

Durabilidade de Geomembranas Envelhecidas em Laboratório sob Condições Similares às de Campo

Davidson Miguel Avelar de Oliveira
UFMG, Belo Horizonte, Brasil, eng.davidson@hotmail.com

Marina de Freitas de Souza
UFMG, Belo Horizonte, Brasil, marinasouzasbt@hotmail.com

Ana Flávia Gobira Xavier
UFMG, Belo Horizonte, Brasil, anafgobira@gmail.com

Déborah Ferreira Azevedo
UFMG, Belo Horizonte, Brasil, deborah.fa@hotmail.com

Maria das Graças Gardoni Almeida
UFMG, Belo Horizonte, Brasil, gardoni@etg.ufmg.br

RESUMO: O presente artigo estuda a durabilidade de geomembranas de polietileno de alta densidade (HDPE) usadas como barreiras de impermeabilização em barragem de rejeito de mineração de ouro. O contato do fluido altamente contaminante da barragem de rejeito de ouro, a exposição às elevadas temperaturas no campo e a radiação ultravioleta potencializam a combinação de danos físicos e químicos. Para a avaliação dessa degradação, as geomembranas foram envelhecidas em laboratório, por meio de procedimentos que simulam, o mais próximo possível, as condições de obra tanto em termos das tensões de confinamento, quanto das condições ambientais. Sendo a geomembrana um material constituído de polímeros, a sua degradação é evidenciada pela análise em dimensões microscópicas das quebras das ligações químicas das macromoléculas. Nesse sentido, após os ensaios de envelhecimento das geomembranas, algumas propriedades como perda de resistência do material, rigidez e deformação são analisados por meio de ensaios em laboratório de microscopia eletrônica de varredura (MEV). O resultado apresenta a modificação da microestrutura das geomembranas dos ensaios de durabilidade nas mesmas condições de campo e daquelas amostras exumadas diretamente na barragem, por meio da detecção de cavidades, fissuras e deformações desenvolvidas no material pela perda de massa em função do tempo de envelhecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de Rejeitos, Geomembrana, Durabilidade, Envelhecimento.

1 INTRODUÇÃO

Por causa de uma maior consciência sobre a necessidade de preservar o meio ambiente e reduzir os impactos sobre ele, a disposição dos resíduos e rejeitos de forma apropriada é essencial na sociedade moderna. O uso de geomembranas para impermeabilização em barragens de rejeito cresceu consideravelmente, devido à sua eficiência comprovada em diversas

obras de engenharia e dificuldade de obtenção de materiais naturais.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na norma NBR ISO 10.318 (ABNT, 2013) define a geomembrana como um material bidimensional, de baixa permeabilidade, composto majoritariamente por asfaltos, elastômeros ou plastômeros, utilizado para controle de fluxo e separação. As geomembranas podem ser lisas ou texturizadas (GMT), estas últimas possuem acabamento

superficial rugoso com a função de aumentar as características de atrito de interface.

As geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) são compostas de polietileno, polímero mais usado na fabricação de geomembranas (Koerner, 2005), e fabricadas por meio de um processo de extrusão. O resultado é um plástico termoplástico, que é mais maleável e suscetível ao amolecimento quando submetido a temperaturas mais elevadas sem que ocorra a decomposição generalizada. As geomembranas de PEAD são as mais utilizadas em aterros devido à resistência química, mecânica e durabilidade, além de permitir soldas resistentes do ponto de vista hidráulico e mecânico (Lopes, 2006 apud Rebelo, 2009).

O uso de geomembranas para impermeabilização em barragens de rejeito cresceu consideravelmente, devido a sua eficiência comprovada em diversas obras de engenharia e dificuldade de obtenção de materiais naturais. Além disso, podem ser citadas outras vantagens como: facilidade de instalação de geossintéticos, com consequente redução do tempo para execução das obras; as camadas apresentam pequena espessura, ocupando pouco espaço na área de disposição em contraste com camadas de argila compactada; o controle de qualidade na fabricação das geomembranas garante maior confiabilidade nas suas propriedades e características relevantes para este tipo de aplicação; e coeficientes de permeabilidade elevados, sendo que nas geomembranas eles variam tipicamente entre 10^{-11} e 10^{-13} cm/s (Koerner, 1998 apud Gardoni, 2015).

