Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

VINÍCIUS ROCHA MENDES SANTOS

Avaliação da Resistência de Interface entre Geoexpandido, Geomembranas de PEAD e Geotêxteis Não Tecidos: Escala ampliada (300mm x 300mm)

Bauru
2026

VINÍCIUS ROCHA MENDES SANTOS

Avaliação da Resistência de Interface entre Geoexpandido, Geomembranas de PEAD e Geotêxteis Não Tecidos: Escala ampliada (300mm x 300mm)

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientador : Dr. Paulo César Lodi

Bauru
2026

S237a

Santos, Vinícius Rocha Mendes
Avaliação da resistência de interface entre geoexpandido, geomembranas de PEAD e geotêxteis não tecidos: escala ampliada (300mm x 300mm) / Vinícius Rocha Mendes Santos. -- Bauru, 2026
192 f. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Paulo César Lodi

1. Geotecnia. 2. Cisalhamento direto. 3. Geotêxteis. 4. EPS. 5. Ângulo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE VINÍCIUS ROCHA MENDES SANTOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 09 de outubro de 2026, às 9h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de VINÍCIUS ROCHA MENDES SANTOS, intitulada "Avaliação da Resistência de Interface entre Geoexpandido, Geomembranas de PEAD e Geotêxteis Não Tecidos: Escala ampliada (300mm x 300mm)". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO CESAR LODI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / UNESP / Câmpus de Bauru - FEB, Prof. Dr. FERNANDO LUIZ LAVOIE (Participação Virtual) do(a) Departamento de Geotecnia / Universidade de São Paulo - USP / Escola de Engenharia de São Carlos, Prof. Dr. JOSÉ ORLANDO AVESANI NETO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade de São Paulo - USP / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP), Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final:_ _ _ APROVADO _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO CESAR LODI

gov.br Documento assinado digitalmente
PAULO CESAR LODI
Data: 09/10/2026 10:26:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dedico principalmente a Santissima Trindade, sem ela nada seria possível. Aos meus pais, Sandra e Emerson, , a minha noiva Jessyka ,A minha avó e matriarca da familia Maria Mendes, e a todas as pessoas que tornaram essa trajetória possível e mais leve.

AGRADECIMENTOS

Acredito ser impossível agradecer, nestas páginas, a todas as pessoas que verdadeiramente merecem ser lembradas. Ainda assim, farei o meu melhor. Que a ausência de algum nome não seja interpretada como falta de reconhecimento, pois aqueles que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada jamais terão sua importância apagada de minhas memórias.

Inicialmente, agradeço ao corpo docente da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), especialmente aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pela oportunidade de formação, pelos conhecimentos compartilhados e pelos ensinamentos que ultrapassaram os limites das salas de aula ao longo desses anos.

Aos colegas de laboratório, com quem compartilhei a rotina, os desafios e a busca pelo conhecimento científico, deixo minha sincera gratidão. Foram dias de muito aprendizado, marcados por conquistas, incertezas e adversidades que, por vezes, nem mesmo o mais criativo dos roteiristas seria capaz de imaginar. A convivência e o companheirismo tornaram essa jornada mais suportável e, certamente, mais significativa.

Aos técnicos Gustavo Pinheiro e Sérgio Gimenez, expresso meu profundo reconhecimento. Sem a competência, a dedicação e a disponibilidade de ambos, a realização desta pesquisa não teria sido possível. O trabalho que desempenham, muitas vezes longe dos holofotes acadêmicos, possui valor inestimável. O zelo com que exercem suas funções e o compromisso que demonstram diariamente dignificam o nome da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) e merecem todo o reconhecimento.

Estendo meus agradecimentos à equipe de limpeza, que, além de garantir as condições adequadas para o desenvolvimento das atividades no laboratório, também me ofereceu companhia e momentos de descontração durante os longos dias de trabalho. São gestos e presenças que podem parecer pequenos na rotina de uma universidade, mas que fazem uma diferença imensa para quem atravessa períodos de tamanha dedicação e exigência.

Agradeço também a César e Israel, integrantes do laboratório, que tantas vezes se mostraram disponíveis para ajudar, especialmente nos momentos em que surgiam dificuldades

inesperadas. A disposição de ambos em colaborar foi fundamental para tornar o cotidiano mais simples e acolhedor.

Para além dos espaços da universidade, sou grato a todas as pessoas que fizeram parte da minha vida durante esse período de estadia. A Julião e Ronaldo, porteiros do prédio, e a Fábio, zelador, pelo convívio, pela atenção e pela cordialidade de todos os dias. A Elizabeth e sua filha Mariana, pela companhia e por dedicarem parte de seu tempo a ouvir minhas angústias, oferecendo acolhimento e humanidade em momentos nos quais isso significou muito.

A Kaik e Saulo Campos, companheiros da academia, agradeço por terem contribuído para que a atividade física se tornasse também um espaço de lazer, descontração e equilíbrio. Em meio à intensidade e às turbulências do mestrado, esses momentos representaram uma oportunidade de aliviar as preocupações e recuperar as forças para seguir adiante.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pelo apoio financeiro concedido, que contribuiu para a realização desta pesquisa e para minha permanência no programa de pós-graduação.

Aos meus pais, Emerson e Sandra, minha gratidão por tudo o que fizeram e continuam fazendo por mim. De maneira especial, agradeço à minha mãe, Sandra, que foi a maior incentivadora deste projeto e uma das principais responsáveis por torná-lo possível, inclusive por meio de seu indispensável apoio financeiro. Seu esforço, sua confiança e sua disposição em investir nos meus sonhos representam muito mais do que qualquer título acadêmico será capaz de expressar.

Ao meu irmão, Matheus Rocha Santos, e ao meu primo, Douglas Tavares, agradeço pela paciência, pela escuta e por tantas vezes dividirem comigo as angústias, os receios e as incertezas que acompanharam essa caminhada. Ter com quem compartilhar o peso dos momentos difíceis foi essencial para que eu encontrasse forças para continuar.

À minha noiva, Jessyka Pereira Soares, meu amor e minha profunda gratidão. Você acompanhou de perto os momentos mais difíceis desta trajetória, dividiu comigo angústias que nem sempre eram suas e permaneceu ao meu lado quando eu mais precisei. Esteve presente em um dos períodos mais delicados da minha vida e me ajudou a encontrar forças para me reerguer. Sua compreensão, seu companheirismo e seu amor foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Agradeço a Deus por ter me guiado e protegido em todos os caminhos que precisei percorrer. Pela força nos momentos de fraqueza, pela esperança diante das incertezas e por

permitir que, mesmo diante de tantos obstáculos, eu pudesse concluir esta etapa da minha vida.

Por fim, reservo um agradecimento especialmente importante ao meu orientador, Professor Dr. Paulo César Lodi. Talvez nenhuma palavra escrita nestas páginas seja suficiente para expressar a dimensão da minha gratidão. Obrigado por ter acreditado em mim e, sobretudo, por ter lutado por mim quando muitos já haviam deixado de acreditar. Obrigado pela paciência diante das minhas aflições, pelas incontáveis mensagens, pelas orientações e pela disponibilidade que tantas vezes ultrapassou os limites do seu horário de trabalho. Sei que, em diversos momentos, minhas dificuldades também exigiram do senhor esforços que iam muito além das responsabilidades habituais de um orientador. Sua confiança, sua dedicação e, acima de tudo, sua humanidade fora determinante para que esta trajetória chegasse ao fim. Mais do que me orientar na construção de uma dissertação, o senhor me ajudou a atravessar um dos períodos mais desafiadores da minha vida. Por tudo isso, levarei comigo não apenas os ensinamentos acadêmicos, mas também o exemplo de profissional e de ser humano que encontrei no senhor.

A todos, meu mais sincero obrigado.

RESUMO

A estabilidade de sistemas geotécnicos que utilizam blocos de poliestireno expandido (EPS) como material leve de preenchimento, conhecido como geoexpandido, depende da resistência ao cisalhamento mobilizada nas interfaces entre esses blocos e os geossintéticos em contato com eles. Esse parâmetro é fundamental para verificar a resistência ao deslizamento em sistemas de aterros e estruturas de contenção. Com o objetivo de suprir lacunas da literatura nacional referentes a ensaios em escala ampliada, este trabalho investigou o comportamento ao atrito de interfaces formadas por blocos de EPS com densidades de 20, 25 e 30 kg/m³, conforme a ABNT NBR 11752:2018. Os blocos foram ensaiados em contato com geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) lisas e texturizadas do tipo matriz balão e com geotêxteis não tecidos de PET e PP, nas gramaturas de 300 g/m² (PET e PP), 400 g/m² (PET), 500 g/m² (PET) e 600 g/m² (PET e PP). O programa experimental consistiu em ensaios de cisalhamento direto em escala ampliada (300 × 300 mm), realizados na condição seca, com velocidade de deslocamento horizontal de 0,2 mm/min. Na primeira etapa, que abrangeu as interfaces EPS-EPS e EPS-geomembrana, as tensões normais aplicadas variaram de 11 a 55 kPa. Na segunda etapa, dedicada às interfaces EPS-geotêxtil, essas tensões variaram de 11 a 33 kPa. Os parâmetros de resistência foram obtidos pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, adotando-se envoltórias puramente friccionais. Na interface EPS-EPS, os ângulos de atrito de pico ficaram entre 28,6° e 35,8°. Nas interfaces com geomembranas, o contato com a geomembrana lisa resultou em ângulos de atrito de 14,4° a 16,0°, enquanto a textura do tipo matriz balão, ao promover o intertravamento mecânico com o EPS, elevou esses valores para 27,6° a 32,0°. Esses ganhos foram maiores quanto maiores a densidade e a rigidez dos blocos de EPS. Para os geotêxteis não tecidos, os ângulos de atrito de pico foram elevados, entre 29,2° e 39,5° (PET e PP). No entanto, a gramatura de 600 g/m² apresentou resistência ao cisalhamento inferior à das mantas de menor gramatura avaliadas. Concluiu-se que a escolha criteriosa da combinação entre a textura do geossintético e a densidade do EPS ajuda a evitar a seleção de densidades ou gramaturas superdimensionadas ou subdimensionadas, o que garante maior segurança e menor custo, quando houver evidências suficientes para respaldar a aplicação em campo.

Palavras-chave: Cisalhamento direto; Ângulo de atrito; Intertravamento mecânico.

ABSTRACT

The stability of geotechnical systems that use expanded polystyrene (EPS) blocks as lightweight fill, commonly referred to as EPS geofoam, depends on the shear strength mobilized at the interfaces between these blocks and the geosynthetics in contact with them. This parameter is essential for assessing sliding resistance in embankments and retaining structures. To address gaps in the Brazilian literature concerning tests performed at a representative scale, this study systematically investigated the frictional behavior of interfaces involving EPS blocks with densities of 20, 25, and 30 kg/m³, in accordance with ABNT NBR 11752:2018. The blocks were tested against smooth and blown-film textured high-density polyethylene (HDPE) geomembranes, as well as against polyester (PET) and polypropylene (PP) nonwoven geotextiles with masses per unit area of 300 g/m² (PET and PP), 400 g/m² (PET), 500 g/m² (PET), and 600 g/m² (PET and PP). The experimental program comprised large-scale direct shear tests (300 × 300 mm) conducted under dry conditions at a horizontal displacement rate of 0.2 mm/min, in strict accordance with ASTM D5321. In the first stage, which encompassed EPS–EPS and EPS–geomembrane interfaces, the applied normal stresses ranged from 11 to 55 kPa; in the second stage, devoted to EPS–geotextile interfaces, they ranged from 11 to 33 kPa. Shear strength parameters were determined using the Mohr–Coulomb failure criterion, assuming purely frictional failure envelopes (i.e., zero adhesion). The EPS–EPS interface exhibited peak friction angles between 28.6° and 35.8°. For the geomembrane interfaces, contact with the smooth geomembrane yielded friction angles of 14.4° to 16.0°, whereas the blown-film texture, by promoting mechanical interlocking with the EPS, increased these values to between 27.6° and 32.0°. These gains were more pronounced for denser and stiffer EPS blocks. The nonwoven geotextiles exhibited high peak friction angles, ranging from 29.2° to 39.5° (PET and PP). However, the 600 g/m² geotextiles showed lower shear strength than the lighter geotextiles evaluated. It was concluded that a judicious selection of the combination of geosynthetic surface texture and EPS density helps avoid the specification of over- or under-designed densities and masses per unit area, thereby enhancing safety while reducing costs, once a sufficiently robust body of evidence becomes available to support field application.

Keywords: Direct shear test; Friction angle; Mechanical interlocking.

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AOS	*Apparent Opening Size* (abertura aparente de filtração)
ASTM	*American Society for Testing and Materials* (atual ASTM International)
CBR	*California Bearing Ratio*; no texto, designa o ensaio de puncionamento estático tipo CBR (ABNT NBR ISO 12236)
CQA	*Construction Quality Assurance* (garantia da qualidade da construção)
CV	Coeficiente de variação
D-20, D-30	Classes de EPS *geofoam* designadas pela densidade nominal (20 e 30 kg/m³)
DEM	*Discrete Element Method* (método dos elementos discretos)
DSC	*Differential Scanning Calorimetry* (calorimetria diferencial de varredura)
E-20	EPS com densidade nominal de 20 kg/m³ (designação adotada neste estudo)
E-25	EPS com densidade nominal de 25 kg/m³ (designação adotada neste estudo)
E-30	EPS com densidade nominal de 30 kg/m³ (designação adotada neste estudo)
EN	*European Norm* (norma europeia)
EPA	*Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)
EPS	*Expanded Polystyrene* (poliestireno expandido)
EPS12 a EPS46	EPS designado pela densidade, em kg/m³ (ex.: EPS20 = 20 kg/m³); na ASTM D6817, os tipos EPS12, EPS15, EPS19, EPS22, EPS29, EPS39 e EPS46 têm número correspondente, aproximadamente, à densidade mínima
EPS 70 a EPS 200	Classes de EPS da norma europeia EN 13163, em que o número indica a tensão de compressão a 10% de deformação, em kPa
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru

FTMS	*Federal Test Method Standard* (norma federal de métodos de ensaio dos Estados Unidos)
GBR-P	Barreira geossintética polimérica (geomembrana), conforme ABNT NBR ISO 10318-1
GCL	*Geosynthetic Clay Liner* (barreira geossintética argilosa)
GF	Linha GeoFort de geotêxteis não tecidos de polipropileno da Ober (GF 16 e GF 31); o número indica a resistência à tração nominal, em kN/m
GH	Linha GeoFort de geotêxteis não tecidos de poliéster da Ober (GH 16, GH 21, GH 26 e GH 31); o número indica a resistência à tração nominal, em kN/m
GM	Geomembrana (inclui os códigos GM1, GM4 e GM5 de Atmatzidis et al., 2001)
GM LISA	Geomembrana lisa de PEAD (designação de Costa Júnior, 2020)
GM TXT-AR	Geomembrana texturizada de PEAD (designação de Costa Júnior, 2020)
GRI	*Geosynthetic Research Institute* (especificações GRI-GM13, GRI-GM14 e GRI-GM19)
HALS	*Hindered Amine Light Stabilizers* (estabilizantes de luz à base de aminas impedidas)
HDPE	*High-Density Polyethylene* (polietileno de alta densidade; equivalente a PEAD)
IS	*Indian Standard* (norma do *Bureau of Indian Standards*)
ISO	*International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)
LOI	*Limiting Oxygen Index* (índice limite de oxigênio)
LPET	*Low-melt PET* (fibra de poliéster de baixo ponto de fusão)
LVDT	*Linear Variable Differential Transformer* (transformador diferencial de variação linear)
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFI	*Melt Flow Index* (índice de fluidez)
N/A	Não se aplica

NBR	Norma Brasileira
OIT	*Oxidative Induction Time* (tempo de indução oxidativa)
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PET	Poli(tereftalato de etileno), poliéster
PP	Polipropileno
PVC	Poli(cloreto de vinila)
SEM	*Scanning Electron Microscopy* (microscopia eletrônica de varredura; equivalente a MEV)
TGA	*Thermogravimetric Analysis* (análise termogravimétrica)
TMA	*Thermomechanical Analysis* (análise termomecânica)
UnB	Universidade de Brasília
Unesp	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UR	Umidade relativa
UV	Ultravioleta

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração das principais aplicações do geoexpandido em obras de infraestrutura geotécnica 15
Figura 2 – Instalação de placas de poliestireno expandido (EPS) em sistema de isolamento e alívio de carga em construção civil 16
Figura 3 – Utilização de geoexpandido como recurso para preenchimento de aterro 18
Figura 4 – Representação do geoexpandido aplicado como elemento de sustentação em obras rodoviárias 18
Figura 5 – Proposta de revisão bibliográfica com as bases da análise bibliométrica 22
Figura 6 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por ano de publicação 23
Figura 7 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por autor 23
Figura 8 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por revistas 24
Figura 9 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por tipo 24
Figura 10 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por subárea 25
Figura 11 – Fluxograma com estrutura completa de produção das geomembranas 33
Figura 12 – Rolo de geomembrana lisa PEAD 55
Figura 13 – Geomembrana sendo moldada para encaixe no equipamento de cisalhamento direto 56
Figura 14 – Geotêxtil tipo PET de gramatura 300 g/m² 56
Figura 15 – Geotêxtil tipo PP de gramatura 300 g/m² 57
Figura 16 – Rolos de geotêxtil para realizar adaptação ao tamanho do equipamento utilizado 57
Figura 17 – Placa de identificação de lâmina de geoexpandido de densidade 20 kg/m³ (E-20) 58
Figura 18 – Lâmina de variadas densidades incluindo uma amostra E-25 (30 kg/m³) destacada 58
Figura 19 – Lâminas de variadas densidades prontas para ser ensaiadas 59
Figura 20 – Moldagem massiva de amostras, especificamente geotêxtil tipo PET 59
Figura 21 – Ferramentas utilizadas em processo de moldagem dos materiais citados 60
Figura 22 – Moldagem dos blocos de poliestireno expandido por laminação 70
Figura 23 – Moldagem do bloco, envolvendo corte nas dimensões da máquina 70
Figura 24 – Fileiras de geoexpandidos posicionados para corte eletrônico 71
Figura 25 – Fábrica Isofaber realizando procedimento de corte das amostras de geoexpandido 71
Figura 26 – Máquina de cisalhamento direto (300mm x 300mm) 73
Figura 27 – Sistema de aquisição de dados da Unesp 74
Figura 28 – Figura contendo referência de literatura nacional/internacional e este estudo 82
Figura 29 – Principais literaturas balizadoras com faixa de valor central para interface EPS-EPS e literatura que a corrobora correspondente 83

Figura 30 – Gráfico com dados da interface EPS/EPS com comparativo ESTE ESTUDO/Literatura 84
Figura 31 – Gráfico comparativo ângulo de atrito de pico x pós pico 97
Figura 32 – Comparativo da interface analisada x ângulo de atrito obtido – expresso em percentual do termo de referência (maior) 98
Figura 33 – Comparativo da interface analisada x ângulo de atrito obtido – com filtragem de subgrupos (E-20, E-25 e E-30) expresso em percentual do termo de referência (maior) 100
Figura 34 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x E-20 122
Figura 35 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x E- 25 122
Figura 36 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x E-30 123
Figura 37 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x E-25 123
Figura 38 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x E-30 124
Figura 39 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal - E-25 x E-30 124
Figura 40 – Envoltória Geoexpandido E-20 X E-20 125
Figura 41 – Envoltória Geoexpandido E-25 X E-25 125
Figura 42 – Envoltória Geoexpandido E-30 x E-30 126
Figura 43 – Envoltória Geoexpandido E-20 X E-25 126
Figura 44 – Envoltória Geoexpandido E-20 X E-30 127
Figura 45 – Envoltória Geoexpandido E-25 x E-30 127
Figura 46 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geomembrana lisa PEAD 128
Figura 47 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geomembrana lisa PEAD 128
Figura 48 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geomembrana lisa PEAD 129
Figura 49 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geomembrana texturizada tipo matriz balão 129
Figura 50 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geomembrana texturizada tipo matriz balão 130
Figura 51 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geomembrana texturizada tipo matriz balão 130
Figura 52 – Envoltórias E-20 x Geomembrana Lisa PEAD 131
Figura 53 – Envoltória E-25 x Geomembrana lisa PEAD 131
Figura 54 – Envoltória E-30 x Geomembrana lisa PEAD 132
Figura 55 – Envoltória E-20 x Geomembrana texturizada do tipo matriz balão 132
Figura 56 – Envoltória E-25 x Geomembrana texturizada do tipo matriz balão 133
Figura 57 – Envoltória E-30 x Geomembrana texturizada do tipo matriz balão 133

Figura 58 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PET 300 g/m² 134
Figura 59 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PET 300 g/m² 134
Figura 60 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PET 300 g/m² 135
Figura 61 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PET 400 g/m² 135
Figura 62 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PET 400 g/m² 136
Figura 63 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PET 400 g/m² 136
Figura 64 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PET 500 g/m² 137
Figura 65 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PET 500 g/m² 137
Figura 66 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PET 500 g/m² 138
Figura 67 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PET 600 g/m² 138
Figura 68 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PET 600 g/m² 139
Figura 69 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PET 600 g/m² 139
Figura 70 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PP 300 g/m² 140
Figura 71 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PP 300 g/m² 140
Figura 72 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PP 300 g/m² 141
Figura 73 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PP 600 g/m² 141
Figura 74 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PP 600 g/m² 142
Figura 75 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PP 600 g/m² 142
Figura 76 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PET 300 g/m² 143
Figura 77 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PET 300 g/m² 143
Figura 78 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PET 300 g/m² 144
Figura 79 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PET 400 g/m² 144
Figura 80 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PET 400 g/m² 145

Figura 81 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PET 400 g/m² 145
Figura 82 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PET 500 g/m² 146
Figura 83 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PET 500 g/m² 146
Figura 84 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PET 500 g/m² 147
Figura 85 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PET 600 g/m² 147
Figura 86 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PET 600 g/m² 148
Figura 87 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PET 600 g/m² 148
Figura 88 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PP 300 g/m² 149
Figura 89 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PP 300 g/m² 149
Figura 90 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PP 300 g/m² 150
Figura 91 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PP 600 g/m² 150
Figura 92 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PP 600 g/m² 151
Figura 93 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PP 600 g/m² 151
Figura 94 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x E20 152
Figura 95 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x E25 152
Figura 96 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x E30 153
Figura 97 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x E25 153
Figura 98 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x E30 154
Figura 99 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x E30 154
Figura 100 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geomembrana Lisa 155
Figura 101 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geomembrana Lisa 155
Figura 102 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geomembrana Lisa 156
Figura 103 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geomembrana Texturizada 156
Figura 104 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geomembrana Texturizada 157
Figura 105 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geomembrana Texturizada 157
Figura 106 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PET – 300 g/m² 158
Figura 107 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PET – 300 g/m² 158
Figura 108 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PET – 300 g/m² 159
Figura 109 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PET – 400 g/m² 159
Figura 110 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PET – 400 g/m² 160
Figura 111 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PET – 400 g/m² 160
Figura 112 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PET – 500 g/m² 161
Figura 113 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PET – 500 g/m² 161
Figura 114 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PET – 500 g/m² 162
Figura 115 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PET – 600 g/m² 162

Figura 116 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PET – 600 g/m²..... 163
Figura 117 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PET – 600 g/m²..... 163
Figura 118 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PP – 300 g/m² 164
Figura 119 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PP – 300 g/m² 164
Figura 120 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PP – 300 g/m² 165
Figura 121 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PP – 600 g/m² 165
Figura 122 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PP – 600 g/m² 166
Figura 123 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PP – 600 g/m² 166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros físico-mecânicos elementares médios compilados da literatura para blocos de EPS Geofoam em função da densidade aparente 27

Tabela 2 – Principais polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos 31

Tabela 3 – Ensaios de identificação e desempenho e respectiva norma de ensaio 34

Tabela 4 – Diferenças estruturais entre os polímeros PET e PP 40

Tabela 5 – Efeitos das propriedades do geotêxtil na interface geossintética..... 42

Tabela 6 – Parâmetros Operacionais Típicos (Cisalhamento EPS-Geossintético)..... 45

Tabela 7 – Valores e literaturas que corroboram os parâmetros do EPS 63

Tabela 8 – Valores médios (possíveis de adoção) baseados na literatura para caracterização do EPS 64

Tabela 9 – Síntese dos dados médios obtidos por Costa Júnior (2020) após caracterização de diversas amostras..... 65

Tabela 10 – Tabela com características físicas, mecânicas, hidráulicas, de durabilidade e de bobinas: propriedades declaradas pela OBER associadas à normativa vigente para GH 16 (300 g/m²), GH 21 (400 g/m²), GH 26 (500 g/m²) e GF 31 (600 g/m²)..... 66

Tabela 11 – Tabela com características físicas, mecânicas, hidráulicas, de durabilidade e de bobinas: propriedades declaradas pela OBER associadas à normativa vigente para GF 16 (300 g/m²) e GF 31 (600 g/m²) 67

Tabela 12 – Resumo interfaces EPS – EPS / EPS - Geomembrana..... 78

Tabela 13 – Valores obtidos e utilizados na curva de evolução para interfaces EPS – PET e EPS - PP 81

Tabela 14 – Resultados da literatura x este estudo..... 86

Tabela 15 – Tabela comparativa entre geomembranas texturizadas de diferentes tipos (Literatura x este estudo)..... 87

Tabela 16 – Comparativo interface EPS/PET – VIANA (2024) x ESTE ESTUDO 91

Tabela 17 – Comparação de resultados obtidos na interface EPS - PP..... 93

Tabela 18 – Tabela Comparativa Pico x Pós-pico..... 96

Tabela 19 – Determinação de aspereza conforme ASTM D 5994 (2015a)..... 119

Tabela 20 – Determinação de aspereza conforme ASTM D 7466 (2015c)..... 119

Tabela 21 – Determinação dos parâmetros de resistência à tração da Geomembrana Lisa conforme ASTM D 6693 (2015b) 120

Tabela 22 – Determinação dos parâmetros de resistência à tração da Geomembrana Texturizada conforme ASTM D 6693 (2015b) 120

Tabela 23 – Determinação dos parâmetros de resistência à perfuração da geomembrana lisa (GM LISA) e geomembrana texturizada (GM TXT-AR) conforme ASTM D4833 (2013b) 120

Tabela 24 – Determinação dos parâmetros de resistência ao rasgo da geomembrana lisa (GM LISA) e geomembrana texturizada (GM TXT-AR) conforme ASTM D1004 (2013a) 121

SUMÁRIO

RESUMO 1
LISTA DE FIGURAS 6
LISTA DE TABELAS 11
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA 15
2 OBJETIVOS 21
2.1 Objetivo Geral 21
2.2 Objetivos Específicos 21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
3.1 Metodologia da revisão 22
3.2 Poliestireno Expandido (EPS) como material geotécnico 26
3.2.1 Composição, propriedades físico-mecânicas e densidades comerciais 26
3.2.2 Aplicações em obras geotécnicas (geofoam) 27
3.2.3 Influência da densidade nas propriedades de interface 29
3.3 Geossintéticos: composição 30
3.3.1 Classificação e composição polimérica 30
3.3.2 Geomembranas de PEAD 32
3.3.2.1 Características e normativas 32
3.3.2.2 Geomembranas lisas vs. texturizadas: mecanismos de rugosidade 35
3.3.3 Geotêxteis não tecidos 36
3.3.3.1 Geotêxteis de PET: propriedades e aplicações 36
3.3.3.2 Geotêxteis de PP: propriedades e aplicações 37
3.3.3.3 Efeito da gramatura no comportamento friccional 40
3.4 Resistência de interface em sistemas EPS-Geossintéticos 42
3.4.1 Mecanismos de atrito interfacial: critério de Mohr-Coulomb 42
3.4.2 Ensaio de cisalhamento direto: fundamentos e parâmetros 43
3.4.3 Efeito de escala e representatividade do equipamento (300 × 300 mm vs. 100 × 100 mm) 47
3.4.4 Avaliação dos parâmetros de interfaces EPS-EPS e EPS-Geomembranas 48
3.4.5 Avaliação dos parâmetros de interfaces EPS-Geotêxteis 51
3.4.6 Avaliação comparativa pico x pós pico 53
4 MATERIAIS E MÉTODOS 55
4.1 Ensaios laboratoriais 55
4.1.1 Materiais Empregados 55
4.1.2 Caracterização dos materiais 60

4.1.2.1 *Poliestireno expandido - EPS* 60
4.1.2.2 *Geomembranas Lisas e Texturizadas* 65
4.1.2.3 *Geotêxteis PET* 66
4.1.2.4 *Geotêxteis PP* 67
4.2 **Metodologia de ensaio** 68
4.2.1 ***Estrutura do ensaio*** 68
4.2.2 ***Cronograma dos ensaios*** 68
4.2.3 ***Procedimentos experimentais*** 69
4.2.4 ***Aquisição e Tratamento de Dados*** 72
4.3 **Dificuldades encontradas** 74
4.3.1 ***Logística e Parcerias Interinstitucionais*** 74
4.3.2 ***Fornecimento de Materiais e Preparação das Amostras*** 75
4.3.3 ***Processamento e Tratamento de Dados*** 75
4.3.4 ***Suporte Institucional e Material*** 75
5 **RESULTADOS E DISCUSSÃO** 76
5.1 **Resultados** 76
5.1.1 ***Primeira etapa (Interface EPS – EPS e EPS – Geomembranas)*** 76
5.1.2 ***Segunda etapa (Interface EPS-Geotêxtil PET e PP)*** 79
5.2 **Comparação e discussão dos resultados** 81
5.2.1 ***Interface EPS-EPS*** 81
5.2.2 ***Interface EPS – GEOMEMBRANA*** 85
5.2.3 ***Interface EPS – Geotêxtil PET e PP*** 89
5.2.4 ***Análise das interfaces pico x pós pico*** 94
5.3 **Avaliação comparativa entre as interfaces estudadas** 97
6 **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES** 101
6.1 **Conclusão** 101
6.2 **Recomendações futuras** 102
7 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** 104
APÊNDICE A – TABELAS DE CARACTERIZAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS LISAS E GEOMEMBRANAS TEXTURIZADAS 119
APÊNDICE B – GRÁFICOS DE TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTO HORIZONTAL PARA INTERFACE EPS-EPS 122
APÊNDICE C – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PICO (τPICO) PARA INTERFACE EPS-EPS 125
APÊNDICE D – GRÁFICOS DE TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTO HORIZONTAL PARA INTERFACE EPS-GEOMEMBRANA LISA E GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 128

APÊNDICE E – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PICO (τPICO) PARA INTERFACE EPS-GEOMEMBRANA LISA E GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 131

APÊNDICE F – GRÁFICOS DE TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTO HORIZONTAL PARA INTERFACE EPS-GEOTÊXTIL PET E EPS-GEOTÊXTIL PP 134

APÊNDICE G – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PICO (τPICO) PARA INTERFACE EPS-GEOTÊXTIL PET E INTERFACE EPS-GEOTÊXTIL PP 143

APÊNDICE H – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PÓS - PICO (τ PÓS-PICO) PARA INTERFACE EPS-EPS . 152

APÊNDICE I – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PÓS - PICO (τ PÓS-PICO) PARA INTERFACE EPS-GEOMEMBRANA LISA E EPS-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 155

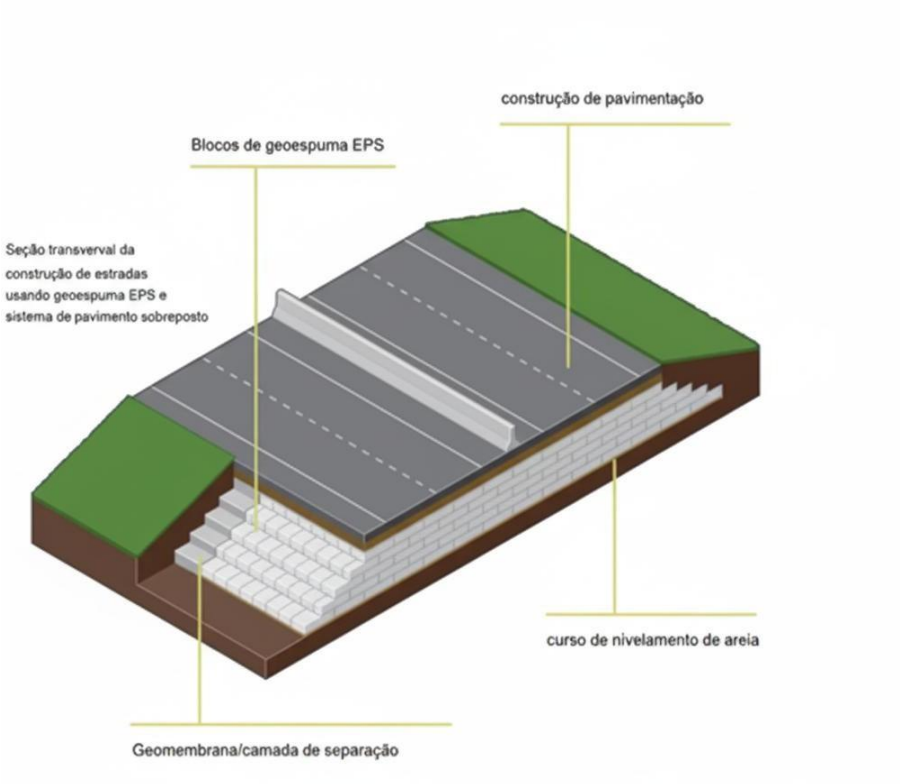
APÊNDICE J – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PÓS - PICO (τ PÓS-PICO) PARA INTERFACE EPS-GEOTÊXTIL PET E EPS-GEOTÊXTIL PP 158

NOTAS 167

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A engenharia geotécnica contemporânea busca continuamente por materiais inovadores que permitam a execução de obras mais seguras, econômicas e eficientes, especialmente em cenários desafiadores, como os que envolvem solos de baixa capacidade de suporte. Nesse contexto, o Poliestireno Expandido (EPS), conhecido no meio técnico como geoexpandido ou *geofoam*[1], consolidou-se como uma solução de engenharia de notável versatilidade, cujas principais aplicações em obras de infraestrutura estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Ilustração das principais aplicações do geoexpandido em obras de infraestrutura geotécnica.



