectar *stick-slip* desde o início do ensaio (Figs. 4.15a e 4.15d), diminuindo quando se aproxima do seu fim (Figs. 4.15e e 4.15f). Esta última micrografia é a única que apresenta os destacamentos parciais nas paredes laterais que eram comuns no riscamento com penetrador de 40°. Este evento diminuiu de intensidade por dois motivos: o primeiro é que o penetrador adentrou menos na amostra e gerou menos concentração de tensões. O segundo é que no final do riscamento, as trincas aumentam muito seu tamanho, facilitando o alívio das tensões. Por fim, é interessante observar que o entorno da região (d), onde há destacamentos, corresponde à única região do gráfico que contém alguns picos de alta frequência

O risco gerado com penetrador cônico de 90° (ângulo de ataque de 45°) pode ser visto nas Figs. 4.16 e 4.17. Como o ângulo de ataque diminuiu, o penetrador se tornou menos agressivo, ou seja, passou a forçar a deformação plástica de menos material, gerando menores campos de tensão nas laterais do material.

Neste ensaio, a atividade acústica também se acentuou momentos antes da ocorrência de picos de maior amplitude, porém os picos não se destacaram tanto dos demais como ocorreu no riscamento com penetrador de 60°. Além disso, apesar de tais picos também terem sido acompanhados de quedas bruscas na força tangencial, estas foram relativamente menores. Tais quedas também foram acompanhadas de estouros audíveis, contudo estes tiveram intensidades menores. O motivo pelo qual os penetradores cônicos de 60° e de 90° apresentaram este fenômeno, mas não o de 40°, pode estar associado ao fato de que neste último caso o ângulo de ataque era tão elevado que as trincas se formavam mesmo com pouca deformação elástica ou plástica. Assim, antes que o material se acumulasse na frente do penetrador e provocasse o aumento da força tangencial, a trinca já havia se propagado e, assim, aliviado as tensões.

Neste riscamento houve dois tipos de trincas: o primeiro, bastante visível na Fig. 4.17e, é aquele nas bordas e que já estava presente nos riscamentos com penetradores de 40° e de 60°. Entretanto, tais trincas ocorreram em escala bem menor do que nos casos anteriores, provavelmente porque o penetrador não é tão agressivo.

O segundo tipo de trinca é aparentemente inédito nos ensaios até então, apontada pela seta na Fig. 4.17a. Entretanto, elas são justamente as trincas hertzianas devidas ao *stick-slip*. Como o material abaixo do penetrador é frágil, ele se rompe durante a fase do "stick" (ver discussão em torno da Fig. 2.14e-h p. 24). Além disso, nenhum *burst* foi detectado na região onde somente elas estavam presentes.

