

3.5.8 – Ensaio de desgaste abrasivo DIN

Estes ensaios foram realizados conforme a norma DIN 53516 – “Testing of rubber and elastomers; determination of abrasion resistance”. Os ensaios de abrasão foram realizados num abrasômetro DIN 53.516. Duas abordagens foram utilizadas: a primeira com carga de 10N, a seco e numa lixa com grana 60 mesh de óxido de alumínio (Al_2O_3), e a segunda com carga de 15N, submerso em água à temperatura ambiente e com uma lixa com grana 60 mesh de carboneto de sílica (SiC), **figura 3.21a**. A pesagem das amostras foi realizada numa balança Sartorius com resolução de 10^{-5}g . Os resultados representam a média e o desvio padrão de cinco amostras.

A escolha dessas duas abordagens teve como objetivo principal identificar o efeito do tamanho do evento sobre os materiais testados.

As amostras foram retiradas com uma ferramenta de corte específica e podem ser observadas na **figura 3.21b**.

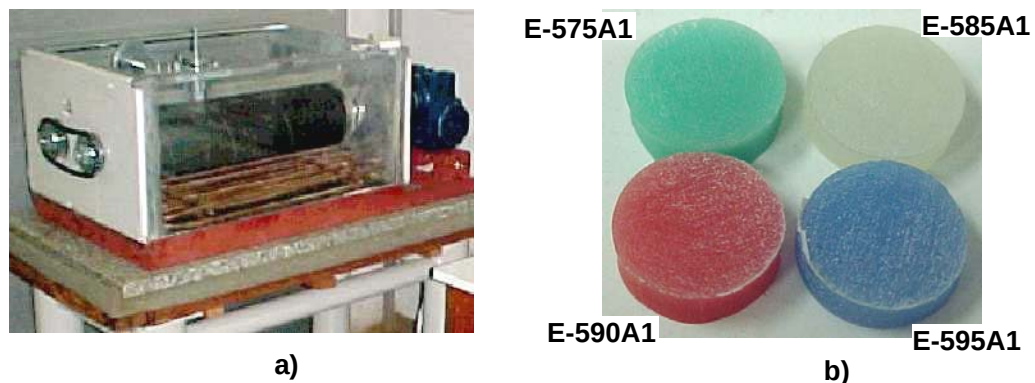


Figura 3.21 – a) Abrasômetro DIN 53.516 adaptado para ensaio submerso; b) Amostras do ensaio DIN 53.516.

3.6 – Parametrização do Ensaio de Abrasão SIMMC

A metodologia de teste tem como objetivo verificar faixas de operação do equipamento, bem como, selecionar parâmetros ótimos de carga e número de ciclos capazes de gerar os mecanismos de desgastes observados na prática.

Para isso foram realizados ensaios fixando alguns parâmetros e variando outros.

3.6.1 – Seleção da velocidade de teste

A frequência do inversor foi variada a partir de 15 Hz até 30 Hz, de maneira a atender a questão de vibração e torque, citada anteriormente no item 3.3.3. Esses valores resultam em velocidades médias de deslocamento de 63mm/s até 126 mm/s. Assim, a velocidade média de deslocamento foi selecionada em 83 mm/s. O material das calhas utilizadas nos primeiros ensaios é um poliuretano de dureza 85 Shore A (PU – Ref).

3.6.2 - Seleção da carga de teste

Em uma primeira seqüência de testes, fixou-se a velocidade e o número de ciclos, variando a carga no contato em 250N e 350N. O número de ciclos fixado foi de 1500, levando a um tempo de ensaio de duas horas e vinte e cinco minutos. Esses ensaios geraram perdas de massa total de 7g e 10g, respectivamente. O material utilizado foi o mesmo citado no item 3.6.1.

Fez-se necessário um segundo levantamento, visto que, para outros materiais as perdas para essa parametrização eram muito pequenas, comprometendo a medição. Assim, variou-se a carga em 500N, 650N e 800N. O material utilizado para esse levantamento foi o E-585A1.

3.6.3 – Seleção do número de ciclos de teste

Em outra abordagem fixou-se a carga e variou-se a quantidade de ciclos. Nessa condição constatou-se a perda de massa total, porém, é necessário o estudo do *amaciamento* (regime inicial do desgaste, onde a taxa de desgaste não é constante). Isso se faz necessário, pois a determinação de taxas de desgaste só faz sentido se determinada após esse transitório inicial.

