

É interessante observar, que a ordem de profundidade máxima não obedece à ordem de dureza Shore A. A definição de dureza é exatamente a dificuldade de se penetrar na superfície de um material. Todavia, nos materiais estudados, para os dois ensaios, observaram-se diferenças de resistência à penetração.

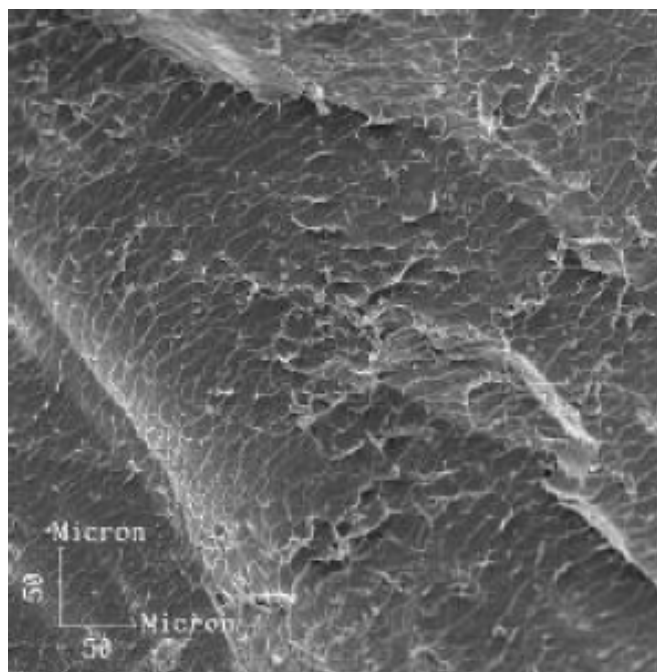


Figura 4.22 – Aspecto da fratura do PU–Ref fraturado a -196°C , MEV, FERREIRA, *et al.*, (2002).

Associa-se esse comportamento diferenciado principalmente à geometria do penetrador. No ensaio de dureza Shore A tem-se um penetrador com um raio de ponta muito menor do que a esfera utilizada no IEI. Conseqüentemente, o ensaio IEI está mais distante de perfurar o material.

Isso leva ao entendimento que, durante o ensaio IEI, existe uma solicitação da propriedade de resistência a deformação, semelhante à resposta elástica do material durante o ensaio de tração. Nota-se que, apesar dos valores de alongamento máximo durante a tração (**tabela 4.2**) serem muito próximos, o E-595A1 tem a menor capacidade de deformar e mostra a menor profundidade máxima de penetração, enquanto os materiais E-575A1 e PU-Ref demonstram serem mais elásticos e mostram as maiores profundidades de penetração.

No ensaio de dureza Shore A, existe uma tendência a perfurar o material, solicitando assim a propriedade de resistência à deformação, porém numa condição de rasgamento.

Observa-se, ainda, que para os materiais de mesma dureza (E-585A1 e PU-Ref), os valores de alongamento máximo durante o rasgamento (**tabela 4.3**), também são os mesmos, mas as profundidades máximas de penetração para o ensaio IEI são diferentes. Isso confirma que a resposta do material durante a medida de dureza Shore A está muito mais ligada, então, a uma condição de rasgamento.

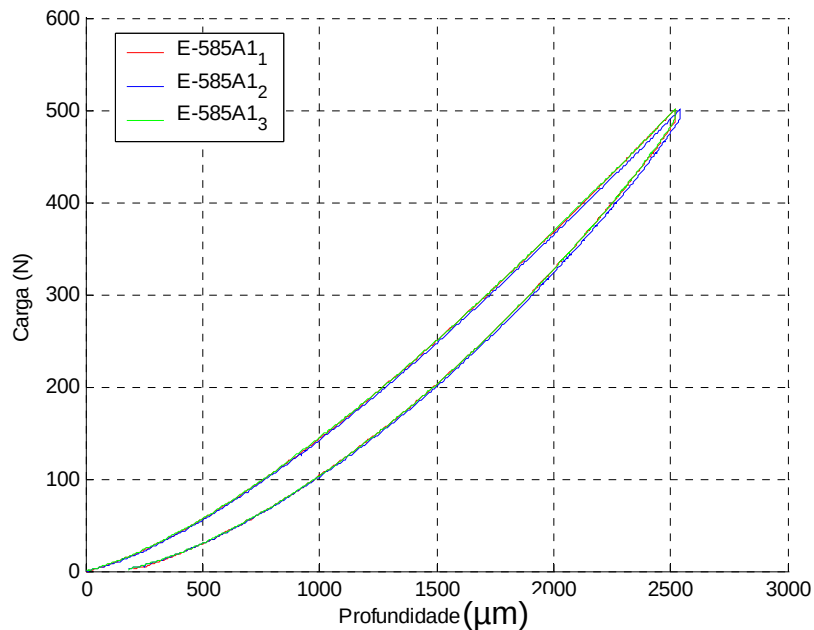


Figura 4.23 – Curvas de indentação instrumentada. Carga *versus* profundidade. O gráfico retrata a repetibilidade nas curvas geradas nos três ensaios para o material E-585A1.