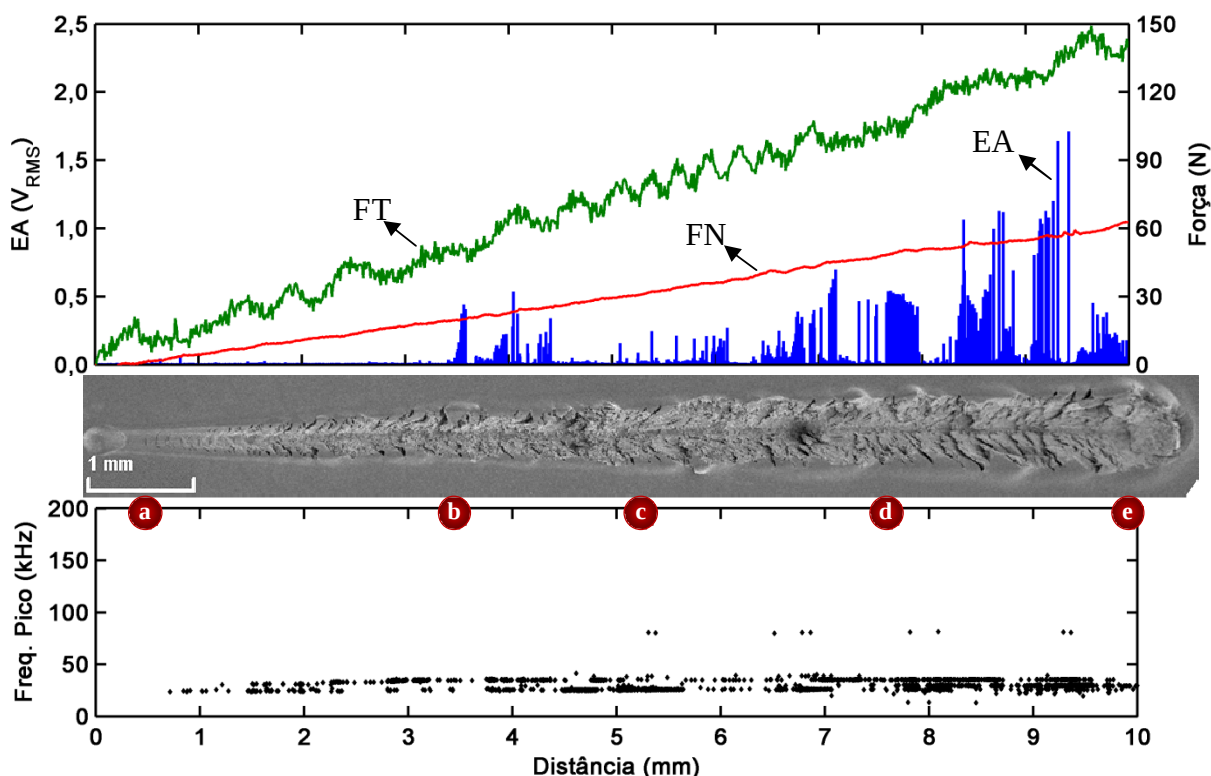


Figura 4.16 - Risco do ensaio 46 (penetrador cônico de 90° em PS), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (e) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.17)

Os dois tipos de trincas citados aqui, apesar de possuírem causas diferentes, geram picos de EA com a mesma frequência de pico. Entretanto, as trincas geradas devido ao *stick-slip* no fundo do riscamento só começaram a ser perceptíveis ao sensor de EA empregado a partir da posição de 1 mm, quando começou a propagar até a borda do risco. Isto faz levar a crer que o sistema de medição não é muito sensível a tal tipo de trinca.

A ocorrência dos destacamentos parciais nas paredes laterais continuaram presentes ao longo deste riscamento. Contudo, eles são mais aparentes nos instantes antes dos estalos audíveis com picos no valor RMS da EA e nas forças, ou seja, nos instantes em que a tensão está se acumulando antes de se aliviar bruscamente. É justamente nestas regiões em que se observa a ocorrência de alguns *bursts* com picos na faixa de alta frequência (a partir de 80 kHz).

