



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

**ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA ENTRE BANNERS E GEOMEMBRANAS  
DE PVC COMO CAMADA DE IMPERMEABILIZAÇÃO EM TELHADOS VERDES**

Karen Ferreira Martins dos Santos

Projeto de Graduação apresentado ao  
Curso de Engenharia Ambiental da Escola  
Politécnica, Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do título de  
Engenheiro.

Orientador: Elaine Garrido Vazquez

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2019

Santos, Karen Ferreira Martins

Análise experimental comparativa entre *banners* e geomembranas de PVC como camada de impermeabilização em telhados verdes/ Karen Ferreira Martins dos Santos – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2019.

XIV, 83: il.; 29,7 cm.

Orientador: Elaine Garrido Vazquez.

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Curso de Engenharia Ambiental, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 73-80.

1.Telhados verdes 2. Impermeabilização 3. *Banners* 4. Geomembranas 5. PVC.

I. Vazquez, Elaine Garrido. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Ambiental. III. Análise experimental comparativa entre *banners* e geomembranas de PVC como camada de impermeabilização em telhados verdes.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Deus por ter me guiado para chegar até aqui.

À minha família - pai, mãe e irmã - que sempre se mantiveram ao meu lado, apoiando-me com palavras de conforto e ânimo durante a caminhada acadêmica.

À UFRJ que, com sua infraestrutura e profissionais qualificados, permitiu o desenvolvimento de habilidades e conhecimentos pessoais e únicos para meu futuro profissional.

À Enactus UFRJ que me proporcionou experiências incríveis durante meu período acadêmico, renovando minhas forças, e me direcionou para a escolha do tema aqui abordado.

À minha querida orientadora, que aceitou meu acanhado e ousado convite de desenvolver a nova pesquisa apresentada nesse trabalho, incentivando e direcionando cada etapa.

À professora Elen e ao professor Wilson que, sempre muito dispostos e cordiais, abriram as portas para a realização dos meus ensaios e aceitaram o convite para participar da minha banca examinadora. Ao professor Josimar que me deu a honra de somar à banca.

À Viviane que me ajudou na realização dos ensaios previstos, sem nunca medir esforços e que, hoje, tornou-se uma amiga.

Às minhas eternas mestrandas e amigas, Carla e Cláisse, que, por meio do CNPq/UFRJ, permitiram e me ensinaram a ter uma visão mais ampla sobre o meio acadêmico. Vocês me deram o conhecimento que eu precisava para a elaboração do meu cronograma, organização das tarefas e realização das atividades em meio laboratorial.

Aos meus amigos e companheiros de curso que mostraram o que é uma verdadeira família ambiental, compartilhando experiências e aprendizados que sempre levarei comigo.

E, por fim, a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa jornada.

*“Desenvolvimento sustentável significa usarmos nossa ilimitada capacidade de pensar em vez de nossos limitados recursos naturais”*  
(JUHA SIPILÄ, Finlândia).

# Resumo

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Análise Experimental Comparativa entre *Banners* e Geomembranas de PVC como Camada de Impermeabilização em Telhados Verdes  
Karen Ferreira Martins dos Santos  
Fevereiro/2019

Orientador: Elaine Garrido Vazquez

Curso: Engenharia Ambiental

A urbanização favoreceu o surgimento de impactos ambientais. Devido a isso, alternativas mais sustentáveis têm sido desenvolvidas em diferentes áreas. Na construção civil, destaca-se o telhado verde. Na área de resíduos, há o incentivo pela busca de alternativas para o uso de materiais com alto tempo de decomposição. Este é o caso de *banners*, materiais que possuem baixa permeabilidade. Diante de iniciativas já realizadas onde o *banner* é utilizado como camada de impermeabilização em telhados verdes e a falta de embasamento científico para viabilizar esta aplicação, a presente pesquisa tem por objetivo analisar a viabilidade executiva e técnica de *banners* serem reutilizados como camada de impermeabilização de telhados verdes em substituição às geomembranas a partir de uma revisão bibliográfica sobre o tema, seguida pela apresentação de um exemplo de aplicação do *banner* como impermeabilizante e testes experimentais de algumas das propriedades físicas e mecânicas de dois *banners* e uma geomembrana. Os resultados obtidos evidenciaram maior resistência a tração dos *banners* quando comparados à geomembrana. A densidade se manteve dentro da faixa recomendada pela literatura. A gramatura e espessura dos *banners* salientam a necessidade de sobreposição de camadas. Os resultados mostram que os *banners* possuem potencial para a aplicação. Contudo, seu uso requer cuidados e estudos mais aprofundados, sobretudo a determinação de outras propriedades, a fim de garantir seu desempenho. Ademais, as particularidades entre os *banners* demandam controle sobre cada material usado, limitando sua aplicação em grande escala.

**Palavras-chave:** Impermeabilização. Telhado verde. Geomembrana. *Banner*.

# Abstract

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Comparative Experimental Analysis Between *Banners* and PVC Geomembranes as Waterproofing Layer on Green Roofs  
Karen Ferreira Martins dos Santos

February/2019

Advisor: Elaine Garrido Vazquez

Course: Environmental Engineering

Urbanization favored the emergence of environmental impacts. Because of it, more sustainable alternatives have been developed in different areas. In civil construction, the green roof stands out. In the waste area, there is an incentive to search for alternatives for the use of materials with high decomposition time. This is the case of banners, materials that have low permeability. Due to initiatives already undertaken where the banner is used as a layer of waterproofing on green roofs and the lack of scientific basis to make this application viable, the present research aims to analyze the executive and technical feasibility of banners to be reused as a layer of waterproofing of green roofs to replace the geomembranes from a bibliographic review on the subject, followed by the presentation of an example of the banner application as waterproofing and experimental tests of some of the physical and mechanical properties of two banners and a geomembrane. The obtained results evidenced greater tensile strength of the banners when compared to the geomembrane. The density was close to that recommended by the literature. The weight and thickness show the need for layer overlapping. The results show that banners have potential for application. However, its use requires further care and studies, especially the determination of other properties, in order to guarantee its performance. In addition, the particularities of each banner require control over each material used, which limits its application on a large scale.

**Keywords:** Waterproofing. Green roofs. Geomembrane. Banner.

# Sumário

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1.       | INTRODUÇÃO.....   | 1  |
| 1.1.     | Contextualização .....  | 1  |
| 1.2.     | Objetivo .....  | 5  |
| 1.2.1.   | Objetivo Geral.....   | 5  |
| 1.2.2.   | Objetivos Específicos.....  | 5  |
| 1.3.     | Justificativa .....   | 5  |
| 1.4.     | Metodologia .....   | 7  |
| 1.5.     | Descrição dos Capítulos .....                                       | 8  |
| 2.       | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 10 |
| 2.1.     | Telhados Verdes: um estudo sobre a camada de impermeabilização..... | 10 |
| 2.1.1.   | Considerações iniciais .....  | 10 |
| 2.1.2.   | Classificação dos Telhados Verdes .....                             | 11 |
| 2.1.3.   | Componentes de um Telhado Verde .....                               | 13 |
| 2.1.4.   | Camada de Impermeabilização.....                                    | 15 |
| 2.2.     | Geomembranas .....  | 20 |
| 2.2.1.   | Considerações Iniciais .....  | 20 |
| 2.2.2.   | Processo de Fabricação .....  | 23 |
| 2.2.3.   | Polímeros .....   | 24 |
| 2.2.3.1. | Processo de Polimerização.....                                      | 25 |
| 2.2.3.2. | Difusão em Polímeros.....   | 27 |
| 2.2.3.3. | Comportamento Mecânico de Polímeros .....                           | 27 |
| 2.2.4.   | Ensaios em Geomembranas.....  | 29 |
| 2.3.5.   | Permeabilidade em Geomembranas.....                                 | 31 |
| 2.3.5.1. | Permeabilidade em Geomembranas.....                                 | 31 |
| 2.3.5.2. | Permeabilidade e Estanqueidade .....                                | 34 |
| 2.3.     | <i>Banners</i> .....  | 34 |
| 2.3.1.   | Considerações Iniciais .....  | 34 |
| 2.3.2.   | Processo de Produção.....   | 35 |
| 2.3.2.1. | Impressão no <i>Banner</i> .....                                    | 35 |
| 2.3.3.   | <i>Banner</i> e o meio ambiente .....                               | 36 |
| 3.       | MATERIAIS E MÉTODOS .....   | 38 |
| 3.1.     | Materiais .....   | 38 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 3.2.     | Métodos .....   | 40 |
| 3.2.1.   | Gramatura .....   | 40 |
| 3.2.2.   | Espessura .....   | 41 |
| 3.2.3.   | Densidade .....   | 43 |
| 3.2.4.   | Resistência à Tração .....  | 45 |
| 3.2.4.1. | Ensaios Uniaxiais .....   | 47 |
| 3.2.4.2. | Ensaios Multiaxiais .....   | 49 |
| 4.       | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....                               | 52 |
| 4.1.     | Introdução .....  | 52 |
| 4.2.     | Exemplo de Aplicação – Protótipo de Telhado Verde com <i>banner</i> ..... | 52 |
| 4.2.1.   | Desenvolvimento do Protótipo .....  | 54 |
| 4.2.2.   | Análise de Desempenho .....   | 55 |
| 4.3.     | Execução dos Ensaios .....  | 57 |
| 4.3.1.   | Ensaio de Gramatura .....   | 57 |
| 4.3.2.   | Ensaio de Espessura .....   | 58 |
| 4.3.3.   | Ensaio de Densidade .....   | 58 |
| 4.3.4.   | Ensaio de Resistência à Tração .....                                      | 59 |
| 4.4.     | Resultados e Análises .....   | 61 |
| 4.4.1.   | Propriedades Físicas .....  | 61 |
| 4.4.2.   | Propriedades Mecânicas .....  | 65 |
| 5.       | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 69 |
| 5.1.     | Conclusão .....   | 69 |
| 5.2.     | Sugestão de Trabalhos Futuros .....                                       | 70 |
| 5.3.     | Limitações e Dificuldades .....   | 72 |
|          | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 73 |
|          | ANEXOS .....  | 81 |

# **Lista de Figuras**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Tipos de telhados verdes: a) extensivo; b) semi-intensivo; e c) intensivo.....  | 11 |
| Figura 2. Sistema MEG de telhados verdes.....   | 14 |
| Figura 3. Três tipos de disposição de camadas (A, B e C) em um telhado verde.....   | 14 |
| Figura 4. Sistema hidropônico de telhado verde composto por três camadas segundo Rezende (2013) .....   | 15 |
| Figura 5. Disposição da camada de impermeabilização composta por imprimação e manta de impermeabilização segundo Gatto (2012) .....             | 16 |
| Figura 6. Processo de formação da cadeia polimérica do PVC.....   | 25 |
| Figura 7. a) molécula de etileno; b) representação esquemática da unidade de repetição e estrutura da cadeia.....                               | 26 |
| Figura 8. Influência da temperatura no comportamento mecânico do poli(metacrilato de metila) .....  | 28 |
| Figura 9. Comportamento tensão versus deformação para: A - polímeros frágeis; B - plásticos; C - elásticos .....                                | 28 |
| Figura 10. Comportamento b) elástico; c) viscoelástico; e d) viscoso diante da aplicação de uma dada tensão (a) .....                           | 29 |
| Figura 11. Mecanismo de difusão em geomembranas .....   | 33 |
| Figura 12. <i>Banner</i> B1 utilizado na análise. A) Parte frontal; B) Parte posterior.....   | 39 |
| Figura 13. <i>Banner</i> B2 utilizado na análise. A) Parte frontal; B) Parte posterior.....   | 39 |
| Figura 14. Geomembrana GEO utilizada na análise. A) Parte frontal; B) Parte posterior.....  | 40 |
| Figura 15. Comportamento tensão versus deformação para diferentes tipos de geomembranas.....  | 47 |
| Figura 16. Corpo de prova em formato “haltere” para ensaio de tração .....  | 48 |
| Figura 17. Protótipo do telhado verde com <i>banner</i> para impermeabilização recém concebido em setembro de 2016 .....                        | 53 |
| Figura 18. Camadas do protótipo de telhado verde com <i>banner</i> .....  | 55 |
| Figura 19. Protótipo de telhado verde composto por <i>banner</i> para impermeabilização em janeiro de 2019 .....                                | 56 |
| Figura 20. Verificação da estanqueidade do sistema pela: a) Irrigação do protótipo; e b) verificação da estanqueidade sob o <i>banner</i> ..... | 56 |
| Figura 21. Ensaio de gramatura em lona de PVC .....   | 57 |
| Figura 22. Equipamento para ensaio de espessura .....   | 58 |
| Figura 23. Equipamento para ensaio de densidade com base na ASTM D792.....  | 59 |
| Figura 24. Máquina universal de ensaios.....  | 59 |
| Figura 25. Resultados mínimo e máximo para cada material .....  | 61 |
| Figura 26. Valores de Espessura mínimos e máximos dos materiais ensaiados e aqueles recomendados pela literatura .....                          | 62 |
| Figura 27. Resultados do ensaio de densidade dado os valores mínimos e máximos e valores recomendados pela literatura .....                     | 63 |
| Figura 28. Perda de tinta, na cor azulada, do <i>banner</i> B1 para a água durante ensaio de densidade .....                                    | 64 |
| Figura 29. Tensão versus deformação para amostras B1, B2 e GEO .....  | 66 |
| Figura 30. Resultado dos ensaios de tração para as amostras de <i>banner</i> .....  | 67 |
| Figura 31. Gráfico tensão versus deformação para amostras B1 e GEO .....  | 68 |

Figura 32. Gráfico tensão *versus* deformação para amostras B2 e GEO ..... 68

## **Lista de Quadros**

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1. Classificação e características dos telhados verdes.....                              | 12 |
| Quadro 2. Vantagens e desvantagens entre PVC e PEAD .....                                       | 22 |
| Quadro 3. Matéria prima e respectivo polímero gerado .....                                      | 24 |
| Quadro 4. Alguns polímeros, seus monômeros de formação e respectivas unidades de repetição..... | 26 |
| Quadro 5. Relação do aumento de densidade com outras propriedades em polietileno .....          | 44 |
| Quadro 6. Ensaios realizados e respectivas normas .....   | 52 |

## **Lista de Tabelas**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Composição típica de diferentes geossintéticos .....                              | 23 |
| Tabela 2. Propriedades mínimas exigidas para geomembranas de PVC flexíveis .....            | 49 |
| Tabela 3. Valores comparativos de ensaios de tração para PVC com 0,75 mm de espessura ..... | 51 |
| Tabela 4. Resultado dos ensaios de propriedades físicas .....                               | 64 |
| Tabela 5. Resultados do ensaio de tração .....  | 65 |

# **Lista de Siglas e Símbolos**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
A.C. – Antes de Cristo  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
CEN – *European Committee for Standardization*  
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
CMMAD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento  
CPE-R – Polietileno Clorado Reforçado  
CQF – Controle de Qualidade de Fabricação  
CQI – Controle de Qualidade de Instalação  
CSPE – Polietileno Clorossulfonado  
DSC – Calorimetria Diferencial de Varredura  
E – Módulo de Elasticidade  
ECO-92 – Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento Humano de 1992  
EIA-R – Liga de Interpolímero de Etileno Reforçado  
EPDM – Borracha de Etileno Propileno  
EPS – Poliestireno Expandido  
f-PP – Polipropileno Flexível  
GBR – Barreira Geossintética  
GBR-P – Barreira Geossintética Polimérica  
GM – Geomembrana  
HCl – Ácido Clorídrico  
IGRA – Associação Internacional de Telhados Verdes  
ISO – *International Organization for Standardization*  
KCI – Cloreto de Potássio  
MEG – Modern Extensive Greenroof  
ONU – Organização das Nações Unidas  
PE – Polietileno  
PEAD – Polietileno de Alta Densidade  
PELBD – Polietileno Linear de Baixa Densidade  
PEMD – Polietileno de Média Densidade  
PET – Poli (Tereftalato de Etileno)  
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
PP – Polipropileno

PVC – Poli(Cloreto de Vinila)

SBS – Borracha de Estireno Butadieno

SVT – Transmissividade aos vapores de solventes

TGA – Análise Termogravimétrica

TMA – Análise Termomecânica

USEPA – Agência de Proteção Ambiental Americana

UV – Ultravioleta

VLDPE – Polietileno de Densidade Muito Baixa

VWT – Permeabilidade ao vapor de água

WBCSD – Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

Impermeabilização de áreas impedindo o escoamento da água de chuva, geração de resíduos e seu posterior descarte nem sempre adequado, formação de ilhas de calor, emissão de gases do efeito estufa e poluição sonora são alguns dos impactos ambientais negativos advindos do processo de urbanização. Apesar de necessário para o desenvolvimento socioeconômico, o processo deve agrupar não somente as áreas social e econômica, mas também a ambiental.

Surge, então, o conceito de desenvolvimento sustentável, englobando os aspectos social, ambiental e econômico. Dessa forma, os assuntos passam a ser discutidos contemplando questões como mudanças climáticas, consumo de recursos naturais, gestão de resíduos e poluição ambiental, ao mesmo tempo em que consideram as questões social e econômica de um local (GATTO, 2012).

A introdução desse tripé no comportamento das cidades permite que projetos sejam elaborados de maneira que os três fatores se equilibrem ao máximo, garantindo o ganho econômico, a conservação ambiental e o suprimento das necessidades sociais.

Na história, a preocupação com a questão ambiental começou a deflagrar ações em 1968 a partir da criação do Clube de Roma. Formado por dez países representados por trinta pessoas, o Clube tinha por objetivo discutir e analisar os limites de crescimento econômico ao mesmo tempo em que leva em conta o uso crescente dos recursos naturais. As discussões originaram o estudo intitulado “Limites do Crescimento” que pregava a necessidade de parar o crescimento econômico, uma vez que levaria ao esgotamento de recursos naturais no futuro (CHAVES, 2014).

Anos depois, em 1972, houve o primeiro encontro mundial para discutir a relação entre o desenvolvimento econômico e o uso de recursos naturais, além de objetivar a conscientização da sociedade em prol do meio ambiente, com a participação de representantes governamentais e não governamentais. Esse encontro ficou conhecido como Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano, ou apenas Conferência de Estocolmo, e apresentou grande importância no

desenvolvimento do pensamento de que é possível articular crescimento econômico com preservação ambiental.

Em 1987, o conceito de desenvolvimento sustentável foi, pela primeira vez, definido e descrito pelo Relatório *Brundtland*, ou *Nosso Futuro Comum*, elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Segundo esta, trata-se do desenvolvimento que satisfaz as necessidades das gerações presentes sem prejudicar as necessidades das gerações futuras (CMMAD, 1987).

O relatório tornou pública uma lista de ações propostas a nível nacional, a saber: limitar o crescimento da população; garantir a provisão de alimentos em longo prazo; preservar a biodiversidade; diminuir o consumo de energia e desenvolver tecnologias baseadas em energias renováveis; desenvolver a produção industrial nos países não industrializados, com base em tecnologias de baixo impacto ambiental; controlar a urbanização e integrar os pequenos meios urbanos e zonas rurais; e atender as necessidades básicas.

O termo, porém, só foi amplamente divulgado e conhecido em 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento Humano que ocorreu no Rio de Janeiro. Mais conhecida como ECO-92 ou RIO-92, esse encontro contou com a participação de chefes de Estado que reconheceram o conceito de desenvolvimento sustentável e concordaram em sua promoção, mostrando a importância do tema ambiental que existia na época (CHAVES, 2014).

O saldo positivo da ECO-92 foi, dentre outros resultados, o surgimento de documentos, como a Agenda 21 - um plano de ação global com visão a longo prazo sobre o desenvolvimento sustentável, englobando áreas como energia, atmosfera, pobreza e população -, além de leis nacionais de incentivo às ações e indicadores para avaliação da sustentabilidade, como a Pegada Ecológica e o Índice de Sustentabilidade Ambiental.

Segundo Goulart (2012), a discussão sobre o tema foi importante ainda para impulsionar a elaboração do Protocolo de *Kyoto* assinado em 1997, que tinha por objetivo reduzir as emissões de gases do efeito estufa em países desenvolvidos e, consequentemente, os impactos ambientais. O principal alvo desse acordo era o dióxido de carbono, dito por especialistas ser um gás ligado ao aquecimento global, responsável por efeitos catastróficos à humanidade em longo prazo.

Outros encontros ocorreram nos anos seguintes, como: a Cúpula Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável ou RIO+20 em 2012, a fim de avaliar o progresso desde a ECO-92 e definir novas metas; a Cúpula das Nações Unidas para Desenvolvimento Sustentável em 2015, que resultou na elaboração da Agenda 2030, composta pelos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e suas 169 metas; a 21<sup>a</sup> Conferência das Partes, também em 2015, que culminou no Acordo de Paris, a fim de prosseguir com as intenções do Protocolo de *Kyoto*; e, a mais recente, COP 24 em dezembro de 2018, que definiu regras para implementação do Acordo de Paris.

Ressalta-se, ainda, o conceito de ecoeficiência. Termo cunhado com base no desenvolvimento sustentável, foi originalmente desenvolvido pelo *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*, ou Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável, como contribuição do setor privado à ECO-92. O conceito dispõe sobre a produção de um determinado bem ou serviço com a redução no uso de insumos e na poluição, mantendo os preços competitivos e sua qualidade no mercado. Nesse caso, o uso de recursos seria, no máximo, equivalente à capacidade de sustentação ambiental do planeta (VERFAILLIE & BIDWELL, 2000).

Dentre os princípios da ecoeficiência encontram-se: reduzir o uso do material, reduzir o consumo de energia, reduzir a dispersão de substâncias tóxicas, reduzir a emissão de gases poluentes, ampliar a reciclagem, maximizar o uso de fontes renováveis, aumentar a durabilidade do produto e agregar valor ao bem ou serviço.

Contudo, para alcançar o desenvolvimento proposto, é importante que todos os agentes participantes se tornem responsáveis e atuem a fim de garantir a sustentabilidade de suas cidades, como bem orienta a Lei 12.305 com o conceito de *Responsabilidade Compartilhada*. Segundo a Lei, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), a responsabilidade é sobre todos aqueles que participam da cadeia desde a geração de produtos até a destinação final de seus respectivos resíduos.

Na presente pesquisa, considera-se a responsabilidade compartilhada em um conceito mais amplo, não somente sobre atividades referentes à geração e gestão de resíduos sólidos, mas a todo tipo de atividade impactante ao meio ambiente. Com isso, a responsabilidade é sobre cada indivíduo, a fim de que apliquem alternativas

sustentáveis em seu modo de vida nas mais diferentes áreas, reduzindo seus impactos.

