



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JAEDSON ALVES FERREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DE GEOMEMBRANAS TEXTURIZADAS DE
POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE POR ENSAIOS EM
ESPECTRÔMETRO DE INFRAVERMELHO**

BARREIRAS-BA

2025

JAEDSON ALVES FERREIRA

CARACTERIZAÇÃO DE GEOMEMBRANAS TEXTURIZADAS DE
POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE POR ENSAIOS EM
ESPECTRÔMETRO DE INFRAVERMELHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Oeste da Bahia, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: D.Sc. José Luiz Ernandes Dias
Filho

Coorientadora: D.Sc. Maria Alejandra Aparicio
Ardila

BARREIRAS-BA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

F383 Ferreira, Jaedson Alves.

Caracterização de geomembranas texturizadas de polietileno de alta densidade por ensaios em espectrômetro de infravermelho. / Jaedson Alves Ferreira. – 2025.

90f.

Orientador: D.Sc. José Luiz Ernandes Dias Filho

Coorientadora: D.Sc. Maria Alejandra Aparicio Ardila.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, BA, 2025.

1. geomembranas; 2. infravermelho; 3. oxidação; 4. durabilidade; 5. geossintéticos. I. Dias Filho, José Luiz Ernandes. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 624

JAEDSON ALVES FERREIRA

CARACTERIZAÇÃO DE GEOMEMBRANAS TEXTURIZADAS DE
POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE POR ENSAIOS EM
ESPECTRÔMETRO DE INFRAVERMELHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Oeste da Bahia, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 28 / 11 / 2025

Banca Examinadora:

Prof. D.Sc José Luiz Ernandes Dias Filho (Orientador)
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Eng.^a D.Sc Maria Alejandra Aparicio Ardila (Coorientadora)

Prof. D.Sc Marcelo Kobelnik (Avaliador)
Universidade Estadual Paulista

Prof. D.Sc Sérgio Macedo Soares (Avaliador)
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Aos meus queridos pais, que não mediram esforços por mim.

AGRADECIMENTOS

Sou imensamente grato aos meus pais, Elson e Joana, por sempre acreditarem e me apoiarem.

Ao meu companheiro Lucas pelo carinho e apoio durante todo esse processo.

Ao meu orientador Prof. José Luiz, pela orientação, pelos ensinamentos transmitidos com sabedoria e, acima de tudo, pela amizade.

À minha coorientadora Engenheira Maria Alejandra, pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos e por ceder as amostras utilizadas neste trabalho, contribuindo de forma essencial para sua realização.

Aos professores Marcelo e Sérgio, agradeço pela disponibilidade em compor a banca examinadora e pelas valiosas contribuições para este trabalho. Agradeço, ainda, ao professor Sérgio pelo suporte adicional nos ensaios.

Aos amigos que o curso de Engenharia me trouxe, Tallita, Priscila, Jefferson, Luane e Daví, que mesmo distantes sempre estiveram em meus pensamentos.

Ao Engenheiro Lucas e a toda a equipe da Meridian Construtora pelos ensinamentos práticos e pela compreensão durante esta fase final da graduação.

Ao Laboratório de Química pela disponibilização dos equipamentos necessários à execução deste trabalho.

Ao Centro Multiusuário de Análises e ao professor Dennis pelo suporte e utilização do microscópio eletrônico de varredura.

E, por fim, à Pró-Reitoria de Ações Afirmativas e Assistência Estudantil (PROAE) pelo apoio fundamental durante a minha trajetória acadêmica.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação da durabilidade de geomembranas texturizadas de polietileno de alta densidade. O estudo inclui amostras de referência (virgens), amostras submetidas ao intemperismo natural, envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta e amostras exumadas de campo. As análises foram realizadas por ensaios em espectrômetro de infravermelho por transformada de Fourier em modo de reflectância total atenuada auxiliado por microscopia eletrônica de varredura em alguns casos, permitindo identificar alterações químicas relacionadas à oxidação e modificações estruturais no polímero. Para cada material foram avaliadas bandas associadas a grupos carbonila, hidroxila e deformações características do polietileno, relacionando-se a formação desses grupos com o avanço da degradação. Os resultados demonstraram que o comportamento das geomembranas é influenciado significativamente pela cor, processo de fabricação e das condições de exposição. As geomembranas pretas apresentaram maior estabilidade química sob radiação ultravioleta, atribuída à presença de negro de fumo, enquanto geomembranas coloridas exibiram maior suscetibilidade à oxidação. Nas amostras exumadas, identificaram-se diferentes graus de degradação conforme o tipo de obra, destacando maior estabilidade das porções enterradas e maior degradação em superfícies expostas. A análise indica que a combinação de espectroscopia no infravermelho e avaliação sistemática das bandas funcionais permite monitorar a evolução da oxidação em geomembranas de polietileno de alta densidade. Os resultados reforçam a necessidade de considerar variáveis de fabricação, exposição e histórico de serviço na avaliação da vida útil desses materiais em aplicações geotécnicas.

Palavras-chave: geomembranas; infravermelho; oxidação; durabilidade; geossintéticos.

ABSTRACT

This study presents an evaluation of the durability of textured high-density polyethylene geomembranes. The analysis includes reference (virgin) samples, samples subjected to natural weathering, accelerated ultraviolet radiation aging, and field-exhumed specimens. The characterization was carried out using Fourier Transform Infrared spectroscopy in attenuated total reflectance mode, aided by scanning electron microscopy in some cases, allowing the identification of chemical changes related to oxidation and structural modifications in the polymer. For each material, bands associated with carbonyl, hydroxyl, and characteristic polyethylene deformations were examined, relating the formation of these functional groups to the progression of degradation. The results demonstrated that geomembrane behavior is significantly influenced by color, manufacturing process, and exposure conditions. Black geomembranes exhibited higher chemical stability under ultraviolet radiation, attributed to the presence of carbon black, while colored geomembranes showed greater susceptibility to oxidation. Among the exhumed samples, different degrees of degradation were identified depending on the application context, with greater stability observed in buried portions and more pronounced degradation on exposed surfaces. The analysis indicates that the combination of infrared spectroscopy and systematic evaluation of functional bands is a consistent methodology for monitoring the evolution of oxidation in high-density polyethylene geomembranes. The findings reinforce the need to consider manufacturing variables, exposure conditions, and service history when assessing the service life of these materials in geotechnical applications.

Keywords: geomembranes; infrared; oxidation; durability; geosynthetics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Geotêxtil tecido e geotêxtil não tecido.....	11
Figura 2 – Geogrelha	12
Figura 3 – Georrede.....	13
Figura 4 - Geocompósito formado com geoespaçador e geotêxtil não tecido.....	14
Figura 5 - Geocompósito formado com geotêxtil não tecido e georrede	14
Figura 6 – Geomembrana de diferentes cores	15
Figura 7 - Processo de extrusão matriz plana	16
Figura 8 - Processo de extrusão matriz balão	18
Figura 9 - Esquema do painel de intemperismo e detalhes das amostras.....	27
Figura 10 - Espectrômetro de FTIR acoplado ao módulo ATR	30
Figura 11 - Espectros de infravermelho de polietileno virgem e exposto à radiação UV	30
Figura 12 - Espectro infravermelho de PEAD	32
Figura 13 - Preparação das amostras para a MEV	34
Figura 14 - Espectros infravermelho de geomembrana PEAD verde	35
Figura 15 - Espectro infravermelho de geomembrana PEAD preta/branca	36
Figura 16 - Micrografias de MEV da geomembrana preta/branca virgem (a) e degradada (b)	37
Figura 17 - Espectro infravermelho de geomembrana PEAD preta.....	38
Figura 18 - Espectro infravermelho de geomembrana PEAD verde antes e após envelhecimento em câmara UV.....	40
Figura 19 - Espectro infravermelho de geomembrana PEAD preta antes e após envelhecimento em câmara UV.....	41
Figura 20 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana PEAD preta/branca antes e após envelhecimento em câmara UV	42
Figura 21 - Espectro infravermelho de geomembrana texturizada PEAD fabricada por extrusão plana antes e após envelhecimento em câmara UV	43
Figura 22 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana texturizada PEAD fabricada por extrusão plana antes e após envelhecimento em câmara UV	44
Figura 23 - Espectro infravermelho de geomembrana texturizada PEAD fabricada por extrusão balão antes e após envelhecimento em câmara UV	45
Figura 24 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana texturizada PEAD fabricada por extrusão balão antes e após envelhecimento em câmara UV.....	46

Figura 25 - Espectro infravermelho de geomembrana texturizada PEAD antes e após aplicada em aterro de SP.....	47
Figura 26 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana texturizada PEAD antes e após aplicada em aterro de São Paulo	48
Figura 27 - Micrografias de MEV da borda lisa de geomembrana antes (a) e após aplicada em aterro em SP (b).....	49
Figura 28 - Espectro infravermelho de geomembrana texturizada PEAD antes e após aplicada em aterro do RJ.....	50
Figura 29 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana texturizada PEAD antes e após aplicada em aterro do Rio de Janeiro	51
Figura 30 - Espectro infravermelho de geomembranas PEAD aplicadas em barragem de rejeito.....	53
Figura 31 - Micrografias de MEV da geomembrana texturizada aplicada no fundo da barragem (a), no talude (b) e a borda lisa aplicada no talude (c)	54
Figura A.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD verde virgem.....	65
Figura A.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD verde degradada.....	65
Figura A.3 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta/branca virgem	66
Figura A.4 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta/branca degradada	66
Figura A.5 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta virgem.....	67
Figura A.6 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta degradada.....	67
Figura B.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD verde exposta por 500 h.....	68
Figura B.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD verde exposta por 1000 h.....	68
Figura B.3 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta exposta por 500 h.....	69
Figura B.4 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta exposta por 2000 h.....	69
Figura B.5 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta/branca exposta por 500 h	70
Figura B.6 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta/branca exposta por 1000 h	70
Figura C.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada virgem fabricada por extrusão plana.....	71
Figura C.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão plana exposta por 500 h	71
Figura C.3 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão plana exposta por 1000 h	72

Figura C.4 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão plana exposta por 2000 h	72
Figura C.5 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa da geomembrana PEAD virgem fabricada por extrusão plana.....	73
Figura C.6 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa da geomembrana PEAD fabricada por extrusão plana exposta por 2000 h	73
Figura C.7 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada virgem fabricada por extrusão balão.....	74
Figura C.8 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão balão exposta por 500 h	74
Figura C.9 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão balão exposta por 1000 h	75
Figura C.10 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão balão exposta por 2000 h	75
Figura C.11 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa da geomembrana PEAD virgem fabricada por extrusão balão	76
Figura C.12 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa da geomembrana PEAD fabricada por extrusão balão exposta por 2000 h	76
Figura D.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada virgem aplicada em aterro sanitário de SP.....	77
Figura D.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada degradada aplicada em aterro sanitário de SP.....	77
Figura D.3 – Espectros das triplicatas da porção borda lisa de geomembrana PEAD virgem aplicada em aterro sanitário de SP.....	78
Figura D.4 – Espectros das triplicatas da porção borda lisa de geomembrana PEAD degradada aplicada em aterro sanitário de SP.....	78
Figura D.5 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada degradada aplicada em aterro sanitário do RJ.....	79
Figura D.6 – Espectros das triplicatas da porção borda lisa de geomembrana PEAD degradada aplicada em aterro sanitário do RJ.....	79
Figura E.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada aplicada em fundo de barragem	80
Figura E.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada aplicada em talude	80

Figura E.3 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa de geomembrana PEAD aplicada em talude 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das geomembranas PEAD lisas	20
Tabela 2 - Propriedades das geomembranas PEAD texturizadas.....	20
Tabela 3 - Regiões espectrais do infravermelho.....	23
Tabela 4 - Características das geomembranas texturizadas PEAD sob intemperismo natural	27
Tabela 5 - Características das geomembranas PEAD coloridas sob exposição em câmara UV	28
Tabela 6 - Características das geomembranas PEAD conforme tipo de fabricação, superfície e sob exposição em câmara UV	28
Tabela 7 - Características das geomembranas PEAD exumadas de aterros.....	29
Tabela 8 - Características das geomembranas PEAD exumadas de barragem de rejeito.....	29
Tabela 9 - EDS das geomembranas preta/branca virgem e degradada.....	38
Tabela 10 - EDS das geomembranas virgem e degradada após aplicação em aterro.....	50
Tabela 11 - EDS das geomembranas aplicadas em barragem de rejeito	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATR	Reflexão Total Atenuada
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
FTIR	Transformada de Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIR	Infravermelho Médio
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
1.2 OBJETIVO GERAL	9
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 GEOSINTÉTICOS	10
2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE GEOMEMBRANAS	16
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS QUANTO À SUPERFÍCIE.....	18
2.4 INFLUÊNCIA DA COLORAÇÃO	20
2.5 DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS.....	22
2.6 ESPECTROMETRIA POR INFRAVERMELHO	22
2.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 GEOMEMBRANAS	26
3.1.1 GEOMEMBRANAS SUBMETIDAS AO INTEMPERISMO NATURAL.....	26
3.1.2 GEOMEMBRANAS EXPOSTAS À RADIAÇÃO UV EM CÂMARA DE ENVELHECIMENTO	27
3.1.3 GEOMEMBRANAS PELO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	28
3.1.4 GEOMEMBRANAS EXUMADAS DE ATERROS SANITÁRIOS	29
3.1.5 GEOMEMBRANAS EXUMADAS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	29
3.2 EQUIPAMENTO	29
3.3 AQUISIÇÃO DOS ESPECTROS DAS AMOSTRAS	31
3.4 ANÁLISE DOS DADOS.....	32
3.4.1 ESPECTRO DE REFERÊNCIA.....	32
4. RESULTADOS	35
4.1 GEOMEMBRANAS SUBMETIDAS AO INTEMPERISMO NATURAL.....	35
4.2. GEOMEMBRANAS EXPOSTAS À RADIAÇÃO UV EM CÂMARA DE ENVELHECIMENTO	39
4.3. GEOMEMBRANAS PELO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	43
4.4. GEOMEMBRANAS EXUMADAS DE ATERROS SANITÁRIOS	47

4.5. GEOMEMBRANAS EXUMADAS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	52
5. CONCLUSÃO.....	56
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	58
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICE A	65
APÊNDICE B.....	68
APÊNDICE C	71
APÊNDICE D	77
APÊNDICE E.....	80

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir da década de setenta, de acordo com Vertematti (2015), os geossintéticos começaram a ser estudados e utilizados no Brasil em obras de engenharia civil, seguindo a tendência de outros países. Esses materiais poliméricos foram inicialmente empregados em obras hidráulicas e de estabilização de solo, porém seu uso foi progressivamente expandido para aplicações mais complexas, sobretudo as geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), em sistemas de barreiras de aterros sanitários, aplicações em contenções e em reservatórios de água.

Por criar um ambiente que dificulta a passagem de líquidos e gases, Pires e Silva (2025) afirmam que a geomembrana é o principal geossintético em obras de proteção ambiental, criando uma barreira para evitar a contaminação do solo e de águas subterrâneas. Entre os principais benefícios proporcionados por esse material, além da contribuição para a sustentabilidade ambiental, destaca-se a redução de custos de operação e o aumento da durabilidade das estruturas.

Considerando o uso cada vez mais frequente de geomembranas, há um maior interesse em entender a vida útil desse material a partir da sua exposição a condições ambientais adversas (Santos, 2014). Aparicio-Ardila *et al.* (2025) realizaram análises que indicam que esses materiais podem apresentar alterações ao longo do tempo. Concomitante a isso, Pires e Silva (2025) vão além e relatam que a durabilidade das geomembranas, capacidade do material de manter suas propriedades durante sua vida útil, pode ser comprometida através da exposição a raios ultravioleta, mudanças de umidade e temperatura e interações químicas.

Embora as geomembranas de polietileno possam degradar por diferentes mecanismos, a oxidação é amplamente reconhecida como o fator que mais compromete sua durabilidade (Hawkins, 1984; Aparicio-Ardila, 2025; Lopes e Lopes, 2010). Quando ocorre oxidação, há ruptura das cadeias poliméricas, o que reduz o peso molecular do material, tornando-o mais frágil e suscetível ao aparecimento de rachaduras por tensofissuramento (stress-cracking) (Tisinger e Giroud, 1993). Hsuan e Koerner (1995, *apud* Sangam e Rowe, 2002) definem três estágios para a ocorrência da degradação oxidativa: o estágio I ocorre com a depleção de antioxidantes, o estágio II é determinado pelo início da degradação e o estágio III ocorre degradação até a falha.

Entender as alterações que a geomembrana PEAD pode sofrer ao longo do tempo sob determinadas condições é fundamental para a utilização eficaz desse geossintético em vista de

evitar inviabilização de construções e até mesmo o colapso (Dias Filho e Silva, 2025). Fatores como a exposição à radiação ultravioleta, presença de pigmentos ou outros aditivos, presença de agentes agressivos e da textura superficial podem influenciar diretamente as propriedades físicas e estruturais das geomembranas ao longo dos anos. Dessa forma, avaliar a durabilidade e o desempenho é um aspecto crítico no dimensionamento e na sua especificação para o dimensionamento de projetos onde são utilizadas em vista de garantir a integridade funcional e a segurança das obras.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a durabilidade de geomembranas texturizadas de PEAD submetidas à degradação natural e acelerada, por meio de análises em espectrômetro de infravermelho.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar os efeitos da degradação das geomembranas texturizadas de PEAD em função:

- do tipo de envelhecimento (em campo e acelerado em laboratório);
- da coloração superficial do material;
- do processo de fabricação (extrusão por balão e extrusão plana);
- do tipo de aplicação (aterros sanitários e obras de mineração);
- da textura superficial (texturizada e borda lisa).

Também foi objetivo complementar as investigações, por meio de microscopia eletrônica de varredura, as alterações morfológicas superficiais das geomembranas que apresentaram as maiores variações espectrais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão dos principais tópicos relacionados ao tema deste trabalho, com foco nas geomembranas e suas características técnicas. Inicialmente, é abordado o conceito de geossintéticos, com destaque nas suas funções e aplicações dentro da engenharia civil. Em seguida, são mencionados os principais processos de fabricação de geomembranas, destacando os métodos que influenciam suas propriedades. Na sequência, é feita uma revisão dos tipos de superfícies de geomembranas, considerando suas aplicações específicas. Um tópico específico é dedicado à influência da coloração das geomembranas em relação à durabilidade e resistência à radiação ultravioleta. Por fim, é apresentada uma visão geral sobre microplásticos e o método de espectrômetro por infravermelho, utilizado para a caracterização e análise das geomembranas.

2.1 GEOSSINTÉTICOS

A Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS, 2025) define geossintéticos como materiais feitos de polímeros, sendo sintéticos ou naturais, que podem ter a forma de mantas, tiras ou estrutura tridimensional, utilizados em contato com o solo ou com rochas.

Lopes e Lopes (2010) classificam os grupos de materiais dos geossintéticos como matérias-primas naturais e químicas. As matérias-primas naturais podem ter origem vegetal (juta, algodão, linho e cânhamo), animal (lã e seda) e mineral (amianto), mas são raramente utilizadas por não possuírem propriedades adequadas e pelo carácter, em sua maioria, biodegradável. Por suas vezes, as matérias-primas químicas são divididas em orgânicas (polímeros naturais transformados) e inorgânicas (minerais). As autoras destacam ainda que o material mais utilizado para a produção dos geossintéticos são os materiais orgânicos sintéticos, comumente conhecidos como plásticos, derivados do petróleo.

A produção e a aplicação de forma sistemática deste material, segundo Lopes e Lopes (2010), se deram já a partir da década de 50 em sequência do desenvolvimento dos polímeros sintéticos na década de 40. Inicialmente, os geossintéticos eram em suma geotêxteis e surgiram a partir da necessidade de reduzir impactos ambientais e de utilizar solos considerados inadequados. Ao longo das décadas seguintes, o avanço das técnicas de extrusão e polimerização, aliado à necessidade de soluções mais eficientes e duráveis, possibilitou o surgimento de novos tipos de geossintéticos.

Embora as propriedades dos geossintéticos estejam ligadas ao tipo de polímero utilizado, a forma mais adequada de classificá-los deve levar em conta suas diferenças estruturais e os métodos de fabricação empregados (Silva, 2016). De acordo com Carneiro

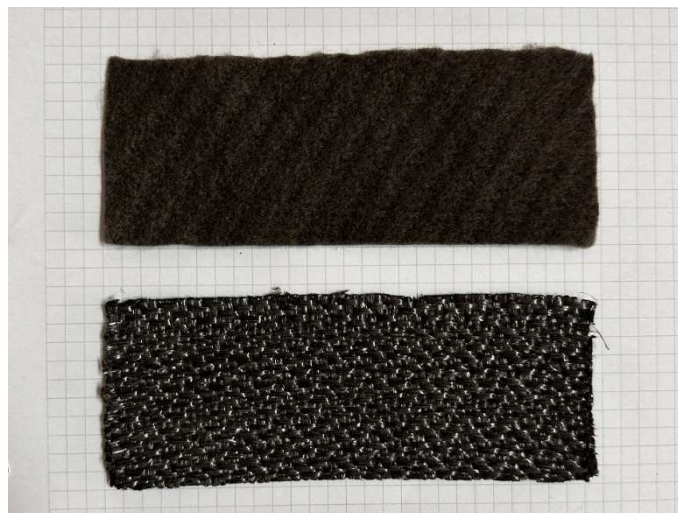
(2009), os geossintéticos são classificados como geotêxteis (tecidos, não-tecidos e tricitado), produtos correlatados (geogrelhas, georredes, geocompósitos e geo-outros) e geomembranas.

A escolha do tipo de geossintético a ser utilizado deve levar em consideração as características da obra e os objetivos que se desejam alcançar. Essa seleção irá depender, principalmente, da função que o material irá possuir na obra, seja de filtração, separação, reforço, impermeabilização, drenagem ou outro. Além disso, características como o tipo de solo que será trabalhado, as cargas atuantes, degradação do material devido à agressividade do ambiente e a durabilidade desejada para a estrutura são relevantes. Dessa forma, a escolha do tipo de geossintético está diretamente relacionado às demandas específicas da obra.

Geotêxteis

Os geotêxteis (**Figura 1**) são materiais planos e flexíveis, muito utilizados para proteção, reforço, separação, filtragem ou drenagem. Segundo Pires e Silva (2025), este geossintético possui a função principal de separar diferentes camadas de solo, evitando que elas se misturem, ao mesmo tempo que permite a passagem de água, como um filtro. De acordo com o método de produção, esse geossintético pode ser dividido em dois tipos, designados como tecidos, não-tecidos e tricotados.

Figura 1 – Geotêxtil tecido e geotêxtil não tecido



Fonte: Autor (2025)

Segundo Silva (2016), os geotêxteis do tipo tecidos são fabricados em processos de tecelagem através da utilização de teares mecânicos. Para isso, os componentes mais utilizados na produção das malhas são manufaturados a partir de polipropileno (PP), monofilamento em

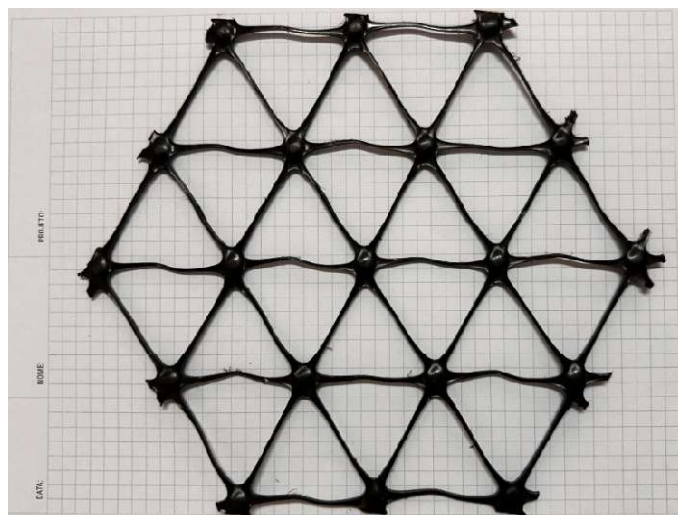
poliéster (PET) e de multifilamentos de polietileno (PE). Pela presença de fios perpendiculares e entrelaçados, sua aparência se caracteriza pelo formato em malha. De modo geral, possuem espessuras entre 0,5 e 2 mm.

Os geotêxteis não-tecidos, de acordo com Silva (2016), por sua vez, possuem sua malha formada através de ligação mecânica, que forma o material designado como não-tecido agulhado, térmica, que forma o material termicamente ligado, ou química, que forma o material ligado quimicamente. Os geotêxteis obtidos por esses três processos tendem a ter espessuras entre 0,5 e 5 mm.

Geogrelhas

Segundo Lopes e Lopes (2010), as geogrelhas podem ser definidas como malhas abertas formadas por estruturas poliméricas planas (**Figura 2**). De acordo com o método de produção, esse geossintético pode ser dividido em três tipos, designados como extrudadas, tecidas ou soldadas a laser. A geogrelha extrudada é produzida a partir de folhas de polímero, em duas ou três fases de produção; a geogrelha tecida advém da união de centenas de fibras, visando à obtenção de barras longitudinais; e a geogrelha soldada a laser, por sua vez, é fabricada com a união de barras de PET ou PP, por fusão a laser.

Figura 2 – Geogrelha



Fonte: Autor (2025)

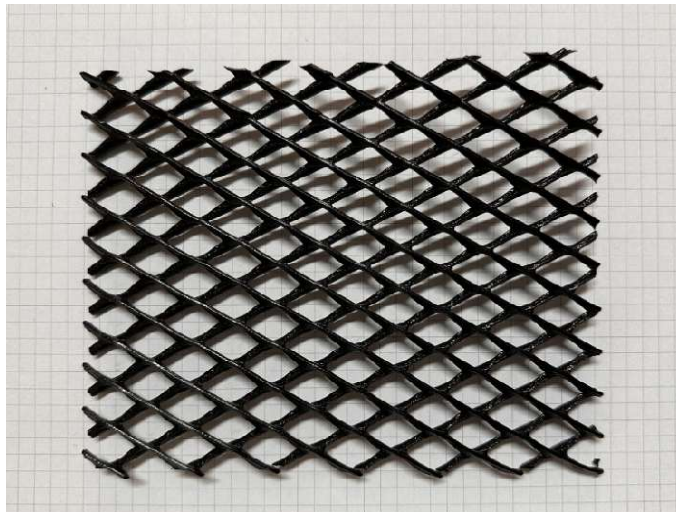
De acordo com Carneiro (2009), as geogrelhas podem ser aplicadas em diversas áreas, porém são mais comumente utilizadas como reforços. Em taludes, por exemplo, esse geossintético pode ser inserido nas camadas de solo, a fim de obter maior resistência ao

cisalhamento e controlar as deformações. Já para fundações com solos moles ou de baixa capacidade de suporte, as geogrelhas permitem maior estabilidade do solo, ao aumentar sua resistência e possibilitar a redistribuição das cargas, o que viabiliza, por exemplo, a construção de estradas em solos considerados inadequados (Pires e Silva, 2025).

Georredes

As georredes (**Figura 3**) são formadas a partir de materiais poliméricos planos e fabricadas por extrusão de polímero fundido (Silva, 2016). Este geossintético é constituído por duas séries de fios extrudados paralelos que se interceptam de forma constante, são muito utilizados para conduzir grandes vazões de fluidos por possuírem elevada porosidade ao longo do plano (Costa *et al.*, 2015). As georredes possuem uma estrutura aberta, que se assemelha às geogrelhas, porém, enquanto estas têm como função principal o reforço, as georredes são mais indicadas para a função de drenagem.