Fonte: Autor (2026) adaptado de Revista FT (2018), "Poliestireno Expandido na Estabilização de Solos Moles: Sua aplicação para construções de rodovias".

Introduzido comercialmente na década de 1950 e empregado na engenharia civil a partir dos anos 1970 em países como Japão e Noruega, o poliestireno expandido tem sido amplamente utilizado em aterros compensados, muros de solo reforçado e no alívio de cargas

[1] O termo *geofoam*, de origem inglesa, corresponde à designação mais comum para o geoexpandido em publicações técnicas internacionais.

sobre fundações. Suas características físico-químicas, como leveza, isolamento térmico e acústico, facilidade de moldagem e baixo custo, tornam-no ideal para diversas aplicações, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Instalação de placas de poliestireno expandido (EPS) em sistema de isolamento e alívio de carga em construção civil.



Fonte: Autor (2026).

O poliestireno expandido é um material polimérico celular rígido, que se caracteriza por seu peso específico extremamente baixo (que pode ser até 100 vezes menor que o do solo), aliado a uma elevada resistência à compressão.

A resistência da interface está diretamente relacionada à densidade do EPS, pois esta variável influencia a porosidade, a rugosidade superficial, a distribuição de tensões e o comportamento sob deslocamento. EPS de maior densidade tende a apresentar maior resistência à compressão e menor deformabilidade, favorecendo a adesão mecânica e a transferência de esforços na interface com geossintéticos. Em contrapartida, densidades elevadas podem reduzir a absorção de adesivos, comprometendo a ancoragem superficial em determinadas aplicações.

Segundo a ABNT NBR 11752:2018[v], as densidades comerciais do EPS variam de 10 kg/m³ a 40 kg/m³, sendo as mais baixas empregadas em isolamento térmico e as mais elevadas em situações que requerem maior resistência mecânica. Estudos focados na aderência entre EPS e concreto, especialmente em painéis do tipo sanduíche e pré-moldados, reforçam a importância de se considerar essas variações de densidade.

A principal vantagem do uso do geoexpandido reside em sua capacidade de reduzir significativamente os carregamentos verticais e os impulsos horizontais sobre estruturas e o subleito. Essa característica torna-o ideal para uma vasta gama de aplicações em obras civis e geotécnicas. As principais utilizações incluem:

Aterros Estruturais para Encontros de Pontes e Viadutos: Em vez de executar complexas e pesadas estruturas de transição, blocos de geoexpandido são empilhados para formar o corpo do aterro de aproximação. Sua leveza evita a sobrecarga em solos compressíveis, enquanto sua rigidez é suficiente para suportar a laje de aproximação e as cargas de tráfego, eliminando os clássicos "solavancos" causados por recalques diferenciais (Stark et al., 2004; Koerner[vi], 2012).

Estabilização e Reparo de Taludes: Utilizado para substituir a massa de solo instável, o geoexpandido aumenta o fator de segurança contra escorregamentos sem alterar a geometria original da encosta (Paine & Hannon, 2004).

Sistemas de Alívio de Carga sobre Estruturas Enterradas: Empregado sobre tubulações, galerias ou túneis, o EPS alivia a carga do solo sobrejacente, prevenindo danos estruturais e recalques excessivos.

Amortecedor Sísmico: Devido à sua compressibilidade, blocos de geoexpandido podem ser instalados ao redor de fundações ou atrás de estruturas de contenção em zonas sísmicas para atuar como um "amortecedor", absorvendo e dissipando a energia das ondas sísmicas e reduzindo as pressões sobre a estrutura.

Inclusão Compressível: Posicionado junto a estruturas rígidas, o geoexpandido funciona como uma inclusão compressível que absorve a expansão de solos expansivos ou a deformação lateral de maciços, protegendo a estrutura contra pressões indesejadas.

Redução do Congelamento e Descongelamento do Solo (*Frost Heave*): Em climas frios, camadas de geoexpandido sob pavimentos e fundações atuam como isolante térmico, impedindo que a frente de congelamento atinja o solo saturado e cause danos por expansão.

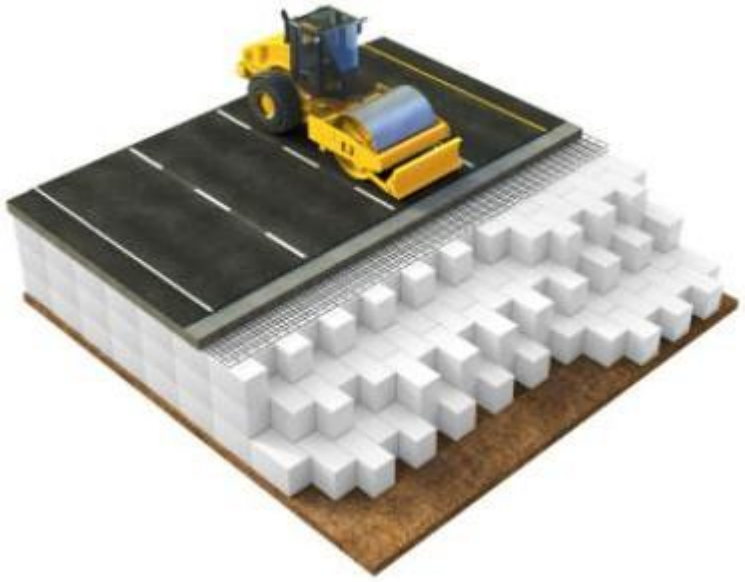
As Figuras 3 e 4 ilustram exemplos compatíveis com as aplicações citadas.

Figura 3 – Utilização de geoexpandido como recurso para preenchimento de aterro.



Fonte: Adaptado de AECweb (2021), "EPS geotécnico é recurso em obras de taludes e aterros".

Figura 4 – Representação do geoexpandido aplicado como elemento de sustentação em obras rodoviárias.



Fonte: Adaptado de Kingspan Isoeste (2026).

A eficácia e a durabilidade dessas aplicações, no entanto, dependem da interação sinérgica entre o geoexpandido e outros materiais geossintéticos, como geomembranas e geotêxteis. Portanto, entender essa interação é essencial para o sucesso de projetos de infraestrutura, pois a interface entre os materiais determina o desempenho estrutural e funcional de todo o sistema. Pesquisas recentes evidenciam que a resistência de interface pode variar significativamente conforme o tipo de geossintético, a preparação da superfície e as condições de confinamento (SHUKLA, 2017).[vii]

A combinação desses materiais em sistemas compostos é fundamental para proteger os blocos de EPS e garantir o desempenho do conjunto. As **geomembranas**, lâminas poliméricas impermeáveis, são aplicadas sobre a superfície do geoexpandido para protegê-lo contra a infiltração de água e, crucialmente, contra o ataque de produtos químicos, como

hidrocarbonetos, que podem degradar o poliestireno (Horvath, 1997[viii]; Palmeira, 2009[ix]). Por sua vez, os **geotêxteis**, mantas permeáveis com funções de separação, filtração e proteção, são frequentemente empregados em contato direto com os blocos de EPS. Eles atuam como camada de separação, prevenindo a contaminação do material, e como proteção mecânica contra danos durante a instalação (Koerner, 2012[x]).

Devido a essa configuração, a interface entre o EPS e os geossintéticos torna-se um plano de potencial deslizamento, cuja resistência ao cisalhamento governa a estabilidade interna do sistema.

A análise da resistência de interface é crucial, pois falhas podem comprometer a segurança e a viabilidade dos projetos (COSTA JUNIOR, 2020[xi]). Um exemplo emblemático é o rompimento do aterro de Kettleman Hills em 1988, ocorrido devido à baixa resistência de interface entre a geomembrana e o material sobrejacente. O aterro, com 27 metros de altura, sofreu deslocamentos laterais de aproximadamente 11 metros e recalques verticais de 4,3 metros, evidenciando o potencial catastrófico de uma falha de interface.

Nesse contexto, o ensaio de cisalhamento direto consolidou-se como a metodologia mais eficaz para simular o comportamento dessa interação sob condições controladas (PUPPALA et al., 2019[xii]). Estudos como o de Koerner [xiii](2012) confirmaram que o método fornece dados experimentais confiáveis para o dimensionamento seguro de projetos de engenharia.

Apesar da vasta literatura sobre o tema (McCartney, Zornberg & Swan, 2009[xiv]; Bacas, Cañizal & Konietzky, 2015[xv]; Borsatto, 2020; entre outros), uma limitação comum na maioria dos trabalhos é o uso de equipamentos de pequena escala (10 × 10 cm). Embora essa prática seja justificada pela maior disponibilidade de laboratórios (Koerner, 2012[xvi]), a norma ASTM D5321[xvii] recomenda que o ensaio seja realizado em caixas de maior dimensão (mínimo de 30 × 30 cm) para garantir que os resultados sejam representativos das condições de campo.

No Brasil, a carência de estudos que utilizam equipamentos de grande porte (30 × 30 cm) é ainda mais acentuada. Dessa forma, esta pesquisa se justificou ao buscar preencher essa lacuna, ampliando a base de dados nacional com resultados obtidos em escala apropriada e permitindo uma comparação mais robusta com a literatura técnica. A compreensão dos mecanismos de interação, especialmente no que tange à influência da densidade do EPS, ainda é incipiente e demanda uma avaliação sistemática.

A relevância deste estudo reside, portanto, não somente no avanço científico sobre materiais difundidos, mas também na promoção de sistemas construtivos mais leves,

eficientes e sustentáveis. Buscou-se oferecer subsídios práticos para que engenheiros e pesquisadores desenvolvessem novas soluções com maior segurança.

Diante do exposto, o estudo aprofundado da resistência da interface entre o geoexpandido e geossintéticos é de fundamental importância. A correta quantificação dos parâmetros de atrito é indispensável para o dimensionamento seguro de estruturas. Esta dissertação se propôs a analisar experimentalmente o comportamento mecânico da interface entre blocos de EPS de diferentes densidades e geossintéticos de uso corrente na engenharia, a fim de fornecer parâmetros confiáveis para análises de estabilidade e contribuir para o avanço de diretrizes de projeto mais seguras e otimizadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico em interfaces compostas por blocos de poliestireno expandido (EPS), nas densidades de 20, 25 e 30 kg/m³, em contato homólogo e com geossintéticos poliméricos (geomembranas de PEAD e geotêxteis não tecidos de PET e PP), mediante a execução de ensaios de cisalhamento direto em escala ampliada (300 × 300 mm, sob velocidade de deslocamento horizontal de 0,2 mm/min) e a adoção de envoltórias de ruptura puramente friccionais, com a finalidade de subsidiar a literatura nacional e internacional.

2.2 Objetivos Específicos

- Quantificar a influência da densidade do geoexpandido no ângulo de atrito de pico, por meio da avaliação da resistência ao cisalhamento na interface EPS-EPS.
- Quantificar o ganho de atrito causado pelo intertravamento mecânico da superfície, com base na comparação das envoltórias de ruptura das interfaces de EPS com geomembrana de PEAD lisa e com geomembrana texturizada do tipo matriz balão.
- Definir os limites de resistência por atrito nas interfaces formadas por EPS e geotêxteis não tecidos (PET e PP), na faixa de tensão normal aplicada de 11 a 33 kPa.
- Avaliar o mecanismo de perda de resistência ao cisalhamento induzido pelo aumento da gramatura (300 a 600 g/m²).
- Comparar os parâmetros de resistência obtidos na caixa de 300 × 300 mm com os registrados na literatura em equipamentos convencionais de menor porte (100 × 100 mm), evidenciando a redução dos efeitos de escala e de borda típicos dos equipamentos menores.

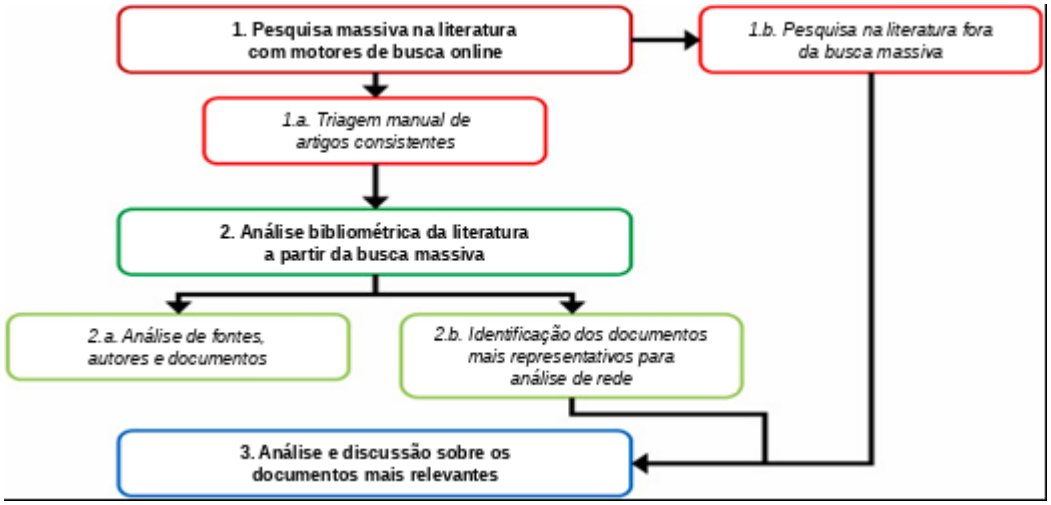
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Metodologia da revisão

A metodologia desta pesquisa teve como etapa inicial uma criteriosa revisão bibliográfica para estruturar os tópicos gerais e específicos do estudo. A construção da análise bibliométrica foi realizada na plataforma Scopus, escolhida por sua abrangência e rigor acadêmico. Inicialmente, realizou-se um levantamento amplo de informações sobre o tema, seguido por um processo sistemático de filtragem com critérios de inclusão e exclusão bem definidos. Essa abordagem permitiu selecionar as referências mais pertinentes para a contextualização e o aprofundamento de cada tópico.

A estratégia de pesquisa foi alinhada com a proposta de Paliotto et al. (2024)[xviii] em "Systematic review, evaluation and comparison of different approaches for the implementation of road network safety analysis". O método adotado combinou uma busca ampla de dados com a incorporação manual de documentos científicos relevantes que, eventualmente, não tivessem sido capturados pela pesquisa inicial devido a fatores como a amplitude dos filtros aplicados, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Proposta de revisão bibliográfica com as bases da análise bibliométrica.

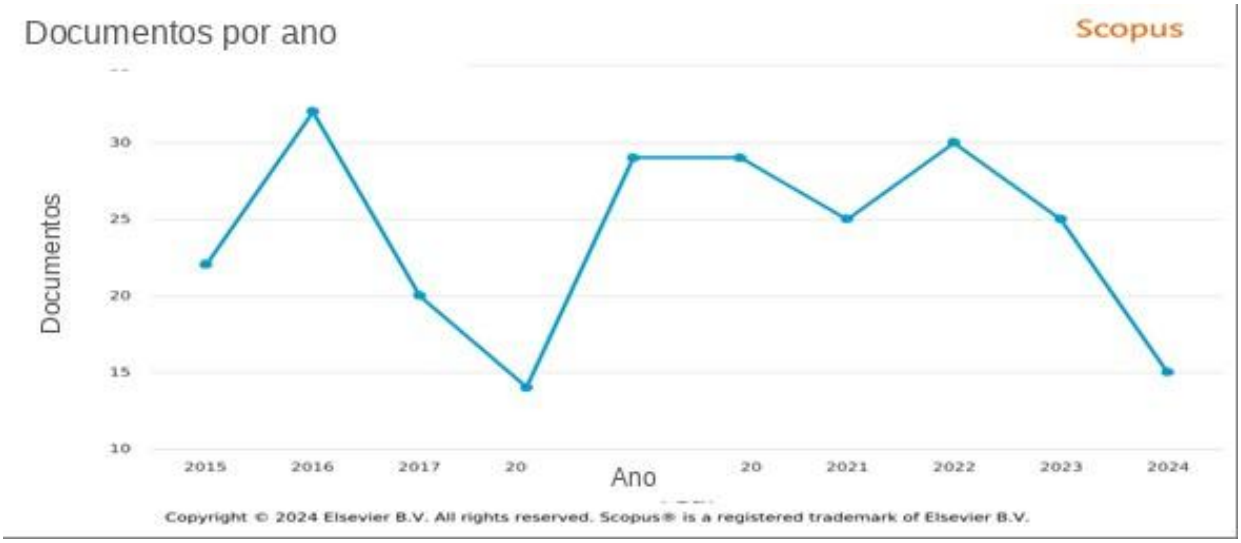


Fonte: Autor (2026) adaptado de (PALIOTTO et al., 2024[xix]).

As etapas da pesquisa foram definidas da seguinte forma: (1) definição dos anos de publicação do parâmetro de busca (limites inferior e superior), sendo a pesquisa ampla realizada no período de 2015 a 2024; (2) definição das palavras contidas no título, no caso [Geosynthetics]; (3) definição do idioma de busca, sendo escolhida a língua inglesa, por oferecer o melhor retorno de busca; (4) definição do tipo de documento, sendo incluídos artigos, capítulos de livro, artigos de revisão e artigos de conferência. Os filtros predefinidos

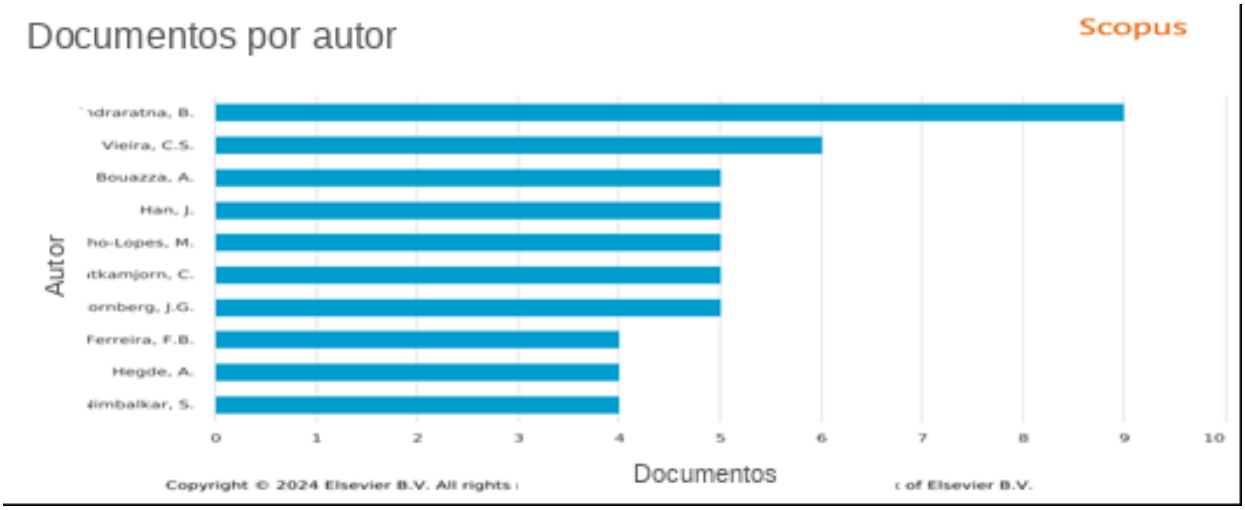
na pesquisa ampla geraram 241 documentos ao todo, que foram categorizados conforme as Figuras 6, 7, 8, 9 e 10.

Figura 6 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por ano de publicação.



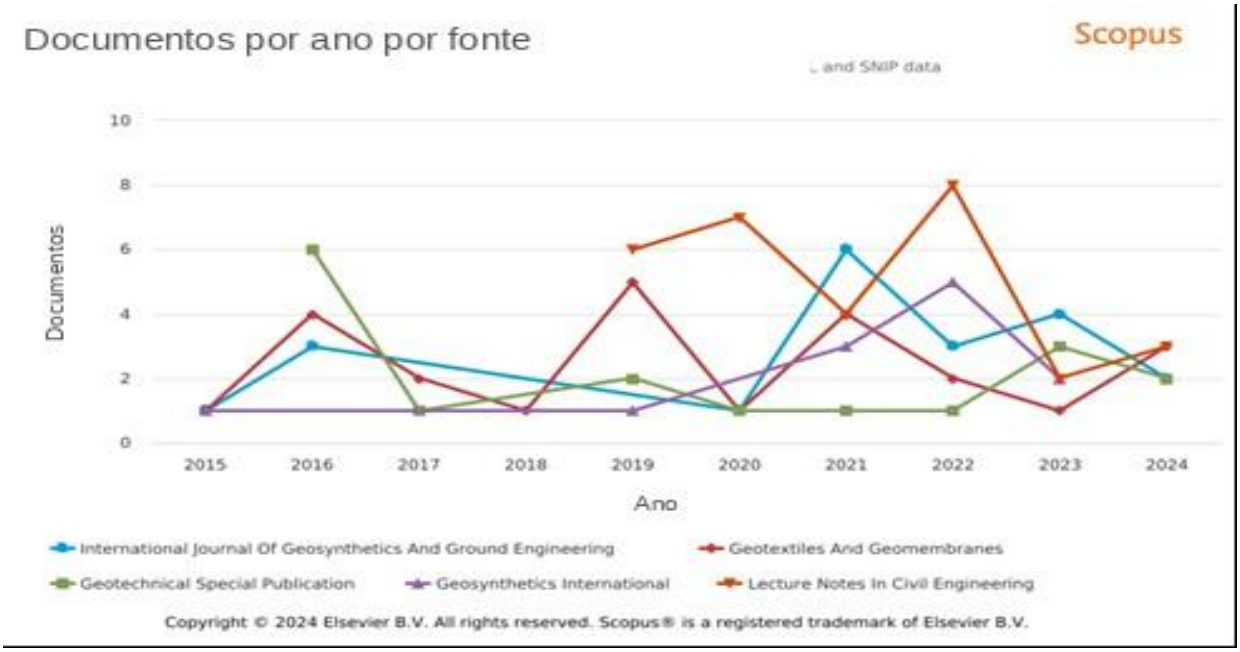
Fonte: Autor (2026) adaptado de Scopus.

Figura 7 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por autor.



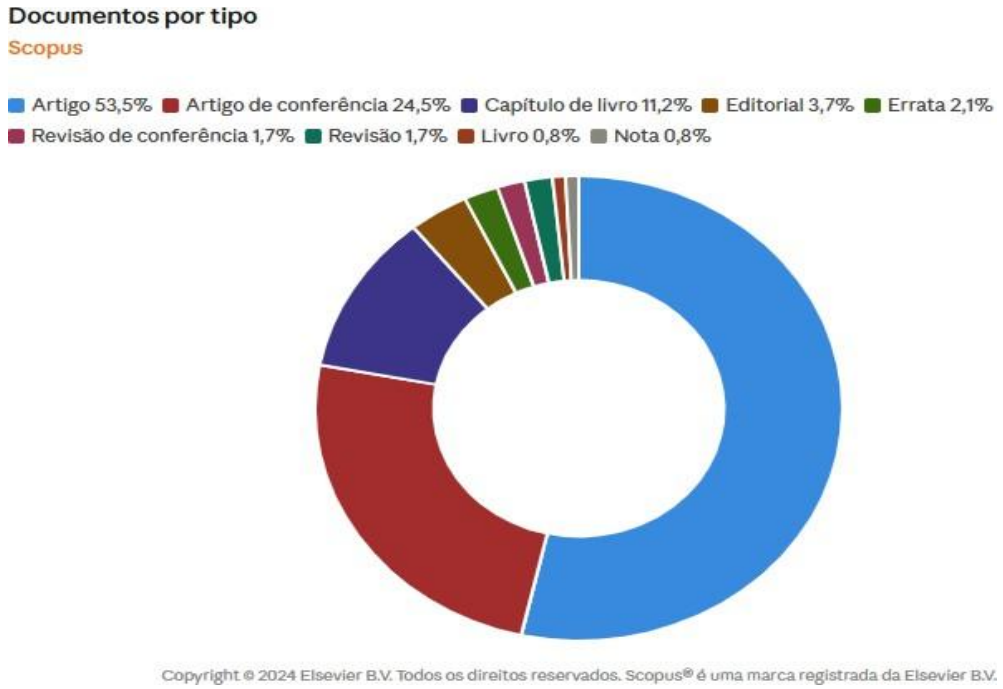
Fonte: Autor (2026) adaptado de Scopus.

Figura 8 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por revistas.



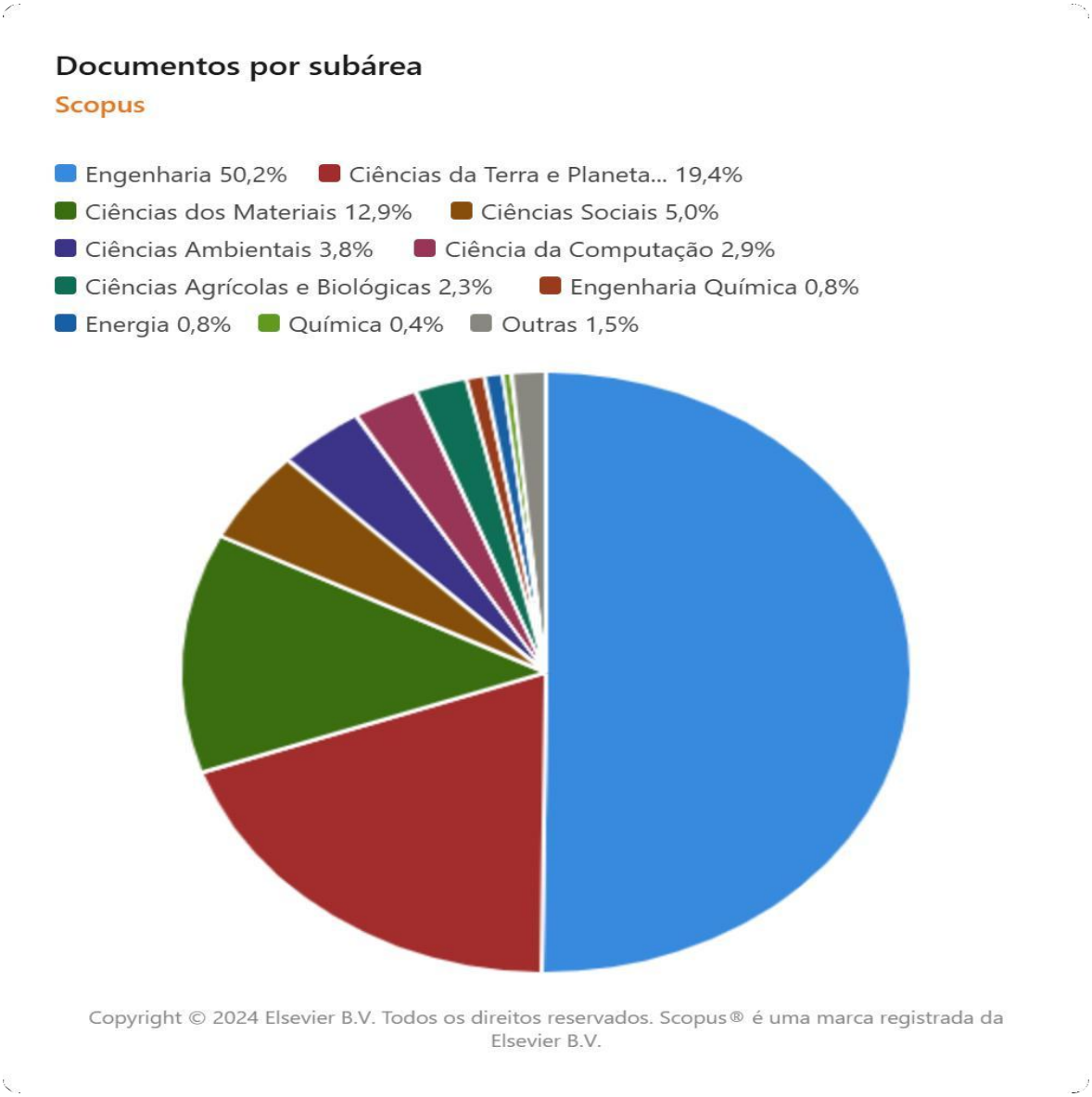
Fonte: Autor (2026) adaptado de Scopus.

Figura 9 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por tipo.



Fonte: Autor (2026) adaptado de Scopus.

Figura 10 – Documentos encontrados na ampla pesquisa categorizados por subárea



Fonte: Autor (2026) adaptado de Scopus.

Para filtrar melhor os arquivos a serem utilizados, foram definidos os passos 5 e 6: (5) definição das palavras-chave, sendo escolhidas [Interface Friction Angle, Interface Behavior, Interfaces (materials), Interface, Interface Shear Strength]; (6) definição da subárea da pesquisa, mantida como Engenharias. O resultado foi um conjunto de 17 documentos científicos, considerados os de maior relevância para analisar o comportamento da interface de geossintéticos. Com base nesses dados e considerando a inclusão de dissertações, livros e relatórios científicos, foi possível delimitar o contexto da pesquisa.

3.2 Poliestireno Expandido (EPS) como material geotécnico

3.2.1 Composição, propriedades físico-mecânicas e densidades comerciais

O poliestireno expandido (EPS), frequentemente designado na literatura internacional como geofoam, é um material geossintético classificado como plástico celular rígido. Sua matriz decorre da polimerização do monômero de estireno, seguida da impregnação com um agente expansor volátil hidrocarbonado, tipicamente pentano. Sob ação de vapor d'água e temperatura controlada, as microesferas de poliestireno sofrem grande expansão volumétrica e se fundem em moldes para formar blocos maciços (Tafreshi et al., 2020[xx]; Horvath, 1994[xxi]). O produto final apresenta macroestrutura de células fechadas, composta por aproximadamente 98% de ar aprisionado e 2% de matriz polimérica, o que explica o peso específico ultraleve do EPS (cerca de 1% a 2% do peso específico de solos ou concreto) e sua boa estabilidade volumétrica (Tafreshi et al., 2020[xxii]; Horvath, 1994[xxiii]). Estudos mostraram que a homogeneidade microestrutural (tamanho de célula, fração de vazios, densidade aparente) e a qualidade da fusão intercelular controlam diretamente a integridade do bloco sob esforços compressivos (Sreekantan[xxiv] et al., 2024).

A utilização do EPS como material geotécnico exige padronização por densidade aparente. No contexto internacional, a norma ASTM D6817[xxv] estabelece classes (EPS15, EPS22, EPS29, EPS39 etc.) definidas por densidade mínima e resistências a 1%, 5% e 10% de deformação, usadas como base de projeto (Horvath[xxvi], 1994). Na prática de engenharia, faixas de densidade entre cerca de 10 e 40 kg/m³ são típicas, com o EPS utilizado em aplicações geotécnicas usualmente entre 12 e 35 kg/m³ (Tafreshi[xxvii] et al., 2020; Beju & Mandal, 2017[xxviii]). O comportamento geomecânico do EPS é governado pela sua resposta tensão-deformação em compressão uniaxial, que apresenta três estágios: (i) região aproximadamente elástica linear até cerca de 1% a 2% de deformação axial, com deformação reversível das paredes celulares; (ii) platô elasto-plástico entre cerca de 2% e 5%, associado ao esmagamento/flambagem progressiva das células; e (iii) fase de encruamento (strain-hardening) além de cerca de 5% a 10%, ligada ao colapso e densificação da estrutura celular (Beju & Mandal, 2017[xxix]; Chun et al., 2004[xxx]; Ghazavi et al., 2025[xxxi]). Em consonância com a ASTM D6817[xxxii], a resistência à compressão é usualmente especificada em 1%, 5% e 10% de deformação, sendo a tensão a 1% adotada como limite de serviço para evitar deformações permanentes de longo prazo; o módulo de elasticidade inicial é obtido na parte quase linear da curva (Horvath, 1994[xxxiii]; Beju & Mandal, 2017[xxxiv]; Akis et al., 2022[xxxv]; Ghazavi et al., 2025[xxxvi]). Além da compressão, o EPS geofoam apresenta resistência à flexão relevante e

baixa absorção de água, característica da estrutura de células fechadas; ensaios mostraram absorção volumétrica muito pequena e redução modesta das propriedades mecânicas mesmo em condição saturada (Beju & Mandal, 2017[xxxvii]).