Nesse contexto, entram em voga dois temas associados ao desenvolvimento sustentável de uma cidade. Na área da construção civil, a demanda por alternativas tecnológicas ambientalmente corretas cresceu a fim de reduzir seus impactos, vide ser uma das áreas que mais impacta o meio ambiente, responsável por cerca de 30% das emissões de gases do efeito estufa na atmosfera (PEREIRA, 2009; CHAVES. 2014).

Essa demanda incentivou a recuperação e aprimoramento dos telhados verdes, técnica utilizada desde a Antiguidade que, com o passar do tempo, tem tomado espaço no mundo e, de forma mais morosa, no Brasil. Suas vantagens variam desde controle térmico a conforto acústico e atingem tanto o ambiente interno, sobre a qual está instalada, quanto ambientes externos próximos ao local (GATTO, 2012).

Na área de resíduos, as preocupações giram em torno da falta de gestão e destinação muitas vezes inadequada, conduzindo resíduos que poderiam ser reaproveitados, reciclados ou tratados, a aterros sanitários, controlados ou mesmo lixões. Assim acontece para *banners*, materiais costumeiramente utilizados em apresentações, exposições e propagandas. Com o tempo de vida útil extremamente curto e produzido a partir de materiais com alto tempo de decomposição, são dispostos em aterros, reduzindo sua vida útil e dificultando processos de decomposição de outros materiais pela formação de camadas impermeáveis (JUNG *et al*, 2015).

A característica impermeabilizante concedida aos *banners* através do polímero que lhe forma - em geral, poli(cloreto de vinila), como descrevem Jung *et al* (2015) e Najeliski (2017) - traz a possibilidade do material ser reutilizado com essa função em sistemas construtivos, como os telhados verdes que, tradicionalmente, demandam custos elevados para obtenção das membranas usuais de impermeabilização, as geomembranas.

Dessa forma, propôs-se demonstrar o potencial executivo de *banners* serem utilizados como substitutos de geomembranas na camada de impermeabilização em telhados verdes através de um exemplo de aplicação e avaliar sua viabilidade técnica através de ensaios experimentais.

## 1.2. Objetivo

### 1.2.1. Objetivo Geral

Analisar a viabilidade executiva e técnica de *banners* de PVC descartados serem reutilizados para compor a camada de impermeabilização em telhados verdes, por meio de uma revisão bibliográfica, um exemplo de aplicação do *banner* como camada de impermeabilização e ensaios laboratoriais de propriedades físicas e mecânicas de dois *banners* e uma geomembrana, a fim de realizar uma comparação entre os resultados e dados da literatura.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a camada de impermeabilização de telhados verdes
- Caracterizar os materiais geomembrana e *banner* de PVC
- Apresentar um exemplo de aplicação e seu desempenho
- Determinar, por meio de ensaios, propriedades físicas e mecânicas dos materiais
- Realizar análise comparativa entre os materiais, considerando sua aplicação em telhados verdes

## 1.3. Justificativa

Estudos e pesquisas voltados a técnicas mais sustentáveis são necessários e fundamentais para viabilizar sua aplicação, seja em qualquer escala, possibilitando e promovendo seu uso pelos mais variados setores da sociedade, independente de condições financeiras, locacionais, climáticas ou de disponibilidade de materiais (FÉLIX, 2008).

Partindo desse princípio, os telhados verdes têm se difundido devido à necessidade de amenizar os impactos ambientais causados com a urbanização. Caracterizado por ser uma superfície plantada, separada do solo por uma estrutura qualquer, possui inúmeros benefícios, sobretudo a redução da temperatura interna em edificações. Segundo Ohnuma (2008), essa redução pode variar de 3 a 7 °C quando comparada à

convencional, com potencial de atingir o ambiente externo em uma redução de 1 a 2 °C em grandes cidades (GOMES *et al apud* GATTO, 2012).

Ademais, aumenta a vida útil e reduz a necessidade de manutenção de telhados, aumenta a captação de águas pluviais, reduzindo o volume destinado a sistemas de captação de água públicos, reduz a poluição atmosférica pela sua atuação como filtro biológico e reduz a poluição sonora pela sua ação como isolante acústico.

Aqueles que adquirem o sistema têm ainda aumento da área útil da edificação e um ganho em qualidade de vida, com a possibilidade de desenvolver hortas e outras plantações alimentícias, influenciando em sua saúde física, além de prover um detalhe estético devido à sua aparência natural (NASCIMENTO, 2014; SAVI, 2012).

Com o passar dos anos, investimentos no desenvolvimento dos telhados verdes possibilitaram melhorias como a redução do peso e da espessura das camadas que compõem o sistema, a introdução de mais variedades na vegetação da cobertura e novos materiais para aumentar sua eficiência (SILVA, 2011). Entretanto, ainda possui um grande potencial a ser desbravado para que, por fim, possa se expandir por todas as cidades brasileiras e por todas as classes sociais.

Paralelamente, os *banners* têm sido descartados pelos seus usuários por desconhecimento de suas possibilidades de reuso, destinando-se a aterros sanitários (JUNG *et al*, 2015). Contudo, uma vez sem utilidade, os donos não possuem apego pelo material, tornando-se de fácil acesso para aqueles que o desejam a fim de aplicar em telhados verdes.

Sejam empresas que realizam divulgações em *banners* e periodicamente o renovam, sejam eventos acadêmicos anuais que demandam o material para exposição, existem fontes para sua obtenção espalhadas por todo o Brasil, como a Semana de Integração Acadêmica da UFRJ que utiliza cerca de 200 *banners* ao ano para exposições de trabalho em todos seus campus (UFRJ, 2019), além das semanas acadêmicas anuais dos cursos de graduação que costumam utilizar *banners* para divulgação do tema do evento.

Ressalta-se ainda que, apesar da introdução de meios digitais, como televisores, computadores, *notebooks*, *tablets* e celulares, os *banners* ainda são, muitas vezes, a principal fonte de propaganda de empresas ou de exposição de trabalhos. Portanto, a

escassez do produto não é uma questão de curto prazo, garantindo sua disponibilidade e necessidade de pesquisas quanto a um descarte adequado.

Outrossim, iniciativas já têm sido realizadas em prol da aplicação de *banners* em telhados verdes para impermeabilização. A Enactus UFRJ, como exemplo, é uma iniciativa acadêmica sem fins lucrativos que visa o empreendedorismo social. Dividida em vários projetos, auxilia comunidades precárias a desenvolver um empreendimento e, assim, obterem seu local à sociedade.

O “Teto Verde” é o projeto voltado para a aplicação de telhados verdes em moradias dentro de comunidades cujos donos não possuem poder aquisitivo para obtenção da técnica usual e nas quais, com sua implantação, poderiam ser introduzidas espécies vegetativas alimentícias, possibilitando a venda e geração de renda para os moradores. Assim, um dos objetivos é reduzir seu custo de instalação ao máximo, tornando-se viável tanto aos investimentos da Enactus quanto aos moradores das comunidades. A aplicação do *banner* seria um passo a mais para esse fim.

Portanto, vê-se a necessidade de instaurar uma pesquisa em prol de fornecer uma base acadêmica e reconhecimento do *banner* para possíveis aplicações em telhados verdes, corroborando para o uso de um produto e de uma técnica sustentável com referência em normas estabelecidas, uma vez que não há outro estudo acadêmico ou trabalho científico já publicado sobre o tema.

#### 1.4. Metodologia

O trabalho consistiu em uma pesquisa bibliográfica sobre telhados verdes, *banners* e geomembranas. Dessa forma, é fornecida uma base teórica que proporciona o direcionamento de ensaios usualmente aplicados em geomembranas e que podem ser aplicáveis em *banners*.

Em seguida, foi elucidado um exemplo de aplicação acerca de um protótipo de telhado verde composto por *banner* para a camada de impermeabilização, descrevendo seu desempenho ao longo do tempo.

Adicionalmente, realizou-se uma pesquisa experimental a partir de quatro ensaios escolhidos e uma análise comparativa diante dos resultados sobre ambos os materiais na função de manta de impermeabilização, considerando, sobretudo, sua aplicação na técnica estudada, o telhado verde.

As informações para composição da revisão bibliográfica foram obtidas, em sua maioria, a partir de fontes recentes e provenientes de pesquisas nacionais sobre o tema abordado, a fim de tornarem os dados mais representativos diante da pesquisa que tem por foco a implementação dos *banners* no Brasil.

Em relação aos ensaios desenvolvidos, devido à introdução relativamente recente das geomembranas no Brasil, há poucas normas originadas no país, elaboradas diante das características locacionais (LODI, 2003). Dessa forma, a parca documentação a nível nacional encontrada foi priorizada e utilizada a fim de fortalecê-la. Contudo, a falta de informações levou a pesquisa à obtenção de dados e ensaios internacionais, baseados em normas reconhecidas, como a ASTM.

## 1.5. Descrição dos Capítulos

O presente trabalho estrutura-se em cinco capítulos e parte pós-textual com as referências bibliográficas e anexos.

No capítulo 1 encontra-se a introdução. Mostrada neste capítulo, apresenta a contextualização do tema, seguida dos objetivos pretendidos com a pesquisa, as justificativas, a metodologia empregada e a descrição dos capítulos.

O capítulo que se segue compõe a revisão bibliográfica, apresentando informações e dados acerca dos telhados verdes, das geomembranas e dos *banners*, trazendo ainda um item dedicado à uma breve explicação acerca do principal material constituinte de ambos os materiais, os polímeros.

O capítulo 3 discorre sobre os materiais utilizados para a análise experimental e os dados obtidos através de seus fornecedores. Adicionalmente, descreve as propriedades e os métodos de ensaios usuais para determinação das mesmas.

O capítulo 4 apresenta um exemplo de aplicação a partir de um protótipo de telhado verde com *banner* e uma análise de seu desempenho, a descrição da execução dos ensaios realizados, apresentação dos resultados obtidos e sua respectiva análise.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais, composta pelas conclusões, sugestões para trabalhos futuros e limitações e dificuldades encontradas na realização da presente pesquisa.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas que retratam as fontes obtidas para elaboração da base teórica do estudo, seguida dos anexos para adição de informações complementares.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa traz à luz o envolvimento de três temas, a saber: telhado verde, *banners* e geomembranas. Cada qual possuem características, particularidades e considerações distintas. Dessa forma, este capítulo tem por objetivo a apresentação dos temas separados por itens, uma vez ser fundamental o conhecimento sobre todos para que, então, possam ser relacionados e atender aos objetivos da presente pesquisa.

### 2.1. Telhados Verdes: um estudo sobre a camada de impermeabilização

#### 2.1.1. Considerações iniciais

Dona de muitas nomenclaturas - cobertura verde, teto verde, telhado verde, ecotelhado, cobertura naturada, naturação ou telhados vivos - e de variadas definições, a técnica vem se expandindo vide a crescente preocupação ambiental no Brasil e no mundo, uma vez que é considerada parte harmoniosa do conceito de equilíbrio ecológico por oferecer inúmeras vantagens às edificações e ao ambiente no entorno (GATTO, 2012).

Os telhados verdes são estruturas capazes de suportar volumes determinados de terra, de vegetação, de água de chuva e de irrigação sobre o telhado de uma edificação (OHNUMA, 2008). Silva (2011) acrescenta ao dizer que são sistemas construtivos que podem ser instalados em lajes ou sobre telhados convencionais, oferecendo conforto térmico e acústico nos ambientes internos e têm sua cobertura vegetal feita de grama ou planta.

Rola (2008) amplia a aplicação da técnica para quaisquer superfícies construídas, proporcionando a revegetação do espaço. Ademais, dependendo da inclinação e o peso que a estrutura suporta, o sistema pode chegar a ser uma área de lazer.

Osmundson (1999) simplifica sua definição ao dizer que se trata de qualquer espaço aberto e plantado, com o propósito de proporcionar satisfação ao homem e melhorias ambientais, separado do solo por uma edificação ou outro tipo de estrutura qualquer.

Contudo, a técnica ainda encontra resistências, seja pelo receio de infiltração por problemas na camada de impermeabilização e, assim, danificar a estrutura da edificação; o receio na geração de pragas e/ou biodiversidade indesejada; um sobrecarregamento mal calculado sobre a estrutura; a ideia de alto custo para aquisição e instalação; ou mesmo o desconhecimento do sistema e seus benefícios.

Grande parte desses receios podem ser solucionados pela elaboração e correta instalação de um bom projeto, bastando a atuação de profissionais qualificados na área a fim de garantir a eficiência do telhado verde e o menor custo sobre ele aplicado.

### 2.1.2. Classificação dos Telhados Verdes

Os telhados verdes podem ser classificados, basicamente, em: extensivo, intensivo ou semi-intensivo, determinados em função de seu uso, tipo de vegetação e espessura do substrato (FERRAZ, 2012). A Figura 1 apresenta ilustrações que possibilitam a identificação visual das diferenças.

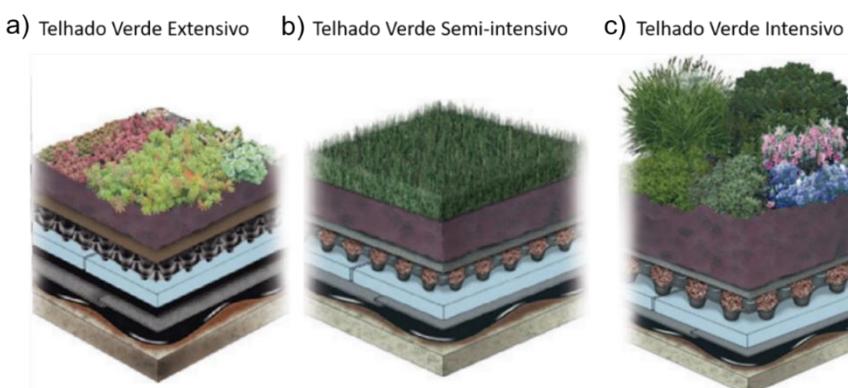


Figura 1. Tipos de telhados verdes: a) extensivo; b) semi-intensivo; e c) intensivo

American Hydrotech *apud* Ferraz (2012)

Nos extensivos são utilizadas vegetações de pequeno porte, rústicas e rasteiras, como gramíneas, que não demandam manutenção e irrigação constantes. Esse tipo de telhado geralmente não é estruturado para ser acessível ao público, mas sim para aumentar a captação de água de chuva (FERRAZ, 2012; REZENDE, 2016).

Os semi-intensivos possuem custos e sobrecargas mais elevados que da anterior. Além disso, demandam manutenção periódica e mais cuidado com a vegetação por

ser de maior porte (GATTO, 2012). Rezende (2016) o define como sistemas que possuem a simplicidade e custos reduzidos do telhado verde extensivo e a acessibilidade e vegetação do intensivo.

Os intensivos suportam plantas maiores, até de grande porte (NAGY *apud* OHNUMA, 2008). São projetados para serem acessíveis às pessoas, podendo incluir assentos e áreas pavimentadas. Esses requerem maior manutenção e serviço, como poda e irrigação constantes. Não são aplicáveis em coberturas inclinadas, promovem proteção por sombreamento a edifícios e construções e podem funcionar como um jardim comum (HENEINE, 2008). Ademais, suportam o cultivo de plantas perenes, lenhosas e trechos gramados (GATTO, 2012).

O Quadro 1 destaca as características e diferenças entre os três sistemas segundo Rezende (2013). Contudo, há inúmeras variações quanto às especificações determinantes para cada tipo de telhado verde (SILVA, 2011; FERRAZ, 2012; NAGY *apud* OHNUMA, 2008). Assim, a determinação de variáveis como espessura e carga devem ser parte do estudo, elaboração e bom senso dos projetistas.

Quadro 1. Classificação e características dos telhados verdes

| Características                           | Extensivo                | Semi-intensivo           | Intensivo                    |
|---|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| <b>Manutenção</b>                         | Baixa                    | Periódica                | Alta                         |
| <b>Irrigação</b>                          | Não                      | Periódica                | Regular                      |
| <b>Plantas</b>                            | Sedum, ervas e gramíneas | Gramas, ervas e arbustos | Gramados, arbustos e árvores |
| <b>Altura do Sistema Construtivo (mm)</b> | 60 - 200                 | 120 – 250                | 150 - 400                    |
| <b>Peso (kg/m<sup>2</sup>)</b>            | 60 - 150                 | 120 – 200                | 180 - 500                    |
| <b>Custos</b>                             | Baixo                    | Médio                    | Alto                         |
| <b>Uso</b>                                | Proteção ecológica       | Cobertura verde          | Jardim ou parque             |

Adaptado de Rezende, 2016

Na escolha do material para a camada de impermeabilização, é importante a consideração do tipo de telhado verde pretendido, uma vez que o aumento de carga, sobretudo a exercida pela camada de substrato, demandaria propriedades de

resistência mecânica melhores. Ou seja, telhados verdes intensivos necessitam de propriedades melhores que os semi-intensivos e, por sua vez, os extensivos.

### 2.1.3. Componentes de um Telhado Verde

O telhado verde é composto por quatro camadas principais de igual importância: vegetação, substrato, drenagem e impermeabilização (ROLA *et al*, 2003). A vegetação trata da cobertura vegetal propriamente dita, selecionada em função das características de projeto e locacionais. Ferraz (2012) elenca algumas espécies possivelmente aplicáveis no Brasil.

O substrato é composto por uma mistura balanceada de solo e nutrientes e sua espessura varia de acordo com a necessidade da vegetação escolhida e com o limite de suporte de carga. Sua principal função é fornecer condições para o desenvolvimento da vegetação, além de facilitar a drenagem do excesso de águas pluviais.

A drenagem é a camada que recolhe as águas de chuva, de irrigação e demais excedentes sobre a superfície que não evaporaram e as encaminha ao deságue. Dependendo do sistema, a camada de drenagem pode ainda armazenar água para reuso, disponibilizar área para crescimento de raízes e/ou aeração do sistema e proteger a estrutura. Entre a drenagem e o substrato pode também haver uma camada filtro a fim de impedir o entupimento da drenagem.

Por fim, a impermeabilização é a camada com a função de proteger a base do telhado contra toda umidade externa e assegurar sua estanqueidade (ROLA, 2008). Geralmente, é utilizada uma manta impermeabilizante e, caso esta não seja resistente às raízes, utiliza-se uma manta adicional antirraízes (FERRAZ, 2012).

Com o desenvolvimento dos telhados verdes, na década de 1980 foi produzido um novo sistema. Conhecido como sistema MEG (*Modern Extensive Greenroof*), é composto por seis camadas, como mostra a Figura 2. A partir do suporte, as camadas são, sequencialmente: impermeabilização, barreira antirraízes, drenagem, armazenamento de água, filtragem e substrato. Devido aos materiais necessários, há um custo de instalação e manutenção elevados, limitando sua ampla aplicação (REZENDE, 2016).

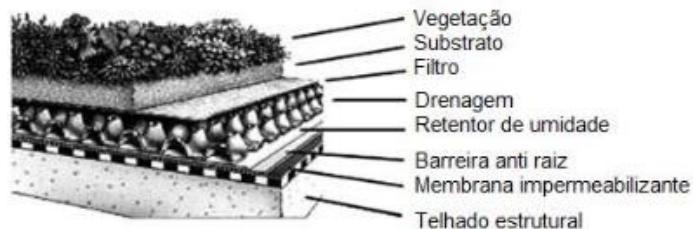


Figura 2. Sistema MEG de telhados verdes

Lazzarin *et al* (2016)

Dependendo do projeto, suas necessidades e o clima local, outras camadas podem ser adicionadas, podendo ainda variar de posição, como mostra Nagy *apud* Lima (2009) na Figura 3.

Nesse, as camadas podem ser compostas por superfície de acabamento, superfície de apoio, camada de regularização, barreira de vapor, isolante térmico, camada de separação e proteção, membrana impermeável, camada antirraiz, camada de drenagem, camada de filtração, camada de substrato e camada de vegetação. Como visto na figura, alguma camada pode ser isenta, a depender da escolha do sistema, ou mudar de posição.

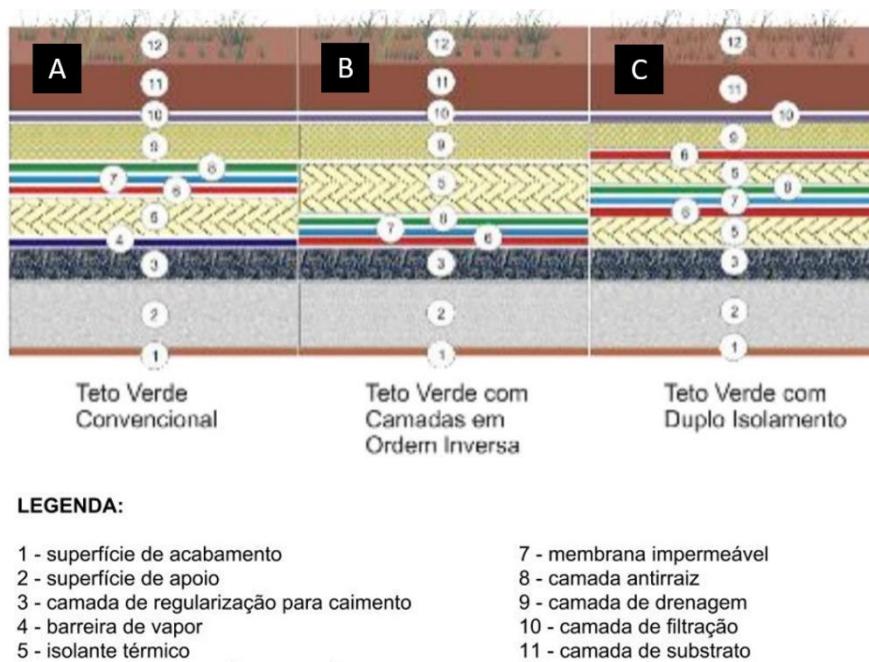


Figura 3. Três tipos de disposição de camadas (A, B e C) em um telhado verde

Adaptado de Nagy *et al apud* Lima, 2009

Diante da necessidade de redução da complexidade e dos custos dos telhados verdes, Rezende (2016) propôs uma nova tecnologia aplicada à técnica: hidropônia com ausência de substrato. Nessa, as camadas dividem-se em apenas três: geotêxtil fino, membrana de impermeabilização e geotêxtil espesso como ilustra a Figura 4.