As energias de deformação, calculadas a partir da área abaixo das curvas, para o carregamento e descarregamento para cada material são mostradas na **tabela 4.6** e na **figura 4.25**. A energia de carregamento é representada por **Ec**, a energia de descarregamento por **Ed** e a diferença entre elas é a energia envolvida na histerese do material.

No carregamento (**Ec**), o material E-575A1 tem maior energia de deformação enquanto o material E-590A1 tem a menor energia. Durante o descarregamento (**Ed**) observa-se que a energia é menor que no carregamento para todos os materiais. Esse fato está associado à histerese do material, (GUIZZO, 1999). Porém, nota-se que para o E-595A1 isso ocorre com maior intensidade, chegando a mudar a ordem de classificação, devido à pronunciada deformação residual, ver **figura 4.24**.

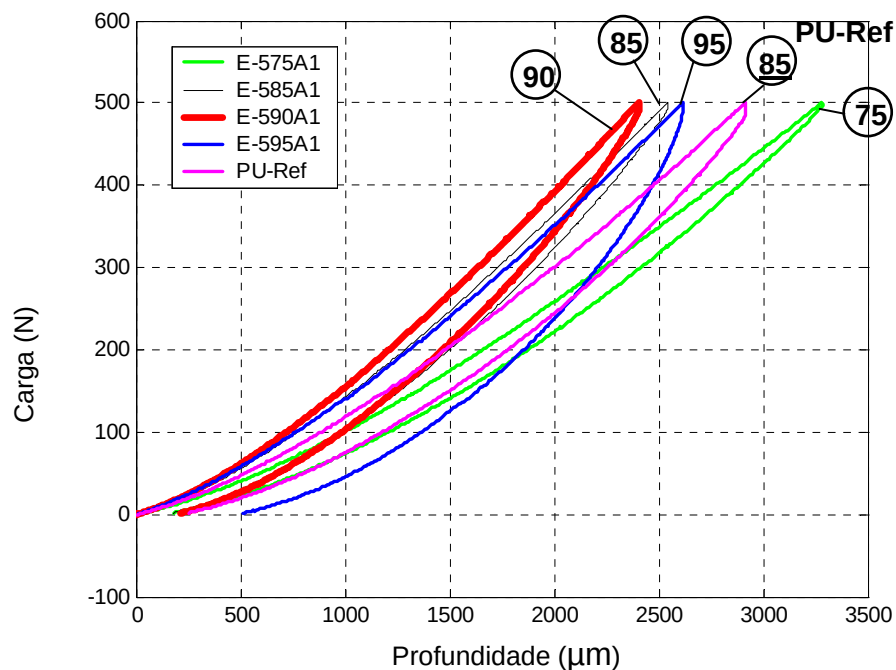


Figura 4.24 – Curva de indentação instrumentada característica carga *versus* profundidade para os materiais testados.

Tabela 4.6 – Energia de deformação para o ensaio de indentação instrumentada comparada com outras propriedades mecânicas. **Ec** energia durante o carregamento, **Ed** energia durante o descarregamento e **Ec-Ed** histerese.

Amostra	Ec [J]	Ed [J]	Ec-Ed [J] Histerese	Limite de Resistência [MPa]	Alongamento Máximo (%)	Resiliência (%)	Resistência ao Rasgamento [N/mm]
E-575A1	761,8±45,7	680,1±40,8	81,7±4,9	33,4±1,7	468±8	51,0±1,5	70,8±1,5
E-585A1	547,1±8,2	452,7±6,8	94,4±1,4	30,6±6,4	430±35	45,0±1,5	94,7±0,6
E-590A1	503,3±10,1	406,3±8,1	97,0±1,9	34,1±0,9	423±38	37,0±0,9	107,3±1,2
E-595A1	581,4±20,3	367,7±12,9	213,6±7,5	30,0±5,1	403±50	35,0±0,3	121,4±7,3
PU - Ref.	563,5±22,5	450,3±18,0	113,2±4,5	26,3±3,7	480±20	41,0±0,4	54,0±1,1