3.6.3.1 – Estudo do amaciamento

O *amaciamento* é um fenômeno que acontece nos primeiros ciclos de um ensaio de desgaste, onde há acomodação da superfície de desgaste com o elemento responsável pela abrasão, podendo levar a grandes variações da taxa de desgaste nos instantes iniciais. A seguir, essa taxa estabiliza-se (ZUM GAHR, 1987).

Para o estudo do *amaciamento* foram realizados ensaios com paradas em pequenos intervalos de tempo (baixo número de ciclos), para monitorar o comportamento da taxa de desgaste durante o ensaio. Esses ensaios foram realizados em amostras do E-585A1.

3.7 – Ensaios de Desgaste Abrasivo

Os ensaios foram realizados com frequência de 15 Hz, que corresponde a uma velocidade média de 83 mm/s, carga de 500N, temperatura de 4°C e duração de 1000 ciclos. O ângulo de oscilação do cilindro foi de 90°, sendo 180° corridos a cada ciclo. A velocidade de translação do conjunto dos penetradores foi de 2 mm/s. Foi realizado um pré-teste de 1000 ciclos nas amostras nessa carga. A taxa de desgaste foi calculada pela **equação 3.5**. As perdas de massa foram medidas numa balança da marca BEL, modelo MARK 4100, com resolução de 10 mg, após serem secas com ar comprimido.

$$w = \frac{\Delta m}{\rho_{material} * d} \quad (3.5)$$

Onde:

w é a taxa de desgaste em mm³/m;

Δm é a perda de massa durante o ensaio em gramas;

$\rho_{material}$ é a densidade do material em g/mm³;

d é a distancia percorrida durante o ensaio em m.

Foram utilizadas quatro amostras de cada material. Os valores de taxa de desgaste são referentes à média para cada grupo.

3.8 – Análise Matemática dos Resultados

Na tentativa de encontrar alguma correlação entre resistência ao desgaste abrasivo experimentado no ensaio SIMMC e as propriedades mecânicas dos materiais testados, foi realizada uma análise matemática do comportamento de algumas propriedades em relação à taxa de desgaste. Para essa análise foi utilizado o programa MATLAB® R12.

Capítulo IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Análise de Calhas via MEV

Com a finalidade de obter dados reais sobre o desgaste em linhas de extração de petróleo foram retirados segmentos de calhas protetoras após 44 meses de uso na plataforma P19 e analisados em um Microscópio Eletrônico de Varredura.

Os resultados obtidos na análise destas calhas, que experimentaram desgaste abrasivo no fundo do mar, revelam desgaste por mecanismos com fratura frágil. O material de fabricação é um poliuretano, denominado material de referência, PU – Ref. O resultado da análise via MEV pode ser observado na **figura 4.1**.

As setas nas **figuras 4.1a** e **4.1c** indicam a direção de movimentação da linha, causada pela ação das correntes marítimas.

Pode-se observar na **figura 4.1a** um risco profundo e macroscópico. Aumentando-se a ampliação, **figuras 4.1b, c** e **d**, notam-se trincas que adentram o material. Observa-se, que trincas importantes são formadas em um plano aparentemente perpendicular à direção de riscamento e caminham nos dois sentidos. Apesar de se observar microcorte em algumas regiões, o mecanismo predominante é o de fratura frágil, onde há formação de fragmentos de desgaste pelo encontro de trincas de sentidos opostos (**figura 4.1c**) ou ruptura de regiões em forma de “lingüetas” formadas entre trincas, como mostrado na **figura 4.1d**.

Esses resultados são coerentes com os obtidos pelo autor deste trabalho e colaboradores em trabalho anterior (FRANCO, *et al.* 2002). Nesse trabalho, foram observados os mesmos mecanismos de desgaste para esses componentes. Uma análise das imagens conduziu à realização de ensaios de esclerometria pendular, com objetivo de investigar qual ângulo de ataque reproduziria em laboratório os mecanismos predominantes.