Figura 3 – Georrede

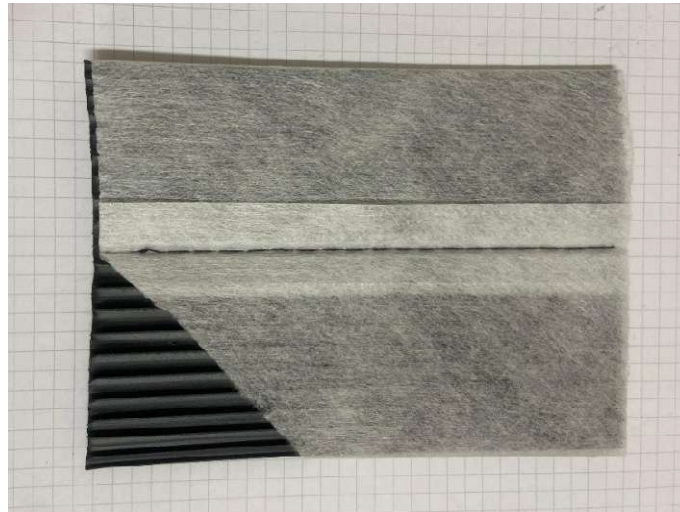


Fonte: Autor (2025)

Geocompósitos

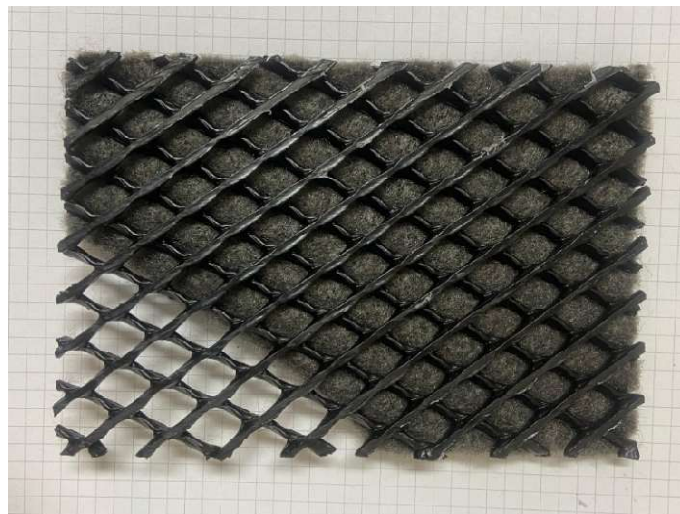
Em vista de combinar as melhores características na associação de diferentes materiais, em que ao menos um deles é um geossintético, surgem os geocompósitos (**Figura 4 e Figura 5**). A partir desse agrupamento, a resolução de problemas e funções específicas é possibilitada. Entre os geocompósitos formados, os mais utilizados são os geocompósitos bentoníticos, os geocompósitos de drenagem e os geocompósitos de reforço.

Figura 4 - Geocompósito formado com geoespaçador e geotêxtil não tecido



Fonte: Autor (2025)

Figura 5 - Geocompósito formado com geotêxtil não tecido e georrede



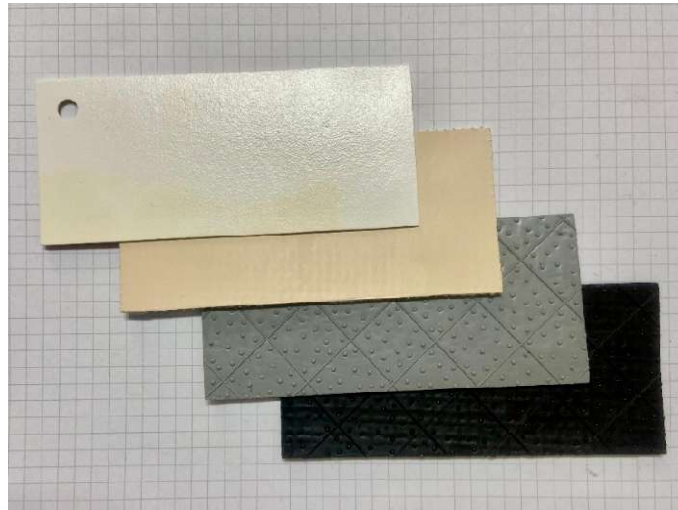
Fonte: Autor (2025)

Geomembranas

As geomembranas (**Figura 6**) são materiais poliméricos planos, em formato de mantas flexíveis, com baixíssima permeabilidade (entre 10^{-11} cm/s a 10^{13} cm/s) (Palmeira, 2018). Segundo Carneiro (2009), este geossintético possui como função principal barrar líquidos ou gases, evitando que os mesmos percolem em obras de engenharia ambiental, geotécnica, hidráulica ou de transportes. Em reservatórios de água e barragens de rejeito, por exemplo, as geomembranas criam uma barreira impermeável que evita a passagem dos líquidos e, conseqüentemente, vazamentos. Ao mesmo tempo, em aterros sanitários esse geossintético é

essencial para impedir a contaminação do solo e de aquíferos por resíduos perigosos (Pires e Silva, 2025) ou mesmo saída de gases após o seu fechamento.

Figura 6 – Geomembrana de diferentes cores



Fonte: Autor (2025)

Dentre os polímeros mais utilizados para a fabricação das geomembranas, o polietileno (PE) se destaca por possuir, geralmente, maior resistência à solventes químicos orgânicos e substâncias químicas agressivas. Esse polímero é formado pela polimerização de compostos contendo ligações insaturadas entre dois átomos de carbono. A partir dele, é produzido o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polietileno linear de baixa densidade (PELBD) e o PEAD. Por possuir maior resistência, o PEAD é amplamente escolhido (Palmeira, 2018).

De acordo com o método de produção, as geomembranas podem ser divididas em três tipos: extrusão, calandragem e espalhamento superficial. No primeiro processo, uma folha é produzida pela extrusão de polímero fundido, juntamente com aditivos; caso se deseje uma geomembrana reforçada, é possível cobri-la, ainda quente, com um geotêxtil. A espessura desse tipo de geomembrana varia entre 0,13 e 5,1 mm. Já no processo de calandragem, o material é passado por cilindros aquecidos, geralmente após a extrusão; nesse método, pode-se introduzir um geotêxtil entre duas camadas de plástico para produzir geomembranas multicamadas reforçadas. Por fim, no processo de espalhamento superficial, um polímero ou composto asfáltico é espalhado sobre uma folha, que será removida ao final do processo, revestindo-a para produzir a geomembrana. Caso se deseje geomembranas reforçadas, o geotêxtil substitui a folha de papel (Lopes e Lopes, 2010).

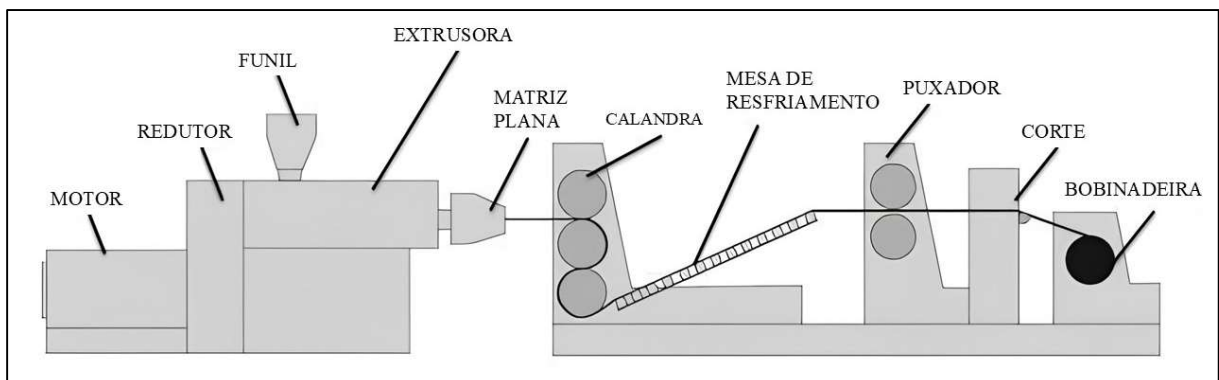
2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE GEOMEMBRANAS

A produção de geomembranas compostas por PELBD ou PEAD ocorre através de processos de extrusão. Segundo Santos (2014), inicialmente resinas poliméricas são combinadas com uma mistura concentrada que inclui aditivos, antioxidantes e estabilizantes. Após isto, a combinação é transportada pneumáticamente para o sistema de alimentação de uma extrusora, onde uma rosca conduz o material através de diferentes estágios: alimentação, compressão e dosagem. Ao final, a massa fundida é moldada conforme o tipo de matriz empregado. Na fabricação das geomembranas por extrusão, dois métodos são amplamente utilizados: o de matriz plana e o de matriz balão.

Extrusão por matriz plana

O processo de fabricação de geomembranas por matriz plana inicia-se com a introdução do polietileno granulado por meio de um funil, onde ele é plastificado, homogeneizado e bombeado pela extrusora até a matriz plana, conforme **Figura 7** (Engepol e Nortene, 2013). Essa matriz possui uma fenda horizontal calibrada, responsável por dar forma ao produto, controlando a espessura, que varia entre 0,75 e 3,0 mm, e a largura, que normalmente fica entre 1,80 e 4,60 metros, podendo atingir até 9,50 metros quando múltiplas extrusoras operam em paralelo (Santos, 2014). Logo após a saída da matriz, a geomembrana ainda em estado plástico passa pelos rolos da calandra, que promovem o resfriamento e o polimento da superfície, garantindo um acabamento adequado (Engepol e Nortene, 2013).

Figura 7 - Processo de extrusão matriz plana



Fonte: Adaptado de Engepol e Nortene (2013)

Em seguida, a geomembrana é conduzida por um puxador equipado com dois roletes motorizados, que mantêm o movimento contínuo do material até a bobinaadeira, onde ocorre o enrolamento em bobinas conforme a metragem pré-definida. A bobina é então cortada pela

máquina de corte (Engepol e Nortene, 2013). Para a fabricação de geomembranas texturizadas (TXT), o material fundido é pressionado entre dois rolos contrarotativos com superfícies padronizadas, imprimindo a textura desejada durante a extrusão (Ewais e Rowe, 2014; Scheirs, 2009). Vale destacar que as condições térmicas e de estresse variam a cada lote fabricado, influenciando a estrutura morfológica da geomembrana e afetando suas propriedades finais e a taxa de degradação sob exposição ambiental (Ewais e Rowe, 2014).

Extrusão por matriz balão

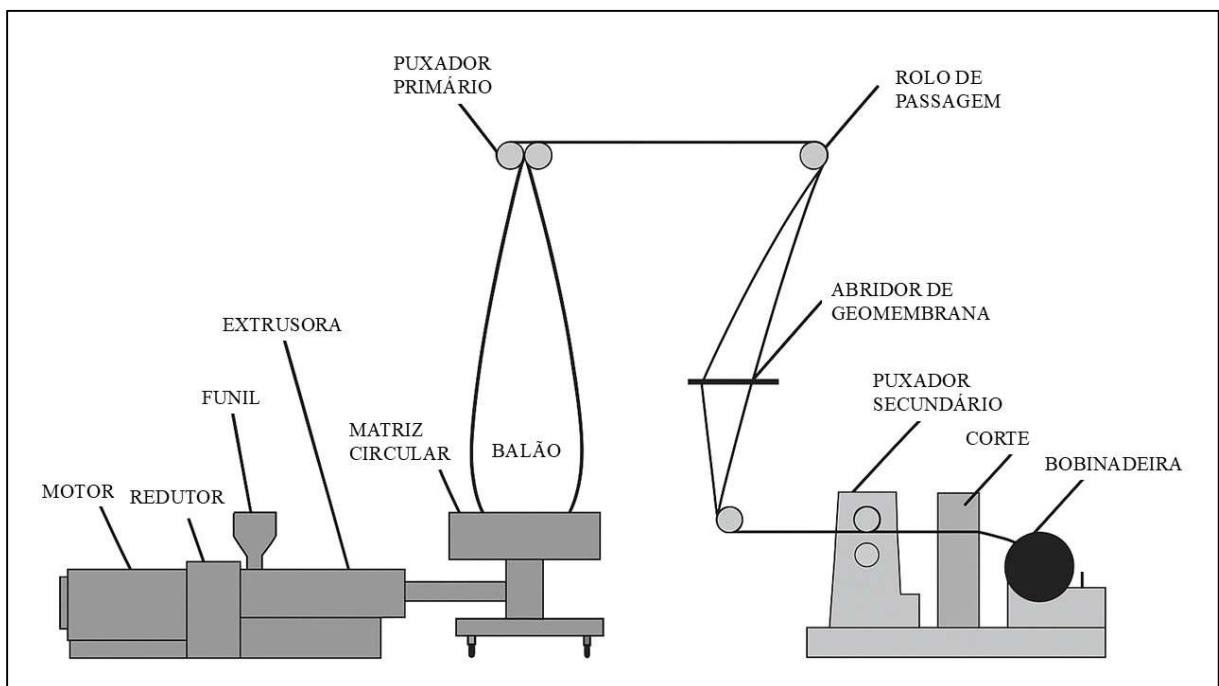
O processo de fabricação de geomembranas por extrusão com matriz balão é amplamente utilizado na indústria, sendo considerado o mais comum para a produção comercial desses materiais (Aparicio-Ardila, 2025). Nesse método, conforme **Figura 8**, a resina de polietileno em forma granular é alimentada em uma extrusora, onde é plastificada, homogeneizada e então direcionada para uma matriz circular dotada de uma fenda calibrada. A massa fundida é extrudada formando um tubo plástico, que é mantido suspenso e em movimento por um puxador localizado no topo do equipamento. Para evitar que as paredes internas do tubo se fundam, insufla-se ar sob pressão no interior, criando um balão. A espessura final da geomembrana é controlada tanto pela abertura da fenda da matriz quanto pela velocidade do puxador superior (Engepol e Nortene, 2013; Santos, 2014).

Após a formação do balão, a geomembrana, ainda no formato tubular, é cortada longitudinalmente por uma faca posicionada após o puxador, permitindo a abertura completa do tubo e a obtenção da largura desejada, que pode chegar a 5,90 metros. Esse processo, contudo, cria dois vincos ao longo da geomembrana, pontos que podem se tornar suscetíveis a danos por ataque químico ou degradação ambiental a longo prazo. Em sequência, a geomembrana passa por um puxador secundário, com roletes motorizados que mantêm o movimento contínuo do material até sua bobinagem, quando, ao atingir a metragem preestabelecida, é novamente cortada (Engepol e Nortene, 2013).

A qualidade da geomembrana produzida por matriz balão está fortemente vinculada à razão de insuflamento (RI), que corresponde à relação entre o diâmetro da matriz e o diâmetro do balão formado. Embora internacionalmente a prática comum seja um RI de aproximadamente 1,2, no Brasil frequentemente se utilizam equipamentos com RI de 1,6, o que aumenta as tensões residuais na geomembrana e compromete sua durabilidade (Engepol e Nortene, 2013). Além da razão de insuflamento, diversos outros aspectos impactam negativamente a qualidade da geomembrana fabricada por matriz balão. Entre eles, destaca-se a formação de vincos permanentes, que criam linhas de pré-tensionamento passíveis de se

tornarem pontos frágeis. Também há uma maior variação na espessura do material, que pode chegar a 10%, superior à registrada no processo de matriz plana, onde a variação se limita entre 3% e 5%. Já o processo balão resulta em maior enrugamento do produto, prejudicando etapas subsequentes, podendo gerar falhas estruturais. Ademais, o acabamento superficial tende a ser inferior, com menor brilho e maior incidência de riscos (Engepol e Nortene, 2013).

Figura 8 - Processo de extrusão matriz balão



Fonte: Adaptado de Engepol e Nortene (2013)

No que se refere a textura, segundo Aparicio-Ardila (2025), o método de formação está relacionado com a taxa de extrusão e a velocidade do puxador. À medida que bolhas de nitrogênio inertes se resfriam e estouram pelo cisalhamento da extrusora, cria-se a textura superficial característica.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS QUANTO À SUPERFÍCIE

As geomembranas podem ser classificadas quanto à sua superfície em dois tipos principais: lisas e TXT (ou rugosas). Essa distinção é relevante principalmente para aplicações que envolvem contato com outros geossintéticos ou solos com risco de escorregamento, já que a rugosidade da superfície influencia diretamente na estabilidade do sistema (Carneiro, 2009).

Geomembranas lisas são caracterizadas por sua superfície uniforme e contínua, sendo geralmente mais resistentes à tração, à deformação axial e ao puncionamento do que as TXT

(Santos, 2014). Por sua vez, geomembranas texturizadas apresentam acabamento superficial rugoso, em vista de melhorar o atrito entre a geomembrana e os materiais em contato, resultando em melhor desempenho em situações onde há risco de deslizamento (Shukla e Yin, 2006; Santos, 2014).

Do ponto de vista funcional, a textura nas geomembranas é sobretudo importante em aplicações ambientalmente sensíveis, como em aterros sanitários ou mineração, onde a estabilidade da estrutura depende fortemente da interação entre a geomembrana e os demais materiais (Aparicio-Ardila, 2025). Em geral, a presença da textura permite a construção de taludes mais íngremes, por exemplo, taludes laterais de 3(H):1(V) e, em alguns casos, até mais íngremes, reduzindo significativamente o risco de escorregamento das camadas de solo ou cobertura (Shukla e Yin, 2006).

Segundo Santos (2014), existem diversos métodos para a produção de geomembranas texturizadas. Em muitos casos, a textura é aplicada em uma segunda etapa, após a produção da geomembrana lisa. Os quatro métodos mais comuns para texturização são: coextrusão, intrusão, laminação e estruturação. A coextrusão é a técnica mais utilizada, na qual um agente de sopro é adicionado à resina fundida, gerando bolhas que formam a textura superficial ao entrarem em contato com o ar frio. Na intrusão, partículas de polietileno quente são lançadas contra a superfície da chapa já formada. Já a laminação envolve a aplicação de espuma sobre uma chapa lisa, enquanto a estruturação é feita por meio da compressão da chapa quente entre rolos estampados em contra rotação, conferindo diferentes padrões de rugosidade.

A textura pode ser aplicada em uma ou em ambas as superfícies da geomembrana, dependendo da aplicação. As geomembranas texturizadas são, geralmente, fabricadas com bordas lisas, a fim de facilitar sua instalação e o processo de soldagem (Shukla e Yin, 2006; Scheirs, 2009). Essas bordas também são utilizadas na realização do ensaio de tensofissuramento, uma vez que esse tipo de ensaio não é adequado para superfícies texturizadas ou rugosas com irregularidades. De acordo com a especificação GRI-GM13 (GRI, 2025), o ensaio deve ser conduzido em bordas lisas de rolos texturizados ou em chapas lisas produzidas com a mesma formulação da geomembrana texturizada.

O Instituto de Pesquisa em Geossintéticos indica na **Tabela 1** os valores para algumas das propriedades na especificação GRI GM-13 (GRI, 2025) para geomembranas de PEAD lisas e na **Tabela 2** geomembranas PEAD texturizadas. Assim, a escolha entre geomembranas lisas e texturizadas deve levar em conta as exigências específicas de cada projeto, equilibrando requisitos de resistência mecânica e estabilidade estrutural.

Tabela 1 - Propriedades das geomembranas PEAD lisas

Propriedades		Método de Teste (ASTM)	Espessuras (mm)						
			0,75	1	1,25	1,5	2	2,5	3
Resistência à tração (kN/m)	No escoamento	D6693	11	15	18	22	29	37	44
	Na ruptura		20	27	33	40	53	67	80
Deformação axial (%)	No escoamento	Tipo IV	12	12	12	12	12	12	12
	Na ruptura		700	700	700	700	700	700	700
Resistência ao rasgo (N)		D1004	93	125	156	187	249	311	374
Puncionamento (N)		D4833	240	320	400	480	640	800	960
Tensofissuramento (h)		D5397	300	300	300	300	300	300	300

Fonte: Adaptado de GRI GM13 (2025)

Tabela 2 - Propriedades das geomembranas PEAD texturizadas

Propriedades		Método de Teste (ASTM)	Espessuras (mm)						
			0,75	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0
Resistência à tração (kN/m)	No escoamento	D6693	11	15	18	22	29	37	44
	Na ruptura		8	10	13	16	21	26	32
Deformação axial (%)	No escoamento	Tipo IV	12	12	12	12	12	12	12
	Na ruptura		100	100	100	100	100	100	100
Resistência ao rasgo (N)		D1004	93	125	156	187	249	311	374
Puncionamento (N)		D4833	200	267	333	400	534	667	800
Tensofissuramento (h)		D5397	300	300	300	300	300	300	300

Fonte: Adaptado de GRI GM13 (2025)

2.4 INFLUÊNCIA DA COLORAÇÃO

A cor das geomembranas desempenha um papel fundamental na sua durabilidade, principalmente em aplicações nas quais o material permanece exposto à radiação solar ao longo de sua vida útil. A pigmentação, obtida por meio da adição de compostos químicos específicos, influencia não apenas o comportamento térmico das mantas, mas também sua resistência à radiação ultravioleta (UV) e a facilidade de inspeção visual. Esses pigmentos atuam como estabilizantes contra a radiação UV, ao exemplo do negro de fumo utilizado em geomembranas

pretas e do dióxido de titânio presente em geomembranas brancas (Shukla e Yin, 2006; Aparicio-Ardila, 2025).

As geomembranas de coloração preta são as mais comuns e utilizadas devido à presença de negro de fumo em sua composição. Esse aditivo é incorporado às resinas poliméricas visando aumentar a resistência à radiação UV, funcionando como um agente que absorve a radiação ultravioleta e reduz o risco de degradação oxidativa (Lodi, 2003; Vertematti, 2015). A eficácia do negro de fumo no aumento da durabilidade das geomembranas se deve à sua capacidade de minimizar os efeitos negativos dos raios UV sobre os polímeros, retardando o surgimento de comportamento frágil e fissuras. Segundo Barroso e Lopes (2010), a concentração típica de negro de fumo nas geomembranas PEAD varia entre 2% e 3%. Entretanto, essa elevada absorção de energia solar característica das geomembranas pretas implica também em maior aquecimento superficial. Segundo Pierson *et al.* (1993 *apud* Lodi, 2003), em condições de exposição direta ao sol, temperaturas da ordem de 80 °C foram registradas na superfície dessas geomembranas, o que pode provocar expansões térmicas indesejadas, formação de rugas e aceleração do processo de envelhecimento dos materiais poliméricos. Essas alterações térmicas podem resultar em diminuição da rigidez, perda de resistência química, aumento da fluência e intensificação de reações termo-oxidativas (Van Santvoort, 1994 *apud* Lodi, 2003).

Para minimizar esses efeitos, geomembranas brancas podem ser utilizadas, visto que refletem maior quantidade de radiação solar, reduzindo a absorção de calor. Estudos demonstram que as temperaturas observadas nas geomembranas brancas são inferiores em comparação às pretas e às coloridas (Koerner e Koerner, 1995). Além do benefício térmico, a superfície branca facilita a inspeção visual de danos e irregularidades após a instalação (Shukla e Yin, 2006; Lavoie e Coelho, 2018).

Além das opções monocromáticas, existem geomembranas bicolores, como as de coloração verde/preta, azul/preta ou branca/preta, que combinam aspectos funcionais e estéticos. Essa configuração é especialmente útil para reduzir ondulações e vincos causados por variações térmicas e prolongar a vida útil do material (Lavoie e Coelho, 2018). Porém, independentemente da coloração, a efetividade da proteção UV depende da correta dispersão dos aditivos na matriz polimérica. O negro de fumo e antioxidantes devem estar uniformemente distribuídos para assegurar resistência à degradação ao longo do tempo. A qualidade dessa dispersão pode ser verificada por métodos de avaliação microscópica (Shukla e Yin, 2006).

2.5 DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS

Quando se fala em degradação de polímeros, um assunto importante são os microplásticos. Os microplásticos são partículas sintéticas de até 5mm, podendo ser considerados primários ou secundários, sendo onipresentes nos ecossistemas e considerados como contaminantes emergentes (ONU, 2019).

A presença de microplásticos no ambiente está diretamente ligada à maneira como os materiais plásticos se comportam quando ficam expostos por longos períodos sob ação de agentes degradantes como a radiação solar, oxigênio, variações de temperatura, esforços mecânicos e outros, ocasionando a perda de suas propriedades originais. Com o tempo, essas alterações deixam o material mais frágil, favorecendo a fragmentação da superfície e levando à formação dos microplásticos.

A poluição por plásticos, de forma geral, já é reconhecida como um problema social, econômico e ambiental (Montagner *et al.*, 2021). Quando chegam ao meio ambiente, segundo os autores, esses materiais passam por uma série de transformações que modificam seu comportamento, sua durabilidade e a forma como se movimentam pelos ecossistemas. Os autores afirmam ainda que esses pequenos pedaços já foram encontrados em praticamente todos os tipos de ambientes pesquisados, mas seus impactos ainda não são totalmente entendidos.

Segundo Olivatto *et al.* (2018), uma das principais preocupações é que os microplásticos não causam apenas efeitos físicos nos organismos, eles também podem agir como vetores de outros contaminantes, carregando substâncias químicas adsorvidas em suas superfícies. Dessa forma, a investigação sobre seus impactos tem crescido.

Há mais de duas décadas, segundo Lim (2021), pesquisadores já alertavam para os efeitos potenciais dessas partículas. No ano de 2004 o ecologista Richard Thompson, da Universidade de Plymouth, denominou oficialmente o termo “microplásticos”, após encontrar partículas menores que 5 mm em praias no Reino Unido. Desde então, segundo a autora, estudos têm revelado um quadro preocupante onde essas partículas podem ser localizadas no fundo dos oceanos, no Ártico, no gelo da Antártida, no sal de cozinha, na água potável, na cerveja e no ar respirável. Elas podem viajar longas distâncias carregadas pelo vento ou pela chuva, e permanecem no ambiente por décadas antes de se degradarem completamente.

2.6 ESPECTROMETRIA POR INFRAVERMELHO

A espectrofotometria pode ser definida como um processo analítico-instrumental que se baseia nas propriedades de absorção, emissão e reflexão da energia eletromagnética em regiões específicas do espectro. A partir da década de oitenta, a técnica de infravermelho evoluiu

consideravelmente, com destaque para a substituição gradual dos espectrômetros dispersivos pelos espectrômetros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR, em inglês), além do desenvolvimento de aplicações nas regiões do infravermelho próximo e distante. Dessa forma, a espectrometria por infravermelho é muito utilizada para identificar a estrutura molecular de diferentes materiais, incluindo polímeros sintéticos, como os utilizados na fabricação de geossintéticos. Segundo Fernandes (2015), espectrometria é o termo utilizado para nomear as técnicas que obtêm informações a partir da radiação incidente em uma amostra, considerando que cada substância apresenta um padrão espectral único devido à maneira como seus átomos e moléculas absorvem, transmitem ou refletem essa radiação.

A região do infravermelho se encontra entre o espectro visível e as micro-ondas, sendo geralmente dividida em três faixas, denominadas de infravermelho próximo (NIR, em inglês), infravermelho médio (MIR, em inglês) e infravermelho distante (FIR, em inglês) (John, 2020), conforme **Tabela 3**. Entre elas, o MIR é a mais utilizado em análises qualitativas e quantitativas, principalmente pela sua capacidade de identificar e caracterizar compostos orgânicos e polímeros (Skoog *et al.*, 2017). No MIR se destaca a região chamada de impressão digital (*fingerprint*), entre 1.200 e 600 cm^{-1} , muito útil para diferenciar as substâncias. Segundo Skoog *et al.* (2017), pequenas variações estruturais nas moléculas já se refletem em mudanças significativas nas bandas de absorção, o que a torna um parâmetro de identificação com maior confiabilidade.

Tabela 3 - Regiões espectrais do infravermelho

Região	Nº de ondas (cm^{-1})	Comprimento de onda (nm)
NIR	12.800 - 4.000	780 - 2.500
MIR	4.000 - 400	2.500 - 5.000
FIR	200 - 10	5.000 - 100.000

Fonte: John (2020)

A espectroscopia de infravermelho médio apresenta diversas vantagens. É aplicável a uma grande variedade de materiais, sejam sólidos, líquidos, gases, polímeros ou misturas complexas. Além disso, é uma técnica rápida, de baixo custo em comparação a métodos como Ressonância Magnética Nuclear (NMR), Cromatografia Gasosa-Espectrometria de Massa (GC-MS) e Cromatografia Líquida-Espectrometria de Massa (LC-MS), além de não requerer preparo e destruição das amostras (Smith, 2011).

Entre os avanços mais relevantes se destaca a utilização do acessório de Reflexão Total Atenuada (ATR, em inglês). Nessa técnica, a radiação infravermelha atravessa um cristal de

alto índice de refração e reflete na interface com a amostra, penetrando levemente em sua superfície por meio da chamada onda evanescente. Dessa forma, é possível obter espectros sem preparo elaborado, aplicando o material diretamente sobre o cristal (Smith, 2011; Máquina, 2017). Além desse acessório, segundo Cougo (2017), outro ponto importante foi o desenvolvimento da FTIR, que substituiu os espectrômetros dispersivos. Enquanto os instrumentos antigos faziam leituras lentas e sequenciais, o FTIR utiliza um interferômetro capaz de medir simultaneamente todas as frequências, resultando em maior sensibilidade, resolução e rapidez. Entre as vantagens do FTIR se destaca a maior relação sinal/ruído devido ao uso de menos elementos ópticos, aquisição de espectros completos em poucos segundos e redução do tempo necessário para medições repetidas aliado a melhora da confiabilidade dos resultados (Holler; Skoog; Crouch, 2009).