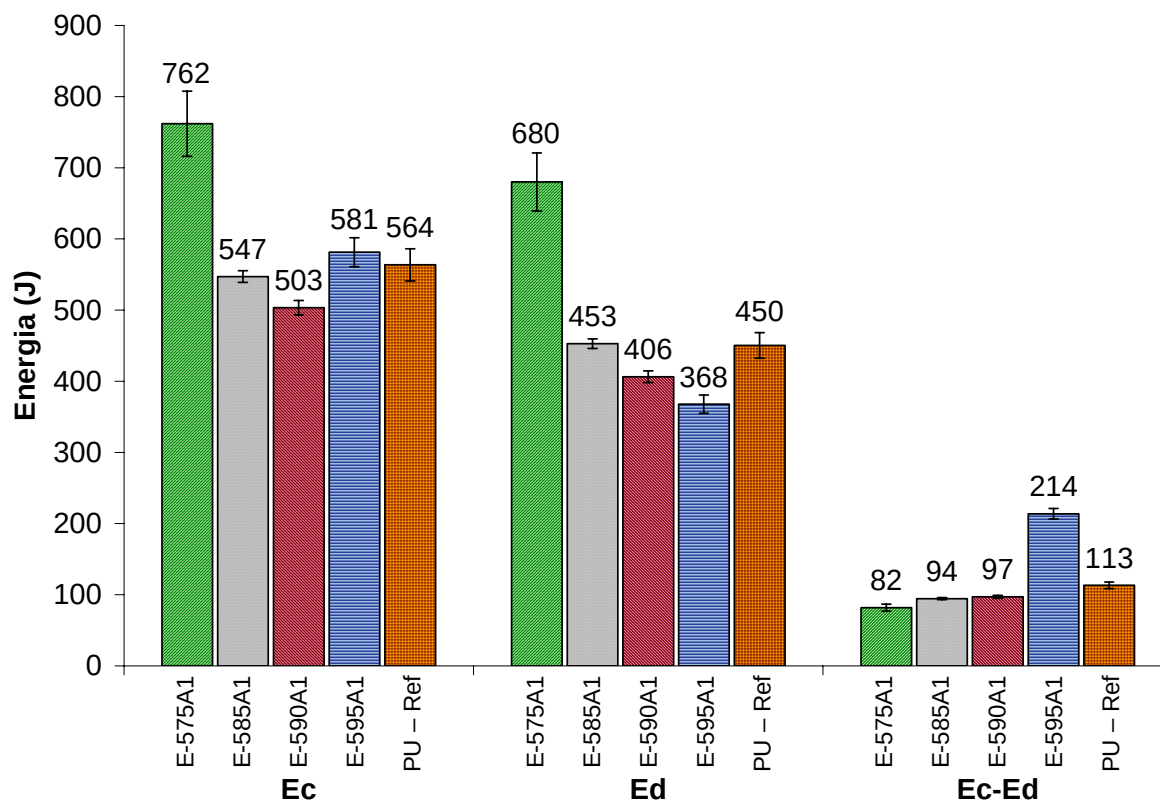


Figura 4.25 – Energia de deformação para o ensaio de indentação instrumentada. Ec – energia durante o carregamento, Ed – energia durante o descarregamento e Ec-Ed – histerese.

A histerese é uma propriedade que não está diretamente relacionada a nenhuma outra propriedade mecânica, porém, observa-se que existe um compromisso entre capacidade de alongamento e resiliência. O material de menor capacidade de alongamento e menos resiliente teve a maior histerese. E o de menor histerese reúne boa resiliência e capacidade de alongamento.

4.4.8 – Ensaio de Abrasão DIN 53.516

Os resultados de abrasão a seco com carga de 10N, bem como os submersos com carga de 15N, podem ser observados na **Tabela 4.7**. As **figuras 4.26** e **4.27** mostram os resultados da perda de volume em forma de gráfico de barra para os ensaios DIN com carga de 10N e 15N, respectivamente. Amostras do PU – Ref também foram ensaiadas para as duas condições.

Tabela 4.7 – Perda de volume médio nos ensaios de desgaste abrasivo DIN 53.516.

Amostra	Abrasão 10N - seco [mm ³]	Abrasão 15N - submerso [mm ³]
E-575A1	28,0±1,1	172,1±5,0
E-585A1	31,0±2,0	217,2±5,2
E-590A1	32,2±3,0	240,3±2,0
E-595A1	48,0±1,0	275,5±4,0
PU - Ref.	114,5±8,0	294,1±4,0

Observa-se, que o desgaste é significativamente afetado com a variação do valor da carga e do abrasivo. No ensaio com carga de 10 N, a lixa utilizada é de um óxido de Alumínio, enquanto o realizado com carga de 15 N, utilizou-se uma lixa de carboneto de Silício. Sabe-se da literatura, que abrasivos a base de Silício são mais pontiagudos, enquanto os a base de óxido de Alumínio são mais arredondados. Essa diferença geométrica pode levar a redução nas perdas de massa ou volume na abrasão, da ordem de até 3 a 4 vezes, como mostrado por LARSEN-BASSE(1988).

Existe também variação da taxa de desgaste em função das propriedades dos materiais. Para os PU's da série E-500, o aumento da dureza diminui a resistência à abrasão. A literatura indica, que o aumento da dureza induz o surgimento de mecanismos de microcorte em alguns sistemas tribológicos semelhantes aos aqui abordados, (KURACHENKOV *et al.*, 1990). Apesar dos resultados apontarem uma relação da taxa de desgaste com a dureza para estes materiais, essa mudança de mecanismos de desgaste não é visível nas fotos de microscopia de varredura eletrônica (**Figura 4.28**). O aspecto da superfície desgastada é semelhante para os quatro PU's. Os materiais de menor dureza (E-575A1 e E-585A1, **figura 4.28a** e **4.28b**) apresentam um aspecto topográfico um pouco mais acentuado em relação aos de maior dureza (E-575A1 e E-585A1, **figura 4.28c** e **4.28d**). Notam-se nas duas primeiras figuras (**4.28a** e **4.28b**) riscos, aparentemente, maiores que os observados nas duas outras micrografias.