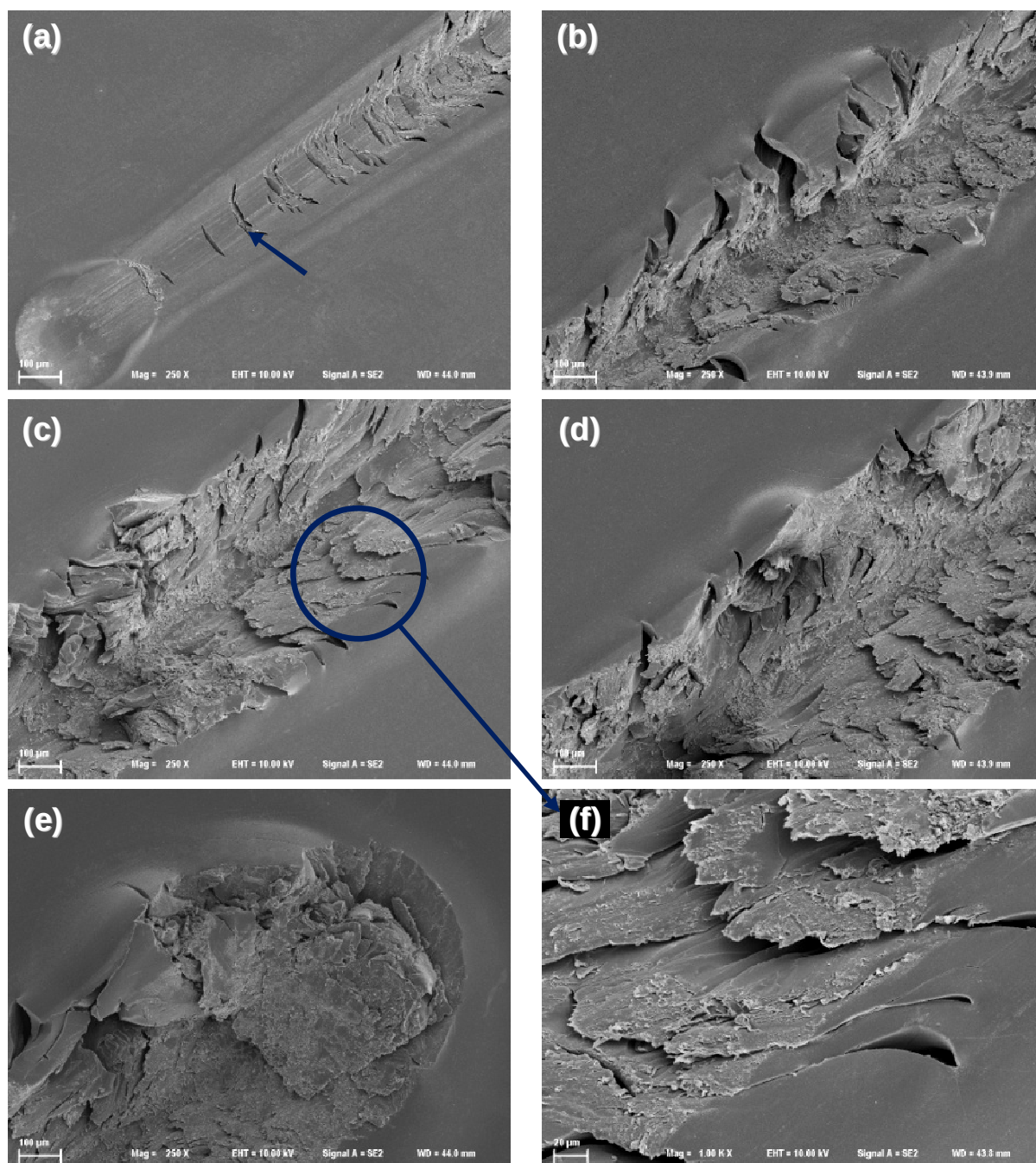


Figura 4.17 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 46 (penetrador cônico de 90° em PS). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.16.

As micrografias no MEV dos três primeiros ensaios mostraram que os riscamentos realizados apresentaram dois mecanismos de desgaste principais: trincas e *stick-slip*, em concordância com os resultados apresentados por Sinha e Lim (2006). Vale destacar também que o coeficiente de atrito é consideravelmente maior que os medidos nas amostras anteriores, chegando a ser maior que 2. Isto é uma consequência natural do fato do penetrador ter adentrado mais na amostra (FERREIRA, 2010) e, consequentemente, maior deformação plástica.

4.1.4. Riscamentos em Acrílico (PMMA)

As Figuras 4.18 e 4.19 exibem um dos três riscamentos do acrílico com o penetrador cônico de 40°. Nelas, nota-se que o mecanismo de desgaste predominante foi o microtincamento nas bordas laterais. Da mesma forma que no PS riscado com penetrador de 60°, as trincas nas bordas se iniciaram em múltiplas frentes e se propagaram por uma longa extensão. É possível notar marcas de adesão no final do riscamento, mas tais marcas não geraram EA em um nível detectável, conforme já havia acontecido no PS. Também não se observam sinais de placas de material semi-destacado nas paredes laterais, geradas por *stick-slip*, típicas nos riscamentos no PS. Isso ocorreu provavelmente porque o acrílico é um material mais resistente.

Considerando que o mecanismo predominante foi trincamento nas bordas do risco, faz sentido que só tenham surgido *bursts* de baixa frequência. Além disso, como tais trincas foram bem parecidas com as do PS riscado com penetrador de 60°, faz sentido que os eventos acústicos tenham apresentado frequências de picos na mesma faixa, ou seja, abaixo dos 50 kHz.

