XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/38

Estudo Comparativo de Técnicas de Espectrofotometria por Infravermelho para Avaliação da Degradação em Geotêxteis Tecidos

Júlia de Sousa Dourado
Graduanda, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, julia.d4277@ufob.edu.br

Jaedson Alves Ferreira
Graduando, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jaedson.f3593@ufob.edu.br

Sérgio Macedo Soares
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, sergio.soares@ufob.edu.br

José Domingos Santos da Silva
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jose.silva@ufob.edu.br

José Luiz Ernandes Dias Filho
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jledfilho@ufob.edu.br

RESUMO: A espectrometria no infravermelho tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a caracterização de geossintéticos, especialmente quanto à avaliação de sua durabilidade frente a processos de degradação. Este estudo tem como objetivo comparar e discutir resultados à luz de análises conduzidas em geotêxteis tecidos utilizando a Espectroscopia de absorção na região Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR, em inglês) pela tradicional técnica de transmissão e com aplicação do módulo de Reflectância Total Atenuada (ATR, em inglês). Para tanto, foram selecionadas sete amostras de geotêxteis submetidas a condições controladas de degradação de campo e laboratório. Nesse sentido, os espectros obtidos permitiram avaliação das variações em bandas importantes como a carbonila em 1712 cm^{-1} e metil 1377 cm^{-1} para a comparação dos resultados entre as duas metodologias de ensaio. Nos espectros obtidos com o módulo ATR foi possível observar o aparecimento de bandas mais suaves e definidas, refletindo maior representatividade das ligações poliméricas das amostras e menor influência de irregularidades superficiais. Em contrapartida, os dados obtidos por transmissão evidenciaram bandas de maior intensidade e menor estabilidade espectral, associado a elevada densidade do material, gerando ruídos na interpretação espectral. Por fim, demonstrou-se que o uso do módulo ATR confere maior consistência às análises de geotêxteis tecidos onde a densidade do material é maior e os ruídos intensos, tornando essa técnica mais adequada para essas condições, enquanto o FTIR tradicional poderia contribuir mais à medida que novos elementos químicos são formados.

PALAVRAS-CHAVE: Espectroscopia, Geotêxtil tecido, Durabilidade, Caracterização, Infravermelho.

ABSTRACT: Infrared spectrometry has established itself as an essential tool for the characterization of geosynthetics, particularly regarding the evaluation of their durability against degradation processes. This study aims to compare and discuss results considering analyses conducted on woven geotextiles using Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy via the traditional transmission technique and with the application of the Attenuated Total Reflectance (ATR) module. To this end, seven geotextile samples were selected and subjected to controlled field and laboratory degradation conditions. In this sense, the spectra obtained allowed for the evaluation of variations in important bands such as carbonyl at 1712 cm^{-1} and methyl at 1377 cm^{-1} for the comparison of results between the two assay methodologies. In the spectra obtained with the ATR module, it was possible to observe the appearance of smoother bands and defined, reflecting greater representativeness of the sample's polymeric bonds and less influence from surface irregularities. In contrast, the data obtained by transmission showed peaks of higher intensity and lower spectral stability, associated with the high density of the material, generating noise in the spectral interpretation. Finally, it was demonstrated that the use of the

ATR module provides greater consistency for the analysis of woven geotextiles where material density is higher and noise is intense, making this technique more suitable for these conditions, while traditional FTIR could contribute more as new chemical elements are formed.

KEYWORDS: Spectroscopy, Woven geotextile, Durability, Characterization, Infrared.

1 INTRODUÇÃO

Há cerca de três décadas os geossintéticos vêm sendo empregados de maneira significativa na construção civil brasileira, visto que fornecem diversas vantagens técnicas e financeiras em obras como estradas, barragens, túneis e estruturas de contenção (COSTA, et al, 2008). Nesse contexto, os geotêxteis tecidos ocupam uma posição de destaque devido à sua estrutura de filamentos ortogonais (urdume e trama), a qual lhes confere elevada resistência mecânica e eficiência em funções de filtração, separação, reforço, drenagem e proteção (SALAH, 2020). Fabricados predominantemente a partir de polímeros como o polipropileno (PP) e o poliéster (PET), esses materiais são selecionados por sua inércia química e propriedades físicas otimizadas. Por sua vez, a manutenção de suas propriedades ao longo do tempo é condicionada pela estabilidade molecular frente aos processos de degradação ambiental, tornando a avaliação de sua durabilidade um fator crítico para a segurança das estruturas.