Figura 4. Sistema hidropônico de telhado verde composto por três camadas segundo Rezende (2013)

Além das camadas e dos diferentes sistemas já mencionados, o projetista deve se atentar para o telhado estrutural, que é a base a sustentar todo o sistema. Dessa forma, variáveis como a capacidade de suporte de carga, ou seja, o peso que a estrutura é capaz de suportar, e a inclinação da estrutura suporte são consideradas a fim de elaborar um projeto de telhado verde.

Diante das principais características do sistema e algumas variações que existem, antes da tomada de qualquer decisão, a fase de planejamento deve considerar as funções e o desempenho desejados para o telhado verde como um todo. Em seguida, os materiais necessários para o sistema podem ser escolhidos e estudados quanto à maneira em que serão dispostos, bem como qual vegetação será aplicada, garantindo o sucesso do projeto (MINKE 2004; GATTO, 2012).

#### 2.1.4. Camada de Impermeabilização

Com a apresentação das camadas essenciais à técnica, tornou-se notória a importância da impermeabilização, presente em todas as definições. De acordo com Rola (2008), quando se trata de telhado verde, as maiores preocupações giram em torno dessa camada, foco do presente trabalho, além da sobrecarga da estrutura.

Essencialmente, a camada impermeabilizante é a responsável por proteger a camada suporte contra a umidade presente no ambiente externo e os fluidos que percolam

pelo sistema, assegurando estanqueidade. Para tanto, deve possuir determinadas características, como alta resistência à perfuração, evitando o transpasse das raízes pela camada filtrante.

Segundo Gatto (2012), a camada como um todo é composta pela imprimação, que oferece o suporte da membrana impermeabilizante pela aplicação de uma solução asfáltica/betuminosa sobre a estrutura, e a membrana propriamente dita, como ilustra a Figura 5. Esta última trata-se de um produto impermeável, industrializado, obtido por extrusão, calandragem ou outro processo com características definidas, podendo adicionar a função antirraiz a depender de sua composição.

Ambas, imprimação e manta, localizam-se sobrepostas à camada de regularização, camada formada para melhoria do telhado estrutural, reduzindo defeitos e imperfeições a partir da aplicação de argamassa e, assim, melhor assentar as camadas superiores.



Figura 5. Disposição da camada de impermeabilização composta por imprimação e manta de impermeabilização segundo Gatto (2012)

Para a proteção superior da membrana impermeável, deve ser realizada uma análise acerca das camadas sobre ela colocadas e seus comportamentos esperados. O conjunto deve proporcionar resistência a intempéries como frio, calor, chuva, raios UV, vento, ozônio e outros gases que possam provocar a decomposição química e biológica do material impermeabilizante, além de possíveis danos mecânicos (GATTO, 2012; HENEINE, 2008; MINKE, 2004).

Ademais, de acordo com Kirby *apud* Ohnuma (2008), a camada deve resistir à contaminação de fertilizantes e outros produtos químicos usados durante adubação e manutenção da vegetação. Algumas plantas, como as figueiras, possuem raízes

agressivas que podem penetrar a camada, danificando o sistema. Por isso, são aplicadas mantas com características antirraízes (SILVA, 2001).

A camada de impermeabilização deve compor o sistema de forma que a carga aplicada por ela seja admitida pela estrutura da edificação. Um estudo realizado por Gatto (2012) previu um sistema de telhado verde, concebido por uma empresa, e analisou as cargas atuantes.

O sistema foi composto por camadas consideradas essenciais para seu bom funcionamento, a saber: uma camada de regularização, a impermeabilização propriamente dita, a camada de proteção da impermeabilização, uma camada de manta geotêxtil, uma camada de dreno, outra camada com geocomposto filtrante, camada de substrato vegetal, camada de vegetação e sobrecargas projetadas, totalizando uma carga de 1.015,87 kg/m<sup>2</sup>. Somente para a camada de substrato, o peso foi igual a 180 kg/m<sup>2</sup>, indicando um sistema semi-intensivo.

Para a camada de impermeabilização, a carga foi calculada em 7,95 kg/m<sup>2</sup>. O cálculo considerou uma manta de impermeabilização somada à imprimação. Os valores sobre a manta consideraram espessura máxima de 6 mm representando, assim, o limite máximo de carga aplicável à camada em um sistema tradicional de telhado verde.

Nesse exemplo, pode-se notar a baixa influência do peso da camada de impermeabilização sobre o sistema como um todo quando comparada às outras. Gatto (2012) ainda cita que, quando se considera a capacidade de suporte da laje, o aspecto de maior relevância é a camada de substrato, uma vez que é a camada detentora dos maiores pesos específicos variando de 1.600 a 1.800 kg/m<sup>3</sup>.

Contudo, os diferentes sistemas resultarão em valores variados e cada projeto deverá calcular as cargas totais e as discretizadas em camadas, a fim de fornecer um balanceamento adequado e atender as necessidades da cobertura.

Com relação aos materiais, desde a concepção dos telhados verdes, inúmeros tipos foram utilizados como impermeabilizantes. Os primeiros registros dos telhados verdes aplicada em edificações, em 2.500 A.C., mostram a utilização de camadas de chumbo para evitar a infiltração da umidade (ROLA, 2008). Na Escandinávia, eram utilizadas cascas de mogno, um tipo nobre de madeira (HENEINE, 2008).

Em 1800, o cimento vulcânico foi utilizado em uma casa de classe média na Alemanha. Em Munique, na estufa do Rei Ludwig II, foram utilizadas placas de cobre, contudo, não geraram bons resultados. As placas ocasionaram vazamentos contínuos e infiltrações, resultando na demolição do edifício que suportava a estufa no topo (OSMUNDSON, 1999).

Segundo Heneine (2008), atualmente há destaque para três tipos de impermeabilizantes utilizados: membranas de cobertura em área urbanizada, membranas de única espessura e membrana fluida aplicada. A primeira trata-se de membrana betuminosa somada à borracha de estireno butadieno (o SBS incluso), um tipo de polímero elastomérico que aumenta a elasticidade da membrana. Com vida útil de 15 a 20 anos, são suscetíveis à degradação em temperaturas excessivas e raios UV que causam o craqueamento do material.

As de única espessura são membranas em rolos de plástico, como as termoplásticas de poli(cloreto de vinila) (PVC), ou em rolos de borracha sintética, como borracha de propileno etileno (EPDM). O autor afirma que podem ser muito eficientes quando implantadas corretamente. Por fim, as fluidas são aplicadas na forma líquida, eliminando o problema de juntas e facilitando a aplicação na vertical.

Para os dois primeiros tipos, membrana betuminosa com SBS incluso e membrana de plástico ou elastômero (borrachas), sua composição é essencialmente feita por polímeros. Assim, devido a sua característica impermeabilizante, ao material que lhe forma e seu formato laminar, esses materiais também são conhecidos como geomembranas (ABNT, 2018).

Além da membrana, devido à possíveis ações das raízes da vegetação contra o sistema, pode ser necessária a aplicação de uma camada contínua de separação entre a membrana e o substrato, principalmente quando aquela for composta de material orgânico e possuir baixa resistência às raízes, como o betume. Normalmente, esse material de separação é de PVC que possui múltiplas funções, além da própria impermeabilização e, por isso, geralmente é o único material constituinte da camada (HENEINE, 2008).

Para fortalecimento na proteção do sistema contra as raízes, Minke (2004) comenta sobre o uso de tecido de poliéster revestido em PVC com espessura de 2 mm por ser seguro e econômico. Entretanto, na América Latina, o material é importado e caro. Por

isso, utiliza-se similar: um material utilizado para toldo de caminhão com espessuras de 0,8 a 1,0 mm de espessura, afirmando substituir bem. Ainda acrescenta que, por serem finas, as lâminas de PVC devem ser soldadas na fábrica com alta frequência e ar quente.

A fim de reduzir a necessidade de soldas, o autor sugere o uso de polietileno de alta densidade como alternativa, apesar de serem mais rígidas e, por isso, serem mais adequadas para coberturas planas.

Escolhido o material e feita a instalação, a impermeabilidade da cobertura é garantida através de uma inspeção ocular em todas as emendas e soldas. Posteriormente, um teste de estanqueidade pode ser aplicado. Esse teste consiste em colocar água com determinada coluna de água e aguardar alguns dias. Passados os dias, sem nenhum vazamento, fica comprovado o desempenho da camada.

A necessidade de verificar a camada cuidadosamente reside no fato de que, caso seja verificado algum problema posterior à instalação de todo o sistema, a cobertura fica comprometida (HENEINE, 2008). Ademais, qualquer reparo é dificultado por necessitar retirar todas as camadas até a de impermeabilização para solucioná-lo, tornando o processo oneroso.

Devido ao alto grau de risco sobre o sistema diante de qualquer falha na camada de impermeabilização, é vital que esta seja elaborada com todo cuidado e atenção, seja na definição, aplicação ou manutenção da camada e das outras sobrepostas.

A fim de evitar problemas à camada de impermeabilização e garantir sua estanqueidade, a norma brasileira NBR 9575 (ABNT, 2010b) traz exigências e recomendações referentes à seleção e projeto de impermeabilização aplicada em edificações e construções em geral. A NBR 9574 (ABNT, 2008) complementa com as exigências e recomendações relativas à execução de impermeabilização em um sistema, incluindo o ensaio de estanqueidade a ser elaborado.

## 2.2. Geomembranas

### 2.2.1. Considerações Iniciais

Geomembrana trata-se de um material produzido industrialmente em forma de lâmina. Caracterizada pela baixa permeabilidade, é aplicada em sistemas de impermeabilização com a função de reduzir ou prevenir a percolação de fluidos e sólidos através de sua estrutura (ABNT, 2018).

Quando a função barreira é essencialmente desempenhada por polímeros, chama-se barreira geossintética polimérica ou geomembrana. Já quando é desempenhada por betume, chama-se barreira geossintética betuminosa ou geomembrana betuminosa.

O uso de geomembranas data da década de 1930 apesar de, segundo Rowe & Sangam (2002), as geomembranas de PVC terem sido desenvolvidas em 1927. Na década de 1950, as geomembranas de PVC ganharam destaque na América do Norte para impermeabilização de canais. Entre 1960 e 1970, o material já havia se instalado no Canadá, Rússia, Tailândia e Europa (KOERNER, 1998).

No Brasil, as primeiras aplicações de geossintéticos – classe de materiais a qual as geomembranas pertencem - ocorreram na década de 1970 para armazenamento ou contenção de resíduos a fim de proteger a fundação, encostas e aquíferos contra contaminação, como em aterros sanitários e industriais. Contudo, somente a partir da década de 1990, passaram a ser utilizados de forma mais expressiva. Atualmente, há diversas obras que incorporam os geossintéticos (SANTOS, 2014).

As geomembranas se destacaram devido a sua versatilidade, fácil emprego e bom desempenho, podendo ainda apresentar um bom custo benefício e reduzir a espessura das barreiras de sistemas impermeabilizantes usuais, como sistemas de base de aterros e telhados verdes.

Devido a isso, seu uso aumentou consideravelmente em todo o mundo, somado ao desenvolvimento de métodos para controle de qualidade na produção e instalação. Contudo, é necessário dar continuidade aos estudos, principalmente quando mencionado o Brasil que, atualmente, conta com poucas especificações e normas destinadas à qualificação do material.

Geralmente utilizadas na área geotécnica e civil, as geomembranas destacam-se em projetos de estabilidade de talude e barragens de terra. Na área de engenharia ambiental, são aplicadas para proteção de água subterrânea, lagoas de esgotos e aterros sanitários. Lodi (2003) ressalta ainda seu uso na área de transportes, como para proteção à umidade dos componentes eletrônicos em túneis de metrô.

Sua constituição, essencialmente, é de materiais geossintéticos. Ou seja, materiais cujo, ao menos, um de seus componentes são polímeros. Geossintéticos refere-se a um grupo de materiais que diferem em função, características e modo de produção. Junto à geomembrana, os geotêxteis são os geossintéticos mais utilizados (PEDRONI, 2017).

Tipicamente, dois ou mais geossintéticos são dispostos em conjunto a fim de melhorar o desempenho do sistema em que são aplicados. Um exemplo é a composição de uma geomembrana, para impedir a passagem de fluidos, somada a um geotêxtil, para direcionar o fluxo de água – na função de dreno - sobre a membrana.

De acordo com Rigo & Cazzuffi (1991), as geomembranas, também denominadas como “*liners*” ou “*seals*”, possuem espessura que varia de 0,5 a 5,0 mm. Ademais, apesar de serem utilizadas como membranas de impermeabilização, não são materiais completamente impermeáveis, obtendo coeficiente de permeabilidade que varia de  $10^{-10}$  a  $10^{-13}$  cm/s.

Segundo Costa *et al* (2008), as geomembranas são compostas, predominantemente, por materiais termoplásticos, elastoméricos ou asfálticos (betume). As geomembranas de poli(cloreto de vinila) – ou PVC - e de polietileno de alta densidade – ou PEAD -, ambas termoplásticas, são as mais utilizadas atualmente devido às suas vantagens frente aos outros materiais, como a maior resistência química e maior versatilidade, podendo ser utilizadas em diferentes aplicações.

As geomembranas de polietileno (PE), devido à sua alta resistência química e durabilidade, são as mais utilizadas em respeito a sistemas de base e cobertura de aterros sanitários. Já as de PVC, inicialmente, foram recomendadas para aplicações de curto prazo (um a cinco anos) nos Estados Unidos devido às incertezas quanto sua durabilidade. Entretanto, essa realidade tem mudado e as geomembranas de PVC já têm se instalado em aterros de resíduos sólidos urbanos ou RSU (SHARMA & LEWIS,

1994). O Quadro 2 mostra um comparativo com vantagens e desvantagens entre PVC e PEAD.

Quadro 2. Vantagens e desvantagens entre PVC e PEAD

| <b>Poli(cloreto de vinila) – PVC</b>        |  |
|---|--|
| <b>VANTAGENS</b>                            | <b>DESVANTAGENS</b>  |
| Boa trabalhabilidade                        | Baixa resistência aos raios UV, ozônio, sulfídeos e elementos de intempéries |
| Boa resistência mecânica                    | Fraco desempenho em altas e baixas temperaturas                              |
| Facilidade de Soldagem                      |  |
| Bom atrito de interface                     | Lixívia de plastificantes ao longo do tempo                                  |
| <b>Polietileno de Alta Densidade – PEAD</b> |  |
| <b>VANTAGENS</b>                            | <b>DESVANTAGENS</b>  |
| Boa resistência a agentes químicos          | Baixa resistência ao punctionamento  |
| Boa resistência e solda                     | Baixo atrito de interface  |
| Bom desempenho em baixas temperaturas       | Formação de rugas  |
| Boa resistência mecânica                    | Difícil conformação ao subleito  |
|   | Sujeita ao fissuramento sob tensão   |

Adaptado de Lodi, 2003 e Gomes, 2014

O material de PVC ganha destaque devido a sua facilidade de instalação e por ser menos expansivo quando comparado ao polietileno. Além disso, necessita apenas de um solvente para soldagem. Já o PE deve ser soldado a quente por meio de um equipamento específico. Contudo, a soldagem a quente possui melhor controle de qualidade. No caso do solvente para solda é difícil a análise de qualidade.

A geomembrana de PE pode ser encontrada com largura de até 7,0 metros, enquanto que a de PVC não ultrapassa 2,4 metros, demandando menor quantidade de solda que este. O polietileno também costuma ser mais rígido que o PVC e, por isso, no caso de telhados verdes, é mais utilizado em sistemas do tipo intensivo que não possuem estrutura inclinada que demandam recortes no material.

Fica claro que a escolha da geomembrana depende do responsável técnico pelo projeto e as aplicações previstas para o material em um sistema.

### 2.2.2. Processo de Fabricação

As geomembranas possuem composições que variam a depender da aplicação desejada. Incluem-se, para essas composições, a resina polimérica, os aditivos, as cargas e outros agentes. Sendo assim, materiais com base na mesma resina polimérica podem variar em propriedades e, consequentemente, desempenho (COLMANETTI, 2006).

Os aditivos são utilizados, dentre outras funções, como corante, absorvedor de raios UV, retardantes de chamas, estabilizantes de temperatura e plastificantes. A Tabela 1 mostra a distribuição usual de componentes em geossintéticos tradicionais. Dependendo da dispersão destes com a resina usada, a mistura final poderá ser homogênea ou heterogênea (KOERNER, 1998).

Tabela 1. Composição típica de diferentes geossintéticos

| Polímero                    | Resina (%) | Cargas (%) | Negro de Fumo (%) | Aditivos (%) | Plastificantes (%) |
|-----------------------------|------------|------------|-------------------|--------------|--------------------|
| Polietileno                 | 95 – 97    | 0          | 2 – 3             | 0,5 - 1,0    | 0                  |
| Polipropileno Flexível      | 95 – 97    | 0          | 2 – 3             | 0,5 - 1,0    | 0                  |
| PVC sem plastificantes      | 80         | 10         | 5 – 10            | 2,0 - 3,0    | 0                  |
| PVC com plastificantes      | 50 – 70    | 5 - 10     | 1 – 2             | 2,0 - 3,0    | 25 - 35            |
| Poliéster                   | 97         | 0          | 2 – 3             | 0,5 - 1,0    | 0                  |
| Náilon                      | 97         | 0          | 2 – 3             | 0,5 - 1,0    | 0                  |
| Poliestireno                | 97         | 0          | 2 – 3             | 0,5 - 1,0    | 0                  |
| Polietileno Clorossulfonado | 40 – 60    | 20 - 40    | 20 – 25           | 0,5 - 1,0    | 0                  |

Adaptado de Koerner, 1998

Os aditivos anti UV, como o negro de fumo, por exemplo, são adicionados na produção das geomembranas de PVC devido a sua baixa resistência aos raios ultravioletas. Ademais, termoestabilizantes e antioxidantes podem ser adicionados para aumentar a resistência às intempéries, calor, soldabilidade e degradação por agentes químicos (FELDKIRCHER, 2008).

Plastificantes são adicionados ao material a fim de melhorar propriedades como a flexibilidade, ductilidade e tenacidade. Ademais, reduzem dureza, rigidez e temperatura de transição vítreia. A nível molecular, as pequenas moléculas do plastificante ocupam posições entre as cadeias poliméricas, aumentando a distância entre as cadeias e, assim, reduz ligações secundárias intermoleculares (CALLISTER, 2012).

O PVC, por exemplo, essencialmente amorfó e rígido a temperatura ambiente, possui temperatura de transição vítreia em 80 °C. Contudo, a aplicação de plastificantes de baixo peso molecular como aditivo promove flexibilidade ao material e reduz sua temperatura de transição vítreia.

As cargas atuam com o objetivo de melhorar propriedades como os limites de resistência à tração, compressão e abrasão, e a tenacidade. Materiais como pó de madeira, pó de sílica, areia de sílica, vidro, argila, talco, calcário e outros polímeros sintéticos são utilizados como cargas.

Para obtenção do material final, as geomembranas podem ser fabricadas por três processos: extrusão, calandragem ou espalhamento (LODI, 2003).

As geomembranas de polietileno são manufaturadas por meio de extrusão. Neste, os produtos da formulação - resina polimérica, negro de fumo e demais aditivos - são encaminhados para uma extrusora, onde são comprimidos e emergidos como uma solução fundida na forma final.

No processo de calandragem, utilizado para geomembranas de PVC, CSPE e reforçadas, os produtos da composição são pesados e misturados em uma câmara conhecida como *Banbury type* ou *Farrel type*. No momento da mistura, calor é adicionado à reação entre os componentes. Transformado em uma massa contínua, passa por um conjunto de rolos, a fim de formar a chapa final com espessuras que variam de 0,5 a 3,0 mm e largura de até 2,40 m.

O processo de espalhamento, por fim, consiste na fundição dos componentes para formação da geomembrana que são espalhados sobre um material tecido ou não tecido em uma fina camada. Geralmente, os poros são suficientemente pequenos para impedir a penetração da substância fundida no lado oposto. Assim, quando requerido em ambos os lados, o processo é repetido no lado oposto.

### 2.2.3. Polímeros

O polímero é a principal matéria prima que forma as geomembranas e os *banners*, fornecendo suas principais características e propriedades. Também conhecido como material polimérico, consiste em macromoléculas de origem orgânica ou inorgânica formado pela repetição de pequenas estruturas, as unidades de repetição. Esse processo ocorre por meio de uma reação conhecida como polimerização.

Usualmente, os polímeros são formados a partir de três grupos principais de matérias primas: produtos naturais, hulha e petróleo. O Quadro 3 exemplifica algumas das matérias primas e seus respectivos polímeros gerados para cada grupo.

Quadro 3. Matéria prima e respectivo polímero gerado

| Grupos                 | Matéria Prima     | Polímero  |
|------------------------|-------------------|---|
| Produtos Naturais      | Celulose          | Nitrato de celulose, acetato de celulose e acetato butirato de celulose |
|                        | Látex             | Borracha natural  |
|                        | Óleo de mamona    | Náilon 11   |
|                        | Óleo de soja      | Náilon 9  |
| Petróleo               | Nafta             | PVC e polipropileno   |
| Hulha (carvão mineral) | Gás de hulha      | Polietileno e resinas fenólicas   |
|                        | Alcatrão de hulha | Poliuretano e poliestireno  |
|                        | Coque de hulha    | Polietileno e PVC   |

A característica de cada polímero dependerá do tipo de macromoléculas, peso molecular e forma de interação. Suas propriedades estarão diretamente ligadas às estruturas químicas formadas (LODI, 2003).

Diante de tantas propriedades e benefícios que oferece, o polímero é um dos materiais mais presentes no dia a dia da sociedade. Atualmente, com o desenvolvimento tecnológico, possui inúmeras aplicações que variam desde garrafas e recipientes de alimentos a automóveis, itens esportivos e materiais da construção civil, como é o caso das geomembranas.

#### 2.2.3.1. Processo de Polimerização

A polimerização refere-se à reação de síntese dos polímeros. Estes ocorrem pela união de moléculas de um dado composto, o monômero, formando longas cadeias e originando uma macromolécula.

Monômeros são moléculas simples. No caso do PVC, por exemplo, o monômero de formação é o cloreto de vinila (Figura 6). O termo origina-se do grego *mono* = “um” e *mero* = “parte”, ou seja, “uma parte”, enquanto *poli* equivale a “muitas” e polímero significa “muitas partes” (LUCAS *et al*, 2001). Assim, costuma-se dizer que um polímero é sintetizado a partir de vários monômeros. Entretanto, é importante observar que os monômeros serão os formadores do polímero via condições adequadas durante a polimerização, na qual passam a ser chamados de unidades de repetição.