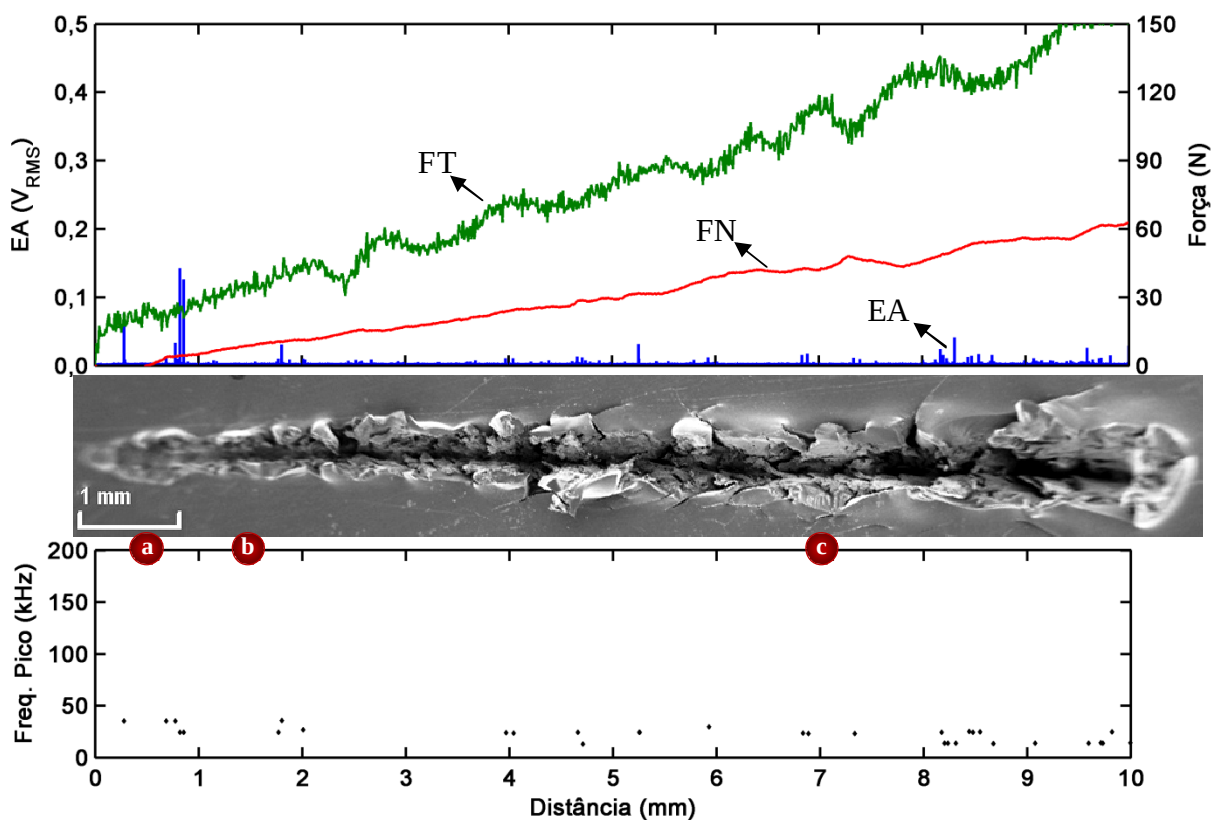


Figura 4.18 - Risco do ensaio 23 (penetrador cônico de 40° em PMMA), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (c) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.19)