Apesar de sua reconhecida resistência, esses materiais poliméricos enfrentam degradação química durante a sua vida útil, as quais induzem alterações em sua cadeia polimérica por fenômenos como oxidação, cisão de cadeia e formação de novos compostos (BARBEŞ et al, 2014). Dessa forma, a incidência de radiação ultravioleta (UV), aliada a variações térmicas e ao contato com solos de pH extremo ou íons metálicos, desencadeia processos de degradação físico-química complexos. Segundo a ISO 13438 (2018), materiais compostos por poliolefina, como o PP, são mais sensíveis à oxidação quando comparados aos compostos por tereftalato de PET. Além disso, esse fenômeno é frequentemente acompanhado por redução na ductilidade e resistência mecânica dos geossintéticos, podendo desencadear a falha prematura dessas estruturas. Diante desse cenário, o monitoramento do avanço da degradação polimérica torna-se indispensável para prever o comportamento desses materiais em campo e assegurar a longevidade das obras de engenharia.

O FTIR é a técnica mais utilizada para a identificação de materiais orgânicos e não-orgânicos (ASTM E1252, 2013). No contexto de investigação das alterações estruturais em nível molecular, a espectroscopia FTIR consolidou-se como a ferramenta analítica por excelência na caracterização. O método fundamenta-se na absorção seletiva da radiação infravermelha na região média (4000 a 500 cm^{-1}) pelos modos vibracionais das ligações químicas, gerando um espectro de absorbância que atua como uma "impressão digital" única para cada material. No contexto da engenharia de materiais, essa técnica destaca-se por sua sensibilidade em detectar o surgimento de novos grupos funcionais, com ênfase nas bandas de carbonila (1820 a 1660 cm^{-1}), marcador químico fundamental do estágio de foto-oxidação e envelhecimento do material.

Tradicionalmente, a análise por infravermelho de polímeros sólidos tem sido realizada por meio da técnica de transmissão, a qual exige que o feixe de radiação atravesse a amostra para atingir o detector. Segundo a ASTM E1252 (2013): "A espessura da amostra deve ser adequada para causar uma diminuição na potência de radiação que atinge o detector nas frequências de absorção usadas na análise". No entanto, para geotêxteis tecidos, essa abordagem apresenta limitações analíticas devido à elevada densidade e opacidade das fibras. Amostras de alta gramatura costumam causar a absorção total de bandas importantes ou o desvio da linha de base devido ao espalhamento de luz nas irregularidades superficiais do tecido (*scattering*). Além disso, a necessidade de preparação de pastilhas de brometo de potássio (KBr) ou prensagem a quente para a formação de filmes finos torna o método laborioso e introduz riscos de contaminação por umidade e ruídos espectrais que podem comprometer a estabilidade dos dados. Almond et al. (2020) propõem que a eventual saturação das bandas leva a uma linha de base distorcida e ao alargamento das bandas nos espectros obtidos, além do fato de que as medições dessa técnica não são possíveis em materiais de estrutura mais espessa.

Atualmente, o módulo ATR é o acessório de amostragem FTIR mais utilizado na investigação acerca da transformação de diferentes grupos funcionais da estrutura polimérica desses geossintéticos (BARBEŞ et al., 2014). Essa técnica, também conhecida como FTIR-ATR, utiliza um cristal de alta densidade óptica que promove a interação da radiação apenas com a superfície da amostra (fenômeno da onda evanescente), em profundidades que variam tipicamente de 0,2 µm a 2,0 µm. Essa especificidade torna a técnica ATR uma