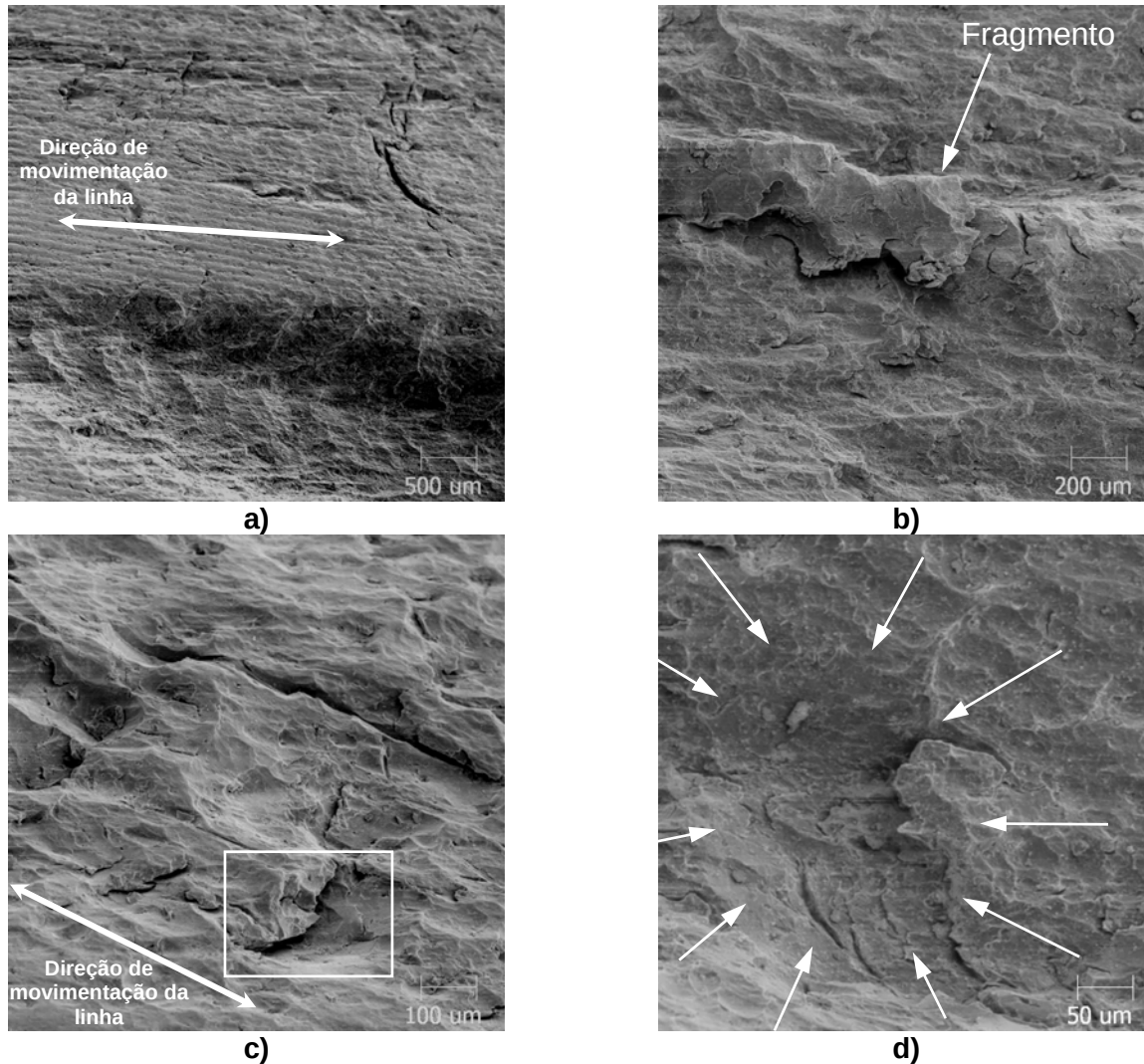


Figura 4.1 – Fotos de MEV mostrando a superfície de calhas expostas em campo: a) vista geral de uma região desgastada, b) detalhes da formação de fragmentos de desgaste, c) detalhe de ruptura de uma “lingüeta” formada pela propagação de uma trinca e d) região onde houve o destacamento de um fragmento de desgaste, MEV.

4.2 – Comparação da Análise de Campo com Resultados de Esclerometria

Os ensaios de esclerometria realizados por FRANCO *et al.* (2002), com cinco ângulos de ataque diferentes (40°, 52,5°, 60°, 75° e 95°), mostraram que, os mecanismos de desgaste passam de microtrincas para microcorte quando se aumenta o ângulo de ataque, para o poliuretano usado nessas calhas.

A comparação da análise do material de campo com esses resultados mostra que, predominantemente, no fundo do mar ocorrem interações dos *risers* com superfícies de geometrias com baixos ângulos de ataque.