Há correlação direta entre densidade aparente e propriedades mecânicas: aumento da densidade implica espessamento das paredes celulares e elevação do módulo e da resistência à compressão e cisalhamento (Beju & Mandal, 2017[xxxviii]; Chun et al., 2004[xxxix]; Meguid & Khan, 2019[xl]; Khalaj et al., 2020[xli]). Essa interdependência permite modelar módulo inicial e tensões a 1%, 5% e 10% como funções da densidade. Modelos de regressão e redes neurais treinados com centenas de ensaios de compressão mostraram que a densidade é a variável dominante para prever módulo e resistências com alto coeficiente de correlação ($R^2 > 0,90$) (Akis et al., 2022[xlii]; Khalaj et al., 2020[xliii]).

Para fins de adoção de parâmetros de referência, a **Tabela 1** consolida os valores médios representativos da literatura e das normativas para as principais densidades.

Tabela 1 – Parâmetros físico-mecânicos elementares médios compilados da literatura para blocos de EPS Geofoam em função da densidade aparente.

Tipo (ASTM D6817[xliv])	Densidade mínima (kg/m³)	Resistência à Compressão a 1% (kPa)	Resistência à Compressão a 5% (kPa)	Resistência à Compressão a 10% (kPa)	Módulo de Elasticidade Inicial, Ei (MPa)	Resistência à Flexão (kPa)	Absorção de Água máx. (% por volume)
EPS12	11,2	15	35	40	1,5	69	4,0
EPS15	14,4	25	55	70	2,5	172	4,0
EPS19	18,4	40	90	110	4,0	207	3,0
EPS22	21,6	50	115	135	5,0	276	3,0
EPS29	28,8	75	170	200	7,5	345	2,0
EPS39	38,4	103	241	276	10,3	414	2,0
EPS46	45,7	128	300	345	12,8	517	2,0

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ASTM D6817 (2013)[xlv], ABNT NBR 17148 (2023)[xlvi] e ABNT NBR 11752 (2016)[xlvii].

3.2.2 Aplicações em obras geotécnicas (geofoam)

A transição do poliestireno expandido (EPS) de um mero isolante térmico para um geossintético de alto desempenho mecânico (geofoam) ampliou de forma significativa o repertório de soluções da engenharia geotécnica moderna. Diretrizes como a ASTM D6817[xlviii], associadas a guias de projeto contemporâneos, orientam aplicações em que o EPS geofoam substitui o peso litostático do solo, produzindo grandes alívios de tensão e possibilitando controle de recalques e de ações dinâmicas em estruturas geotécnicas complexas (Horvath, 1994[xlix]; Khan & Meguid, 2021[l]). A literatura recente consolida o emprego do geofoam em funções como aterros leves, inclusões compressíveis, proteção a

túneis e tubulações, estabilização de taludes e mitigação de danos por congelamento (Horvath, 1994[li]; Khan & Meguid, 2021[lii]).

(i) Aterros leves e aproximação de pontes. Em estudos de caso ao longo da rodovia US 67, no Texas, a substituição do aterro convencional por blocos de EPS geofoam sobre argilas compressíveis reduziu substancialmente os recalques na zona de encontro ponte-aterro, mitigando o "bump" e viabilizando desempenho adequado com monitoramento de longo prazo (Puppala et al., 2019[liii]). Densidades típicas de geofoam são cerca de 100 vezes menores que a de solos compactados (Horvath, 1994[liv]; Khan & Meguid, 2021[lv]), o que resulta em acréscimos de tensão muito reduzidos.

(ii) Inclusão compressível em muros e sobre tubulações. Estudos numéricos e experimentais mostraram que uma camada de EPS entre o muro rígido e o aterro mobiliza o cisalhamento no solo e reduz significativamente a pressão lateral, com melhores resultados para geofoam de baixa densidade (Khan & Meguid, 2021[lvi]). Ensaios com painéis de EPS sobre tubulações enterradas indicaram reduções de até cerca de 70% da pressão vertical em modelos físicos e de 30% a 36% em escala real, dependendo da geometria e do arranjo das camadas.

(iii) Amortecedor sísmico. Análises numéricas de túneis tipo cut-and-cover mostraram que o geofoam como material de cobertura pode atenuar de maneira marcante cargas estáticas e dinâmicas no revestimento, com eficiência crescente à medida que aumenta a aceleração de entrada; o arranjo geométrico e a espessura dos blocos influenciam diretamente essa capacidade (Shadabi et al., 2021[lvii]).

(iv) Estabilização de taludes. Revisões históricas relataram múltiplas aplicações de geofoam como material de enchimento leve para estabilização de taludes e encostas, reduzindo o peso próprio da massa de solo e, consequentemente, as tensões cisalhantes na região crítica de ruptura (Horvath, 1994).[lviii]

(v) Isolante térmico contra expansão por congelamento. Revisões sobre o uso do EPS geofoam em pavimentos destacaram sua função como barreira térmica em regiões de inverno rigoroso, limitando a penetração da frente de congelamento e protegendo subleitos suscetíveis a frost heave. Estudos em bueiros rasos mostraram que camadas isolantes próximas à estrutura reduzem a penetração de gelo e minimizam danos ao pavimento; pesquisas laboratoriais com

geofoams compostos também indicaram melhora da resistência ao congelamento à medida que se aumenta o conteúdo de EPS.

(vi) Durabilidade e fluência. Experiências em aterros com geofoam mostraram que, quando as tensões de serviço foram mantidas em níveis compatíveis com os limites estabelecidos pela ASTM D6817[lix] (tensões de referência a 1%, 5% e 10% de deformação), os recalques de longo prazo por consolidação e deformações adicionais permaneceram moderados, permitindo desempenho satisfatório em horizontes de décadas (Puppala et al., 2019[lx]).

Revisões destacaram a necessidade de limitar a tensão de trabalho a uma fração da resistência de compressão para controlar a fluência, e de proteger o geofoam contra solventes e hidrocarbonetos, por exemplo, através de geomembranas (Horvath, 1994).[lxi]

3.2.3 Influência da densidade nas propriedades de interface

A estabilidade global de infraestruturas geotécnicas que incorporam poliestireno expandido (EPS geofoam) depende fortemente do comportamento de cisalhamento nas interfaces entre o geofoam e materiais adjacentes; por isso, diversos estudos investigaram de forma sistemática a resistência de interface em sistemas solo-EPS-estrutura (Meguid & Khan, 2019[lxii]; Khan & Meguid, 2018[lxiii]). É bem estabelecido que propriedades mecânicas intrínsecas do EPS, como resistência à compressão e módulo inicial, aumentam com a densidade aparente, conforme indicado em estudos experimentais e pela própria classificação de resistência/1% de deformação na ASTM D6817[lxiv] (Khan & Meguid, 2018[lxv]; Khan & Meguid, 2021[lxvi]). Contudo, ao se restringir ao intervalo de densidades tipicamente usado em campo (cerca de 15 a 35 kg/m³), a literatura apresenta duas visões contrastantes sobre a influência da densidade do EPS na resistência ao cisalhamento de interface. A primeira vertente, baseada em investigações paramétricas, indica que a densidade exerce efeito primário e estatisticamente significativo sobre a envoltória de resistência da interface. Ensaios de cisalhamento direto com três densidades (15, 22 e 35 a 39 kg/m³) em interfaces EPS-areia, EPS-PVC e EPS-concreto mostraram que o aumento da densidade do EPS conduz a incremento consistente do ângulo de atrito de pico da interface; no caso de areia e concreto, o ganho de ângulo é marcado, enquanto para PVC o aumento é mais modesto (Meguid & Khan, 2019[lxvii]; Khan & Meguid, 2018[lxviii]). Nessa interpretação, a maior densidade está associada a maior rigidez da matriz celular e menor compressão local sob tensões normais, o que reforça a resistência friccional mobilizada. Em contraste, a segunda escola de pensamento, apoiada em ensaios de cisalhamento direto de grande escala (305 × 305 mm), concluiu que, na faixa de

densidades de 15 a 30 kg/m³, a influência da densidade do EPS no ângulo de atrito de interface é pequena ou irrelevante. Em testes envolvendo interfaces EPS-EPS, EPS-juta, EPS-geogrelhas e EPS-cinza volante, variações na densidade do bloco resultaram em mudanças muito pequenas nos ângulos de atrito, embora a adesão apresentasse leve aumento com a densidade. Esses resultados sugeriram que, desde que as tensões normais permaneçam dentro do regime elástico de todos os blocos ensaiados, a falha tende a ocorrer por deslizamento planar na interface, com pouca participação da deformação volumétrica do EPS.

A aparente contradição entre esses conjuntos de dados levou à formulação de uma terceira interpretação: a influência da densidade é mediada pelas características da superfície adjacente. Estudos que compararam interfaces EPS-concreto, EPS-madeira, EPS-aço, EPS-areia e EPS-PVC mostraram que a rugosidade e a rigidez do material em contato controlam o mecanismo de ruptura. Para superfícies relativamente lisas (como aço ou PVC), o deslizamento interfacial domina e a variação de densidade tem efeito limitado no atrito; já para superfícies ásperas, como concreto e areia, a maior densidade do EPS está associada a aumentos claros do ângulo de atrito de interface (Meguid & Khan, 2019[lxix]; Khan & Meguid, 2018[lxx]). Assim, a densidade do geofoam atua como fator potencializador de resistência sobretudo quando combinada com contrafaces capazes de desenvolver engrenamento mecânico. Discrepâncias entre estudos também se explicam por diferenças de metodologia. Ensaios em caixas pequenas (cerca de 100 × 100 mm) podem induzir efeitos de borda que distorcem o modo de ruptura; por isso, recomenda-se o uso de caixas de, no mínimo, 300 × 300 mm, conforme diretrizes de ensaios de cisalhamento de geossintéticos. Além disso, a magnitude da tensão normal aplicada e a natureza do material em contato (solo granular, concreto, aço, geotêxteis) exercem papel decisivo na interpretação da influência da densidade do EPS, indicando a necessidade de programas experimentais em escala representativa que considerem explicitamente essas variáveis (Meguid & Khan, 2019[lxxi]; Khan & Meguid, 2018[lxxii]; Khajeh et al., 2020[lxxiii]).

3.3 Geossintéticos: composição

3.3.1 Classificação e composição polimérica

A terminologia, classificação e especificação dos geossintéticos são consolidadas por normas internacionais de terminologia (como a ISO 10318[lxxiv]) e amplamente sistematizadas em obras de referência de projeto geotécnico com geossintéticos (Markiewicz[lxxv] et al., 2022). De acordo com esses preceitos, os geossintéticos constituem uma classe de produtos poliméricos utilizados em contato com solo, rocha ou outros geomateriais para desempenhar

funções como separação, reforço, filtração, drenagem, barreira e proteção (Markiewicz et al., 2022[lxxvi]). Embora o espectro de manufatura inclua arranjos estruturais complexos (geocompostos, geogrelhas, geossintéticos bentoníticos, etc.), a presente investigação adotou um recorte bem delimitado. O escopo restringiu-se às matrizes poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD), poliéster (PET) e polipropileno (PP), que figuram entre os polímeros mais empregados na fabricação de geotêxteis, geomembranas, geogrelhas e demais geossintéticos (Müller & Saathoff, [lxxvii]2015). A delimitação a essas três famílias decorreu de sua ampla utilização em estruturas de contenção, barreiras de proteção e outras obras geotécnicas modernas, nas quais o emprego combinado com blocos de EPS geofoam é frequente (Chatrabhuj & Meshram, 2024). [lxxviii]A Tabela 2 consolida propriedades básicas dessas resinas, destacando diferenças físico-químicas que justificaram sua seleção.

Tabela 2 – Principais polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos

Matriz Polimérica	Sigla	Densidade Específica (g/cm³)	Características Físico-Mecânicas Predominantes	Aplicações Funcionais Típicas na Geotecnia
Polietileno de Alta Densidade	PEAD	0,94 – 0,96	Elevada cristalinidade, alta rigidez superficial, inércia química e baixíssima permeabilidade.	Barreiras de fluxo (impermeabilização) em aterros, canais e estruturas de contenção.
Polipropileno	PP	0,90 – 0,91	Baixa densidade, boa ductilidade elástica, resistência à degradação biológica e elevada tenacidade.	Elementos de separação, filtração e proteção mecânica contra puncionamento.
Poliéster	PET	1,38 – 1,41	Elevada massa específica polimérica, alto módulo de elasticidade (rigidez à tração) e baixa fluência.	Elementos de reforço estrutural basal, estabilização de maciços e filtração severa.

Fonte: Elaborada pelo autor (2026), com base em ABNT NBR ISO 10318-1 [*lxxix*](2013).

Compreender o comportamento mecânico e estrutural dos materiais em contato com o EPS geofoam é fundamental para interpretar a resistência ao cisalhamento nas interfaces. Ensaios de cisalhamento direto mostraram que o atrito em sistemas compósitos solo-EPS-estrutura não depende apenas da rugosidade superficial, mas também da resposta da matriz do geofoam sob tensões normais confinantes, incluindo sua densidade e compressibilidade (Meguid & Khan, 2019[lxxx]; Khan & Meguid, 2018[lxxxi]). A rigidez superficial e a deformabilidade do EPS controlam a magnitude da indentação mútua na zona de contato, afetando tanto a compressão vertical quanto a resistência de interface (Meguid & Khan, 2019[lxxxii]; Khan & Meguid, 2018[lxxxiii]). Estudos com diferentes densidades (15, 22 e 35 a 39 kg/m³) indicaram que a densidade do geofoam e a rugosidade do material adjacente têm efeitos significativos na adesão e no ângulo de atrito, especialmente para superfícies ásperas como concreto, madeira e areia (Meguid & Khan, 2019[lxxxiv]; Khan & Meguid, 2018[lxxxv]). Em

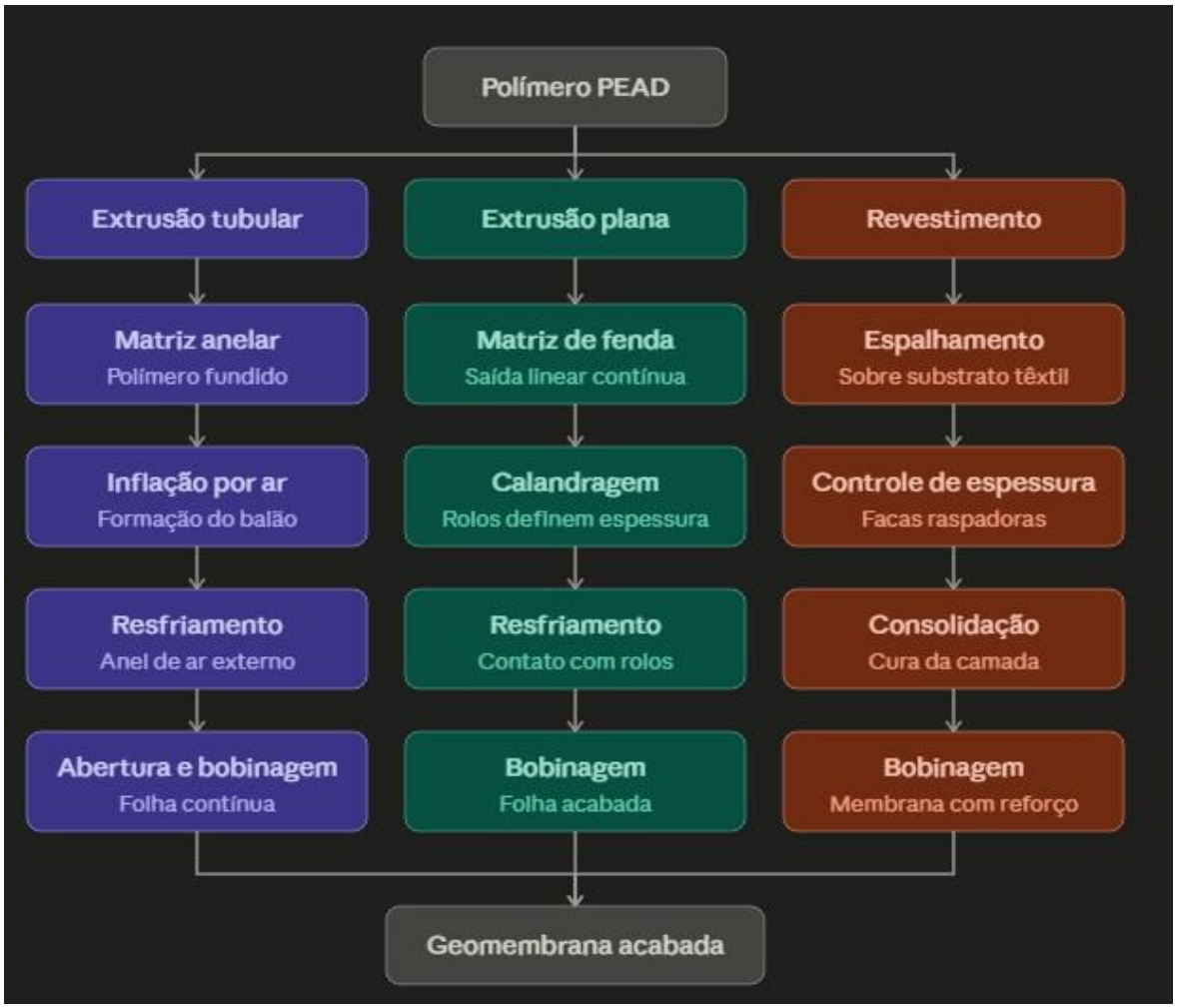
interfaces entre EPS e materiais relativamente lisos (por exemplo, aço, PVC), o deslizamento interfacial domina e os ângulos de atrito mobilizados são menores; a variação de densidade do EPS tem efeito limitado sobre o atrito, e a falha tende a concentrar-se em uma zona superficial estreita do geofoam (Meguid & Khan, 2019[lxxxvi]; Khan & Meguid, 2018[lxxxvii]). Já em interfaces com materiais mais rugosos ou com elementos de reforço (geogrelhas, geotêxteis), a interação entre asperezas e matriz celular do EPS pode levar a mecanismos de engrenamento mecânico e maiores resistências de cisalhamento, embora estudos de grande escala também tenham mostrado casos em que a densidade do EPS teve influência pouco significativa no ângulo de atrito de interface. Assim, os resultados disponíveis indicaram que o atrito em interfaces com EPS é governado pela combinação de propriedades do geofoam (densidade, rigidez) e características da superfície oposta (rugosidade, material), mais do que por textura superficial isoladamente (Meguid & Khan, 2019[lxxxviii]; Khan & Meguid[lxxxix], 2018).

3.3.2 Geomembranas de PEAD

3.3.2.1 Características e normativas

As geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) são amplamente empregadas como barreiras sintéticas de fluxo em sistemas de revestimento e cobertura de aterros e outras obras de engenharia geoambiental, devido à sua combinação de baixa permeabilidade, boa resistência mecânica e durabilidade química (Koerner, 1996[xc]; Rowe & Yu[xci], 2018; Rowe et al., 2016[xcii]). O comportamento macroscópico da geomembrana é fortemente influenciado pelo processo industrial de fabricação. Uma síntese abrangente dos métodos de produção de geomembranas poliméricas descreveu três rotas principais (Scheirs, 2009[xciii]): 1. Blown film (extrusão por matriz balão): o polímero fundido é extrudado através de uma matriz circular, formando um "balão" inflado por ar que é resfriado e depois aberto e bobinado em folhas contínuas (Scheirs, 2009[xciv]; Halake et al., 2023[xcv]). 2. Flat sheet extrusion e calandragem (matriz plana + rolos): a resina é extrudada por uma fenda linear (flat die) e conduzida por rolos/calandras que definem a espessura e promovem o resfriamento por contato (Scheirs, 2009[xcvi]). 3. Spread coating (revestimento por espalhamento): o polímero é distribuído em camada fina sobre um substrato ou reforço têxtil, com a espessura controlada por facas raspadoras ou dispositivos similares (Scheirs, 2009[xcvii]). Esses processos de fabricação podem ser esquematizados em fluxogramas industriais (conforme apresentado na Figura 11) baseados nas descrições técnicas consolidadas em manuais de geomembranas (Scheirs, 2009[xcviii]; Halake et al., 2023[xcix]).

Figura 11 – Fluxograma com estrutura completa de produção das geomembranas.



Fonte: Autor (2026).

Geomembranas de PEAD são produzidas com densidades na faixa típica de polímeros classificados como “alta densidade”, atendendo a requisitos mínimos definidos em especificações como a GRI-GM13[c], que também estabelecem limites para propriedades de tração e espessura (León & Zúñiga, 2024[ci]; Narejo et al., 1996[cii]). Ensaios de laboratório e estudos com geomembranas exumadas mostraram que esses materiais apresentam elevada resistência à tração e mantêm bom desempenho químico e mecânico após anos em contato com lixiviados e soluções de mineração, embora a resistência possa degradar progressivamente sob exposição prolongada a ambientes agressivos (Xue et al., 2013[ciii]; Lavoie et al., 2020[civ]). Hidraulicamente, geomembranas de PEAD íntegras atuam como barreiras praticamente impermeáveis: valores de condutividade hidráulica equivalente são tipicamente da ordem de 10^{-14} m/s, e testes padronizados de fluxo registraram vazões da ordem de 10^{-6} m³/m²/dia, indicando transmissão de fluxo extremamente baixa (Rarison et al., 2023[cv]; Touze-Foltz, 2016[cvi]). Esses resultados refletem um mecanismo de transporte

controlado por dissolução e difusão molecular através da matriz polimérica, e não por percolação em poros contínuos (Rarison et al., 2023[cvii]; Di Battista & Rowe, 2020[cviii]). Em aplicações de engenharia civil, como aterros sanitários, lagoas de lixiviado e sistemas de mineração, espessuras comerciais de geomembranas de PEAD de 1,0 a 2,0 mm são amplamente utilizadas; estudos de puncionamento em escala reduzida e em grande escala mostraram que o aumento da espessura contribui para maior resistência a esforços localizados, embora a proteção adicional por geotêxteis de interface seja frequentemente necessária para limitar deformações e prevenir falhas por puncionamento (León & Zúñiga, 2024[cix]; Koerner et al., 2012[cx]; Narejo et al., 1996[cxi]).

A Tabela 3 reúne os principais ensaios referentes às geomembranas e as respectivas normas de ensaio.

Tabela 3 – Ensaios de identificação e desempenho e respectiva norma de ensaio

Ensaios de identificação	**Norma**
Espessura	ASTM D1593[cxii], D5199[cxiii], e D3767[cxiv]
Densidade	ASTM D792[cxv], D1505[cxvi], e D297[cxvii]
Massa por unidade de área	ASTM D3776[cxviii]
Ensaio de Tração	ASTM D638[cxix], D882[cxx] e D751[cxxi]
Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	ASTM D3417[cxxii] e D3418[cxxiii]
Análise Termogravimétrica (TGA)	ASTM D6370[cxxiv] e E1131[cxxv]
Análise Termomecânica (TMA)	ASTM D648[cxxvi] e E831[cxxvii]
Índice de Fusão (MFI)	ASTM D1238[cxxviii]
Teor de Solventes	ASTM D297[cxxix]
Dureza	ASTM D2240[cxxx]
Extraíveis	ASTM D297[cxxxi] e D3421[cxxxii]
Teor de cinzas	ASTM D297[cxxxiii]
Tempo de Oxidação (OIT)	ASTM D3895[cxxxiv]
Teor de Negro de Fumo (PE)	ASTM D1603[cxxxv]
Dispersão de Negro de Fumo (PE)	ASTM D5596[cxxxvi] e D3015[cxxxvii]
Ensaios de desempenho	**Norma**
Resistência ao Rasgo	ASTM D1004[cxxxviii], D2263[cxxxix] e D624[cxl]
Resistência ao Estouro	ASTM D5617[cxli]
Resistência ao Puncionamento	ASTM D4833[cxlii] e FTMS 101C[cxliii]
Cisalhamento	ASTM D5321[cxliv]
Fluência	ASTM D5262[cxlv]
Expansão Térmica	ASTM D696[cxlvi]
Estabilidade Dimensional	ASTM D1204[cxlvii]
Permeabilidade (água)	ASTM E96[cxlviii]
Permeabilidade (vapor)	ASTM E96[cxlix]
Ensaios de Desempenho em Emendas	**Norma**
Ensaio de Cisalhamento	
Ensaio de Descolamento	ASTM D4437[cl] e D4545
Ponto de Escoamento Mecânico	ASTM 6392[cli], GM19[clii] e GM14[**cliii**]
Pressurização das Emendas	

Ensaios de identificação	Norma
Aplicação de Ar	
Caixa de Vácuo	
Plano de Impedância Ultrassônico	
Ressonância Ultrassônica	
Ensaios de Durabilidade	**Norma**
Abrasão	ASTM D460[cliv] e D2228[clv]
Exposição à Intempérie	ASTM D1435[clvi]
Envelhecimento Térmico	ASTM D573[clvii]
Exposição ao Calor (Estufa)	ASTM D794[clviii] e D5721[clix]
Exposição à Radiação UV	ASTM G153[clx], G154[clxi] e G155[clxii]
Resistência Química	EPA 9090[clxiii], D5747[clxiv] e D5322[clxv]
Resistência Biológica	ASTM G22[clxvi] e G21[clxvii]
Envelhecimento por Ozônio	ASTM D1149[clxviii]
Fissuramento sob Tensão (PE)	ASTM D1693[clxix] e D5397[clxx]

Fonte: Autor (2026), com base na literatura apresentada.

3.3.2.2 Geomembranas lisas vs. texturizadas: mecanismos de rugosidade

A resistência ao atrito de geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) em sistemas de contenção está intimamente ligada às características topográficas de sua superfície. Em interfaces entre geomembranas lisas de PEAD e partículas granulares, o pico de resistência ao cisalhamento é governado por uma combinação de deslizamento e "plowing", controlados pela dureza superficial relativa, forma dos grãos e tensão normal aplicada (Dove & Frost, 1999[clxxi]). A introdução de texturas modifica esse regime, aumentando a rugosidade e permitindo que as tensões de cisalhamento sejam parcialmente transferidas para o interior da matriz dos materiais em contato por meio de mecanismos de engrenamento mecânico. A microtopografia de geomembranas de PEAD pode ser caracterizada por parâmetros de rugosidade medidos em escala micrométrica, como rugosidade média e parâmetros estereológicos, que descrevem a distribuição de picos e vales (Dove et al., 1996[clxxii]; Dove & Frost, 1999[clxxiii]). Métodos de análise de imagem e de perfis permitem classificar geomembranas em diferentes categorias de textura (baixa, média, alta), evidenciando que superfícies mais agressivas apresentam maiores alturas de asperidades (Dove & Frost, 1999[clxxiv]; Yeşiller & Çekiç, 2005[clxxv]). Em interfaces geomembrana texturizada-geotêxtil, a presença de asperidades salientes possibilita um efeito tipo gancho-laço, no qual as protuberâncias da geomembrana se ancoram nas fibras do geotêxtil. Ensaios de cisalhamento de interface e testes específicos de "hook and loop" mostraram que essa interação pode contribuir de forma significativa para a resistência de pico, e que a magnitude do efeito depende fortemente da geometria e distribuição da textura (Hebeler et al., 2005[clxxvi]). Estudos recentes de variação de rugosidade durante o cisalhamento indicaram ainda que o

perfil topográfico se deforma sob tensão normal e deslocamento, influenciando o comportamento pós-pico da interface (Xu et al., 2023[clxxvii]). De forma geral, a literatura mostra correlação entre o aumento da rugosidade de geomembranas texturizadas e o incremento de atrito e resistência de interface, por meio de mecanismos combinados de fricção e engrenamento mecânico. No entanto, valores limiares específicos de rugosidade (por exemplo, um Ra definido) e percentuais fixos de ganho em coeficiente de atrito dependem do tipo de textura, do processo de fabricação e do material em contato, devendo ser determinados experimentalmente para cada sistema (Dove et al., 1996[clxxviii]; Dove & Frost, 1999[clxxix]; Xu et al., 2023[clxxx]; Hebeler et al., 2005[clxxxi]; Yeşiller & Çekiç, 2005[clxxxii]).

3.3.3 Geotêxteis não tecidos

3.3.3.1 Geotêxteis de PET: propriedades e aplicações

Os geotêxteis não tecidos de poliéster (PET) constituem uma classe essencial de materiais geossintéticos amplamente empregados em obras civis, ambientais e geotécnicas. Sua estrutura tridimensional porosa e permeável, resultado do entrelaçamento aleatório das fibras, aliada às propriedades químicas e termomecânicas do PET, proporciona excelente desempenho em aplicações que exigem durabilidade sob condições operacionais severas. Processo de fabricação: A produção dos geotêxteis não tecidos envolve etapas industriais sequenciais: extrusão do polímero fundido para formação dos filamentos; deposição aleatória desses filamentos sobre uma esteira formando um véu isotrópico; consolidação mecânica por agulhamento (Ding et al., 2020[clxxxiii]; Lin et al., 2016[clxxxiv]; Lin et al., 2014[clxxxv]), processo no qual agulhas farpadas entrelaçam as fibras perpendicularmente ao plano da manta, conferindo espessura característica, compressibilidade e rede interna de poros; finalmente, a manta agulhada passa por termofixação em calandras ou fornos para estabilização dimensional através da fusão parcial nos pontos de contato superficial das fibras. Essa sequência resulta em um material versátil com propriedades ajustáveis conforme o controle dos parâmetros industriais, mas é importante ressaltar:

- Aumentar a densidade/profundidade de agulhamento melhora até certo ponto a resistência à tração/rasgo/punção, mas profundidades excessivas podem reduzir propriedades (Lin et al., 2016[clxxxvi]; Lin et al., 2014[clxxxvii]).
- A termofixação/hot-press com fibras de baixo ponto de fusão (LPET) aumenta significativamente resistência à tração, rasgo, estouro e punção, e melhora resistência à água (Lin et al., 2016[clxxxviii]).

Propriedades técnicas: Mecanicamente, mantas não tecidas de PET apresentam resistência à tração tipicamente entre 20 e 60 kN/m (Lin et al., 2016[clxxxix]; Wojtasik, 2008[cxc]; Lin et al., 2014[cxci]; Li et al., 2021[cxcii]) e alongamento na ruptura variando entre 10% e 50%, permitindo absorver tensões estruturais sem colapso prematuro mesmo diante de recalques diferenciais do terreno. Em termos hidráulicos, a permissividade varia de 1,1 a 4,5 s^{-1} e o coeficiente de permeabilidade, de cerca de 0,5 a $2{,}9\times10^{-2}$ m/s, para não tecidos agulhados de poliéster, com AOS variando de menos de 0,074 mm (fibras de 3 dtex) a aproximadamente 0,30 mm em mantas com filamentos mais grossos (Hwang et al., 1998[cxciii]). Durabilidade: A durabilidade desses materiais é comprovada por ensaios acelerados e estudos ambientais. O PET mantém suas propriedades operacionais em temperaturas entre -30 °C e +80 °C; apresenta elevada resistência química à hidrólise na maioria dos ambientes naturais (pH entre 2 e 12); além disso, sua estabilidade térmica/hidrolítica permite uso prolongado mesmo sob exposição ambiental adversa (Franco et al., 2022[cxciv]). Ensaios mostraram que, após envelhecimento acelerado ou exposição prolongada ao intemperismo natural, houve redução moderada da resistência à tração (geralmente inferior a 20% após mil horas sob radiação UV intensa), sem perda significativa das demais propriedades físicas essenciais ao desempenho estrutural (Franco et al., 2022[cxcv]).

Funções principais na engenharia (Valentin et al., 2021[cxcvi]; Ding et al., 2021[cxcvii]; Scholz et al., 2024[cxcviii]): A combinação estrutural do PET com o processo industrial confere aos geotêxteis não tecidos cinco funções consagradas:

- Separação: barreira física entre camadas com granulometrias distintas;
- Filtragem: permite escoamento transversal seletivo;
- Drenagem: conduz fluidos no próprio plano tridimensional;
- Reforço: mobiliza resistência à tração/ancoragem;
- Controle de erosão: protege solos superficiais contra ação erosiva hídrica ou atmosférica.

Essas funções são amplamente reconhecidas como fundamentais para o sucesso técnico desses materiais em obras rodoviárias, ferroviárias, aterros sanitários, proteção costeira/hidráulica e estabilização de taludes.