ferramenta ágil para a caracterização da interface e para a detecção de processos de degradação que se iniciam na superfície dos geotêxteis, uma vez que se trata de um método não destrutivo, o qual requer pouca ou nenhuma preparação da amostra (ALMOND et al., 2020). Em contrapartida, a técnica de transmissão clássica permanece como um método de referência para investigar as propriedades volumétricas (*bulk*) e a composição interna das fibras, sendo frequentemente empregada quando se exige a representação da massa total do polímero. Dessa maneira, ambas as modalidades apresentam condições distintas para respaldo confiável: enquanto a técnica FTIR-ATR depende da qualidade do contato mecânico entre o tecido e o cristal para evitar perdas de sinal, a transmissão exige uma preparação criteriosa para mitigar fenômenos de espalhamento de luz inerentes a materiais densos.

Diante da complexidade estrutural dos geotêxteis tecidos, o presente estudo tem como objetivo comparar e discutir o desempenho analítico da espectroscopia FTIR nas modalidades de transmissão e o ATR. Pretende-se investigar a sensibilidade de cada método na detecção de novos grupos funcionais, ponderando as contribuições da amostragem superficial do módulo ATR frente à representatividade volumétrica da transmissão. Em última análise, este trabalho visa fornecer um referencial técnico para a seleção fundamentada da técnica espectroscópica em ensaios de durabilidade, auxiliando na padronização de protocolos de caracterização para a previsão da vida útil de geossintéticos.

2 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo fundamenta-se na análise comparativa entre dados espectroscópicos secundários (obtidos pela técnica de transmissão) e dados experimentais primários (obtidos por ATR). As etapas do processo de pesquisa, desde a seleção dos materiais à correlação dos índices de degradação, estão esquematizadas no fluxograma apresentado na Figura 1.



Figura 1. Fluxograma esquemático da metodologia de pesquisa

A pesquisa foca na comparação entre duas técnicas distintas voltadas para a análise do estado de degradação em um geotêxtil tecido de PP. O estudo abrange amostras intactas e amostras submetidas a dois regimes de degradação controlada distintos: envelhecimento natural em campo (6, 12 e 24 meses) e envelhecimento acelerado em laboratório (100, 130, 270 e 600 ciclos), permitindo o monitoramento das bandas de carbonila sob diferentes condições de exposição.

A constituição da base de dados secundária apoiou-se na extração e reanálise dos registros experimentais publicados por Dias Filho et al. (2019). Focado na validação da espectrofotometria como ferramenta para caracterização da durabilidade de geotêxteis tecidos, o trabalho forneceu os parâmetros espectrais por meio da técnica de transmissão para amostras submetidas a rigorosos protocolos de envelhecimento: exposição natural em campo (até 24 meses) e degradação acelerada em laboratório (até 600 ciclos - ASTM D4355). A investigação experimental (dados primários) aplicou a técnica ATR nas mesmas classes de amostras, permitindo uma comparação direta entre as respostas do material sob as diferentes condições de ensaio.

2.1 Materiais

Para a obtenção dos dados secundários foi selecionado um geotêxtil tecido em monofilamento de PP de 500 g/m², gerando a denominação PP500, cujas características são apresentadas na Tabela 1. As amostras ensaiadas para a composição da base de dados primária correspondem às mesmas utilizadas no estudo de referência, no qual não foram submetidas a processos de preparação destrutivos.

Tabela 1. Propriedades do geotêxtil intacto.

Propriedade	PP500
Resistencia à Tração (kN/m)	106,2 ± 2,0
Gramatura (g/m²)	500 ± 9
Espessura (mm)	1,53 ± 0,04

2.2 Transmissão

A espectroscopia por transmissão baseia-se na passagem de um feixe de infravermelho através da amostra, com um detector fazendo a medição da intensidade da radiação que sobrevive ao percurso óptico. Dessa forma, o método permite a análise da composição volumétrica total da fibra, a qual resulta de uma média entre o estado da superfície e do núcleo amostral. Para geotêxteis tecidos, que são materiais de alta gramatura, opacidade e espessura considerável, a transmissão direta é dificilmente viável sem uma preparação extensiva da amostra. No entanto, no contexto desse estudo, os ensaios foram realizados com as amostras em seu estado original, sem alteração de seu estado físico, permitindo a avaliação da degradação.