Baseado nesses resultados foi desenvolvido, projetado e construído um equipamento para desgaste abrasivo baseado no princípio da esclerometria, capaz de gerar os mecanismos de desgaste observados na prática. Esse equipamento tem um conjunto de noventa penetradores, com ângulos de ataque de 55° , distribuídos de forma conhecida sobre uma placa, simulando numa ótica tribológica, o solo marítimo. A seguir apresentam-se os resultados preliminares obtidos com esse equipamento.

4.3 – Infra-estrutura para Ensaio de Desgaste Abrasivo SIMMC

Determinado o ângulo de ataque que reproduziria na superfície o desgaste observado em campo, desenvolveu-se um equipamento de desgaste abrasivo que ensaie amostras de calhas em tamanho comercial, como descrito na seção 3.3.2.

A **figura 4.2** mostra o equipamento em sua configuração final.

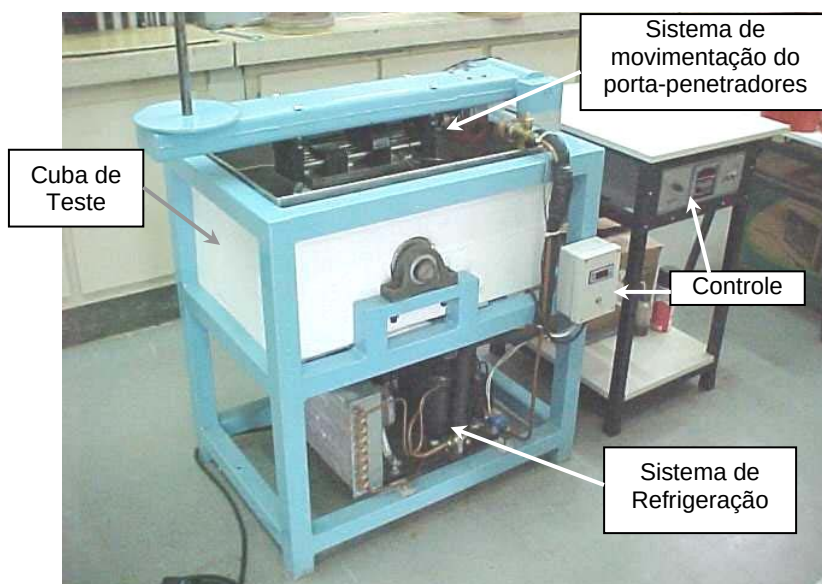


Figura 4.2 – Equipamento de esclerometria múltipla desenvolvido, projetado e construído no LTM. Abrasômetro SIMMC.

4.3.1 – Ensaios de validação do equipamento

Os primeiros ensaios foram realizados com a finalidade de verificar o funcionamento do equipamento, bem como, se reproduziria de forma satisfatória os mecanismos de desgaste observados na prática. Eles foram realizados em amostras de PU – Ref, **Figura 4.3**.

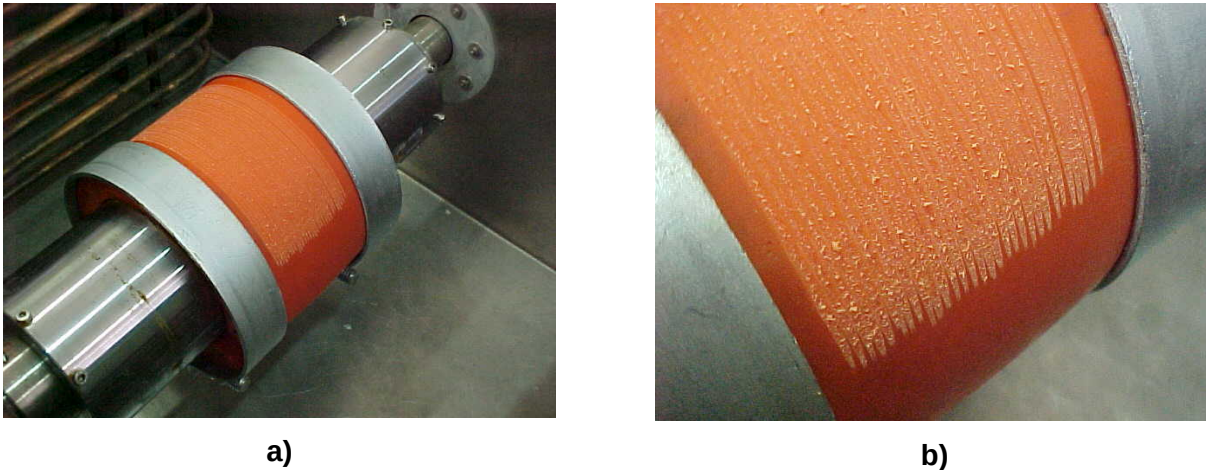


Figura 4.3 – Amostra a superfície desgastada durante um ensaio no SIMMC; amostra de PU – Ref. 250N, velocidade média de deslocamento 125 mm/s, imerso em água doce a 4°C.