3.3.3.2 Geotêxteis de PP: propriedades e aplicações

Os geotêxteis não tecidos de polipropileno (PP) são hoje a principal família de geotêxteis, respondendo por mais de 90% da produção mundial, em grande parte pela combinação de baixo custo, facilidade de processamento e bom desempenho mecânico e

hidráulico em separação, filtragem, drenagem e proteção (Scholz et al., 2024[cxcix]; Carneiro & Lopes, 2022[cc]; Valentin et al., 2021[cci]). Em mantas agulhadas, filamentos ou fibras curtas de PP são entrelaçados mecanicamente, resultando em uma estrutura tridimensional porosa adequada a essas funções (Ding et al., 2021[ccii]; Valentin et al., 2021[cciii]). O processo típico de fabricação envolve formação do véu (por fiação ou deposição de fibras cortadas), seguida de agulhamento, que promove o entrelaçamento no eixo Z, e, em muitos produtos, uma etapa de ligação térmica (calandragem ou ar quente) para estabilizar dimensionalmente a manta e ajustar a distribuição de poros (Ding et al., 2021[cciv]; Valentin et al., 2021[ccv]). A combinação de agulhamento e termofixação controla diretamente resistência à tração, resistência à punção, espessura, porosidade e tamanho de poros, bem como permeabilidade à água (Ding et al., 2021[ccvi]; Valentin et al., 2021[ccvii]). Estudos experimentais mostraram que geotêxteis de PP (filamento contínuo ou fibra curta) podem apresentar elevadas resistências à tração e à punção, adequadas às funções de proteção e reforço, com desempenho de punção superior ao de geotêxteis equivalentes de PET na mesma gramatura (Koerner & Koerner, 2011[ccviii]). Processos de agulhamento mais intensos, maior massa por unidade de área e parâmetros adequados de termoligação permitem obter estruturas de alta resistência e alongamento, mantendo boa permeabilidade e controle da abertura de poros efetiva (Ding et al., 2020[ccix]).

Quanto à durabilidade, o PP é quimicamente estável em muitos ambientes, mas apresenta suscetibilidade significativa à degradação por radiação UV e oxidação. Ensaios de envelhecimento acelerado e natural mostraram que geotêxteis não tecidos de PP sofrem redução de resistência à tração e punção, formação de trincas nas fibras e alteração de espessura e permeabilidade após exposição prolongada ao intemperismo, sobretudo em presença de radiação UV (Carneiro & Lopes, 2022[ccx]; Valentin et al., 2021[ccxi]; Jie et al., 2022[ccxii]). Estudos de envelhecimento artificial com temperaturas elevadas, alta pressão de oxigênio e UV mostraram queda de massa molar e consumo de estabilizantes (antioxidantes e HALS), confirmando que a vida útil depende fortemente do pacote de estabilização e do grau de cobertura/abrigo do geotêxtil na obra (Scholz et al., 2024[ccxiii]; Valentin et al[ccxiv]., 2021). Em contrapartida, geotêxteis de PP exibem boa resistência à água do mar e a ambientes marinhos, quando adequadamente estabilizados (Scholz et al., 2021[ccxv]).

Comparações diretas entre PP e PET mostraram que, para a mesma gramatura, geotêxteis de PP podem ter melhor desempenho à punção, enquanto geocompósitos PET-PP também sofrem degradação significativa sob UV, indicando que ambos os polímeros requerem estabilização adequada quando expostos (Koerner & Koerner, 2011[ccxvi]; Carneiro et al[ccxvii]., 2022). As funções de separação, filtragem, drenagem, reforço e proteção continuam

sendo definidas sobretudo pela estrutura (agulhamento, gramatura, porosidade), mais do que apenas pelo tipo de polímero (Ding et al., 2021[ccxviii]; Bulut & Şengül, 2024[ccxix]).

A síntese das diferenças estruturais intrínsecas que distinguem as matrizes poliméricas de PET e PP em mantas não tecidas é apresentada na Tabela 4. A organização adotada reúne cinco parâmetros físico-estruturais (rigidez de flexão, gravidade específica, espessura nominal sob igual gramatura, dureza superficial das fibras e massa por unidade de área), cada um com implicação direta no mecanismo de mobilização do atrito na interface com blocos de EPS. A comparação dessas variáveis mostra que o desempenho do geotêxtil quanto ao atrito não pode ser inferido a partir de uma única propriedade do polímero, mas resulta da interação entre a rigidez da fibra, a densidade de pontos de contato real e a compressibilidade transversal da manta sob carga confinante. De forma geral, mantas de PET tendem a apresentar fibras mais rígidas e com maior módulo de elasticidade, enquanto mantas de PP, para a mesma gramatura, são usualmente mais espessas e compressíveis, o que afeta o modo de contato real com a superfície do EPS e, consequentemente, o atrito mobilizado na interface (Koerner & Koerner, 2011[ccxx]).

O PP, em razão de sua densidade aproximadamente 34% menor, produz mantas com cerca de 45% mais fibras por unidade de massa, condição que multiplica a quantidade de pontos de engrenamento mecânico na área real de contato, mas que, ao mesmo tempo, induz maior deformação vertical durante o cisalhamento, por dissipar energia na compressão da própria manta antes da mobilização do deslizamento interfacial. O balanço entre esses dois mecanismos opostos (rigidez individual da fibra versus densidade de contatos) configurou uma hipótese de trabalho, avaliada experimentalmente nas seções seguintes.

Tabela 4 – Diferenças estruturais entre os polímeros PET e PP

Parâmetro Estrutural / Físico	Poliéster (PET) Não Tecido	Polipropileno (PP) Não Tecido	Implicação no Atrito com EPS
Rigidez superficial das fibras	Maior rigidez à flexão (módulo de Young da ordem de 2,8–4,0 GPa); fibras tendem a ser mais duras e abrasivas ao toque.	Menor rigidez (módulo da ordem de 1,5–2,0 GPa); toque mais macio e fibras mais dúcteis na superfície, em razão da Tg próxima de 0 °C.	Esperava-se que fibras mais rígidas (PET) apresentassem maior capacidade de indentação microscópica na matriz celular branda do EPS por sítio de contato. Contudo, o ganho efetivo de cisalhamento interfacial depende do balanço entre a rigidez individual da fibra e a densidade de pontos de contato, hipótese que foi avaliada experimentalmente nas seções 5.1.2 e 5.2.3.
Gravidade específica e volume	1,38 g/cm³ (polímero mais denso).	0,91 g/cm³ (polímero mais leve).	Afeta diretamente a espessura para uma mesma gramatura, alterando a compressibilidade do sistema sob carga confinante e a posição efetiva do plano de cisalhamento.
Espessura nominal (para igual gramatura)	Tendencialmente menor (manta mais compacta, com fibras mais próximas).	Tendencialmente maior (manta mais volumosa, com aproximadamente 45% mais fibras por unidade de massa).	Maior espessura inicial (PP) implica maior deformação vertical durante o cisalhamento, dissipando parte da energia de atrito na compressão da própria manta antes da mobilização do deslizamento na interface.
Dureza superficial das fibras	Dureza Rockwell tipicamente na faixa M94–M101; superfície mais resistente à deformação localizada.	Dureza Rockwell tipicamente na faixa M30–M35; superfície mais maleável sob contato concentrado.	A dureza superior do PET amplia a tensão de contato concentrada na ponta da fibra, favorecendo o colapso celular localizado do EPS sob a mesma força normal. Esse parâmetro é, mecanicamente, mais correlacionado à indentação do que a rigidez à flexão isoladamente.
Massa por unidade de área (gramatura)	Exige maior aporte de massa (g/m²) para atingir espessuras elevadas de projeto.	Atinge espessuras elevadas com menor massa (g/m²) em razão da baixa densidade da resina.	Impacta a quantidade de fibras disponíveis na área de contato real. O efeito isolado da gramatura sobre o atrito interfacial foi aprofundado na seção 3.3.3.3.

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

3.3.3.3 Efeito da gramatura no comportamento friccional

O comportamento ao atrito de interfaces geossintéticas resulta da interação entre topografia superficial, propriedades mecânicas dos materiais e sua estrutura interna (Kandpal & Vangla, 2024[ccxxi]). Em geotêxteis não tecidos, a massa por unidade de área controla, de forma indireta, a espessura, a densidade de fibras e a porosidade, influenciando a compressibilidade transversal e o potencial de intertravamento com o meio adjacente (Abdelaal & Solanki, 2022[ccxxii]). Em interfaces solo granular-geotêxtil, estudos mostraram que partículas rígidas e angulosas podem penetrar parcialmente na matriz fibrosa, mobilizando atrito e intertravamento; o aumento da rugosidade e da massa por unidade de área tende, em muitos casos, a aumentar a resistência de interface, até o ponto em que a deformação interna do geotêxtil passa a controlar a ruptura. Em interfaces geomembrana-geotêxtil, resultados de ensaios de cisalhamento direto e de cisalhamento por torção indicaram

que a combinação entre rugosidade da geomembrana e gramatura/estrutura do geotêxtil pode levar tanto a maiores resistências de pico quanto a rupturas internas do geotêxtil e perdas acentuadas pós-pico por arrancamento e rearranjo de fibras (Abdelaal & Solanki, 2022[ccxxiii]). Por outro lado, materiais celulares compressíveis como o EPS geofoam exibem comportamento ao cisalhamento dominado por sua própria compressibilidade e coesão equivalente, com ângulo de atrito pouco sensível à densidade. Ensaios de interface entre o EPS e outros materiais mostraram que mecanismos de intertravamento podem aumentar a resistência de interface, mas o detalhamento microscópico da indentação de fibras de geotêxtil em EPS ainda é pouco documentado nas fontes disponíveis (Özer & Akay, 2016[ccxxiv]). Os resultados experimentais em interfaces geossintéticas em geral indicaram que aumentar a massa por unidade de área ou a rugosidade não garante, por si só, maior atrito. Em certos casos, geotêxteis mais pesados ou muito espessos tornam-se altamente compressíveis, funcionando como uma camada amortecedora: parte da energia de compressão e cisalhamento é dissipada por deformação interna e deslizamento de fibras, podendo deslocar o plano de ruptura para dentro do geotêxtil e reduzir a resistência interfacial efetivamente mobilizada (Abdelaal & Solanki, 2022[ccxxv]).

A síntese das principais propriedades do geotêxtil que governam o comportamento mecânico de interfaces geossintéticas é apresentada na Tabela 5. A organização proposta reúne três níveis de análise (a contribuição da gramatura como variável de estado, o papel do processo de fabricação na forma das fibras e a influência da rugosidade do material em contato), de modo a mostrar que o desempenho da interface não resulta de uma propriedade isolada do geotêxtil, mas da interação entre esses três fatores. Conforme os trabalhos compilados, o aumento da massa por unidade de área amplia, ao mesmo tempo, a espessura da manta e a densidade de fibras disponíveis na área real de contato, mecanismo que pode tanto intensificar o engrenamento mecânico quanto provocar ruptura interna por superação da coesão fibra-fibra (Abdelaal e Solanki, 2021[ccxxvi]). Em paralelo, o processo de consolidação das fibras (agulhado ou termoligado) altera a forma das ligações entre filamentos e, consequentemente, o engrenamento do tipo gancho-laço e a velocidade de perda da resistência ao cisalhamento após o pico. Por fim, a rugosidade da superfície em contato define o mecanismo de atrito dominante, que alterna entre sulcamento, engrenamento mecânico e desgaste superficial, conforme a relação entre a altura das asperidades e o diâmetro característico das fibras (Kandpal e Vangla, 2024[ccxxvii]).

Tabela 5 – Efeitos das propriedades do geotêxtil na interface geossintética

Propriedade do geotêxtil	Efeito típico na interface	Referências
↑ Massa por unidade de área	Maior espessura e maior densidade de fibras; pode ampliar o engrenamento mecânico ou induzir ruptura interna da manta.	Abdelaal e Solanki [ccxxviii](2022).
Tipo de fibra e processo de fabricação (agulhado vs. termoligado)	Altera o mecanismo de engrenamento gancho-laço e a evolução do dano pós-pico.	Bacas et al.[ccxxix] (2015).
Rugosidade do material contraposto	Controla o sulcamento das asperidades, o engrenamento mecânico e o desgaste superficial.	Kandpal e Vangla [ccxxx](2023).

Fonte: Autor (2026).

3.4 Resistência de interface em sistemas EPS-Geossintéticos

3.4.1 Mecanismos de atrito interfacial: critério de Mohr-Coulomb

A estabilidade de estruturas geotécnicas compósitas depende da capacidade de transferência de tensões nas interfaces entre materiais distintos. Em sistemas envolvendo solos, geossintéticos e materiais celulares, a resistência ao cisalhamento de interface é parâmetro chave para evitar falhas de deslizamento (Bacas et al., 2015[ccxxxi]; Khan & Meguid, 2018[ccxxxii]). Em nível de projeto, é comum descrever a resistência interfacial por uma envoltória do tipo Mohr-Coulomb:

$$\tau = c_a + \sigma_n * \tan(\phi)$$

Na qual τ é a tensão cisalhante de ruptura, σn a tensão normal efetiva, ca a adesão de interface e ϕ o ângulo de atrito de interface (Jotisankasa & Rurgchaisri[ccxxxiii], 2018). Estudos com interfaces solo-geomembrana, solo-geotêxtil, solo tratado com biopolímero e solo congelado-geossintético mostraram envoltórias aproximadas por esse critério, com ca representando contribuições adesivas (cimento, gelo, biopolímero) e σn·tanϕ representando a componente friccional normal-dependente (Jotisankasa & Rurgchaisri, 2018[ccxxxiv]; Khan & Meguid, 2018[ccxxxv]).

Em escala microscópica, a resistência de interface resulta da combinação de mecanismos como deslizamento, adesão, plowing/aração e intertravamento mecânico. Ensaios e modelos recentes para interfaces areia-geomembrana lisa identificaram uma transição de um regime dominado por deslizamento para um regime em que o plowing (sulcamento da superfície polimérica pelas partículas) passa a controlar a resistência à medida que a tensão normal cresce. Interfaces areia-geotêxtil mostram intertravamento de partículas e alongamento de fibras, enquanto interfaces geotêxtil/geomembrana e geocomposto/geomembrana combinam intertravamento do tipo “gancho-laço” com atrito (Bacas et al., 2015[ccxxxvi]). Na interface concreto-solo, um modelo explícito de adesão e plowing quantificou a contribuição de cada mecanismo para a resistência total. A rugosidade

e a topografia multiescala das superfícies têm papel determinante. Parâmetros de rugosidade 2D e 3D de geomembranas, como altura média de elementos de perfil e volume de material do "core", correlacionam-se fortemente com a resistência de interface com geotêxteis e solos. Estudos multiescala mostraram que o coeficiente de atrito e o mecanismo predominante (deslizamento ou plowing) dependem da angularidade das partículas, dureza do material contínuo e carga normal, com existência de uma tensão normal crítica associada à mudança de mecanismo (Kandpal & Vangla, 2024[ccxxxvii]). Em materiais celulares deformáveis, como o EPS geofoam, a resistência ao cisalhamento interno e a resistência de interface com areia e PVC também são descritas por parâmetros de coesão e ângulo de atrito de interface; a densidade do EPS influencia esses parâmetros e a forma de mobilização da resistência (Khan & Meguid, 2018[ccxxxviii]). Juntos, esses resultados reforçaram que a envoltória de Mohr-Coulomb é uma descrição macroscópica de um fenômeno governado, em escala micro, por deslizamento, adesão, plowing e intertravamento, modulados por rugosidade, morfologia das partículas, dureza relativa e compressibilidade dos materiais em contato (Kandpal & Vangla, 2024[ccxxxix]; Bacas et al., 2015[ccxl]; Xu et al., 2023[ccxli]).

3.4.2 Ensaio de cisalhamento direto: fundamentos e parâmetros

A avaliação laboratorial da resistência ao cisalhamento em interfaces solo-geossintético e geossintético-geossintético é fundamental para o dimensionamento seguro de estruturas de contenção, taludes e fundações reforçadas. O ensaio de cisalhamento direto é amplamente utilizado devido à sua simplicidade, disponibilidade em escala grande e capacidade de fornecer parâmetros de resistência ao pico e a grandes deslocamentos para interfaces relevantes em projeto (Ferreira et al., 2021[ccxlii]; Xiao et al., 2025[ccxliii]; Muluti et al., 2023[ccxliv]). No ensaio de cisalhamento direto, o deslizamento relativo entre dois materiais é imposto ao longo de um plano horizontal predeterminado, sob tensão normal constante. O equipamento típico consiste em uma caixa bipartida, com metade inferior móvel e metade superior estacionária; a força tangencial é aplicada por deslocamento controlado da caixa inferior, enquanto a carga normal é aplicada por atuadores ou sistema de carga vertical (Ferreira et al., 2021[ccxlv]; Muluti et al., 2023[ccxlvi]). A força cisalhante é medida por célula de carga e os deslocamentos horizontais/verticais são monitorados por transdutores, sendo os sinais registrados por um sistema de aquisição de dados (Ferreira et al., 2021[ccxlvii]; Muluti et al., 2023[ccxlviii]).

Para interfaces com geossintéticos, há normas que estabelecem parâmetros para ensaios de cisalhamento direto, como a ASTM D5321[ccxlix], e que indicam o uso de caixas com

aproximadamente 300×300 mm, de modo a representar adequadamente a rugosidade de geomembranas texturizadas e a estrutura de geotêxteis, e a reduzir efeitos de borda (Bacas et al., 2015[ccl]; Pavanello et al., 2023[ccli]; Muluti et al., 2023[cclii]; Cazzuffi et al., 2022[ccliii]). Estudos experimentais relataram caixas com 300×300 mm ou 305×305 mm, indicando que estas atendem aos requisitos mínimos da ASTM D5321[ccliv] (Bacas et al., 2015[cclv]; Muluti et al., 2023[cclvi]). As recomendações normativas e de pesquisa enfatizam a fixação rígida dos geossintéticos a bases ou placas rugosas na caixa (por barras, parafusos, adesivos ou placas texturizadas) para evitar deslizamentos parasitas e tração não quantificada do geossintético durante o cisalhamento (Bacas et al., 2015[cclvii]; Ferreira et al., 2021[cclviii]; Muluti et al., 2023[cclix]). No caso de materiais muito leves ou de baixa tensão de serviço (como alguns sistemas de cobertura ou interfaces em baixas sobrecargas), a caracterização da resistência de interface em baixas tensões normais torna-se crítica. Ensaios diretos convencionais têm dificuldade em operar com tensões tão baixas, razão pela qual dispositivos especiais e ensaios em plano inclinado vêm sendo utilizados para investigar atrito de interface até cerca de 5 kPa, com boa concordância entre métodos quando adequadamente configurados (Pavanello et al., 2023[cclx]; Pavanello et al., 2022[cclxi]). Para materiais celulares como o EPS geofoam, estudos de cisalhamento direto em blocos de EPS de diferentes densidades mostraram que tensões normais da ordem de 15 a 60 kPa são adequadas para investigar o comportamento de resistência ao cisalhamento do material e de suas interfaces (Padade & Mandal, 2014[cclxii]). Normas e estudos experimentais recentes em interfaces geossintéticas ressaltam também a importância de promover grandes deslocamentos durante o ensaio para caracterizar não só a resistência de pico, mas também a resistência a grandes deslocamentos ou residual. ASTM D5321[cclxiii] exige um deslocamento mínimo (por exemplo, 50 mm) para garantir a mobilização da resistência a grandes deslocamentos, embora trabalhos tenham mostrado que esse curso pode não ser suficiente para atingir plenamente a resistência residual em algumas interfaces, recomendando aparelhos com curso maior ou uso de ensaios complementares (como anel de cisalhamento) para extrapolar a resistência residual (Pavanello et al., 2023[cclxiv]; Liu et al., 2023[cclxv]).

A diversidade dos parâmetros experimentais encontrados na literatura para ensaios de cisalhamento direto em interfaces geossintéticas está resumida na Tabela 6. Essa organização mostra uma variação metodológica significativa, que dificulta a comparação dos resultados entre estudos: as dimensões das caixas de cisalhamento se concentram, em sua maioria, em torno de 300 × 300 mm (limite inferior recomendado pela ASTM D5321[cclxvi] para reduzir os efeitos de borda em geossintéticos), enquanto a faixa de tensão normal aplicada apresenta

variação superior a uma ordem de grandeza, conforme a aplicação investigada (Bacas et al., 2015[cclxvii]; Muluti et al., 2023[cclxviii]). Em interfaces solo-geossintético típicas de aterros, taludes e sistemas de revestimento de aterros sanitários, a literatura se concentra na faixa de 25 a 400 kPa, de acordo com as tensões de operação em campo (Xu et al., 2023[cclxix]; Cazzuffi et al., 2022[cclxx]). Já os estudos com EPS-geofoam, por causa da alta compressibilidade do material e do risco de colapso precoce das células, limitaram-se a tensões da ordem de 15 a 60 kPa, em corpos de prova com geometria padronizada de 100 × 100 × 50 mm (Padade e Mandal, 2014[cclxxi]), enquanto as investigações com tensões ainda mais baixas (até cerca de 5 kPa) recorreram ao ensaio em plano inclinado normalizado pela EN ISO 12957-2[cclxxii] (Pavanello et al., 2022[cclxxiii]; 2023[cclxxiv]). Essa divisão metodológica representou uma lacuna importante para o presente trabalho: a aplicação direta de parâmetros de atrito obtidos sob altas tensões de confinamento em projetos com EPS-geofoam é questionável, pois desconsidera o colapso das células sob baixas tensões. Esse fato justificou, no plano experimental, o cumprimento rigoroso das prescrições da ASTM D5321[cclxxv] e da família EN ISO 12957[cclxxvi], conforme a faixa de tensões efetivamente investigada.

Tabela 6 – Parâmetros Operacionais Típicos (Cisalhamento EPS-Geossintético).

Aspecto	Valores/condições típicas relatadas	Referências
Dimensão da caixa de cisalhamento	≈ 300 × 300 mm ou 305 × 305 mm.	Bacas et al. (2015)[cclxxvii]; Muluti et al. (2023).[cclxxviii]
Faixa de σ_n em interfaces solo-geossintético	≈ 25 a 400 kPa (aplicações em aterros, taludes e sistemas de revestimento).	Bacas et al. (2015)[cclxxix]; Xu et al. (2023)[cclxxx]; Muluti et al. (2023)[cclxxxi]; Cazzuffi et al. (2022)[cclxxxii].
Baixas tensões em pesquisas específicas	Até ≈ 5 kPa (ensaios em plano inclinado e dispositivos de cisalhamento especial).	Pavanello et al. (2022)[cclxxxiii]; Pavanello et al. (2023).[cclxxxiv]
Corpo de prova de EPS-geofoam	100 × 100 × 50 mm; σ_n = 15 a 60 kPa.	Padade e Mandal (2014)[cclxxxv].
Normas de referência	ASTM D5321[cclxxxvi] e EN ISO 12957-1[cclxxxvii] (cisalhamento direto); EN ISO 12957-2[cclxxxviii] (plano inclinado).	Pavanello et al. (2022)[cclxxxix]; Pavanello et al. (2023)[ccxc]; Xiao et al. (2025)[ccxci]; Cazzuffi et al. (2023)[ccxcii].

Fonte: Autor (2026).

A velocidade de deslocamento horizontal é um parâmetro importante em ensaios de interfaces geossintéticas, e as normas e os estudos experimentais costumam adotar taxas da ordem de 1 mm/min para cisalhamento direto, visando representar condições quase estáticas e controlar o desenvolvimento de poropressões quando solos coesivos ou GCLs estão presentes (Pavanello et al., 2022[ccxciii]; Ferreira et al., 2021[ccxciv]; Muluti et al., 2023[ccxcv]; Triplett & Fox, 2001[ccxcvi]). Em interfaces solo-geossintético, taxas menores (por exemplo, 0,1 mm/min) são recomendadas quando há presença de argila ou GCL, de forma a permitir dissipação de poropressões antes e durante o cisalhamento (Muluti et al., 2023[ccxcvii]; Triplett & Fox,

2001[ccxcviii]; Fox, 2011[ccxcix]). Estudos com GCLs e interfaces geomembrana-GCL mostraram que a taxa de cisalhamento pode afetar o modo de ruptura e a resistência, sobretudo sob carregamentos dinâmicos, mas não detalharam efeitos de aquecimento significativo ou plastificação de asperidades poliméricas (Fox, 2011[ccc]; Liu et al., 2023[ccci]). Ensaios com EPS geofoam em cisalhamento simples e monotônico apontaram que, nas faixas estudadas, o comportamento é pouco sensível à taxa de cisalhamento, sendo dominado por tensão normal, densidade e amplitude de deformação (Li et al., 2021[cccii]; Khan & Meguid, 2018[ccciii]). No que se refere aos métodos, três abordagens principais são relatadas para avaliação da resistência interfacial:

- Cisalhamento direto (ASTM D5321[cciv]/EN ISO 12957-1[cccv]), largamente utilizado para interfaces solo-geossintético e geossintético-geossintético em tensões normais de cerca de 25 a 400 kPa, com deslocamentos típicos de 50 mm e velocidades em torno de 1 mm/min (Pavanello et al., 2022[cccvi]; Muluti et al., 2023[cccvii]; Ferreira et al., 2021[cccviii]).
- Ring shear (cisalhamento torcional), que permite deslocamentos tangenciais muito grandes (da ordem de metros), adequado para capturar resistências residuais autênticas em interfaces geomembrana-geotêxtil e solo-geossintético, superando as limitações de deslocamento do cisalhamento direto; resultados de ring shear podem ser usados para extrapolar resistências residuais a partir de ensaios diretos (Liu et al., 2023[cccix]; Lin et al., 2021[cccx]; Lin et al., 2021[cccxi]; Chiu & Fox, 2004[cccxii]).
- Plano inclinado (EN ISO 12957-2[cccxiii]), amplamente empregado para avaliar atrito de interfaces geossintéticas sob tensões normais muito baixas (cerca de 5 kPa), típicas de coberturas e fases iniciais de construção, embora apresente desafios quanto à uniformidade de tensões (Pavanello et al., 2022[cccxiv]; Pavanello et al., 2021[cccxv]; Pavanello et al., 2022[cccxvi]). Estudos recentes mostraram boa concordância entre ângulos de atrito obtidos em plano inclinado e em um dispositivo de cisalhamento direto adaptado para essas baixas tensões, quando o crescimento de tensão tangencial foi imposto de forma gradual, análoga ao plano inclinado (Pavanello et al., 2023[cccxvii]; Pavanello et al., 2022[cccxviii]).

Na faixa de tensões moderadas comum a muitas aplicações de geossintéticos (cerca de 25 a 150 kPa), o cisalhamento direto linear permanece o método mais difundido, por combinar trajetória de deslizamento planar, controle adequado de tensão normal e possibilidade de representar a cinemática de escorregamento em taludes e interfaces de revestimento (Pavanello et al., 2022[cccxix]; Ferreira et al., 2021[cccxx]; Muluti et al., 2023[cccxxi]; Lin

et al., 2024[cccxxii]). Contudo, estudos com ring shear e plano inclinado mostraram que, para situações específicas (grandes deslocamentos ou tensões muito baixas), é necessária a complementação dos resultados de cisalhamento direto para uma caracterização interfacial mais completa (Liu et al., 2023[cccxxiii]; Lin et al., 2024[cccxxiv]; Pavanello et al., 2023[cccxxv]; Pavanello et al., 2021[cccxxvi]; Pavanello et al., 2022[cccxxvii]).

3.4.3 Efeito de escala e representatividade do equipamento (300 × 300 mm vs. 100 × 100 mm)

A confiabilidade do dimensionamento de estruturas geotécnicas que incorporam geossintéticos e materiais poliméricos leves, como o EPS geofoam, exige que os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos em laboratório sejam representativos das condições de campo. Em interfaces com geossintéticos, o comportamento ao atrito é fortemente afetado por efeitos de escala, relacionados tanto ao tamanho da caixa de cisalhamento quanto às heterogeneidades topográficas de geomembranas texturizadas e geotêxteis (Cerato & Lutenegger, 2006[cccxxviii]; Wasti, 2001[cccxxix]; Wang & Gutierrez, 2010[cccxxx]; Zhou et al., 2025[cccxxxi]).

Ao contrário de amostras de areia homogênea, em que pequenas caixas podem ser suficientes, interfaces contendo geossintéticos apresentam rugosidade distribuída em múltiplas escalas, padrões de agulhamento e macroestruturas que exigem áreas de ensaio grandes para capturar um comportamento médio estável (Khan & Latha, 2023[cccxxxii]; Wasti, 2001[cccxxxiii]). Por essa razão, normas específicas para interfaces com geossintéticos, como a ASTM D5321[cccxxxiv], e estudos recentes recomendam caixas de aproximadamente 300×300 mm (ou 305×305 mm), de modo a atender a requisitos de relação entre dimensão da caixa, abertura de geogrelhas e tamanho de partículas do solo, além de reduzir efeitos de borda (Banyhussan et al., 2023[cccxxxv]; Zhou et al., 2025[cccxxxvi]; Wasti, 2001[cccxxxvii]). Pesquisas sobre efeitos de escala em solos granulares e interfaces solo-geossintético mostraram que os parâmetros de cisalhamento podem variar significativamente com o tamanho do corpo de prova. Em areias e areias siltosas, a resistência de pico e o ângulo de atrito tendem a diminuir à medida que a caixa aumenta de 60 para 300 mm, refletindo mudanças no confinamento e na formação da zona de cisalhamento (Cerato & Lutenegger, 2006[cccxxxviii]). Em interfaces cimentadas solo-solo, observou-se que amostras pequenas fornecem resistências mais elevadas que se reduzem gradualmente até um valor estável quando o tamanho da amostra atinge cerca de 300 mm, identificando esse comprimento como tamanho característico para minimizar o efeito de escala (Zhou et al., 2025[cccxxxix]). Simulações numéricas em DEM

também indicaram que a resistência máxima cresce com a redução do comprimento do corpo de prova, em função da forma como se organiza a banda de cisalhamento (Wang & Gutierrez, 2010[cccxl]).

Para interfaces geomembrana-geotêxtil, comparações entre testes com caixas pequenas (60×60 mm) e grandes (300×300 mm) mostraram que a escala influencia particularmente os valores de adesão e, em menor grau, o ângulo de atrito, sobretudo em geomembranas rugosas, em que o intertravamento e a deformação superficial são importantes (Wasti, 2001[cccxli]). Estudos de reprodutibilidade em areias compactadas evidenciaram ainda grande variabilidade interlaboratorial, sugerindo que diferenças de equipamento, preparação e possivelmente de escala de amostra contribuem substancialmente para a dispersão de resultados de atrito. No caso de materiais celulares, como o EPS geofoam, a caracterização da resistência ao cisalhamento interno e da resistência de interface com solos e outros materiais estruturais tem sido conduzida tanto em corpos de prova relativamente pequenos (por exemplo, 100×100×50 mm) (Padade & Mandal, 2014[cccxlii]; Khan & Meguid, 2018[cccxliii]) quanto em caixas de 305×305 mm quando o interesse é a interface com geossintéticos ou outros elementos construtivos (Padade & Mandal, 2014[cccxliv]). Ensaios em escala maior permitem que um número suficiente de células ou pérolas de EPS participe da zona de cisalhamento, o que torna os parâmetros obtidos mais representativos do comportamento em campo, especialmente quando se investiga intertravamento geométrico com geotêxteis ou geogrelhas (Padade & Mandal, 2014[cccxlv]; Zhou et al., 2025[cccxlvi]). Assim, a adoção de um ensaio de cisalhamento direto em caixa de grande porte, compatível com as recomendações da ASTM D5321[cccxlvii], reduz os efeitos de escala e de borda, abrange melhor as variações da superfície dos geossintéticos e dos materiais celulares e fornece parâmetros de resistência ao cisalhamento mais próximos do comportamento em escala de obra (Banyhussan et al., 2023[cccxlviii]; Zhou et al., 2025[cccxlix]; Cerato & Lutenegger, 2006[cccl]; Wasti, 2001[cccli]; Padade & Mandal, 2014[ccclii]; Wang & Gutierrez, 2010[cccliii]).

3.4.4 Avaliação dos parâmetros de interfaces EPS-EPS e EPS-Geomembranas

A definição confiável dos parâmetros de interface em sistemas EPS-EPS e EPS-geomembrana exige ir além da simples listagem de ângulos de atrito e adesões aparentes. Os resultados disponíveis mostram um quadro mais complexo do que a visão simplificada de "material celular friccional com ca≈0", o que exige uma leitura que considere, em conjunto, a compressibilidade, a rugosidade e a escala de ensaio.