Os ensaios realizados dentro do espectro correspondente ao infravermelho vibracional (4000-500 cm^{-1}) foram executados em um espectrofotômetro Shimadzu IRAffinity-1.

2.3 Reflectância Total Atenuada (ATR)

O princípio do método ATR baseia-se na reflexão interna total do feixe de infravermelho dentro de um cristal de alto índice de refração, denominado Elemento de Reflexão Interna (IRE). Assim que esse feixe atinge a interface entre o cristal e o geotêxtil, uma onda evanescente é gerada, penetrando a amostra em profundidades que podem variar entre 0,2 µm a 2,0 µm. Dessa forma, a técnica permite leituras superficiais, avaliando com maior precisão o estado inicial de degradação polimérica.

Os ensaios experimentais realizados por meio desse método foram executados em um espectrofotômetro Shimadzu IRAffinity-1S com acoplamento do módulo QATR 10 *Single-Reflection ATR Accessory*, equipado com um cristal de diamante com área de contato de 1,8 mm e ângulo de incidência de 45º. As amostras foram analisadas em triplicata por espectros de absorbância na região do infravermelho médio, nos quais foram realizadas correções de linha de base por meio do software *LabSolutions IR*, disponibilizado pela fabricante. Nesse sentido, a fim de garantir que as áreas e alturas das bandas representem verdadeiramente as concentrações na superfície da amostra, cinco ferramentas de correção foram utilizadas em todos os espectros obtidos: *background* (BKG), pré-processamento espectral responsável por eliminar interferências atmosféricas e/ou instrumentais; *arithmetic*, elimina desvios e interferências de fundo para estabilidade; *normalize*, padroniza a intensidade; *baseline correction*, elimina inclinações, ruídos de fundo e deslocamentos; *smoothing*, suaviza o ruído sobre a linha de base.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Perfil espectral

A caracterização molecular do PP500 por meio das duas técnicas de infravermelho permitiu identificar as bandas e bandas de absorção típicos do polímero. Em todos os espectros, destacam-se as faixas de absorção e intensidade características para estiramentos $C-H$ (2870-2960 cm^{-1}), as deformações angulares e assimétricas dos grupos metileno CH_2 e metil CH_3 em 1456 cm^{-1} e as deformações simétricas do grupo metila CH_3 em 1377 cm^{-1}. O monitoramento dessas bandas é crucial, pois elas atuam como indicadores precoces da cisão de cadeia antes do surgimento nítido de bandas de oxidação.

3.2 Comparação entre as técnicas: ATR e Transmissão

A comparação visual entre os métodos revela discrepâncias significativas na qualidade do sinal. Os espectros obtidos via FTIR-ATR (Figuras 2a e 3a) apresentam linhas de base planas e bandas bem definidas, características resultantes do caminho óptico controlado pela onda evanescente (0,2 µm a 2,0 µm), a qual interage apenas com a superfície da amostra (BARBEŞ et al., 2014). Em contrapartida, a técnica de transmissão (Figuras 2b e 3b) exibiu acentuada instabilidade espectral similar a Almond et al., 2020. Pode-se observar um desvio nas linhas de base e um aumento no ruído de fundo, fenômenos que podem ser atribuídos ao espalhamento de luz (*scattering*) provocado pela geometria das fibras e pela alta densidade do tecido.