As fotos via MEV da região de desgaste das calhas após o ensaio são apresentadas na **figura 4.4**. Riscos formados pela passagem dos penetradores podem ser observados e uma análise com maiores aumentos revelam os mecanismos pelo qual se dá a retirada de material durante o ensaio, **figura 4.5**.

Observam-se trincas e formações de fragmentos de desgaste. O aspecto da superfície também é semelhante àquela observada nas amostras de campo (**figura 4.1**) e revela o rompimento do material por fratura frágil, porém com vales e picos provenientes da configuração dos penetradores (**figura 4.5c e 4.5d**).

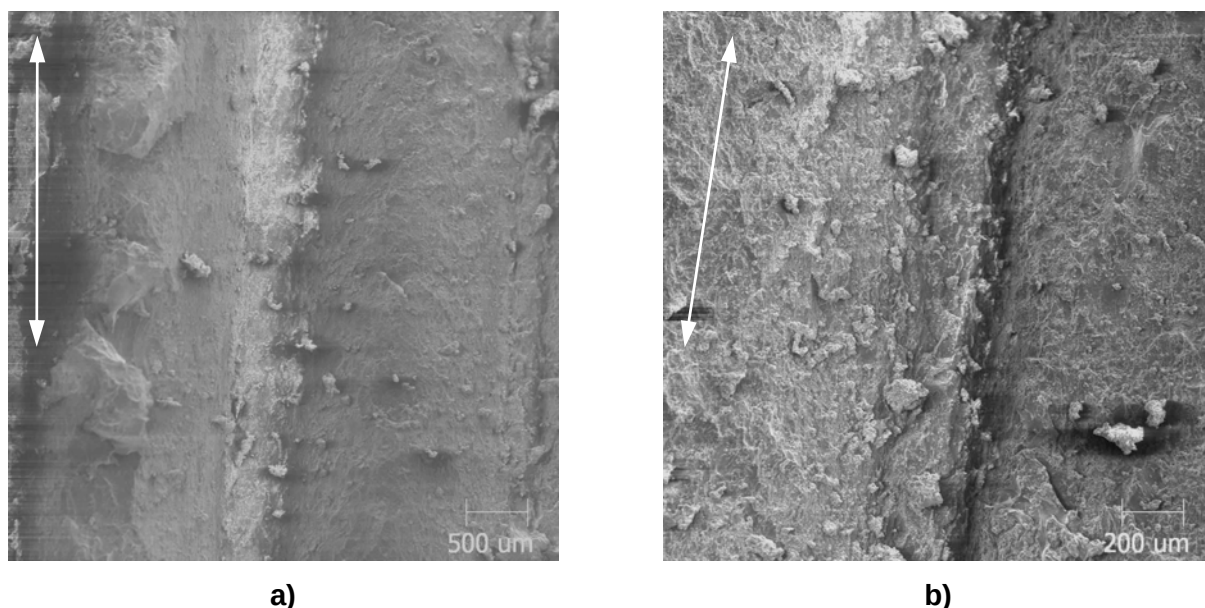


Figura 4.4 – Aspecto da superfície desgastada durante um ensaio no SIMMC numa amostra de PU–Ref, 250N, velocidade média de deslocamento 125 mm/s, a) aspecto geral da região de contato com os penetradores e b) vale de um risco. As setas representam a direção de riscamento, MEV.

A **figura 4.5b** mostra a formação de um fragmento de desgaste através da propagação de uma trinca superficial, semelhante ao visto na **figura 4.1b**.

Na **figura 4.5d** podem ser observadas várias trincas e também o rompimento do material de uma forma muito semelhante ao observado na **figura 4.1c**.

Esses resultados mostram que o ensaio é capaz de reproduzir os mecanismos de desgaste através do qual se dá a retirada de material na situação de campo.