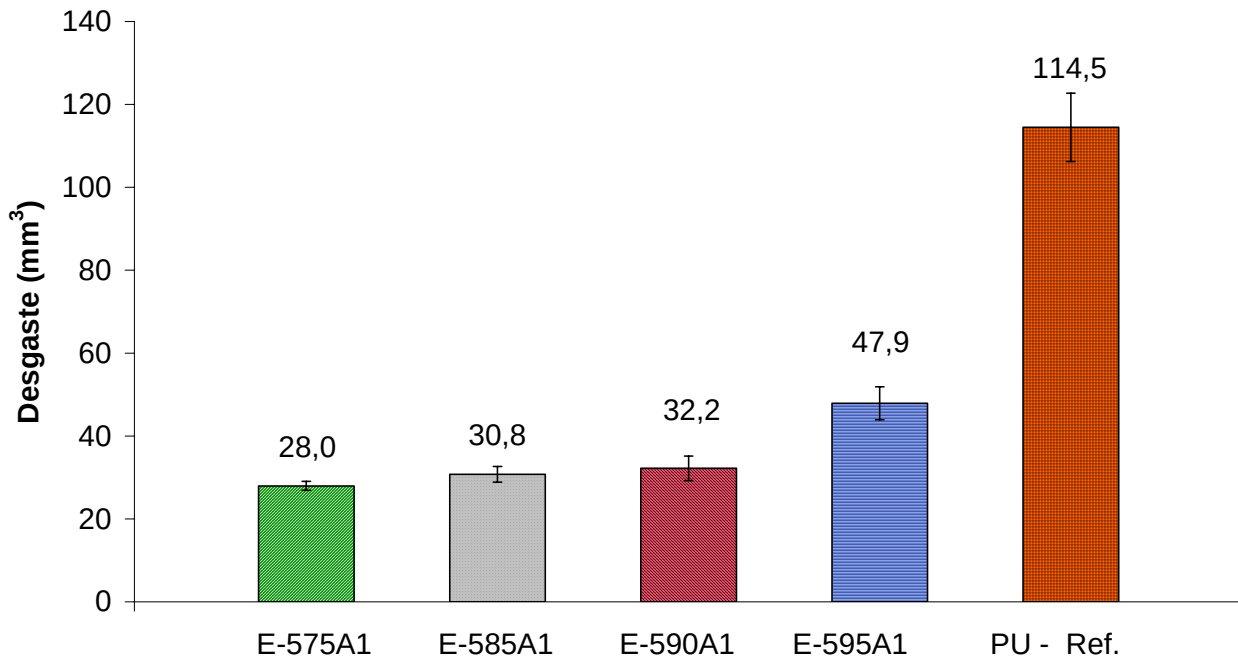


Figura 4.26 – Perda de volume médio nos ensaios de desgaste abrasivo segundo a norma DIN 53.516, com carga de 1 N, a seco, abrasivo 60 mesh, Al_2O_3 .

A diferença nas taxas de desgaste está, muito provavelmente, ligada ao comportamento elástico dos materiais testados. Na **figura 4.28a** observa-se, que alguns fragmentos de desgastes permanecem aderidos à superfície, apesar do rasgamento da mesma, sugerindo a ocorrência de deformação e recuperação elástica do material durante a passagem do abrasivo (ver alongamentos no ensaio de tração, **tabela 4.2**, e de resistência ao rasgamento, **tabela 4.3**). Em contrapartida, para materiais mais duros, parece existir uma maior facilidade de remoção destes fragmentos. A amostra E-595A1 apresenta uma superfície com menor quantidade de material aderido, **figura 4.28d**.

As **figuras 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32** mostram em maiores aumentos os quatro PU's ensaiados. Nelas ficam evidenciados os mecanismos de microcorte e observam-se, nas **figuras 4.29b, 4.30b, 4.31b e 4.32b**, regiões características de fratura frágil, com presença de trincas e superfícies planas.