Sampaio (2013) analisou as propriedades físicas e mecânicas de geossintéticos virgens e após a realização de ensaios de degradação química por 8 meses. Geomembranas e geotêxteis foram imersos no fluido da Barragem de Jacobina (BA), sob temperatura de 40 °C e emissão de raios ultravioleta, a fim de se reproduzir as condições reais de campo no laboratório. Analisou-se também amostras exumadas da obra real (Barragem de Jacobina), o que juntamente com os ensaios de durabilidade permitiram avaliar a degradação do geotêxtil e da geomembrana com base nos resultados das amostras virgens. Grande parte

das amostras após o ensaio de durabilidade apresentou deformação máxima na ruptura inferior às amostras virgens. As amostras com 8 meses de imersão no fluido apresentaram valores de resistência à tração máxima superiores aos obtidos para as amostras com um mês de imersão, e valores de deformação na ruptura menores. Em geral, as amostras submetidas ao ensaio de durabilidade apresentaram resistência à tração residual inferior aos valores obtidos para as amostras virgens e exumadas, provavelmente, devido às condições de laboratório serem são mais críticas do que as de campo.

Gardoni (2015) analisou amostras envelhecidas em laboratório e amostras exumadas nas barragens de rejeito. Aquelas envelhecidas por meio de ensaios de durabilidade sob ação de radiação ultravioleta, radiação infravermelha e imersão em fluido cianetado apresentaram processo de degradação similar às exumadas. Os resultados apontados foram mais próximos do que usando os recursos de envelhecimento em câmara úmida, demonstrando que a condição de laboratório reproduziu melhor às de campo.

Este artigo estuda a durabilidade de geomembranas PEAD usadas como barreiras de impermeabilização em rejeitos de mineração de ouro. No processo de separação e extração de ouro, são produzidos resíduos que dispostos em barramentos impermeabilizados com geomembranas.

A fim de investigar o desempenho de geossintéticos em barragens de rejeitos, ensaios de laboratório que simulam as condições de campo, foram realizados. As geomembranas foram envelhecidas em fluido contendo cianeto proveniente de uma barragem de rejeito sob temperatura e exposição a raios ultravioleta em condições similares às de campo.

2 O USO DE GEOMEMBRANAS NA MINERAÇÃO

A mineração é uma atividade econômica de grande importância para muitos países no mundo e é considerada uma das maiores produtoras de resíduos sólidos do planeta.

Geossintéticos emergem como um novo material com função de barreira de fluxo de uso

necessário na mineração devido à escassez de depósitos adequados e econômicos de solo argiloso. A sua utilização tem a vantagem de uma maior eficiência devido ao seu baixo valor de coeficiente de permeabilidade, ao controle de qualidade do produto, a facilidade de colocação na obra e a elevada resistência química e mecânica. As geomembranas têm sido utilizadas desde 1970 como material de vedação para lagoas de evaporação, lixiviação e contenção de rejeitos. Estas barreiras são concebidas para proteção ambiental e, apresentam alta eficiência de impermeabilização.

3 BARRAGEM DE REJEITO DE OURO

A barragem de rejeito de ouro que é caso de obra do presente estudo é a barragem de Jacobina, de propriedade da Jacobina Mineração e está localizada no riacho Santo Antônio, na cidade de Jacobina (BA), a cerca de 330 km da cidade de Salvador. A barragem, com dique de partida concluído em maio de 2010, está sendo construída em sete etapas, com alteamento para jusante. Ela possui capacidade para o processamento de aproximadamente 2,4 milhões de t / ano de minério de ouro, com uma potência média de 6.500 t / dia. A capacidade final de armazenamento do reservatório será de aproximadamente 27.000.000m³.