Em polímeros como os utilizados na fabricação de geomembranas, a espectroscopia por infravermelho permite monitorar alterações nas ligações carbônicas provocadas por degradação. Estudos como os de Kwon *et al.* (2013), Curcio *et al.* (2015) e Murakami e Koga (2016) mostraram que ao longo da exposição ao meio ambiente exógeno, é possível acompanhar o surgimento da banda carbonila em polímeros. Em pesquisas com geossintéticos, autores como Yang e Ding (2006), Azuma *et al.* (2009), Valente *et al.* (2010) e Rouillon *et al.* (2016) também utilizaram essa técnica. Dentro desses trabalhos, Rouillon *et al.* (2016) destacou a análise da banda em 1456 cm^{-1} , correspondente ao grupo metil, como representativa para avaliar o comportamento de polipropilenos.

2.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica amplamente utilizada para a caracterização microestrutural de materiais, permitindo a análise detalhada da morfologia superficial com elevada resolução e profundidade de campo. Diferentemente da microscopia óptica, o MEV utiliza um feixe de elétrons focalizado que varre a superfície da amostra, possibilitando a obtenção de imagens com ampliações significativamente superior, além de informações topográficas e composicionais.

O princípio de funcionamento do MEV baseia-se na interação do feixe de elétrons com os átomos da amostra, gerando diferentes sinais, como elétrons secundários e elétrons retroespalhados. Esses sinais são coletados por detectores específicos e convertidos em imagens, permitindo a observação de características como rugosidade, porosidade, fraturas, fissuras e defeitos superficiais. A escolha do detector influencia diretamente o tipo de

informação obtida, sendo os elétrons secundários mais utilizados para análise topográfica e os retroespalhados para contrastes relacionados à composição química.

Uma das principais vantagens da MEV é sua versatilidade na análise de diferentes tipos de materiais, incluindo metais, cerâmicas, materiais compósitos e polímeros. Em estudos relacionados a processos de degradação (Frangipani, 2018; Lavoie *et al.*, 2020; Prudêncio e Wiebeck, 2021), a técnica é particularmente relevante, pois possibilita a identificação de alterações morfológicas associadas ao envelhecimento, desgaste, oxidação ou ataque químico, contribuindo para a compreensão dos mecanismos responsáveis pela deterioração do material. Entretanto, a aplicação da MEV requer cuidados específicos na preparação das amostras, especialmente no caso de materiais não condutores, que geralmente necessitam de recobrimento com uma fina camada de material condutor, como ouro ou carbono.

Dessa forma, o MEV destaca-se como uma ferramenta essencial em estudos de caracterização e avaliação de materiais, sendo frequentemente empregada de forma complementar a outras técnicas analíticas para fornecer uma visão mais abrangente das propriedades e do comportamento dos materiais investigados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação das alterações químicas nas geomembranas, devido processos de degradação, foi utilizado o ensaio de espectrometria no infravermelho por FTIR. A técnica foi aplicada em amostras virgens e envelhecidas, tanto em condições de intemperismo natural (exposição em campo experimental e em obra) quanto em laboratório (envelhecimento acelerado por radiação ultravioleta). O espectrômetro infravermelho utilizado operou na faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , tornando possível identificar grupos funcionais formados ou modificados ao longo do tempo, como as bandas características de carbonila (C=O) e metil (CH_3), associadas à degradação oxidativa dos polímeros, como identificado no estudo de Kato (2022). As amostras analisadas possuem dimensões reduzidas, o que torna a técnica adequada por não exigir preparação destrutiva.

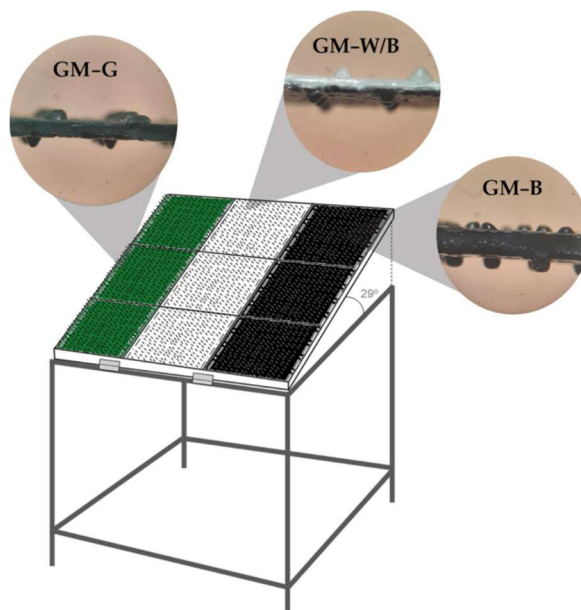
3.1 GEOMEMBRANAS

Neste estudo, foram utilizadas amostras de geomembranas de PEAD com diferentes características de fabricação, tipos de superfície, cores, espessuras, condições de envelhecimento e aplicações. As amostras são as mesmas utilizadas na tese de doutorado de Aparicio-Ardila (2025) e foram organizadas em cinco grupos, conforme os objetivos do trabalho, totalizando 34 amostras. É importante destacar que as amostras classificadas como de referência (virgens) foram armazenadas em temperatura ambiente nas instalações do fabricante por longos períodos, variando de 7 a 10,5 anos. Apesar do armazenamento em arquivo, é provável que durante esse tempo as amostras tenham sofrido um grau de envelhecimento.

3.1.1 GEOMEMBRANAS SUBMETIDAS AO INTEMPERISMO NATURAL

Nesta etapa do estudo, foram utilizadas seis amostras TXT de geomembranas PEAD, com espessura de 1,00 mm, fabricadas por extrusão plana e apresentando diferentes colorações (verde, preta e preta/branca). Três dessas amostras eram virgens, utilizadas como referência, e três foram exumadas após exposição em painel de intemperismo (**Figura 9**) localizado no município de Canoas-RS. Os períodos de exposição foram distintos: 8,5 anos para a geomembrana preta, 9 anos para a preta/branca e 10,5 anos para a verde. Cada amostra exumada teve sua respectiva amostra virgem de referência, conforme apresentado na **Tabela 4**. Resultados complementares de caracterização física e mecânica dessas geomembranas estão disponíveis em Aparicio-Ardila *et al.* (2025)

Figura 9 - Esquema do painel de intemperismo e detalhes das amostras



Fonte: Aparicio-Ardila *et al.* (2025)

Tabela 4 - Características das geomembranas texturizadas PEAD sob intemperismo natural

Amostra	Tipo	Cor	Espessura (mm)	Condição	Tempo (anos)
1				Virgem	-
2	TXT	Verde	1,00	Exposta em painel	10,5
3				Virgem	-
4	TXT	Preta/Branca	1,00	Exposta em painel	9
5				Virgem	-
6	TXT	Preta	1,00	Exposta em painel	8,5

Fonte: Adaptado de Aparicio-Ardila (2025)

3.1.2 GEOMEMBRANAS EXPOSTAS À RADIAÇÃO UV EM CÂMARA DE ENVELHECIMENTO

Seis amostras foram ensaiadas em câmara de radiação UV e estão expostas na **Tabela 5**. As variações envolveram diferentes cores, tempos de exposição (500 h e 1000 h) e, por sua vez, diferentes tipos de superfície (texturizada e borda lisa). Essa etapa irá permitir avaliar a degradação acelerada por exposição artificial à radiação UV. Cada amostra teve sua respectiva amostra virgem como referência, para as geomembranas texturizadas foram consideradas as amostras virgens da **Tabela 4**. Resultados complementares de caracterização física e mecânica dessas geomembranas estão disponíveis em Aparicio-Ardila *et al.* (2025).

Tabela 5 - Características das geomembranas PEAD coloridas sob exposição em câmara UV

Amostra	Tipo	Cor	Espessura (mm)	Condição	Tempo (h)
7	TXT	Verde	1,00	Envelhecida	500
8					1000
9	TXT	Preta	1,00	Envelhecida	500
10					2000
11				Virgem	—
12	Lisa	Preta/Branca	1,00	Envelhecida	500
13					1000

Fonte: Adaptado de Aparicio-Ardila (2025)

3.1.3 GEOMEMBRANAS PELO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Neste grupo será investigada a influência do processo de fabricação na durabilidade das geomembranas na parte texturizada e parte lisa frente à radiação UV. Serão testadas dez amostras com 2,00 mm de espessura, divididas entre os processos de fabricação por extrusão plana e extrusão balão, sendo subdivididas em texturizadas e borda lisa (área retirada da geomembrana texturizada). Conforme a **Tabela 6**, as condições de envelhecimento variaram entre 500 h, 1000 h e 2000 h, além da virgem como parâmetro. Para as amostras fabricadas por extrusão plana, as geomembranas virgens do Rio de Janeiro (**Tabela 7**), por terem as mesmas características, foram consideradas como parâmetros.

Tabela 6 - Características das geomembranas PEAD conforme tipo de fabricação, superfície e sob exposição em câmara UV

Amostra	Tipo de Fabricação	Tipo	Espessura (mm)	Condição	Tempo (h)
14	Extrusão Plana	TXT	2,00	Envelhecida	500
15					1000
16		Borda Lisa	2,00	Envelhecida	2000
17					2000
18				Virgem	—
19	Extrusão Balão	TXT	2,00	Envelhecida	500
20					1000
21		Borda Lisa	2,00	Envelhecida	2000
22					2000
23				Virgem	—
				Envelhecida	2000

Fonte: Adaptado de Aparicio-Ardila (2025)

3.1.4 GEOMEMBRANAS EXUMADAS DE ATERROS SANITÁRIOS

Quatro amostras (**Tabela 7**) foram coletadas de coberturas de aterros sanitários localizados nas cidades de São Paulo (SP) e Rio de Janeiro (RJ). As espessuras eram de 2,00 mm e incluíam partes da geomembrana texturizadas e sua borda lisa. As condições variaram entre virgens e degradadas, com tempos de exposição entre 3,2 anos (SP) e 4 anos (RJ).

Tabela 7 - Características das geomembranas PEAD exumadas de aterros

Amostra	Local	Tipo	Espessura (mm)	Condição	Tempo (anos)
24	SP	TXT	2,00	Virgem	—
25				Degradada	3,2
26		Borda Lisa	2,00	Virgem	—
27				Degradada	3,2
28	RJ	TXT	2,00	Virgem	—
29				Degradada	4
30		Borda Lisa	2,00	Virgem	—
31				Degradada	4

Fonte: Adaptado de Aparicio-Ardila (2025)

3.1.5 GEOMEMBRANAS EXUMADAS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Três amostras de partes da geomembrana texturizadas e sua borda lisa, com 2,00 mm de espessura, foram obtidas de áreas de rejeitos de mineração de zinco, sendo geomembranas do talude e fundo da barragem (**Tabela 8**). Neste caso, não havia amostras virgens disponíveis para servir como referência, assim a análise foi realizada comparando o grau de degradação entre os diferentes locais onde o material foi aplicado. As amostras apresentavam aproximadamente 20 anos de utilização.

Tabela 8 - Características das geomembranas PEAD exumadas de barragem de rejeito

Amostra	Tipo	Espessura (mm)	Condição	Local	Tempo (anos)
32	TXT	2,00	Degradada	Fundo da barragem	20
33				Talude	
34	Borda Lisa	2,00	Degradada	Talude	20

Fonte: Adaptado de Aparicio-Ardila (2025)

3.2 EQUIPAMENTO

Para a caracterização química das geomembranas de PEAD, será utilizado um espectrometro FTIR, modelo IRAffinity-1S, da fabricante Shimadzu, acoplado a um módulo de

ATR, conforme **Figura 10**. Esse equipamento permite a identificação de grupos funcionais e possíveis alterações químicas provenientes da degradação.

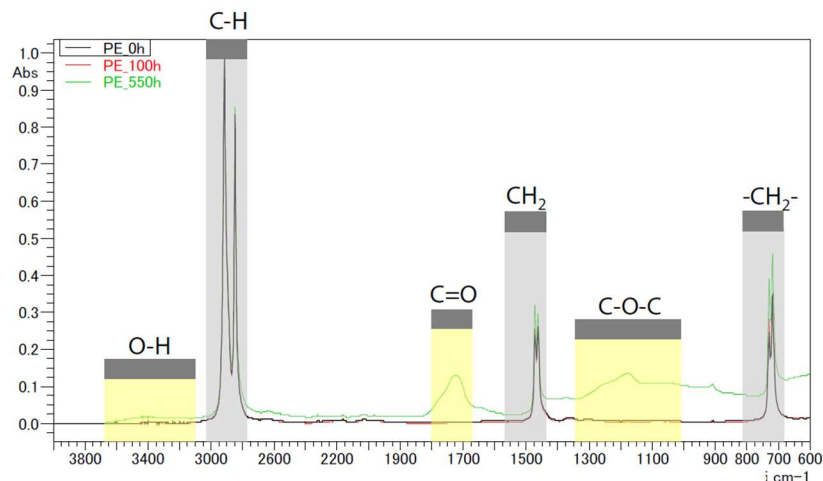
Figura 10 - Espectrômetro de FTIR acoplado ao módulo ATR



Fonte: Autor (2025)

A técnica de FTIR é baseada na absorção de radiação infravermelha por ligações químicas específicas presentes nos materiais. Cada tipo de ligação, como C=O e CH₃, absorve a radiação em faixas de comprimento de onda características, gerando um espectro que funciona como uma “impressão digital” da composição molecular da amostra (Bruker, 2015), como a **Figura 11** que demonstra o ensaio em polietileno virgem e compara com o material degradado em câmara UV em 100 e 500 horas.

Figura 11 - Espectros de infravermelho de polietileno virgem e exposto à radiação UV



Fonte: Kato (2022)

O módulo ATR facilita a análise direta de amostras sólidas, como as geomembranas estudadas, eliminando a necessidade de preparo químico previamente. A amostra é pressionada contra um cristal com grande índice de refração e a radiação infravermelha penetra superficialmente no material por reflexão, coletando dados sobre a estrutura química da camada da geomembrana. Essa abordagem é não destrutiva e rápida (Oliveira *et al.*, 2015), ideal para amostras com diferentes graus de envelhecimento.

3.3 AQUISIÇÃO DOS ESPECTROS DAS AMOSTRAS

Os espectros de infravermelho foram obtidos utilizando, como mencionado, um espectrômetro equipado com o acessório de ATR, contendo cristal de alta transparência adequado à região do infravermelho médio. As análises foram realizadas na faixa espectral de 4.000 a 400 cm^{-1} , que corresponde à região do MIR, com resolução e sensibilidade adequadas à identificação dos grupos funcionais presentes nas geomembranas de PEAD. Além disso, análises foram realizadas com resolução espectral de 4 cm^{-1} e 64 varreduras (scans) acumuladas por espectro, a fim de aumentar a relação sinal-ruído.

Antes da coleta de cada conjunto de espectros, foi realizado o ensaio de background (ensaio em branco), com o objetivo de verificar possíveis interferências no cristal e corrigir possíveis ruídos de leitura. Esse procedimento tem por objetivo que o espectro obtido represente a resposta da amostra analisada.

As amostras apresentadas neste trabalho foram posicionadas diretamente sobre o cristal ATR. Dessa forma permite-se cobertura total da área de leitura e contato uniforme entre o material e a superfície do acessório. Para cada amostra, foram adquiridos três espectros consecutivos em diferentes partes da mesma amostra visando aumentar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos dados obtidos.

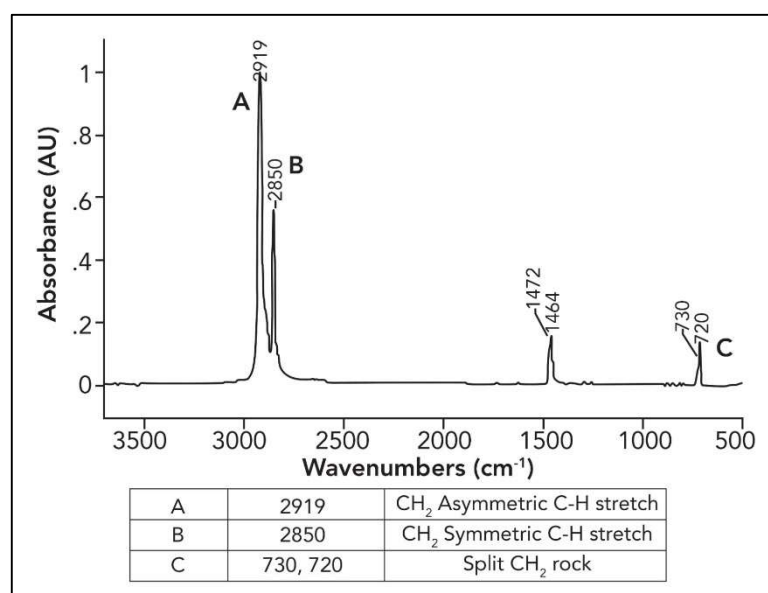
Os espectros foram processados e corrigidos por meio dos métodos, presentes no software do equipamento, *Arithmetic*, *Baseline Correction*, *Normalize* e *Smoothing*, visando tratar dados com base matemática, alinhar as linhas de base, normalizar a intensidade das bandas e eliminar ruídos. Após o processamento, todos os espectros foram exportados em formato ASCII e posteriormente tratados no software OriginPro, utilizado para organização, comparação e análise gráfica dos dados.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

3.4.1 ESPECTRO DE REFERÊNCIA

A **Figura 12** apresenta um espectro de referência do PEAD, no qual são destacadas as principais bandas características de polímero. Conforme Smith (2021), as bandas mais intensas localizam-se em 2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} , correspondentes, respectivamente, aos estiramentos (*stretch*) assimétrico e simétrico das ligações C–H do grupo metileno (CH_2). Essas absorções são características de materiais que possuem longas cadeias de carbono e hidrogênio ligadas de forma linear, como o polietileno (Kovács *et al.*, 2021).

Figura 12 - Espectro infravermelho de PEAD



Fonte: Smith (2021)

As bandas em 1472 cm^{-1} e 1464 cm^{-1} estão associadas às vibrações de deformação angular (ou *scissoring*) das ligações C–H (Casarano, 2004), enquanto os picos observados em 730 cm^{-1} e 720 cm^{-1} correspondem às vibrações de balanço (*rocking*) do grupo CH_2 .

Ainda segundo Smith (2021), esses dois últimos picos aparecem duplicados devido ao fenômeno conhecido como divisão cristalina (*crystalline splitting*), que ocorre em materiais semicristalinos como o PEAD devido ao acoplamento vibracional entre cadeias de metileno adjacentes. Esse efeito é indicativo de uma estrutura altamente ordenada e está diretamente relacionado à cristalinidade do polímero. O PEBD, por exemplo, não apresenta essa divisão, exibindo apenas um único pico em torno de 718 cm^{-1} , devido à presença de ramificações laterais que impedem o empacotamento regular das cadeias.

Dessa forma, estas bandas constituem a chamada “assinatura espectral” do PEAD, servindo como base para a interpretação dos espectros obtidos experimentalmente durante o trabalho. A análise dessas regiões permite verificar se o material sofreu alterações químicas ao longo do tempo ou sob diferentes condições de exposição.

Além disso, é possível observar a ausência de picos na região de aproximadamente 1710 cm^{-1} , ligada ao grupo carbonila (C=O), e 3400 cm^{-1} , ligada a grupos hidroxila (O-H). Essa ausência mostra que não houve oxidação significativa na amostra de referência, indicando que a estrutura do polímero se encontra preservada e que o material analisado ainda não passou por processos de degradação oxidativa.

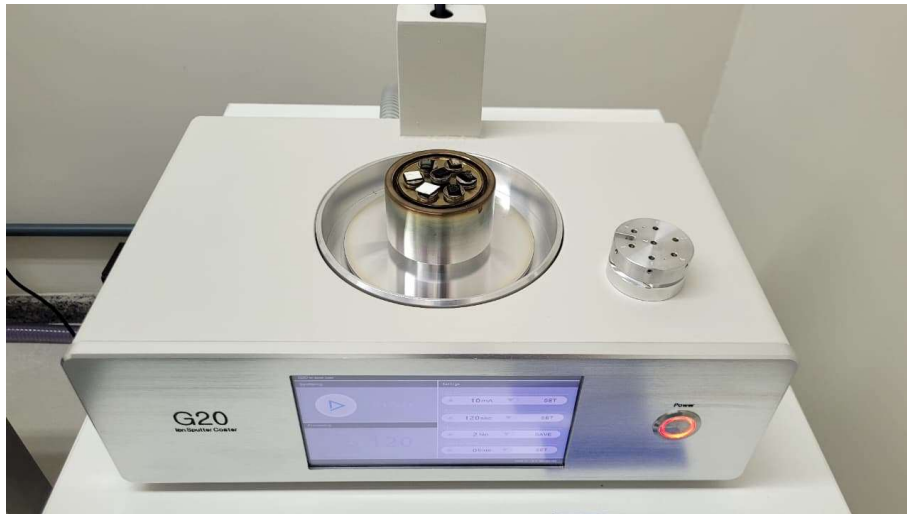
Portanto, o espectro apresentado é compatível com o comportamento esperado para um PEAD em estado virgem, sem evidências de formação de produtos como ácidos carboxílicos, cetonas e aldeídos, que são coletivamente conhecidos como compostos carbonílicos (Wang *et al.*, 2023). Assim, esse espectro de referência será utilizado como parâmetro comparativo para a avaliação das amostras “virgens” e expostas, possibilitando identificar, nos demais resultados, o surgimento de novas bandas ou variações de intensidade relacionadas a reações de envelhecimento e degradação do material.

3.4.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA/ESPECTROSCOPIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO DE ENERGIA

A MEV/espectroscopia de raios x por dispersão de energia (EDS) foi utilizada para corroborar as avaliações de alterações morfológicas decorrentes dos processos de degradação na superfície de sete amostras de geomembranas presentes neste trabalho. O equipamento utilizado permite a obtenção de imagens de alta resolução por meio do bombardeamento da amostra com um feixe de elétrons, possibilitando observar detalhes microestruturais que não são visíveis por microscopia óptica convencional.

As amostras analisadas foram previamente preparadas de acordo com as recomendações, em vista de garantir as condições adequadas durante a leitura. Para isso, as amostras foram fixadas em suportes metálicos e recobertas com uma fina camada condutora de ouro (**Figura 13**). As imagens obtidas pela MEV foram avaliadas comparativamente entre os diferentes grupos de amostras. A análise morfológica possibilitou verificar modificações como alteração na rugosidade e microfissuras e identificar e quantificar os elementos químicos presentes na superfície da amostra. Os resultados complementam as análises químicas realizadas por FTIR, contribuindo para uma compreensão mais abrangente do comportamento das geomembranas ao longo de seu ciclo de vida.

Figura 13 - Preparação das amostras para a MEV



Fonte: Autor (2025)

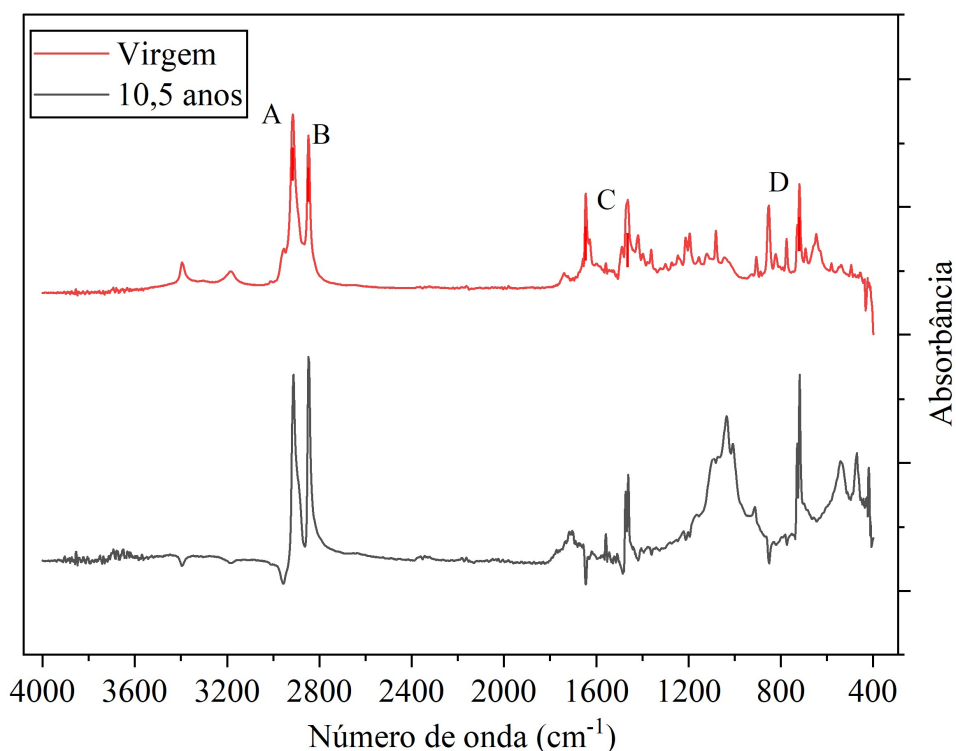
4. RESULTADOS

4.1 GEOMEMBRANAS SUBMETIDAS AO INTEMPERISMO NATURAL

Verde

Na **Figura 14** é apresentado os espectros da análise por FTIR realizada comparando a geomembrana verde virgem (linha vermelha), a qual encontrava-se previamente armazenada antes de ser ensaiada, com a amostra verde que foi exposta por 10,5 anos (linha preta).

Figura 14 - Espectros infravermelho de geomembrana PEAD verde



Fonte: Autor (2025)

O espectro da amostra exposta manteve as bandas características da assinatura espectral do PEAD, indicando que a estrutura principal do polímero foi preservada. As bandas em 2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} (bandas A e B), tiveram suas proporções invertidas, evidenciando possível alteração nas cadeias de metileno. A banda C não variou significativamente, enquanto as bandas em 730 cm^{-1} e 720 cm^{-1} (D) intensificaram-se e sugerem que a estrutura altamente ordenada e cristalina da geomembrana foi alterada. Observou-se também que houve um aumento relativo da intensidade desta banda em comparação com as bandas A e B, sugerindo uma maior contribuição das vibrações associadas à fase cristalina do material.

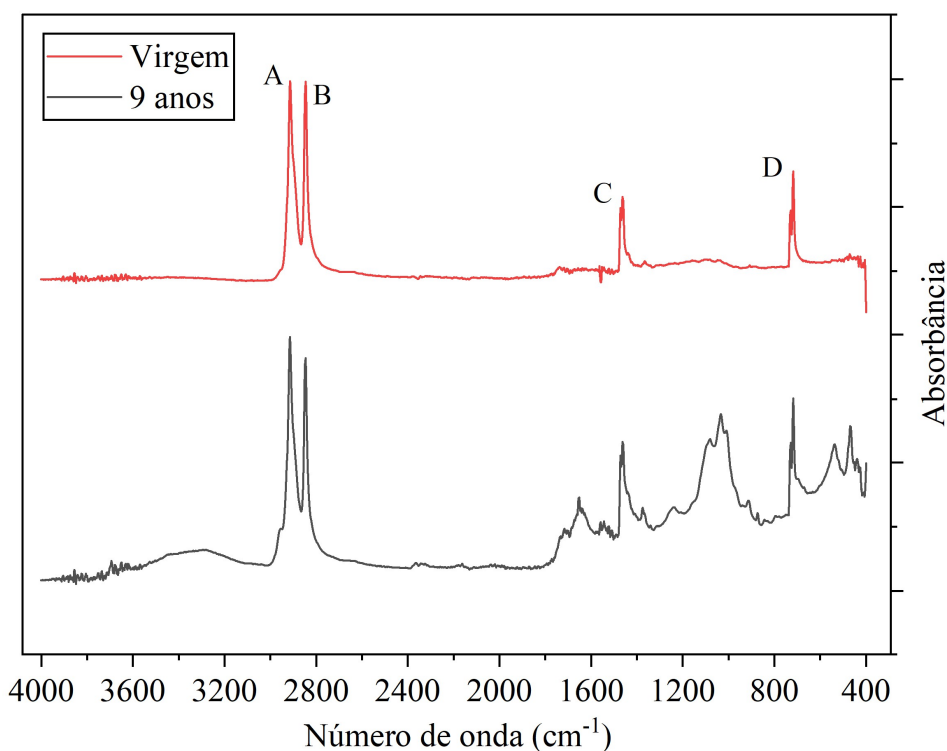
A degradação química da geomembrana em campo é indicada pelo aumento na absorção de grupos funcionais relacionados à oxidação, em relação às demais bandas. A banda de

carbonila (C=O) (1710 cm^{-1}), onde o espectro da amostra de 10,5 anos apresentou um aumento acentuado. Este aumento, em comparação com a amostra virgem armazenada (que já continha C=O), indica que a exposição direta ao intemperismo induziu uma oxidação acelerada. Já para a banda de 3400 cm^{-1} houve a diminuição de absorção na região (associada aos grupos Hidroxila, {O-H}) na amostra exposta. Além disso, há alterações das cadeias entre 800 e 1200 cm^{-1} , com formação de compostos como alcenos (C=C) e álcoois.