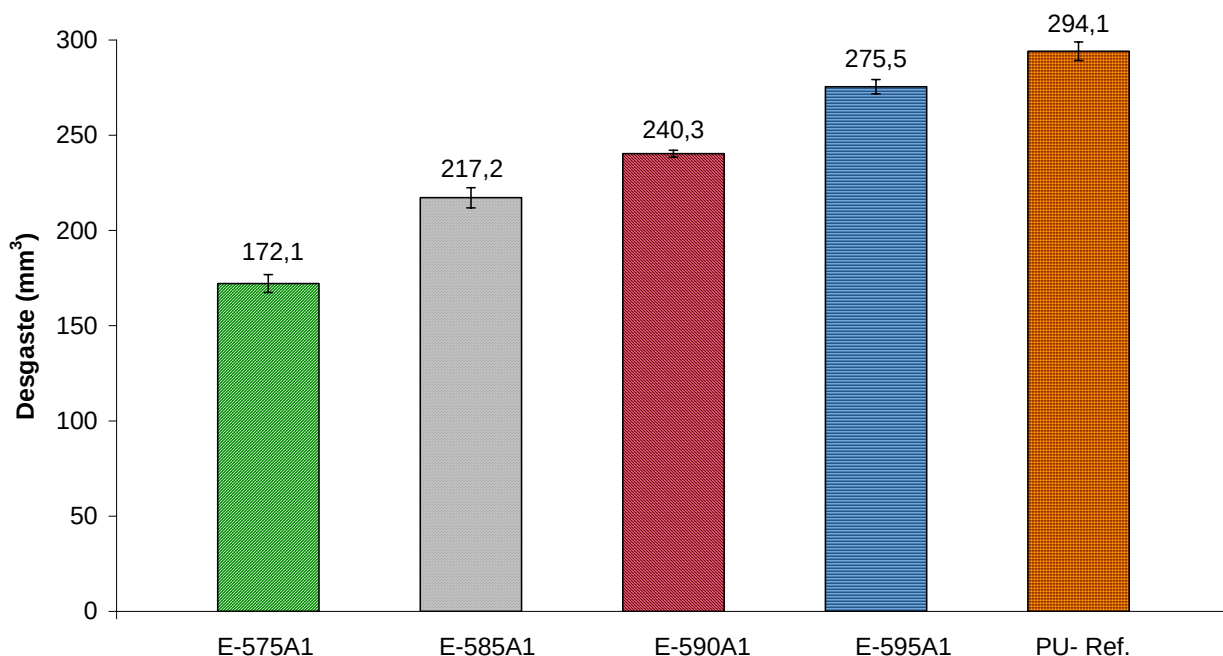


Figura 4.27 – Resultado do ensaio DIN 53.516, com carga de 15N, submerso em água a 25°C. Desvio padrão para quatro amostras, SiC, 60 mesh.

A existência de corte está, muito provavelmente, ligada à característica agressiva do abrasivo da lixa deste ensaio (SiC). O carboneto de Silício é pontiagudo (altos ângulos de ataque), levando ao processo de corte do material. Esse mecanismo parece ser bastante importante na retirada de material durante o ensaio de desgaste abrasivo DIN 53.516. Além disso, regiões com trincas e rompimento de forma frágil são observadas.

Durante o processo de corte é essencial que haja resistência ao rasgamento, porém, a capacidade de deformar elasticamente é fundamental, pois a elasticidade permite a passagem da partícula abrasiva sem, ou com mínima remoção de material. Em outras palavras, o polímero “foge” à ação do abrasivo, retornando a posição inicial após a passagem do abrasivo. Para um material com grande capacidade de se alongar, é de se esperar que haja maior deformação elástica antes que surjam falhas ou trincas, consumindo energia sem gerar desgaste. Essa propriedade é geralmente, inversamente proporcional à resistência ao rasgo, ou seja, materiais que alongam mais, geralmente necessitam de menores forças para serem rompidos, ver **tabela 4.3**. Isso mostra que, a propriedade de alongamento tem maior influência na resistência ao desgaste abrasivo DIN 53.516, visto que o PU E-575A1 tem menos desgaste e maior capacidade de se alongar.