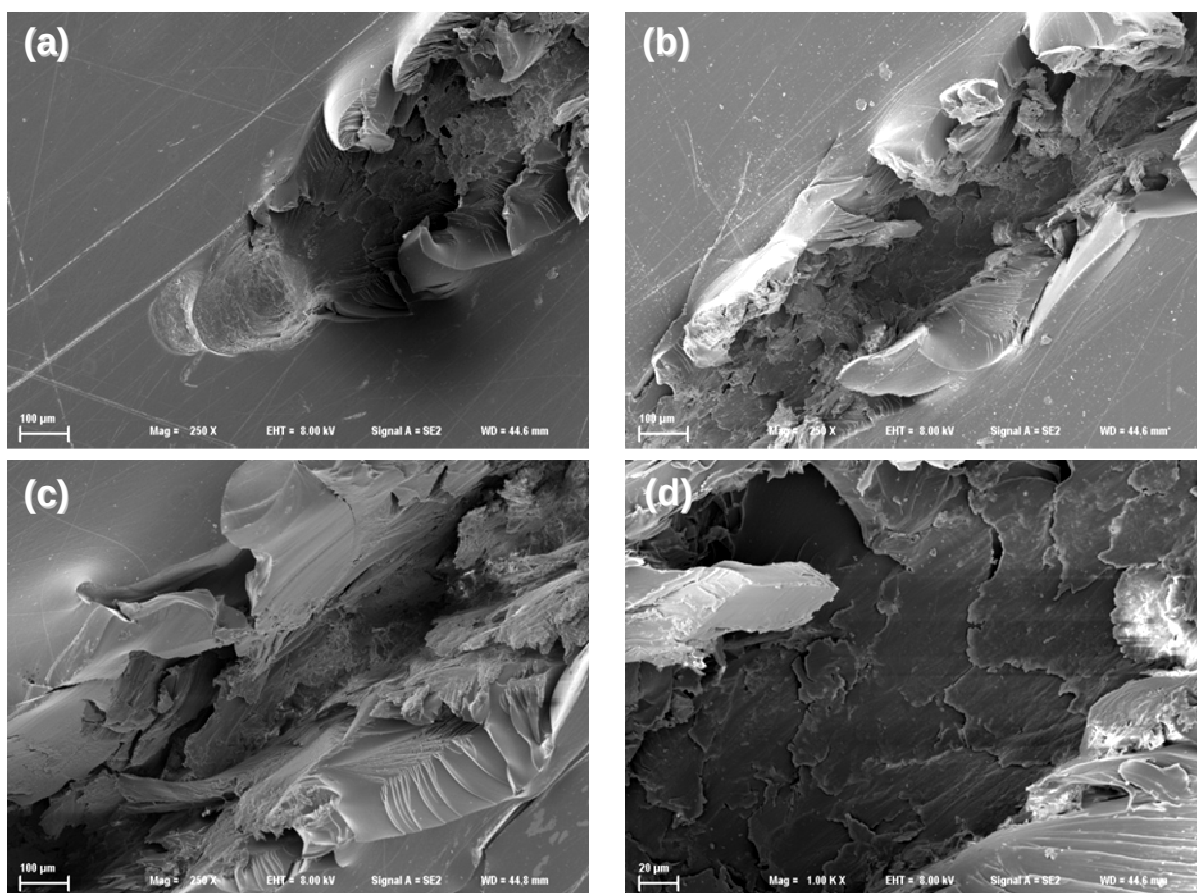


Figura 4.19 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 23 (penetrador cônico de 40° em PMMA). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.18. A micrografia (d) é ampliação de (b)

O riscamento do acrílico com penetrador cônico de 60°, registrado nas Figs. 4.20 e 4.21, segue o que aconteceu no riscamento com penetrador de 40°, onde predominaram as trincas nas bordas, que resultaram em *bursts* de baixa frequência. Podem ser vistas algumas placas parcialmente destacadas nas laterais, resultantes de *stick-slip*, porém em pequenas quantidades. Entretanto, nenhum *burst* de alta frequência associado a eles foi detectado. Este fato não é de todo estranho, uma vez que tal mecanismo foi bem menos severo neste riscamento, gerando uma EA de menor amplitude. As próprias características do material podem ter contribuído para uma maior atenuação do sinal acústico.

Por fim, o riscamento com penetrador cônico de 90°, registrado nas Figs. 4.22 e 4.23, segue o que aconteceu no riscamento com penetrador 60°, onde predominaram as trincas no fundo do risco causadas pelo *stick-slip*. Apenas a partir da posição de 7 mm é que começaram a aparecer marcas evidentes de trincas nas bordas. Marcas de adesão são muito pouco evidentes, e só foram detectados *bursts* com baixa frequência de pico.