Preta/Branca

Na **Figura 15** espectros de IR da geomembrana preta/branca virgem (linha vermelha) com a amostra exposta por 9 anos ao intemperismo natural (linha preta) o espectro da amostra envelhecida variou a intensidade das bandas características do PEAD, indicando que a estrutura principal do polímero foi alterada após o período de exposição.

Figura 15 - Espectro infravermelho de geomembrana PEAD preta/branca



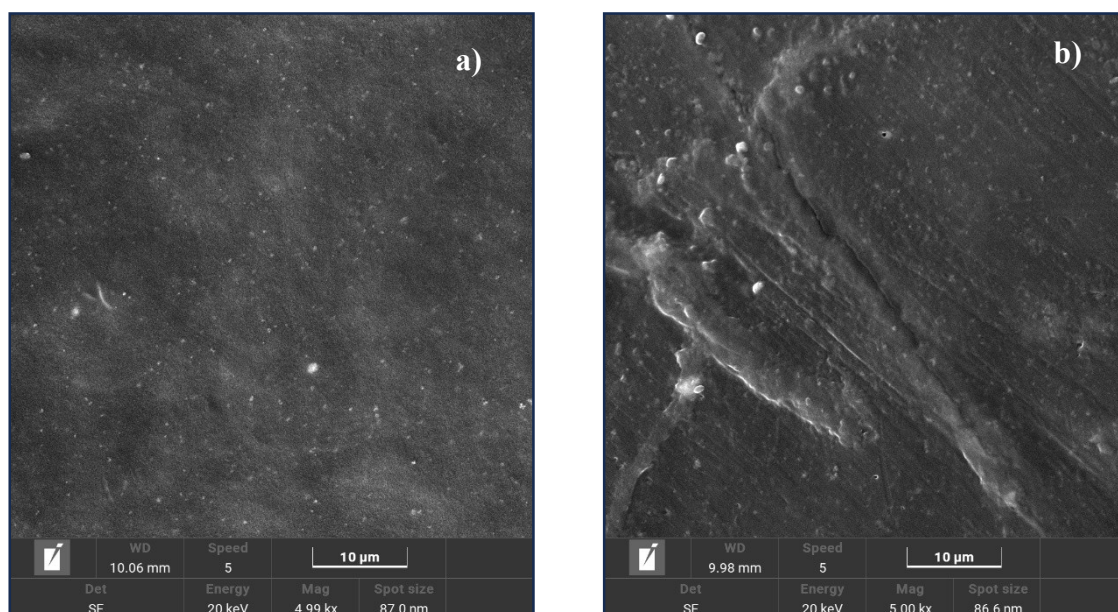
Fonte: Autor (2025)

As bandas A e B possuíam intensidades similares e, após a degradação, B diminuiu a intensidade em relação a banda A. A banca C não variou significativamente, bem como a banda em $730\text{--}720\text{ cm}^{-1}$ (D), referente às vibrações de balanço do grupo CH_2 , manteve o desdobramento típico da divisão cristalina, indicando que a estrutura do PEAD foi preservada.

É verificado também um grande aumento da banda em 1710 cm^{-1} , que aponta o processo oxidativo e a formação de produtos de oxidação como cetonas e ésteres, conforme Gomes (2024). Concomitante a isso, a região de 3400 cm^{-1} também apresentou aumento de intensidade. Além disso, foram observadas alterações das cadeias entre 800 e 1200 cm^{-1} , similares da amostra de geomembrana verdes.

Para complementar os resultados do FITR da geomembrana preta/branca, foram realizados ensaios por meio de MEV do material virgem e após sua degradação no painel de intemperismo (**Figura 16**) com aproximação de 5000x.

Figura 16 - Micrografias de MEV da geomembrana preta/branca virgem (a) e degradada (b)



Fonte: Autor (2025)

O ensaio demonstrou alterações morfológicas da superfície do material, indicando a degradação do mesmo após a exposição no painel de intemperismo. A amostra não degradada (a) exibiu uma superfície majoritariamente lisa e homogênea, indicando integridade e coesão do material. Em contrapartida, a geomembrana após o intemperismo (b) apresentou uma superfície alterada, indicando possíveis presença de microfissuras. A comparação entre as espectroscopias de energia dispersiva (EDS, em inglês) das superfícies antes e após a degradação evidencia mudanças químicas compatíveis com o processo de envelhecimento da geomembrana (**Tabela 9**).

Tabela 9 - EDS das geomembranas preta/branca virgem e degradada

Elemento detectável	Virgem	Degradada
Carbono (at%)	92,80	88,74
Oxigênio (at%)	5,86	9,79

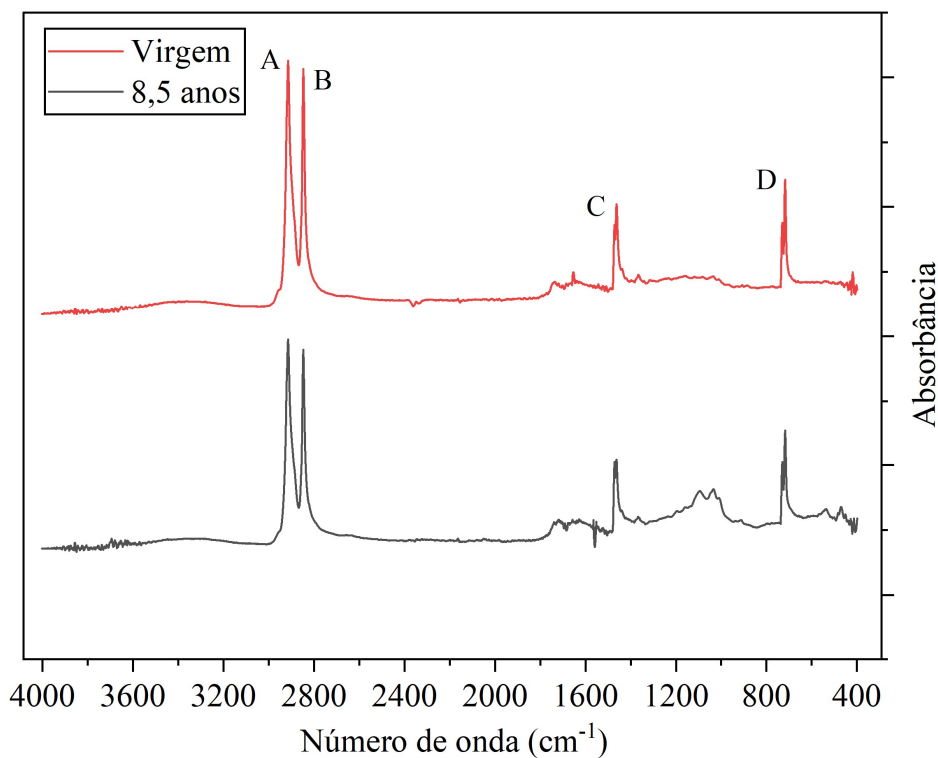
Fonte: Autor (2025)

Entre os elementos detectáveis pelo método, a amostra virgem apresenta maior proporção de carbono (92,8 at%) e oxigênio (5,86 at%), a amostra degradada mostra aumento de oxigênio (9,79 at%) e redução correspondente de carbono (88,74 at%). O acréscimo de oxigênio indica intensificação das reações oxidativas no material, fenômeno esperado em materiais expostos ao intemperismo.

Preta

Os espectros da geomembrana preta exposta por 8,5 anos, conforme **Figura 17**, apresentou perfil semelhante ao da amostra virgem, com ligeira redução de intensidade, mantendo as bandas características do PEAD, o que indica preservação da estrutura molecular do polímero após o período de exposição.

Figura 17 - Espectro infravermelho de geomembrana PEAD preta



Fonte: Autor (2025)

A assinatura espectral foi bem preservada nas bandas A, B e D, já a banda C, em 1472 cm^{-1} e 1464 cm^{-1} , associadas às vibrações de deformação angular das ligações C–H, diminuíram sua intensidade.

A banda de carbonila apresentou mudança mínima de intensidade, indicando que os processos oxidativos foram pouco modificados em relação à geomembrana que estava mantida no arquivo da fabricante. A região de 3400 cm^{-1} também manteve baixa variação de intensidade. Já as alterações das cadeias entre 800 e 1200 cm^{-1} foram presentes da mesma forma que nas amostras verde e branca, porém com menor intensidade, o que pode estar relacionado a estabilização mais efetiva com negro de fumo em sua composição.

Dessa forma, os espectros obtidos para as geomembranas expostas indicam que o PEAD variou sua estrutura química principal, com bandas características preservadas e sinais de oxidação. A presença e o aumento das bandas associadas aos grupos carbonila indicam os processos oxidativos, principalmente nas geomembranas verde (sem negro de fumo na composição) e preta/branca, enquanto a geomembrana preta apresentou menores alterações, indicando maior estabilidade que as demais.

Essas observações são reforçadas pelos resultados apresentados por Aparicio-Ardila (2025), que indicam a depleção substancial de antioxidantes nas geomembranas coloridas (verde e preta/branca) e a ocorrência de processos oxidativos após o Estágio I de degradação.

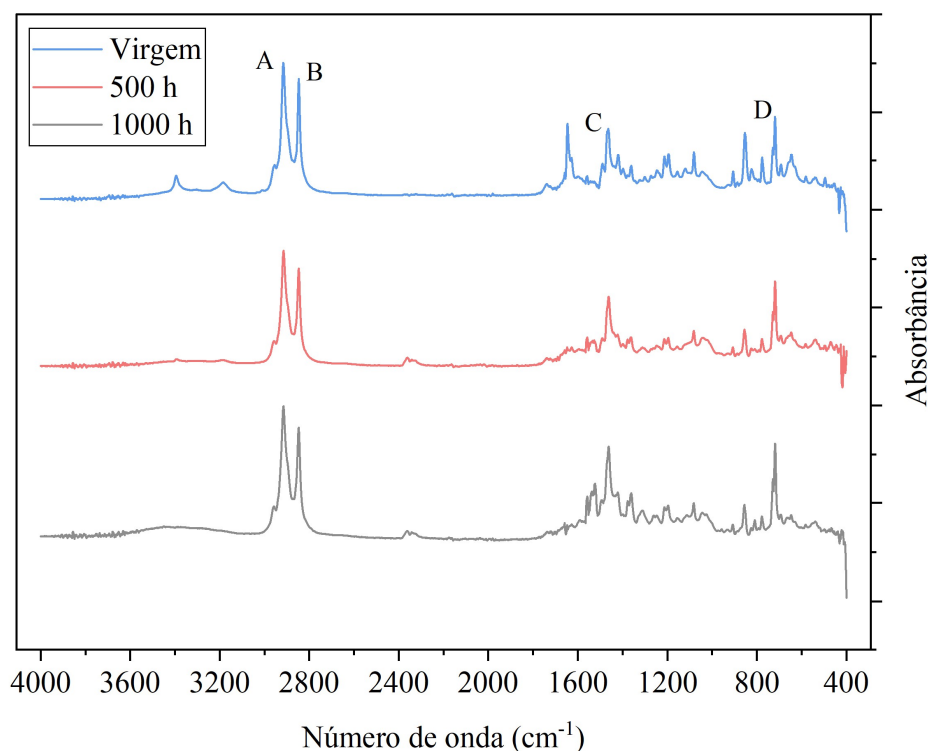
Os gráficos correspondentes às triplicatas dos ensaios para o grupo de geomembranas submetidas ao intemperismo natural são apresentados no Apêndice A.

4.2. GEOMEMBRANAS EXPOSTAS À RADIAÇÃO UV EM CÂMARA DE ENVELHECIMENTO

Verde

Na **Figura 18** estão expostos os espectros da análise comparando a geomembrana verde antes (linha azul) e após procedimento de degradação por exposição em câmara UV por 500 h (linha vermelha) e 1000 h (linha preta).

Figura 18 - Espectro infravermelho de geomembrana PEAD verde antes e após envelhecimento em câmara UV



Fonte: Autor (2025)

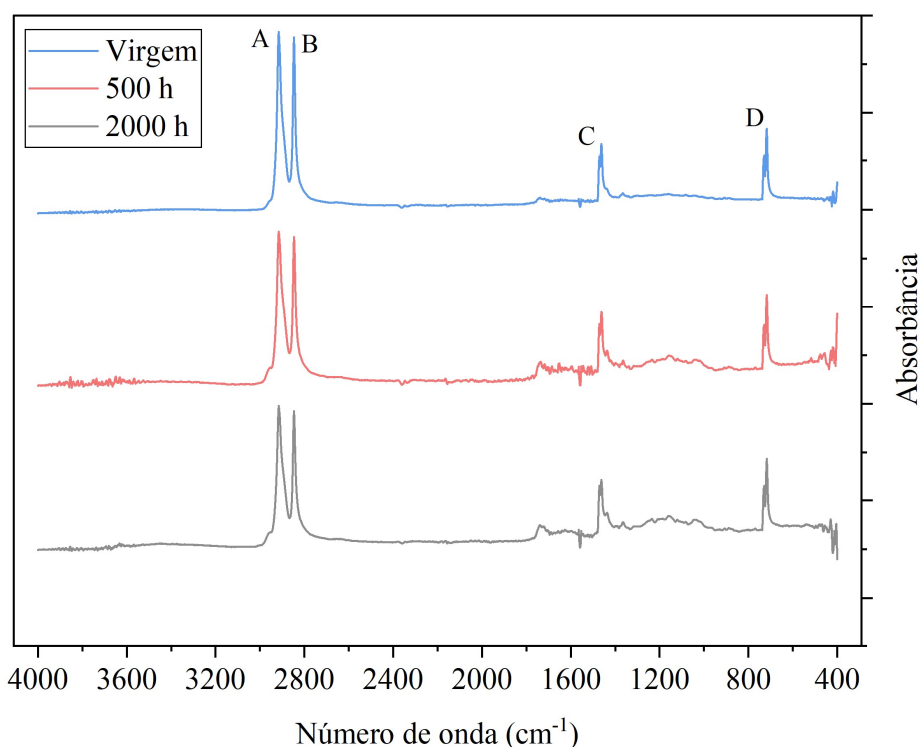
Assim como as amostras que foram expostas ao intemperismo natural, o espectro da amostra envelhecida manteve as bandas características da assinatura espectral do PEAD, indicando que a estrutura principal do polímero foi preservada. As bandas A e B se mantiveram em destaques, seguidas das bandas C e D, que por suas vezes obtiveram aumento relativo de suas intensidades em relação às demais bandas.

Apesar do aumento relativo das bandas C e D, indicando reorganização estrutural (aumento aparente da fração cristalina) e mudanças morfológicas superficiais, não foi observado aumento da banda em 1710 cm^{-1} em relação às demais, o que indica que não há evidência clara de formação adicional de carbonilas detectáveis após 500 h e 1000 h. No entanto, o alargamento da região de 3400 cm^{-1} após 1000 h de exposição sugere a intensificação do grupo hidroxila, associado à formação de álcoois e ácidos carboxílicos.

Preta

Na **Figura 19** estão expostos os espectros da análise comparando a geomembrana preta antes (linha azul) e após procedimento de degradação por exposição em câmara UV por 500 h (linha vermelha) e 2000 h (linha preta).

Figura 19 - Espectro infravermelho de geomembrana PEAD preta antes e após envelhecimento em câmara UV



Fonte: Autor (2025)

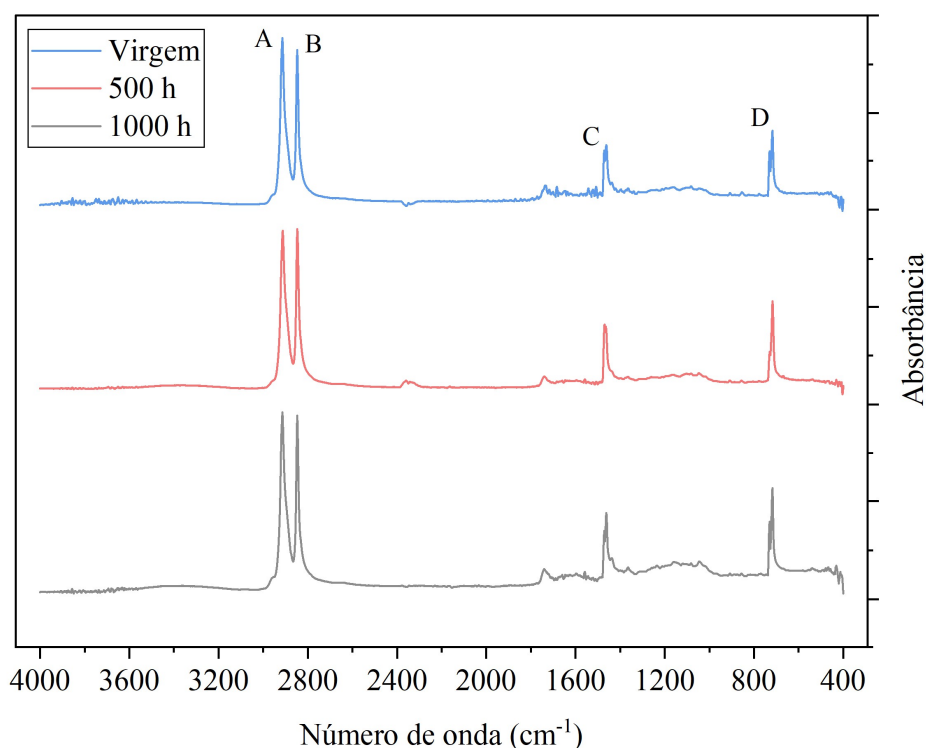
Assim como a amostra verde, o espectro da amostra envelhecida manteve as bandas características da assinatura espectral do PEAD, indicando que a estrutura principal do polímero foi preservada. As bandas A e B diminuíram de intensidade, enquanto as bandas C e D mantiveram suas intensidades sem variações significativas.

Apesar da diminuição de intensidade das bandas A e B, indicando mudanças morfológicas superficiais, não foi observado aumento significativo da banda em 1710 cm^{-1} em relação às demais. Ao mesmo tempo, a região de 3400 cm^{-1} sugere a não ampliação do grupo hidroxila. Já para a região entre 800 e 1200 cm^{-1} houveram alterações, indicando formação de compostos como alcenos e álcoois, por exemplo.

Preta/Branca

Na **Figura 20** estão os espectros da borda lisa de geomembrana preta/branca antes (linha azul) e após procedimento de degradação por exposição em câmara UV por 500 h (linha vermelha) e 1000 h (linha preta).

Figura 20 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana PEAD preta/branca antes e após envelhecimento em câmara UV



Fonte: Autor (2025)

Assim como as amostras anteriores, os espectros das amostras envelhecidas mantiveram as bandas características da assinatura espectral do PEAD, indicando que a estrutura principal do polímero foi preservada. A banda A manteve sua intensidade sem variações significativas, enquanto as bandas B, C e D tiveram pequenas variações ao longo do tempo.

A banda em 1710 cm⁻¹ não apresentou grande variação em relação a amostra virgem, que já apresentava a carbonila em seu espectro, indicando que o processo de oxidação já havia iniciado. A região da hidroxila, por sua vez, apresentou leve alargamento de suas bandas, sugerindo intensificação do grupo.

Sendo assim, mesmo após o envelhecimento acelerado em câmara UV, as três geomembranas mantiveram a estrutura química do PEAD, preservando as bandas características e com ausência de crescimento significativo na banda de 1700 cm⁻¹. Porém as variações identificadas, como o aumento relativo das bandas C e D na geomembrana verde, redução das bandas A e B na geomembrana preta e o leve alargamento da região 3400 cm⁻¹ na geomembrana preta/branca, indicam ajustes morfológicos. Alinhado a isto, as conclusões de Aparicio-Ardila (2025) relatam depleção acelerada de antioxidantes em geomembranas

coloridas e do potencial início de mudanças mecânicas após as exposições, onde as amostras preta e preta/branca permanecem no estágio 1 de oxidação durante os tempos de exposição avaliados e a geomembrana verde no estágio 2.

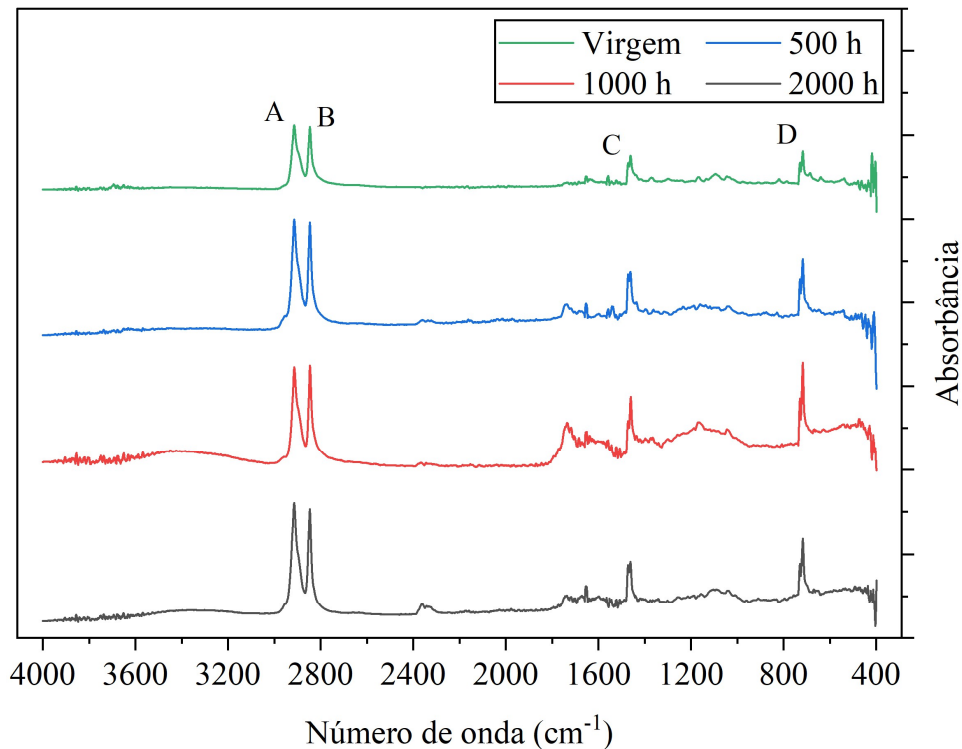
Os gráficos correspondentes às triplicatas dos ensaios para o grupo de geomembranas submetidas ao envelhecimento em câmara UV são apresentados no Apêndice B.

4.3. GEOMEMBRANAS PELO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Geomembrana texturizada fabricada por extrusão plana

A **Figura 21** contém os espectros da análise comparando geomembranas texturizadas fabricadas pelo método de extrusão plana antes (linha verde) e após envelhecimento em câmara UV a 500 h (linha azul), 1000 h (linha vermelha) e 2000 h (linha preta).

Figura 21 - Espectro infravermelho de geomembrana texturizada PEAD fabricada por extrusão plana antes e após envelhecimento em câmara UV



Fonte: Autor (2025)

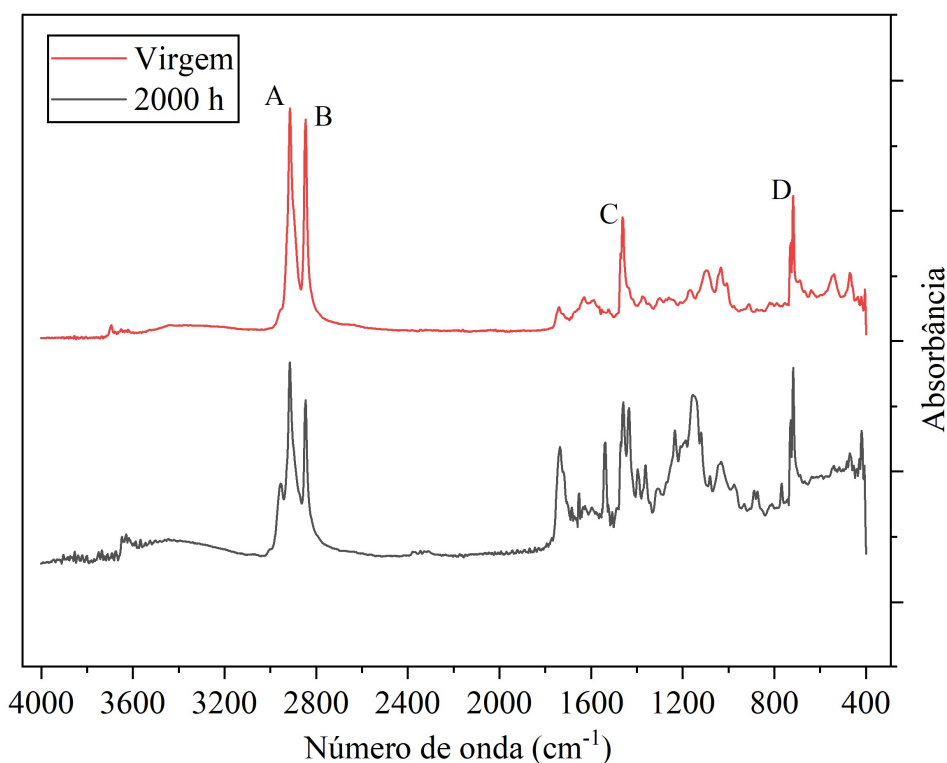
Os espectros das geomembranas envelhecidas mantiveram as bandas características da assinatura espectral do PEAD (A, B, C e D), porém com variação de suas intensidades e surgimento de novos picos, como o de O=C=O (dióxido de carbono) na região de 2349 cm^{-1} , onde este pode ter ocorrido por absorção presente no ar no momento da realização do ensaio.

A banda em 1710 cm^{-1} (que já havia aparecido na amostra virgem) apresentou leve aumento de intensidade ao longo do envelhecimento da amostra. A banda em 3400 cm^{-1} , por sua vez, não era evidente na geomembrana virgem, mas passou a ser observada com clareza a partir de 1000 h de envelhecimento. A região entre 800 e 1200 cm^{-1} apresentou significativa variações de intensidade, indicando formação de compostos.

Borda lisa de geomembrana texturizada fabricada por extrusão plana

A **Figura 22** contém os espectros da análise comparando a borda lisa de geomembranas texturizadas fabricadas pelo método de extrusão plana antes (linha vermelha) e após envelhecimento em câmara UV a 2000 h (linha preta).

Figura 22 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana texturizada PEAD fabricada por extrusão plana antes e após envelhecimento em câmara UV



Fonte: Autor (2025)

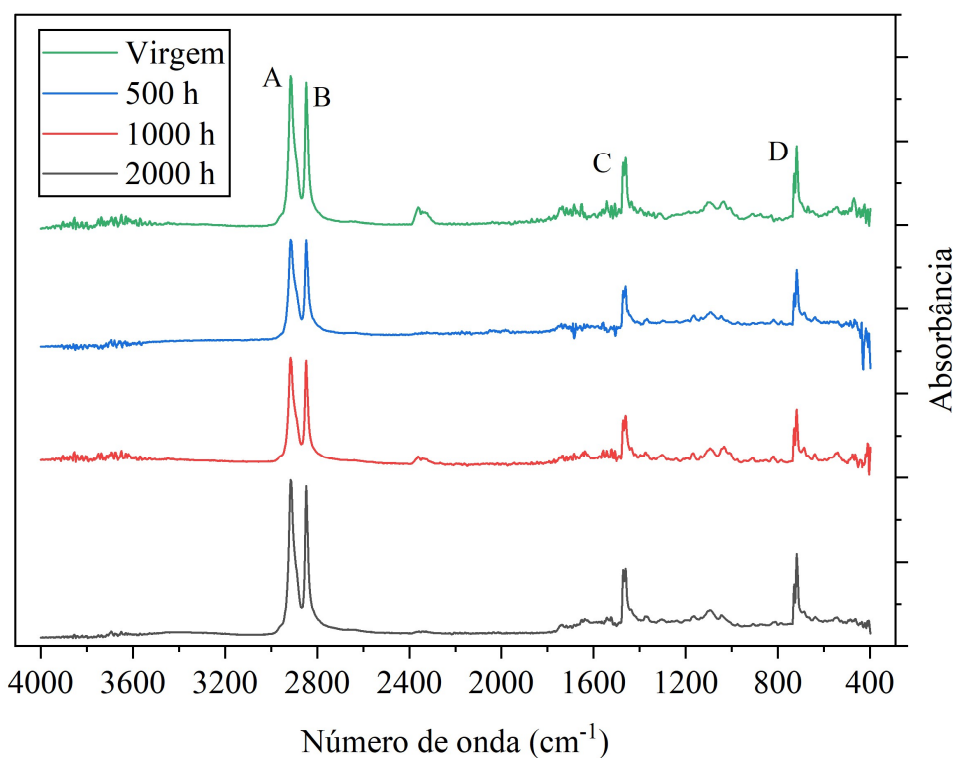
O espectro da borda lisa da geomembrana envelhecida fabricada por extrusão plana apresentou, até então, as maiores variações de intensidades, tanto das bandas características do PEAD, quanto das demais bandas. Foi observado que houve um amplo aumento da intensidade da banda C e D em comparação com as bandas A e B, onde esta última sugere uma maior contribuição das vibrações associadas à fase cristalina do material.