4.4 – Ensaio de Caracterização das Amostras

Foram ensaiados quanto à dureza, tração, alongamento, rasgamento, resiliência, densidade e abrasão quatro tipos de poliuretanos (MDI-BD) com diferentes formulações, além de um PU de dureza 85 Shore A, utilizado atualmente na fabricação de calhas protetoras de linhas flexíveis. Esse material foi denominado PU – Ref.

Os resultados obtidos são apresentados nas seções seguintes.

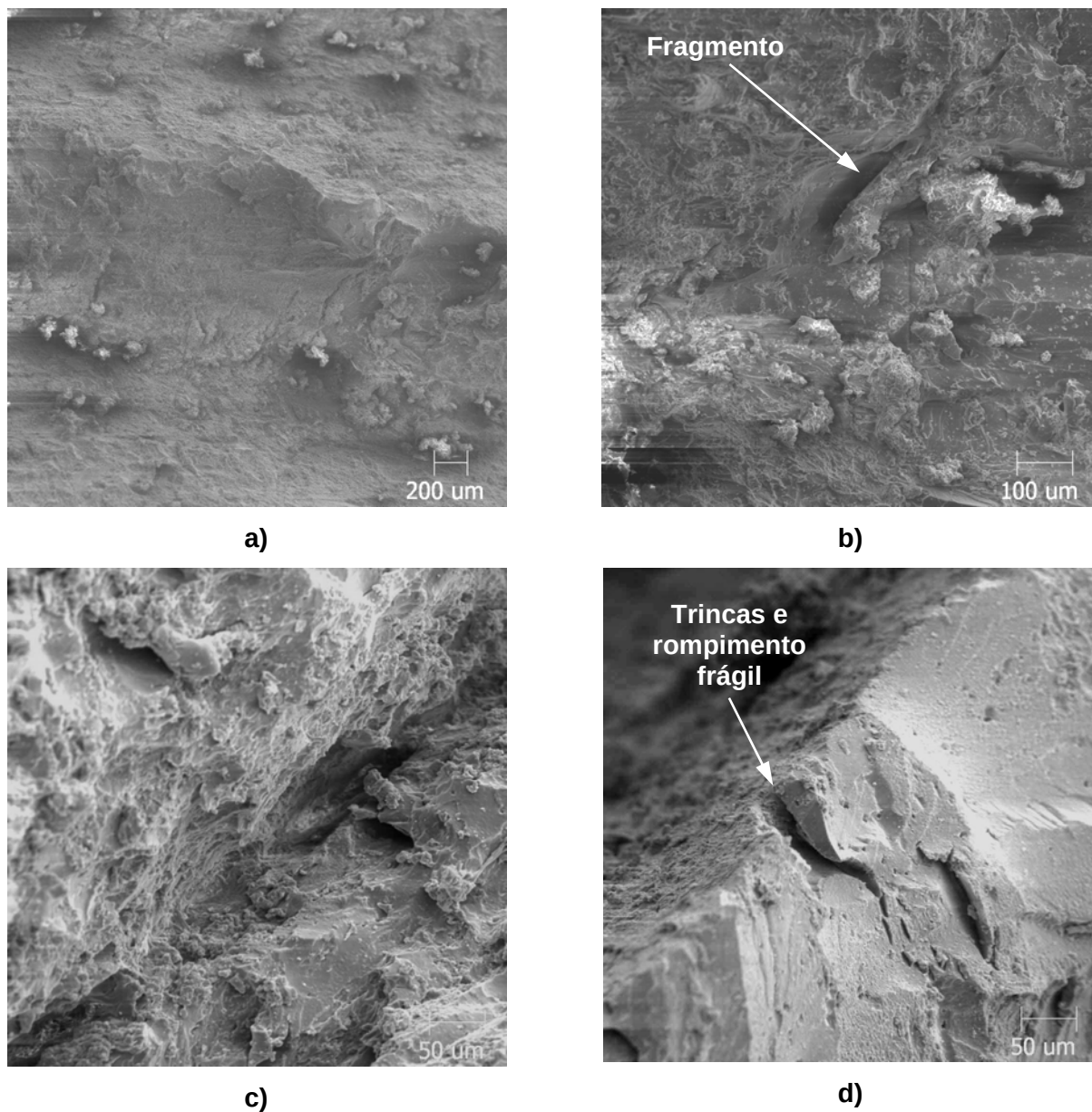


Figura 4.5 – Aspecto da superfície desgastada durante um ensaio no SIMMC; amostra de PU–Ref. 250N, velocidade média de deslocamento 125 mm/s. b) região de início dos riscos, b) detalhe de um fragmento de desgaste, c) aspecto típico da superfície após a remoção de material e e) pico de desgaste com formação de trincas, MEV.