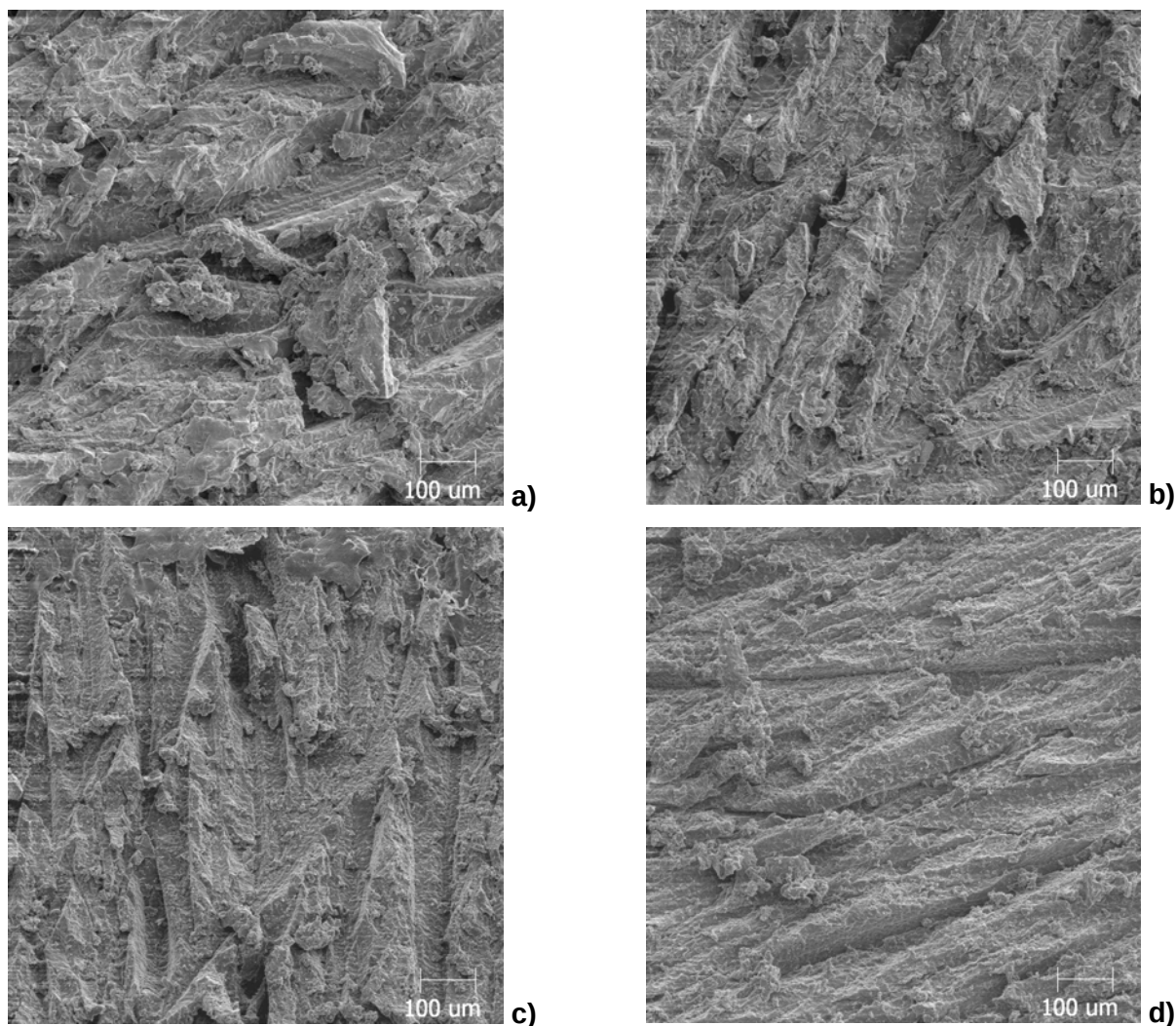


Figura 4.28 – Aspecto da superfície de desgaste para ensaio DIN 53.516, 15 N, submerso. a) E-575A1, b) E-585A1, E-590A1 e d) E-595A1, amostras inclinadas de 30°, MEV.

Ao se comparar os materiais da série E-500 com o PU-Ref, observa-se a superioridade daqueles em relação a esse. A **figura 4.33** mostra a micrografia da região ensaiada do PU-Ref. Nela fica evidente a existência de microcorte e regiões de fratura frágil, assim como observado nos PU's da série E-500. Considerando a topografia desses materiais, o PU-Ref se comporta de forma semelhante ao E-575A1, porém com maiores evidências de corte com grande retirada de material, **figura 4.32b**. Em relação ao alongamento máximo no rasgamento, o PU-Ref tem a mesma capacidade de deformação do E-585A1, porém sua resistência ao rasgo é muito menor. Isso

indica que, a capacidade de alongar-se é importante nesse ensaio, mas a resistência ao rasgamento também.

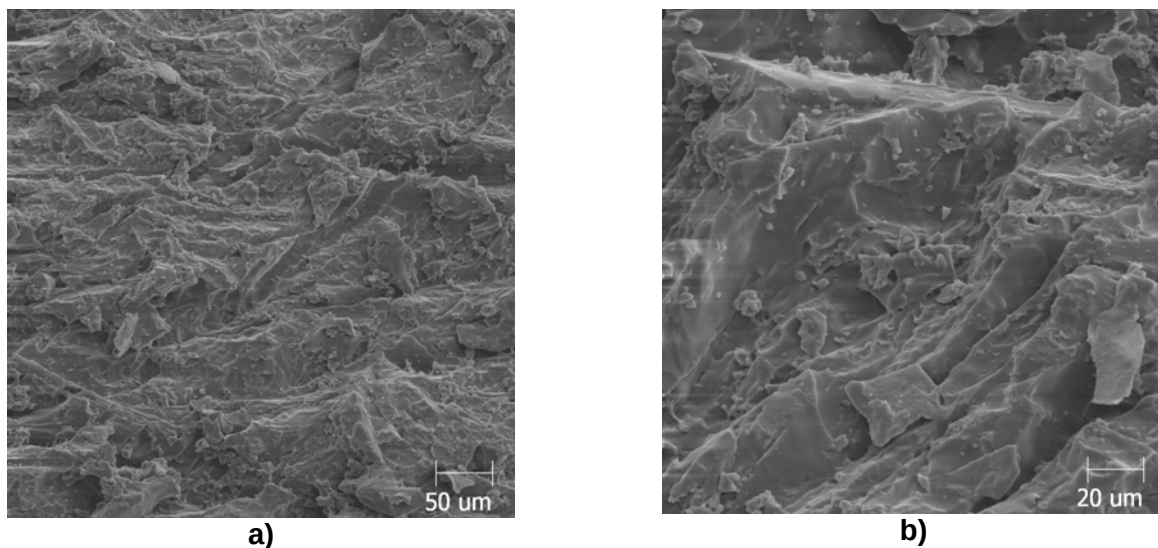


Figura 4.29 – Amostra E-575A1, ensaio DIN 53.516, carga de 15N, submerso em água a 25°C. a) aspecto geral, b) detalhe de a), MEV.