Em blocos lisos, ensaiados em cisalhamento direto de pequena escala (100×100 mm), a resposta global do EPS é descrita por uma coesão equivalente que cresce com a densidade, enquanto o ângulo de atrito interno ou de interface varia pouco (Khan & Meguid, 2018[ccccliv]; Meguid & Khan, 2019[ccclv]). Interpretações que classificam o contato EPS-EPS como "majoritariamente friccional com adesão nula" desconsideram que a coesão mobilizada em ensaios monotônicos e de cisalhamento simples resulta da compressão progressiva da microestrutura celular e do travamento causado pelo colapso parcial das paredes das células, ou seja, de um mecanismo de adesão que surge do dano, e não de colagem química (Li et al., 2026[cccclvi]; Zou et al., 2025[cccclvii]).

Quando a superfície de contato é modificada por intertravamento geométrico (ledges e notches), o comportamento muda de forma qualitativa: o plano de cisalhamento deixa de ser aproximadamente plano, e o cisalhamento passa a induzir arrancamento e flexão das células nos ressaltos, transformando um contato essencialmente friccional em um sistema friccional-adesional, com surgimento de coesão de interface adicional e aumento sistemático do ângulo de atrito com o número de saliências (Özer & Akay, 2016[cccclviii]). Ignorar essa relação entre a geometria de encaixe e a "coesão equivalente" leva a modelos de Mohr-Coulomb que escondem o papel estrutural do desenho do bloco.

Em contrapartida, estudos que trataram a resistência de interfaces EPS-EPS ou EPS-solo por meio de envoltórias aproximadamente lineares, sem discutir a natureza bilinear das curvas de resistência em função de σn (regimes friccional e adesional em baixos e altos confinamentos), acabaram reunindo mecanismos distintos em um único par (c, ϕ) (Padade & Mandal, 2014[ccclix]; Atmatzidis et al., 2001[ccclx]). A literatura que apresenta envoltórias bilineares em interfaces geofoam-geossintético e geofoam-solo mostra essa transição: em baixos níveis de σn, a resistência se deve ao atrito e à microindentação; em níveis mais elevados, predomina a contribuição do esmagamento local e da ancoragem das células, gerando uma componente adesiva significativa (Atmatzidis et al., 2001[ccclxi]; Meguid & Khan, 2019[ccclxii]; Li et al., 2026[ccclxiii]). Uma avaliação rigorosa de interfaces EPS-EPS deve, portanto, separar faixas de σn e distinguir parâmetros "efetivos" por regime, em vez de reduzir todo o comportamento a um único par de Mohr-Coulomb.

Nos contatos EPS-geomembrana, a literatura é ainda mais escassa. Ensaios em EPS-geomembrana, EPS-geotêxtil e EPS-solo realizados em caixa grande (305×305 mm) mostraram ângulos de atrito aparentes entre 16° e 46° para interfaces geofoam-geomembrana, com influência modesta da densidade do EPS sobre ϕ e algum aumento de adesão com densidade (Padade & Mandal, 2014[ccclxiv]; Atmatzidis et al., 2001[ccclxv]). Por outro lado, estudos

de EPS-PVC e EPS-aço em caixas menores indicaram ângulos substancialmente inferiores aos verificados contra concreto, madeira ou areia, reforçando que superfícies poliméricas lisas representam planos preferenciais de escorregamento (Khan & Meguid, 2018[ccclxvi]; Özer & Akay, 2016[ccclxvii]; Padade & Mandal, 2014[ccclxviii]). Esses resultados convergem: superfícies de baixa rugosidade macroscópica em contato com a matriz celular compressível do EPS mobilizam pouco intertravamento e produzem quase exclusivamente atrito de deslizamento, com coesão de interface muito baixa.

A aplicação direta desses resultados a geomembranas lisas de PEAD é coerente do ponto de vista mecânico, mas ainda carece de uma base sistemática específica para EPS-PEAD: a maioria dos trabalhos com geomembranas de PEAD avaliou interfaces com solos e geotêxteis, nas quais o aumento da rugosidade induz ganhos de atrito muitas vezes superiores a 50% em relação ao PEAD liso, justamente por ativar dilatância e engrenamento nas asperidades. O meio técnico tem assumido, de forma implícita, que o mesmo raciocínio vale para o EPS, mas não foram encontrados estudos que separassem, na interface EPS-geomembrana, a contribuição da indentação das cristas na matriz celular e a do atrito puro na base lisa do polímero.

Além disso, grande parte dos programas experimentais sobre EPS em contato com materiais rígidos (concreto, aço, madeira, PVC) utilizou caixas de 100×100 mm e níveis de deformação relativamente modestos (Khan & Meguid, 2018[ccclxix]; Meguid & Khan, 2019[ccclxx]). Essas configurações tendem a favorecer um regime de cisalhamento dominado pela compressão quase uniforme da zona de contato, o que impede o desenvolvimento pleno de trilhas de aração, da flambagem das colunas de células e da ruptura extensa das paredes celulares, mecanismos que só atuam quando o deslocamento é comparável a vários diâmetros de pérolas e o plano de cisalhamento se propaga pelo bloco (Li et al., 2026[ccclxxi]; Zou et al., 2025[ccclxxii]; Neto & Bueno, 2012[ccclxxiii]). Em outras palavras, há uma distância metodológica entre o que se mede em laboratório e o que governa a ruptura em interfaces EPS-geomembrana na escala de um aterro.

Padade e Mandal (2014)[ccclxxiv] e Khan e Meguid (2019) [ccclxxv] mostraram, de forma convergente, que a densidade do EPS tem efeito mais pronunciado na coesão/adesão equivalente do que no ângulo de atrito, tanto para interfaces internas (EPS-EPS) quanto para interfaces com materiais lisos (PVC, aço). Em paralelo, Atmatzidis et al. (2001) [ccclxxvi] e Özer e Akay (2016[ccclxxvii]) mostraram que geometrias de intertravamento (asperezas ou ressaltos) podem transformar interfaces friccionais em sistemas com componente adesiva expressiva. Contudo, nenhum desses trabalhos foi concebido para estudar especificamente a interface

EPS-geomembrana de PEAD, lisa ou texturizada, do ponto de vista da penetração das cristas poliméricas na estrutura celular, em diferentes escalas de ensaio e percursos de deslocamento.

Foram identificadas três lacunas principais:

(i) ausência de programas comparativos entre EPS-geomembrana lisa e EPS-geomembrana texturizada em caixas de grande escala (cerca de 300×300 mm) que controlem o efeito de escala sobre a bilinearidade atrito/adesão;

(ii) inexistência de modelos constitutivos de interface que incorporem a evolução de coesão equivalente e rigidez tangencial com dano celular (colapso progressivo de paredes, reorientação de ligamentos) sob trajetórias monotônicas e cíclicas (Zou et al., 2025[cccclxxviii]; Li et al., 2026[cccclxxix]); e

(iii) escassez de estudos que correlacionem métricas quantitativas de rugosidade (altura e forma de asperidades, espaçamento, fração de área texturizada) com parâmetros de interface Mohr-Coulomb especificamente para EPS, à semelhança do que já se realizou em interfaces geomembrana-solo e geomembrana-geotêxtil.

Enquanto a literatura continuar a usar, sem análise crítica, parâmetros obtidos em caixas pequenas e em interfaces genéricas EPS-PVC ou EPS-aço no projeto de contatos EPS-geomembrana em taludes e bases de aterros, os modelos de estabilidade continuarão apoiados em coeficientes de segurança artificiais, e não em uma caracterização representativa do atrito. Foi justamente essa diferença entre o conhecimento detalhado do material EPS (Zou et al., 2025[cccclxxx]; Ge et al., 2022[cccclxxxi]; Li et al., 2026[cccclxxxii]) e a simplificação excessiva das suas interfaces com geomembranas que esta investigação buscou reduzir.

3.4.5 Avaliação dos parâmetros de interfaces EPS-Geotêxteis

A literatura que trata especificamente de interfaces EPS-geotêxtil é muito escassa quando comparada ao grande número de estudos sobre interfaces EPS-solo, EPS-geogrelha e EPS-concreto (Padade & Mandal, 2014[cccclxxxiii]; Meguid & Khan, 2019[cccclxxxiv]; Athanasopoulos et al., 2001[cccclxxxv]; Atmatzidis et al., 2001[cccclxxxvi]). Essa diferença não é por acaso: ela revela uma tendência histórica de priorizar mecanismos de interação com materiais granulares ou rígidos (areia, concreto, aço), em detrimento de matrizes fibrosas compressíveis, que são justamente as que mais se aproximam do comportamento real dos geotêxteis não tecidos de alta gramatura usados como separação ou proteção em contato com o geofoam.

Os resultados de Padade e Mandal[cccclxxxvii], obtidos em caixa de cisalhamento de grande escala (305×305 mm), indicaram que, para interfaces EPS-geotêxtil de juta e EPS-geogrelha,

a densidade do EPS (0,15 a 0,30 kN/m³) não provocou variações significativas no ângulo de atrito de interface, apenas um pequeno acréscimo na coesão aparente (Padade & Mandal, 2014[ccclxxxviii]). Em contrapartida, Khan e Meguid[ccclxxxix], com caixas menores (100×100 mm) e superfícies relativamente rígidas (areia, PVC), relataram aumento sistemático do ângulo de atrito de interface com a densidade do EPS, sobretudo para EPS-areia. A leitura conjunta desses resultados mostra que a "sensibilidade" da resistência da interface à densidade do EPS depende do mecanismo de deformação dominante: quando a ruptura ocorre por deslizamento planar com pouca penetração de asperezas (caso de geotêxteis macios e geogrelhas finas em caixa ampla), o aumento de rigidez do EPS praticamente não aparece nos resultados (Padade & Mandal, 2014[cccxc]); quando a interface opera com maior confinamento local e superfícies rígidas (areia, concreto, madeira, aço), a alta compressibilidade do EPS menos denso provoca maiores deformações verticais, o que reduz a capacidade de mobilizar engrenamento mecânico e, consequentemente, o ângulo de atrito (Meguid & Khan, 2019[cccxci]; Atmatzidis et al., 2001[cccxcii]).

O estudo de Atmatzidis et al. [cccxciii] ampliou esse quadro ao quantificar ângulos de atrito aparentes entre EPS e múltiplos geossintéticos (cinco geotêxteis, cinco geomembranas), mostrando que: (i) a faixa típica de φ_interface para EPS-geotêxteis se situa entre 21° e 34°; (ii) a densidade do EPS exerce influência pouco expressiva na inclinação da envoltória, embora possa alterar a componente adesiva em níveis de tensão normal próximos ao escoamento do geofoam (Atmatzidis et al., 2001[cccxciv]). Tal conclusão converge com a de Padade e Mandal (2014)[cccxcv] e contrasta com a dependência mais acentuada observada em interfaces EPS-concreto e EPS-areia (Meguid & Khan, 2019[cccxcvi]), revelando um comportamento duplo: interfaces EPS-geotêxtil tendem a ser governadas pelo atrito das fibras sobre a superfície celular comprimida, enquanto interfaces entre EPS e materiais rígidos são fortemente condicionadas pela deformabilidade volumétrica do EPS. Essa diferença de mecanismos expõe uma lacuna metodológica importante na avaliação dos parâmetros de interface EPS-geotêxteis. Em primeiro lugar, a maior parte dos estudos de interface EPS-geossintéticos ou utiliza caixas pequenas (cerca de 100×100 mm), nas quais o confinamento lateral artificial pode induzir modos de ruptura por rasgamento e confinamento indesejado do geotêxtil (Meguid & Khan, 2019[cccxcvii]), ou trata geotêxteis e geomembranas como grupos genéricos, sem diferenciar a compressibilidade e a espessura das mantas não tecidas (Atmatzidis et al., 2001[cccxcviii]). Em segundo lugar, raramente se avalia, de forma sistemática, a influência da gramatura, da estrutura das fibras e da rigidez à tração do geotêxtil sobre a forma da envoltória de ruptura, apesar de estudos de interface geossintético-solo mostrarem

que a texturização, a altura e o espaçamento de asperezas em geomembranas podem induzir variações superiores a 60% a 70% na resistência de pico (Fowmes et al., 2017[cccxcix]).

Dessa comparação entre os estudos resulta, portanto, um quadro claro: (i) há consenso quanto à possibilidade de representar as interfaces EPS-geotêxteis por uma envoltória de Mohr-Coulomb quase linear, com φ_interface moderado e coesão aparente sensível à compressão local (Padade & Mandal, 2014[cd]; Atmatzidis et al., 2001[cdi]); (ii) ainda não existe uma relação confiável e independente da escala que ligue, de modo direto, a densidade do EPS, a gramatura e a estrutura do geotêxtil e o nível de tensão normal, em condições representativas de serviço de obras de contenção e barreiras com geofoam. A avaliação rigorosa dos parâmetros de interface EPS-geotêxteis, no padrão de periódicos como Geotextiles and Geomembranes ou Geosynthetics International, exige, portanto, um programa experimental que deixe de lado a simples extrapolação de resultados EPS-solo e EPS-geomembrana (Meguid & Khan, 2019[cdii]; Athanasopoulos et al., 2001[cdiii]) e passe a tratar o par EPS-geotêxtil como um sistema próprio, em que a compressibilidade dos dois materiais, a espessura real da interface de contato e os efeitos de escala sejam quantificados.

3.4.6 Avaliação comparativa pico x pós pico

Interfaces em sistemas de contenção de resíduos apresentam pico a pequenos deslocamentos, seguido de redução progressiva da tensão cisalhante até um patamar residual, associada a polimento de geomembranas, ruptura e "penteamento" de fibras de geotêxteis e desgaste das asperezas (Lin et al., 2024[cdiv]; Gilbert & Byrne, 1996[cdv]; Ferreira et al., 2015[cdvi]; Khan & Latha, 2023[cdvii]). Em interfaces geomembrana lisa-geotêxtil não tecido, a resistência pós-pico continua decrescendo até grandes deslocamentos (metros), evidenciando que a estabilização residual pode ocorrer muito além do limite de 12,7 mm adotado em normas de cisalhamento direto (Liu et al., 2023[cdviii]). Ensaios de anel de cisalhamento mostraram que parte da perda de pico para grandes deslocamentos decorre principalmente do desgaste geomembrana/geotêxtil, enquanto a transição de grandes deslocamentos para residual é governada pelo rearranjo e ruptura progressiva das fibras paralelas ao cisalhamento (Lin et al., 2024[cdix]; Liu et al., 2023[cdx]).

Para interfaces com claro comportamento de strain-softening, diversos autores recomendam que a verificação de estabilidade adote, no mínimo, a resistência residual mobilizável ao longo de toda a interface crítica, com fator de segurança maior que 1, dada a elevada probabilidade de mobilização de grandes deslocamentos em aterros sanitários (Gilbert & Byrne, 1996[cdxi]; Thiel, 2023[cdxii]). Modelos constitutivos específicos e diagramas pós-pico

permitem representar o amolecimento e auxiliar na seleção de parâmetros de longo prazo em análises de equilíbrio limite e numéricas (Thiel, 2023[cdxiii]; Chang & Feng, 2022[cdxiv]). Estudos em interfaces solo-geofoam e solo-geossintéticos trataram explicitamente a sensitividade de interface (τ_pico/τ_residual) como indicador da severidade do strain-softening e do risco de degradação da capacidade resistente sob deslocamentos acumulados (Gilbert & Byrne, 1996[cdxv]).

Carregamentos cíclicos e repetidos podem alterar a rigidez e a resistência de interfaces, mas nem sempre conduzem à degradação da resistência de pico; em alguns casos há aumento por densificação do solo adjacente (Ferreira et al., 2016[cdxvi]). Em interfaces GCL-areia ou GCL-geomembrana, ciclos de cisalhamento e envelhecimento promovem ruptura progressiva de fibras e perda de resistência após múltiplos ciclos, evidenciando risco de aproximação ao regime residual em operação (Ferreira et al., 2015[cdxvii]). Ensaios em condições termo-hidro-mecânicas variáveis (hidratação, temperatura) mostraram que a resistência de pico e a de grandes deslocamentos podem diminuir de forma marcada com o aumento da temperatura e da hidratação, atenuando o strain-softening observado a temperatura ambiente, mas também diminuindo o nível absoluto de resistência disponível (Hou et al., 2023[cdxviii]; He et al., 2024[cdxix]).

Estudos analíticos e numéricos indicaram que deformações gravitacionais do maciço de resíduos são suficientes, em muitos casos, para limitar a resistência disponível na interface a valores inferiores ao pico, aproximando-a da pós-pico/residual (Gilbert & Byrne, 1996[cdxx]; Thiel, 2024[cdxxi]; Liu et al., 2023[cdxxii]). Ignorar essa transição e usar indiscriminadamente parâmetros de pico em taludes de aterros e sistemas de revestimento pode levar a fatores de segurança artificialmente elevados e a uma avaliação irreal da estabilidade (Gilbert & Byrne, 1996[cdxxiii]; Thiel, 2024[cdxxiv]; Chang & Feng, 2022[cdxxv]). Abordagens modernas enfatizam a necessidade de integrar (Lin et al., 2024[cdxxvi]; Thiel, 2024[cdxxvii]; Khan & Latha, 2023[cdxxviii]): (i) parâmetros residuais medidos com grandes deslocamentos; (ii) variabilidade associada à fabricação/instalação; e (iii) mecanismos micromecânicos de degradação, na definição de envoltórias de resistência de longo prazo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Ensaios laboratoriais

4.1.1 Materiais Empregados

Foram utilizados os seguintes materiais:

- Equipamento de ensaio de cisalhamento direto em larga escala (30 × 30 cm), conforme a ABNT NBR ISO 12957-1[cdxxix] (2013);
- Geomembranas (GM) lisas e texturizadas do tipo matriz balão, com 2,00 mm de espessura, de polietileno de alta densidade (PEAD), como apresentado nas Figuras 12 e 13;
- Geotêxteis não tecidos de poliéster (PET), com gramaturas de 300, 400, 500 e 600 g/m², e de polipropileno (PP), com gramaturas de 300 e 600 g/m², como apresentado nas Figuras 14, 15 e 16;
- Geoexpandido em diferentes densidades (20 kg/m³, 25 kg/m³ e 30 kg/m³), como apresentado nas Figuras 17, 18 e 19.

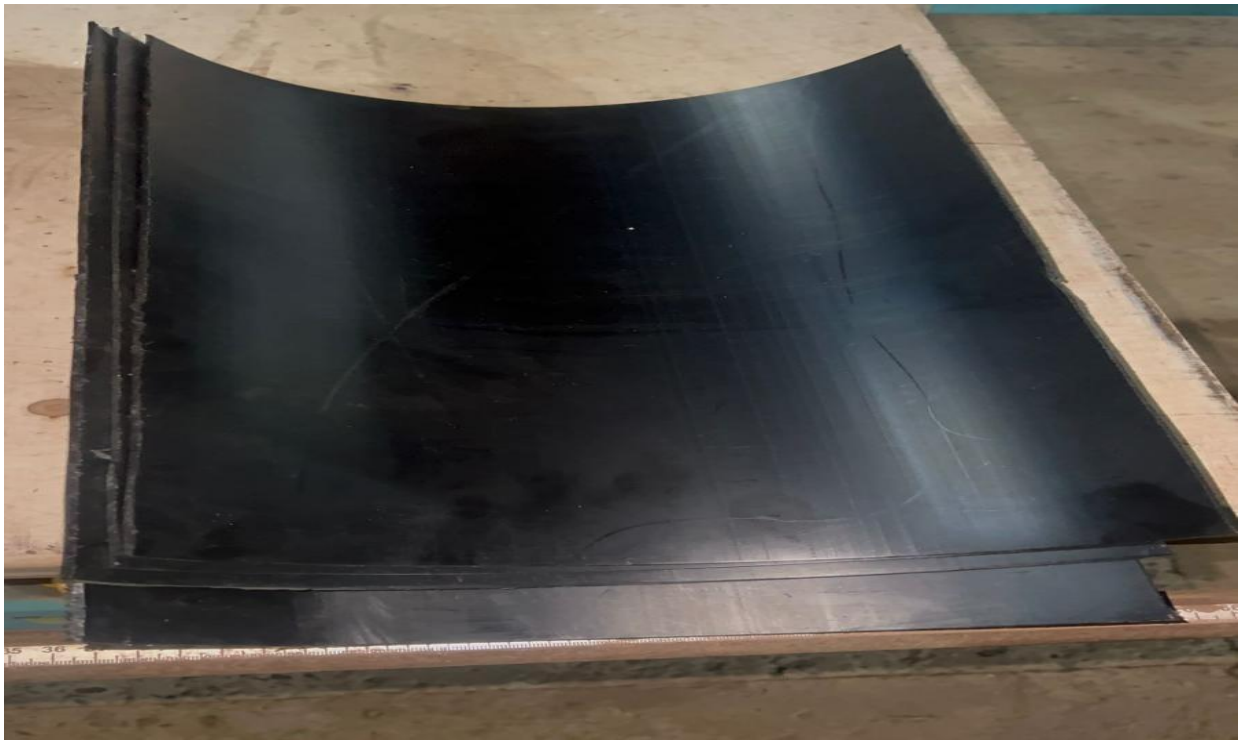
Materiais adicionais foram utilizados para adaptações, conforme apresentado nas Figuras 20 e 21, sendo eles: tesouras, serrotes para cortes manuais, grampo sargento, serras e madeiras para nivelamento.

Figura 12 – Rolo de geomembrana lisa PEAD



Fonte: Autor (2026).

Figura 13 – Geomembrana sendo moldada para encaixe no equipamento de cisalhamento direto



Fonte: Autor (2026).

Figura 14 – Geotêxtil tipo PET de gramatura 300 g/m²



Fonte: Autor (2026).

Figura 15 – Geotêxtil tipo PP de gramatura 300 g/m²



Fonte: Autor (2026).

Figura 16 – Rolos de geotêxtil para realizar adaptação ao tamanho do equipamento utilizado



Fonte: Autor (2026).

Figura 17 – Placa de identificação de lâmina de geoexpandido de densidade 20 kg/m³ (E-20)



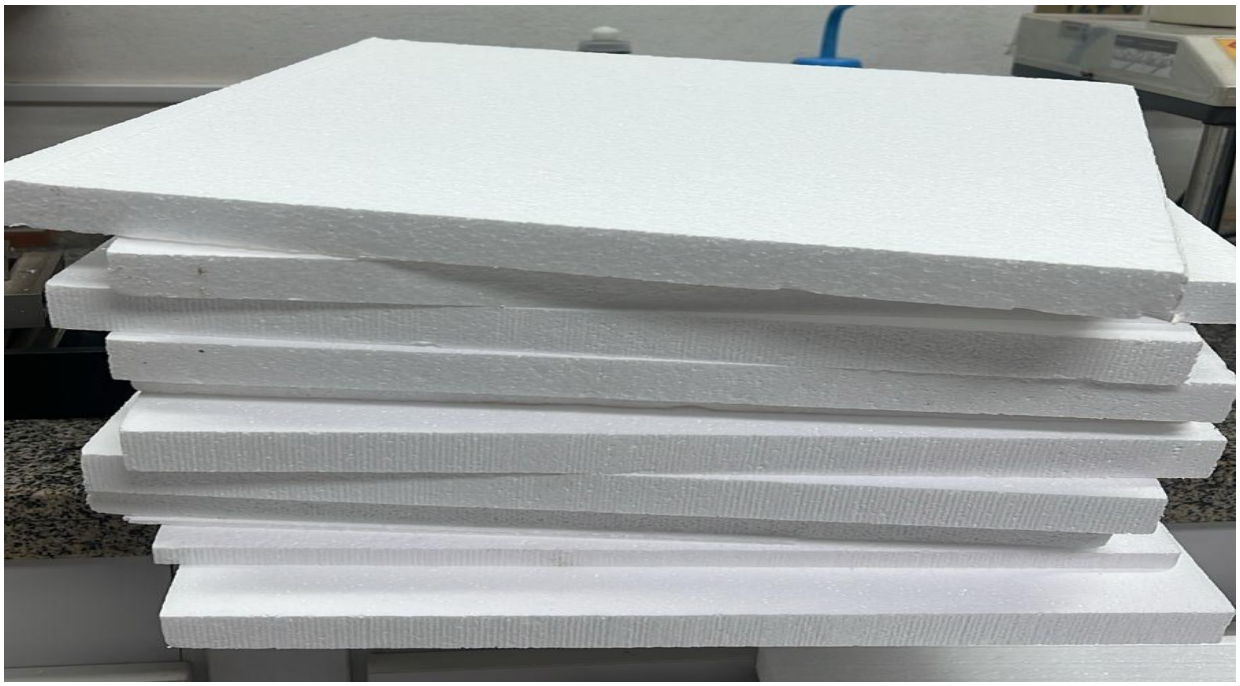
Fonte: Autor (2026).

Figura 18 – Lâmina de variadas densidades incluindo uma amostra E-25 (30 kg/m³) destacada



Fonte: Autor (2026).

Figura 19 – Lâminas de variadas densidades prontas para ser ensaiadas



Fonte: Autor (2026).

Figura 20 – Moldagem massiva de amostras, especificamente geotêxtil tipo PET



Fonte: Autor (2026).

Figura 21 – Ferramentas utilizadas em processo de moldagem dos materiais citados



Fonte: Autor (2026).

4.1.2 Caracterização dos materiais

A definição precisa das propriedades físicas, mecânicas e geométricas dos materiais empregados nesta pesquisa foi uma premissa fundamental para garantir a confiabilidade dos ensaios e das análises seguintes. Com o propósito de estabelecer uma base de dados consistente, a caracterização técnica consistiu em levantar as propriedades nominais e os parâmetros de controle de qualidade informados nos catálogos técnicos e nas fichas de especificação dos fabricantes, que refletem os limites de conformidade industrial e as diretrizes de produção em fábrica.

4.1.2.1 Poliestireno expandido - EPS

As propriedades geométricas do EPS, sua densidade[2] e a espessura das lâminas são parâmetros fundamentais para garantir sua utilização eficiente em diversas aplicações, como proteção contra vibrações, isolamento térmico e até mesmo em geotecnia, onde seu comportamento mecânico e sua interação com outros materiais geossintéticos como geomembranas e geotêxteis são cruciais.

[2] A densidade do geoexpandido, quando apresentada, foi representada pela letra grega ρ e acompanhada das unidades de medida habitualmente utilizadas para massas específicas. Apesar de serem conceitos distintos, essa simplificação buscou aproximar a pesquisa da linguagem mais usual no meio comercial.

Em virtude da indisponibilidade do catálogo do fabricante, realizou-se uma compilação de dados na literatura especializada para determinar os valores médios aceitáveis para os parâmetros físicos, químicos, mecânicos e hidráulicos do material. Esse levantamento teve como propósito estabelecer indicadores de referência para as amostras avaliadas nos ensaios subsequentes.

Massa específica aparente (ρ): valores de 20 a 30 kg/m³ correspondem a categorias usuais de geofoam (D-20/D-30) e às classes EPS 70 a EPS 200 (Chun et al., 2004[cdxxx]; Abdelrahman et al., 2008[cdxxxi]; Khalaj et al., 2020[cdxxxii]).

- Resistência à compressão a 10% (σ10): a tabela de Khalaj et al.[cdxxxiii] para EPS de 13,5 a 28 kg/m³ apresentou valores de 70, 110, 135 e 200 kPa (Khalaj et al., 2020[cdxxxiv]). Logo, para a faixa de 20 a 30 kg/m³, valores típicos de 70, 110, 135 e 200 kPa são coerentes. Os valores médios estabelecidos, de 85, 125 e 190 kPa, estão dentro dessa faixa (foram adotados: EPS 20: 70 a 90 kPa; EPS 25: 100 a 130 kPa; EPS 30: 150 a 200 kPa) (Khalaj et al., 2020[cdxxxv]; SohrabVeiseh & Yousefi, 2021[cdxxxvi]).

- Módulo de elasticidade (E): estudos triaxiais e de pequenas deformações mostraram E inicial crescente com a densidade, da ordem de alguns MPa para 20 a 30 kg/m³ (Chun et al., 2004[cdxxxvii]; Abdelrahman et al., 2008[cdxxxviii]; Khalaj et al., 2020[cdxxxix]). Valores de 5, 7 e 10,5 MPa foram considerados plausíveis como módulo inicial.

- Resistência ao cisalhamento / G: o trabalho dinâmico de Ghazavi et al[cdxl]. mostrou G da ordem de centenas de kPa a poucos MPa na faixa de densidades de 13,6 a 31,3 kg/m³, com G aumentando com a densidade (Ghazavi et al., 2025[cdxli]). Os valores G = 2,4; 3,0 e 4,3 MPa são coerentes como módulo de cisalhamento máximo em pequenas deformações; é importante ressaltar que esses valores são obtidos em regime elástico inicial (Ghazavi et al., 2025[cdxlii]; Abdelrahman et al., 2008[cdxliii]).

- ν (Poisson): ensaios de pequenas deformações em D-20 e D-30 mostraram ν0 pequeno e dependente da tensão confinante, com valores iniciais baixos que podem crescer em deformação inelástica (Abdelrahman et al., 2008[cdxliv]; Chun et al., 2004[cdxlv]). A faixa de 0,10 a 0,15 é plausível como ν inicial em pequenas deformações.

- Absorção de água (7 dias / 1 ano): Ramli Sulong et al[cdxlvi]. apresentaram dados de absorção volumétrica para 15, 20, 25 e 30 kg/m³: em 7 dias, cerca de 3,0 / 2,3 / 2,2 / 2,0 %; em 1 ano, cerca de 5,0/ 4,0 / 3,8 / 3,5 % (Sulong et al., 2019[cdxlvii]). Os valores adotados neste trabalho (20 kg/m³: 2,3 e 4,0; 25 kg/m³: 2,2 e 3,8; 30 kg/m³: 2,0 e 3,5) coincidem com esses dados (Sulong et al., 2019[cdxlviii]). A absorção em 24 h foi considerada de 2% a 3% em volume.

• Permeabilidade ao vapor e μ: a mesma referência apresentou, para EPS de diferentes classes, μ de 20 a 40 (EPS 70) e de 30 a 70 (EPS 100 a 150), com permeabilidade δ de 0,006 a 0,030 mg·Pa^{-1}·h^{-1}·m^{-1} (Sulong et al., 2019[cdxlix]). Os valores μ = 35, 50 e 70, com δ decrescendo com a densidade, são coerentes com essas faixas (Sulong et al., 2019[cdl]).

• Absorção de água por capilaridade próxima de zero: compatível com estrutura de células fechadas, embora sempre haja pequena absorção por canais intersticiais (Sulong et al., 2019[cdli]).

• Resistência química, fungos/bactérias, insolubilidade em água: os dados coincidem com compilações que indicam o EPS como resistente à água, soluções alcalinas e ácidos diluídos, e não nutritivo a microrganismos, mas sensível a muitos solventes orgânicos (Sulong et al., 2019[cdlii]).

• Condutividade térmica λ: trabalhos com EPS de baixa densidade (cerca de 15 a 20 kg/m³) e produtos comerciais relataram λ de 0,032 a 0,040 W/(m·K), decrescendo com o aumento da densidade até certo ponto (SohrabVeiseh & Yousefi, 2021[cdliii]; Simpson et al., 2020[cdliv]). Os valores adotados (de 0,036 a 0,033 W/(m·K) a 10 °C e de 0,032 a 0,029 W/(m·K) a 0 °C) estão dentro da faixa típica.

A Tabela 7 reúne os valores e as referências [3] citadas acima para facilitar a visualização e o entendimento das propriedades.

[3] A tabela foi elaborada com base em uma literatura ainda mais extensa; as referências incluídas na tabela são apenas as mais representativas para a faixa de valores adotados em cada classe.

Tabela 7 – Valores e literaturas que corroboram os parâmetros do EPS

Propriedade / Parâmetro	Valores Estabelecidos	Literatura de Referência
Massa específica aparente	20, 25 e 30 kg/m³	Chun et al. (2004)[cdlv]; Abdelrahman et al. (2008)[cdlvi]; Khalaj et al. (2020)[cdlvii]
Resistência à compressão a 10%	Faixa típica geral: ~70–200 kPa (para 13,5–28 kg/m³)	Khalaj et al. (2020)[cdlviii]; SohrabVeiseh & Yousefi [cdlix](2021)
Módulo de elasticidade inicial	Ordem de alguns MPa (crescente com a densidade na faixa de 20–30 kg/m³)	Chun et al. (2004)[cdlx]; Abdelrahman et al. (2008)[cdlxi]; Khalaj et al. (2020)[cdlxii]
Módulo de cisalhamento máximo	Ordem de centenas de kPa a poucos MPa (na faixa de 13,6–31,3 kg/m³)	Ghazavi et al. (2025)[cdlxiii]; Abdelrahman et al. (2008)[cdlxiv]
Coeficiente de Poisson inicial *(Pequenas deformações)*	Faixa de 0,10–0,15 *(Dependente da tensão confinante; valores iniciais baixos com crescimento em deformação inelástica)*	Abdelrahman et al. (2008)[cdlxv]; Chun et al. (2004)[cdlxvi]
Absorção de água volumétrica	**Em 24 horas:** 2–3% vol. **Em 7 dias:** 3,0% (15 kg/m³) / 2,3% (20 kg/m³) / 2,2% (25 kg/m³) / 2,0% (30 kg/m³) **Em 1 ano:** 5,0% (15 kg/m³) / 4,0% (20 kg/m³) / 3,8% (25 kg/m³) / 3,5% (30 kg/m³)	Sulong et al. (2019)[cdlxvii]
Fator de resistência à difusão do vapor	Faixa geral: 20–40 (EPS 70) e 30–70 (EPS 100–150)	Sulong et al. (2019)[cdlxviii]
Permeabilidade ao vapor	0,006–0,030 mg·Pa⁻¹·h⁻¹·m⁻¹ *(Valor decrescente com o aumento da densidade)*	Sulong et al. (2019)[cdlxix]
Absorção de água por capilaridade	aproximadamente 0 *(Compatível com estrutura de células fechadas, ocorrendo pequena absorção residual por canais intersticiais)*	Sulong et al. (2019)[cdlxx]
Resistência química e biológica	Material insolúvel em água; resistente a água, soluções alcalinas e ácidos diluídos; não nutritivo a microrganismos (fungos/bactérias). Sensível a diversos solventes orgânicos.	Sulong et al. (2019)[cdlxxi]
Condutividade térmica	Faixa típica (~15–20 kg/m³): aproximadamente 0,032–0,040 W/(m·K)	SohrabVeiseh & Yousefi (2021)[cdlxxii]; Simpson et al. (2020)[cdlxxiii]

Fonte: Autor (2026) baseado em literaturas de referência sobre o tema.