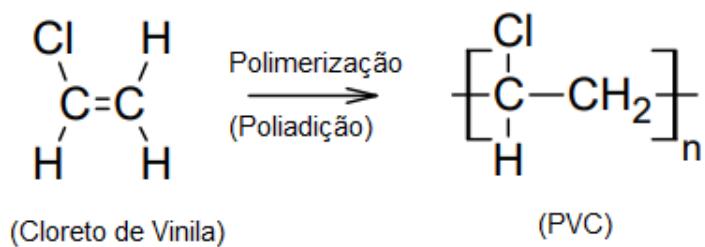


Figura 6. Processo de formação da cadeia polimérica do PVC

Adaptado de Santos, 1979

Como exemplo, uma molécula de etileno é representada pela fórmula  $C_2H_4$  e pela estrutura molecular como mostra a Figura 7a. Na polimerização, a molécula corresponde ao monômero de formação do polietileno, um material polimérico sólido, cuja unidade de repetição deriva do próprio etileno, como mostra a Figura 7b.

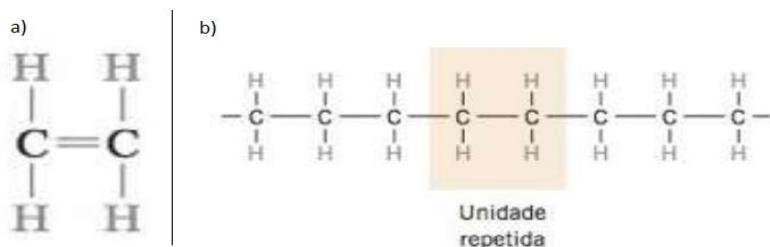


Figura 7. a) molécula de etileno; b) representação esquemática da unidade de repetição e estrutura da cadeia

Adaptado de Callister, 2012

O Quadro 4 mostra alguns dos principais polímeros com seus respectivos monômeros de formação e unidades de repetição de origem.

Quadro 4. Alguns polímeros, seus monômeros de formação e respectivas unidades de repetição

| POLÍMERO                      | MONÔMERO              | UNIDADE DE REPETIÇÃO |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Polietileno (PE)              | Etileno<br>           |                      |
| Poli(Cloreto de Vinila) (PVC) | Cloreto de Vinila<br> |                      |
| Polipropileno (PP)            | Propeno<br>           |                      |
| Poliestireno (PS)             | Estireno<br>          |                      |

Adaptado de Callister, 2012

### 2.2.3.2. Difusão em Polímeros

As características de permeabilidade e absorção de um polímero, que irão determinar a qualidade na função de impermeabilização do material final, estão relacionadas ao grau que ocorre a difusão de substâncias. Portanto, é necessário entender a base sobre o movimento de difusão das pequenas moléculas de interesse.

Ressalta-se que a penetração de substâncias externas ao polímero pode causar reações químicas e, ainda, a degradação de propriedades físicas e mecânicas do material. Portanto, é importante ter um conhecimento prévio sobre as substâncias que potencialmente estarão em contato com as membranas, bem como a composição destas, para evitar um dano futuro em seu desempenho.

Nas regiões amorfas de um material ocorrem as maiores taxas de difusão, uma vez que apresentam mais vazios e o movimento ocorre de um vazio a outro adjacente. Da mesma forma, quanto menor for a molécula a passar pela membrana, mais rápido passará. Moléculas quimicamente inertes ao polímero, ou seja, que não interagem com o material, também apresentarão maior facilidade de passagem.

Junto à difusão ocorre a dissolução da molécula no material da membrana que, caso seja mais rápida que a difusão, esta pode ser comprometida. A taxa de difusão é quantificada pelo produto entre o coeficiente de difusão e a solubilidade do polímero.

Pode-se notar que a permeabilidade varia não só com relação às características do material polimérico, mas com relação às substâncias que passarão pela membrana, diante de suas características de dissolução e reativas. Portanto, faz-se importante o conhecimento e estudo de cada substância que estará em contato com o material.

### 2.2.3.3. Comportamento Mecânico de Polímeros

A partir de ensaios de resistência a tração é possível determinar as características mecânicas dos polímeros. Diferente dos metais, as características mecânicas para polímeros são muito sensíveis às mudanças de temperatura próximo à ambiente, como pode ser visto na Figura 8 para o poli(metacrilato de metila).

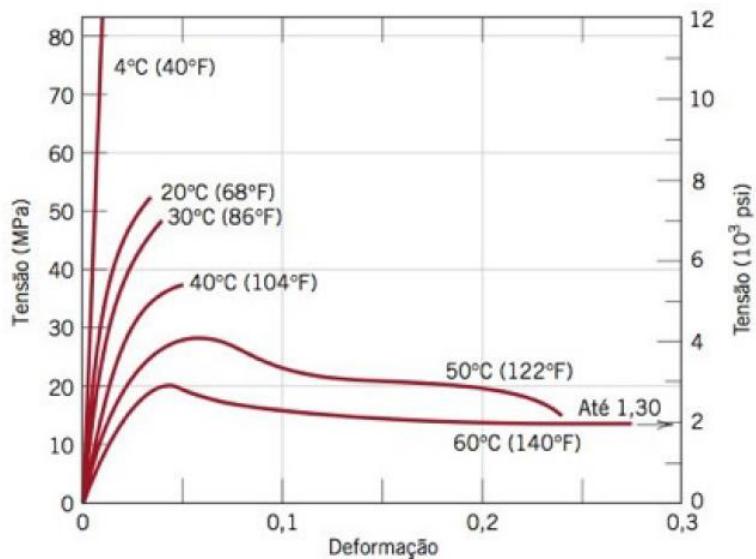


Figura 8. Influência da temperatura no comportamento mecânico do poli(metacrilato de metila)

Callister, 2012

Usualmente, para os polímeros, há três tipos de comportamento mecânico como mostra a Figura 9. A curva A representa polímeros frágeis, isentos de escoamento e que fraturam durante deformação elástica. Na curva B há os plásticos, cuja deformação inicial é elástica, seguida pelo escoamento e uma região de deformação plástica. Na curva C, a deformação é totalmente elástica, típica de materiais elastoméricos, que deformam de forma reversível a baixos níveis de tensão imposta.

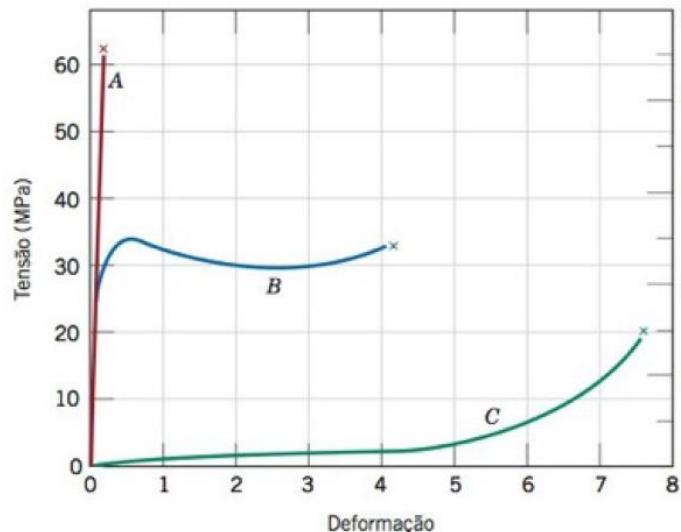


Figura 9. Comportamento tensão versus deformação para: A - polímeros frágeis; B - plásticos; C - elásticos

Callister, 2012

Polímeros amorfos possuem comportamento mecânico específico, resignando a denominação de polímero viscoelástico. Estes possuem a tendência de se comportar como vidro a temperaturas baixas, como uma borracha em temperaturas médias - acima da temperatura de transição vítrea - e como líquido viscoso com o aumento da temperatura.

Quando ocorre a deformação elástica, o material se deforma totalmente no momento em que a tensão é aplicada e se recupera, voltando às suas dimensões originais, quando a mesma é retirada. Quando totalmente viscoso, a deformação é retardada e não reversível após retirada da tensão. No caso do comportamento viscoelástico, a deformação é instantânea, como no elástico, mas é seguida por uma deformação viscosa retardada. Os três comportamentos podem ser vistos na Figura 10.

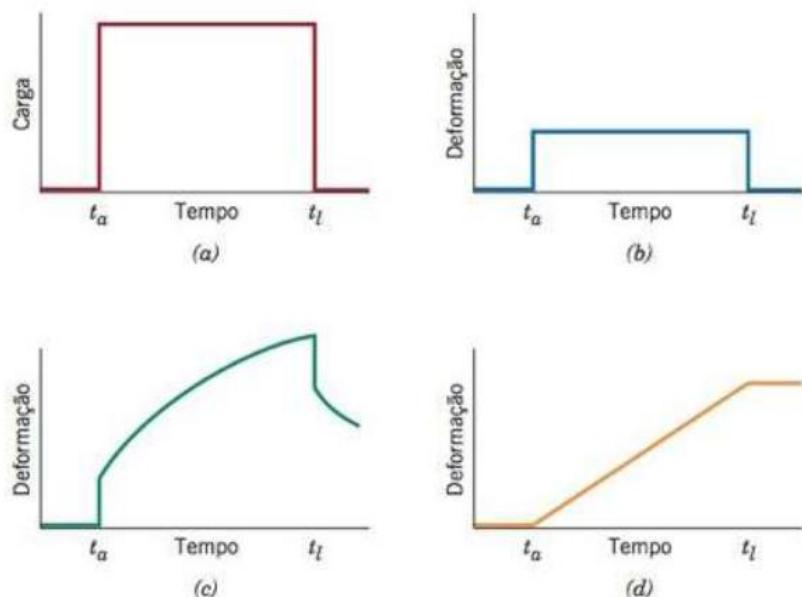


Figura 10. Comportamento b) elástico; c) viscoelástico; e d) viscoso diante da aplicação de uma dada tensão (a)  
Callister, 2012

#### 2.2.4. Ensaios em Geomembranas

Existem diversos tipos de geomembranas, que variam quanto à superfície (lisa ou rugosa), espessura e composição, gerando materiais com diferentes propriedades. Para garantir o atendimento às especificações técnicas em suas diferentes aplicações, é necessário a realização do processo de controle de qualidade durante sua fabricação (CQF) com a execução de ensaios de laboratório específicos e, posteriormente, o controle de qualidade de instalação (CQI) (COSTA *et al*, 2008).

Apesar de haver um crescimento na utilização de geomembranas no país e elaboração de novas normas a elas aplicadas, faltam normativas brasileiras para avaliação de suas propriedades e seu desempenho diante das condições locais (LODI, 2003). Dessa forma, encontram-se subsídios importantes na experiência internacional sobre as características das geomembranas e diretrizes para defini-las.

Internacionalmente, à despeito do Brasil, existem inúmeras normas destinadas para os diferentes tipos de geomembranas e, ainda, para determinação de um mesmo parâmetro. Destacam-se, para tanto, as normas ISO (*International Organization for Standardization*), as americanas ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e as europeias CEN (*European Committee for Standardization*).

Ressalta-se que, devido à vasta quantidade de normativas, ao se comparar resultados de ensaios em geomembranas, deve-se observar se são resultados plausíveis, gerados a partir de um mesmo tipo e tamanho de amostra, mesmas condições de carregamento e tempo de duração de ensaio similares. Caso contrário, diferentes resultados podem ser obtidos, deixando de ser representativos (COLMANETTI, 2006).

De uma maneira geral, os ensaios em geomembranas podem ser divididos em ensaios de identificação e ensaios de desempenho. Os de identificação são direcionados para determinação do controle de qualidade, bem como garantia e identificação do material. Segundo Rigo & Cazzuffi (1991), esses ensaios referem-se à caracterização das propriedades físicas, como espessura, densidade, índice de fluidez, gramatura e permeabilidade ao vapor de água (VWT).

Algumas vezes, é ainda necessária a identificação dos componentes químicos, demandando ensaios de análise termogravimétrica (TGA), termomecânicas (TMA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC) (BUENO, 2003).

Os ensaios de desempenho, em contrapartida, devem demonstrar a capacidade do material exercer sua função em campo, considerando as condições em que se encontra. Podem ainda ser divididos em estudo de durabilidade e estudo das uniões. No de durabilidade, a amostra faz parte do corpo principal do material, objetivando controlar a capacidade do material resistir às tensões ao longo do tempo. No das uniões, a amostra localiza-se nas emendas de construção (RIGO & CAZZUFFI, 2005).

De acordo com Santos (2014), os ensaios de desempenho podem ser caracterizados pelos ensaios de resistência ao rasgo, resistência ao estouro e resistência ao punctionamento. Destacam-se, para estudos de durabilidade, os ensaios de resistência química e biológica, fissuramento sob tensão e abrasão.

O autor ainda afirma que a escolha dos ensaios de identificação está intimamente ligada ao tipo de geomembrana utilizada. Entretanto, com relação à escolha dos ensaios de desempenho, deve-se, primeiro, definir a aplicação da geomembrana para, então, selecionar os mais adequados.

Vertematti (2004) sugere outra classificação que permite a divisão dos ensaios em: físicos (espessura e gramatura) - para identificação do produto; mecânicos - para obtenção de parâmetros relacionados ao comportamento tensão *versus* deformação; hidráulicos - para verificar aplicação do material ao bloqueio de passagem de líquido; e de desempenho - para verificar boa funcionalidade do material em campo.

No Anexo A, há uma listagem dos principais ensaios realizados em geomembranas com suas respectivas normas, segundo Vertematti (2004).

### 2.3.5. Permeabilidade em Geomembranas

#### 2.3.5.1. Permeabilidade em Geomembranas

As geomembranas possuem como principal função a impermeabilização, de forma a bloquear o fluxo de líquidos e possíveis gases no sistema em que são empregadas. Assim, caso percam essa propriedade, falha o sistema. Entretanto, não são completamente impermeáveis e, portanto, certa infiltração deve ser esperada e admitida através do material. Sendo assim, é de extrema importância a determinação desse parâmetro a fim de prever seu bom funcionamento.

Devido à baixa permeabilidade que apresentam, os ensaios usuais para determinação desse parâmetro em geomembranas demandaria alta carga hidráulica que, além de não referenciar situações reais em campo, pode ocorrer vazamentos ou problemas na própria amostra que poderiam causar variações nos resultados. Caso a carga hidráulica se mantivesse baixa, o ensaio se tornaria muito longo, podendo ocorrer evaporação da água (MARÇAL, 2012).

Uma análise diferente é, geralmente, realizada para geomembranas. Esse ensaio é determinado como *Water Vapor Transmission* (WVT) ou, em sua tradução, Razão de Transmissão de Vapor de Água. Ensaios de transmissividade ao vapor de água revelam valores de permeabilidade típicos variando de  $0,5 \times 10^{-10}$  a  $0,5 \times 10^{-13}$  cm/s (KOERNER, 1998).

Apesar de ser usado para controle de qualidade e identificação do material, faz-se importante também detectar as variações que podem ocorrer quando já implementadas em campo. Isso porque sofrem influência das altas temperaturas e intempéries, como exposição aos raios ultravioletas, devido ao processo de degradação natural ao longo do tempo (MARÇAL, 2012).

De acordo com Hsuan *et al* (1991), com o início da degradação por radiação térmica e ultravioleta, há a formação de radicais livres e, consequentemente, a degradação oxidativa. Sequencialmente, gera-se o fissuramento sob tensão, o chamado *stress cracking*, caracterizado pela ruptura interna ou externa de um polímero causada por tensões de tração menores que sua resistência mecânica em um curto espaço de tempo. Esse fenômeno pode afetar os parâmetros de permeabilidade do material impermeabilizante.

O desempenho quanto à permeabilidade também pode ser reduzido devido a fissuras ou furos nos painéis e falhas nas emendas. Problemas assim podem ser evitados com a instalação adequada e adoção de métodos de detecção de furos (COLMANETTI, 2006).

Haxo & Pierson (1991) estudaram o método usado para geomembranas e obtiveram determinadas conclusões, das quais serão destacadas algumas, acerca do processo de difusão que ocorre, bem como do ensaio de permeabilidade em si:

O mecanismo de difusão ocorre com base no fluxo de uma substância através da geomembrana, consistindo de três passos (Figura 11): dissolução de amostras dentro da superfície da membrana onde inicia-se o fluxo; difusão das amostras através da membrana de maior potencial químico para o de menor; e saída das amostras por evaporação ou dissolução no líquido presente nessa face. Esse transporte encontra-se em escala molecular e acontece devido a um gradiente na concentração de amostras, pressão de vapor ou temperatura e pressão hidrostática através do material.

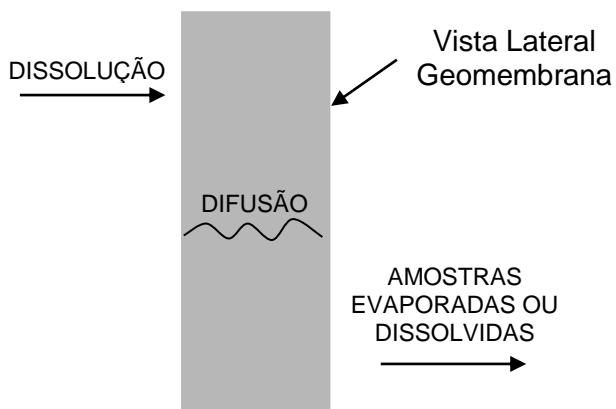


Figura 11. Mecanismo de difusão em geomembranas

Os mesmos autores concluíram que as geomembranas são permeoseletivas, ou seja, as taxas de permeabilidade de diferentes amostras diferem entre si em função, sobretudo, da sua solubilidade e difusividade.

Quanto aos ensaios, propriamente dito, sabe-se que a medição real é sobre o coeficiente de difusão, que corresponde a um gradiente de concentração da membrana. Para gases, este corresponde ao coeficiente de difusão. Entretanto, no caso de líquidos, o coeficiente de permeabilidade é definido por uma pressão hidrostática.

Para o cálculo do coeficiente, a medição da taxa de fluxo deve ainda ser muito precisa, além de considerar possíveis vazamentos (fugas) decorrentes do equipamento, uma vez que há pequena quantidade de difusão do fluido através do material. Outro fator importante para o cálculo, é a prévia determinação da espessura e peso específico do material a ser ensaiado.

A Razão de Transmissão de Vapor de Água é referenciada pela norma ASTM E96, costumeiramente utilizada para o cálculo indireto da permeança e, posteriormente, do coeficiente de permeabilidade. Outras normas utilizadas são UNI 8202/23, EN 14150 e ISO 11058.

A base do ensaio tem relação com a Lei de Fick e adequação à Lei de Darcy. A primeira preconiza que a diferença de pressão em um ambiente controlado permite a medição do fluxo que passa de um meio a outro, controlando-se a perda ou ganho de

massa dentro do recipiente. Já a Lei de Darcy descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso (MARÇAL, 2012).

Nesse ensaio, a amostra da geomembrana fica em contato com dois ambientes caracterizados por diferentes umidades relativas. Assim, mede-se a massa de vapor de água que passa por uma área pré-determinada da geomembrana, por um dado período de tempo e sob pressão específica. Posteriormente, por meio de correlações, obtém-se o coeficiente de permeabilidade.

#### 2.3.5.2. Permeabilidade e Estanqueidade

Quando se fala de impermeabilidade e estanqueidade, muitos consideram sinônimos. Contudo, faz-se importante a distinção entre ambas. De acordo com a NBR 9575 (ABNT, 2010), estanqueidade refere-se à uma propriedade de um conjunto que impede a penetração ou passagem de fluidos através de si. Já impermeabilidade trata-se de uma propriedade de um produto de ser impermeável a fluidos.

Utilizado para avaliar o desempenho da impermeabilização de uma maneira qualitativa, o ensaio de estanqueidade é utilizado na presente pesquisa apenas sobre as amostras de banners, verificando a passagem ou não de água.

A norma que confere o ensaio de estanqueidade é a NBR 9574 (2011). Para esse, a norma sugere um tempo mínimo de 72 horas para verificação de falhas na execução da camada de impermeabilização.

### 2.3. *Banners*

#### 2.3.1. Considerações Iniciais

Os *banners* são materiais usados, costumeiramente, para apresentação de trabalhos, propagandas, exposições em feira e eventos, fachadas ou até anúncios de promoções, podendo variar em componentes de produção e tamanho. Contudo, possui vida útil curta e, após seu uso, é descartado sem adequada gestão.

Atualmente, apesar de haver substitutos para o material no meio digital e eletrônico que, de forma direta, são menos impactantes ao meio ambiente, o acesso a esses é limitado e o uso de *banners*, de menor custo, permanece inevitável para alguns setores de serviços e mesmo acadêmicos.

Devido a isso, faz-se necessário um estudo sobre sua correta destinação, a fim de reduzir sua influência negativa ao propor um caminho alternativo e, concomitantemente e na medida do possível, aumentar seu valor agregado ao inserir nova funcionalidade. Assim, dar subsídios com o intuito do *banner* ser reutilizado para outras aplicações é essencial, sendo necessário o conhecimento prévio de suas características, bem como processo de fabricação.

### 2.3.2. Processo de Produção

Fabricado industrialmente, o *banner* trata-se uma lona sintética cujo principal componente é o poli(cloreto de vinila), o PVC. As lonas são materiais resistentes provenientes do petróleo, produzidas a partir de uma mistura de resina, plastificantes, cargas e aditivos que é fundida e moldada como material laminado. Em seguida, é acoplada a ela uma tela de reforço, tramas geralmente feitas por fios de poliéster, poliamida ou outro material que garanta resistência ao rasgo e ao tensionamento, aumentando resistência física, mecânica e durabilidade do material (SCMDIA, 2018).

#### 2.3.2.1. Impressão no *Banner*

A impressão no *banner* é tradicionalmente realizada por serigrafia, também conhecida como *silk screen* ou impressão à tela. O nome do processo surgiu devido ao material originalmente utilizado nas telas “seri”, nome de origem grega que significa seda, e ao termo “gráfia”, que significa escrever ou desenhar. Com o tempo, a seda deu lugar ao poliéster e náilon para formação das telas (PRINTI, 2018).

Segundo Jensen & Schneider (2015), o tecido de poliéster adicionado ao PVC é vantajoso e o mais utilizado atualmente por ter uma boa relação tensão versus deformação, podendo ser bem esticado sem se romper, de forma a melhorar a qualidade da impressão, além de não absorver umidade. Já o tecido de náilon, comparativamente, é mais flexível e resiste bem a tintas abrasivas, contudo, não é

recomendado para impressão em grandes dimensões. Costuma ser utilizado para impressões em superfícies não planas ou sobre cerâmicas.