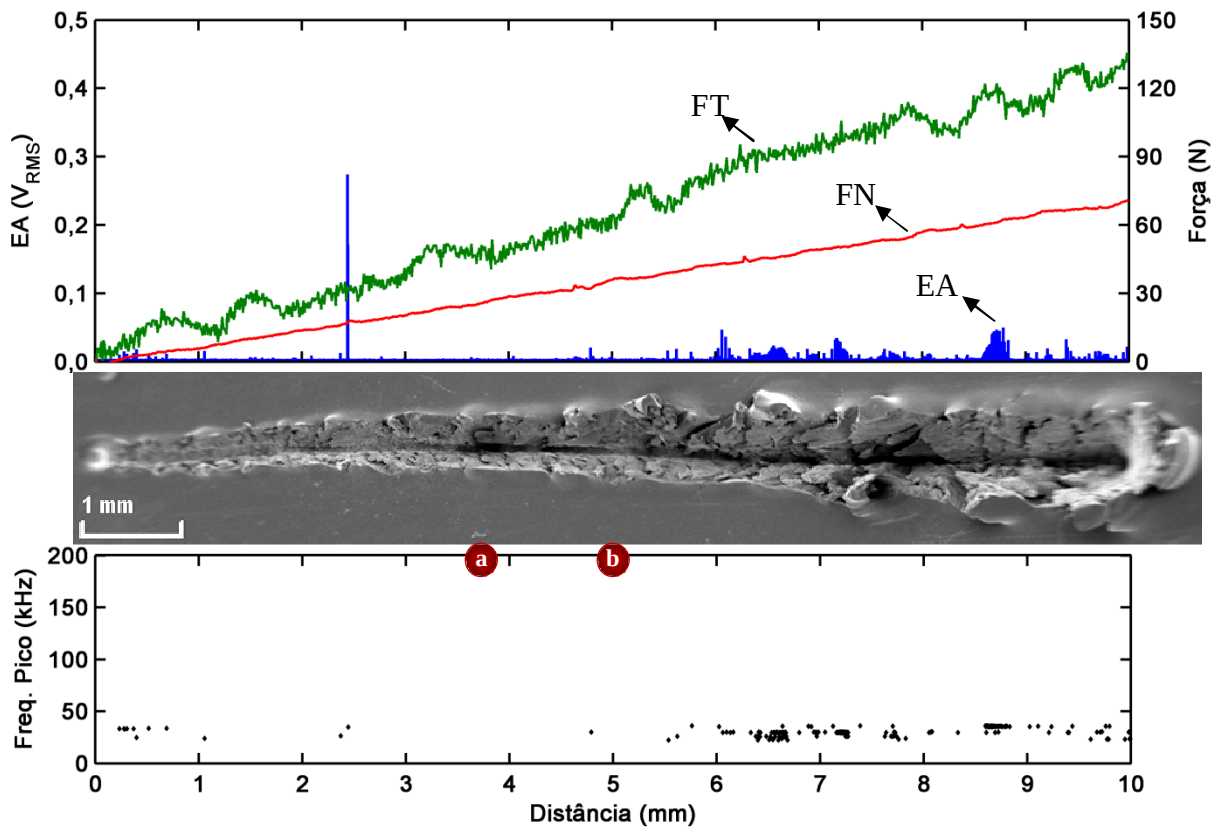


Figura 4.20 - Risco do ensaio 27 (penetrador cônico de 60° em PMMA), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (b) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.21)

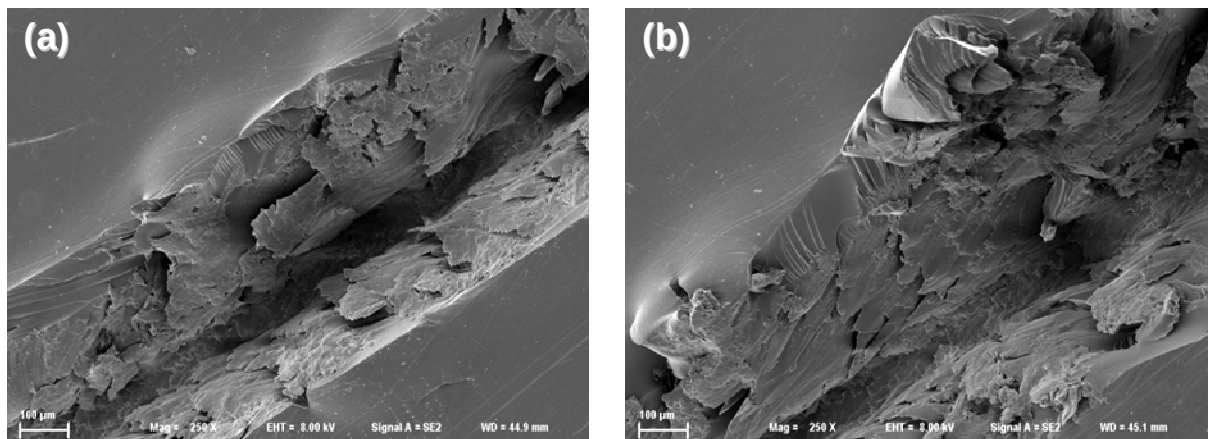


Figura 4.21 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 27 (penetrador cônico de 60° em PMMA). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.20

Os riscamentos do PMMA apresentaram EA com frequência de pico somente abaixo de 50 kHz, faixa que representa as trincas. De fato, o mecanismo de trincamento foi o mais relevante em seu riscamento. Os eventos secundários não geraram picos provavelmente

pela combinação de dois fatores: tais eventos geram menos picos de EA e eles ocorreram em menor escala. Por exemplo, as marcas de adesão na parede lateral da Fig. 4.21b foram menores que as marcas na parede do PS. Além disso, as características do material podem ter influenciado.