Para evitar a contaminação do solo e de águas subterrâneas, o reservatório, a fundação e talude de montante foram impermeabilizados com geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espessura, texturizada em um dos lados. A Figura 1 apresenta a visão geral da barragem Jacobina na primeira fase de construção.



Figura 1. Vista geral da barragem de Jacobina no primeiro alteamento (Sampaio, 2013).

4 MATERIAIS

4.1 Geomembrana

Foram utilizadas geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) com espessura fornecida pelo fabricante de 1,5mm e texturizada em uma das faces, assim como executado na obra da barragem Jacobina.

A Tabela 1 indica as características fornecidas pelo fabricante da geomembrana.

Tabela 1. Propriedades da Geomembrana.

P.F	t _{GT} (mm)	RT (kN/m)	RR (N)	e (%)
Plana	1,5	16	187	100

Nota: P.F.= processo de fabricação;

t_{GT}= espessura (ASTM D 5994);

RT= resistência à tração (ASTM D 6693);

RR= resistência ao rasgo (ASTM D 1004);

e= deformação na ruptura (ASTM D 6693).

4.2 Fluido da Barragem de Rejeitos

O processo de extração e beneficiamento do ouro é realizado por meio da adição de substâncias como o cianeto, componente de alta toxicidade. Analisou-se então, a constituição química do fluido da barragem, que se encontra em contato direto com a geomembrana de impermeabilização do aterro.

A Tabela 2 e as Figuras de 2 a 4 apresentam as variações de componentes químicos do fluido. Sendo apenas observadas variações de cobre, ferro e zinco no fluido. Os outros componentes apresentam as seguintes concentrações: alumínio < 5 ppm; arsênio < 0,5 ppm; cádmio < 0,02 ppm; chumbo < 0,5 ppm; cromo < 0,1 ppm; manganês < 0,5 ppm; níquel < 0,5 ppm. Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Análises Químicas do departamento de Engenharia Química da UFMG. As retiradas dos fluidos para análise coincidem com os prazos de 1 mês, 2 meses e 4 meses de ensaio.

Nas Figuras de 2 a 4, as colunas completas representam as concentrações dos metais no recipiente Branco e as colunas hachuradas representam os valores médios dos recipientes de 1 a 7 descritos no item 5.2 do presente artigo. Foi observado que a concentração dos metais caiu a cada retirada de amostras. Essa variação está relacionada com a precipitação por oxidação dos metais, tendo em vista que foi observada a cristalização de alguns sólidos nos recipientes. Para averiguar este fato estão em

andamento análises de Espectrometria de fluorescência de raios X e Difratometria de raios X, que irão identificar os elementos que estão presentes no precipitado e sua composição.

Tabela 2. Análise química de composição do fluido.

Recipiente - Branco			
Etapa	Cobre (ppm)	Ferro (ppm)	Zinco (ppm)
Retirada 1	0,34	0,5	0,5
Retirada 2	0,23	0,5	1,08
Retirada 3	0,11	0,18	0,05
Valores médios - Recipientes de 1 a 7			
Etapa	Cobre (ppm)	Ferro (ppm)	Zinco (ppm)
Retirada 1	0,31	0,78	0,50
Retirada 2	0,16	0,59	0,50
Retirada 3	0,12	0,27	0,07

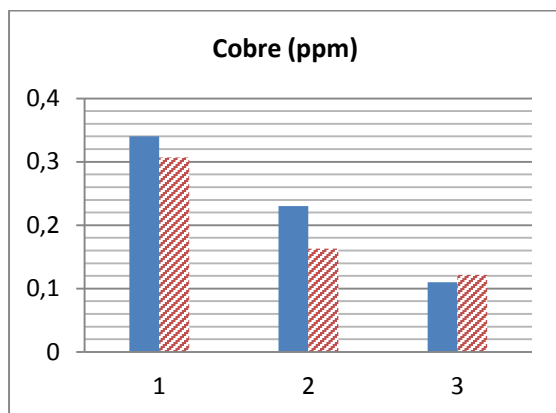


Figura 2. Concentração de cobre em cada retirada.