4.4.1 – Ensaio de dureza

Os resultados de dureza dos materiais podem ser observados na **Tabela 4.1**. Para esse ensaio foi utilizada a escala Shore A.

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio de dureza Shore A para os PU's produzidos.

Amostra	Dureza Shore A
	ASTM D2240
E-575A1	77±0
E-585A1	87±1
E-590A1	90±0
E-595A1	94±0
PU – Ref.	85 *

* - Dado fornecido pelo fabricante.

A escolha dessa faixa de dureza se deu de forma a investigar a influência dessa propriedade e a referência para isso foi o PU-Ref, de dureza 85 Shore A. A partir daí escolheu-se PU's com durezas abaixo e acima desse valor.

As durezas medidas e os valores esperados para cada material não ultrapassam a 3 pontos. Isso verifica que os materiais trabalhados abrangem de forma satisfatória a faixa de dureza esperada. O material que mais se distanciou foi o E-585A1, onde a dureza esperada era de 85 Shore A.

4.4.2 – Ensaio de tração e alongamento

Os resultados do ensaio de tração são apresentados na **tabela 4.2**. Nas **figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9** podem ser observadas as curvas de tensão *versus* deformação correspondentes.

A resistência à deformação nos PU's está vinculada à proporção de fases cristalinas e amorfas e à existência de ligações cruzadas, que impedem movimentação de estruturas enoveladas. A influência da forma e composição das cadeias é também de grande importância no grau de mobilidade entre as cadeias. Os quatros primeiros PU's da tabela têm a mesma composição de pré-polímero e agente de cura, porém com porcentagens de NCO diferentes, ver **tabela 3.1**.

Pode-se observar na **tabela 4.2**, considerando os desvios, que os valores de resistência à tração para os materiais da série E-500 e para o PU-Ref são praticamente iguais e são da ordem de 30MPa. Os alongamentos máximos para esses materiais, também considerando os desvios,

são próximos e da ordem de 430%. Contudo, percebe-se uma pequena vantagem do E-575A1 e do PU-Ref em relação aos demais, e uma menor capacidade de deformação parece ser observada para o E-595A1. Os módulos a 100%, 200% e 300% também são apresentados na **tabela 4.2**.

Esses materiais possuem uma grande capacidade de deformação, chegando a alongarem-se quase cinco vezes em relação ao comprimento inicial, antes de romper. A resistência ao desgaste abrasivo e a capacidade de deformação estão ligadas à resistência a tração, porém, é de se esperar, que essas propriedades não influenciem diretamente na diferenciação da taxa de desgaste para esse grupo de materiais, haja vista que os valores máximos, considerando os desvios, são muito próximos.

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de tração.

Amostra	Módulo a 100% [MPa]	Módulo a 200% [MPa]	Módulo a 300% [MPa]	Limite de Resistência [MPa] (PSI)	Alongamento Máximo (%)
	ASTM D412				ASTM D624
E-575A1	3,8	6,2	9,4	33,4±1,7(4846±255)	468±8
E-585A1	6,9	10,0	15,0	30,6±6,4(4437±937)	430±35
E-590A1	8,7	12,4	17,4	34,1±0,9(4972±132)	423±38
E-595A1	11,5	15,6	20,9	30,0±5,1(4353±738)	403±50
PU – Ref.	9,7	13,8	17,4	26,3±3,7(3808±538)	480±20

No entanto, observa-se que os módulos, ou resistências mecânicas medidas a 100, 200 e 300%, divergem bastante. Isso pode ser explicado pela sequência de deformação que esses materiais experimentam. No início da deformação, a disposição e restrição das cadeias, mesmo que tenham a mesma composição, afeta diretamente a resistência à deformação. Porém, na situação de rompimento, como as macromoléculas têm a mesma composição, a resistência oferecida à ruptura é muito próxima para os materiais, como mostrado na figura 4.10.

Isso leva a crer, que os materiais da série E-500 apresentam um aumento das configurações de maior resistência mecânica (fases cristalinas e estruturas tridimensionais travadas), na medida que se aumenta o valor porcentual de NCO, como mostrado na seção 2.2.6.3 e 2.2.6.4.