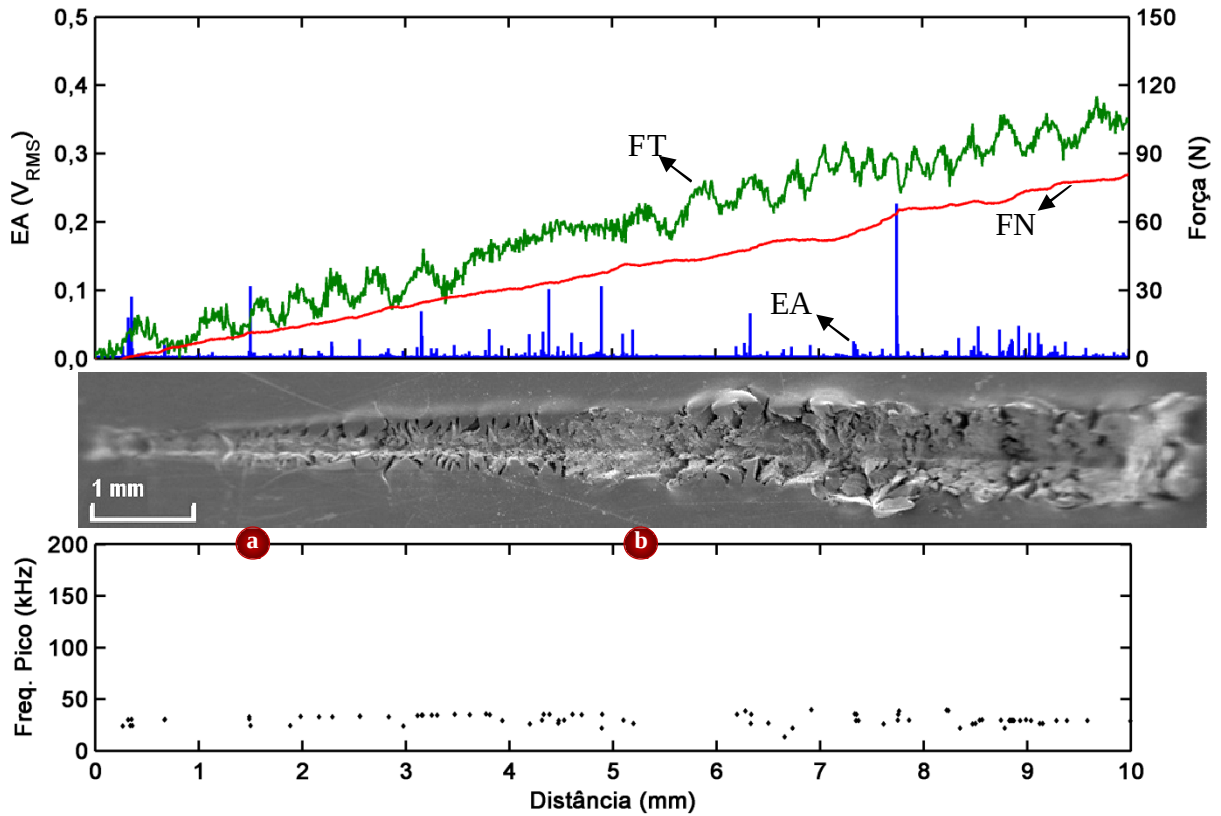


Figura 4.22 - Risco do ensaio 29 (penetrador cônico de 90° em PMMA), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (b) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.23)

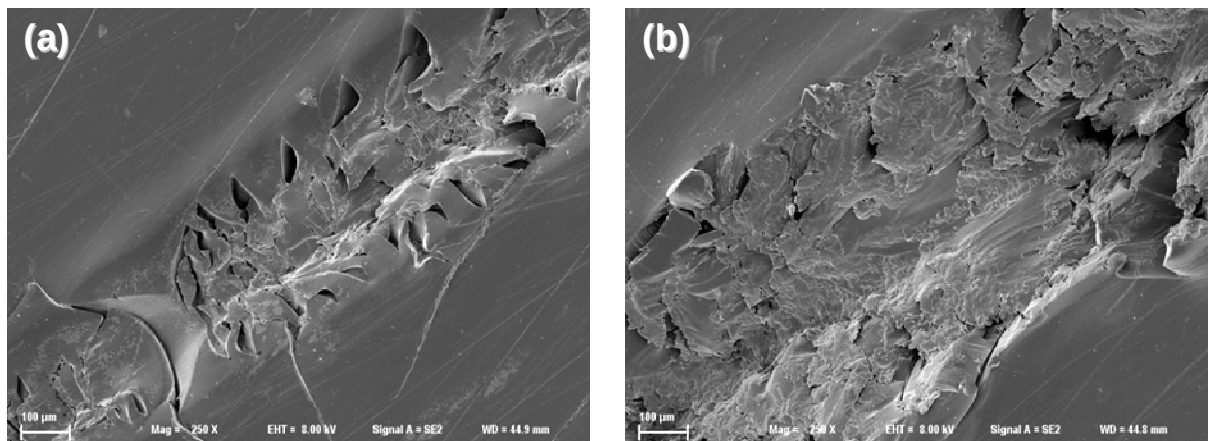


Figura 4.23 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 29 (penetrador cônico de 90° em PMMA). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.22

4.1.5. Riscamentos em Policarbonato (PC)

O Policarbonato é um material mais dúctil e resistente do que o PS e o PMMA, o que favorece o surgimento de um submecanismo de corte em detrimento de trincas. Por este motivo, os riscamentos aqui apresentados foram notavelmente mais dúcteis que os demais polímeros, apesar de se continuar detectando trincas. Este material, assim como o PMMA, seguiu a tendência dos polímeros mais resistentes de apresentar EA com menor amplitude.