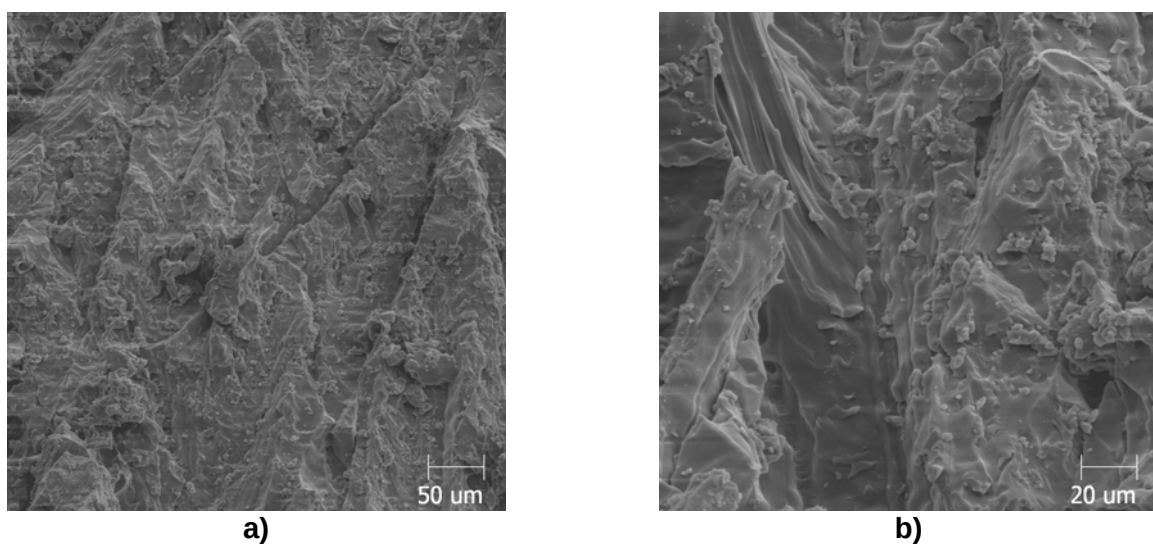


Figura 4.30 – Amostra E-585A1, ensaio DIN 53.516, carga de 15N, submerso em água a 25°C. a) aspecto geral, b) detalhe de a), MEV.

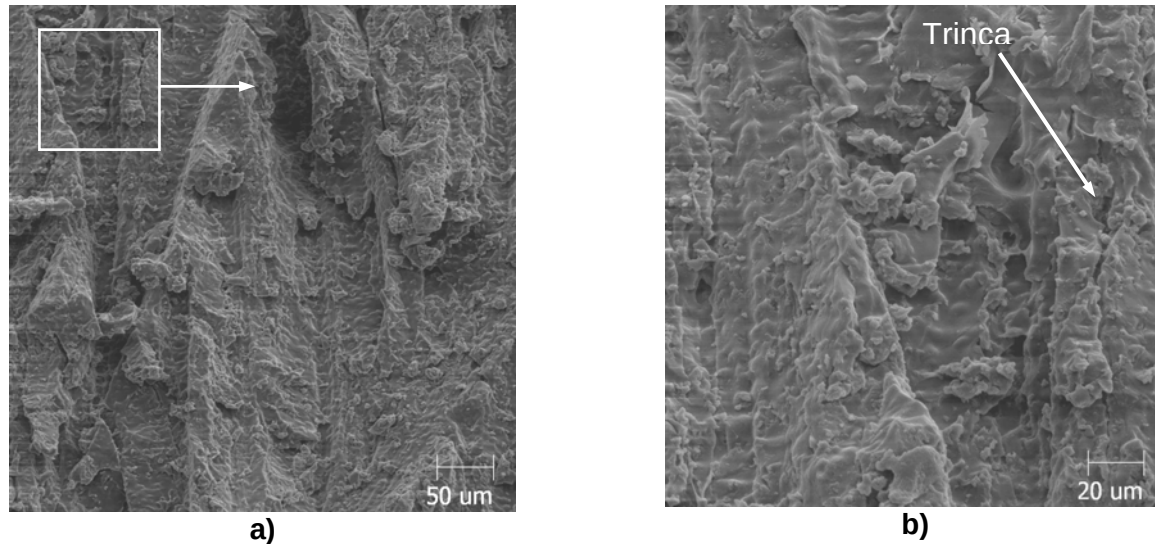


Figura 4.31 – Amostra E-590A1, ensaio DIN 53.516 carga 15N/submerso em água. a) aspecto geral, b) detalhe de uma trinca, MEV