Com a Tabela 7 como referência e com avaliações complementares, a Tabela 8 buscou definir valores considerados razoáveis por meio do cruzamento de informações da literatura e das normas vigentes. Ainda que não sejam valores medidos experimentalmente, eles têm considerável confiabilidade, devido ao rigor técnico do processo de elaboração, que avaliou diferentes fontes e comparou informações.

Tabela 8 – Valores médios (possíveis de adoção) baseados na literatura para caracterização do EPS

Propriedades	Unidades	EPS 20 kg/m³	EPS 25 kg/m³	EPS 30 kg/m³	Norma / Método de Referência
Massa específica aparente (ρ)	kg/m³	20	25	30	NBR 11949 [cdlxxiv] / ASTM D1622[cdlxxv] / EN 1602[cdlxxvi]
Composição (ar / poliestireno)	% vol.	98 / 2	98 / 2	97 / 3	—
Fórmula química do polímero base	—	$(C_8H_8)_n$	$(C_8H_8)_n$	$(C_8H_8)_n$	—
Tamanho médio de célula	mm	0,05–0,10	0,05–0,10	0,03–0,08	Microscopia (SEM)
Resistência à compressão (10% deformação)	kPa	85	125	190	NBR 8082[cdlxxvii] / ASTM D1621[cdlxxviii] / EN 826[cdlxxix]
Resistência à compressão (1% deformação)	kPa	35[4]	55	85	ASTM D6817[cdlxxx]
Resistência à flexão	kPa	180	220	300	ASTM C203[cdlxxxi] / EN 12089
Resistência à tração	kPa	125	135	175	ASTM D1623[cdlxxxii]
Resistência ao cisalhamento	kPa	150	190	240	ASTM D732[cdlxxxiii] / ASTM C273[cdlxxxiv]
Módulo de cisalhamento (G)	MPa	2,4	3,0	4,3	ASTM D732[cdlxxxv]
Módulo de elasticidade / Young (E) – curto prazo	MPa	5,0	7,0	10,5	ASTM D1621[cdlxxxvi] / EN 826[cdlxxxvii]
Coeficiente de Poisson (ν)	—	0,10	0,12	0,15	Ensaio triaxial
Deformação no limite elástico	%	1,0–1,5	1,0–1,5	1,0–1,5	ASTM D6817 [cdlxxxviii]
Coeficiente de atrito (μ) – face moldada	—	0,5	0,5	0,5	—
Condutividade térmica (λ) a 10 °C	W/(m·K)	0,036	0,034	0,033	NBR 12094[cdlxxxix] / EN 12667[cdxc]
Condutividade térmica (λ) a 0 °C	W/(m·K)	0,032	0,030	0,029	IS 3346[cdxci]
Calor específico (c)	J/(kg·K)	1300	1300	1300	ISO 10456[cdxcii]
Difusividade térmica (α)	mm²/s	1,38	1,05	0,85	$\alpha = \lambda/(\rho \cdot c)$
Resistência térmica (R) – e=25,4 mm	m²·K/W	0,67	0,70	0,74	ASTM C518[cdxciii]
Coeficiente de dilatação térmica linear	10^{-5} /°C	6,0	6,0	6,0	ASTM D696[cdxciv]
Temperatura máx. de uso contínuo	°C	75	75	75	—
Temperatura máx. de uso intermitente	°C	80	80	80	—
Estabilidade dimensional	%	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0	ASTM D2126[cdxcv] / EN 1603[cdxcvi]
Absorção de água por imersão (24 h)	% vol.	3,0	2,5	2,0	NBR 7973[cdxcvii] / ASTM C272[cdxcviii] / EN 12087[cdxcix]
Absorção de água por capilaridade	%	≈ 0 (nula)	≈ 0 (nula)	≈ 0 (nula)	—
Permeabilidade ao vapor d'água (δ)	ng/(Pa·s·m)	6,0	4,5	3,5	NBR 8081[d] / EN 12086[di]
Fator de resistência à difusão de vapor (μ)	—	35	50	70	EN 12086[dii]
Permeância ao vapor (e=25,4 mm)	perm·in	2,5	2,0	1,3	ASTM E96[diii]

[4] É necessário ressaltar que, para as tensões de ensaio de 44 e 55 kPa (acima de 35 kPa), é possível que o EPS 20 (E-20) tenha apresentado características de plastificação, devido à tensão acima do limite de deformação elástica do material.

Propriedades	Unidades	EPS 20 kg/m³	EPS 25 kg/m³	EPS 30 kg/m³	Norma / Método de Referência
Constante dielétrica (100–400 MHz)	—	1,02–1,03	1,03	1,03–1,04	—
Rigidez dielétrica	kV/mm	2,0	2,0	2,0	—
Índice de oxigênio (LOI)	%	24	24	24	ASTM D2863[div]
Classe de reação ao fogo (retardante)	—	E (F)	E (F)	E (F)	NBR 11948[dv] / EN 13501-1[dvi]
Coeficiente de absorção sonora (α, 250–2000 Hz)	—	0,05–0,15	0,05–0,15	0,05–0,15	ISO 354[dvii]
Solubilidade em água	—	Insolúvel	Insolúvel	Insolúvel	—
Resistência química	—	Resistente a álcalis, ácidos diluídos, água; atacado por solventes orgânicos (hidrocarbonetos, cetonas)			
Resistência a fungos/bactérias	—	Inerte	Inerte	Inerte	ASTM C1338[dviii]
Vida útil estimada	anos	≥ 100	≥ 100	≥ 100	-

Fonte: Autor (2026).

4.1.2.2 Geomembranas Lisas e Texturizadas

As geomembranas empregadas neste estudo foram cedidas pelo laboratório da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB - Unesp), provenientes de um lote sem especificação do fabricante. Contudo, ressalta-se que Costa Júnior (2020[dix]) utilizou amostras oriundas do mesmo lote em sua pesquisa, realizando a caracterização técnica do material. Dessa forma, o presente trabalho adotou os parâmetros relatados na literatura pelo referido autor, cujos dados de caracterização são apresentados a seguir.

Com o intuito de resumir as diversas caracterizações[5] (tabelas 19, 20, 21, 22, 23 e 24, contidas no Apêndice A deste documento), apresenta-se a seguir a Tabela 9, que reúne as médias dos resultados obtidos pelo autor.

Tabela 9 – Síntese dos dados médios obtidos por Costa Júnior (2020)[dx] após caracterização de diversas amostras.

Propriedade / Ensaio	Norma de Referência	GM LISA	GM TXT-AR
Espessura (mm)	ASTM D5199[dxi] / D5994[dxii]	1,87	2,11
Altura da aspereza (mm)	ASTM D7466[dxiii]	N/A[6]	0,352
Resistência ao escoamento (kN/m)	ASTM D6693[dxiv]	34,34	39,09
Deformação no escoamento (%)	ASTM D6693[dxv]	14,96	14,27
Resistência à ruptura (kN/m)	ASTM D6693[dxvi]	59,81	41,26
Deformação na ruptura (%)	ASTM D6693[dxvii]	821,12	430,92
Resistência à perfuração (N)	ASTM D4833[dxviii]	774,00	851,00
Resistência ao rasgo (N)	ASTM D1004[dxix]	290,16	366,46

Fonte: Autor (2026) baseado na literatura Costa Júnior (2020)[dxx].

[5] Todas as tabelas referentes à caracterização do autor estão completas e detalhadas no APÊNDICE A deste trabalho.
[6] N/A = Não se aplica, por se tratar de material de face lisa.

4.1.2.3 Geotêxteis PET

Os geotêxteis utilizados nos ensaios foram fornecidos pela marca OBER[dxxi]. A Tabela 10, apresentada a seguir, reúne os dados do fabricante referentes aos geotêxteis do tipo PP para as gramaturas 300 g/m² (GH 16), 400 g/m² (GH 21), 500 g/m² (GH 26) e 600 g/m² (GH 31).

Tabela 10 – Tabela com características físicas, mecânicas, hidráulicas, de durabilidade e de bobinas: propriedades declaradas pela OBER[dxxii] [7] associadas à normativa vigente para GH 16 (300 g/m²), GH 21 (400 g/m²), GH 26 (500 g/m²) e GF 31 (600 g/m²)

Propriedade	Norma	Unidade	GH 16 / 300 g/m²	GH 21 / 400 g/m²	GH 26 / 500 g/m²	GH 31 / 600 g/m²
FÍSICAS						
Gramatura	ASTM D 5261[dxxiii]	g/m²	300	400	500	600
Espessura	ASTM D 5199[dxxiv]	mm	2,9	3,3	3,8	4,2
Cor	—	—	Cinza	Cinza	Cinza	Cinza
Composição	—	—	100% PET	100% PET	100% PET	100% PET
MECÂNICAS						
Tração faixa larga transversal	ASTM D 4595[dxxv]	kN/m	16	21	26	31
Alongamento transversal	ASTM D 4595[dxxvi]	%	>50	>50	>50	>50
Tração faixa larga longitudinal	ASTM D 4595[dxxvii]	kN/m	14	19	24	29
Alongamento longitudinal	ASTM D 4595[dxxviii]	%	>50	>50	>50	>50
Puncionamento (haste)	ASTM D 4833[dxxix]	N	465	590	710	835
Puncionamento CBR	**ABNT NBR ISO 12236**[dxxx]	kN	2,8	3,7	4,6	5,5
Rasgo trapezoidal L	ASTM D 4533[dxxxi]	N	50	660	815	970
Rasgo trapezoidal T	ASTM D 4533[dxxxii]	N	460	600	740	885
HIDRÁULICAS						
Abertura de filtração O95	ASTM D 6767[dxxxiii]	µm	80	63	47	30
Permeabilidade normal	ASTM D 4491[dxxxiv]	cm/s	0,38	0,34	0,34	0,34
Permissividade	ASTM D 4491[dxxxv]	s^{-1}	1,50	1,15	0,90	0,80
DURABILIDADE						
Resistência UV 500h	ASTM D 4355[dxxxvi]	% retenção	>70	>70	>70	>70
Ponto de fusão	—	°C	260	260	260	260
BOBINAS						
Comprimento	—	m	100	100	50	50
Largura	—	m	2,30 e 4,60	2,30 e 4,60	2,30 e 4,60	2,30 e 4,60

Fonte: Autor (2026) baseado no catálogo do fabricante OBER (2021)[dxxxvii].

[7] Em casos de catálogos gerais, recomenda-se entrar em contato com o fabricante, com o número do lote em mãos, para verificar possíveis divergências nos dados apresentados quando há necessidade de alto rigor no emprego do material.

4.1.2.4 Geotêxteis PP

Os geotêxteis utilizados nos ensaios foram fornecidos pela marca OBER[dxxxviii]. A Tabela 11, apresentada a seguir, reúne os dados do fabricante referentes aos geotêxteis do tipo PP para as gramaturas 300 g/m² (GF 16) e 600 g/m² (GF 31).

Tabela 11 – Tabela com características físicas, mecânicas, hidráulicas, de durabilidade e de bobinas: propriedades declaradas pela OBER[dxxxix] [8] associadas à normativa vigente para GF 16 (300 g/m²) e GF 31 (600 g/m²)

Propriedade	Norma (catálogo OBER 2021)	Unidade	GF 16 / 300 g/m²	GF 31 / 600 g/m²
FÍSICAS				
Gramatura nominal	ASTM D 5261[dxl]	g/m²	300	600
Espessura nominal (confinamento não declarado)	ASTM D 5199[dxli]	mm	2,9	4,2
Cor	–	–	Cinza	Cinza
Composição	–	–	100% PP (fibras de alta tenacidade, extrusão própria, aditivado UV)	100% PP (idem)
MECÂNICAS				
Tração faixa larga – Transversal (T)	ASTM D 4595[dxlii]	kN/m	16	31
Tração faixa larga – Longitudinal (L)	ASTM D 4595[dxliii]	kN/m	14	29
Alongamento na ruptura (T e L)	ASTM D 4595[dxliv]	%	> 50	> 50
Puncionamento (haste)	ASTM D 4833[dxlv]	N	405	835
Puncionamento CBR	ABNT NBR ISO 12236[dxlvi]	kN	2,3	5,5
Rasgo trapezoidal L	ASTM D 4533[dxlvii]	N	425	970
Rasgo trapezoidal T	ASTM D 4533[dxlviii]	N	390	885
HIDRÁULICAS				
Abertura de filtração O95	ASTM D 6767[dxlix]	µm	88	30
Permeabilidade normal ao plano	ASTM D 4491[dl]	cm/s	0,43	0,34
Permissividade	ASTM D 4491[dli]	s^{-1}	1,75	0,8
DURABILIDADE				
Resistência UV após 500 h	ASTM D 4355[dlii]	% retenção	> 70	> 70
BOBINAS				
Largura	–	m	2,30 ou 4,60	2,30 ou 4,60
Comprimento	–	m	100	50

Fonte: Autor (2026) baseado no catálogo do fabricante OBER (2021)[dliii].

Cabe uma observação importante sobre o catálogo citado: a OBER[dliv] declara apenas o puncionamento CBR pela norma brasileira (ABNT NBR ISO 12236[dlv]). Tração, alongamento, espessura, permeabilidade, permissividade, O95, UV-500 h e rasgo são declarados por normas

[8] Em casos de catálogos gerais, recomenda-se entrar em contato com o fabricante, com o número do lote em mãos, para verificar possíveis divergências nos dados apresentados quando há necessidade de alto rigor no emprego do material.

ASTM. Não há declaração pela NBR ISO 10319[dlvi] (tração) nem pela NBR ISO 12956[dlvii] (abertura característica O90) no catálogo.

4.2 Metodologia de ensaio

4.2.1 Estrutura do ensaio

Para a determinação da resistência de interface, foram realizados ensaios de cisalhamento direto no equipamento com caixa de seção 30 × 30 cm. Para tanto, foi seguida a recomendação da norma ABNT NBR ISO 12957-1 (2013)[dlviii]. As tensões normais definidas para a primeira fase de ensaio (interfaces EPS-EPS e EPS-geomembrana PEAD lisa e texturizada) foram: 11 kPa, 22 kPa, 33 kPa, 44 kPa e 55 kPa. Em relação à segunda fase, que envolveu EPS-geotêxteis, foi definido um critério de parada mais longo (20 mm) e, devido à duração do ensaio e às tensões usuais, adotou-se a mudança para três tensões: 11 kPa, 22 kPa e 33 kPa. A velocidade de cisalhamento foi definida em 0,2 mm/min, para obter ângulos de atrito mais conservadores do que a maioria dos resultados da literatura (1 mm/min como referência) e garantir resultados a favor da segurança.

O critério para definir o valor de pico foi baseado na literatura, segundo a qual a maioria dos picos ocorre entre 5 e 8 mm de deslocamento. No presente estudo, os picos ocorreram por volta de 6 mm, o que forneceu um bom parâmetro para todos os casos. Assim, adotou-se o deslocamento de 6 mm, tomando a maior leitura registrada no ensaio para definir o valor de pico.

Em relação ao valor de pós-pico, foi considerado o deslocamento máximo obtido, ou seja, 12 mm para a fase experimental 1 e 20 mm para a fase experimental 2, com o intuito de avaliar a perda de resistência no pós-pico.

4.2.2 Cronograma dos ensaios

A fase dos ensaios foi estruturada com a definição das densidades dos materiais e das combinações de interface a serem utilizadas no ensaio de cisalhamento direto em amostras de 300 mm x 300 mm. Após essa definição, foram estabelecidas as combinações de materiais para os testes, descritas a seguir.

O programa experimental de cisalhamento direto foi dividido em arranjos de interação envolvendo contatos homogêneos, entre blocos de poliestireno expandido (EPS), e contatos heterogêneos, formados pelo EPS em contato com diferentes tipos de geossintéticos (geomembranas e geotêxteis).

Para as análises das interfaces exclusivas de EPS, adotaram-se painéis com massas específicas aparentes nominais de 20 kg/m³ (E-20), 25 kg/m³ (E-25) e 30 kg/m³ (E-30). As combinações avaliadas abrangeram tanto arranjos entre painéis de mesma densidade (E-20 x E-20, E-25 x E-25 e E-30 x E-30) quanto arranjos mistos (E-20 x E-25, E-20 x E-30 e E-25 x E-30), permitindo a investigação do comportamento mecânico sob diferentes condições de rigidez de contato.

No caso das interfaces formadas por EPS e geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), as três classes de densidade do geofoam (E-20, E-25 e E-30) foram ensaiadas contra duas variantes do geossintético. O escopo abrangeu o cisalhamento contra uma geomembrana de face lisa e contra uma geomembrana texturizada (produzida por processo de matriz balão), totalizando seis configurações distintas nesta etapa.

Em uma fase subsequente, determinou-se a resistência ao cisalhamento das interfaces formadas entre o geofoam e mantas geotêxteis. Para esta análise, foram empregados geotêxteis de poliéster (PET) com gramaturas de 300, 400, 500 e 600 g/m², bem como geotêxteis de polipropileno (PP) nas gramaturas de 300 e 600 g/m². Todas as variações de polímero e de gramatura dos geotêxteis foram combinadas e testadas contra as três densidades do EPS (E-20, E-25 e E-30), compondo a totalidade da matriz de ensaios proposta para a pesquisa.

4.2.3 Procedimentos experimentais

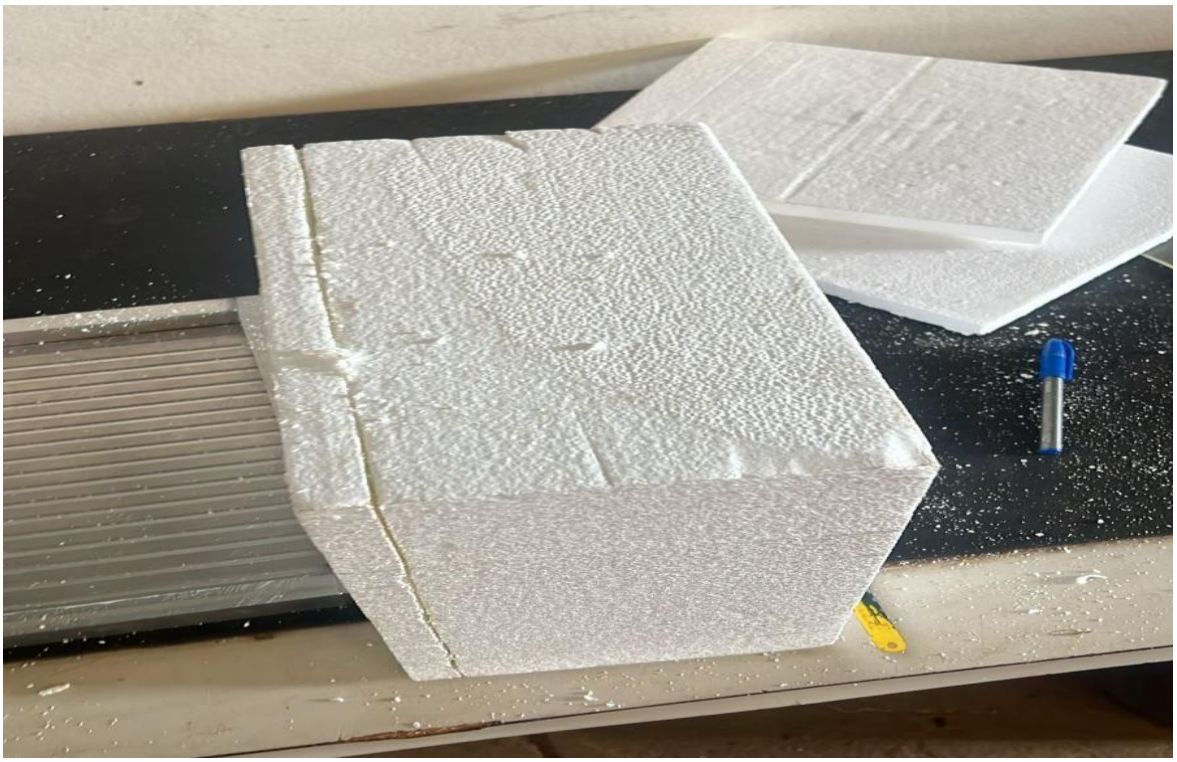
Os ensaios foram conduzidos no laboratório da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FEB/Unesp). Para garantir a precisão dos experimentos, os blocos de EPS foram cuidadosamente moldados em bancada, conforme ilustrado nas Figuras 22 e 23. A preparação das amostras seguiu as dimensões do berço da máquina de cisalhamento, assegurando que os corpos de prova se ajustassem ao equipamento.

Figura 22 – Moldagem dos blocos de poliestireno expandido por laminação



Fonte: Autor (2026).

Figura 23 – Moldagem do bloco, envolvendo corte nas dimensões da máquina



Fonte: Autor (2026).

O processo de moldagem envolveu o corte em bancada, o que pode causar ondulações na interface. Com o intuito de minimizar esses efeitos, foram utilizadas na interface apenas as faces superiores dos blocos, que haviam sido cortadas eletronicamente antes da chegada ao laboratório; a face oposta foi utilizada para a aplicação da carga por meio da placa. Para os ensaios posteriores, realizados nas interfaces EPS-geotêxtil PP e PET, adotou-se o corte eletrônico total em ambas as faces (Figura 24), com o intuito de minimizar as perturbações decorrentes das irregularidades do corte manual. Esse processo foi realizado em parceria com

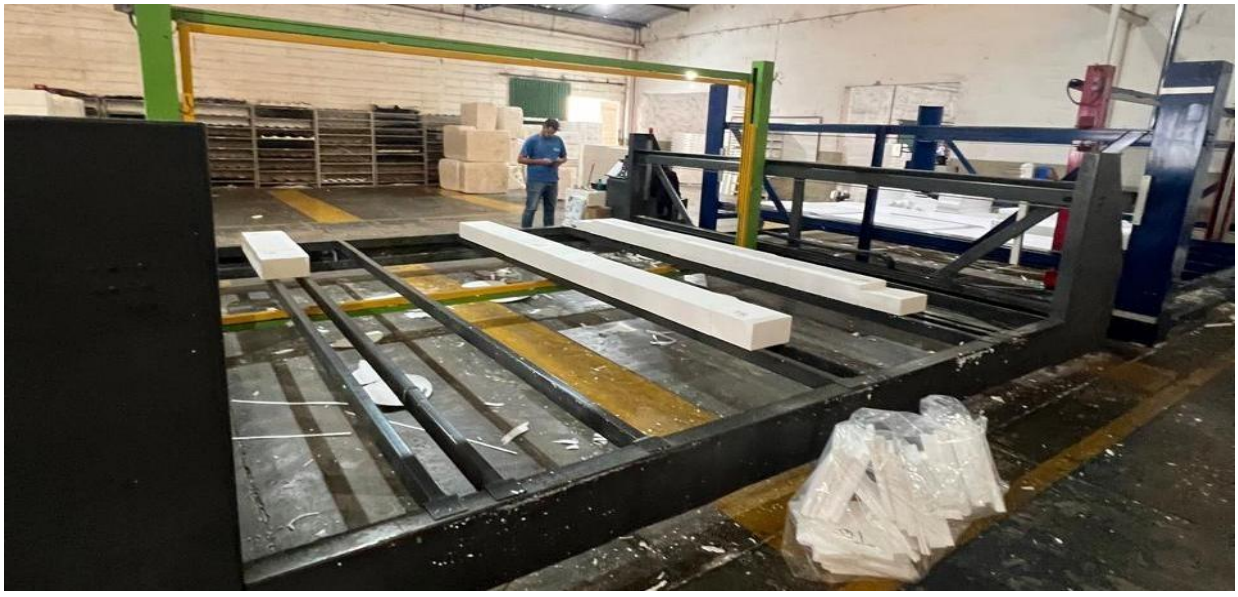
a fabricante dos blocos, a Isofaber, localizada em Bauru, e conduzido pelo encarregado Luiz Otávio. A ferramenta de corte consiste em uma estrutura com trilhos de metal e fios aquecidos de forma controlada por computador (Figura 25), o que garante um corte limpo e evita o aquecimento excessivo, que poderia causar deformação do bloco ou até um incêndio, devido à inflamabilidade do poliestireno expandido.

Figura 24 – Fileiras de geoexpandidos posicionados para corte eletrônico



Fonte: Autor (2026).

Figura 25 – Fábrica Isofaber realizando procedimento de corte das amostras de geoexpandido



Fonte: Autor (2026).

4.2.4 Aquisição e Tratamento de Dados

A aquisição de dados foi realizada por meio da máquina de cisalhamento (Figura 26) e de um software desenvolvido pela Universidade Estadual Paulista (Unesp), sob responsabilidade do técnico Sérgio Gimenez, que possui formação na área de computação (Figura 27). Essa etapa foi necessária devido aos problemas enfrentados desde a chegada da máquina ao campus. O uso de um sistema feito sob medida facilitou o funcionamento do equipamento e tornou mais práticas e efetivas as manutenções, que foram frequentes durante as etapas de preparação e de ensaio. O desenvolvimento de um software específico também reduziu problemas como desatualização ou dificuldade de manuseio, que podem limitar os sistemas utilizados em outros locais. Os dados foram coletados automaticamente e armazenados em arquivos de saída no formato .txt.

Para garantir a qualidade e a confiabilidade dos resultados, os arquivos gerados foram processados no software Microsoft Excel. Em seguida, foi necessário realizar uma segunda etapa de processamento em Python, em razão das perturbações causadas pelo motor elétrico e das leituras em intervalos curtos. Esse processo funcionou como uma “suavização das curvas”, conservando a estrutura original, mas mantendo apenas os pontos importantes para a construção do gráfico e descartando leituras com pouca ou nenhuma diferença em relação à anterior. O curso (12 mm) da peça utilizada na primeira etapa foi um ponto de melhoria identificado e corrigido para a segunda etapa de ensaios (20 mm).

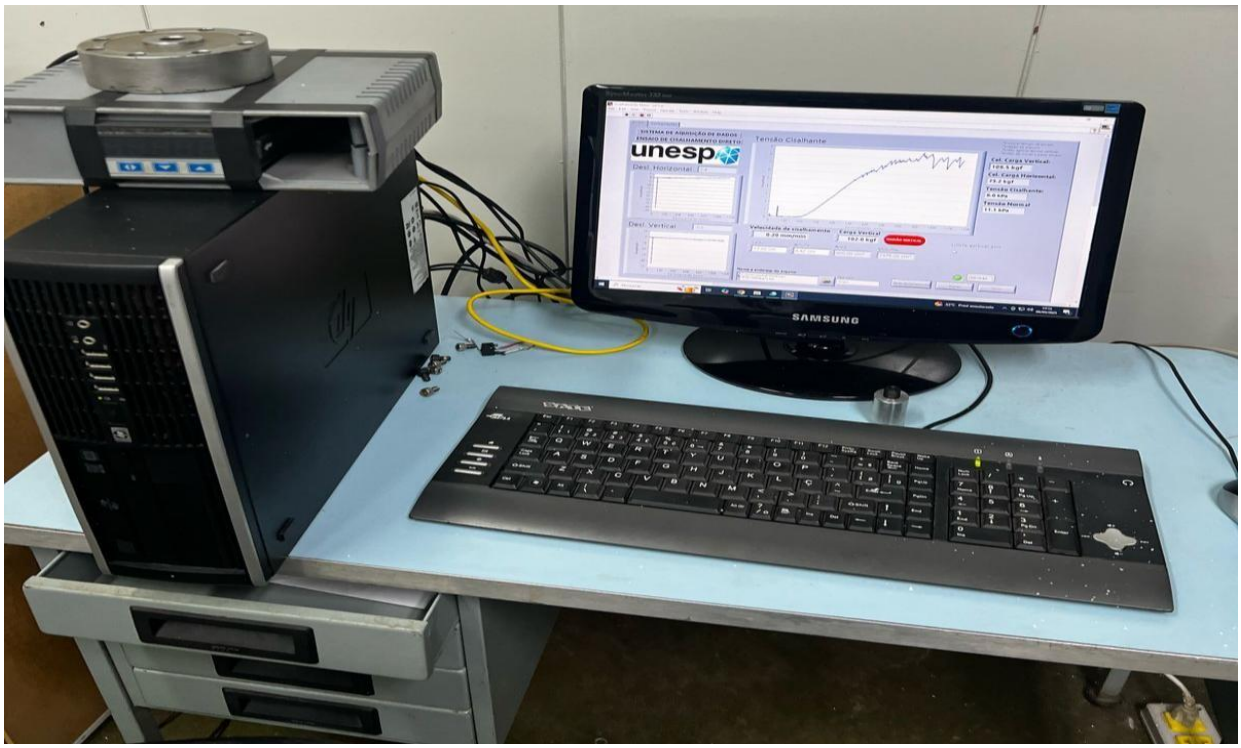
Para a segunda etapa de ensaios, adotou-se um critério de parada maior, pois a troca da peça já havia sido realizada, o que ajudou a delimitar melhor a região de mobilização da máquina.

Figura 26 – Máquina de cisalhamento direto (300mm x 300mm)



Fonte: Autor (2026).

Figura 27 – Sistema de aquisição de dados da Unesp



Fonte: Autor (2026).

4.3 Dificuldades encontradas

O desenvolvimento do programa experimental apresentou intercorrências técnicas que demandaram adaptações metodológicas ao longo das etapas de preparação. Inicialmente, a integridade do equipamento de ensaio foi objeto de avaliação crítica devido a problemas mecânicos, destacando-se a excentricidade dos eixos, o que gerava distorções significativas nos resultados preliminares. Adicionalmente, um evento climático adverso (fortes chuvas) comprometeu as instalações do laboratório, danificando o sistema computacional e o software de aquisição de dados dedicado à pesquisa. Ainda no escopo instrumental, anomalias no Transformador Diferencial de Variação Linear (LVDT) horizontal foram detectadas e devidamente corrigidas durante a primeira fase de testes.

4.3.1 Logística e Parcerias Interinstitucionais

Diante do cenário de instabilidade do equipamento local, explorou-se a viabilidade de conduzir os ensaios no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB). Contudo, após o transporte dos blocos para o Distrito Federal, constatou-se incompatibilidade dimensional entre as amostras e a aparelhagem disponível na referida instituição. Ao mesmo tempo, o corpo técnico da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB - Unesp) concluiu a manutenção da máquina original, atestando seu pleno funcionamento. Esse parecer

favorável motivou um novo transporte das amostras para Bauru a fim de dar prosseguimento à pesquisa.

4.3.2 Fornecimento de Materiais e Preparação das Amostras

O cronograma de pesquisa sofreu restrições devido ao tempo de fornecimento dos materiais, reduzindo o prazo hábil para a execução dos ensaios e para as análises laboratoriais subsequentes. Na etapa de preparação conduzida na FEB, o corte inicial dos blocos de EPS foi realizado manualmente. Embora preliminarmente considerada uma variável de menor impacto, verificou-se que a precisão do corte influenciava a qualidade dos ensaios, constituindo um fator a ser aprimorado metodologicamente. Consequentemente, para a segunda etapa, as amostras foram submetidas a um processo de corte industrial automatizado nas próprias instalações da empresa fornecedora, garantindo a padronização geométrica necessária.

4.3.3 Processamento e Tratamento de Dados

Por fim, o volume expressivo de informações geradas pelos ensaios impôs limitações à etapa de processamento de dados. A utilização de softwares tradicionais de planilhas eletrônicas (como o Microsoft Excel) mostrou-se insuficiente para a filtragem eficiente e para a geração de gráficos com o rigor técnico exigido. Para contornar essa limitação computacional, adotou-se o uso da linguagem de programação Python, cuja capacidade de processamento permitiu o tratamento automatizado e a análise dos dados experimentais com maior robustez e precisão.