No caso do riscamento com penetrador cônico de 40°, apresentado nas Figs. 4.24 e 4.25), é notável como o mecanismo predominante são as trincas nas bordas. Como o material é dúctil e resistente, elas se propagaram por curtas distâncias. Marcas da ocorrência de uma leve adesão na lateral, gerando material parcialmente destacado, são visíveis (Fig. 4.25b e 4.25d) e geraram alguns *bursts* de alta frequência.

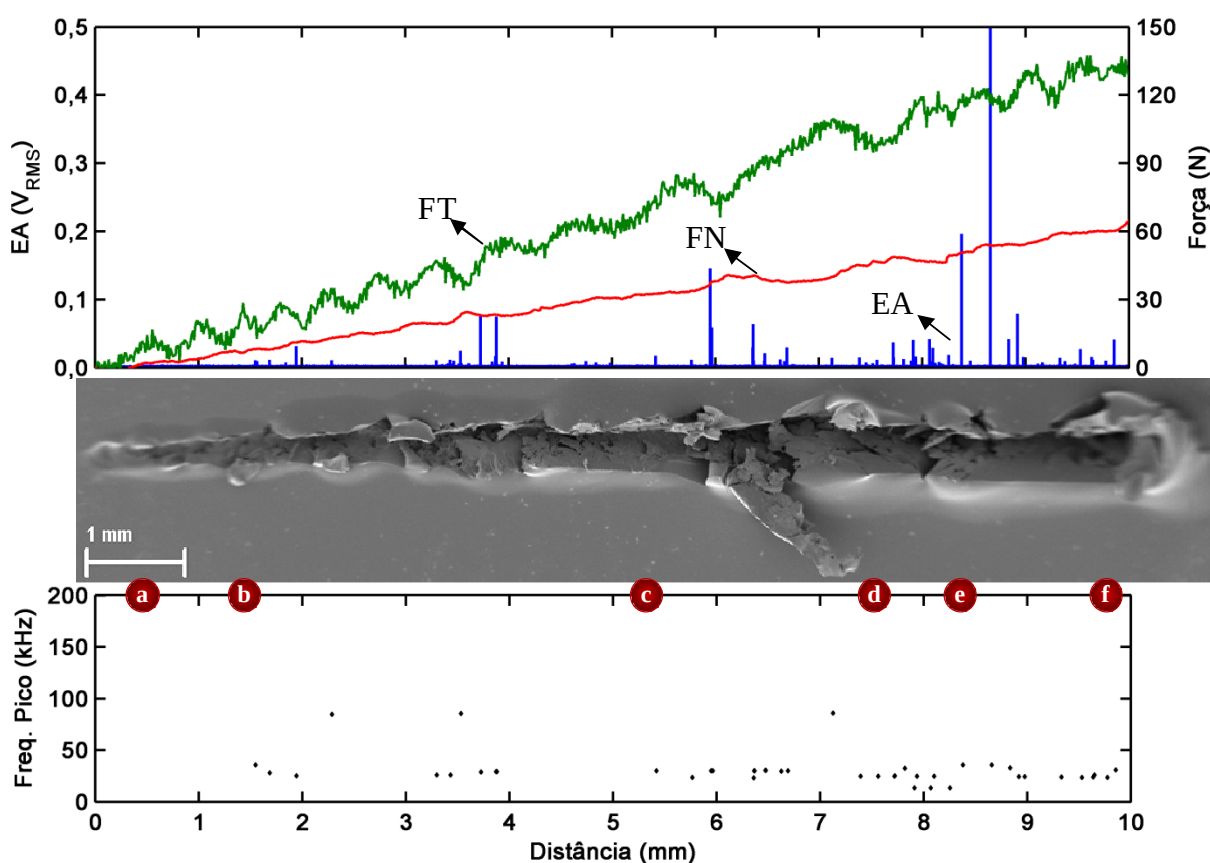


Figura 4.24 - Risco do ensaio 05 (penetrador cônico de 40° em PC), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (f) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.25)