As bandas em 1710 cm^{-1} , 3400 cm^{-1} e entre 800 e 1200 cm^{-1} , que já eram claramente visíveis na amostra virgem, apresentaram um aumento expressivo de intensidade, onde a primeira indica forte oxidação.

Geomembrana texturizada fabricada por extrusão balão

A **Figura 23**, por sua vez, contém os espectros da análise comparando geomembranas texturizadas fabricadas pelo método de extrusão balão antes (linha verde) e após degradação em câmara UV a 500 h (linha azul), 1000 h (linha vermelha) e 2000 h (linha preta).

Figura 23 - Espectro infravermelho de geomembrana texturizada PEAD fabricada por extrusão balão antes e após envelhecimento em câmara UV



Fonte: Autor (2025)

Os espectros das geomembranas envelhecidas fabricadas pelo método de extrusão balão também mantiveram as bandas características da assinatura espectral do PEAD após envelhecimento até 2000 h e, como esperado, houveram variação de suas intensidades. O surgimento da banda de dióxido de carbono ocorreu, provavelmente, devido absorção do gás no momento do ensaio.

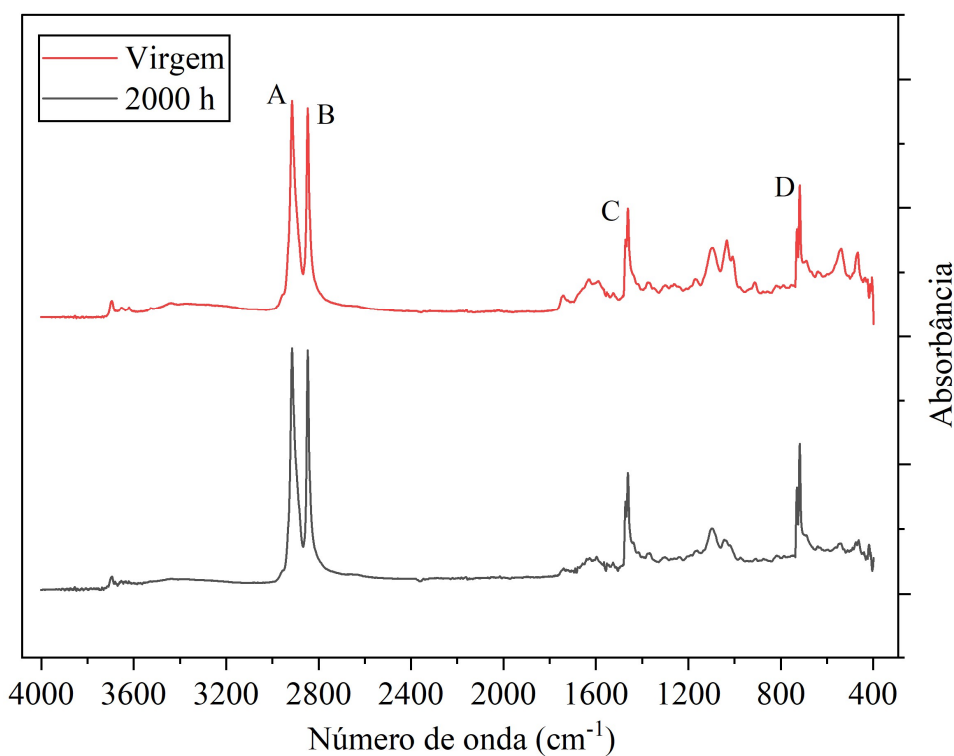
A banda em 1710 cm^{-1} , que já continha bandas de carbonila devido envelhecimento no arquivo do fabricante, apresentou leve aumento de intensidade e alargamento de banda ao longo

do envelhecimento da amostra. A banda em 3400 cm^{-1} apresentou leve exibição em 2000 h. A região entre 800 e 1200 cm^{-1} , que já estava presente na geomembrana virgem, também apresentou variações de intensidade.

Borda lisa de geomembrana texturizada fabricada por extrusão balão

A **Figura 24** contém os espectros da análise comparando a borda lisa de geomembranas texturizadas fabricadas pelo método de extrusão balão antes (linha vermelha) e após envelhecimento em câmara UV a 2000 h (linha preta).

Figura 24 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana texturizada PEAD fabricada por extrusão balão antes e após envelhecimento em câmara UV



Fonte: Autor (2025)

O espectro da borda lisa da geomembrana envelhecida fabricada por extrusão balão apresentou aumento de intensidade das bandas características do PEAD, principalmente das bandas A, B e D.

As bandas em 1710 cm^{-1} e 3400 cm^{-1} (que já haviam aparecido na amostra virgem) se mantiveram constante, com leve variação. A região entre 800 e 1200 cm^{-1} , que também já estava presente na geomembrana virgem, obtiveram suavização de suas bandas.

De modo geral, as variações espectrais observadas nas geomembranas texturizadas, tanto por extrusão plana quanto por extrusão balão, corroboram a tendência apontada por

Aparicio-Ardila (2025) de que a porção de borda lisa apresenta maior suscetibilidade à degradação oxidativa. O aumento mais pronunciado das bandas associadas a carbonilas, hidroxilas e da região 800–1200 cm^{-1} na borda lisa das geomembranas por extrusão plana indica um processo oxidativo mais avançado e formação acelerada de produtos secundários, coerente com a maior perda de antioxidantes e avanço mais rápido nos estágios de oxidação relatados pela autora. Já as geomembranas texturizadas, em ambas as técnicas de fabricação, mostraram alterações espectrais mais moderadas ao longo do envelhecimento.

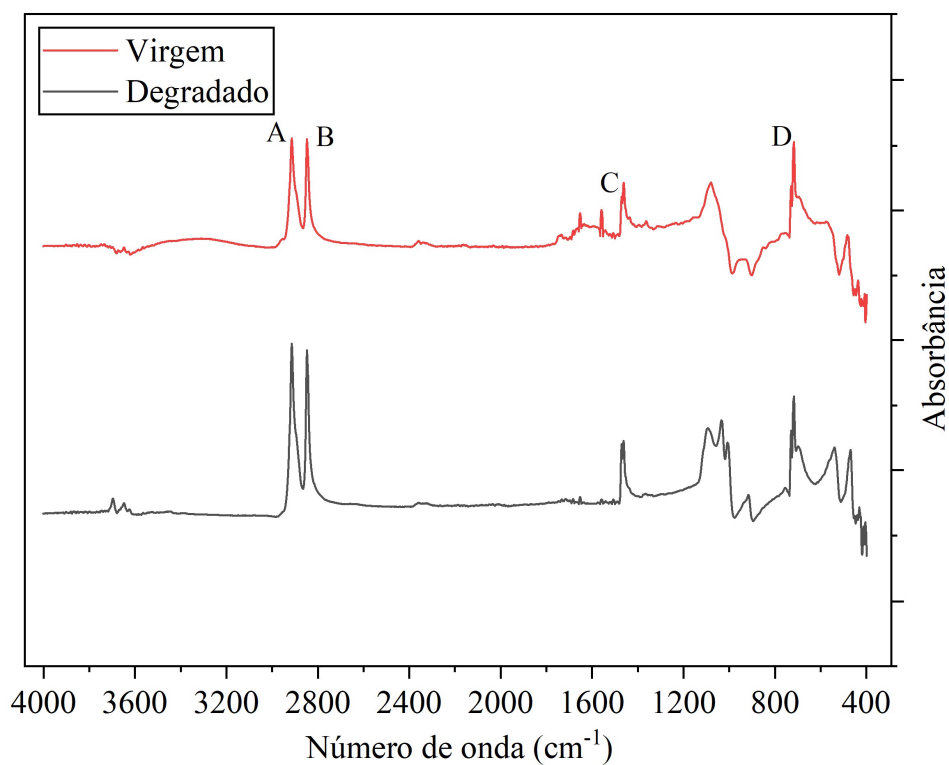
Os gráficos correspondentes às triplicatas dos ensaios realizados nas geomembranas analisadas quanto ao processo de fabricação são apresentados no Apêndice C.

4.4. GEOMEMBRANAS EXUMADAS DE ATERROS SANITÁRIOS

Geomembrana texturizada aplicada em aterro sanitário de SP

A **Figura 25** contém os espectros da análise comparando geomembranas texturizadas antes (linha vermelha) e após a cobertura do aterro sanitário na cidade de SP (linha preta).

Figura 25 - Espectro infravermelho de geomembrana texturizada PEAD antes e após aplicada em aterro de SP



Fonte: Autor (2025)

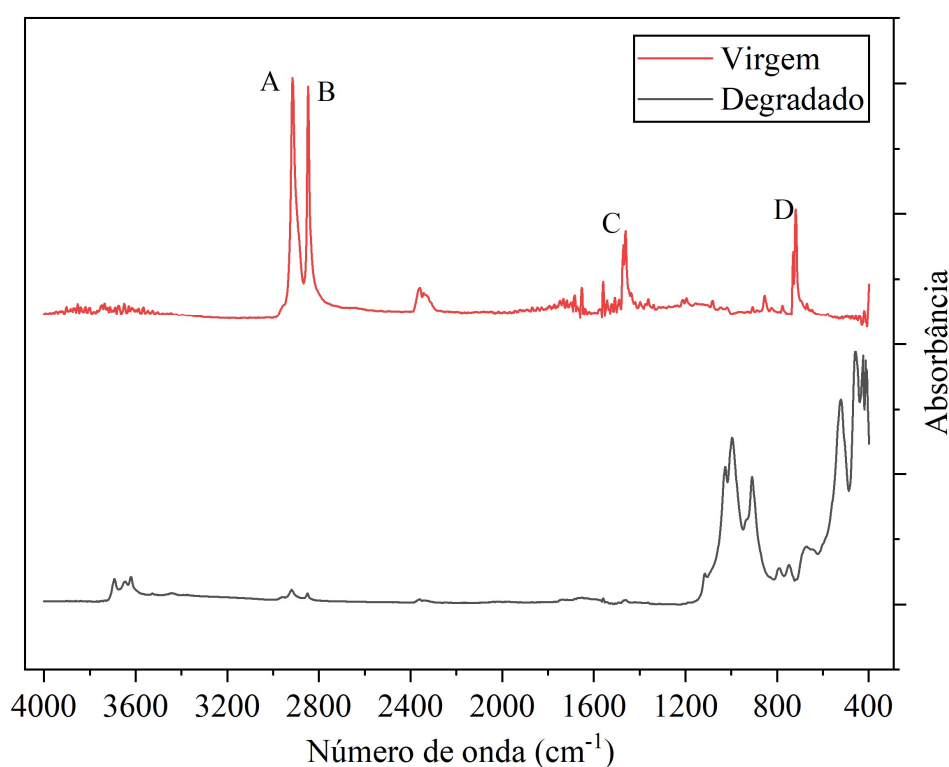
O espectro da geomembrana envelhecida manteve as bandas características da assinatura espectral do PEAD (A, B, C e D), porém com variação de suas intensidades, principalmente nas bandas A e B, onde houveram os maiores aumentos.

A banda em 1710 cm^{-1} (que havia aparecido na amostra virgem) apresentou diminuição de intensidade com o envelhecimento da amostra, o que pode estar relacionado à transformação dos grupos carbonila em outros produtos oxidativos. Na região entre 800 e 1200 cm^{-1} foram observados intensificações e alargamento das bandas, indicando alterações morfológicas nas cadeias do PEAD.

Borda lisa de geomembrana texturizada aplicada em aterro sanitário de SP

A **Figura 26** contém os espectros da análise comparando as bordas lisas de geomembranas texturizadas antes (linha vermelha) e após aplicada em cobertura de aterro sanitário na cidade de SP (linha preta).

Figura 26 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana texturizada PEAD antes e após aplicada em aterro de São Paulo



Fonte: Autor (2025)

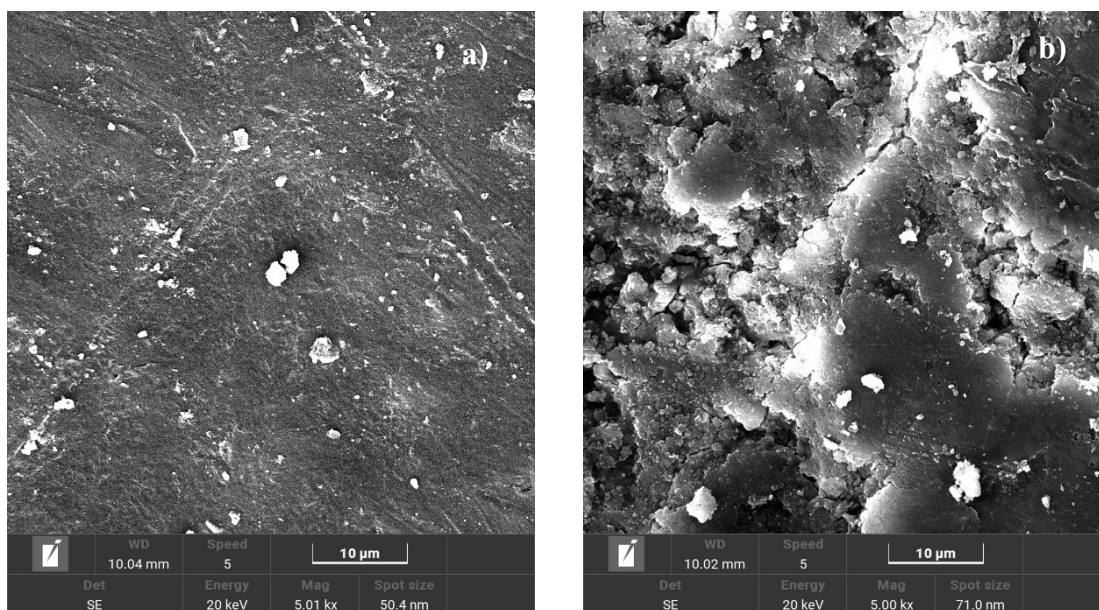
O espectro da borda lisa da geomembrana envelhecida apresentou alterações expressivas em suas bandas características. As bandas A e B sofreram redução extrema de

intensidade, enquanto os picos associados às bandas C e D deixaram de ser visualmente distinguíveis no espectro, evidenciando modificações substanciais na resposta vibracional do material relativos às bandas características do PEAD.

A região de carbonila exibiu alargamento sútil, sugerindo alterações relacionadas a processos oxidativos, ainda que sem formação clara de novos picos bem definidos. Surgiram novos picos na região da hidroxila, indicando modificações químicas associadas à introdução de grupos O–H na estrutura do material. Já a região entre 800 e 1200 cm^{-1} apresentou intensificação e alargamento das bandas, comportamento que indica alterações morfológicas nas cadeias do PEAD, provavelmente associadas a reorganização estrutural.

Na **Figura 27** estão expostos os ensaios por meio de MEV do material virgem e após sua degradação no aterro sanitário com aproximação de 5000x.

Figura 27 - Micrografias de MEV da borda lisa de geomembrana antes (a) e após aplicada em aterro em SP (b)



Fonte: Autor (2025)

O ensaio de MEV e a análise de EDS na borda lisa da geomembrana texturizada também demonstrou alterações químicas significativas, além das alterações físicas. Conforme **Tabela 10**, o EDS da amostra virgem, dentre os elementos detectáveis, constatou uma alta proporção de carbono a 88,06 at% e um teor de oxigênio de 11,46 at%. Já na geomembrana degradada (b), registrou-se um aumento no teor de oxigênio para 26,76 at% e uma redução teor de carbono para 50,34 at%.

Tabela 10 - EDS das geomembranas virgem e degradada após aplicação em aterro

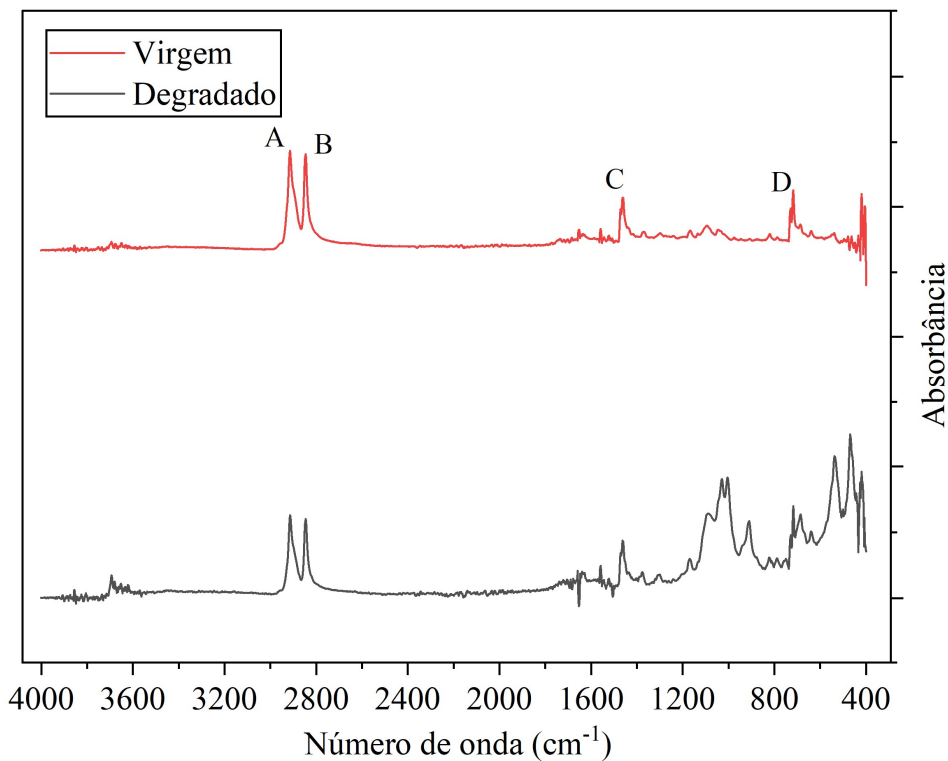
Elemento detectável	Virgem	Degradada
Carbono (at%)	88,06	50,34
Oxigênio (at%)	11,46	26,76

Fonte: Autor (2025)

Geomembrana texturizada aplicada em aterro sanitário do RJ

A **Figura 28** contém os espectros da análise comparando geomembranas texturizadas antes (linha vermelha) e após a cobertura do aterro sanitário na cidade do RJ (linha preta).

Figura 28 - Espectro infravermelho de geomembrana texturizada PEAD antes e após aplicada em aterro do RJ



Fonte: Autor (2025)

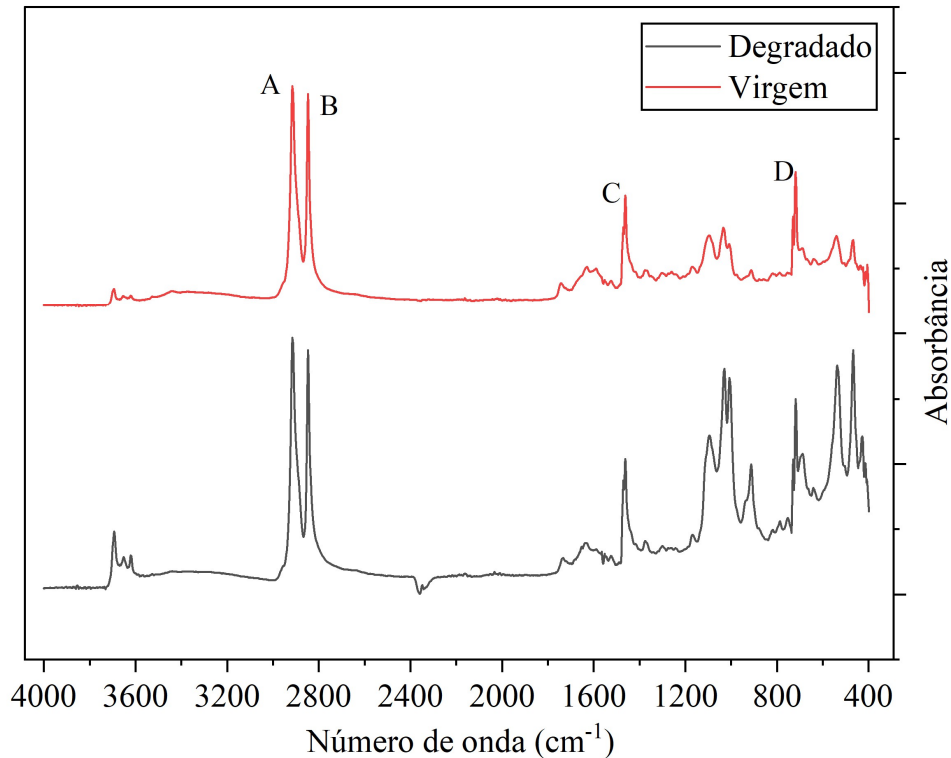
O espectro da geomembrana envelhecida aplicada no RJ apresentou alterações significativas em suas bandas características A, B e D. Já as bandas C manteve a sua intensidade sem muita variação.

As regiões de 1710 cm^{-1} e 3400 cm^{-1} não obtiveram mudanças consideráveis. Porém a região entre 800 e 1200 cm^{-1} apresentaram intensificação das suas bandas.

Borda lisa de geomembrana texturizada aplicada em aterro sanitário do RJ

A **Figura 29** contém os espectros da análise comparando as bordas lisas de geomembranas texturizadas antes (linha vermelha) e após aplicada em cobertura de aterro sanitário na cidade do RJ (linha preta).

Figura 29 - Espectro infravermelho da borda lisa de geomembrana texturizada PEAD antes e após aplicada em aterro do Rio de Janeiro



Fonte: Autor (2025)

O espectro da borda lisa da geomembrana envelhecida aplicada no RJ manteve as bandas características da assinatura espectral do PEAD, porém com variação de suas intensidades, principalmente nas bandas A, B e D.

Em relação às bandas ligadas à degradação do material, a banda em 1710 cm^{-1} se manteve a mesma, já a de 3400 cm^{-1} aumentou de intensidade. Na região entre 800 e 1200 cm^{-1} , assim como na geomembrana texturizada, foram observados intensificações e alargamento das bandas.

Dessa forma, os resultados espectrais indicam que o processo de degradação das geomembranas aplicadas nos aterros sanitários ocorreu de maneira diferenciada entre as porções texturizadas e bordas lisas, e entre os locais SP e RJ. As análises por FTIR indicam que

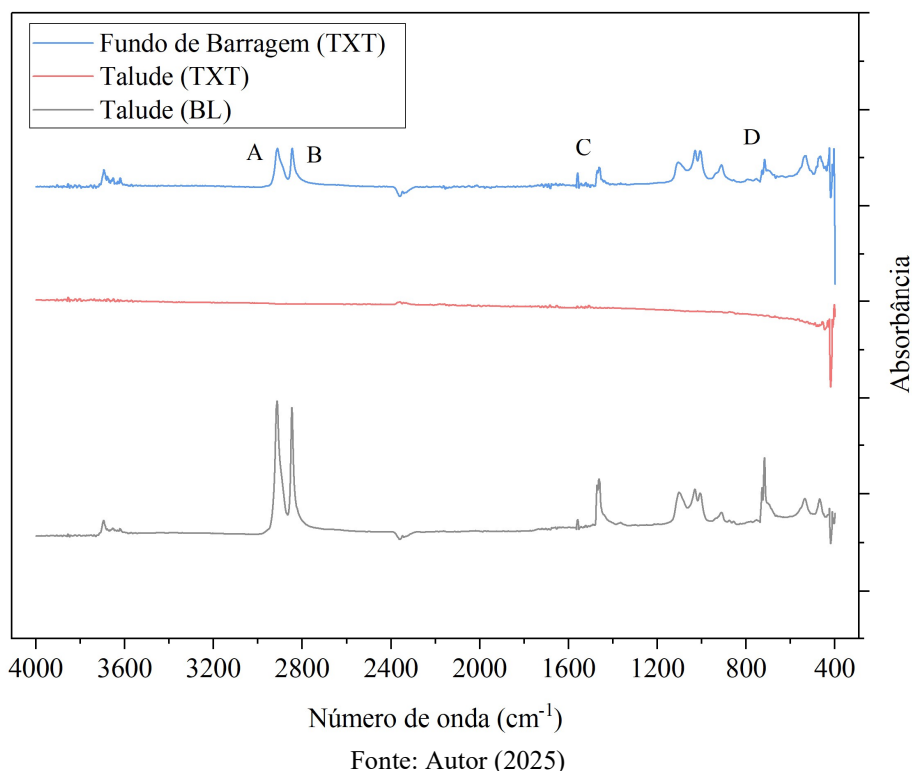
as porções BL, principalmente no aterro de SP, apresentaram as variações mais intensas, ocorrendo reorganizações estruturais no PEAD. Esse comportamento é compatível com a menor retenção de antioxidantes observada por Aparicio-Ardila (2025), principalmente na porção de borda lisa do aterro de SP, que exibiu a menor retenção do tempo de indução à oxidação padrão (Std-OIT, em inglês) (5%) e desempenho mecânico inferior aos limites normativos. Por outro lado, as porções TXT, embora também apresentem variações de intensidade espectral e modificações morfológicas, mantiveram melhor preservação de suas bandas características, comportamento coerente com sua permanência no Estágio I de oxidação. Além disso, as diferenças espectrais entre SP e RJ podem estar influenciadas pelas condições ambientais locais, como altitude e composição dos materiais dos aterros sanitários, destacadas por Aparicio-Ardila como fatores prováveis para a aceleração da depleção antioxidante e para a evolução diferenciada dos mecanismos de degradação.

Os gráficos correspondentes às triplicatas dos ensaios para o grupo de geomembranas exumadas de aterros sanitário são apresentados no Apêndice C.

4.5. GEOMEMBRANAS EXUMADAS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

No caso das geomembranas aplicadas na barragem de rejeitos, a **Figura 30** apresenta os espectros da porção texturizada coletada no fundo da barragem (linha azul), da porção texturizada coletada do talude (linha vermelha) e da borda lisa da geomembrana texturizada coletada do talude (linha preta).