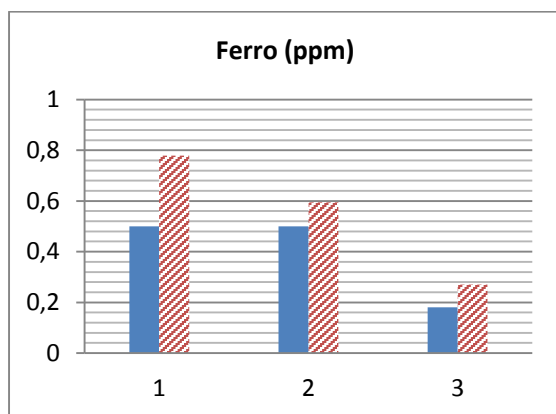


Figura 3. Concentração de ferro em cada retirada.

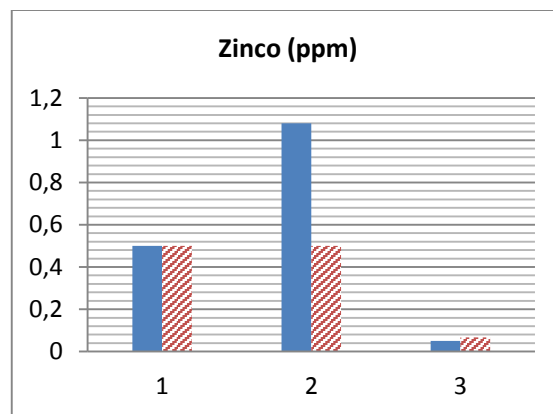


Figura 4. Concentração de zinco em cada retirada.

5 METODOLOGIA DE ENSAIOS

5.1 Ensaios de caracterização

Os ensaios de caracterização foram aplicados a corpos de prova da geomembrana de PEAD de 10 centímetros de largura por 20 centímetros de espessura. Foi realizada uma análise estatística, para selecionar amostras que apresentem características como, gramatura, espessura e densidade, semelhantes.

5.1.1 Gramatura (m)

O ensaio para determinação de gramatura foi realizado conforme prescrições da norma ASTM D5261 (2010). Utilizou-se uma balança digital Marte AS5500C com precisão de 0,01g e um paquímetro digital, para respectiva aferição da massa e dimensões de cada amostra. A partir dos dados encontrados a gramatura (em g/cm²) de cada amostra é calculada pela razão entre massa e área.

5.1.2 Espessura (t_{GT})

O ensaio para determinação da espessura foi realizado conforme a norma ASTM D5199 (2012). O procedimento consiste em colocar a geomembrana com a parte texturizada voltada para cima, ajustando-se os pinos do equipamento entre as elevações da geomembrana. A medida da espessura é feita na matriz plana da geomembrana, depois de 5 segundos de apoio. A Figura 5 ilustra o procedimento descrito.



Figura 5. Ensaio de Espessura da Geomembrana Texturizada.

5.1.3 Densidade

A metodologia de ensaio para determinação da densidade das geomembranas segue a norma os princípios propostos pelo método de Arquimedes, o qual correlaciona as forças peso e empuxo em fluido de densidade conhecida. Seguindo as prescrições da norma ASTM D792 (2013), utilizou-se uma balança Solotest AS5000C, precisão de 0.1g, uma haste e uma gaiola metálica adaptadas. O cálculo da densidade é realizado pela utilização da seguinte expressão:

$$\rho_{GM} = \frac{P}{(P - E)} \quad (1)$$

Onde,

ρ_{GM} = densidade da Geomembrana;

P = Peso da Geomembrana;

E = Empuxo causado pela Geomembrana.