O processo pode ser aplicado em inúmeras superfícies como papel, tecido, vidro, madeira e acrílico, e consiste no vazamento da tinta pela pressão de um rodo ou puxador por meio de uma tela permeável previamente preparada e pode ser feito de forma artesanal, manual ou automatizada.

A tela, ou matriz serigráfica, é esticada em um bastidor de madeira, alumínio ou aço. Esse bastidor é uma espécie de moldura, devendo ser resistente à umidade, uma vez que a matriz é lavada várias vezes. Inicialmente, a tela é coberta por uma fina e uniforme camada de emulsão fotossensível em ambos os lados, sobre a qual a arte é colocada e uma luz UV é aplicada. Os pontos da tela atingidos pela luz coagulam e endurecem, tornando-se, então, impermeabilizados.

As partes não expostas diretamente à luz, devido à proteção da arte, não impermeabilizam, sendo por meio das quais a tinta passará e gravará o material (BRINCAL, 2016). Em seguida a tinta é colocada sobre a tela, exercendo sobre ela uma pressão por meio de um rodo puxador, de forma que a tinta penetre pelos pontos não impermeabilizados da tela.

A impressão digital tem surgido como uma alternativa à serigrafia tradicional. Na digital, a impressão é puramente automática, também realizada em lonas de poli(cloreto de vinila), programada através de um software que imprime o design da estampa requerida, é mais ágil, com cores mais vivas e duráveis. Ademais, a impressão digital utiliza menos tinta se comparada à serigrafia. Isso porque, na artesanal, boa parte do insumo é perdido pela tela de transferência e demais materiais usados (GLOBAL, 2018).

### 2.3.3. *Banner e o meio ambiente*

O aumento da preocupação com o meio ambiente e sua preservação instigam o desenvolvimento de alternativas para a redução dos impactos negativos decorrentes de processos industriais e má qualidade de gestão de seus respectivos resíduos gerados.

A pressão ambiental gerou encargo ao governo que elaborou a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Instituída pela Lei 12.305 (BRASIL, 2010), a Política tornou pública a conceituação de resíduos sólidos, bem como a necessidade de gestão dos mesmos, determinando a responsabilidade sobre cada agente da cadeia que atua desde a geração até a sua disposição final ambientalmente adequada.

Pela Lei, o termo resíduo sólido foi conceituado como sendo todo material, substância, objeto ou bem descartado resultado de atividades humanas, cuja destinação final se procede nos estados sólido ou semissólido, assim como gases contidos em recipientes e líquidos cujas propriedades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Ademais, ficou estabelecida a diferenciação entre destinação e disposição final ambientalmente adequada. Para tanto, é interessante entender que o descarte de um resíduo deve respeitar uma ordem de prioridade, a saber: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por fim, a disposição final.

A destinação final ambientalmente adequada é, portanto, todas as ações de destino para um resíduo, englobando reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação, aproveitamento energético e a própria disposição final. Este último caso limita-se ao depósito de rejeitos em aterros sanitários, sendo rejeito os resíduos que não possuem possibilidades de tratamento e recuperação e, por isso, não há outra destinação possível.

Devido a sua composição polimérica, um *banner* inutilizado e depositado em aterro sanitário possui um elevado tempo de decomposição, apesar de seu uso ser por um curto período de tempo. Assim, reduz a vida útil de aterros sanitários, além de dificultar processos de degradação da matéria orgânica também dispostos no local, devido à formação de camadas impermeabilizantes no interior da célula de resíduos (JUNG *et al*, 2015).

Portanto, é fundamental encontrar alternativas na cadeia de prioridade como determina a Lei para evitar seu descarte em aterros. Sendo inviável a não geração ou redução do material, deve-se conhecer de perto suas características e propriedades a fim de verificar sua viabilidade para outras aplicações.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo discorre, em seu primeiro item, acerca dos materiais utilizados. Em seguida, em métodos, são apresentadas as propriedades a serem determinadas na pesquisa, destacando sua importância diante do desempenho esperado dos materiais, bem como os respectivos ensaios atualmente existentes com as normas mais utilizadas para sua determinação.

#### 3.1. Materiais

Ao total, foram utilizadas três lâminas poliméricas de PVC: dois *banners* e uma geomembrana.

Os *banners* referem-se a lonas de PVC utilizadas para divulgação e doados pela equipe organizadora do Ambientável UFRJ, semana acadêmica de engenharia ambiental da Universidade. Entretanto, são de empresas, composições e, portanto, propriedades diferentes, sendo, por isso, representativos para a análise ao mostrar resultados para duas variantes do material.

O primeiro *banner*, mostrado na Figura 12 e caracterizado como B1 nos ensaios, é composto por resina de PVC reciclado, reduzindo em cerca de 50% a resina de PVC virgem. Demais especificações cedidas pelo Fabricante do material encontram-se no Anexo B.

Os lados frontal e posterior diferem entre si, de forma que a parte impressa se caracteriza por uma superfície lisa, totalmente preenchida com cor. A parte inversa, entretanto, é monocromática preta, com pequena rugosidade, quase desprezível.



Figura 12. *Banner B1* utilizado na análise. A) Parte frontal; B) Parte posterior.

O segundo *banner* foi caracterizado como B2, mostrado na Figura 13. O fabricante para este não foi encontrado e, portanto, não há informações de fábrica quanto a composição ou propriedades do material. Contudo, de acordo com seu Distribuidor, trata ser de um material de PVC. Nota-se ainda que este é um pouco menos maleável e mais rígido ao tato quando comparado ao anterior.

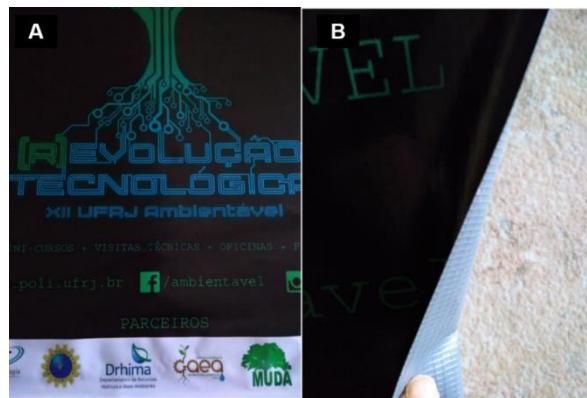


Figura 13. *Banner B2* utilizado na análise. A) Parte frontal; B) Parte posterior.

Nesse, a parte frontal também difere da posterior, sendo a face que contém a arte impressa em cores mais escuras e apresenta superfície lisa. Na parte posterior, o material é monocromático na cor cinza, com pequena rugosidade.

A geomembrana, doada pela Enactus UFRJ, foi denominada GEO nos ensaios e é mostrada na Figura 14. Configura-se em uma lona própria para impermeabilização e é composta por fios de poliéster com alta tenacidade/resistência, recoberto com duas camadas de PVC pigmentado. Ademais, o material possui características anti UV e antioxidante, de acordo com o Distribuidor.

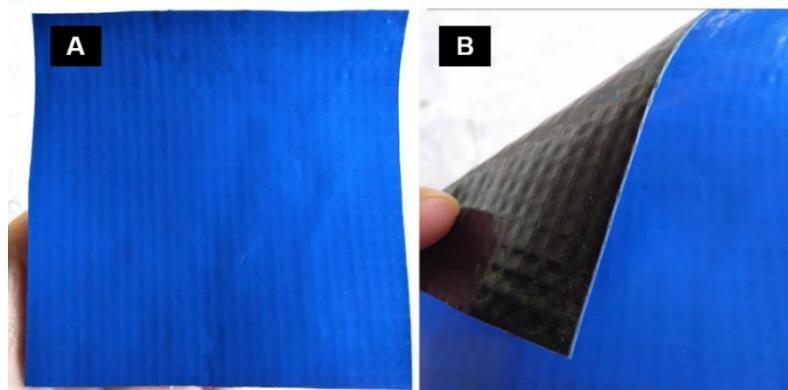


Figura 14. Geomembrana GEO utilizada na análise. A) Parte frontal; B) Parte posterior.

A lona de impermeabilização possui ambas as faces monocromáticas, sendo a frontal azul e um pouco mais lisa que a posterior preta.

### 3.2. Métodos

Diante da literatura que enumera os ensaios necessários para determinação da qualidade e desempenho do material para sistemas de impermeabilização (VERTEMATTI, 2004), optou-se pela realização de quatro deles, a saber: gramatura, espessura, densidade e resistência a tração.

Os ensaios foram escolhidos dentre os ensaios definidos como de identificação, uma vez que se propõe a identificação e caracterização de propriedades dos materiais diante de sua principal composição, o PVC.

Ressalta-se aqui que, com isso, o objetivo é a realização de uma análise introdutória, a fim de determinar, para algumas propriedades, o potencial de *banners* serem considerados em uma aplicação alternativa.

#### 3.2.1. Gramatura

Geralmente utilizada para caracterizar o peso de materiais, a gramatura é determinada por um ensaio simples, no qual é calculada a razão da massa pela respectiva área da amostra. Os resultados são geralmente expressos em  $\text{g/m}^2$ .

O ensaio é realizado para determinar se o material está de acordo com suas especificações, para seu controle de qualidade e para avaliação de amostras comerciais (LODI, 2003).

Contudo, é usual a caracterização de geomembranas apenas pela sua espessura. Já a gramatura costuma ser usada para referenciar materiais geotêxteis, materiais de alta permeabilidade, utilizados em sistemas de drenagem.

A norma que prescreve o método para determinação da gramatura geralmente utilizada é a ASTM D3776. Para esta, há sua análoga brasileira, a NBR 9864 (ABNT, 2013b). Ambas preconizam um ensaio que demanda apenas de uma balança com precisão de 10 mg.

### 3.2.2. Espessura

As geomembranas, por possuírem baixas espessuras, possibilitou uma redução considerável em peso e espessura dos sistemas de impermeabilização nos quais são instaladas. Segundo Koerner (1991) a espessura varia de 0,5 a 5,0 mm para o material. Entretanto, a pequena espessura também influencia outras propriedades do sistema. Dessa forma, é fundamental sua determinação e análise para o controle de qualidade dos materiais.

Para diferentes aplicações, há espessuras que devem ser respeitadas a fim de garantir o bom funcionamento de toda instalação. Como exemplo, a Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) exige que as geomembranas usadas em sistemas de contenção de resíduos sólidos urbanos de aterros sanitários devem possuir, no mínimo, 0,75 mm de espessura, com exceção do PEAD, com mínimo de 1,5 mm para permitir o processo de soldagem da emenda.

A CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, análoga ao INEA – Instituto Estadual do Ambiente – no Rio de Janeiro, recomenda geomembranas com espessura mínima de 1,0 mm para municípios de até 300 mil habitantes e, acima disso, de 2,0 mm (MAIA, 2001).

Com relação ao telhado verde, na América Latina, inclusive Brasil, comenta-se o uso de espessura entre 0,8 e 1,0 mm para a manta de impermeabilização, apesar dos demais países utilizarem espessura em torno de 2,0 mm (MINKE, 2004).

De acordo com Lodi (2003), quanto maior a espessura, maior é sua ductilidade, deformabilidade, resistência ao rasgo, resistência à punção e resistência aos raios UV. Ensaios ainda mostraram que, em geomembranas de PVC, há maior influência das variações de temperatura quanto menor for sua espessura.

Overmann *et al* (1993) ensaiou e demonstrou que há maior resistência química decorrente do aumento da espessura do material. Da mesma forma, Marçal (2012) discorre sobre a maior probabilidade da geomembrana sofrer danos mecânicos quanto menor for a espessura. Ademais, seu valor é importante para cálculo de parâmetros como a resistência à tração e o coeficiente de permeabilidade.

A escolha do ensaio depende da textura da geomembrana e de seu material componente. No caso da textura do material, para geomembranas lisas utiliza-se, principalmente, a norma ASTM D5199.

Nesse ensaio, o valor calculado representa a espessura nominal, e não a mínima. Sua realização consiste na aplicação de uma carga a uma pressão de 20 kPa durante cinco segundos sobre a geomembrana e medição da distância entre os pontos superior e inferior da amostra sob o efeito da carga.

Entretanto, caso tenham-se dúvidas quanto aos valores obtidos, outras pressões podem ser aplicadas. Isso ocorre, geralmente, no caso de geomembranas de polietileno de alta densidade. De acordo com Santos (2014), algumas geomembranas são rígidas e poderiam não se deformar com a pressão de 20 kPa e, por isso, demandam outros valores.

Inicialmente, pode-se adotar uma referência para o ponto zero do equipamento ao aplicar pressão sobre uma base uniforme. Em seguida, coloca-se a geomembrana sob a pressão específica, verificando a nova leitura que corresponderá a espessura da amostra.

Quando a geomembrana é texturizada, recomenda-se o ensaio segundo norma ASTM D5994, que preconiza o método para a medição da espessura do núcleo de

geomembranas texturizadas. O conceito é basicamente o mesmo do ensaio para geomembranas lisas, entretanto, neste, aplica-se a carga sem a utilização de uma placa de referência, mas de duas ponteiras de compressão de mesma forma e tamanho.

Para ambas as normas, destinadas à aplicação em geomembranas lisas e texturizadas, há equivalente segundo a ABNT com a norma NBR 9863-1 (ABNT, 2013a).

### 3.2.3. Densidade

A densidade refere-se à grandeza adimensional calculada pela relação entre o peso específico do material e o peso específico da água. Para a aplicação de geomembranas, a sua determinação é importante uma vez que revela as tendências de outras propriedades que podem comprometer sua funcionalidade quando utilizada.

Em geral, as geomembranas poliméricas possuem densidade que varia de 0,85 a 1,5 (KOERNER, 1998). Para as geomembranas de PVC, a norma italiana UNI 8898/4 estabelece a densidade compreendida entre 1,1 e 1,6 com tolerância de  $\pm$  2% (COLMANETTI, 2006).

O mesmo autor ainda explica que, uma vez que a resina de PVC possui densidade em torno de 1,4 e o plastificante em torno de 1,0, a perda deste ocasiona o aumento da densidade do material, tornando-o mais denso. Assim, mudanças maiores que 5% na densidade podem ainda indicar a degradação do polímero.

Halse *et al* (1991) elucida a relação entre a densidade e a cristalinidade do polímero. Quanto maior esta, maior é a densidade. Assim, a alta densidade pode significar a maior cristalinidade do material, responsável pela diminuição da alongamento na ruptura e resistência ao *stress cracking*, ou seja, fissuramento sob tensão (LODI, 2003), bem como do aumento da rigidez e possibilidade de quebra (SANTOS, 2014).

Lodi (2003) ainda ressalta a relação com o aumento de temperatura, que provoca o aumento da cristalinidade e, por consequência, o aumento da densidade. Sharma & Lewis *apud* Lodi (2003), resumiram as variações esperadas com o aumento da densidade do polietileno em várias propriedades que podem ser vistas no Quadro 6.

Quadro 5. Relação do aumento de densidade com outras propriedades em polietileno

| Propriedades                        | Tendência de Variação |
|-------------------------------------|-----------------------|
| <b>Térmicas</b>                     |                       |
| Ponto de Endurecimento              | Grande Aumento        |
| Viscosidade e Temperatura de Fusão  | Aumento               |
| <b>Mecânicas</b>                    |                       |
| Espessura                           | Aumento               |
| Resistência à Tração                | Aumento               |
| Resistência à Torção                | Aumento               |
| Resistência ao Impacto              | Diminuição            |
| Flexibilidade a Baixas Temperaturas | Diminuição            |
| <b>Químicas</b>                     |                       |
| Resistência ao "stress cracking"    | Diminuição            |
| Permeabilidade                      | Diminuição            |
| Resistência Química                 | Aumento               |

Adaptada de Sharma & Lewis *apud* Lodi, 2003

Para determinação da densidade de uma geomembrana, existem três principais normas, diferenciadas pelos métodos que aplicam: norma ASTM D792 (Método de Deslocamento); ASTM D1505 (Método de Gradiente de Densidade); e ASTM D297 (Método com Picnômetro e Pesagem Hidrostática). Além destas, há a norma ISO 1183.

A norma ASTM D792 (ASTM, 2013), baseada no Princípio de Arquimedes, preconiza um método simples e rápido para o cálculo da densidade. Neste, a densidade é calculada pela multiplicação entre o peso específico da amostra e a densidade da água em função da temperatura em que o ensaio é realizado. O peso específico da amostra, por sua vez, é calculado como a razão entre a medida da massa da amostra ao ar e a medida da massa submersa em água, que corresponde ao peso do volume de água deslocado pela amostra quando imerso na água.

O Método de Gradiente de Densidade é recomendado para os casos em que o material possui densidade menor que a água, principalmente para o polietileno. Nessa, utiliza-se um tubo de vidro, denominado como coluna, com soluções de densidades

diferentes. Assim, gera-se um gradiente de densidade, no qual a base apresenta alta densidade em relação à do topo.

Normalmente, usa-se isopropanol e água quando a densidade do material é menor que 1,0. Para densidade maior que 1,0, recomenda-se brometo de cálcio e água. O material é, então, imerso na coluna, verificando seu ponto de equilíbrio. De acordo com a curva de calibração geradas com as densidades na coluna, determina-se a densidade.

A norma ISO 1183, análoga à ASTM D792, define o ensaio para amostras de borrachas, com uso de balança hidrostática com 0,1 mg de precisão, um suporte para a amostra, um picnômetro com 50 ml de capacidade, um termômetro graduado e água para imersão do material.

### 3.2.4. Resistência à Tração

Usualmente, as geomembranas apresentam baixa resistência. Sua principal função é a impermeabilização do sistema em que é instalada. Assim, não é esperado que contribua ou influencie o comportamento mecânico da estrutura. Contudo, é importante o conhecimento das propriedades mecânicas para quantificar seu comportamento em situações nas quais estejam sujeitas a tensões de gravidade como, por exemplo, em taludes ou em recalques diferenciais, onde podem haver tensões e deslocamentos impostos (COLMANETTI, 2006).

Os resultados podem ser utilizados para controle de qualidade na fabricação, comparação entre diferentes produtos, identificação de um determinado produto e avaliação de mudanças no comportamento mecânico sob efeito da temperatura ou após envelhecimento (LODI, 2003).

Segundo Santos (2014), os ensaios podem ainda ser utilizados para avaliar as composições e produtos poliméricos, uma vez que as propriedades de tração podem indicar a qualidade do composto típico de uma geomembrana.

A avaliação das propriedades de tração do material é realizada por meio de ensaios que diagramam a relação tensão *versus* deformação a partir da aplicação de esforços sobre o mesmo, de forma a gerar uma deformação por alongamento até sua ruptura.

Estes ensaios fornecem dados sobre suas características mecânicas como a resistência à tração, limite de escoamento e módulo de elasticidade.

As deformações resultantes podem ser classificadas em dois tipos: deformação elástica e deformação plástica. A primeira refere-se à deformação em que, caso os esforços sobre o material sejam removidos, o mesmo volta a sua forma original. Em contrapartida, no segundo caso, não há recuperação da mesma forma.

Gerado o gráfico, pode-se então, de forma direta, identificar pontos de interesse, a saber: limite elástico, limite de proporcionalidade, limite de resistência e limite de ruptura. De acordo com Nash & Potter (2014), o limite elástico refere-se ao ponto em que o material deixa de fornecer deformações elásticas e a se comportar de acordo com a Lei de Hook que determina a deformação como diretamente proporcional às tensões aplicadas.

Até o limite elástico, é possível calcular o módulo de elasticidade pela tangente da curva e, assim, referenciar a rigidez do material. Ou seja, o módulo indica a tensão máxima que o material alcança sem sofrer deformação permanente.

O limite de proporcionalidade indica o valor de máxima tensão que pode ser imposta ao material tal que a tensão é função linear da deformação. Muitas vezes, esse ponto equivale ao limite elástico. Entretanto, quando diferem entre si, o limite elástico costuma ser maior que o de proporcionalidade.

O escoamento caracteriza-se no início da fase plástica, onde há deformações crescentes no material sem incremento de carga, mas há um aumento da velocidade de deformação. Durante o escoamento, a carga oscila entre valores muito próximos um do outro. Após esse momento, ocorre o encruamento, ou seja, endurecimento causado pela quebra de grãos que compõe o material quando deformados a frio.

Após o encruamento, a tensão volta a subir, até atingir o limite de resistência, representado pelo máximo valor da tensão na curva do gráfico. O limite de ruptura, por fim, refere-se ao ponto em que ocorre a ruptura do material.

Para cada tipo de material e objetivo de teste, determinam-se as variáveis a serem analisadas. De acordo com Lodi (2003), no caso de geomembranas amorfas, como as de PVC, avaliam-se as tensões em deformações específicas, geralmente a 100% ou

200%. Para geomembranas semicristalinas, a avaliação é sobre a tensão e deformação no escoamento e, para as não reforçadas, a avaliação é sobre a tensão e deformação na ruptura. Ademais, podem ser avaliadas a tensão e deformação na falha de uma geomembrana caso seja esse o interesse.

A Figura 15 mostra, de um ponto de vista qualitativo, o comportamento tensão *versus* deformação de diferentes tipos de geomembranas com base em ensaios do tipo uniaxial. Esse gráfico permite notar que não há ponto de escoamento para o PVC, bem como para o polietileno clorossulfonado, a borracha butílica e o polietileno clorado.