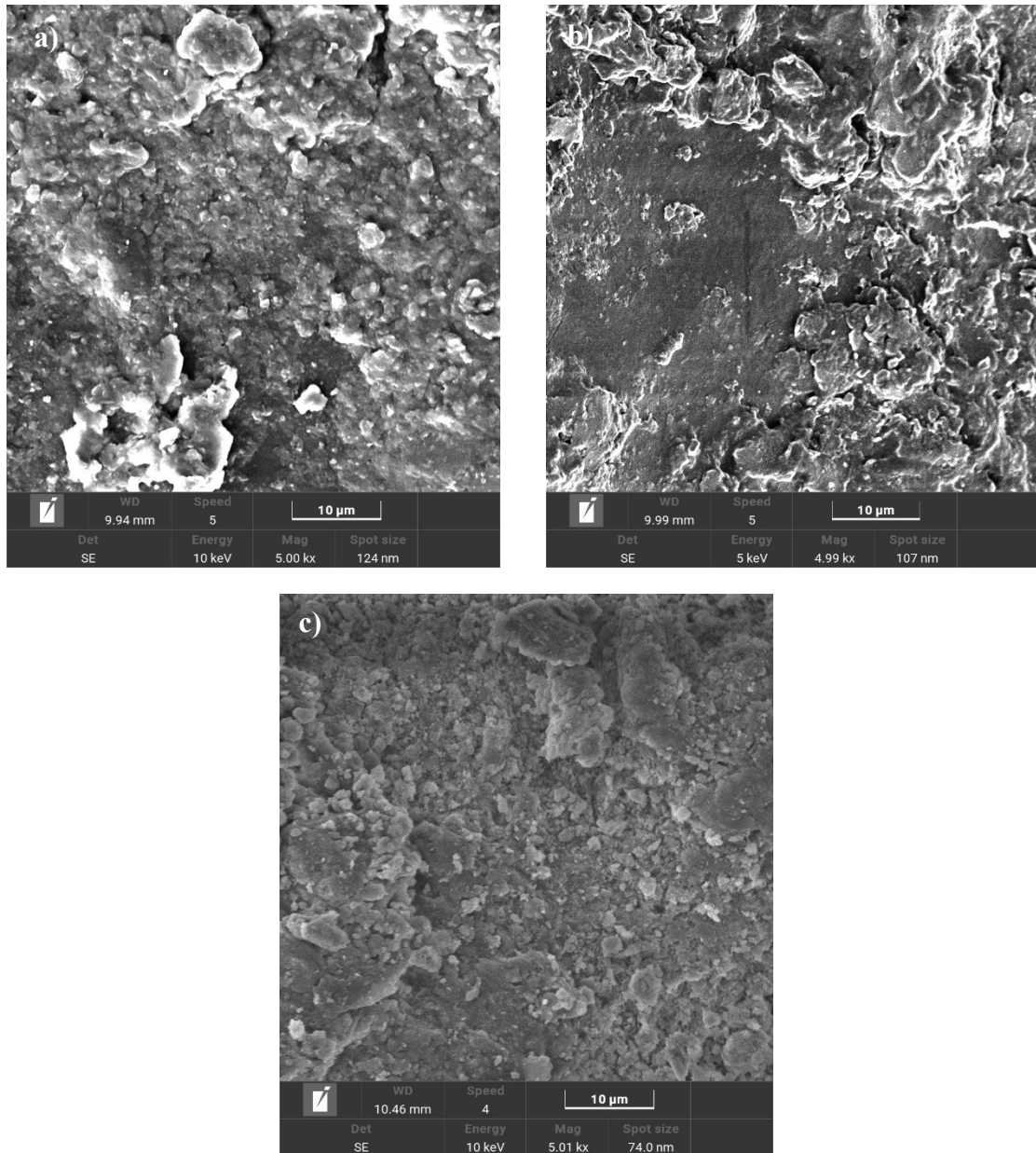
Figura 30 - Espectro infravermelho de geomembranas PEAD aplicadas em barragem de rejeito



Após aproximadamente 20 anos de operação da barragem de rejeitos de zinco, as geomembranas avaliadas, principalmente as porções texturizadas instaladas no fundo e no talude, apresentaram alterações significativas em seus espectros quando comparadas ao espectro de referência do PEAD. A geomembrana texturizada localizada no fundo da barragem exibiu uma redução acentuada das bandas características do polímero, além do surgimento de absorções associadas ao grupo hidroxila, indicando modificações químicas relevantes no material. A porção texturizada do talude, por sua vez, apresentou o quadro mais crítico, evidenciando a completa perda das bandas características do PEAD e sugerindo degradação mais avançada. Em contrapartida, o espectro da borda lisa da geomembrana instalada no talude manteve preservadas as bandas típicas do material, embora apresentasse a presença de absorções relacionadas à hidroxila e intensificação da região entre 800 e 1200 cm⁻¹, comportamento que sugere alterações morfológicas e químicas menos severas quando comparadas às porções texturizadas.

Na **Figura 31** estão expostos os ensaios por meio de MEV das geomembranas texturizadas aplicadas na barragem de rejeito com aproximação de 5000x.

Figura 31 - Micrografias de MEV da geomembrana texturizada aplicada no fundo da barragem (a), no talude (b) e a borda lisa aplicada no talude (c)



Fonte: Autor (2025)

Para o caso da geomembrana texturizada aplicada no fundo da barragem de rejeito, o EDS, conforme **Tabela 11**, identificou uma proporção de carbono a 67,50 at% e um teor de oxigênio de 25,83 at%. Já na geomembrana texturizada aplicada no talude, foi constatado carbono a 84,83 at% e oxigênio de 14,57 at%. Por sua vez, a borda lisa da geomembrana texturizada apresentou teor de carbono a 20,51 at% e teor de oxigênio a 40,36% at%.

Tabela 11 - EDS das geomembranas aplicadas em barragem de rejeito

Elemento detectável	Fundo da barragem (TXT)	Talude (TXT)	Talude (borda lisa)
Carbono (at%)	67,50	84,83	20,51
Oxigênio (at%)	25,83	14,57	40,36

Fonte: Autor (2025)

De modo geral, as alterações espectrais observadas nas geomembranas aplicadas na barragem corroboram as conclusões apresentadas por Aparicio-Ardila (2025) quanto ao comportamento físico e químico do material após o longo período de serviço. A forte perda das bandas do PEAD nas porções texturizadas do talude, acompanhada pela intensificação das regiões associadas a processos oxidativos, é coerente com a maior depleção antioxidante identificada pela autora nessa mesma porção, atribuída à maior área superficial em contato com os rejeitos e à exposição direta à radiação solar. A preservação parcial das bandas na geomembrana texturizada do fundo da barragem, bem como a manutenção mais evidente das bandas características na borda lisa do talude, também concordam com o comportamento descrito no estudo, que aponta maior durabilidade e menor taxa de oxidação para o material que permaneceu coberto.

Os gráficos correspondentes às triplicatas dos ensaios para o grupo de geomembranas exumadas de barragem de rejeito de mineração são apresentados no Apêndice C.

5. CONCLUSÃO

A partir das análises espectrais realizadas por FTIR e corroboradas por MEV nas diferentes condições de exposição, foi possível avaliar a evolução das geomembranas de PEAD e identificar aquelas que preservaram as características mais estáveis ao longo do tempo. As observações obtidas pelo FTIR indicaram que as geomembranas expostas ao intemperismo apresentaram maior variação entre as bandas de 800 a 1200 cm^{-1} , enquanto as amostras submetidas à radiação UV em laboratório apresentaram alterações mais próximas de 1700 e 3400 cm^{-1} . Além disso, as análises complementares do MEV contribuíram para identificar os elementos presentes na superfície das geomembranas, auxiliando na interpretação da degradação observada.

- Geomembranas submetidas ao intemperismo natural: A geomembrana preta/branca apresentou as alterações espectrais mais intensas nas bandas ligadas à degradação de PE, seguida pela geomembrana verde. A geomembrana preta foi a mais estável, exibindo pequenas variações espectrais e baixa evolução oxidativa, apresentando a maior estabilidade química.
- Geomembranas expostas à radiação UV em câmara de envelhecimento: A geomembrana verde apresentou as alterações mais pronunciadas, indicando maior sensibilidade ao UV. A geomembrana preta exibiu redução moderada das bandas A e B, sem evolução significativa da região de 1710 cm^{-1} . Já a borda lisa da geomembrana texturizada preta/branca apresentou o comportamento mais estável, mantendo as bandas características do PEAD e exibindo apenas leves variações na região de 3400 cm^{-1} .
- Geomembranas pelo processo de fabricação: As geomembranas texturizadas apresentaram desempenho superior em ambos os processos de fabricação, exibindo melhor preservação das bandas características do PEAD. Já as porções de borda lisa, tanto na extrusão plana quanto na extrusão balão, foram mais suscetíveis às variações morfológicas. De modo geral, a geomembrana texturizada fabricada por extrusão balão apresentou a maior estabilidade.
- Geomembranas exumadas de aterros sanitários: As amostras exumadas do aterro de SP exibiram variações espectrais mais intensas que as do RJ, sugerindo maior grau de alteração morfológica. Embora tenham permanecido em serviço por menos tempo, essas diferenças podem estar relacionadas à maior altitude do aterro de SP ou às particularidades dos materiais que compõem cada aterro.

- Geomembranas exumadas de rejeitos de mineração: A porção texturizada do talude mostrou a degradação mais avançada, resultado de sua exposição direta à radiação solar e da maior área superficial em contato com os rejeitos. A porção texturizada do fundo da barragem apresentou alterações intermediárias, preservando parcialmente a assinatura espectral do PEAD, comportamento atribuído ao fato de permanecer enterrada e protegida da radiação UV. Já a porção borda lisa do talude exibiu a maior estabilidade.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para aprofundar os resultados obtidos neste estudo, recomenda-se que pesquisas futuras incluam uma análise quantitativa dos espectros de FTIR, principalmente por meio do cálculo da área sob a curva nas bandas de interesse. Essa abordagem ajudaria a quantificar de forma mais objetiva o avanço da oxidação e a comparar diferentes níveis de degradação entre amostra. Também é interessante considerar o uso da espectroscopia NIR, que permite análises rápidas e complementares ao FTIR, oferecendo novas informações sobre alterações estruturais no material e ajudando a monitorar a degradação das geomembranas de maneira prática. Essas duas propostas podem ampliar o entendimento do comportamento das geomembranas ao longo do tempo e contribuir para estudos mais completos sobre sua durabilidade.

REFERÊNCIAS

- APARICIO-ARDILA, Maria Alejandra Aparicio. *Durability of textured HDPE geomembranes in environmental protection applications*. 2025. Doctoral Thesis (Doctor of Science in Geotechnical Engineering) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12553:2003 — Geotêxteis*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12553:2013 — Geotêxteis*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 10318:2016 — Geossintéticos — Termos e definições*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 22 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14724:2024 — Apresentação de trabalhos acadêmicos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. 36 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15352:2005 — Mantas termoplásticas de polietileno para sistemas de impermeabilização de reservatórios, canais, lagoas e aterros sanitários — Requisitos e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 20 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6023:2023 — Informação e documentação — Referências — Elaboração*. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. 52 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 10318:2013 — Geossintéticos — Termos e definições*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 23 p.
- AZUMA, Y. *et al. Outdoor And Accelerated Weathering Tests For Polypropylene And Polypropylene/Talc Composites: A Comparative Study Of Their Weathering Behavior*. Polym. Degrad. Stabil. 94, 2267–2274.
- BARROSO, M. C. P.; LOPES, M. G. *Integridade das geomembranas: influência da exposição aos agentes atmosféricos*. In: 12º Congresso Nacional de Geotecnia, 2004, Coimbra. *Anais...* Lisboa: SPG – Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2004. p. 585–594.
- CARNEIRO, J. R. C. *Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de caráter ambiental: a importância da incorporação de aditivos químicos*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.
- CASARANO, R. *Compósitos formados por polietileno modificado e celulose: obtenção e caracterização*. 2004. 119 f. Tese (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- COELHO, M. F. L.; LAVOIE, F. L. *Comportamento da geomembrana de PEAD exposta ao envelhecimento acelerado*. In: 14. ed., Congresso Brasileiro de Polímeros, 2017, Águas de Lindóia. *Anais [...]*. São Paulo: [s.n.], 2017.

COSTA, A. H. *Versatilidade dos geossintéticos aplicada à engenharia*. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT). Revista Científica da AEDB, v. 3, n. 1, p. 1–10, 2020.

CURCIO, M. S. *TiO₂ Sol-Gel For Formaldehyde Photodegradation using Polymeric Support: Photocatalysis Efficiency Versus Material Stability*. Environ. Sci. Pollut. Control Ser. 22 (2), 800–809, 2015.

DI NÚBILA, C. S.A. *Estudo comparativo do desempenho térmico de telhados verdes com diferentes materiais drenantes em Curitiba-PR*. 2020. 272 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

DIAS FILHO, J. L. E.; CRUZ JUNIOR, E. S. N.; MAIA, P. C. A. *Revisão crítica da utilização da espectrofotometria para a caracterização de geossintéticos*. In: REGEO – IX Congresso Brasileiro de Geossintéticos; X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2023, Salvador. *Anais...* Salvador: IGS Brasil/ABMS, 2023. 10 p.

DIAS FILHO, J. L. E.; MAIA, P. C. A.; XAVIER, G. C. *Spectrophotometry as a tool for characterizing durability of woven geotextiles, Geotextiles and Geomembranes*. [S.l.]: Darcy Ribeiro State University of Northern Rio de Janeiro, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.02.002>.

DIAS FILHO, J. L. E.; SILVA, J. L. *Estudo da Durabilidade de Geossintéticos*. In: LEONEL, Edson Denner; CHINELATTO, Marcelo Aparecido (Org.). *Avanços Recentes em Ciências da Engenharia*. v. 1. São Carlos, EESC USP, 2025. 80-103. DOI: 10.11606/9786586954524

ENGEOPOL; NORTÈNE. *Manual de geossintéticos*. 4. ed. Barueri – SP: Engepol Geossintéticos Ltda / Nortène Plásticos Ltda, [s.d.]. 85 p.

EWAIS, A. M. R.; ROWE, R. K. *Effects of blown film process on initial properties of HDPE geomembranes of different thicknesses*. Geosynthetics International, v. 21, n. 1, p. 62–82, 2014. DOI: 10.1680/gein.13.00035.

FERREIRA, F. G. Domingues. *Fotodegradação e efeito combinado da radiação gama/biodegradação em blendas polietileno/amido*. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

FRANGIPANI, M. J. O. *Estudo do tensofissuramento em geomembranas de polietileno de alta densidade utilizadas em aterros de resíduos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

GRI – GEOSYNTHETIC RESEARCH INSTITUTE. *GM13 Standard Specification: Test methods, test properties and testing frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes*. Revision 16, Mar. 17, 2021. Folsom, PA: Geosynthetic Institute, 2021.

GRI – GEOSYNTHETIC RESEARCH INSTITUTE. *GM13: Standard Specification for Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes*. Revision 19: June 11, 2025. Folsom, PA: GRI, 2025.

KATO, H. *Measurement of UV-degraded polymer materials using a thermal analyzer*. [S. l.]: Shimadzu Corporation, 2022. 3 p.

KOERNER, R. M.; KOERNER, G. R. *Temperature behavior of field deployed HDPE geomembranes*. [S. l.]: GSI, 1995.

KOVÁCS, R. L. *et al. Surface characterization of plasma-modified low density polyethylene by attenuated total reflectance Fourier-transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopy combined with chemometrics*. *Polymer Testing*, Amsterdam, v. 96, 107080, jan. 2021.

KWON, H. J. *TiO₂ Unidimensional Nanoestruturas Com Propriedades De Bloqueio De UV Melhoradas*. *Mater. Lett.* 93 (1), 175–178, 2013.

LAVOIE, F. L.; COELHO, M. F. L. *Geomembranas e suas principais aplicações*. *Revista Fundações e Obras Geotécnicas*, São Paulo, n. 93, 2018.

LAVOIE, F. L. *et al. Durability of HDPE geomembranes: An overview*. *Química Nova*, v. 43, n. 5, p. 656-667, 2020. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170540>

LAVOIE, F. L. *et al. Laboratory Study of the Ultraviolet Radiation Effect on an HDPE Geomembrane*. *Membranes*, Basel, v. 11, n. 5, 390, 2021

LIM, X.Z. *Microplastics are everywhere — but are they harmful?* *Nature*, v. 593, p. 22–25, 2021. doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01143-3>

LODI, P. C. *Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (cloreto de vinila) (PVC)*. 2003. 284 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

LOPES, M. P.; LOPES, M. L. *A Durabilidade dos Geossintéticos*. 1 ed. 294 f. FEUP edições, Porto, 2010.

LUZ, B. R. *Propriedades espectrais das plantas no infravermelho termal: da química ao dossel*. 2005. 188 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MÁQUINA, A. D. V. *Espectrometria no infravermelho médio e métodos quimiométricos PLS-DA e PLS: classificação e previsão do teor de biodiesel na mistura de biodiesel/diesel de mafurra, moringa e algodão*. 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MARTINS, F. R. *et al. Mapas de irradiação solar para o Brasil: resultados do projeto SWERA*. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3137–3145.

MONTAGNER, C. C.; DIAS, M. A.; PAIVA, E. M.; VIDAL, C.. *Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos*. *Química Nova*, v. 44, n. 10, p. 1328–1352, 2021.

MURAKAMI, N; KOGA, N. *In Situ Photoacoustic FTIR Studies On Photocatalytic Oxidation Of 2-Propanol Over Titanium (IV) Oxide*. *Catal. Commun.* 83 (1), 1–4, 2016.

OLIVATTO, G. P.; CARREIRA, R. S.; TORNISIELO, V. L.; MONTAGNER, C. C. *Microplásticos no ambiente marinho: fontes, distribuição e implicações*. 2018. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) — Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande.

OLIVEIRA, A. A. de et al. *Identificação de madeiras utilizando a espectrometria no infravermelho próximo e redes neurais artificiais*. *Tendências em Matemática Aplicada e Computacional*, São Carlos, v. 16, n. 2, p. 81–95, 2015. DOI: 10.5540/tema.2015.016.02.0081.

ONU (2025). *Tudo que você precisa saber sobre microplásticos*. Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/tudo-que-voce-precisa-saber-sobre-microplasticos>> Acesso em: 3 nov. 2025.

PALMEIRA, E. M. *Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente*. 157 f. Oficina de texto, São Paulo, 2018.

PALMEIRA, E. M.; ALMEIDA, M. G. G.; ARAÚJO, G. L. S. *Geossintéticos em engenharia geotécnica e geoambiental: avanços e perspectivas*. *Geotecnia*, Lisboa, n. 152, p. 177–218, 2021. <https://orcid.org/0000-0003-2620-0708>

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. *Introduction to Spectroscopy*, 4th ed.; Cengage Learning, 2004.

PEREIRA PINTO, E. et al. *Role of UV radiation and oxidation on polyethylene micro- and nanoplastics: impacts on cadmium sorption, bioaccumulation, and toxicity in fish intestinal cells*. *Environmental Science and Pollution Research*, [S. l.], v. 31, p. 47974-47990, 2024.

PIRES, A. C. G.; SILVA, J. L. *Geossintéticos Em Obras De Engenharia: Benefícios, Aplicações E Desafios*. In: LEONEL, E. D.; CHINELATTO, M. A. (Org.). *Avanços Recentes em Ciências da Engenharia*. v. 1. São Carlos, EESC USP, 2025. 66-79.

PIRES, D. C. et al. *Avaliação de agente de ligação aziridínico por meio de técnicas de análises química e instrumental*. *Journal of Aerospace Technology and Management*, São José dos Campos, v. 4, n. 2, p. 195-204, jul./dez. 2012.

PRUDÊNCIO, D. F. D. M.; Wiebeck, H. (2021). *Avaliação no desempenho de longa duração do Polietileno de Alta Densidade*. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

REIS, A.; BARROSO, M.; LOPES, M. G.. *Evolução de cinco geomembranas expostas a condições climáticas em Portugal durante 12 anos*. *Geotecnia*, n. 141, p. 41–58, nov. 2017.

ROUILLON, C. et al. *Is Carbonyl Index A Quantitative Probe To Monitor Polypropylene Photodegradation?* *Polym. Degrad. Stabil.* 128, 200–208, 2016.

ROWE, R. K.; SANGAM, H. P. *Durability of HDPE geomembranes*. Geotextiles and Geomembranes, v. 20, n. 2, p. 77–95, 2002.

ROWE, R. K.; EWAIS, A. M. R. *Ageing of exposed geomembranes at locations with different climatological conditions*. Canadian Geotechnical Journal, v. 52, n. 3, p. 326–343, 2015.

ROWE, R. K. *et al.* *Antioxidant Depletion from a High Density Polyethylene Geomembrane under Simulated Landfill Conditions*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Reston, 2009.

SANGAM, H. P.; ROWE, R. K.. *Effects of exposure conditions on the depletion of antioxidants from high-density polyethylene (HDPE) geomembranes*. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v. 39, n. 6, p. 1221–1234, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1139/t02-074>.

SANTOS, L. S.. *Estudo da durabilidade de geomembranas utilizadas na impermeabilização de reservatórios das barragens de rejeito de mineração de ouro*. 2014. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2014.

SANTOS, P. R. A. *et al.* *Projeções de radiação solar incidente à superfície e nebulosidade para a região Nordeste do Brasil através de um conjunto de modelos climáticos*. Revista Brasileira de Meteorologia, Brasília, v. 39, 2024. 25 p.

SCHEIRS, J. *Polymeric geomembranes: selected topics*. Hoboken: Wiley, 2009. ISBN 9780470398194.

SHARMA, S. *et al.* *Biodegradation of Low- and High-Density Polyethylene Films by Microbacterium barkeri Sh20*. Current World Environment, Jaipur, v. 17, n. 1, p. 245-254, 2022. <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.17.1.22>

SHIMADZU CORPORATION. *IRAffinity-1S: Fourier Transform Infrared Spectrophotometer - Brochure and User Manual*. Kyoto, 2009.

SHUKLA, S. K.; YIN, J. H. *Fundamentals of geosynthetic engineering*. London: Taylor & Francis, 2006.

SILVA, A.. *Avaliação da danificação mecânica de geossintéticos causada por resíduos reciclados*. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016.

SILVA, J. T. F. *et al.* *Análise dos efeitos da radiação solar no processo de degradação de geotêxteis*. In: Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), 20., 2024, Balneário Camboriú. Anais [...]. 2024. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/723.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. *Principles of Instrumental Analysis*; Cengage Learning, 2017.

SMITH, B. C. *The Infrared Spectra of Polymers II: Polyethylene*. Spectroscopy, v. 36, n. 9, p. 24-29, 2021. <https://doi.org/10.56530/spectroscopy.xp7081p7>

TEIXEIRA, M. F. H. B. I. *Espectroscopia no infravermelho próximo associada à modelagem empírica multivariada para previsão da resistência a tração do poli(tereftalato de etileno)-PET reciclado*. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

TISINGER, L. G.; GIROUD, J. P. *The durability of HDPE geomembranes*. Geotechnical Fabrics Report, St. Paul, v. 11, n. 6, p. 4-8, set. 1993.

VALENTE, I. M. *et al. Chemical Studies About The Durability Of Polypropylene Geotextiles*. In: Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Guarujá, SP, Brazil, pp. 785–788, 2010.

VERTEMATTI, J. C.. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 2 ed. 576 f. BLUCHER, CTG ABINT. São Paulo, 2015.

YANG, X.; DING, X. *Prediction Of Outdoor Weathering Performance Of Polypropylene Filaments By Accelerated Weathering Tests*. Geotext. Geomembranes 24 (2), 103–109, 2006.

YOUSIF, E.; HADDAD, R. *Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review*. SpringerPlus, London, v. 2, n. 398, p. 1–32, 2013.

WANG, Y. *et al. A Review of Degradation and Life Prediction of Polyethylene*. Applied Sciences, Basel, v. 13, n. 5, 3045, 2023.

APÊNDICE A

Este apêndice apresenta os gráficos correspondentes às triplicatas dos ensaios realizados do grupo de geomembranas submetidas ao intemperismo natural.

Figura A.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD verde virgem

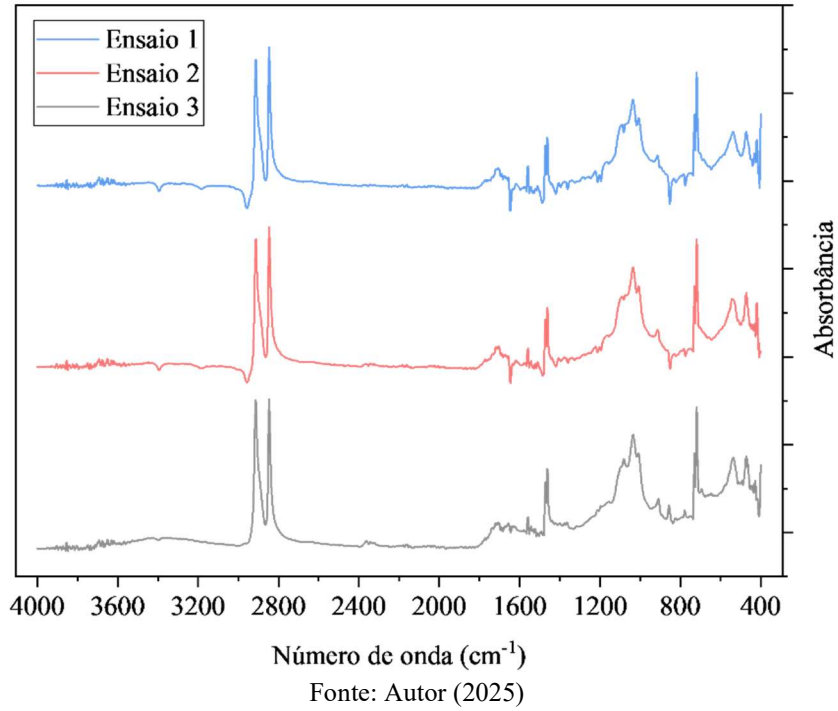


Figura A.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD verde degradada

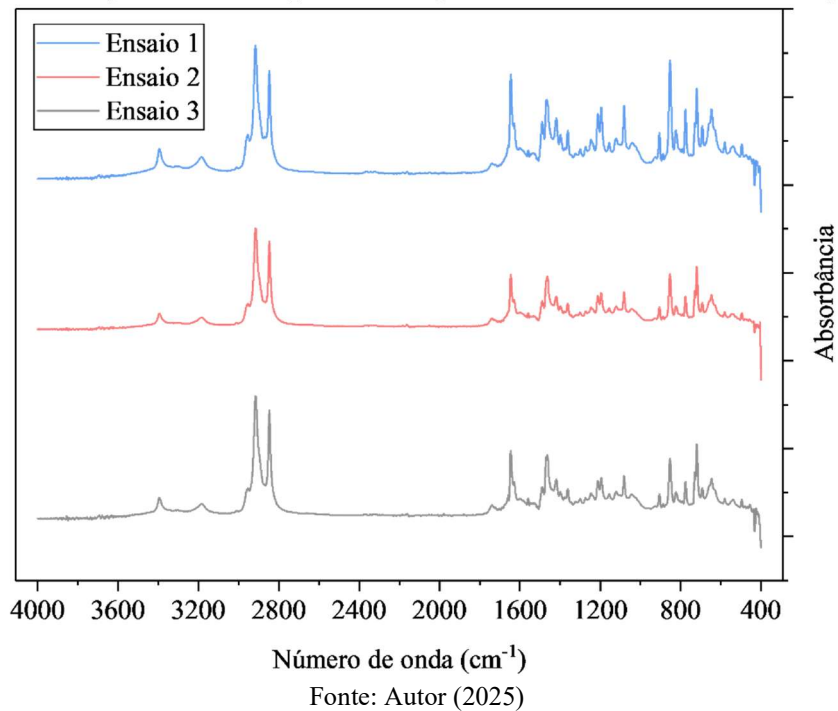


Figura A.3 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta/branca virgem

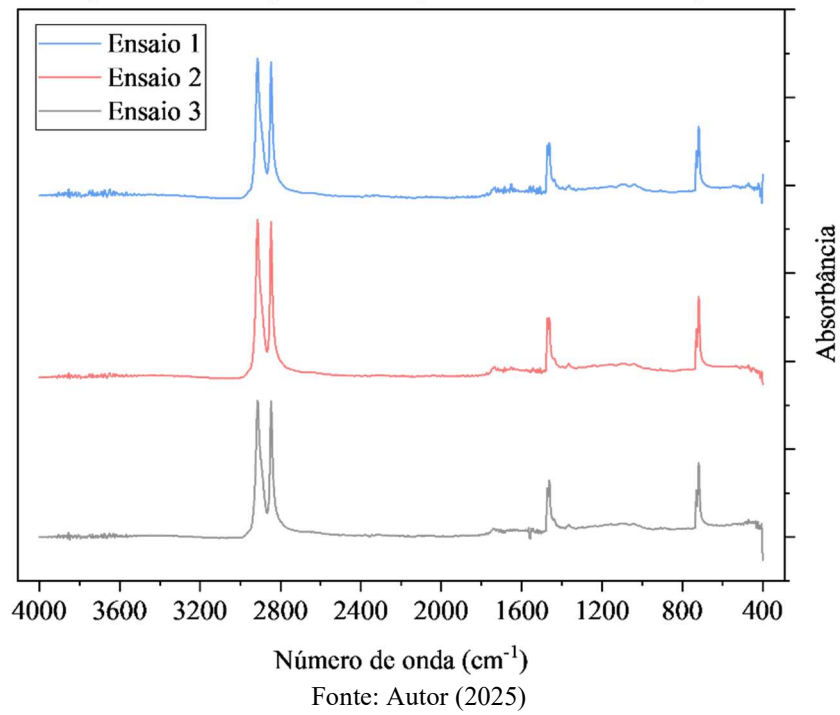


Figura A.4 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta/branca degradada