A Figura 6 ilustra o ensaio de determinação de densidade.



Figura 6. Ensaio de determinação da densidade.

5.2 Envelhecimento das Geomembranas

O ensaio de durabilidade seguiu as prescrições e orientações das normas ASTM D5322 (2009), D5496 (2009) e D5747 (2008). O ensaio tem por objetivo o envelhecimento das geomembranas submetidas às condições mais próximas possíveis daquelas em que elas se encontram na barragem de mineração de ouro, por meio de dispositivos que submetem o material à temperatura em torno de 40°C, irradiação ultravioleta e contato com o fluido altamente cianetado.

Posteriormente aos ensaios de caracterização, foram selecionadas 70 amostras de geomembrana que apresentaram características semelhantes entre si. Essas amostras foram identificadas e dispostas nos recipientes que continham o fluido, de acordo com a Figura 5. A semelhança entre as amostras usadas no ensaio é importante para minimizar erros devido à variação na espessura, gramatura ou densidade das amostras.

Os recipientes foram armazenados em uma caixa de dimensões 2,00 de largura, 2,20 de comprimento e 1,50m de altura, que foi vedada hermeticamente a fim de evitar interferências com o meio externo e simular de forma mais precisa as condições ambientais encontradas na barragem. Cada recipiente foi numerado, conforme Figura 7.

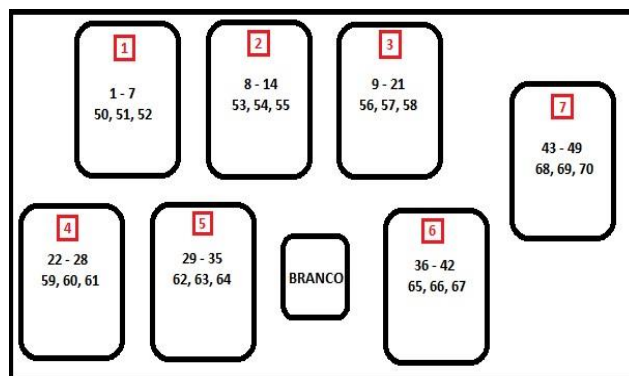


Figura 7. Disposição das amostras nos recipientes.

A Figura 8 apresenta a disposição dos equipamentos e materiais utilizados no ensaio de durabilidade.

As amostras de geomembrana foram retiradas dos recipientes nos intervalos de 1 mês, 2 meses e 4 meses. Foi retirada uma

amostra de cada caixa, totalizando sete amostras por retirada. Destas, cinco serão destinadas aos ensaios de tração, que estão em andamento, uma amostra para os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e uma amostra extra. Os resultados do MEV de cada retirada serão comparados entre si, identificando o grau de degradação de cada amostra. A degradação das amostras está diretamente ligada com a durabilidade das geomembranas na barragem.

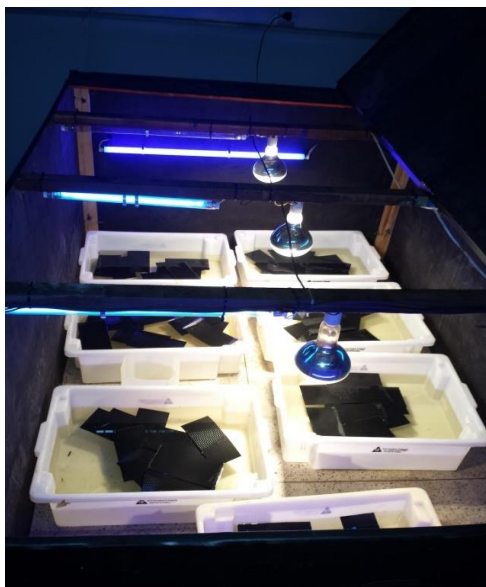


Figura 8. Envelhecimento das geomembranas em laboratório.