3.3 O fenômeno da saturação na Transmissão

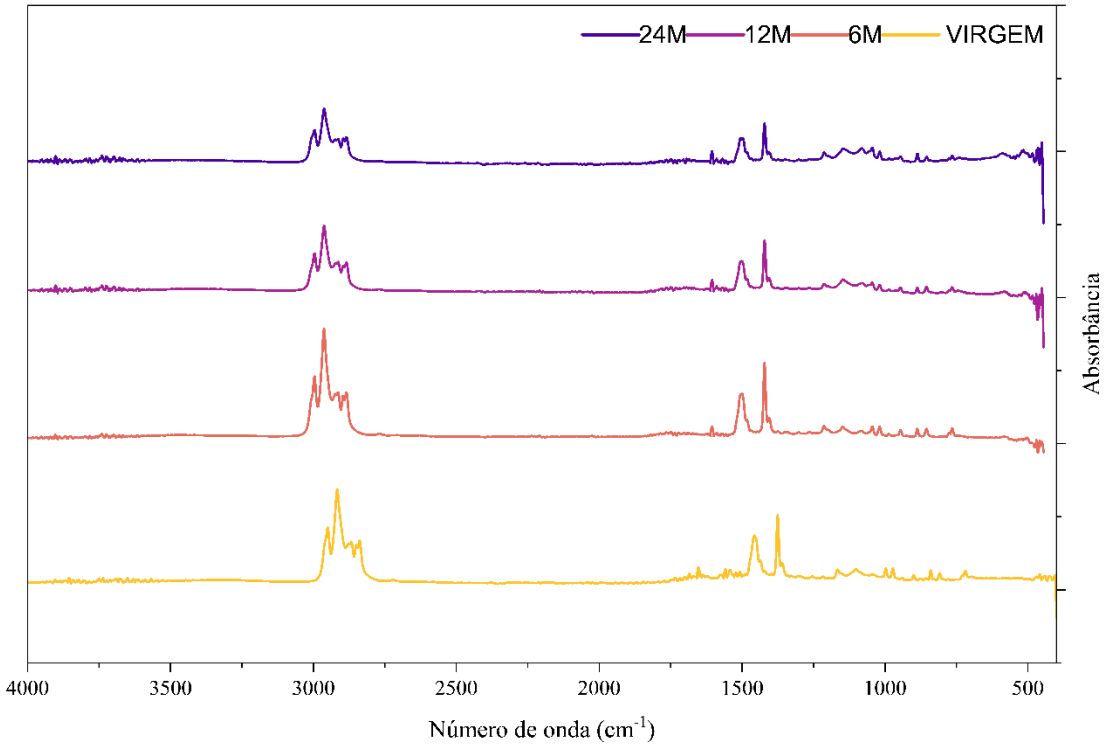
É possível inferir, a partir das Figuras 2b e 3b, que houve saturação por meio dos resultados dos ensaios de transmissão para as amostras: intacta (virgem) e às submetidas a degradação em laboratório a 100 ciclos (100C) e a 130 ciclos (130C), bem como degradação em campo com 6 meses (6M). Nesses espectros, os valores de absorbância excederam o intervalo indicado pela ASTM E1252 para as bandas mais fortes (entre 1 a 2 AU), ultrapassando os limites de linearidade do detector presente no espectrofotômetro utilizado. Além disso, nessas mesmas curvas foram observados valores negativos de absorbância, os quais podem estar relacionados ao *scattering* (ALMOND et al., 2020; DIAS FILHO et al., 2019).

A saturação ocorre a partir da absorção total de importantes bandas devido a espessura e a densidade óptica do geotêxtil PP500 excederem o caminho óptico ideal para transmissão, o qual se insere no intervalo de 10 a 50 µm, a fim de garantir uma leitura precisa. Quando o sinal atinge a saturação, o espectro pode apresentar bandas com "topo achatado" que impossibilitam a quantificação real da degradação. O módulo ATR contorna essa limitação técnica ao isolar a análise à camada superficial (BARBEŞ et al., 2014), mantendo os sinais dentro da escala dinâmica de medição, conforme pode ser observado pelas Figuras 2a e 3a.