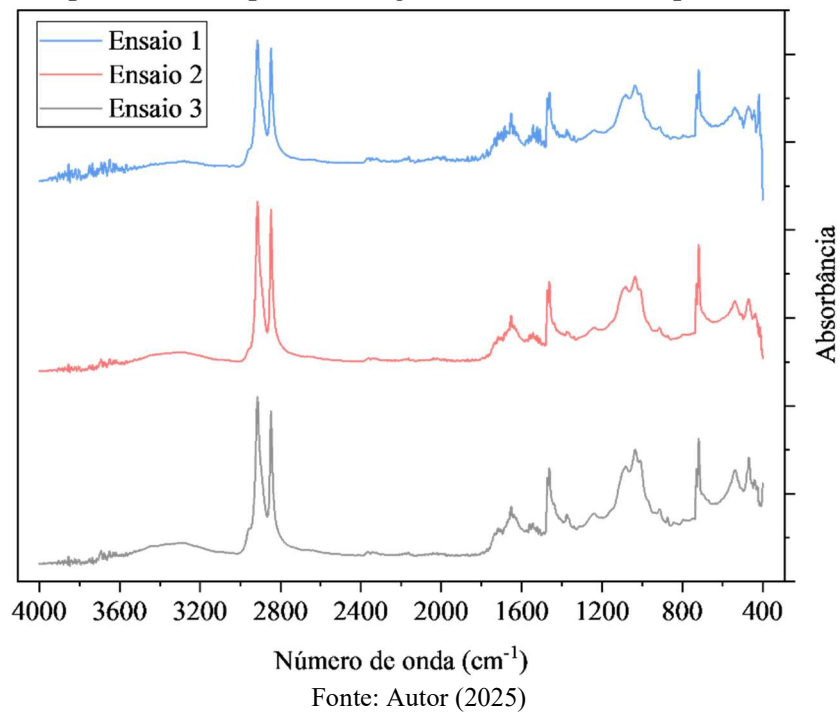


Figura A.5 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta virgem

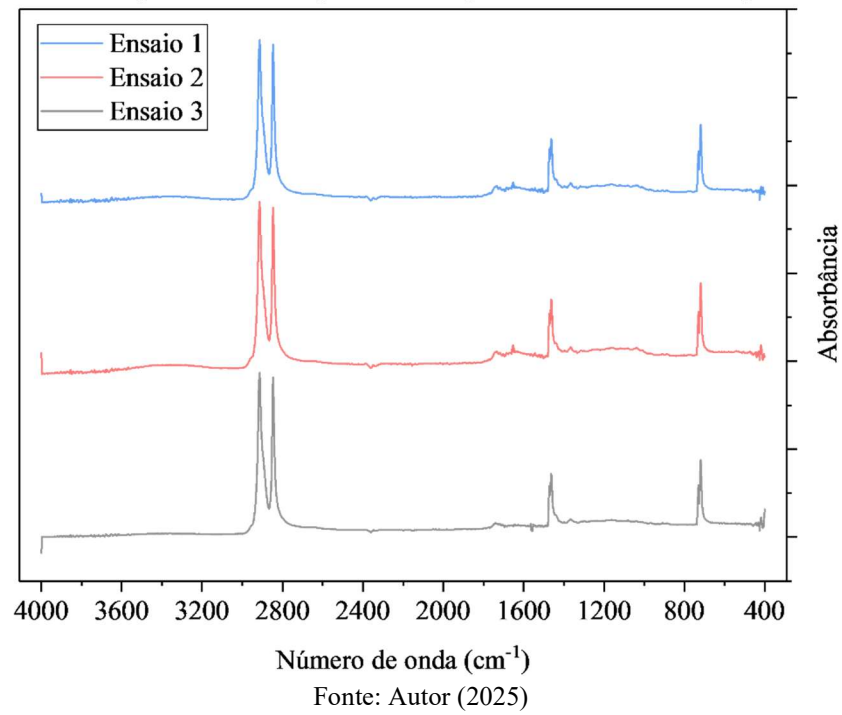
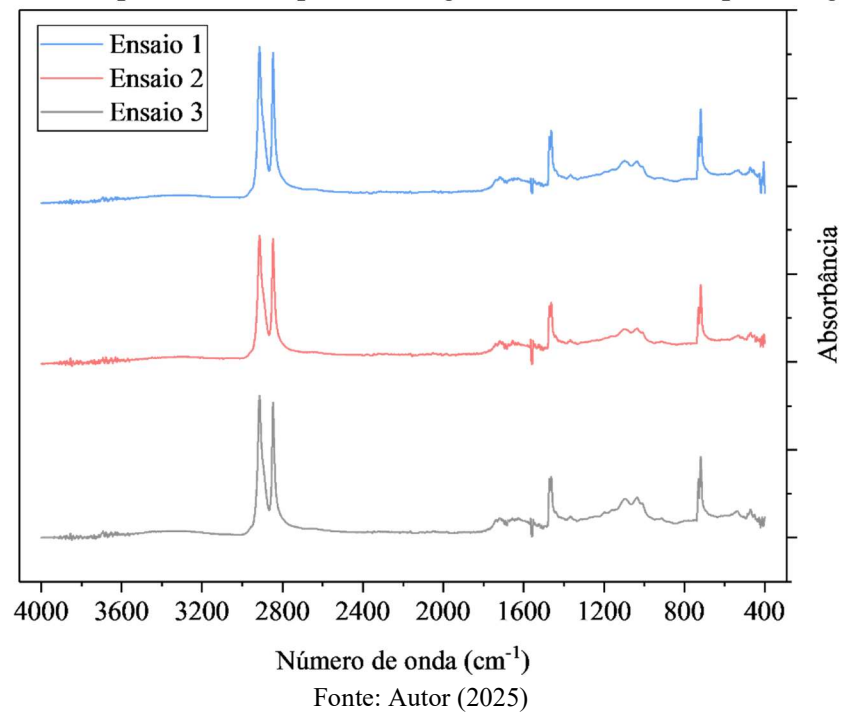


Figura A.6 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta degradada



APÊNDICE B

Este apêndice apresenta os gráficos das triplicatas dos ensaios realizados nas geomembranas expostas à radiação UV em câmara de envelhecimento. Os espectros das amostras virgens são apresentados nas **Figuras A.1, A.3 e A.5** do Apêndice A.

Figura B.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD verde exposta por 500 h

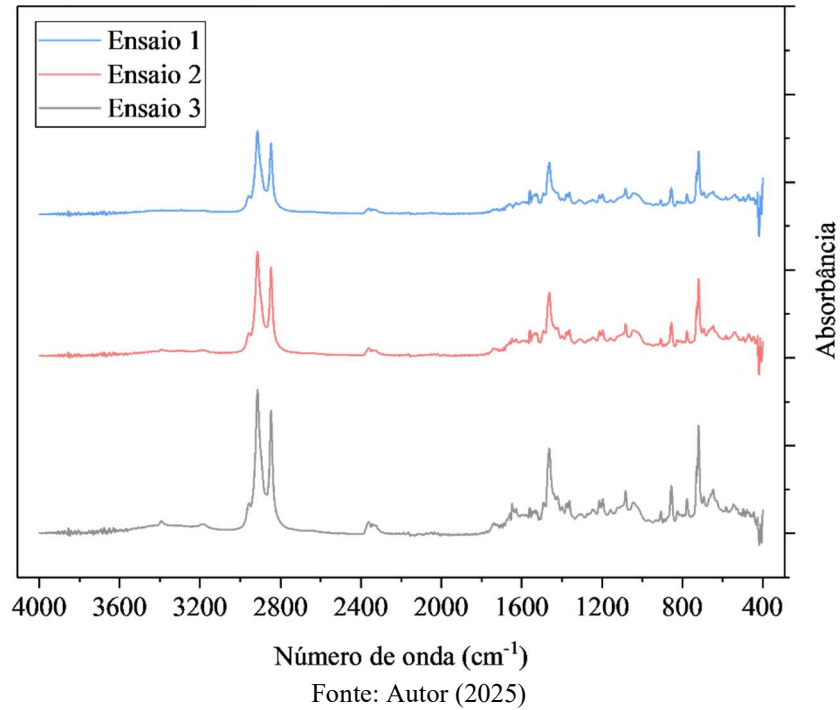


Figura B.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD verde exposta por 1000 h

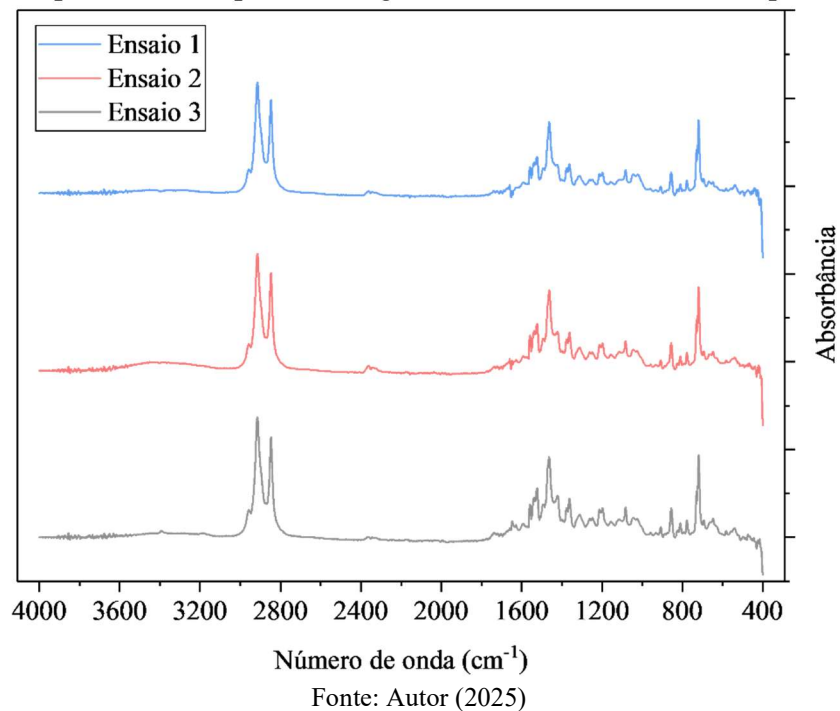


Figura B.3 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta exposta por 500 h

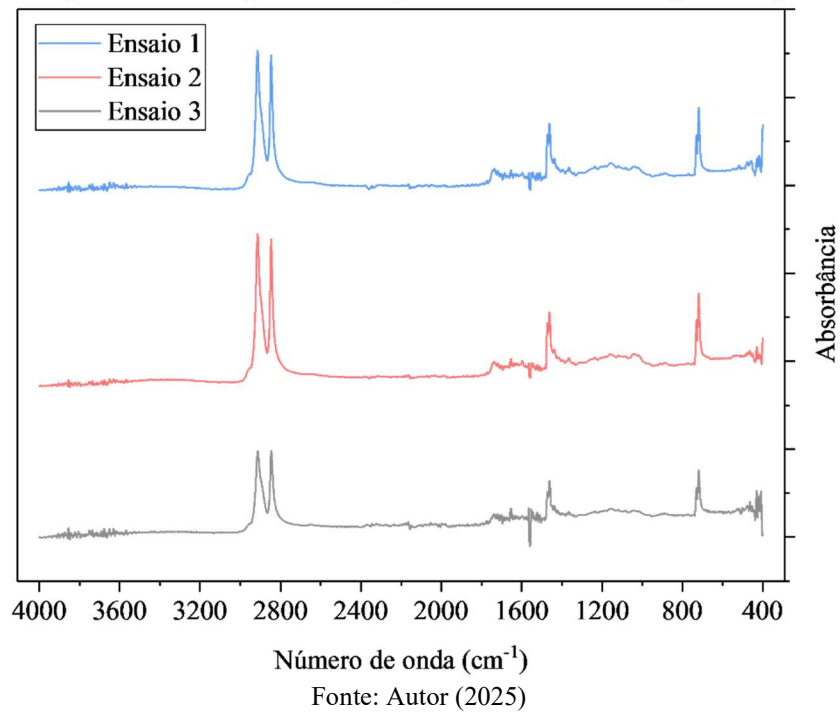


Figura B.4 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta exposta por 2000 h

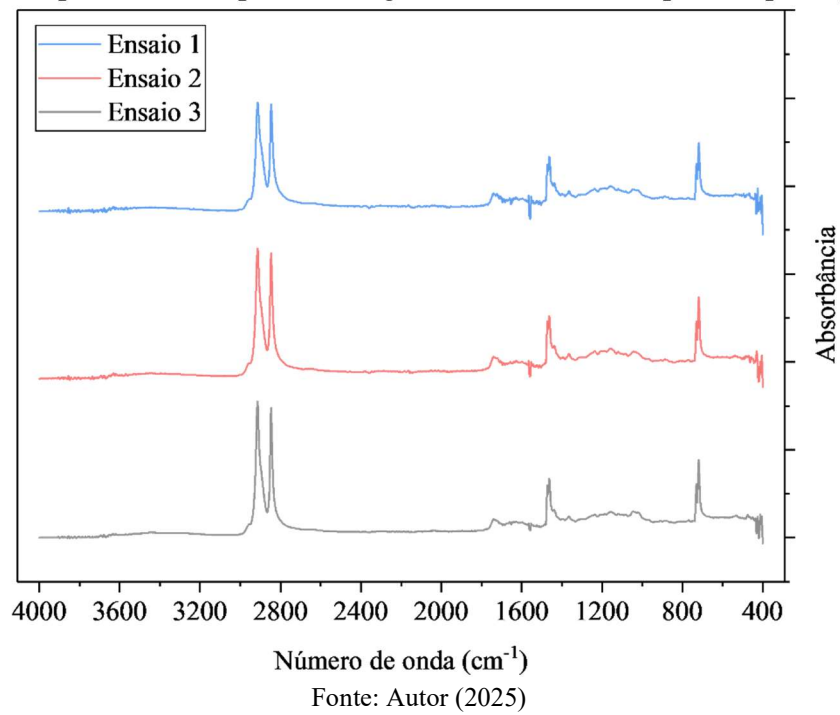


Figura B.5 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta/branca exposta por 500 h

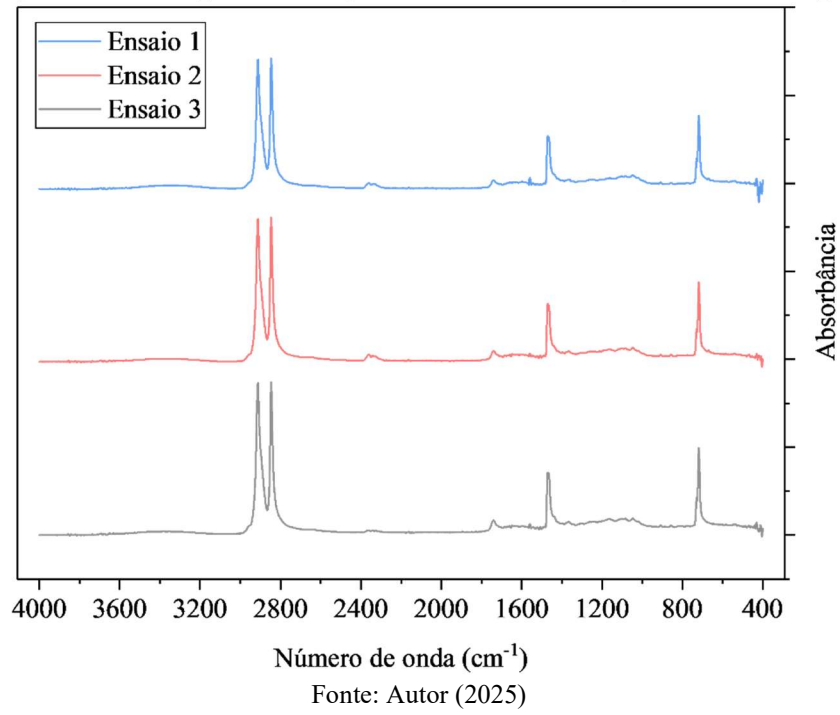
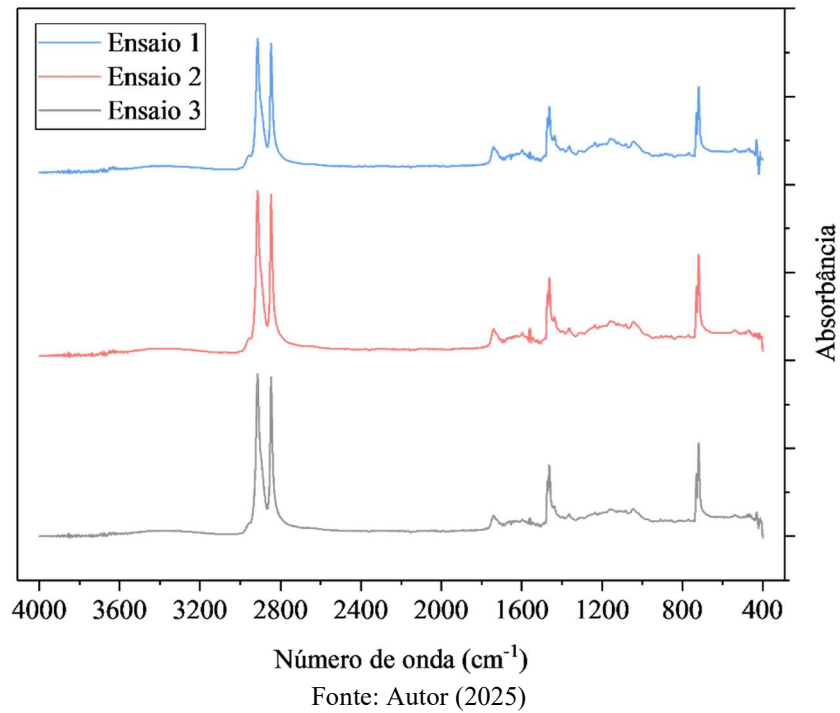


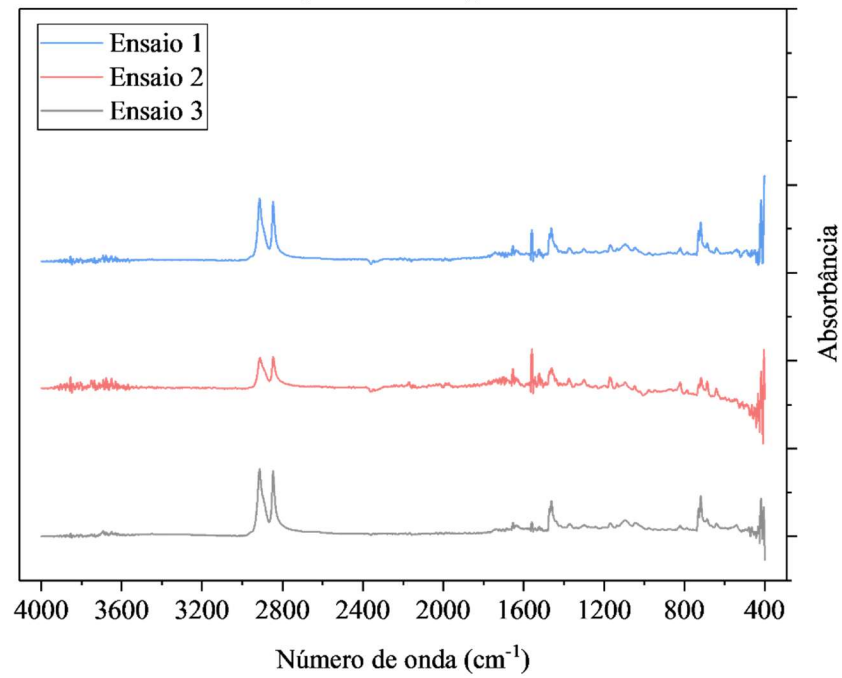
Figura B.6 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD preta/branca exposta por 1000 h



APÊNDICE C

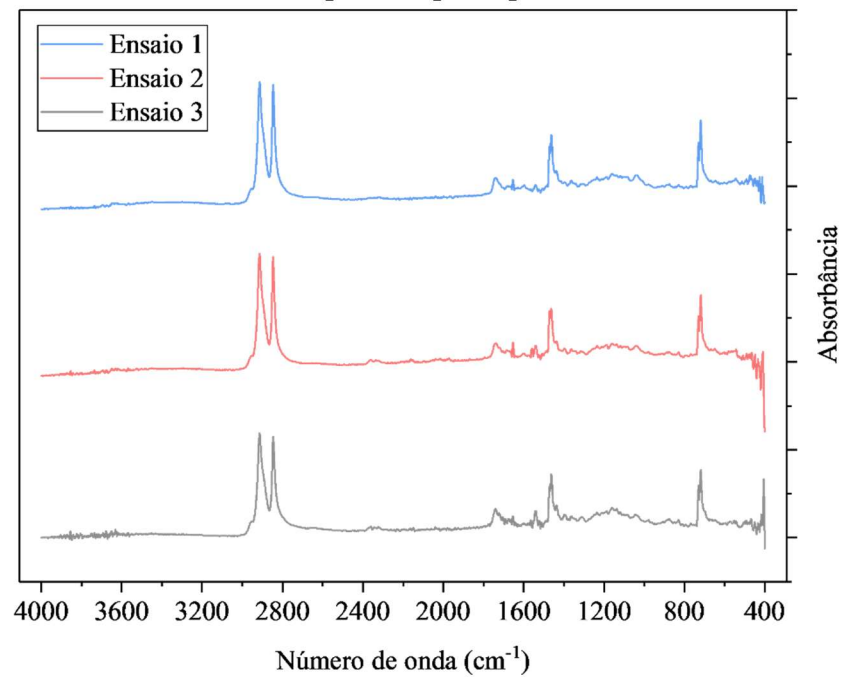
Este apêndice apresenta os gráficos das triplicatas dos ensaios realizados nas geomembranas analisadas quanto ao processo de fabricação.

Figura C.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada virgem fabricada por extrusão plana



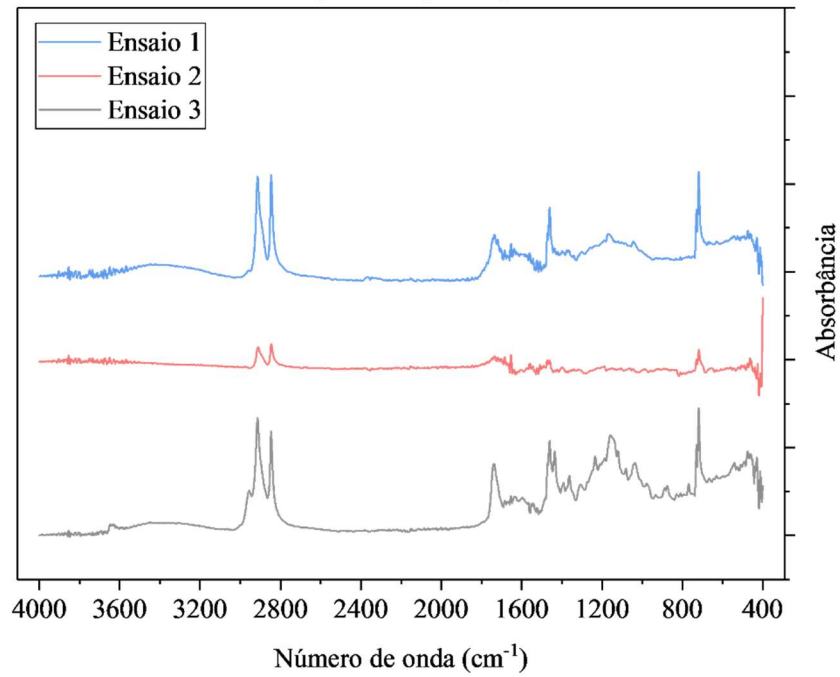
Fonte: Autor (2025)

Figura C.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão plana exposta por 500 h



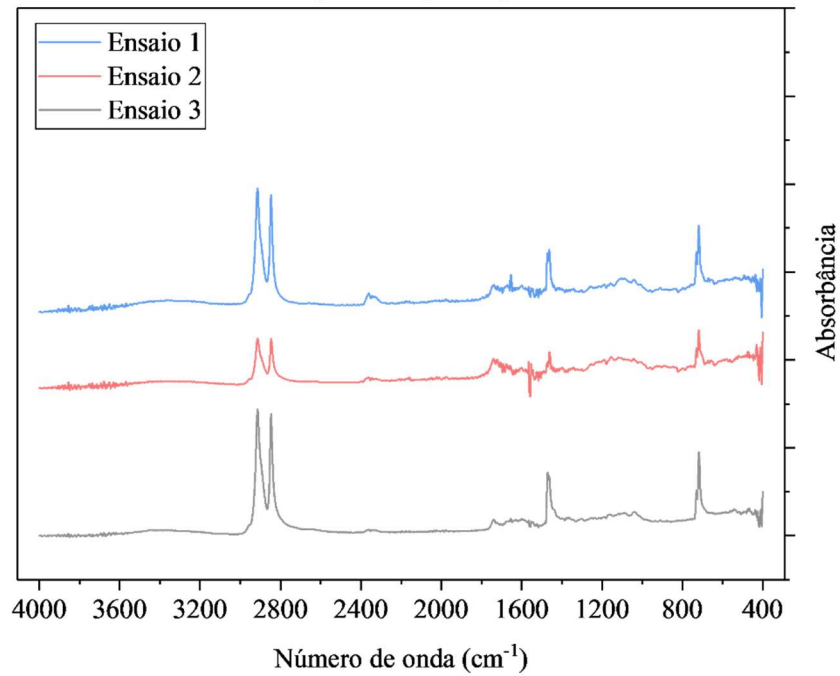
Fonte: Autor (2025)

Figura C.3 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão plana exposta por 1000 h



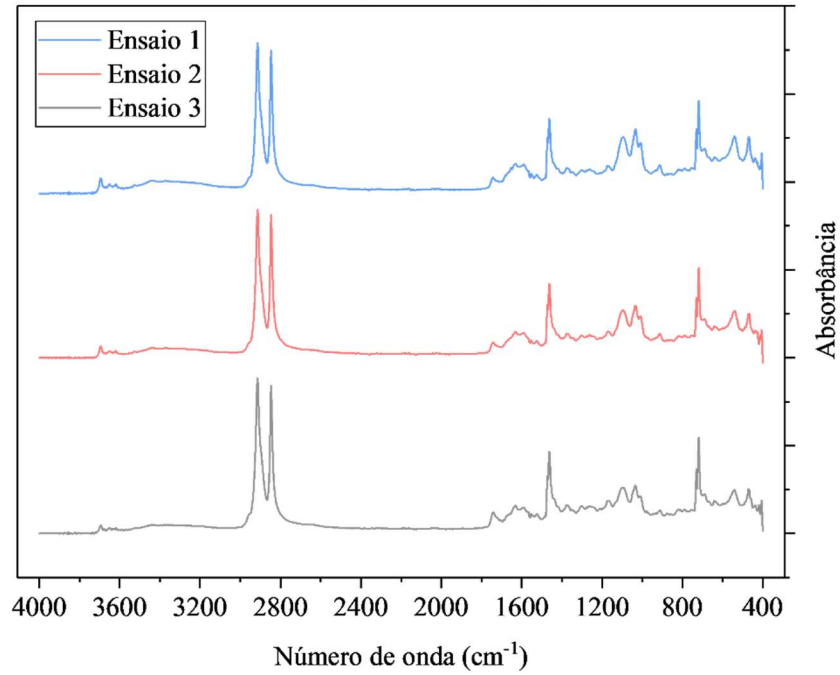
Fonte: Autor (2025)

Figura C.4 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão plana exposta por 2000 h



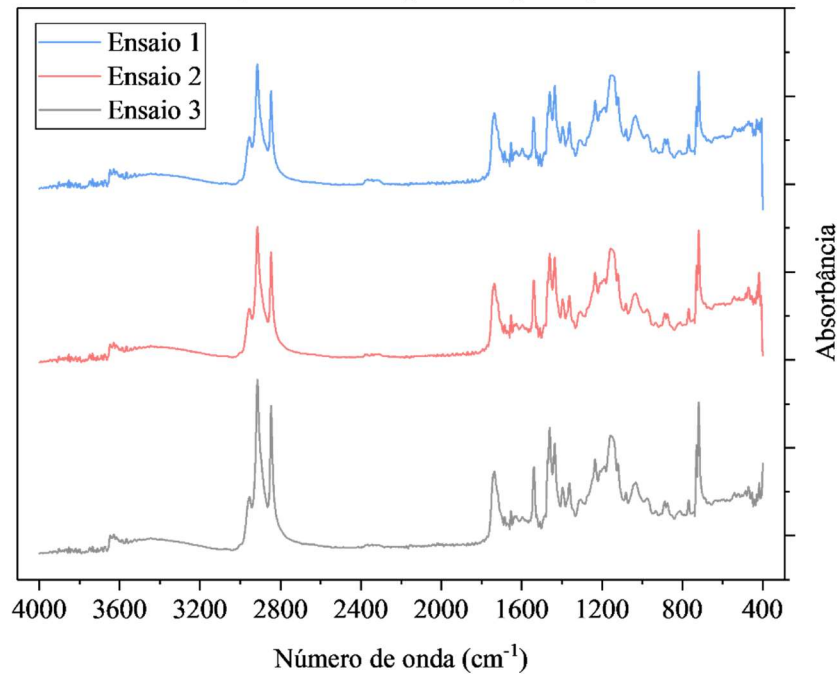
Fonte: Autor (2025)