5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento que utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional.

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) tem como funcionalidade análise microestrutural de materiais sólidos, mediante a apresentação de uma imagem tridimensional de alta resolução. Esse instrumento também fornece dados sobre a morfologia e identificação de elementos químicos da amostra. Portanto, o MEV é uma ferramenta importante na avaliação e observação da degradação dos materiais poliméricos, fornecendo uma imagem detalhada da estrutura (Nagatani et al., 1987 apud Santos, 2014).

A preparação das amostras e a análise de MEV foram realizadas pelo Centro de Microscopia da UFMG. As amostras foram

cortadas em pequenos espécimes (1x1cm) e fixadas com fita de carbono no suporte (stub) de cobre. A Figura 9 apresenta a disposição das amostras no stub, sendo V, 1, 2, 3 e E os símbolos utilizados para designar amostra virgem, amostra da primeira retirada (1 mês), amostra da segunda retirada (2 meses), amostra da terceira retirada (4 meses) e amostra exumada da barragem, respectivamente.

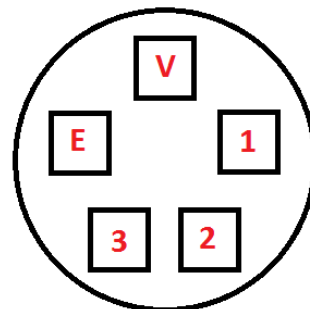


Figura 9. Disposição das amostras no stub.

O microscópio usado no presente estudo foi o Microscópio Eletrônico de Varredura FEG (Quanta 200 FEI). A resolução das imagens varia de 12 a 1000000 vezes em alto e baixo vácuo.

6 RESULTADOS

6.1 Ensaios de caracterização

Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de caracterização para as amostras submetidas ao processo de envelhecimento estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores obtidos nos ensaios de caracterização das amostras envelhecidas

Amostras	Gramatura (g/cm ²)	Espessura (mm)	Densidade (g/cm ³)
R.1	0,1420	1,58	0,950
R.2	0,1476	1,63	0,949
R.3	0,1461	1,69	0,948

Nota: R.1= amostra envelhecida de 1 mês;
R.2= amostra envelhecida de 2 meses;
R.3= amostra envelhecida de 4 meses.

6.2 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises foram realizadas em amostras

submetidas ao ensaio de envelhecimento pelos períodos de 1 mês, 2 meses e 4 meses, identificadas como AMR1, AMR2, AMR3, respectivamente. Também foram analisadas uma amostra virgem, ou seja, que não esteve em contato com o fluido, e uma amostra exumada da barragem de rejeitos de Jacobina (AMEX). Todas as análises foram realizadas no lado liso da geomembrana, que coincide com o lado que está exposto ao fluido cianetado na barragem.

As Figuras de 10 a 14 apresentam, as imagens das amostras virgem, primeira retirada (1 mês), segunda retirada (2 meses), terceira retirada (4 meses) e a exumada (5 anos), respectivamente.

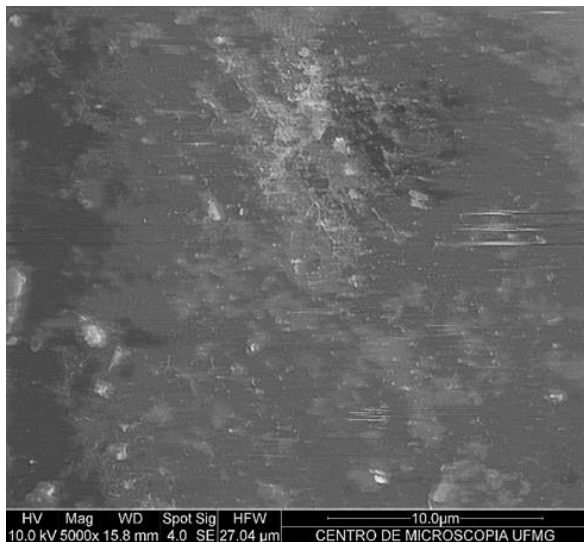


Figura 10. Amostra virgem.