4.3.4 Suporte Institucional e Material

Ressalta-se que a superação dos desafios citados contou com suporte técnico e material indispensável. Registra-se a relevância da parceria com a UnB, por meio da orientação temporária do Prof. Dr. Gregório Luís Silva Araújo, bem como o auxílio dos técnicos Sérgio Gimenez e Gustavo, da FEB - Unesp. Igualmente fundamental para a realização deste estudo foi o fornecimento de materiais pelas empresas, com os devidos agradecimentos à Isofaber (pelo fornecimento do EPS) e à Ober (pelo fornecimento dos geotêxteis PET e PP).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados

5.1.1 Primeira etapa (Interface EPS – EPS e EPS – Geomembranas)

Os resultados experimentais foram apresentados por meio das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal. Com o intuito de facilitar a visualização e a análise comparativa do comportamento mecânico das interfaces avaliadas, todas as curvas correspondentes a um mesmo par de materiais, ensaiadas sob os diferentes níveis de tensão normal aplicados (11 kPa, 22 kPa, 33 kPa, 44 kPa e 55 kPa), foram compiladas em gráficos unificados. Ressalta-se que todas as figuras mencionadas nesta seção estão nos Apêndices B a E deste documento.

A apresentação dos dados seguiu a mesma ordem metodológica estabelecida na primeira fase da pesquisa. Inicialmente, foram expostos os resultados referentes às interfaces formadas por blocos de mesma massa específica aparente. Desse modo, a Figura 34 (Apêndice B) exibe a relação tensão-deslocamento para a interface E-20 x E-20. Da mesma forma, as Figuras 35 e 36 (Apêndice B) ilustram as curvas para as interfaces E-25 x E-25 e E-30 x E-30, respectivamente.

Posteriormente, o mesmo padrão de compilação gráfica foi aplicado às interfaces compostas por materiais de massas específicas distintas. Os resultados foram organizados na seguinte ordem: E-20 x E-25 (Apêndice B, Figura 37), E-20 x E-30 (Apêndice B, Figura 38) e, por fim, E-25 x E-30 (Apêndice B, Figura 39).

Esses gráficos mostram o desenvolvimento da tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal imposto ao longo do ensaio. Fisicamente, à medida que o deslocamento foi imposto pela máquina de ensaio sob tensão normal constante, ocorreu a mobilização da resistência por atrito na interface estudada, e os incrementos da força cisalhante foram registrados em intervalos contínuos de tempo.

A partir da avaliação do conjunto de curvas tensão-deslocamento, procedeu-se à extração dos valores correspondentes aos pares de tensão cisalhante atuante e tensão normal para a elaboração dos gráficos das envoltórias de resistência. A apresentação das envoltórias seguiu a mesma ordem dos pares de materiais estabelecida anteriormente: E-20 x E-20 (APÊNDICE C, Figura 40), E-25 x E-25 (APÊNDICE C, Figura 41), E-30 x E-30 (APÊNDICE C, Figura 42), E-20 x E-25 (APÊNDICE C, Figura 43), E-20 x E-30 (APÊNDICE C, Figura 44) e E-25 x E-30 (APÊNDICE C, Figura 45).

Para definir o ângulo de atrito, foi necessário acrescentar a linha de tendência linear, exibida em conjunto com os pontos obtidos. Os gráficos também fornecem o valor do coeficiente de atrito (μ), que é o coeficiente angular da reta, e o valor de R^2 [9].

A mesma sistemática de compilação e análise adotada anteriormente foi estendida às interfaces formadas pelo contato direto entre os blocos de EPS e os geossintéticos (geomembranas). A apresentação dos dados começou pelas curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, cujos gráficos também estão no **APÊNDICE D**. O comportamento mecânico dessas interfaces foi apresentado na seguinte ordem: E-20 x Geomembrana lisa PEAD (APÊNDICE D, Figura 46), E-25 x Geomembrana lisa PEAD (APÊNDICE D, Figura 47) e E-30 x Geomembrana lisa PEAD (APÊNDICE D, Figura 48). Em seguida, foram apresentados os arranjos com a superfície rugosa: E-20 x Geomembrana texturizada matriz balão (APÊNDICE D, Figura 49), E-25 x Geomembrana texturizada matriz balão (APÊNDICE D, Figura 50) e E-30 x Geomembrana texturizada matriz balão (APÊNDICE D, Figura 51).

Na etapa subsequente, a partir da extração dos pares ordenados (tensão cisalhante *versus* tensão normal atuante) obtidos ao longo da trajetória do ensaio, procedeu-se à elaboração das respectivas envoltórias de resistência ao cisalhamento. A disposição dessas envoltórias seguiu a mesma ordem dos materiais: E-20 x Geomembrana lisa PEAD (APÊNDICE E, Figura 52), E-25 x Geomembrana lisa PEAD (APÊNDICE E, Figura 53) e E-30 x Geomembrana lisa PEAD (APÊNDICE E, Figura 54); seguidas pelas interfaces E-20 x Geomembrana texturizada matriz balão (APÊNDICE E, Figura 55), E-25 x Geomembrana texturizada matriz balão (APÊNDICE E, Figura 56) e, concluindo a série, E-30 x Geomembrana texturizada matriz balão (APÊNDICE E, Figura 57).

Com as regressões lineares estabelecidas para as envoltórias de resistência, os ângulos de atrito das interfaces foram determinados por meio do arco tangente do coeficiente angular de cada reta. A Tabela 12 sintetiza os parâmetros obtidos ao longo de todas as etapas analíticas.

[9] O valor de R^2 é um parâmetro estatístico que varia de 0 a 1 e indica o quanto os valores obtidos se aproximam da tendência linear; quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste da reta aos dados.

Tabela 12 – Resumo interfaces EPS – EPS / EPS - Geomembrana

Ângulo de Atrito	***E-20***	***E-25***	***E-30***
E-20	30,5°	33,4°	28,9°
E-25	33,4°	29,2°	28,6°
E-30	28,9°	28,6°	35,85°
Geomembrana Lisa	14,7°	16°	14,4°[10]
Geomembrana texturizada – Matriz balão	27,6°	29,7°	32°

Fonte: Autor (2026).

- **Interface EPS x EPS (Bloco com Bloco):**

Os valores obtidos (**28,6° a 35,85°**) mostraram que o atrito no contato entre blocos de geofoam é superior ao do contato com geomembranas lisas.

O valor de **35,85°** para a interface **E-30/E-30** ressaltou a excelente estabilidade interna de aterros compostos apenas por blocos de alta densidade.

- **Interface EPS x Geomembrana PEAD Lisa:**

- Esta interface apresentou os menores coeficientes de atrito do estudo, com valores de ângulo de atrito variando entre **14,4° e 16°**.
- Observou-se uma redução de eficiência na densidade **E-30 (14,4°)**, que apresentou uma distorção na tendência de aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da densidade do EPS. É bem provável que essa distorção tenha sido causada principalmente pelo corte em bancada das placas ensaiadas.

- **Interface EPS x Geomembrana PEAD Texturizada (Matriz Balão):**

- Houve um ganho substancial de resistência em relação à geomembrana lisa, com valores saltando para a faixa de **27,6° a 32°**.
- Diferente da interface lisa, aqui o aumento da densidade do EPS (**20 a 30 kg/m³**) gerou um incremento linear e progressivo no ângulo de atrito.
- **Justificativa:** A textura "blown film" (matriz balão) criou um engrenamento elástico 3D. Em densidades maiores (E-30), o EPS ofereceu maior suporte estrutural para que as asperidades da geomembrana penetrassem na face do bloco sem o esmagamento prematuro das células superficiais.

[10] Além da mobilização inferior em relação aos demais materiais, a ausência de engrenamento mecânico em interfaces com geomembranas lisas também ocasionou uma trajetória de tensão por deslocamento sem pico evidente. O pico observado em algumas tensões pode ter ocorrido por ajustes da máquina ou pela distribuição das tensões no EPS.

5.1.2 Segunda etapa (Interface EPS-Geotêxtil PET e PP)

No que tange à segunda etapa do programa experimental, a apresentação das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal manteve o mesmo padrão metodológico adotado na fase inicial. Com o intuito de sistematizar o extenso volume de dados gerados pelas diversas combinações de materiais, os gráficos correspondentes foram agrupados em função do polímero constituinte do geotêxtil (PET ou PP) e de sua respectiva massa por unidade de área (gramatura). Dentro de cada grupo, avaliou-se a influência da variação da massa específica aparente dos blocos de EPS (E-20, E-25 e E-30). Destaca-se que todos os gráficos citados a seguir estão no **APÊNDICE F** deste documento.

As figuras foram organizadas da seguinte maneira:

Geotêxtil PET 300 g/m²: curvas referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE F, Figura 58), E-25 (APÊNDICE F, Figura 59) e E-30 (APÊNDICE F, Figura 60);

Geotêxtil PET 400 g/m²: curvas referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE F, Figura 61), E-25 (APÊNDICE F, Figura 62) e E-30 (APÊNDICE F, Figura 63);

Geotêxtil PET 500 g/m²: curvas referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE F, Figura 64), E-25 (APÊNDICE F, Figura 65) e E-30 (APÊNDICE F, Figura 66);

Geotêxtil PET 600 g/m²: curvas referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE F, Figura 67), E-25 (APÊNDICE F, Figura 68) e E-30 (APÊNDICE F, Figura 69);

Geotêxtil PP 300 g/m²: curvas referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE F, Figura 70), E-25 (APÊNDICE F, Figura 71) e E-30 (APÊNDICE F, Figura 72);

Geotêxtil PP 600 g/m²: curvas referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE F, Figura 73), E-25 (APÊNDICE F, Figura 74) e E-30 (APÊNDICE F, Figura 75).

Os dados extraídos das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal tiveram como propósito caracterizar o comportamento mecânico das interfaces sob cisalhamento contínuo. Foi a partir da análise direta dessas curvas que se determinou a resistência ao cisalhamento de pico, parâmetro fundamental para as etapas de análise seguintes deste estudo.

Com base nos pares ordenados formados pela tensão normal aplicada e pela respectiva tensão cisalhante de pico mobilizada, procedeu-se à elaboração das envoltórias de resistência ao cisalhamento para cada combinação de materiais ensaiada. Para manter a coerência metodológica e a organização do texto, a apresentação dessas envoltórias seguiu o mesmo agrupamento adotado anteriormente, separada pelo tipo de polímero que constitui o geossintético, por sua respectiva massa por unidade de área (gramatura) e pela massa

específica aparente dos blocos de EPS. Ressalta-se que todas as figuras listadas a seguir estão no **APÊNDICE G** deste trabalho. A sequência de apresentação foi a seguinte:

Geotêxtil PET 300 g/m²: envoltórias referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE G, Figura 76), E-25 (APÊNDICE G, Figura 77) e E-30 (APÊNDICE G, Figura 78);

Geotêxtil PET 400 g/m²: envoltórias referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE G, Figura 79), E-25 (APÊNDICE G, Figura 80) e E-30 (APÊNDICE G, Figura 81);

Geotêxtil PET 500 g/m²: envoltórias referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE G, Figura 82), E-25 (APÊNDICE G, Figura 83) e E-30 (APÊNDICE G, Figura 84);

Geotêxtil PET 600 g/m²: envoltórias referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE G, Figura 85), E-25 (APÊNDICE G, Figura 86) e E-30 (APÊNDICE G, Figura 87);

Geotêxtil PP 300 g/m²: envoltórias referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE G, Figura 88), E-25 (APÊNDICE G, Figura 89) e E-30 (APÊNDICE G, Figura 90);

Geotêxtil PP 600 g/m²: envoltórias referentes às interfaces com EPS E-20 (APÊNDICE G, Figura 91), E-25 (APÊNDICE G, Figura 92) e E-30 (APÊNDICE G, Figura 93).

A Tabela 13 sintetiza os parâmetros de resistência extraídos das envoltórias de ruptura para as interfaces compostas por blocos de EPS (nas densidades E-20, E-25 e E-30) e os diferentes geossintéticos avaliados: geotêxteis PET (300, 400, 500 e 600 g/m²) e PP (300 e 600 g/m²).

Para a elaboração de cada envoltória, os ensaios foram conduzidos sob três níveis de tensão normal de confinamento (11 kPa, 22 kPa e 33 kPa). A partir dessas retas de regressão, determinou-se o ângulo de atrito de interface para cada combinação de materiais. Essa compilação forneceu uma base de dados consistente para a caracterização da resistência ao deslizamento do sistema e serviu de base para as etapas de análise seguintes da pesquisa.

Tabela 13 – Valores obtidos e utilizados na curva de evolução para interfaces EPS – PET e EPS - PP

Densidade do EPS	Ângulo de atrito ϕ (°)					
	EPS/PET				EPS/PP	
	300 g/m²	400 g/m²	500 g/m²	600 g/m²	300 g/m²	600 g/m²
E-20	32,7	36,0	32,2	29,4	31,7	29,2
E-25	37,1	36,4	32,7	30,3	35,2	31,4
E-30	38,3	38,1	35,7	30,5	39,5	36,4

Fonte: Autor (2026).

O parâmetro ϕ é o indicador fundamental do comportamento mecânico da interface bloco-geotêxtil. Ele reflete a resistência ao deslizamento gerada pelas interações texturais e geométricas. A comparação entre diferentes gramaturas e entre os polímeros PET e PP permitiu avaliar como o aumento da massa por unidade de área ou a variação do tipo de fibra influenciam a capacidade resistente da interface. Esses dados são essenciais para orientar a seleção e o dimensionamento de reforços geossintéticos em projetos de contenção e reforço de solos.

No que se refere à gramatura do PET, a relação tendeu a ser inversamente proporcional: quanto maior a massa por unidade de área do material, menor foi a resistência observada. O PP apresentou o mesmo padrão de proporcionalidade inversa, ou seja, a gramatura de 600 g/m² apresentou ângulos de atrito inferiores aos da gramatura de 300 g/m².

5.2 Comparação e discussão dos resultados

5.2.1 Interface EPS-EPS

Em relação à interface EPS-EPS, os estudos costumam combinar diferentes tipos de materiais com o EPS e, mesmo quando avaliam a combinação EPS-EPS, normalmente a associam a outros tipos de interface para fins de comparação. Por isso, a Figura 28 apresenta diversos estudos da literatura, com as características específicas de cada um.

Figura 28 – Figura contendo referência de literatura nacional/internacional e este estudo.

#	Referência	Interfaces testadas (o trabalho cobriu)	ρ_EPS (kg/m³)	Caixa (mm)	σ_n (kPa)
1	Atmatzidis; Massanis; Theodorakopoulos (2001)	EPS-EPS; EPS-geotêxtil; EPS-geomembrana; EPS-solo (argila, areia, pedregulho)	10, 15, 20, 30 (nominais)	100 x 100 e 300 x 300 (usaram ambas)	5 até o limite de escoamento de cada EPS (σ_y de 26,5 a 106 kPa)
2	Barrett & Valsangkar (2009) – Fase I	EPS-EPS (sem conector, placa farpada, adesivo PU)	Blocos comerciais (densidade não especificada no resumo)	430 x 280	14,8; 29,6; 74,1
3	Barrett & Valsangkar (2009) – Fase II	EPS-EPS (sem conector, placa farpada, adesivo PU)	Blocos comerciais (densidade não especificada no resumo)	1200 x 600	9,3; 16,1; 26,3
4	Padade & Mandal (2014)	EPS-EPS; EPS-juta; EPS-geogrelha; EPS-cinza volante	15, 20, 22, 30	305 x 305 x 175	25, 50, 75, 100
5	Khan & Meguid (2018)	EPS-EPS (monobloco); EPS-PVC; EPS-areia	15, 22, 30	99,5 x 99,5 x 40 (monobloco); 99,5 x 99,5 x 20 (interface)	18, 36, 54
6	**ESTE ESTUDO**	**EPS-EPS (todas as combinações)**	**20, 25 e 30 (E-20, E-25, E-30)**	**300 x 300 (NBR ISO 12957-1)**	**11, 22, 33, 44 e 55**

Fonte: Autor (2026).

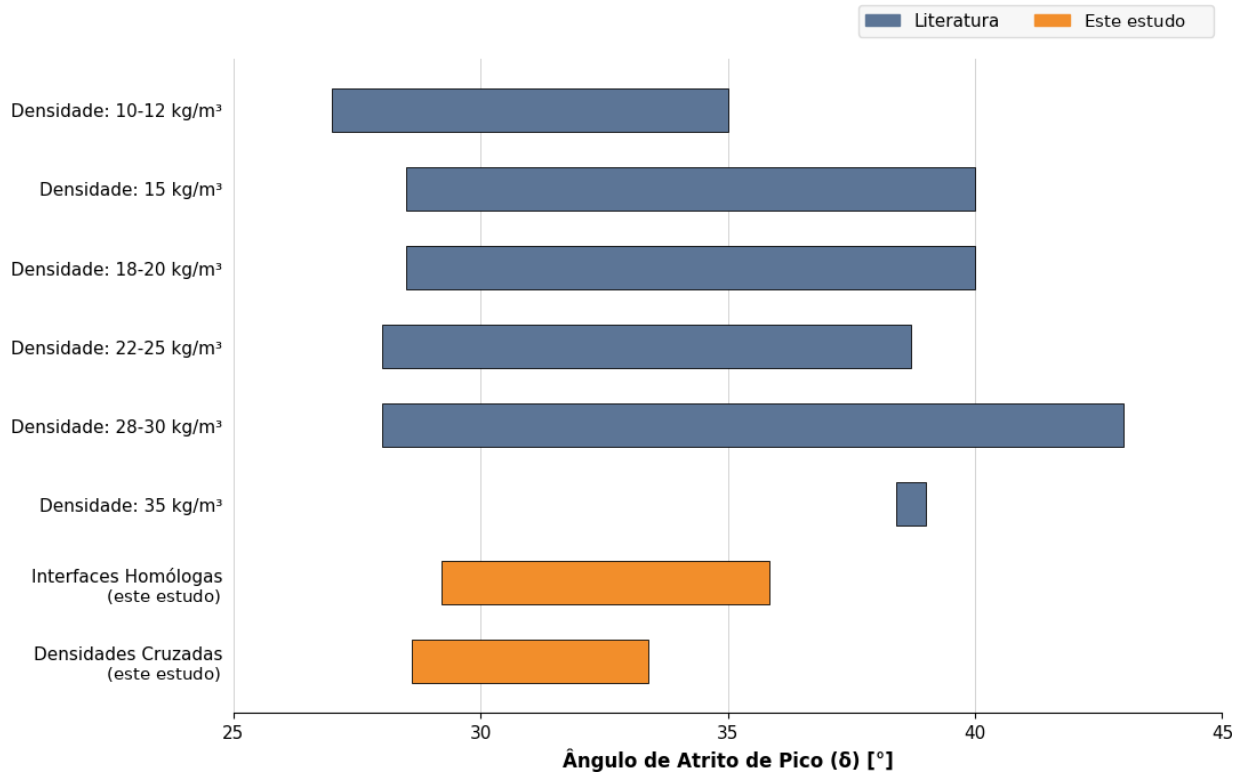
A Figura 29 apresenta uma tabela com dados da literatura e os dados obtidos neste estudo, e a Figura 30 apresenta um gráfico que faz um breve comparativo visual de alguns desses resultados.

Figura 29 – Principais literaturas balizadoras com faixa de valor central para interface EPS-EPS e literatura que a corrobora correspondente.

Densidade Nominal (kg/m³)	Faixa Publicada e Observações (δ_pico)	Valor Central (°)	Fontes Principais
10-12	μ_pico 0,51-0,64 → δ = 27°-33°; Atmatzidis et al. (2001) reporta 35°.	~30	Lin et al. (2001); Avesani Neto & Bueno (2012); Silva, Lodi et al. (2019); Atmatzidis et al. (2001)
15	μ_pico → δ ≈ 35°-40°; Atmatzidis et al. (2001): 36°; Padade & Mandal (2014): 28,5°-30°; Beju & Mandal (2018): ≈ 46° (alta tensão cisalhante).	~33-36	Chrysikos et al. (2006); Padade & Mandal (2014); Beju & Mandal (2018); Atmatzidis et al. (2001)
18-20	Atmatzidis et al. (2001): 40°; Chrysikos et al. (2006): ≈ 38,7°; Padade & Mandal (2014): 28,5°-30°; AbdelSalam & Azzam (2016): δ > 0 com adesão > 0.	~35-37	Chrysikos et al. (2006); Padade & Mandal (2014); AbdelSalam & Azzam (2016); Avesani Neto & Bueno (2012); Atmatzidis et al. (2001)
22-25	Padade & Mandal (2014): 28°-30°; Chrysikos et al. (2006): ≈ 38,7°; Beju & Mandal (2018): aumento ligeiro com a densidade; Özer & Akay (2016) para EPS24: 28°-35°.	~32-35	Beju & Mandal (2018); Chrysikos et al. (2006); Özer & Akay (2016/2021); Padade & Mandal (2014)
28-30	Atmatzidis et al. (2001): 43°; Chrysikos et al. (2006): ≈ 38,7°; Padade & Mandal (2014): 28°-30°; Silva, Lodi et al. (2019): aumento de δ com densidade.	~33-38	Chrysikos et al. (2006); Padade & Mandal (2014); Silva, Lodi et al. (2019); Atmatzidis et al. (2001)
Interfaces Homólogas (E-20/25/30)	Este estudo obteve para interfaces iguais: E-20 x E-20 = 30,5° E-25 x E-25 = 29,2° E-30 x E-30 = 35,85°	~29-36	Este estudo
Densidades Cruzadas (E-20/25/30)	Este estudo obteve para interfaces heterogêneas: E-20 x E-25 = 33,4° E-20 x E-30 = 28,9° E-25 x E-30 = 28,6°	~28-33	Este estudo
35	μ_pico = 0,80 → δ = 38,7°	~38	Chrysikos et al. (2006)

Fonte: Autor (2026).

Figura 30 – Gráfico com dados da interface EPS/EPS com comparativo ESTE ESTUDO/Literatura



Fonte: Autor (2026).

1. Faixa de tensão normal. A faixa de 11 a 55 kPa adotada neste estudo coincide com a de Khan & Meguid (2018)[dlix] e de Özer & Akay (13 a 52 kPa)[dlx], e tem sobreposição parcial com a de Beju & Mandal (25 a 100 kPa)[dlxi]. Já Padade & Mandal[dlxii] (2014) trabalharam entre 25 e 100 kPa, e Atmatzidis et al.[dlxiii] estenderam σ_n até 70% da tensão de escoamento. Tensões normais elevadas tendem a induzir aderência e a curvar a envoltória, subestimando δ_pico se for ajustada uma reta única; este estudo ficou no regime de baixa σ_n, em que a envoltória é predominantemente friccional.
2. EPS moldado vs cortado. Atmatzidis et al. (2001)[dlxiv] ressaltaram a importância de testar a face externa de fábrica e relataram que seu μ médio de 0,80 é cerca de 17% menor que a média de Sheeley & Negussey (2000)[dlxv] e Negussey et al. (2001)[dlxvi] e, ao mesmo tempo, 13% a 40% superior aos valores recomendados nas diretrizes de projeto, o que evidencia a forte sensibilidade da face do bloco ao método de corte.
3. Velocidade de deslocamento. As velocidades variaram de 0,9 mm/min (Khan & Meguid[dlxvii]) a 1,2 mm/min (Chrysikos, Atmatzidis[dlxviii]), além de 1,14 mm/min (Avesani Neto[dlxix]). Özer e Akay[dlxx](2016) mostraram que, para EPS

com encaixe (interlocked), a velocidade pode alterar significativamente a resistência de pico; para EPS-EPS plano, o efeito é menor. Neste estudo, os ensaios de interface foram realizados a uma velocidade de 0,2 mm/min, para ampliar as faixas observadas na literatura.

4. Idade e pré-condicionamento. Apenas Avesani Neto[dlxxi] (2008) explicitou pré-condicionamento de no mínimo 24 h a 23 °C e UR de 50%; a maior parte dos trabalhos internacionais omitiu essa informação, o que gera dispersão adicional.
5. Critério de pico. Quatro estratégias foram identificadas: (i) pico observado na curva $\tau \times \Delta h$ (Padade & Mandal[dlxxii]: 1,7% a 2,5% de deformação); (ii) leitura a Δh fixo de 5 mm (Avesani Neto[dlxxiii]); (iii) leitura a 10% da dimensão da amostra conforme ASTM D3080 quando não há pico (Khan & Meguid[dlxxiv]); (iv) limite imposto pelo curso da caixa (Chrysikos[dlxxv]: 10 mm). No caso deste estudo, foi adotado o critério de pico em $\Delta h = 6$ mm, que apresentou um pico pouco acentuado, com queda percentual baixa até a tensão pós-pico, conforme apresentado anteriormente.
6. **Pré-compressão e tensão normal aplicada.** Atmatzidis et al.[dlxxvi] limitaram σn a 70% da σ do EPS para evitar danos de compressão; em EPS20, isso corresponde a cerca de 70 kPa. Neste estudo, a faixa de 11 a 55 kPa ficou dentro de uma margem segura para todas as densidades.

5.2.2 Interface EPS – GEOMEMBRANA

A resistência ao cisalhamento na interface direta EPS-geomembrana é governada quase exclusivamente por mecanismos de atrito polímero-polímero, com adesão aparente tipicamente nula e envoltória de Mohr-Coulomb essencialmente linear passando pela origem, ao menos até níveis de tensão da ordem de 33 a 82 kPa para EPS20, o que corresponde a 37% a 90% da tensão de escoamento (ATMATZIDIS, MISSIRLIS & THEODORAKOPOULOS, 2001[dlxxvii]).

- Para geomembranas lisas, os valores típicos de ângulo de atrito de pico situam-se em torno de 16° para PEAD (16,2° em SHEELEY & NEGUSSEY, 2001 [dlxxviii]; 16° em ATMATZIDIS et al., 2001[dlxxix]; 16° a 20° em GARCIA, 2023[dlxxx], Unesp-Bauru), 23,5° para PP e 35° a 37° para PVC lisa; a massa específica do EPS tem efeito desprezível e o pico é mobilizado de forma pouco acentuada, o que caracteriza deslizamento friccional puro, com perda pós-pico de apenas 3° a 5°.

- Para geomembranas texturizadas de PEAD, o ângulo de atrito de pico sobe para 38° a 46° (45° em $\sigma \leq 25$ kPa segundo SHEELEY & NEGUSSEY, 2000[dlxxxi]; 46° em ATMATZIDIS et al., 2001[dlxxxii] para PEAD texturizada e com microespigões), em decorrência do intertravamento e da cravação das asperidades nas células superficiais do EPS; observou-se strain-softening moderado e, em condições brasileiras (GARCIA, 2023[dlxxxiii]), a interface com geomembrana texturizada por matriz balão superou a texturizada por matriz plana.

A interface entre EPS e geomembrana lisa (PEAD, PEBDL, PVC) é considerada, de forma sistemática, o plano de menor resistência ao cisalhamento nos sistemas compostos com geoexpandido em obras de aterro leve, sendo crítica para as análises de estabilidade horizontal.

A Tabela 14 reúne os resultados da literatura, incluindo os resultados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 14 – Resultados da literatura x este estudo.

Referência	Polímero / Acabamento	Densidade do EPS (kg/m³)	Tensão Normal (kPa)	Ângulo de Pico (°)	Ângulo Pós-pico (°)	Adesão (kPa)	Origem dos Dados
Sheeley & Negussey (2000)[dlxxxiv]	PEAD lisa	EPS18 / EPS29	14-48	16,2	13,0	0	Literatura
Atmatzidis et al. (2001)[dlxxxv]	PEAD lisa (GM1)	EPS20	5-80	16,0	-	0	Literatura
Atmatzidis et al. (2001)[dlxxxvi]	PP lisa (GM4)	EPS20	5-80	23,5	-	0	Literatura
Atmatzidis et al. (2001)[dlxxxvii]	PVC lisa (GM5)	EPS20	5-80	37,0	-	0	Literatura
Chrysikos et al. (2006)[dlxxxviii]	PVC lisa	EPS15 / EPS20 / EPS30	66-223	31,8 / 33,0 / 38,0	-	-	Literatura
Garcia (2023)[dlxxxi]	PEAD lisa	10-33,5	5 níveis	16-20	7-18	0	Literatura
Este estudo	PEAD lisa	20	11 – 55	14,7	14,02	0	Estudo Atual
Este estudo	PEAD lisa	25	11 – 55	16,0	14,92	0	Estudo Atual
Este estudo	PEAD lisa	30	11 – 55	14,4	13,06	0	Estudo Atual

Fonte: Autor (2026), com base em dados da literatura.

A geomembrana de PEAD texturizada pelo processo de matriz balão é produzida por coextrusão soprada com injeção de nitrogênio como agente expansor nas camadas externas. Esse processo gera asperidades de forma aleatória, com distribuição de altura e densidade espacial não uniformes, e variação de cerca de 10% na espessura ao longo da bobina, decorrência do processo circular.

A literatura mais consolidada sobre revestimento de aterros sanitários (G.R. Koerner & R.M. Koerner, 2011[dxc]) se baseia em ensaios contra geotêxteis e solos coesivos e indica que as geomembranas estruturadas (matriz plana) fornecem resistências ao cisalhamento mais consistentes e confiáveis e melhor desempenho em CQA do que as produzidas por coextrusão em matriz balão. A anisotropia das asperidades em matriz plana (alinhamento preferencial na direção transversal à de calandragem) pode introduzir variabilidade direcional na resistência, mas a literatura disponível não isolou esse efeito em ensaios de cisalhamento direto com EPS, indicando uma lacuna importante.

A Tabela 15, produzida por Garcia (2023)[dxci], apresenta dados comparativos entre os dois tipos, que ajudam a visualizar as diferenças. A tabela foi adaptada com a inclusão dos dados obtidos neste estudo, com a finalidade de ampliar a base teórica e contribuir para o esclarecimento dessa questão.

Tabela 15 – Tabela comparativa entre geomembranas texturizadas de diferentes tipos (Literatura x este estudo).

Interface (GBR-P)	Características do ensaio	Ângulo de atrito (Φ)	Referências
Texturizada (1,5 mm)	Cisalhamento direto (caixas de dimensão: 100x100x25 mm), 1,2 mm/min (taxa de deslocamento), σ = 14 a 48 kPa	45,0° (pico e pós-pico) (σ ≤ 25 kPa) 38,7° (pico e pós-pico) (σ ≈ 45 kPa)	SHEELEY e NEGUSSEY (2000)[dxcii]
Texturizada (saliências de 0,4 mm)	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até δh de 10 mm, σ = 10% de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	38,7° (ρ = 20 kg/m³)	CHRYSIKOS et al. (2006)[dxciii]
Texturizada (micro pontas de 0,55 mm)	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até δh de 10 mm, σ = 10% de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	31,4° (ρ = 20 kg/m³)	CHRYSIKOS et al. (2006)[dxciv]
Texturizada de matriz plana (3 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25), 0,2 mm/min, σ = 11, 22, 33, 44 e 55 kPa	25,0° (pico), 23,6° (pós-pico) (ρ = 10 kg/m³) 24,3° (pico), 22,9° (pós-pico) (ρ = 18 kg/m³) 28,6° (pico), 26,9° (pós-pico) (ρ = 33,5 kg/m³)	MALAGHINI et al. (2019)[dxcv]
GBR-P PEAD - Texturizada (1,5 mm) de matriz plana	Cisalhamento direto (100x100 mm), 0,2 mm/min até δh de 10 mm, σ = 11, 22, 33, 44, 55 kPa	25,8° (pico), 23,6° (pós-pico) (ρ = 10 kg/m³) 24,1° (pico), 22,2° (pós-pico) (ρ = 14,5 kg/m³) 24,3° (pico), 22,9° (pós-pico) (ρ = 18 kg/m³) 27,4° (pico), 24,7° (pós-pico) (ρ = 28 kg/m³) 28,6° (pico), 26,9° (pós-pico) (ρ = 33,5 kg/m³)	GARCIA (2023)[dxcvi]

Interface (GBR-P)	Características do ensaio	Ângulo de atrito (Φ)	Referências
GBR-P PEAD - Texturizada (1,5 mm) de matriz balão	Cisalhamento direto (100x100 mm), 0,2 mm/min até δh de 10 mm, σ = 11, 22, 33, 44, 55 kPa	24,6° (pico), 15,5° (pós-pico) (ρ = 10 kg/m³) 29,0° (pico), 24,7° (pós-pico) (ρ = 14,5 kg/m³) 34,8° (pico), 34,4° (pós-pico) (ρ = 18 kg/m³) 32,0° (pico), 27,1° (pós-pico) (ρ = 28 kg/m³) 34,9° (pico), 23,4° (pós-pico) (ρ = 33,5 kg/m³)	GARCIA (2023)[dxcvii]
GBR-P PVC - Texturizada (0,8 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25 mm), 1,2 mm/min, σ = 14 a 48 kPa	≈ 26,6° (pós-pico) (reduz levemente com a σ)	SHEELEY e NEGUSSEY (2000)[dxcviii]
Texturizada de matriz balão	Cisalhamento direto (300x300x17 mm), 0,2 mm/min, σ = 11 a 55 kPa	27,6 (pico) 26,05 (pós-pico) para deslocamento = 12 mm	ESTE ESTUDO
Texturizada de matriz balão	Cisalhamento direto (300x300x17 mm), 0,2 mm/min, σ = 11 a 55 kPa	29,7 (pico) 28,59 (pós-pico) para deslocamento = 12 mm	
Texturizada de matriz balão	Cisalhamento direto (300x300x17 mm), 0,2 mm/min, σ = 11 a 55 kPa	32 (pico) 29,62 (pós-pico) para deslocamento = 12 mm	

Fonte: Adaptado de Garcia (2023).