Figura C.5 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa da geomembrana PEAD virgem fabricada por extrusão plana



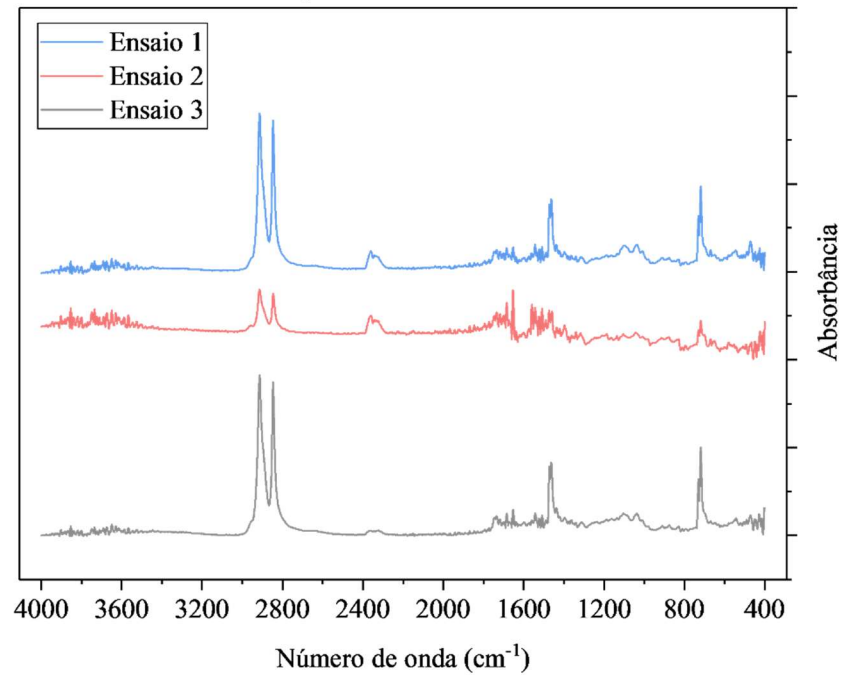
Fonte: Autor (2025)

Figura C.6 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa da geomembrana PEAD fabricada por extrusão plana exposta por 2000 h



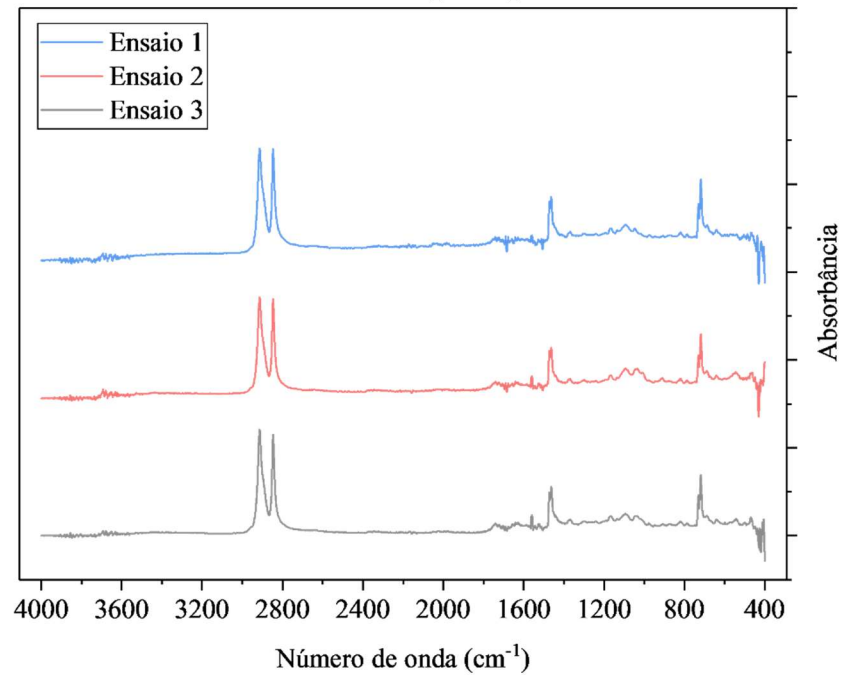
Fonte: Autor (2025)

Figura C.7 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada virgem fabricada por extrusão balão



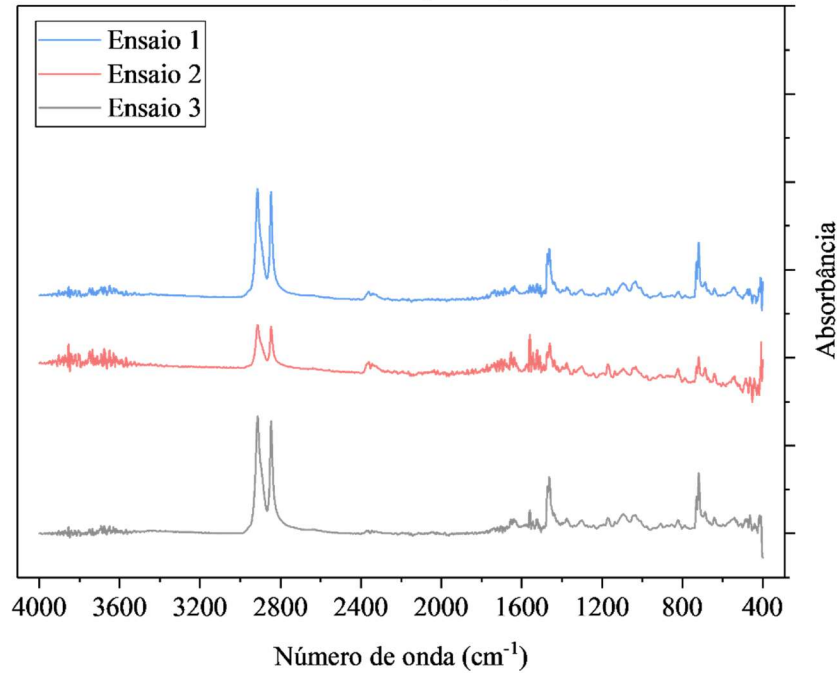
Fonte: Autor (2025)

Figura C.8 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão balão exposta por 500 h



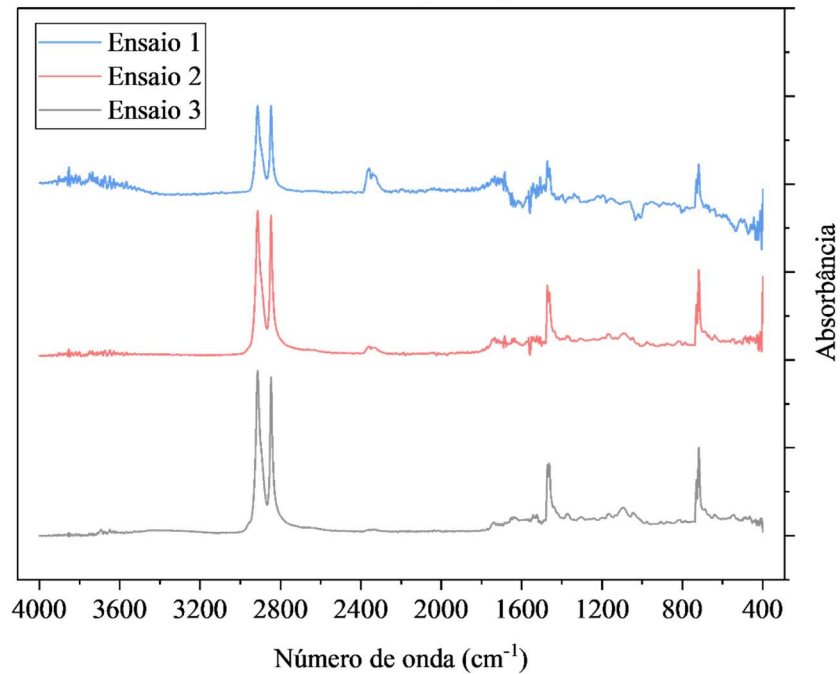
Fonte: Autor (2025)

Figura C.9 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão balão exposta por 1000 h



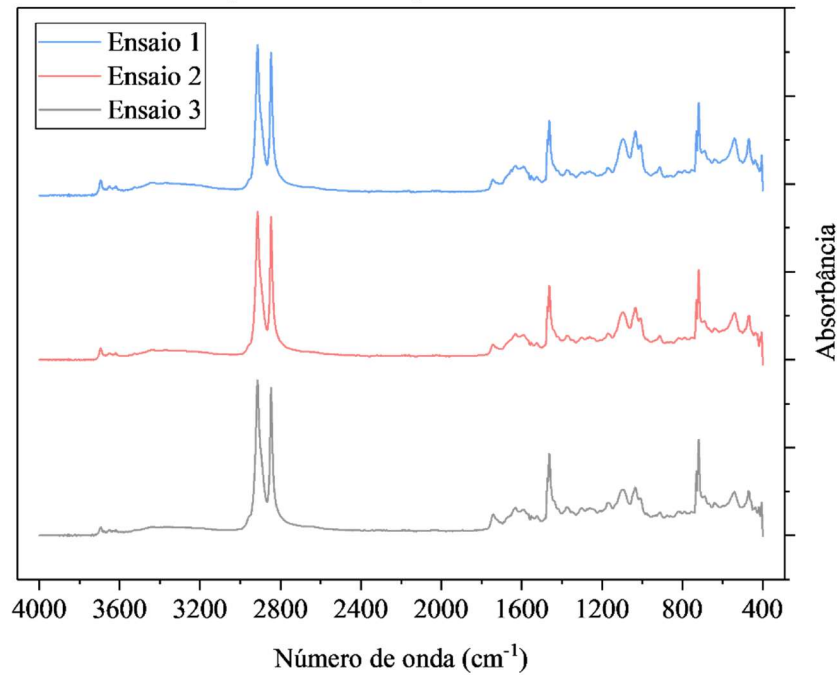
Fonte: Autor (2025)

Figura C.10 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada fabricada por extrusão balão exposta por 2000 h



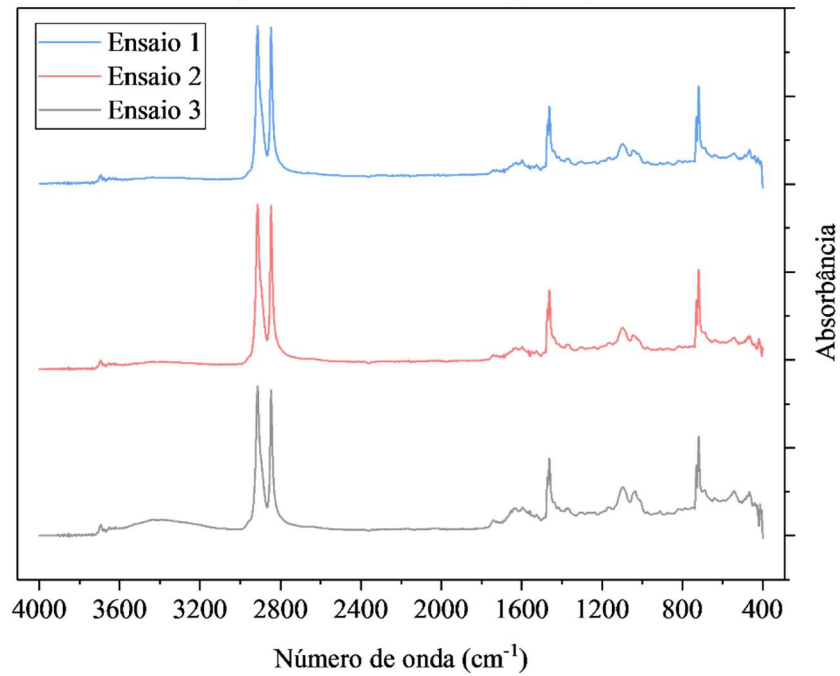
Fonte: Autor (2025)

Figura C.11 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa da geomembrana PEAD virgem fabricada por extrusão balão



Fonte: Autor (2025)

Figura C.12 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa da geomembrana PEAD fabricada por extrusão balão exposta por 2000 h



Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE D

Este apêndice apresenta os gráficos correspondentes às triplicatas dos ensaios realizados nas geomembranas pertencentes ao grupo de geomembranas exumadas de aterros sanitários. Os espectros das amostras virgens do RJ são apresentados nas **Figuras C.1e C.5** do Apêndice C.

Figura D.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada virgem aplicada em aterro sanitário de SP

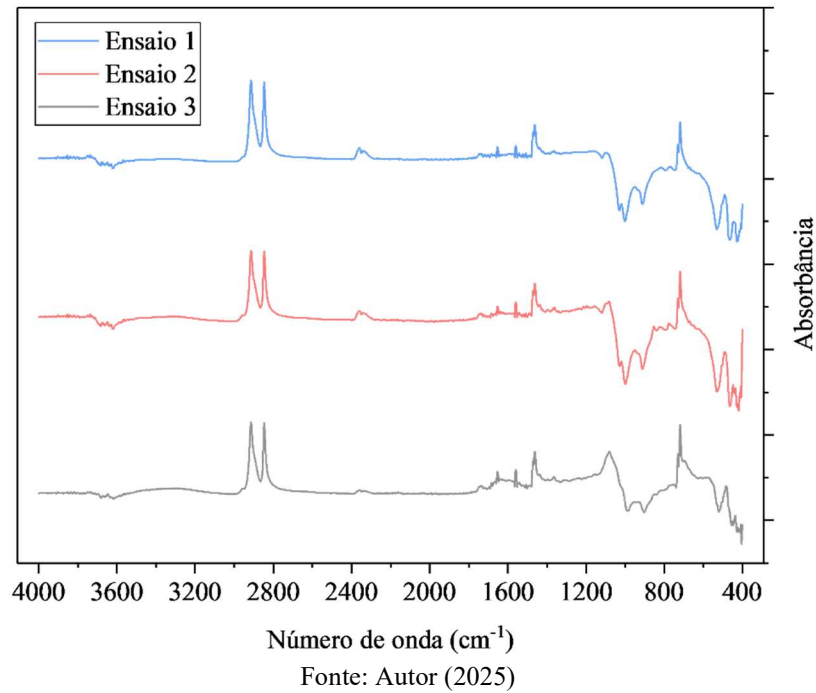


Figura D.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada degradada aplicada em aterro sanitário de SP

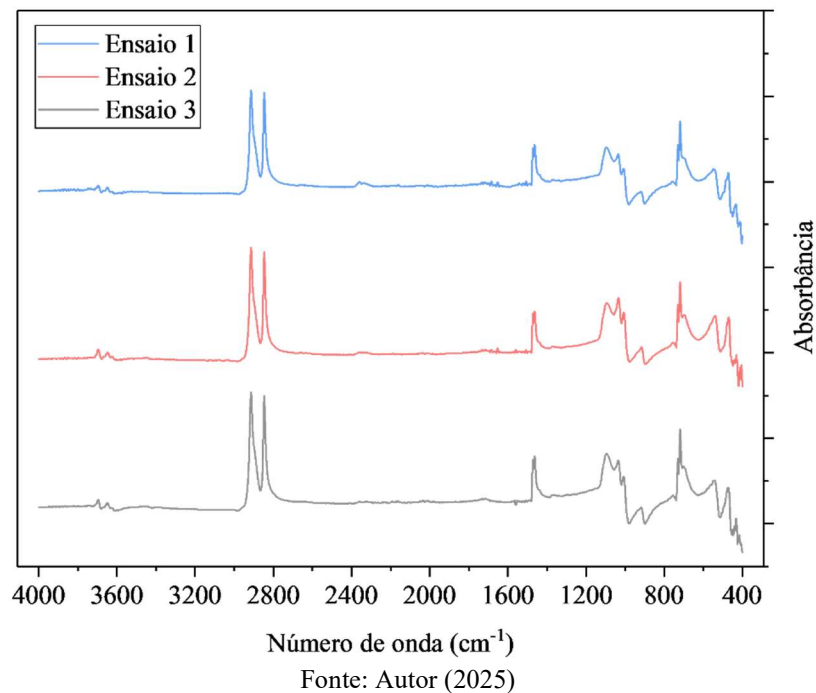
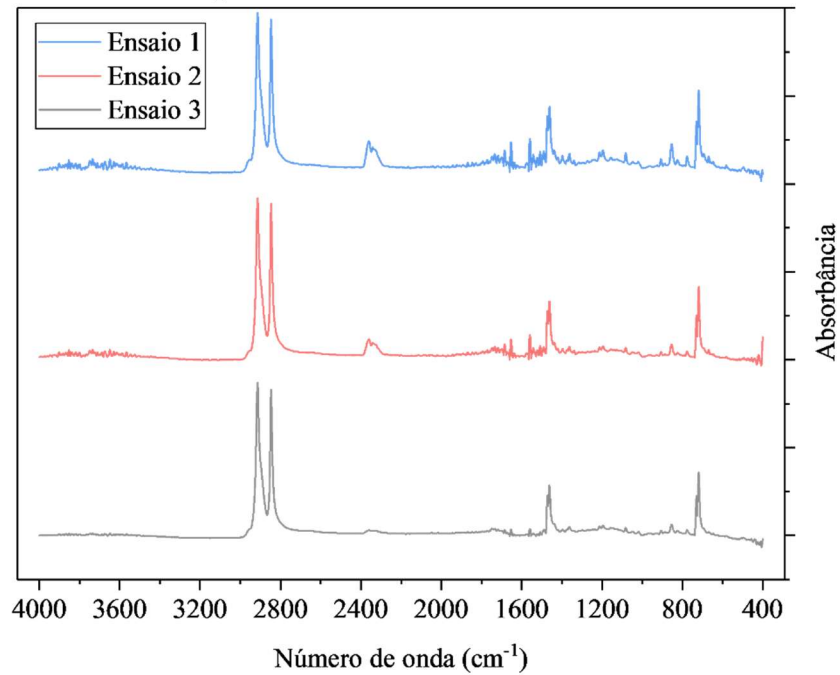
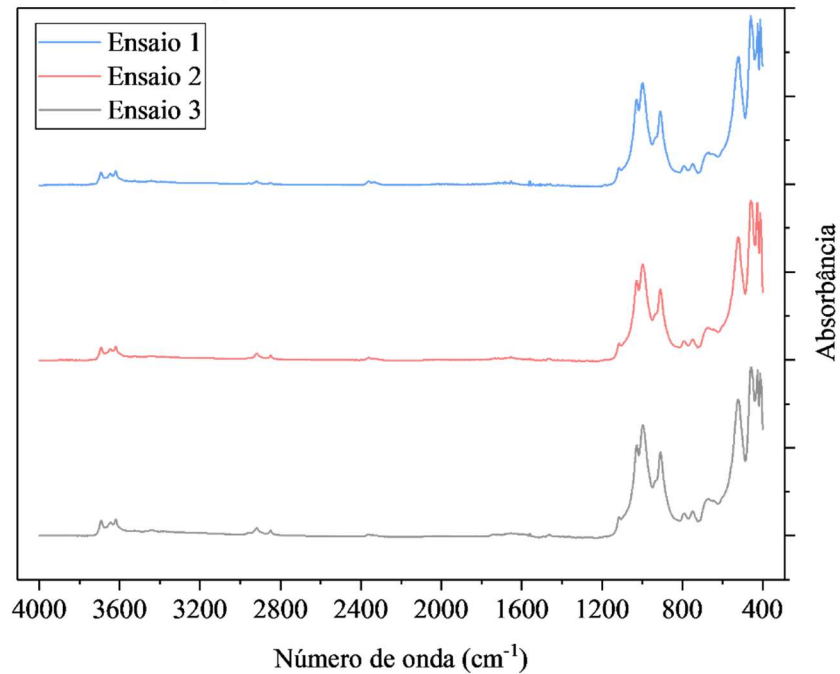


Figura D.3 – Espectros das triplicatas da porção borda lisa de geomembrana PEAD virgem aplicada em aterro sanitário de SP



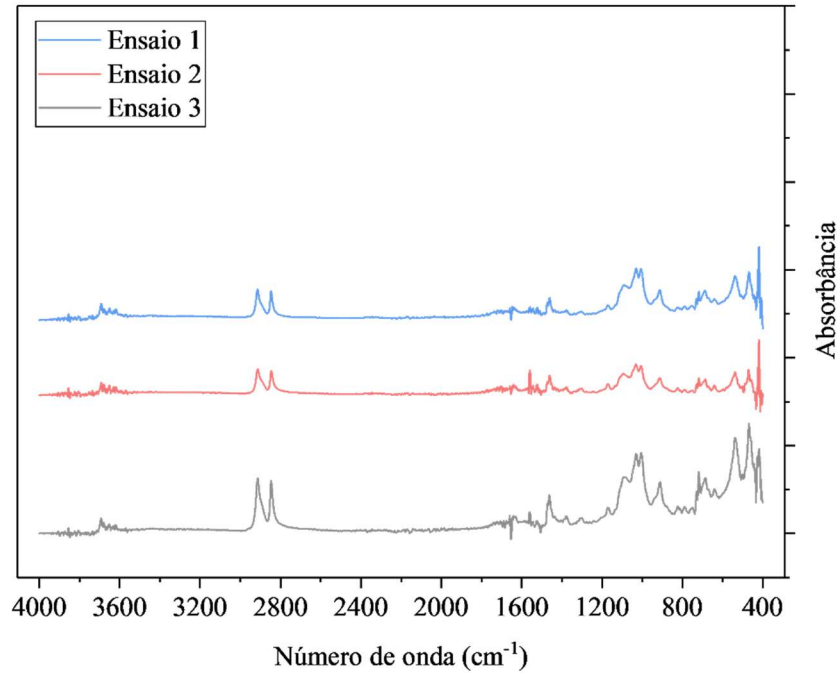
Fonte: Autor (2025)

Figura D.4 – Espectros das triplicatas da porção borda lisa de geomembrana PEAD degradada aplicada em aterro sanitário de SP



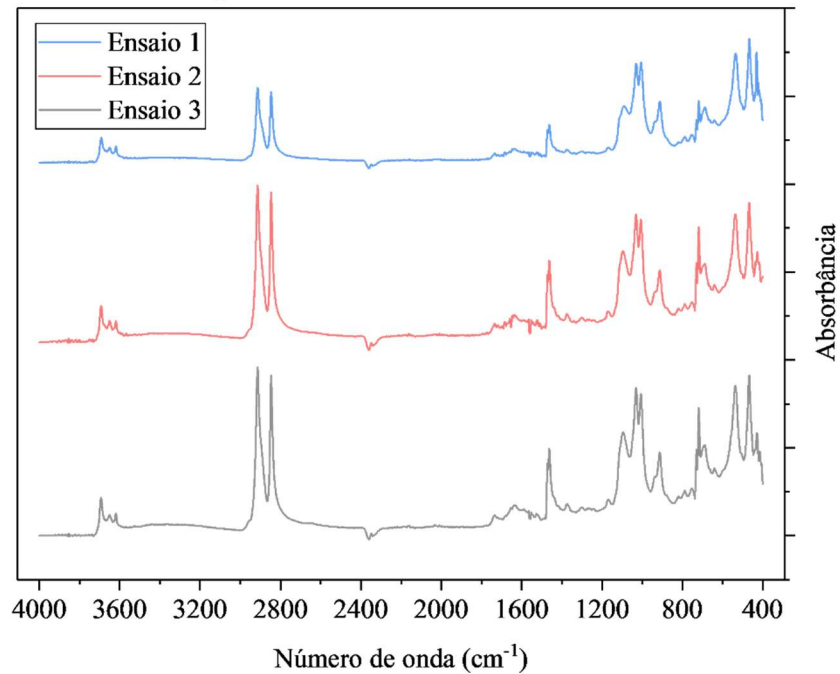
Fonte: Autor (2025)

Figura D.5 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada degradada aplicada em aterro sanitário do RJ



Fonte: Autor (2025)

Figura D.6 – Espectros das triplicatas da porção borda lisa de geomembrana PEAD degradada aplicada em aterro sanitário do RJ



Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE E

Este apêndice apresenta os gráficos correspondentes às triplicatas dos ensaios realizados nas geomembranas pertencentes ao grupo de geomembranas exumadas de uma barragem de rejeito de mineração de zinco.

Figura E.1 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada aplicada em fundo de barragem

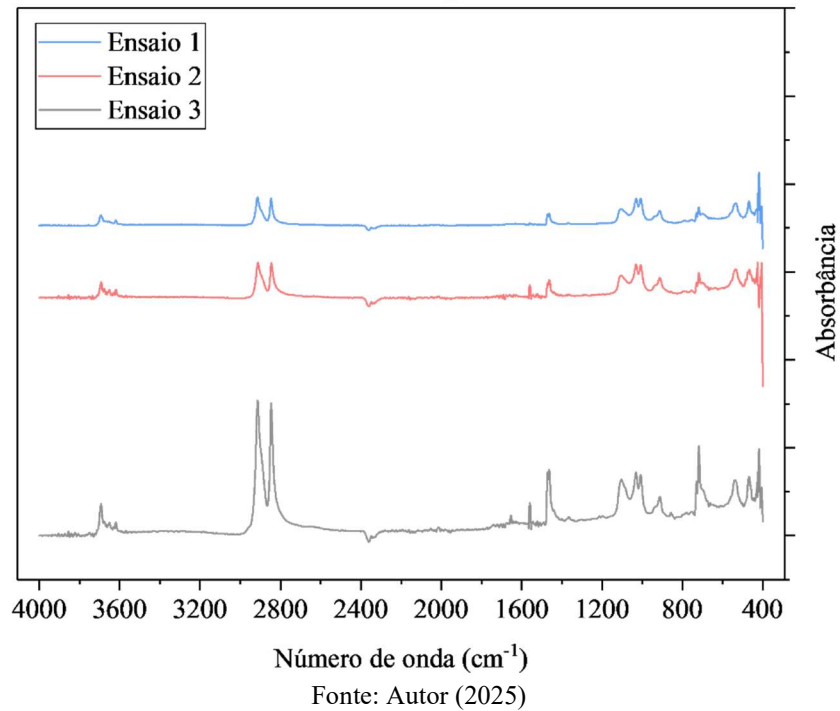


Figura E.2 – Espectros das triplicatas da geomembrana PEAD texturizada aplicada em talude

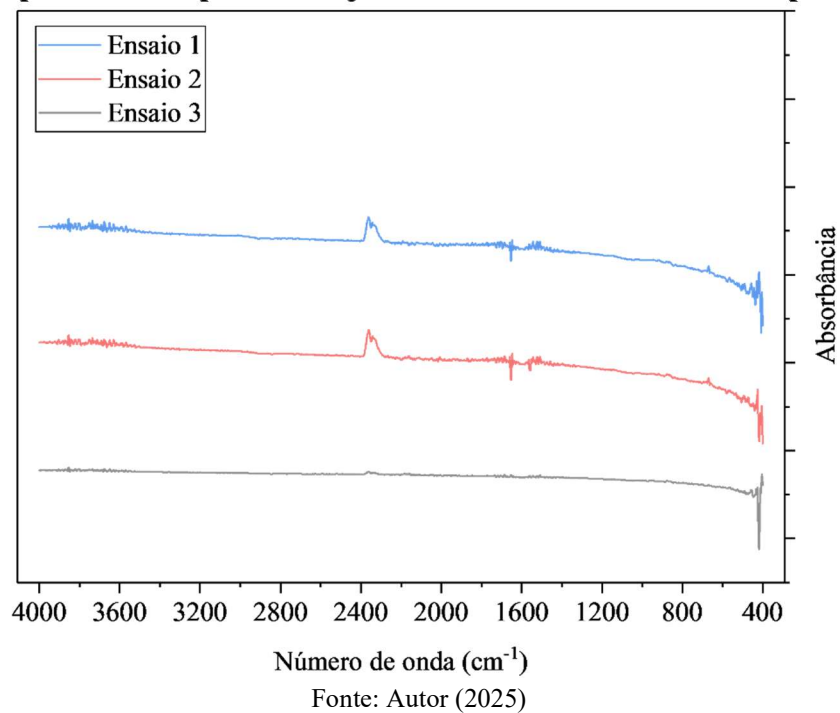


Figura E.3 – Espectros das triplicatas da porção de borda lisa de geomembrana PEAD aplicada em talude