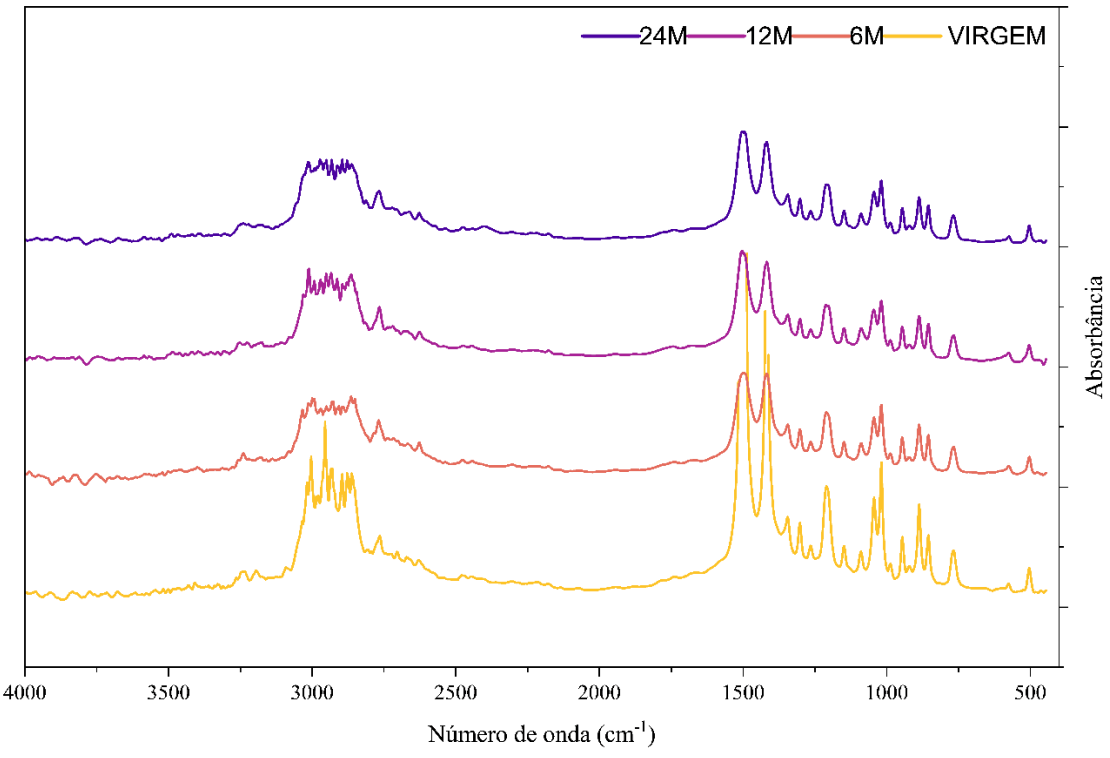
3.4 Monitoramento do avanço da degradação

A formação de carbonila e metil podem ser um indicador relevante na análise da durabilidade de geotêxteis. Com a comparação entre os dados de estresse ambiental obtidos no estudo de Dias Filho et al. (2019), adaptados e apresentados na Tabela 2, é possível observar uma correlação direta entre o tempo de exposição e a formação de grupos carbonila. Com o emprego da técnica de transmissão, a amostra 600C, correspondendo a aproximadamente 4800 horas de exposição, apresentou o maior índice de carbonila, evidenciado pelo crescimento da banda em 1712 cm^{-1}. A amostra exposta por 24 meses (24M), por sua vez, submetida a cerca de 17.280 horas de radiação natural, exibiu alterações estruturais similares.

O monitoramento e técnica utilizada via FTIR-ATR permitiu detectar melhor a evolução da carbonila e metil, onde o modo de transmissão, devido ao ruído e à saturação das bandas adjacentes, pode promover falha de interpretação e cálculo. Nas amostras virgens, a existência do grupo carbonila é mínima. À medida em que o tempo de degradação aumenta, a altura e a área dessa banda aumentam discretamente, indicando a foto-oxidação causada pela radiação UV. Além da oxidação química, a simultânea redução na intensidade da banda de metil (1377 cm^{-1}) serve como indicador da cisão de cadeias moleculares, com posterior fragilização mecânica das fibras, que precede falhas em campo.