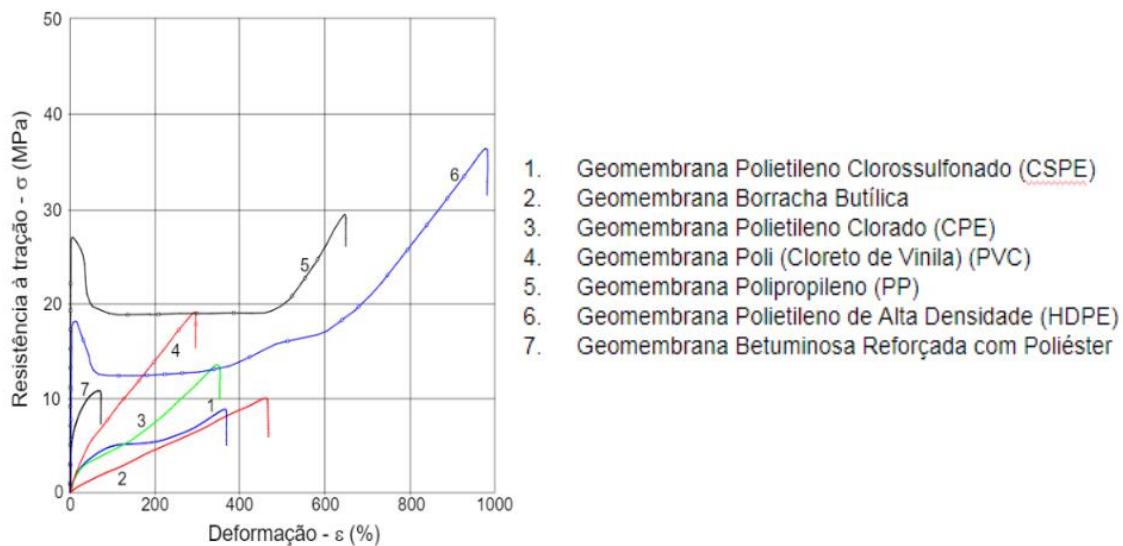


Figura 15. Comportamento tensão *versus* deformação para diferentes tipos de geomembranas  
 Colmanetti, 2006

Em geral, os ensaios dividem-se em uniaxiais e multiaxiais.

### 3.2.4.1. Ensaios Uniaxiais

Ensaios uniaxiais são os mais usuais, nos quais a força é aplicada sobre um corpo em direção perpendicular à superfície de corte que será gerada quando da ruptura do material. Para sua realização, são utilizados equipamentos que permitem altas taxas de deformação, a partir de prensas de tração servo controladas, e compostas por software para aquisição e armazenamento dos resultados.

Os ensaios uniaxiais podem ainda ser do tipo índice ou de desempenho. Os ensaios índice objetivam avaliar o controle e garantia de qualidade e identificação do material.

Para tanto, são utilizados corpos de prova com dimensões relativamente pequenas quando comparadas ao material utilizado em campo. O mais usual é em formato “haltere” (Figura 16), no qual as extremidades são maiores que a parte útil a ser ensaiada a fim de que a ruptura não ocorra próximo às garras. De acordo com a NBR 15856 (ABNT, 2010), esse tipo de ensaio é recomendado para geomembranas de polietileno.



Figura 16. Corpo de prova em formato “haltere” para ensaio de tração  
Ramos, 2013

Há também, para ensaios índice, uso de corpos de prova em “tiras”, ou “faixa estreita”, os quais possuem formato retangular, onde a largura é menor que o comprimento. De acordo com a mesma norma, o formato em tiras é usual em geomembranas de poli(cloreto de vinila) e polipropileno.

Os ensaios de desempenho são utilizados para determinação de parâmetros de projeto. Nestes, os corpos de prova são moldados em faixa larga, nos quais a largura é maior que o comprimento - geralmente na proporção (200 x 100) cm. Os ensaios índice tendem a gerar uma contração lateral na zona central da amostra, o que não ocorre nos ensaios de faixa larga. Assim, estes são realizados visando resultados mais representativos das condições reais e mais orientados para projetos quando condições de deformação plana são assumidas (LODI, 2003).

Vale ressaltar que os ensaios de faixa larga são inadequados para controle de qualidade, uma vez que a taxa de deformação recomendada é baixa a fim de simular melhor as condições de campo, tornando o ensaio demorado e, dependendo da deformação necessária para se alcançar a ruptura de um material, o equipamento não suporta devido ao seu limite como, por exemplo, no caso do PEAD e do PVC que atingem a ruptura a cerca de 1000% e 400% de deformação, respectivamente.

No caso de PVC, de acordo com Lodi (2003), o material não apresenta escoamento inicial, possui deformação que varia de 200% a 500% e resistência à tração de 18 MPa a 20 MPa em ensaios com amostras do tipo “haltere”.

O PVC *Geomembranes Institute* (PGI), em 2006, lançou uma publicação com as principais propriedades das geomembranas de PVC de acordo com a especificação PGI 1104 (PGI, 2004). Essa especificação foi adotada pela ASTM através da norma D7176 que relaciona as propriedades exigidas para geomembranas de PVC flexíveis com espessura de 0,25 mm a 1,5 mm usadas para impermeabilização e pode ser conferida na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mínimas exigidas para geomembranas de PVC flexíveis

| Propriedades                  | Método de Teste (ASTM) | Geomembranas de PVC |                     |                     |                     |                     |                     |
|-------------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Espessura (mm)                | D5199                  | 0,25 +/-<br>0,013   | 0,51<br>+/-<br>0,03 | 0,76<br>+/-<br>0,04 | 1,02<br>+/-<br>0,05 | 1,27<br>+/-<br>0,06 | 1,52<br>+/-<br>0,08 |
| Força na Ruptura (kN/m)       |                        |                     | 4,2                 | 8,4                 | 12,8                | 17                  | 20,3                |
| Deformação Axial (%)          | D882                   |                     | 250                 | 360                 | 380                 | 430                 | 430                 |
| Módulo 100% Deformação (kN/m) |                        |                     | 1,8                 | 3,7                 | 5,6                 | 7                   | 8,8                 |
| Densidade                     | D792                   |                     | 1,2                 | 1,2                 | 1,2                 | 1,2                 | 1,2                 |

Adaptado de PGI, 2004

De acordo com Vertematti (2004) as geomembranas fabricadas no Brasil possuem, em média, resistência à tração igual a 18 MPa para amostras em formato “haltere” ensaiadas na direção longitudinal (no sentido de fabricação) e igual a 16 MPa para direção transversal.

### 3.2.4.2. Ensaios Multiaxiais

Utilizados para identificação de um material, os ensaios uniaxiais não representam as condições de campo de maneira fiel, onde o estado de tensões tende a ser biaxial ou triaxial. Assim, foram desenvolvidos ensaios multiaxiais, ou axissimétricos, que permitem a avaliação das propriedades de tração em múltiplos eixos de maneira simultânea.

Para cálculo dos resultados nesse ensaio assume-se deformação em formato esférico. Entretanto, de acordo com Colmanetti (2006), são gerados estado de tensões diferenciados no ápice do domo e na periferia em situações reais. Dessa forma, são ensaios não recomendáveis para uso em cálculos de projetos.

Atualmente, existe uma gama de normas que norteiam a determinação das propriedades de tração em geomembranas, como a já mencionada NBR 15856. As mais usuais serão elucidadas a seguir.

A NBR 15856 recomenda amostras em formato de “tiras” para geomembranas de PVC e PP, dimensionadas na faixa de 10 a 25 mm de largura e, no mínimo, 150 mm de comprimento. Para geomembranas de PE, são recomendadas amostras em formato “haltere”, com dimensões próprias pré-determinadas. Recomenda-se a velocidade de ensaio em 100 mm/min, podendo ser ajustada diante do interesse do operador.

Para geomembranas com espessura menor que 1,0 mm, recomenda-se a norma ASTM D882. Segundo Koerner (1998), esta é recomendada para uso em geomembranas de PVC, ou qualquer geomembrana termoplástica, prevendo amostra com 25 mm de largura, 150 mm de comprimento total, dos quais 50 mm representa a distância entre as garras, e velocidade de ensaio de 500 mm/min.

Para aquelas com espessura maior, que variam de 1,0 mm até 14,0 mm, sugere-se a norma ASTM D638 que descreve o ensaio de tração em geomembranas não reforçadas e faz referência às normas específicas para geomembranas reforçadas. Esse ensaio prevê o uso de amostras em formato “haltere”.

Ambas metodologias, com amostras em formato tiras e “haltere”, são contempladas também pela *International Organization for Standardization* com a norma ISO 527, norma base de elaboração da NBR 15856.

Os ensaios em “faixa larga” são baseados na norma ASTM D4885 que preconiza amostras com dimensões de 200 mm de largura e 100 mm de comprimento para geomembranas, com taxa de deformação de 1 mm/min. Entretanto, esta pode ser alterada em função das análises a serem executadas.

Por fim, os ensaios multiaxiais são realizados com base na norma ASTM D5617. A amostra é determinada em formato circular, com diâmetro mínimo de 450 mm. No

decorrer do ensaio, o corpo é inflado com ar ou água até o colapso do material. O equipamento, então, registra a deflexão ocasionada com a aplicação da pressão.

É importante notar que, caso o objetivo seja a comparação de diferentes geomembranas, deve-se observar os aspectos dos ensaios utilizados, como o tipo de amostra, velocidade de ensaio e temperatura do ambiente, fatores que influenciam diretamente os resultados obtidos, além da possível presença de falhas ou alterações no corpo de prova e problemas de fixação deste ao equipamento de tração.

Da mesma forma, por definição, um método descreve o procedimento para realização de um determinado ensaio mecânico, assim, seguindo-se um mesmo método, os resultados poderão ser comparáveis. A Tabela 3 mostra como os resultados para uma mesma geomembrana - PVC de 0,75 mm de espessura - podem variar de acordo com o ensaio utilizado.

No caso da temperatura, por exemplo, é um fator importante pois, quanto menor for, maior é o módulo de deformabilidade de uma geomembrana, ou seja, rompe-se com deformações menores e tensões mais elevadas (COLMANETTI, 2006).

Tabela 3. Valores comparativos de ensaios de tração para PVC com 0,75 mm de espessura

| <b>NORMA</b> | <b>Resistência à Tração no Escoamento (MPa)</b> | <b>Deformação Específica (%)</b> | <b>Módulo de Elasticidade Inicial (MPa)</b> | <b>Resistência à Tração na Ruptura (MPa)</b> |
|--------------|---|----------------------------------|---|--|
| ASTM D638    | 21  | 480                              | 31  | 20,7   |
| ASTM D4885   | 13,8  | 210                              | 20  | 13,8   |
| ASTM D5617   | 14,5  | 100                              | 100   | 14,5   |

Adaptado de Lodi, 2003

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Introdução

Este capítulo apresenta um exemplo de aplicação por meio de um protótipo de telhado verde cuja camada de impermeabilização é composta por *banner*, a descrição da execução dos ensaios realizados, os resultados obtidos e a análise comparativa entre os materiais de estudo.

Em suma, foram realizados quatro ensaios em laboratórios do Instituto de Macromoléculas da UFRJ (IMA/UFRJ) que, como pode ser visto no Quadro 6, foram discretizados em propriedades físicas e mecânicas para melhor composição do texto na análise dos resultados.

Quadro 6. Ensaio realizados e respectivas normas

| PROPRIEDADES     | ENSAIOS              | NORMAS    |
|------------------|----------------------|-----------|
| <b>Físicas</b>   | Gramatura            | NBR 9864  |
|                  | Espessura            | NBR 9863  |
|                  | Densidade            | ASTM D792 |
| <b>Mecânicas</b> | Resistência à Tração | NBR 15856 |

### 4.2. Exemplo de Aplicação – Protótipo de Telhado Verde com *banner*

A Enactus é uma organização internacional sem fins lucrativos que fomenta o empreendedorismo social dentro das universidades. Presente, até então, em 36 países e, somente no Brasil, atuando em 100 instituições de ensino, estimula o desenvolvimento de um mundo mais sustentável ao investir na formação de líderes no meio acadêmico, a fim de atuar em projetos que causam impacto social.

A Enactus UFRJ é o time presente na Universidade Federal do Rio de Janeiro e, dentre seus projetos, tem-se o “Teto Verde”. Desenvolvido em setembro de 2016, a partir da concepção do protótipo visto na Figura 17, o projeto surgiu com o intuito de obter um uso alternativo para *banners* descartados, além da fabricação de bolsas, estojos e outros acessórios já manufaturados a partir do material.



Figura 17. Protótipo do telhado verde com *banner* para impermeabilização recém concebido em setembro de 2016

Ao estudar as qualidades do *banner*, identificou-se um potencial quanto a impermeabilização, resistência e durabilidade. A partir de então, novas aplicações foram investigadas até que se encontrou os telhados verdes, técnica cuja camada de impermeabilização pode ser realizada com geomembranas de PVC, mesma matéria-prima dos *banners*.

Diante do objetivo da Organização, além dos benefícios já conhecidos pela aplicação de telhados verdes em uma estrutura, sobretudo o conforto térmico, poderia favorecer o cultivo de plantas alimentícias para posterior comercialização, potencializando ganhos econômicos para os moradores das comunidades nas quais os telhados verdes seriam aplicados.

#### 4.2.1. Desenvolvimento do Protótipo

A concepção do protótipo foi baseada na técnica de telhado verde hidropônico estudada por Rezende (2016). Nesse, o telhado seria formado por apenas três camadas, a saber: manta geotêxtil fina, lona de impermeabilização e manta de geotêxtil espessa.

O geotêxtil fino configura-se na primeira camada, a partir da estrutura, a fim de fornecer uma base segura ao assentamento da membrana impermeabilizante propriamente dita, de forma a evitar qualquer objeto pontiagudo que poderia danificá-la, garantindo ainda maior aderência.

A membrana impermeabilizante, além de bloquear a passagem de fluidos, protege o telhado das raízes das plantas que poderiam penetrar a superfície e causar danos à estrutura.

O geotêxtil espesso, com a função semelhante ao substrato em sistemas tradicionais, é responsável por fornecer a área de enraizamento das plantas, além de agir como meio hidratante para funcionamento de todo o sistema devido à adsorção da água pelas fibras do material que conduz uma solução nutritiva para todo o telhado.

Nesse sistema hidropônico, a camada de drenagem é dispensável pois a técnica dá preferência a telhados estruturais inclinados. No caso da membrana antirraiz, não há necessidade uma vez que se faça a escolha correta da vegetação a ser aplicada, considerando espécies de plantas com enraizamento superficial. O substrato, por fim, foi substituído pela hidropônia baseada na inundação, com uma solução nutritiva, na camada de geotêxtil com enraizamento nas fibras do mesmo.

O telhado estrutural necessário para sustentar todo o sistema pode ser de amianto, zinco, fibra de vidro, ecotelha, concreto, ou qualquer superfície desde que suporte o peso do telhado verde e que tenha uma pequena inclinação para a drenagem da água.

Diante desses preceitos e a fim de reduzir custos, o protótipo foi desenvolvido a partir de um pedaço de telha de amianto encontrado na rua, um pedaço de cano marrom de PVC 3/4 para irrigação, cola de contato para junção das camadas, manta de drenagem, trinta mudas de suculentas e mais algumas mudas junto ao Horto da Prefeitura da UFRJ, *banner* doado e um suporte de madeira para a telha.

Para as camadas de geotêxtil, superior e inferior, como pode ser visto na Figura 18, foram usados os mesmos materiais. Contudo, a fim de aumentar a espessura da camada superior e, assim, a capacidade de sustentação da vegetação e proteção para a camada de impermeabilização contra ação das raízes, foram adicionadas duas camadas do material drenante, enquanto que na camada mais abaixo foi utilizada apenas uma camada. Na impermeabilização, um *banner* foi disposto em uma única camada.



Figura 18. Camadas do protótipo de telhado verde com *banner*

#### 4.2.2. Análise de Desempenho

Após dois anos e quatro meses desde sua concepção, o protótipo continua em ótimo estado, como mostra a Figura 19. Apesar de não ter sido soldado como recomendado pela literatura, utilizando-se apenas cola de contato, as camadas continuam desempenhando seus papéis.

Com as mudanças de estações e cuidados cedidos ao sistema, ocorreram modificações quanto à vegetação disposta sobre as camadas. Contudo, não houve penetração das raízes no *banner*. As espécies, como as *pitayas*, foram escolhidas tomando-se cuidado com o controle de crescimento das raízes.



Figura 19. Protótipo de telhado verde composto por *banner* para impermeabilização em janeiro de 2019

A fim de verificar de forma direta a estanqueidade da camada de impermeabilização feita pelo *banner*, o sistema foi irrigado, como mostra a Figura 20a.



Figura 20. Verificação da estanqueidade do sistema pela: a) Irrigação do protótipo; e b) verificação da estanqueidade sob o *banner*

Constatou-se que a água passou pelo geotêxtil superior, porém foi contida pela camada de *banner*, impedindo a passagem da água para o geotêxtil sob a mesma,

que permaneceu seco (Figura 20b). Pontos molhados na borda do geotêxtil inferior ocorreram devido ao escoamento da água pela vegetação na lateral do sistema, porém a parte interna não foi afetada.

Os resultados obtidos pelo protótipo estimulam a análise profunda da aplicabilidade de *banners* em telhados verdes, uma vez que, para o protótipo em questão, foi capaz de suprir as expectativas esperadas.

### 4.3. Execução dos Ensaios

#### 4.3.1. Ensaio de Gramatura

Para determinação da gramatura, foi utilizada a norma NBR 9864. Assim, foram confeccionadas cinco amostras quadradas com dimensões (10 x 10) cm para cada material. Prontas, as amostras foram pesadas em uma balança com precisão de 10 mg.

Após a pesagem, o valor encontrado foi dividido pela sua área para as cinco amostras. Finalmente, foi calculada a média, resultando na gramatura. A Figura 21 mostra o decorrer do ensaio.



Figura 21. Ensaio de gramatura em lona de PVC

#### 4.3.2. Ensaio de Espessura

O ensaio de espessura teve como base a norma NBR 9863-1. Para tanto, considerou-se membranas de superfícies lisas para os três materiais (B1, B2 e GEO). Assim, sua realização consistiu no uso de um micrômetro da marca *Peacock* com precisão de 0,01 mm, como mostra a Figura 22.



Figura 22. Equipamento para ensaio de espessura

Após confeccionadas, a espessura das amostras foi determinada em vários pontos da mesma pelo micrômetro. Desses pontos, foi calculada a média para determinação da espessura nominal.

Os mesmos resultados foram utilizados como parâmetro para realização do ensaio de resistência à tração.

#### 4.3.3. Ensaio de Densidade

Para a pesquisa, foi utilizada a norma ASTM D792 baseada no Princípio de Arquimedes, por meio de cinco amostras para cada material com dimensões reduzidas de (2 x 2) cm, uma balança com precisão de 0,1 mg e, para suporte da amostra, aparato específico como mostra a Figura 23.



Figura 23. Equipamento para ensaio de densidade com base na ASTM D792

Cada amostra foi pesada no ar e, posteriormente, submersa na água deionizada à temperatura e umidade controlada. Após a determinação dos pesos, a densidade sobre cada resultado foi calculada e, posteriormente, a média dos valores, resultando na densidade final.

#### 4.3.4. Ensaio de Resistência à Tração

Nesse ensaio, a norma NBR 15856 foi utilizada como referência. Para tanto, utilizou-se uma máquina universal de ensaio da marca EMIC com capacidade de 30 kN, acoplada à garra pneumática, como visto na Figura 24.

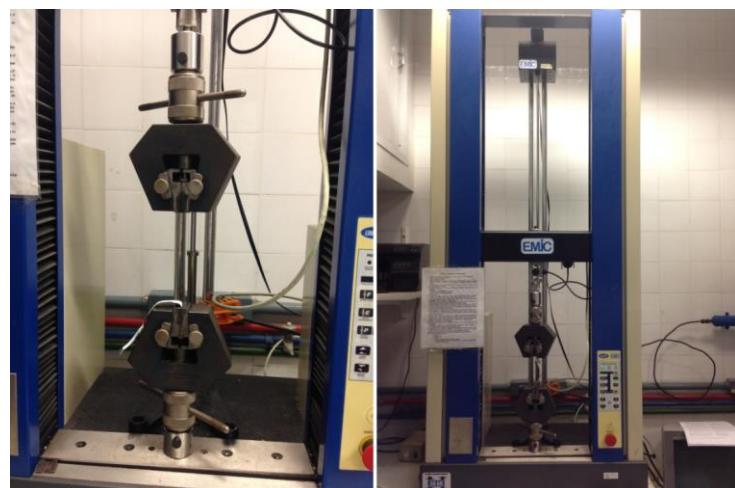


Figura 24. Máquina universal de ensaios

Com relação às amostras, uma vez que os *banners* apresentaram diferenças na conformação das fibras, identificadas de forma visual, no sentido longitudinal e transversal, ambas as direções foram ensaiadas, perfazendo um total de dez amostras por *banner*. Para a geomembrana, uniforme em ambas as direções, foram utilizados cinco corpos de prova.

Assim, a nomenclatura das amostras foi dada como B1L e B2L – para amostras ensaiadas no sentido longitudinal, ou seja, no sentido de comprimento/alongamento das fibras – e B1T e B2T – para amostras ensaiadas no sentido transversal.

As amostras foram confeccionadas em formato de tiras com dimensões de (2,5 x 15) cm e a velocidade do ensaio foi dada em 50 mm/min.

Ligado a um *software* próprio, os dados foram coletados, possibilitando o cálculo das propriedades de interesse, como a resistência a tração, alongamento e módulo de elasticidade.

## 4.4. Resultados e Análises

### 4.4.1. Propriedades Físicas

Os *banners* 1 e 2 utilizados resultaram em gramaturas médias próximas entre si - 434,6 g/m<sup>2</sup> e 439,6 g/m<sup>2</sup>, respectivamente. Contudo, foram bem abaixo do valor encontrado para a geomembrana, com espessura de 706,4 g/m<sup>2</sup> para a amostra GEO. A Figura 25 mostra os resultados mínimos e máximos encontrados para cada material.

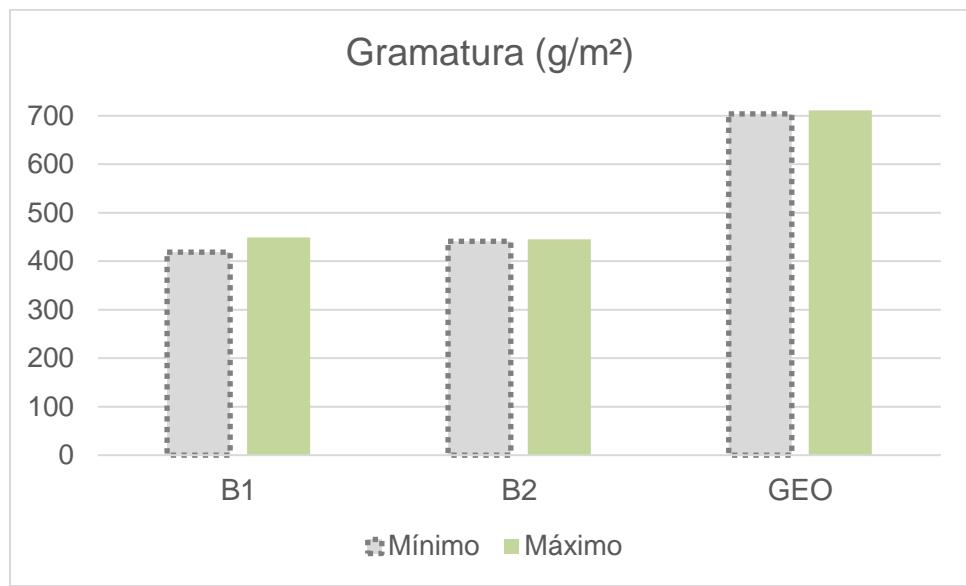


Figura 25. Resultados mínimo e máximo para cada material

Como, em geral, a gramatura indica o peso, os valores mais baixos encontrados para os *banners* beneficiam a técnica no que diz respeito à redução do suporte de carga necessário para um telhado verde, ao torná-lo mais leve.