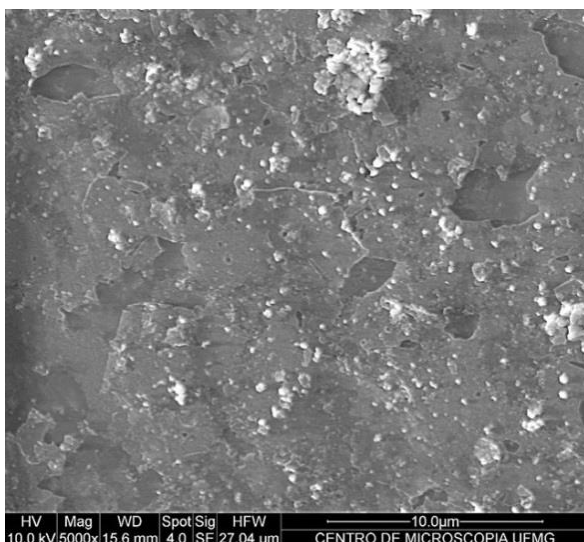


Figura 11. Amostra AMR1 – 1 mês.

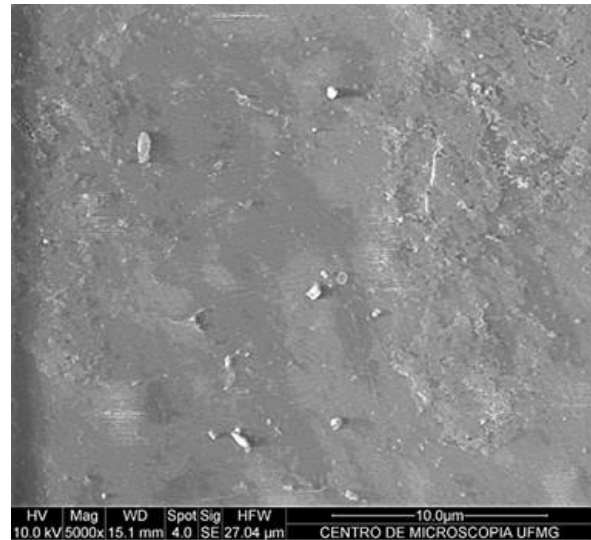


Figura 12. Amostra AMR2 – 2 meses.

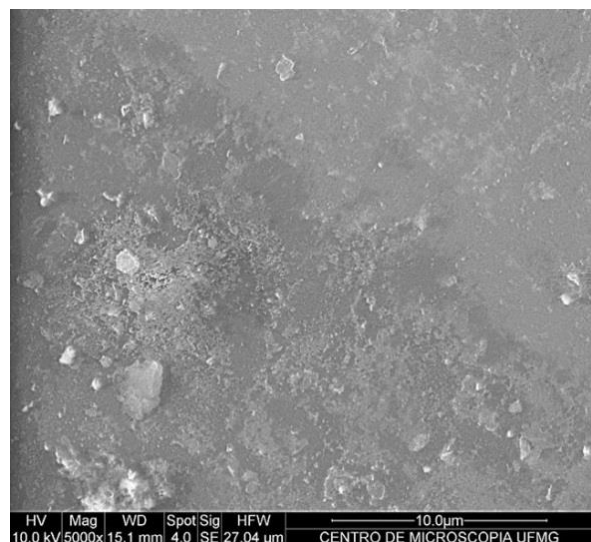


Figura 13. Amostra AMR3 – 4 meses.