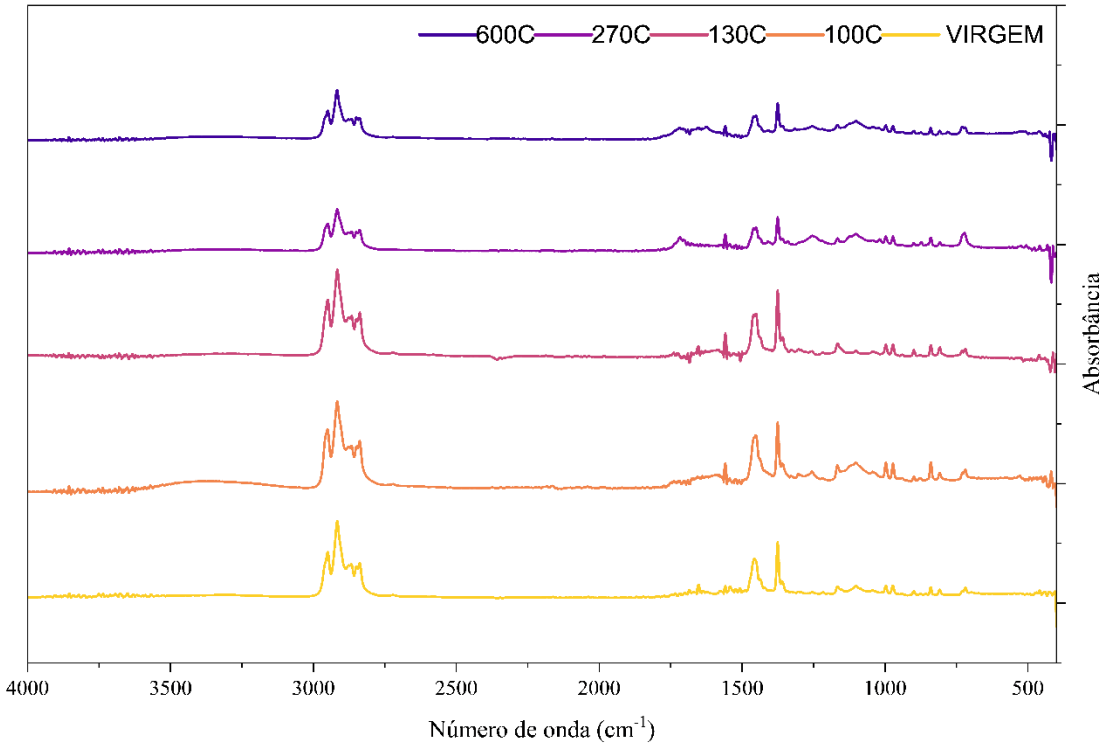


(a) ATR

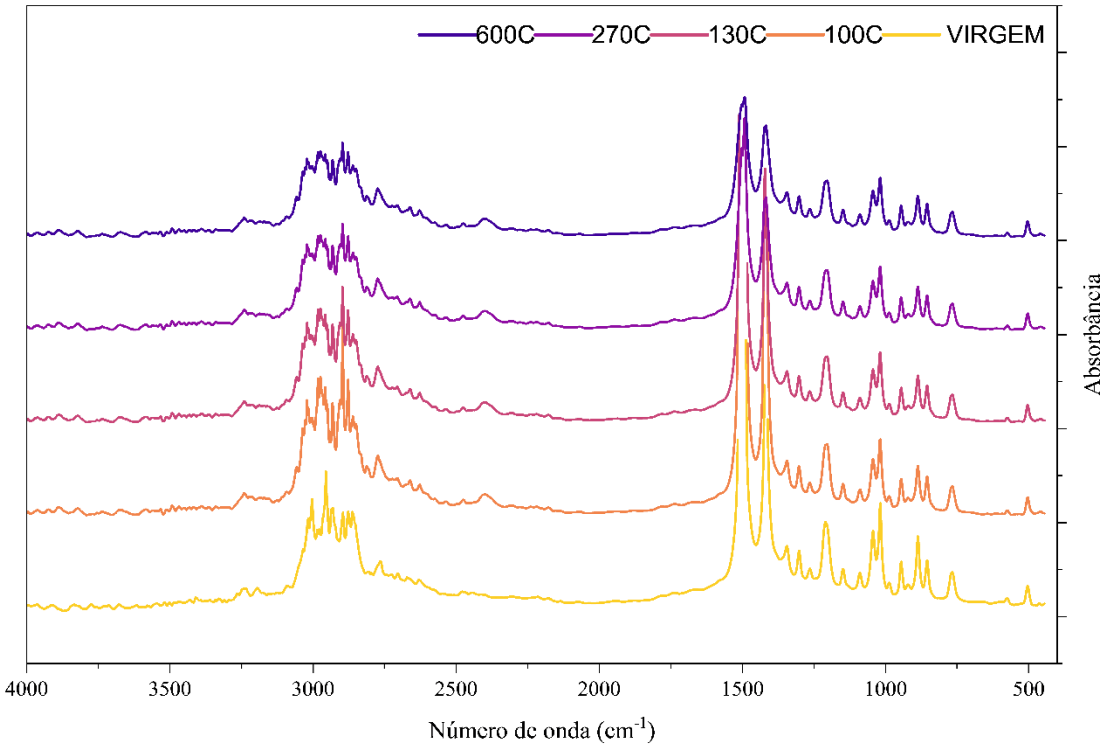


(b) Transmissão

Figura 2. Espectros das amostras intacta e degradadas em campo.



(a) ATR



(b) Transmissão

Figura 3. Espectros das amostras intacta e degradadas em laboratório.

Tabela 2. Parâmetros de tempo de degradação da amostra PP500

Condição	Amostra	Tempo		Absorbância	
		Dias	Horas	Carbonila (%)	Metil (%)
Exposição em campo	6M	180	4320	8,69	39,00
	12M	360	8640	18,21	94,04
	24M	720	17280	26,65	141,18
Exposição em laboratório	100C	33,33	800	13,41	19,14
	130C	43,33	1040	17,56	27,34
	270C	91,00	2160	23,38	43,74
	600C	200,00	4800	27,53	84,73

4 CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que, embora a transmissão seja um método clássico para a análise volumétrica, sua aplicação em geotêxteis tecidos, como o PP500, é limitada pelo excesso de absorção e consequente saturação das bandas mais fortes, já que a gramatura do material pode comprometer a análise. A técnica de transmissão com o módulo ATR provou ser mais adequada para este estudo, garantindo estabilidade espectral e sensibilidade necessária para detectar precocemente os primeiros sinais de degradação induzidas pela radiação UV e pela temperatura, para poder seguir com análises quantitativas.

O ATR provou ser uma ferramenta eficaz para caracterizar alterações limitadas à superfície do material, causadas pela exposição a agentes degradantes, principalmente quando comparadas a técnica tradicional de transmissão. As análises qualitativas, comparando os resultados dos espectros, permitiram uma melhor visualização da evolução da oxidação com o tempo de degradação nas bandas de carbonila e metil.