Adicionalmente, uma gramatura menor pode também indicar uma menor espessura, que significaria, dentre outras coisas, redução na resistência ao rasgo, resistência química e proteção aos raios UV, além do aumento na probabilidade de ocorrência de danos mecânicos (LODI, 2003).

Com relação a espessura, os resultados ilustrados na Figura 26 mostram a faixa de valores encontrados para a espessura dos materiais amostrados e a faixa para os dados recomendados pela literatura.

Enquanto a geomembrana possui espessura de 0,56 mm, os *banners* 1 e 2 ficam na faixa de 0,3 mm. Esse valor não é usual para materiais com função impermeabilizante, sobretudo em telhados verdes que geralmente instalam mantas com espessuras de 0,8 a 1,0 mm no Brasil segundo Minke (2004) a fim de garantir seu desempenho na função esperada, a impermeabilização.

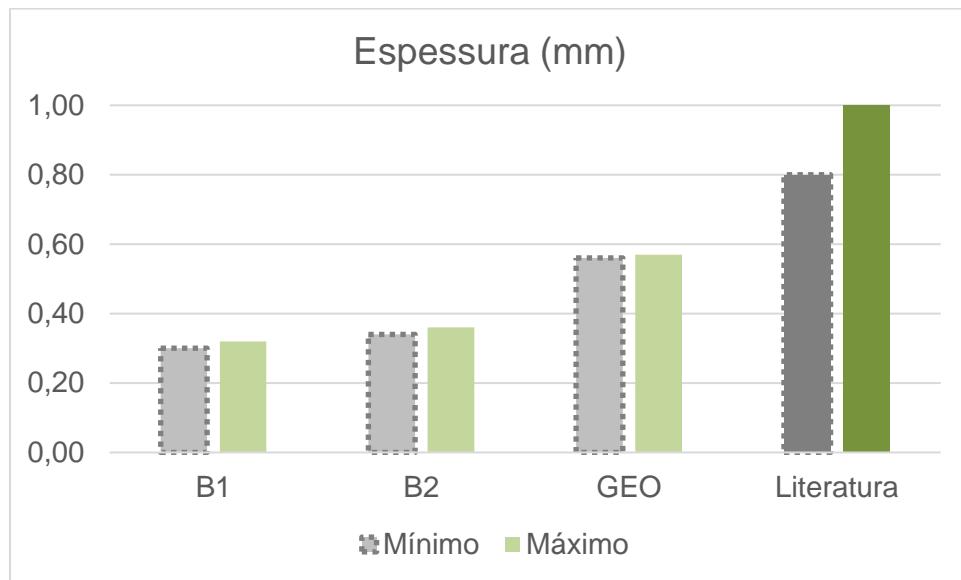


Figura 26. Valores de Espessura mínimos e máximos dos materiais ensaiados e aqueles recomendados pela literatura

Portanto, para aplicá-los, há demanda de uma quantidade maior de material, a fim de serem sobrepostos até atingir a faixa adequada. Para isso, é necessário cuidado na solda e instalação, de forma a garantir seu desempenho e eficiência, evitando problemas futuros.

Destaca-se ainda que, uma vez que há sobreposições para adequação das recomendações a fim de que a camada seja capaz de suportar todas as influências do telhado verde, a aplicação de *banners* é mais recomendada para telhados verdes extensivos e, em alguns casos, semi-intensivos. Isso porque, para os intensivos, a quantidade de camadas sobrepostas seria muito maior, demandando mais material reutilizado. Como as características entre *banners* são muito variáveis, é mais difícil a padronização com grande quantidade de um material descartado.

Como exemplo, no caso da sobreposição, a gramatura aumentaria para 1,1 kg/m<sup>2</sup>, considerando espessura de 0,8 mm, podendo atingir até 1,3 kg/m<sup>2</sup> ao considerar espessura de 1,0 mm. Já no caso de uma espessura de 6,0 mm - espessura estudada

por Gatto (2012) que calculou gramatura total de 7,95 kg/m<sup>2</sup> -, a gramatura atingiria 7,9 kg/m<sup>2</sup>.

Com relação à densidade há também uma grande discrepância entre os materiais, resultados ilustrados na Figura 27. Nesse caso, os *banners* B1 e B2 possuem os maiores valores, 1,56 e 1,54, respectivamente, contra 1,3 da geomembrana.

Uma vez que os valores típicos de geomembranas de PVC se limitam a 1,6 (COLMANETTI, 2006), os valores encontrados estão dentro dos parâmetros. Entretanto, cada *banner*, a depender de sua composição, apresenta diferentes características e propriedades, necessitando a determinação da densidade para cada material e, assim, garantir sua conformidade, bem como das propriedades que variam com a variação da densidade, como alongamento na ruptura, resistência a tração e permeabilidade (LODI, 2003).

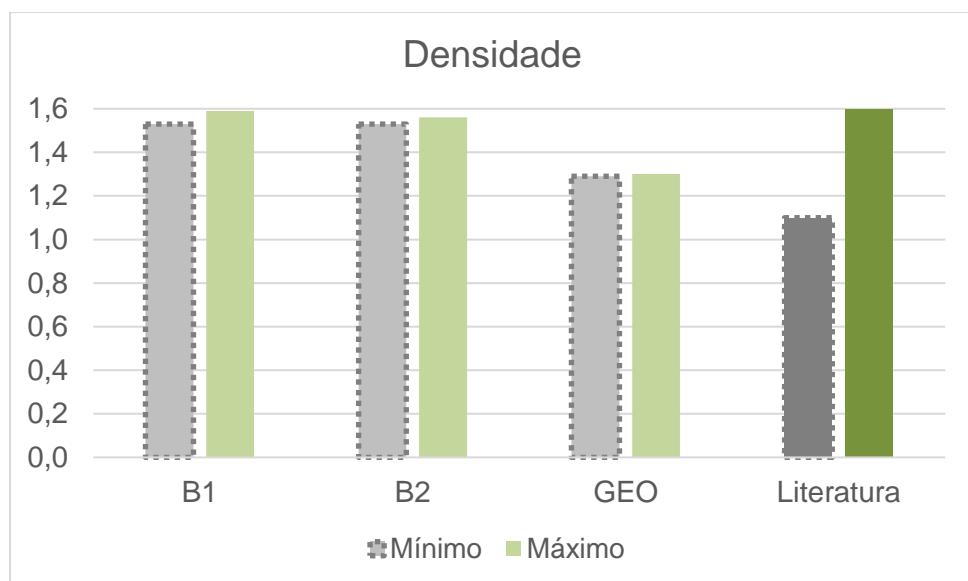


Figura 27. Resultados do ensaio de densidade dado os valores mínimos e máximos e valores recomendados pela literatura

A alta densidade obtida para os *banners* 1 e 2 pode indicar maior resistência a tração, a ser verificada no ensaio para determinação das propriedades mecânicas a seguir, e menor permeabilidade, como cita Lodi (2003).

Em resumo, a Tabela 4 mostra a média dos resultados para as propriedades físicas encontradas sobre cada material.

Tabela 4. Resultado dos ensaios de propriedades físicas

| MATERIAL   | GRAMATURA<br>(g/m <sup>2</sup> ) | ESPESSURA<br>(mm) | DENSIDADE |
|------------|----------------------------------|-------------------|-----------|
| <b>B1</b>  | 434,6                            | 0,31              | 1,56      |
| <b>B2</b>  | 439,6                            | 0,35              | 1,54      |
| <b>GEO</b> | 706,4                            | 0,56              | 1,3       |

Ressalta-se que, durante o ensaio de densidade, notou-se perda de tinta, na cor azulada, do *banner* B1 para a água, como pode ser observado na Figura 28. Portanto, é importante tomar cuidado na aplicação do mesmo em telhados verdes, pois, caso haja captação de água sobre a camada de impermeabilização para reuso, este deve ser cauteloso, uma vez que a tinta provoca contaminação química da água.

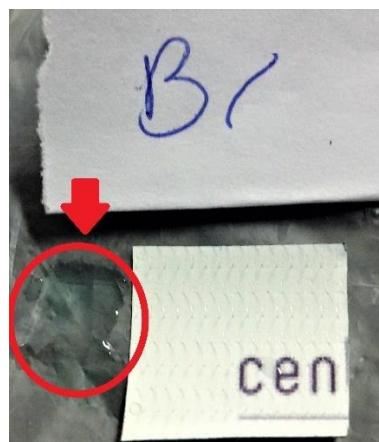


Figura 28. Perda de tinta, na cor azulada, do *banner* B1 para a água durante ensaio de densidade

Ademais, deve-se ter cuidado com outras substâncias químicas que, porventura, posam atuar no sistema, sejam fertilizantes, pesticidas ou outros produtos químicos que auxiliem na manutenção da vegetação e que podem reagir com a tinta do material, aumentando o impacto ambiental.

Uma potencial alternativa que remediaría a contaminação da tinta seria a aplicação do *banner* sobre o telhado com sua face impressa voltada para baixo, no sentido do telhado estrutural, evitando o contato direto da água com a tinta do material.

#### 4.4.2. Propriedades Mecânicas

Os resultados quantitativos das propriedades mecânicas foram compilados na Tabela 5. Diante das informações de interesse, destacam-se a resistência a tração, o alongamento ou deformação na ruptura e o módulo de elasticidade.

Tabela 5. Resultados do ensaio de tração

| Propriedades                                     | B1L | B1T | B2L | B2T | GEO |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Força máxima (N)</b>                          | 249 | 309 | 306 | 304 | 370 |
| <b>Força na ruptura (N)</b>                      | 240 | 309 | 270 | 262 | 66  |
| <b>Resistência a Tração (MPa)</b>                | 32  | 40  | 35  | 35  | 26  |
| <b>Tensão na ruptura (MPa)</b>                   | 31  | 40  | 31  | 30  | 5   |
| <b>Deformação específica na força máxima (%)</b> | 47  | 31  | 25  | 30  | 28  |
| <b>Deformação específica na ruptura (%)</b>      | 49  | 31  | 27  | 31  | 55  |
| <b>Módulo de elasticidade (MPa)</b>              | 2,9 | 5,1 | 3,9 | 5,1 | 2,9 |

Dentre os três materiais e considerando ambos os sentidos ensaiados para os *banners*, a resistência a tração foi menor para a geomembrana. Esse resultado pode ter ocorrido devido a alguma composição desconhecida do material. Porém, dificilmente foi em função do equipamento ou amostra de ensaio, uma vez que o mesmo foi repetido em dois dias distintos, resultando nos mesmos valores.

De forma geral, os valores se mantiveram próximos e acima de 20 MPa, limite recomendado para geomembranas ensaiadas em formato “haltere”. Uma vez que se espera que o formato “tira”, como utilizado nos ensaios, tenha resistência relativamente maior que no “haltere” devido suas dimensões, os valores foram favoráveis, conforme mostra Lodi (2003) e Vertematti (2004).

Em relação à deformação na ruptura, todos os resultados deram bem abaixo do esperado, como pode ser visto na Figura 29, que seria de 200% a 500% para geomembranas de PVC segundo Lodi (2003).

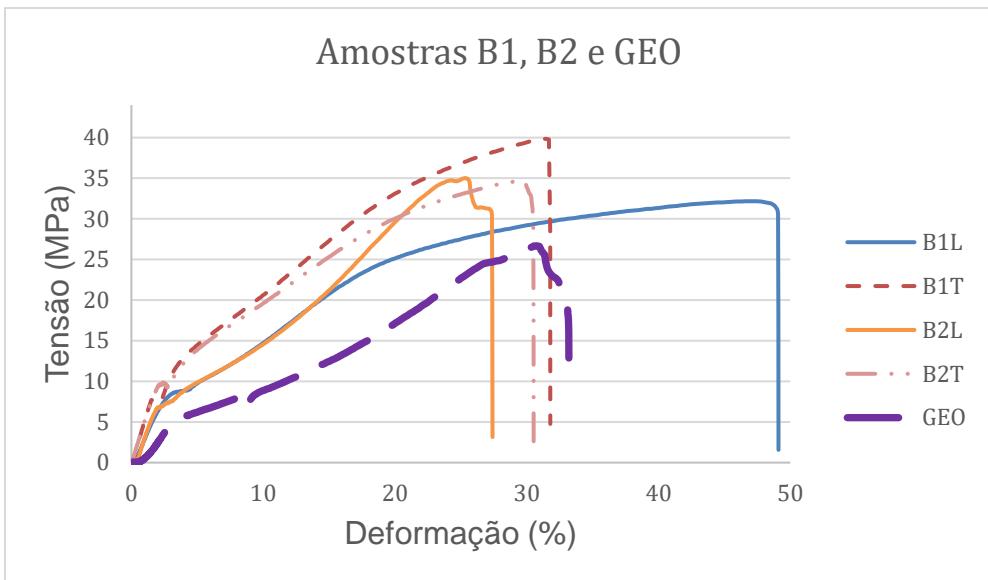


Figura 29. Tensão versus deformação para amostras B1, B2 e GEO

Ressalta-se ainda que, apesar de abaixo das deformações previstas pela literatura, a deformação para a amostra B1 encontra-se próxima à faixa esperada segundo os dados cedidos pelo Fornecedor e dispostos no Anexo B, que ressalta variação de 16,5 a 21,5 %, além da resistência a tração na faixa de 26 a 39 MPa que também confere com os resultados encontrados.

Como previsto diante das características físicas observadas, a deformação para o *banner* B2 foi menor que para as amostras B1 e GEO, como ilustrado pela Figura 30, além do módulo de elasticidade maior, indicando um material mais rígido.

É possível notar que o *banner* B1 possui propriedades melhores quando comparado ao B2, que rompe a deformações e tensões mais baixas. Por fim, o módulo de elasticidade - calculado na fase proporcional, onde a curva apresenta um comportamento próximo ao linear - apresentou variações significativas para uma mesma amostra de *banner* em ambos os sentidos.

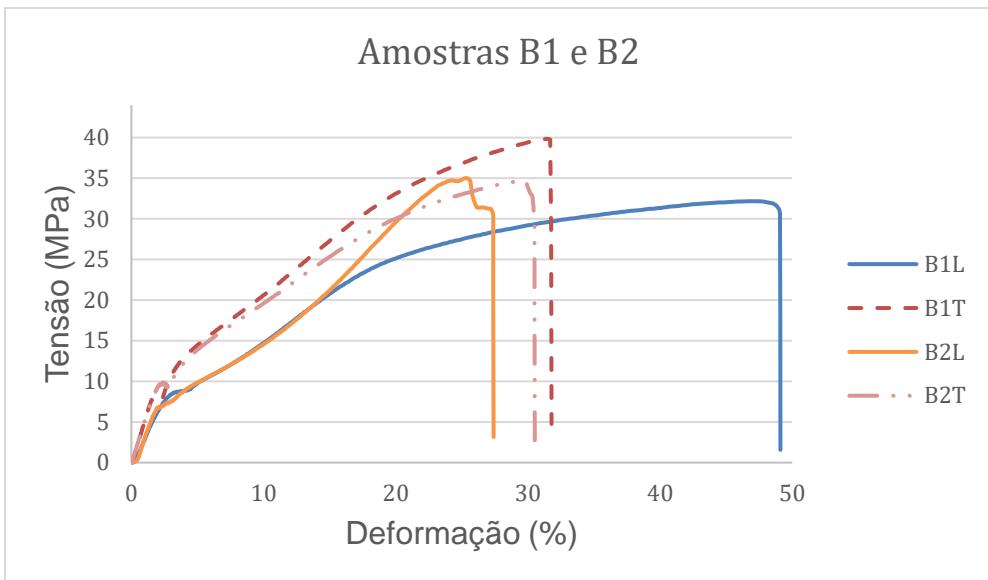


Figura 30. Resultado dos ensaios de tração para as amostras de *banner*

No caso dos *banners*, para o sentido longitudinal, o módulo calculado foi em torno de 3,0 MPa. Para o transversal, o valor foi próximo de 5,0 MPa, apontando um comportamento mais rígido. Assim, na instalação da camada de *banner* em um sistema de telhado verde, é importante também analisar o sentido em que será disposto, a fim de reduzir a tensão aplicada sobre o sentido mais rígido, o que aumentaria a probabilidade de danos mecânicos. Para a geomembrana, o módulo foi calculado em 2,9 MPa. Portanto, menos rígido que ambos os *banners*.

As Figuras 31 e 32 mostram, gráfica e respectivamente, os resultados obtidos e a comparação entre a geomembrana com o *banner* B1 e com o *banner* B2. Na comparação entre ambas as figuras, é possível notar que o *banner* B2 assemelha-se mais dos resultados para a geomembrana GEO no que diz respeito às suas características mecânicas.

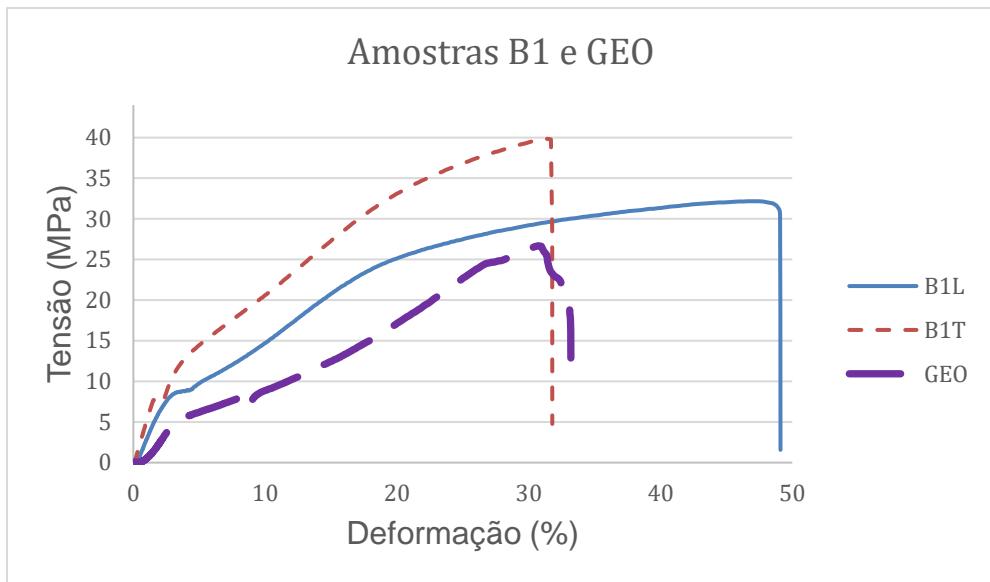


Figura 31. Gráfico tensão *versus* deformação para amostras B1 e GEO

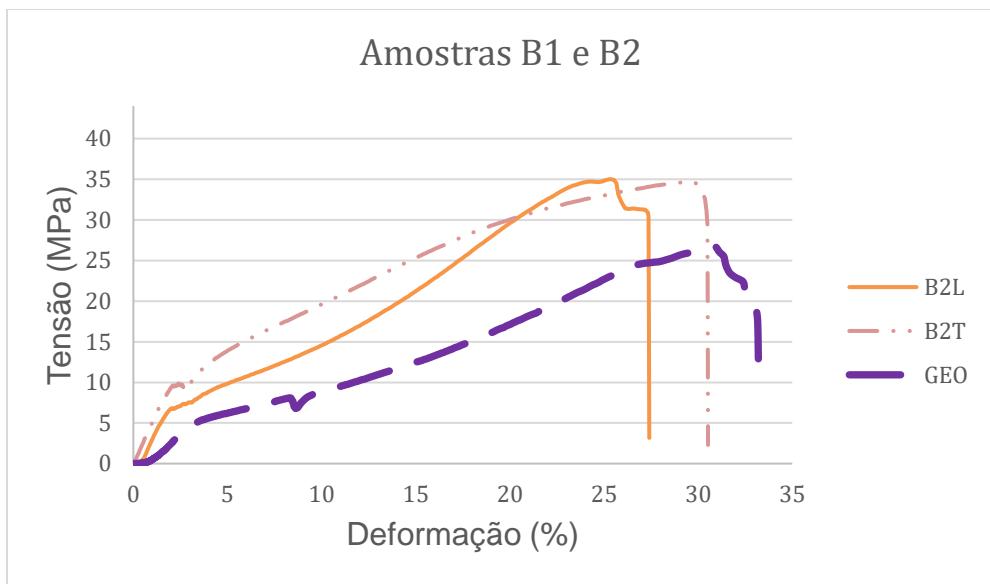


Figura 32. Gráfico tensão *versus* deformação para amostras B2 e GEO

Devido a presença da fibra de poliéster em sua composição, era esperado um comportamento mais dúctil sobre a geomembrana GEO, alcançando deformações maiores. Contudo, além de terem sido resultados reduzidos, foram abaixo dos encontrados para os *banners*, apesar de ser provável, porém não determinado no estudo, a presença de poliéster na composição destes.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Conclusão

O trabalho visou a adequação de um produto conhecido e corriqueiramente utilizado para uma aplicação inovadora. O *banner*, já reutilizado em áreas como de fabricação de bolsas e outros acessórios, mostrou grande potencial como material impermeabilizante em sistemas construtivos, sobretudo os telhados verdes. Diante do levantamento bibliográfico, identificou-se a grande similaridade entre os *banners* e as geomembranas devido seus componentes, com destaque à resina polimérica de PVC, e processo de fabricação.

A análise experimental de ambos os *banners* mostra que o material tem potencial para aplicação em telhados verdes diante das propriedades determinadas. Contudo, possui ressalvas. Para a espessura, houve discrepância nos valores dos *banners* comparados às geomembranas. Entretanto, é uma situação que pode ser sanada pela sobreposição do material. A limitação surge quando a quantidade de *banners* necessária para a sobreposição excede a quantidade já obtida de materiais com características conhecidas e verificadas.