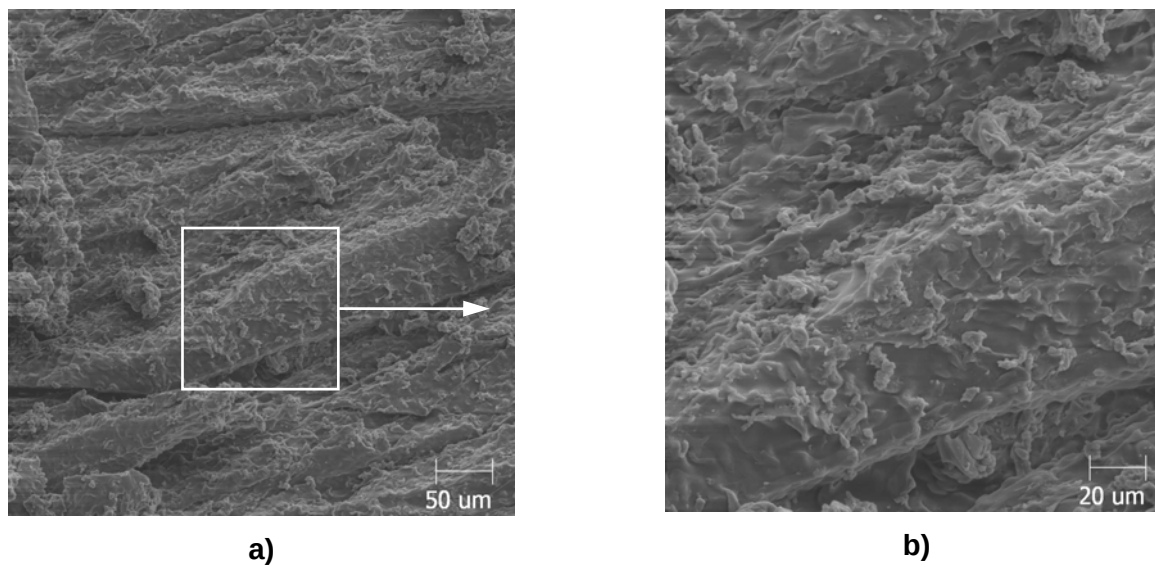


Figura 4.32 – Amostra E-595A1, ensaio DIN 53.516 carga 15N/submerso em água. a) aspecto geral, b) detalhe topográfico, MEV.

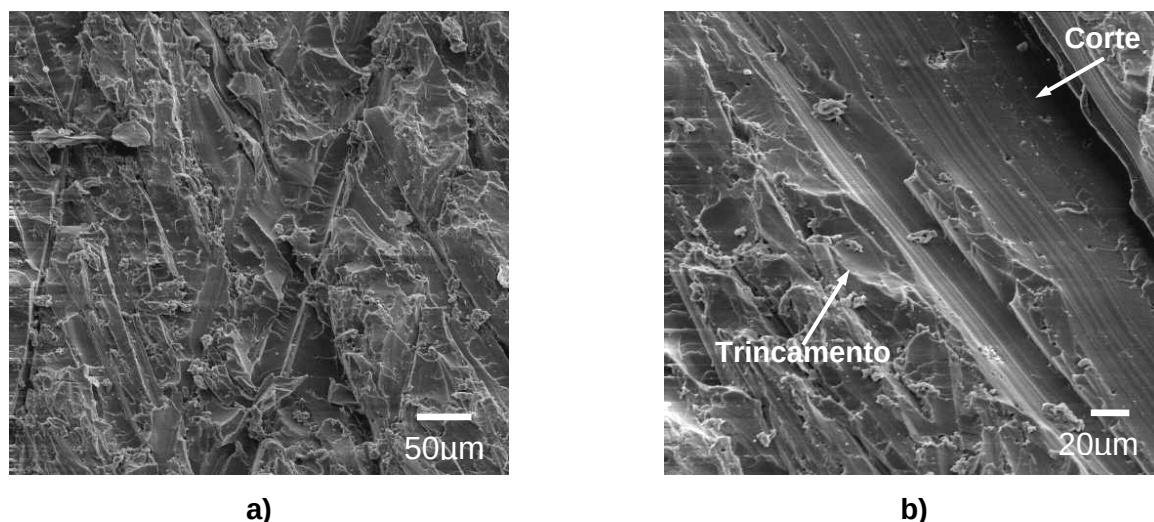


Figura 4.33 – Amostra de PU-Ref, ensaio DIN 53.516 carga 15N/submerso em água. a) aspecto geral, b) detalhe de uma região de trinca e de um corte, MEV.

4.5 – Parametrização do Ensaio SIMMC

Com o objetivo de encontrar faixas ótimas de operação do novo equipamento de desgaste abrasivo, parâmetros, tais como: velocidade, carga e número de ciclos, foram realizados ensaios variando-se alguns parâmetros, fixando os demais.

4.5.1 – Seleção da velocidade de teste

A velocidade média de deslocamento de uma linha flexiva em relação ao solo marinho foi estimada baseado em estudos das marés. Esse valor, definido em relatórios internos da Petrobrás, está próximo a 100 mm/s.

Devido ao problema de vibração, citado na seção 3.3.3, onde a velocidade de oscilação do cilindro, associada com o atrito do par de materiais excitava o sistema em frequências muito próximas da frequência natural, convergindo assim, em ressonância, levando a grandes amplitudes de vibração, estabeleceu-se um valor máximo para esse parâmetro. O valor mínimo foi determinado pela capacidade mecânica de acionamento do sistema (potência mecânica).

A **figura 4.34** mostra o aspecto de uma amostra de PU-Ref após 1000 ciclos em duas frequências, 15Hz e 30Hz, o que representam velocidades médias de riscamento iguais a 63 mm/s e 126 mm/s, respectivamente. A primeira onde não houve vibração durante o ensaio, e a segunda onde ocorreu vibração.