O FTIR-ATR destaca-se também pela rapidez no procedimento experimental e pela preservação da integridade da amostra, sendo recomendado para triagens rápidas. Dessa forma, a metodologia apresentada com o atenuador permite o monitoramento evolução da degradação dos geotêxteis e confirma que é possível avaliar materiais de maior gramatura sem que ocorram ruídos e interpretação equivocada.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ. Os autores agradecem também o apoio da UFOB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almond, Jasmine; Sugumaar, Piriya; Wenzel, Margot N.; Hill, Gavin; Wallis, Christopher (2020) Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy. *e-Polymers*, v. 20, p. 369–381.

ASTM International (2013). ASTM E1252: *Standard practice for general techniques for obtaining infrared spectra for qualitative analysis.*

Barbeş, L.; Rădulescu, C.; Stihi, C. (2014) ATR-FTIR spectrometry characterisation of polymeric materials. *Romanian Reports in Physics*, v. 66, n. 3, p. 765–777.

Costa, Carina M. L. (2008) Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 18, n. 2, p. 158–169.

Dias Filho, J.L.E., Maia, P.C.A., Xavier, G.C. (2019) "Spectrophotometry as a tool for characterizing durability of woven geotextiles". *Geotextiles and Geomembranes*, v. 47, n. 4, 577–585.

International Organization for Standardization (2018). ISO 13438: *Geosynthetics - Screening test method for determining the resistance of geotextiles and geotextile-related products to oxidation.*

Salah, H. (2020) Technical specifications of geotextile and applications in marine works. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 7, n. 1, p. 385–395.