Da mesma forma, a resistência a tração trouxe ânimo ao revelar valores para os *banners* acima do esperado pela literatura e acima do valor encontrado para o material recomendado para aplicação em telhado verde, representado pela amostra de geomembrana. Em contrapartida, a deformação ficou longe do esperado tanto para os *banners* quanto para a geomembrana. Este resultado, porém, não embarreira o uso do material, uma vez que a resistência a tração não é função principal da camada de impermeabilização, mas apenas uma propriedade para certificar situações que, porventura, o telhado verde venha a se encontrar.

Para a gramatura, ao considerar a sobreposição e espessura máxima de 6,0 mm, os *banners* se mostraram de acordo com os dados bibliográficos levantados, apesar de não influenciar de forma tão direta o desempenho do sistema e não serem representativos como é o peso da camada de substrato. A densidade também resultou em valores satisfatórios por se encontrarem dentro da faixa prevista pela literatura. Ressalta-se ainda que todas as propriedades estudadas não devem ser analisadas de

forma isolada. Isso porque uma determinada propriedade pode influenciar e alterar outras.

Por fim, a análise do protótipo de telhado verde permitiu verificar, na prática, a atuação do *banner* como camada de impermeabilização. Com um tempo de vida já considerável, acima de dois anos, o protótipo mostrou que, ao menos em pequena escala, obtém-se um bom desempenho, bloqueando de maneira eficiente a passagem de fluidos.

A aplicação dos materiais estudados limita-se à identificação e estudo de outras variáveis a fim de garantir a qualidade e desempenho dos mesmos em sistemas de impermeabilização. Destaca-se aqui a necessidade da elaboração de estudos quantitativos de permeabilidade que, apesar de serem caros, são fundamentais para identificar a principal função esperada pelos *banners*.

Diante das inúmeras variações em composição, características e propriedades entre *banners*, cada material deve ser estudado, identificado e qualificado a fim de permitir sua aplicação ou não em telhados verdes.

Conclui-se então que o uso do material é limitado, uma vez que não basta a obtenção de diversos tipos de *banners* nas mais diferentes fontes por não haver conhecimento sobre suas propriedades e, muitas vezes, sobre seus fabricantes, a quem se poderia recorrer a fim de obter dados. Ademais, muitos ensaios são onerosos e inviáveis de serem realizados em grande escala e para cada aplicação.

Portanto, mais estudos são recomendados a fim de pautar o uso de *banners* em telhados verdes e disseminar o conhecimento dessa alternativa tecnológica para que, diante da demanda, possam ser feitas adequações e possibilitar seu uso, no futuro, em grande escala.

## 5.2. Sugestão de Trabalhos Futuros

O *banner*, além de poder proporcionar função impermeabilizante em telhados verdes, traz redução de custos àqueles que adquirem a técnica. Isso porque a proposta é que o material seja reutilizado, não sendo necessário compra-lo. Além disso, as

geomembranas propriamente ditas são caras e costumam ser o maior custo nos telhados.

Sendo assim, cria-se a possibilidade de moradias precárias, habitadas por pessoas que não possuem capital para investir em alternativas que amenizem os impactos climáticos, como condicionadores de ar e, mesmo, o telhado verde em sua forma mais tradicional, adquiri-lo.

Dessa forma, como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de um estudo de viabilidade econômica entre um telhado verde cuja camada de impermeabilização é composta por *banners* e outro em que a mesma camada é composta pelas geomembranas tradicionais, analisando os custos em ambos os cenários.

Outra sugestão, é a continuidade no aprofundamento do assunto, uma vez ser a presente pesquisa uma análise introdutória, necessitando do estudo das demais variáveis e propriedades que podem afetar o comportamento e desempenho do *banner* em sistemas de telhados verdes, frente os dados da literatura voltados para mantas de impermeabilização usuais.

Assim, propõe-se a realização dos demais ensaios previstos para as geomembranas que não foram contemplados neste trabalho para que, assim, o *banner* possa ser caracterizado de forma mais profunda e, com isso, fornecer maior embasamento para sua aplicação em telhados verdes.

Adicionalmente, sugere-se o estudo quanto uma sistematização de metodologias para determinação das propriedades recomendadas para aplicação dos *banners* em sistemas de impermeabilização e sua execução, auxiliando projetistas e demais interessados em aplicar o sistema com segurança e eficácia.

No caso específico de geomembranas, como visto, poucas normas brasileiras existem a fim de determinar procedimentos para avaliar as diferentes propriedades que possuem. Sendo assim, propõe-se ainda a realização de estudos para a ampliação da normatização brasileira sobre geomembranas, diante das variáveis locacionais, e para ampliar o conhecimento quanto aos seus benefícios em sistemas de impermeabilização.

Ademais, neste trabalho, a aplicação dos *banners* se restringiu à telhados verdes que demandam variáveis diferentes das demais aplicações possíveis para geomembranas como impermeabilizantes. Portanto, sugere-se a elaboração de novos estudos que tragam a luz a viabilidade do material ser utilizado em outras aplicações como impermeabilizante, que não os telhados.

### 5.3. Limitações e Dificuldades

Por serem ensaios, em sua maioria, internacionais e devido às geomembranas serem recentes no Brasil, não há vasta disponibilidade e/ou conhecimento acerca de equipamentos e procedimentos necessários para determinação de algumas de suas propriedades. Ademais, muitos são onerosos. Por isso, há limitação na realização de ensaios, como o de permeabilidade.

A vasta quantidade de ensaios descritos na literatura e o pouco tempo disponível para elaboração da pesquisa, impossibilitaram a realização de outros que auxiliariam, ou não, no entendimento do *banner* como material impermeabilizante para telhados verdes.

Outra limitação é a disponibilidade de informações técnicas acerca do material *banner* que, em geral, não é divulgado pelo vendedor, uma vez que suas aplicações não requerem a determinação de mais propriedades além das referentes à impressão. Isso dificultou a obtenção de dados e mesmo de características fornecidas pelos fabricantes. No caso do *banner* B2, por exemplo, o fornecedor não foi encontrado, apesar de se ter o local em que foi comprado.

Em resumo, sejam as geomembranas, sejam os telhados verdes, ambos foram introduzidos, principalmente no Brasil, recentemente, sendo difundidos de forma mais expressiva a partir da década de 1990. Devido a isso, faltam estudos que os especifiquem. Ademais, as informações sobre os *banners* limitam-se, em sua maior parte, a dados fornecidos por empresas, sendo pouco os estudos acerca dos mesmos.

Diante disso, relacionar os três temas e, sobretudo, estudar uma aplicação alternativa para um deles diante dos outros, foi um desafio, porém recompensador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9574: Execução de impermeabilização.** 2008.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15856: Geomembranas e produtos correlatos - Determinação das propriedades de tração.** 2010.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9575: Impermeabilização - Seleção e Projeto.** 2010b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9863-1: Geossintéticos - Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camada única.** 2013a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9864: Geossintéticos - Métodos de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos.** 2013b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10318-1: Geossintéticos - Parte 1: Termos e definições.** 2018.

ARAÚJO, S. R., 2007. **As funções dos telhados verdes no meio urbano, na gestão e no planejamento de recursos hídricos.** Monografia de Graduação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D792: Standard test method for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement.** 2008.

BONI, F., 2015. **Telhado Verde - O Guia Completo.** Disponível em: <<https://www.ugreen.com.br/telhado-verde/>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2019.

BRASIL, 2010. **Lei 12.305: Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Disponível em: <[http://bit.ly/lei\\_12305](http://bit.ly/lei_12305)>. Acesso em: 21 de janeiro de 2019.

BRINCAL, 2016. “O que é serigrafia? (ou silk screen)”. Disponível em: <<https://brincal.com.br/o-que-e-serigrafia-ou-silk-screen/>>. Acesso em: 09 de janeiro de 2019.

CALLISTER, W. D; RETHWISCH, D. G., 2012. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 8<sup>a</sup> edição. Rio de Janeiro, LTC. pp. 454-533.

CHAVES, H. O., 2014. **Diretrizes Sustentáveis na Construção Civil: Avaliação do Ciclo de Vida.** Projeto de Graduação. Escola Politécnica/UFRJ: Rio de Janeiro, RJ.

CMMAD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987. **Nosso Futuro Comum.** 1<sup>a</sup> Edição. Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro.

COLMANETTI, J. P., 2006. **Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento.** Tese de D.Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

COSTA, C. M. L.; LODI, P. C.; COSTA, Y. D. J. *et al.*, 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, pp. 158-169.

CTB – Ciência e Tecnologia da Borracha, 2018. **Elastômeros Termoplásticos.** Disponível em: <<http://bit.ly/elastomerostermoplasticos>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2019.

FELDKIRCHER, W., 2008. **Impermeabilização de Aterro Sanitário com Geomembrana.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade São Francisco, Itatiba, SP.

FÉLIX, L. F. C., 2008. **O processo de projeto de uma edificação mais sustentável: contribuições relativas ao programa arquitetônico.** Dissertação de M.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, RS.

FERRAZ, I. L., 2012. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica.** Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

GATTO, C. M., 2012. **Coberturas Verdes: a importância da estrutura e impermeabilização utilizadas.** Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG.

GLOBAL, 2018. **“Serigrafia X impressão digital: quais as diferenças entre essas técnicas?”**. Disponível em: <[http://bit.ly/serigrafia\\_impressaodigital](http://bit.ly/serigrafia_impressaodigital)>. Acesso em: 09 de janeiro de 2019.

GOMES, C. R., 2014. **Análise de Danos em Geomembranas por meio de Ensaios de Laboratório em Diferentes Escalas.** Dissertação de M.Sc. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

GOULART, H. G. M., 2012. **Protocolo de Quioto - Uma ideia de desenvolvimentos sustentável.** Conteúdo Jurídico, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.conteudojuridico.com.br/?artigos&ver=2.38112&seo=1>>. Acesso em: 07 de janeiro de 2019.

HALSE, Y.; WIERTZ, J.; RIGO, J. M. *et al*, 1991. “Chemical identification methods used to characterize polymeric geomembranes”. In: Rollin, A. L. and Rigo, J. M. (eds), **Geomembranes: Identification and Performance Testing**, chapter 15, pp. 316-335. London, RILEM Reports, Chapman & Hall.

HAXO, H. E.; PIERSON, P., 1991 “Permeability Testing”. In: Rollin, A. L. and Rigo, J. M. (eds), **Geomembranes: Identification and Performance Testing**, chapter 10, pp. 172-189. London, RILEM Reports, Chapman & Hall.

HENEINE, M. C. A. S., 2008. **Cobertura Verde.** Monografia de Graduação. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

HSUAN, Y. G.; LORD Jr, A. E.; KOERNER, R. M., 1991. **Effects of outdoor exposure on high density polyethylene geomembrane**, Geosynthetics 91 Conference Proceedings, Atlanta, USA. IFIA, St. Paul, MN, USA, pp. 287-302.

JENSEN, E.; SCHNEIDER, E. L., 2015. "O processo serigráfico e suas possibilidades criativas na impressão". **Revista Liberato**, vol. 16, n. 25, pp. 01-100.

JUNG, A. A.; SALDANHA, M. A.; GONÇALVES, J. AL. et al, 2015. "Projeto Relona: Reaproveitamento de Lonas de Banner". **4º Fórum Internacional Ecoinovar**. Santa Maria, RS. 26 – 28 de agosto de 2015.

KOLB, W., 2003. "Telhados de Cobertura Verde e Manejo de Águas Pluviais". **Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Águas de Chuva**. Petrolina, PE. 11 de julho de 2003.

KOERNER, R. M., 1998. **Designing with geosynthetics**, 3 ed. Prentice Hall Publication Co, Englewood Cliffs, pp. 426 - 469.

KOERNER, R. M., 1991. "Geomembrane Overview - Significance and Background". In: Rollin, A. L. and Rigo, J. M. (eds), **Geomembranes: Identification and Performance Testing**, chapter 1, pp. 03-21. London, RILEM Reports, Chapman & Hall.

LAZZARIN, R. M.; CASTELLOTTI, F.; BUSATO, F., 2005. "Experimental measurements and numerical modelling of a green roof". In: **Energy and Buildings**, vol. 37, pp. 1260-1267.

LIMA, M. P., 2009. **Equações preditivas para determinar a temperatura interna do ar: envolventes em painel alveolar com cobertura verde**. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

LODI, P. C., 2003. **Aspectos de Degradação de Geomembranas Poliméricas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e Poli(cloreto de vinila) (PVC)**. Tese de D.Sc. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP.

MAIA, I. S., 2001. **Avaliação da Degradação de Propriedades Mecânicas de Geomembranas de PEAD e PVC**. Dissertação de M.Sc. Escola de Engenharia de São Carlos EESC/USP, São Carlos, SP.

MARÇAL, R., 2012. **Avaliação da permeabilidade em geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD)**. Dissertação de M.Sc. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP.

MINKE, G., 2004. "Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos". **Editorial Fin de Siglo.** Disponível em: <[http://bit.ly/techosverdes\\_minke](http://bit.ly/techosverdes_minke)>. Acesso em: 06 de janeiro de 2018.

NAJELISKI, D. M.; PALHANO, A. P.; MATOSO, L. G., 2017. "Estudo de Viabilidade da Reutilização de Banners de Lona na Produção de Móveis". **Sustentabilidade em Debate**, v. 8, n. 2, pp. 60-74, Brasília.

NASCIMENTO, M. M., 2014. **Estudo da viabilidade econômica da técnica de telhados verdes em unidades do programa minha casa minha vida na cidade de Campo Mourão, PR.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, PR.

NASH, W.; POTTER, M. C., 2014. **Resistência dos Materiais**, 5 ed. Porto Alegre, Bookman.

NEVES, A. C.; PAULO, E.; GOETTEN, J. P., 2012. **Ensaios de tração - materiais plásticos.** SENAI - Centro de Educação Profissional de Santos Antônio de Platina - PR.

OHNUMA, A. A., 2008. **Medidas não convencionais de reserva d'água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares.** Tese de D.Sc. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

OSMUNDSON, T. H., 1999. **Roof Gardens: History, Design and Construction**, 1 ed. New York, W. W. Norton & Company.

OVERMANN, L. K.; COWLAND, J. W.; MATTRAVERS, N. K. et al, 1993. "Chemical Resistance Testing of Liner Materials for Hong Kong Landfills". In: Christensen, T. H., Cossu, R. and Stegmann, R. (eds), **Barrier systems, environmental aspects, upgrading and remediation, siting, monofills, effects of waste pretreatment, landfilling in developing countries.** Fourth International Landfill Symposium, Sardinia. pp. 333 - 347.

PEDRONI, B., 2017. "Artigo apresenta Panorama do Mercado de Geossintéticos". **Geosynthetica.net.br.** Disponível em: <<http://bit.ly/mercadogeossinteticos>>. Acesso em: 02 de dezembro de 2018.

PEREIRA, P. I., 2009. **Construção Sustentável: o desafio.** Monografia de Graduação. Universidade Fernando Pessoa, Porto, Portugal.

PGI. **PGI 1104 Specification.** PVC Geomembrane Institute: University of Illinois Urbana-Champaign, 2004.

PINHEIRO, E. G., 2001. **Modelos Numéricos Aplicados a Vulcanização de Pneus.** **Dissertação de M.Sc.** Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

PRINTI. "O que é serigrafia?". **Printi.** Disponível em: <<https://www.printi.com.br/blog>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2018.

RAMOS, J. C., 2013. Metodologia para controle operacional de barreiras geossintéticas empregadas em depósitos de rejeitos de mineração. Dissertação de M. Sc. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

REZENDE, B. S., 2013. **Telhados verdes em clima tropical: uma nova técnica e seu potencial de atenuação térmica.** Tese de D.Sc. UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ.

RIGO, J. M.; CAZZUFFI, D. A., 1991. "Test Standards and their Classification". In: Rollin, A. L. and Rigo, J. M. (eds), **Geomembranes: Identification and Performance Testing**, chapter 2, pp. 18-50. London, RILEM Reports, Chapman & Hall.

ROLA, S. M.; MACHADO, 2008. **A naturação como ferramenta para a sustentabilidade de cidades: estudo da capacidade do sistema de naturação em filtrar a água de chuva.** Tese de D.Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

ROLA, S. M.; MACHADO, L. F. C.; BARROSO-KRAUZE, C. et al, 2003. "Naturação, água e o futuro das cidades no contexto das mudanças ambientais globais". In: **Congresso Brasileiro de Arquitetos.** Rio de Janeiro, 2003.

ROWE, R. K.; SANGAM, H. P., 2002. "Durability of HDPE geomembranes", pp. 77-95. Elsevier Science Publishers Ltd.

SANTOS, H. M. A. M., 1979. **Reciclagem química do PVC: aplicação do PVC parcialmente desidroclorado para a produção de um trocador iônico.** Dissertação de M. Sc. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

SANTOS, L. S., 2014. **Estudo da durabilidade de geomembranas utilizadas na impermeabilização de reservatórios das barragens de rejeito de ouro.** Dissertação de M.Sc. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

SAVI, A. C., 2012. **Telhados Verdes: Análise Comparativa de Custo com Sistemas Tradicionais de Cobertura.** Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR.

SCMDIA. "O que você precisa saber sobre lonas sintéticas". **Scmdia.** Disponível em: <[http://bit.ly/lonas\\_sinteticas](http://bit.ly/lonas_sinteticas)>. Acesso em: 21 de dezembro de 2018.

SILVA, N. C., 2011. **Telhado verde: sistema construtivo de maior eficiência e menor impacto ambiental.** Monografia de Graduação. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

TADEU, S., 2011. "Seminário desmistifica questão dos custos para implantação do Telhado Verde em SP". **Portal Sandra Tadeu.** Disponível em: <[http://bit.ly/sandra\\_tadeu](http://bit.ly/sandra_tadeu)>. Acesso em: 28 de dezembro de 2018.

TOMAZ, P., 2008. "Cobertura verde". **Curso de Manejo de águas pluviais**, capítulo 51. Tomaz, P. Guarulhos, SP.

UFRJ. Programação das Sessões e Cadernos Siac 2018. **SIAC UFRJ.** Disponível em: <<https://sistemasiac.ufrj.br/cadernoController/index>>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2019.

VERFAILLIE, H. A.; BIDWELL, R., 2000. **Measuring Ecoefficiency. A Guide to Reporting Company Performance.** World Business Council for Sustainable Development.

VERTEMATTI, J. C., 2004. **Manual Brasileiro de Geossintéticos.** Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos. Editora Blucher.

# ANEXOS

## Anexo A – ensaios e normas usuais para determinação das propriedades de geomembranas

(continua)

| Propriedades             | Norma                  | Observações   |
|--------------------------|------------------------|---|
| <b>FÍSICAS</b>           |                        |   |
| Espessura                | ASTM D751 e D5199      | Geomembranas lisas  |
|                          | ASTM 5994              | Geomembranas texturizadas   |
| Densidade                | ASTM D792              | Método de deslocamento  |
|                          | ASTM D1505             | Método de gradiente de densidade  |
|                          | ASTM D297              | Método de picnômetro  |
|                          | ISO 1183               | -   |
| Índice de Fluidez        | ASTM D1238             | Extrusão por 10 min. Resultado em gramas por carga e por temperatura  |
| Dureza                   | ASTM D2240 E ISO 868   | Durômetro do tipo A   |
| Estabilidade dimensional | ASTM D1204             | -   |
| <b>MECÂNICAS</b>         |                        |   |
|                          | NBR 12824 e ASTM D4885 | Amostra em faixa larga (100 mm de comprimento e 200 mm de largura)  |
|                          | ASTM D638              | Amostra “haltere” (6 mm de largura na seção central para geomembranas não reforçadas e 10 mm para reforçadas) |
| Resistência à tração     | ASTM D882              | Amostras em tiras com 5 a 25,4 mm e amostras com espessura < 1 mm   |
|                          | ISO 37                 | Ensaio em haltere de 4 a 6 mm de largura na seção central   |
|                          | ISO 527                | Ensaio em tira ou haltere, a depender do tipo de geomembrana ensaiada   |
|                          | ISO 1421               | Tiras de (50 x 200) mm  |

## Anexo A – ensaios e normas usuais para determinação das propriedades de geomembranas

(conclusão)

| <b>Propriedades</b>  | <b>Norma</b>                                  | <b>Observações</b>  |
|--|---|---|
| <b>MECÂNICAS</b>   |   |   |
| Resistência a rasgos                                       | ASTM D1004<br>ISO 4674                        | Forma geométrica particular<br>Formas variadas, a depender do método da norma   |
| Resistência contra punctionamento dinâmico                 | NBR 13359<br>ASTM D4833<br>ISO 12236          | Pistão CBR<br>Pistão com 8 mm de diâmetro. Amostra com 45 mm de diâmetro<br>Cone de 500 g e altura de queda de 500 mm |
| <b>HIDRÁULICAS</b>   |   |   |
| Permeabilidade a vapor de água                             | ASTM E96                                      | -   |
| <b>DESEMPENHO</b>  |   |   |
| Resistência a radiação ultravioleta                        | ASTM G26 e ISO 4892                           | Ciclos de luz ultravioleta e vapor  |
| Resistência química  | ENV ISO 12960 e ENV 12225                     | Incubação de amostras em contato com meio agressivo a 23 °C e 50 °C   |
| Resistência à degradação biológica                         | PR EN ISO 13430                               | Incubação de amostras em contato com solo contendo microorganismos agressivos   |
| Resistência à degradação térmica                           | ASTM D794                                     | Incubação de amostras em estufa sob elevadas temperaturas e circulação de ar  |
| Resistência das soldas                                     | ASTM D4545                                    | Cisalhamento e deslocamento   |
| Resistência contra fissuração sob tensão (stress cracking) | ASTM D1693 e ISO 4599<br>ASTM 5397 e ISO 6252 | Realizada em tubos de ensaio<br>Realizada sob carga de tração   |

Adaptado de Vertematti, 2004

## Anexo B – especificações da amostra B1

Lonas de PVC manufaturadas a partir de PVC reciclado utilizado para a parte posterior das lonas, reduzindo em torno de 50% a utilização de resina de PVC virgem.

Dados fornecidas pela empresa

| Propriedades           | Especificações                    | Método de Teste       |
|------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Gramatura              | 440 g/m <sup>2</sup>              |                       |
| Tecido                 | 250D x 500D; 18 x 12 por polegada |                       |
| Durabilidade esperada* | 1 ano                             |                       |
| Força de tensão        | 710 / 480                         | ISO 13934-1:2013: N   |
| Resistência à ruptura  | 39 / 26                           | ISO 13937-2:2000: MPa |
| Alongamento            | 16.5 / 21.5                       | ISO 13934-1:2013: %   |

\*Referente ao banner como figura de exposição

\*\*Os dados representam a média e não devem ser utilizados como especificação