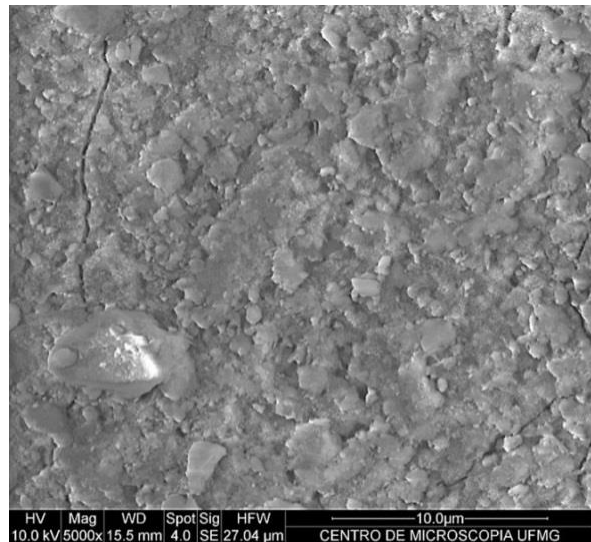


Figura 14. Amostra AMEX – 5 anos.

Observando as imagens obtidas do MEV foi possível notar que a amostra exumada apresenta-se degradada, mostrando rugosidade elevada se comparada com a amostra virgem. A amostra da primeira retirada apresentou-se praticamente intacta, com quase nenhum comprometimento em relação a amostra da segunda e terceira retiradas e da amostra virgem.

7 CONCLUSÃO

O estudo da durabilidade de geomembranas é relevante para a determinação dos parâmetros de projeto necessários para garantir a confiabilidade do emprego do material e a segurança de seu uso, principalmente em obras de grande responsabilidade que requerem longa vida útil.

Os resultados obtidos até o presente momento nos ensaios de durabilidade das geomembranas, mostram que o material possui boa resistência às condições críticas encontradas em barragens de rejeito de ouro. As análises da geomembrana por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostraram uma degradação inicial das amostras retiradas dos ensaios realizados em laboratório para o período de 4 meses, porém sem um maior comprometimento da estrutura polimérica. A amostra exumada após cinco anos de vida útil apresentou nível de degradação mais acentuado, mas ainda sem comprometimento aos parâmetros especificados comparativo ao material novo. Os ensaios de Resistência à Tração, Tempo de Indução Oxidativa (OIT) e a Microscopia de Força Atômica (AFM), que estão em andamento, devem confirmar as análises obtidas por meio do MEV.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Microscopia da UFMG, ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento da Pesquisa) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais). Eles agradecem ainda à Mineradora Yamana Gold e, à empresa Nortene pelos materiais e geossintéticos usados na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2003). NBR 12568: Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3 p.
- ASTM D6693 (2004). Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos.
- ASTM D5747 (2008) -Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geomembranes to Liquids. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos.
- ASTM D1004 (2009). Test Method for Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos.
- ASTM 5496 (2009). Standard Practice for In Field Immersion Testing of Geosynthetics. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos.
- ASTM D5322 (2009) Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos.
- ASTM D5261 (2010) - Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextile. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos.
- ASTM D5199 (2012). Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembranes. American Society for Testing and Materials, Estados Unidos.
- ASTM D792 (2013). Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, Estados Unidos.
- ABNT (2013). NBR ISO 10.318: Geossintéticos – Termos e definições. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 23 p.
- Gardoni, M. G. A. Desempenho de Longa Duração de Barreiras Poliméricas em Locais de Estocagem de Resíduos Contaminados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 8, 2015, Brasília – DF.
- Koerner, R. M. Designing with Geosynthetics. 5ª edição. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005. 796 p. ISBN: 0-13-145415-3.
- Rebelo, K. M. W. Avaliação de camadas de proteção para geomembranas de PVC e PEAD. 2009. 247 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Santos, L. S. dos. Estudo da durabilidade de geomembranas utilizadas na impermeabilização de reservatórios das barragens de rejeito de ouro. 2014. 160 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- Sampaio, Soraya Solatiel (2013) – Estudo do comportamento de barreiras poliméricas em sistemas de disposição de rejeito de minério de ouro, Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.