Os estudos comparativos, principalmente o de GARCIA (2023), mostraram que a configuração de matriz balão tende a ser superior à de matriz plana na interface com EPS, o que contraria a literatura citada, que privilegia a matriz plana para revestimento de aterros sanitários. A diferença é explicável: no aterro sanitário, a superfície em contato costuma ser geotêxtil ou solo argiloso, situação em que asperidades regulares e altas (matriz plana) são vantajosas; já na interface com o EPS, material macio, deformável e com células finas, asperidades irregulares de menor altura, mas com alta densidade espacial (matriz balão), aumentam os pontos de cravação e, portanto, a resistência mobilizada.

A análise dos parâmetros de resistência ao cisalhamento nas interfaces de Geofoam (EPS) é fundamental para garantir a segurança em projetos de engenharia geotécnica. A seguir, apresenta-se uma avaliação que compara os dados deste estudo com as referências da literatura internacional e nacional.

1. Interface Geofoam EPS x Geomembrana PEAD LISA

Nesta configuração, os resultados deste estudo mostraram uma sensibilidade crítica à variação da densidade do EPS:

Densidade 20,0 kg/m³: Obteve-se um ângulo de atrito de pico de **16,9°**, o que se alinha ao intervalo de 16,0° a 20,0° proposto por Garcia (2023) e supera levemente os 16,1° relatados por Sheeley e Negussey (2001)[dxcix].

Densidade 25,0 kg/m³: O valor de **16°** representou a maior resistência entre as interfaces lisas deste estudo, mantendo-se dentro da média esperada pela literatura.

Densidade 30,0 kg/m³: Observou-se uma queda significativa para **14,4°**. Esse resultado pode ser explicado por variações observadas na superfície do EPS, que foi moldado manualmente, mas está dentro do intervalo observado na literatura.

2. Interface Geofoam EPS x Geomembrana PEAD TEXTURIZADA (Matriz Balão)

Os dados para a interface texturizada (tipo matriz balão) revelaram um comportamento mecânico superior e mais estável conforme a densidade aumentou:

Densidade 20,0 kg/m³: O ângulo de **27,6°** já colocou esta interface em um patamar de segurança muito superior ao da lisa, superando o limite inferior de 24,0° obtido por Garcia (2023)[dc].

Densidade 25,0 kg/m³: O aumento para **29,7°** mostrou o benefício do engrenamento mecânico entre as texturas da geomembrana e a estrutura elástica do EPS.

Densidade 30,0 kg/m³: Atingiu-se o valor máximo de **32,0°**. Ao contrário da interface lisa, aqui o aumento da densidade resultou em ganho de resistência, aproximando-se do teto de 35,0° observado na literatura internacional.

3. Síntese Comparativa e Avaliação de Intervalos

Ao comparar este estudo com as referências, notou-se que os resultados para a matriz balão (27,6° a 32,0°) foram mais consistentes do que a variação de Garcia[dci] (24,0° a 35,0°), o que permite uma especificação de projeto mais precisa.

Limites de referência: enquanto os dados deste estudo se concentraram no PEAD, a literatura apresenta a geomembrana de **PVC lisa** (Sheeley, 2000[dcii]) com **35,0°** e geomembranas **fortemente texturizadas** com até **46,0°** como limites de máximo desempenho, embora estas apresentem maior custo ou comportamentos residuais distintos.

5.2.3 Interface EPS – Geotêxtil PET e PP

O estudo da interface entre o Poliestireno Expandido (EPS) e o Geotêxtil PET tem ganhado relevância nas últimas décadas, especialmente em áreas geotécnicas, onde é necessário garantir a estabilidade e a eficiência de sistemas de fundação e pavimentação. O EPS, devido às suas propriedades de leveza e resistência, quando combinado com o Geotêxtil PET, um material sintético com alta resistência à tração e durabilidade, oferece uma solução eficiente para diversas aplicações, principalmente em obras de infraestrutura. A interação

entre esses dois materiais foi investigada por meio de ensaios laboratoriais de cisalhamento, com o objetivo de entender as propriedades de resistência e a transferência de tensões na interface entre os dois.

Os resultados obtidos indicaram que a interface EPS-Geotêxtil PET apresentou uma resistência ao cisalhamento considerável, superior a algumas combinações de materiais frequentemente utilizados em sistemas geotécnicos. A resistência ao cisalhamento é uma das propriedades mais importantes para a estabilidade de sistemas de fundação e pavimentação, pois determina a capacidade do sistema de resistir ao movimento diferencial e ao deslizamento de camadas de solo e materiais geotécnicos. A análise da resistência ao cisalhamento em interfaces de materiais geotécnicos é crucial para a compreensão do comportamento dos sistemas de pavimentos e fundações sob condições de carga dinâmica e estática.

Além disso, o estudo revelou que, sob diferentes níveis de carga, a combinação de EPS com Geotêxtil PET demonstrou um desempenho superior no controle de deformações. A interface entre os materiais mostrou-se eficiente na distribuição das tensões, contribuindo para a durabilidade e integridade das estruturas. O controle de deformações e a distribuição de tensões são aspectos fundamentais para a engenharia geotécnica, pois garantem a estabilidade a longo prazo das obras, principalmente em solos com características de baixa resistência.

A boa aderência entre geotêxteis e materiais de base, como o EPS, é um dos principais fatores para a otimização de sistemas de pavimentos, sendo um critério determinante para o sucesso de tais projetos.

O EPS mostrou excelente capacidade de resistir a impactos e compressão, características que o tornam ideal para utilização em fundações e pavimentos sujeitos a variações de carga e movimento. A resistência à degradação e à ação de agentes externos como água e radiação ultravioleta é um fator importante na escolha dos materiais para obras de infraestrutura, pois afeta diretamente a durabilidade e a manutenção dos sistemas.

A interface entre EPS e Geotêxtil PET mostrou ser altamente eficiente para aplicações em engenharia geotécnica, especialmente em projetos que requerem controle de deformações e estabilização de solos. A combinação desses materiais oferece uma solução robusta para pavimentação e fundação, com desempenho superior em termos de resistência e durabilidade, sendo uma alternativa promissora para a engenharia civil.

Viana (2024)[dciii] realizou estudos que compararam esse tipo de interface nas condições seca e inundada. Para efeito de comparação, foi elaborada a Tabela 16, adaptada, que reúne os

principais resultados obtidos pela autora na condição seca e os obtidos nesta pesquisa para interfaces semelhantes.

Tabela 16 – Comparativo interface EPS/PET – VIANA (2024) [dciv] x ESTE ESTUDO

Interface	Ângulo de atrito ϕ (°) para cada densidade do EPS ρ (kg/m³)							
	Viana (2024)[dcv]					Este estudo		
	10	14,5	18	28	33,5	20	25	30
EPS/PET 300 g/m²	16,43	23,64	23,13	23,87	24,45	32,7	37,1	38,3
EPS/PET 500 g/m²	16,94	9,93	21,76	29,41	36,01	32,2	32,7	35,7
EPS/PET 600 g/m²	15,66	20,27	27,8	26,52	28,03	29,4	30,3	30,5

Fonte: Autor (2026).

- **Densidade do EPS (ρ)**

Nos dois estudos, a densidade do EPS variou: em Viana (2024) [dcvi], entre 10 kg/m³ e 33,5 kg/m³ e, neste estudo, de 20 kg/m³ a 30 kg/m³. Essa diferença no intervalo de densidade pode impactar diretamente a resistência e o comportamento de interface entre o EPS e o geotêxtil PET.

- **Viana (2024):** A densidade do EPS variou em intervalos mais amplos (10, 14,5, 18, 28, 33,5 kg/m³), permitindo uma análise detalhada da resposta do material em diferentes níveis de leveza.
- **Este estudo:** A densidade do EPS analisada foi mais restrita, com valores começando em 20 kg/m³ e indo até 30 kg/m³. Isso permitiu uma avaliação mais focada em faixas de densidade intermediárias.

- **Ângulo de Atrito (ϕ)**

O ângulo de atrito (ϕ) é uma medida da resistência ao deslizamento entre dois materiais e reflete a eficácia da interface EPS/PET na distribuição de tensões. Valores mais altos de ângulo de atrito indicam maior resistência ao deslizamento.

- **Interface EPS/PET 300 g/m²:**
- **Viana (2024)[dcvii]:** O ângulo de atrito variou entre 16,43° (para 10 kg/m³ de EPS) e 24,45° (para 33,5 kg/m³ de EPS), mostrando uma tendência crescente com o aumento da densidade do EPS.
- **Este estudo:** O ângulo de atrito permaneceu relativamente estável, entre 32,7° (para 20 kg/m³ de EPS) e 38,3° (para 30 kg/m³ de EPS), com valores consistentemente mais altos que os do estudo de Viana (2024).
- **Interface EPS/PET 500 g/m²:**

- **Viana (2024)[dcviii]:** O ângulo de atrito variou entre 16,94° (para 10 kg/m³ de EPS) e 36,01° (para 33,5 kg/m³ de EPS), indicando uma tendência de aumento considerável conforme a densidade do EPS aumenta.
- **Este estudo:** O ângulo de atrito variou entre 32,2° (para 20 kg/m³ de EPS) e 35,7° (para 30 kg/m³ de EPS), com valores também mais elevados do que no estudo de Viana (2024).
- **Interface EPS/PET 600 g/m²:**
- **Viana (2024)[dcix]:** O ângulo de atrito apresentou uma variação de 15,66° (para 10 kg/m³ de EPS) até 28,03° (para 33,5 kg/m³ de EPS).
- **Este estudo:** O ângulo de atrito se manteve mais estável, variando entre 29,4° (para 20 kg/m³ de EPS) e 30,5° (para 30 kg/m³ de EPS), com valores de ângulo de atrito mais altos do que os observados por Viana (2024).

- **Comparação de Tendências**

- Nos dois estudos, houve correlação entre o aumento da densidade do EPS e o aumento do ângulo de atrito. Esse aumento está relacionado à resistência do sistema à deformação e ao deslizamento, o que indica que o geotêxtil PET contribui significativamente para a melhoria do desempenho da interface, especialmente em densidades maiores de EPS.

A comparação entre o estudo de Viana (2024) e este estudo revelou uma tendência geral de aumento do ângulo de atrito com a densidade do EPS. Esses resultados indicaram que a gramatura do geotêxtil PET tem um impacto significativo na interação com o EPS, sendo o geotêxtil PET de maior gramatura (600 g/m²) o menos eficaz para aumentar o ângulo de atrito. No entanto, as variações nos dados entre os dois estudos sugerem que mais testes são necessários para determinar a equivalência exata entre os parâmetros em diferentes condições.

Em relação à interface EPS-geotêxtil PP, Atmatzidis, Missirlis e Theodorakopoulos (2001)[dcx] realizaram ensaios utilizando amostras de EPS com densidades entre 15 e 30 g/m³ e geossintéticos de PP com diferentes configurações. Embora não tenham informado exatamente a gramatura utilizada, os autores especificaram a configuração dos materiais, como, por exemplo, agulhados, termoligados e lisos. Os resultados obtidos referem-se aos coeficientes de atrito, e os autores consideraram não haver adesão entre os materiais. A conversão para ângulos de atrito foi feita para adaptar a comparação e facilitar o entendimento; os valores estão na Tabela 17, a seguir, e foram comparados de forma análoga à realizada com o PET, sendo o presente estudo identificado como ESTE ESTUDO.

Tabela 17 – Comparação de resultados obtidos na interface EPS - PP

ATMATZIDIS, MISSIRLIS e THEODORAKOPOULOS (2001)[dcxi]			
Densidade EPS (kg/m³)	**Valor do coeficiente de atrito**	**φ**	**Especificação**
15	0,62	31,80°	Não tecido, punção com agulha, fios "staple" de PP
20	0,65	33,02°	
30	0,78	37,95°	
20	0,48	25,64°	Não tecido, termofixado, filamentos contínuos de PP
20	0,44	23,75°	Não tecido, termofixado, filamentos contínuos de PP
20	0,38	20,81°	Tecido, fitas de 1,5 mm, PP, liso
20	0,62	31,80°	Tecido, fitas de 1,9 e 2,3 mm, PP, áspero (protrusões de 0,2 mm)
20	0,27	15,11°	PEAD, liso
20	0,8	38,66°	PEAD, texturizado, protrusões de 0,4 mm
20	0,61	31,38°	PEAD, micro-espinhos de 0,55 mm
20	0,48	25,64°	PP, liso, reforçado
15	0,62	31,80°	PVC, liso
20	0,65	33,03°	
30	0,78	37,95°	
ESTE ESTUDO			
Densidade EPS (kg/m³)	**Valor do coeficiente de atrito**	**φ**	**Especificação**
20	0,62	31,7°	PP de gramatura 300 g/m²
25	0,71	35,2°	PP de gramatura 300 g/m²
30	0,82	39,5°	PP de gramatura 300 g/m²
20	0,56	29,2°	PP de gramatura 600 g/m²
25	0,61	31,4°	PP de gramatura 600 g/m²
30	0,74	36,4°	PP de gramatura 600 g/m²

Fonte: Autor (2026).

Em Atmatzidis, Missirlis e Theodorakopoulos [dcxii](2001), μ variou de 0,27 (PEAD liso) a 0,80 (PEAD texturizado), com φ de cerca de 15° a 39°. Essa amplitude reflete superfícies muito diferentes, de protrusões microscópicas a geossintéticos ásperos.

Neste estudo, μ ficou mais concentrado, entre 0,56 e 0,82, e φ, entre cerca de 29° e 39°. A escolha de apenas duas configurações de PP reduziu a dispersão, o que indicou um comportamento mais previsível.

• Coeficiente de Atrito (μ)

– Atmatzidis, Missirlis e Theodorakopoulos (2001)[dcxiii]: μ variou de 0,27 (PEAD liso, EPS 20 kg/m³) até 0,80 (PEAD texturizado, EPS 20 kg/m³). A ampla dispersão (cerca de 200%) reflete sobretudo as diferenças de textura e material do geossintético, mais do que a densidade do EPS.

– Neste estudo: PP 300 g/m²: μ subiu de 0,62 (20 kg/m³) a 0,82 (30 kg/m³), mostrando aumento claro com a densidade do EPS.

– PP 600 g/m²: μ oscilou de 0,56 a 0,74 no mesmo intervalo, evidenciando comportamento mais estável e menor sensibilidade ao EPS.

• Ângulo de Atrito (φ)

– Atmatzidis, Missirlis e Theodorakopoulos (2001)[dcxiv]: φ variou entre 15,1° (PEAD liso) e 38,7° (PEAD texturizado), mostrando que texturas agressivas podem dobrar a resistência ao deslizamento.

– Neste estudo: PP 300 g/m²: φ cresceu de 31,7° a 39,5° conforme a densidade aumentou, mantendo valores consistentemente altos.

– PP 600 g/m²: φ se manteve entre 29,2° e 36,4°, com pico em densidade superior (30 kg/m³).

Em ambos os estudos, houve leve tendência de aumento do atrito com a densidade do EPS, e a faixa de valores encontrada para os pares de materiais semelhantes ficou contida, de forma bem homogênea, entre 27° e 35°. A escolha por configurações mais simples neste estudo tornou mais nítidas as variações que são pertinentes para a definição da interface em obras geotécnicas.

É importante ressaltar que os estudos foram realizados com a mesma velocidade de ensaio, 0,2 mm/min, o que ajuda a garantir a semelhança dos resultados, pois, como citado anteriormente, a velocidade de ensaio pode gerar efeitos indesejados que dificultam a interpretação da resistência de interface.

5.2.4 Análise das interfaces pico x pós pico

A análise comparativa entre a resistência de pico e a resistência pós-pico em interfaces envolvendo geossintéticos constitui aspecto fundamental para o dimensionamento seguro de obras geotécnicas, pois tais materiais frequentemente apresentam comportamento de amolecimento por deformação (strain-softening), no qual a tensão cisalhante mobilizada atinge um valor máximo e, após o deslocamento correspondente ao pico, decresce progressivamente até estabilizar-se em um patamar pós-pico. Essa redução está associada à ruptura de ligações adesivas, ao polimento das superfícies em contato e à reorientação de fibras ou texturas, mecanismos amplamente observados em ensaios de cisalhamento direto e anel torcional de interfaces geomembrana/geotêxtil e sistemas de contenção de resíduos (Gilbert & Byrne, 1996[dcxv]; Lin et al., 2024[dcxvi]). Esse fenômeno é particularmente crítico porque grandes deslocamentos induzidos por recalques diferenciais, carregamentos cíclicos ou eventos sísmicos podem rebaixar a resistência efetiva da interface ao nível pós-pico, condição em que a estabilidade global da estrutura passa a ser governada por parâmetros

substancialmente inferiores aos de pico, com potencial comprometimento do coeficiente de segurança quando o projeto desconsidera essa redução. Estudos experimentais e análises numéricas e de equilíbrio limite mostraram que, em sistemas de contenção e taludes revestidos com geossintéticos, deformações induzidas apenas pela ação da gravidade já podem ser suficientes para mobilizar resistências inferiores à de pico, justificando o uso de parâmetros residuais ou de longa duração na verificação de segurança (Gilbert & Byrne, 1996[dcxvii]; Thiel, 2024[dcxviii]).

A disposição das envoltórias de pós-pico seguiu a mesma ordem dos materiais: E-20 x E-20 (APÊNDICE H, Figura 94), E-25 x E-25 (APÊNDICE H, Figura 95) e E-30 x E-30 (APÊNDICE H, Figura 96); seguidas pelas interfaces E-20 x E-25 (APÊNDICE H, Figura 97), E-20 x E-30 (APÊNDICE H, Figura 98) e E-25 x E-30 (APÊNDICE H, Figura 99); após as interfaces EPS-EPS, foram apresentadas as interfaces: E-20 x Geomembrana lisa (APÊNDICE I, Figura 100), E-25 x Geomembrana lisa (APÊNDICE I, Figura 101), E-30 x Geomembrana lisa (APÊNDICE I, Figura 102), E-20 x Geomembrana Texturizada (APÊNDICE I, Figura 103), E-25 x Geomembrana Texturizada (APÊNDICE I, Figura 104) e E-30 x Geomembrana Texturizada (APÊNDICE I, Figura 105); seguidas pelas interfaces E-20 x Geotêxtil PET 300 g/m² (APÊNDICE J, Figura 106), E-25 x Geotêxtil PET 300 g/m² (APÊNDICE J, Figura 107), E-30 x Geotêxtil PET 300 g/m² (APÊNDICE J, Figura 108), E-20 x Geotêxtil PET 400 g/m² (APÊNDICE J, Figura 109), E-25 x Geotêxtil PET 400 g/m² (APÊNDICE J, Figura 110), E-30 x Geotêxtil PET 400 g/m² (APÊNDICE J, Figura 111), E-20 x Geotêxtil PET 500 g/m² (APÊNDICE J, Figura 112), E-25 x Geotêxtil PET 500 g/m² (APÊNDICE J, Figura 113), E-30 x Geotêxtil PET 500 g/m² (APÊNDICE J, Figura 114), E-20 x Geotêxtil PET 600 g/m² (APÊNDICE J, Figura 115), E-25 x Geotêxtil PET 600 g/m² (APÊNDICE J, Figura 116), E-30 x Geotêxtil PET 600 g/m² (APÊNDICE J, Figura 117), E-20 x Geotêxtil PP 300 g/m² (APÊNDICE J, Figura 118), E-25 x Geotêxtil PP 300 g/m² (APÊNDICE J, Figura 119), E-30 x Geotêxtil PP 300 g/m² (APÊNDICE J, Figura 120), E-20 x Geotêxtil PP 600 g/m² (APÊNDICE J, Figura 121), E-25 x Geotêxtil PP 600 g/m² (APÊNDICE J, Figura 122), E-30 x Geotêxtil PP 600 g/m² (APÊNDICE J, Figura 123).

Com base no exposto, fez-se necessária a análise comparativa entre pico e pós-pico. Os dados estão reunidos na Tabela 18, que compara os valores de pico e pós-pico (colunas 1 e 2) e apresenta o percentual de redução obtido experimentalmente (coluna 3) para as interfaces estudadas.

Tabela 18 – Tabela Comparativa Pico x Pós-pico

Interface analisada	Pico	Pós-pico	% Pico/Pós-pico[11]
E-20 x E20	30,5	26,26	86,10%
E-25 x E25	29,2	26,28	90,00%
E-30 x E30	35,85	33,1	92,33%
E-20 x E25	33,4	29,79	89,19%
E-20 x E30	28,9	26,92	93,15%
E-25 x E30	28,6	26,92	94,13%
E-20 x Geomembrana lisa	14,7	14,02	95,37%
E-25 x Geomembrana lisa	16	14,92	93,25%
E-30 x Geomembrana lisa	14,4	13,06	90,69%
E-20 x Geomembrana texturizada	27,6	26,05	94,38%
E-25 x Geomembrana texturizada	29,7	28,59	96,26%
E-30 x Geomembrana texturizada	32	29,62	92,56%
E-20 x Geotêxtil PET 300 g/m²	32,7	24,56	75,11%
E-25 x Geotêxtil PET 300 g/m²	37,1	34,79	93,77%
E-30 x Geotêxtil PET 300 g/m²	38,3	36	93,99%
E-20 x Geotêxtil PET 400 g/m²	36	33,72	93,67%
E-25 x Geotêxtil PET 400 g/m²	36,4	34,18	93,90%
E-30 x Geotêxtil PET 400 g/m²	38,1	37,13	97,45%
E-20 x Geotêxtil PET 500 g/m²	32,2	30,3	94,10%
E-25 x Geotêxtil PET 500 g/m²	32,7	30,88	94,43%
E-30 x Geotêxtil PET 500 g/m²	35,7	33,8	94,68%
E-20 x Geotêxtil PET 600 g/m²	29,4	26,98	91,77%
E-25 x Geotêxtil PET 600 g/m²	30,3	28,55	94,22%
E-30 x Geotêxtil PET 600 g/m²	30,5	28,72	94,16%
E-20 x Geotêxtil PP 300 g/m²	31,7	30	94,64%
E-25 x Geotêxtil PP 300 g/m²	35,2	33,39	94,86%
E-30 x Geotêxtil PP 300 g/m²	39,5	36,92	93,47%
E-20 x Geotêxtil PP 600 g/m²	29,2	27,13	92,91%
E-25 x Geotêxtil PP 600 g/m²	31,4	29,15	92,83%
E-30 x Geotêxtil PP 600 g/m²	36,4	28,61	78,60%[12]

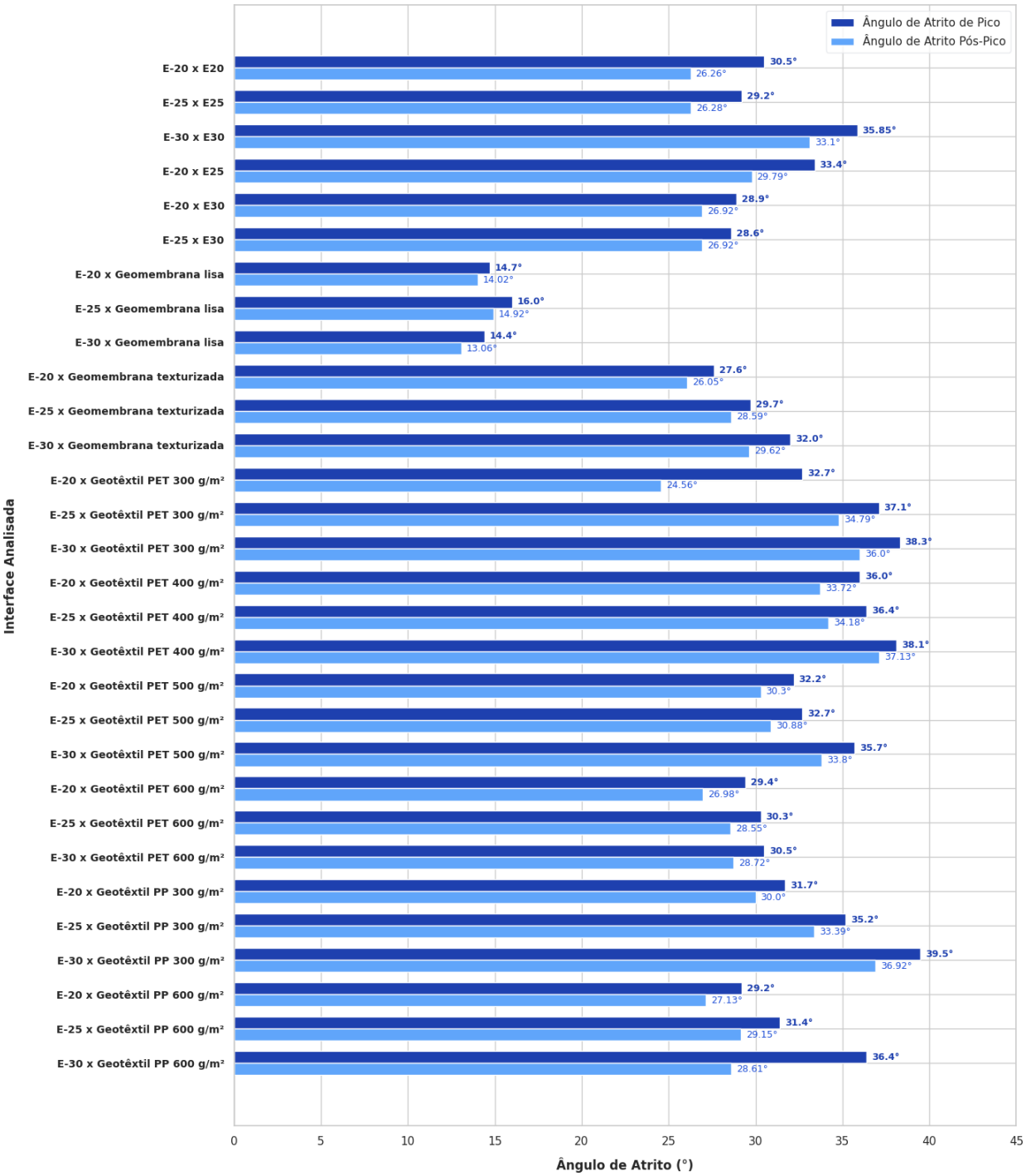
Fonte: Autor (2026).

Os resultados indicaram que a resistência pós-pico tendeu a manter uma proporção elevada em relação à resistência de pico, variando majoritariamente entre 75% e 98%. Em uma análise mais restrita, observou-se que a maior parte das interfaces apresentou retenção de resistência concentrada na faixa de 90% a 95%, o que evidencia uma perda por amolecimento (*strain-softening*) sutil após o pico. Os dados analisados acima foram representados graficamente na Figura 31, para facilitar a visualização pelo leitor.

[11] O valor comparativo de pico/pós-pico foi obtido pela divisão das tangentes dos ângulos de atrito, evitando assim a divisão de dois ângulos em graus.

[12] Retenções de pós-pico abaixo de 90% em interfaces que envolvem geotêxteis não tecidos frequentemente se devem ao rompimento das fibras internas do geotêxtil; a inspeção visual pode determinar se foi o caso.

Figura 31 – Gráfico comparativo ângulo de atrito de pico x pós pico



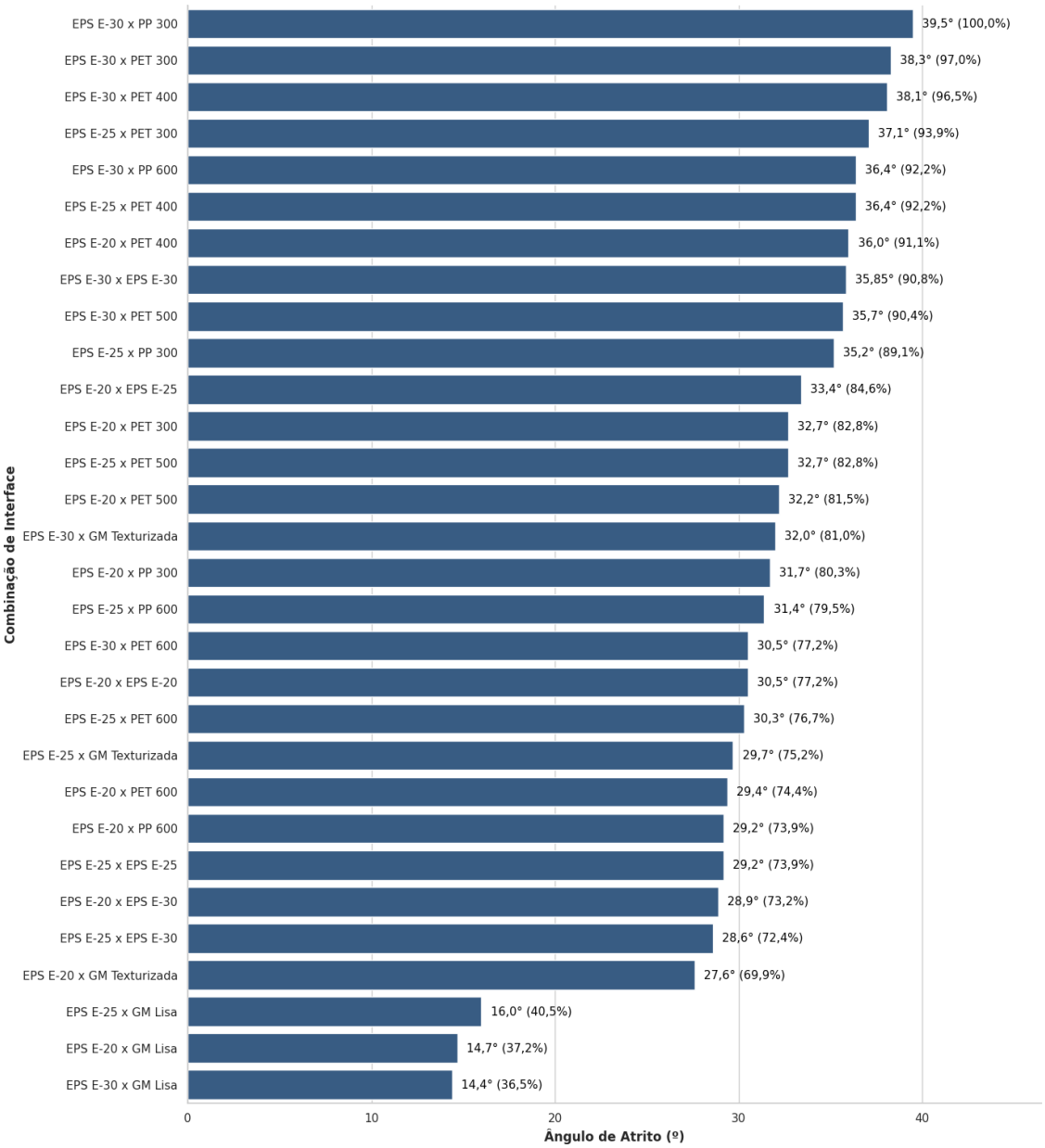
Fonte: Autor (2026).

5.3 Avaliação comparativa entre as interfaces estudadas

Compreender a interação entre o poliestireno expandido e os diferentes materiais geossintéticos é fundamental para a avaliação do sistema. Nesse contexto, a Figura 32 apresenta um gráfico de barras que busca fazer a síntese comparativa dos resultados obtidos nas seções anteriores e expressar a perda de resistência por atrito em termos percentuais (%).

Essa consolidação buscou reunir as informações experimentais e mostrar, de forma sistemática e objetiva, o principal resultado do programa de pesquisa.

Figura 32 – Comparativo da interface analisada x ângulo de atrito obtido – expresso em percentual do termo de referência (maior).



Fonte: Autor (2026).

A divisão apresentada no gráfico permitiu ordenar a eficiência de atrito das amostras em relação ao limite superior de resistência, definido pelo arranjo EPS E-30 x PP 300 (39,5°, correspondente a 100% de aproveitamento). A partir dessa referência, foram identificados três patamares distintos de desempenho relativo.

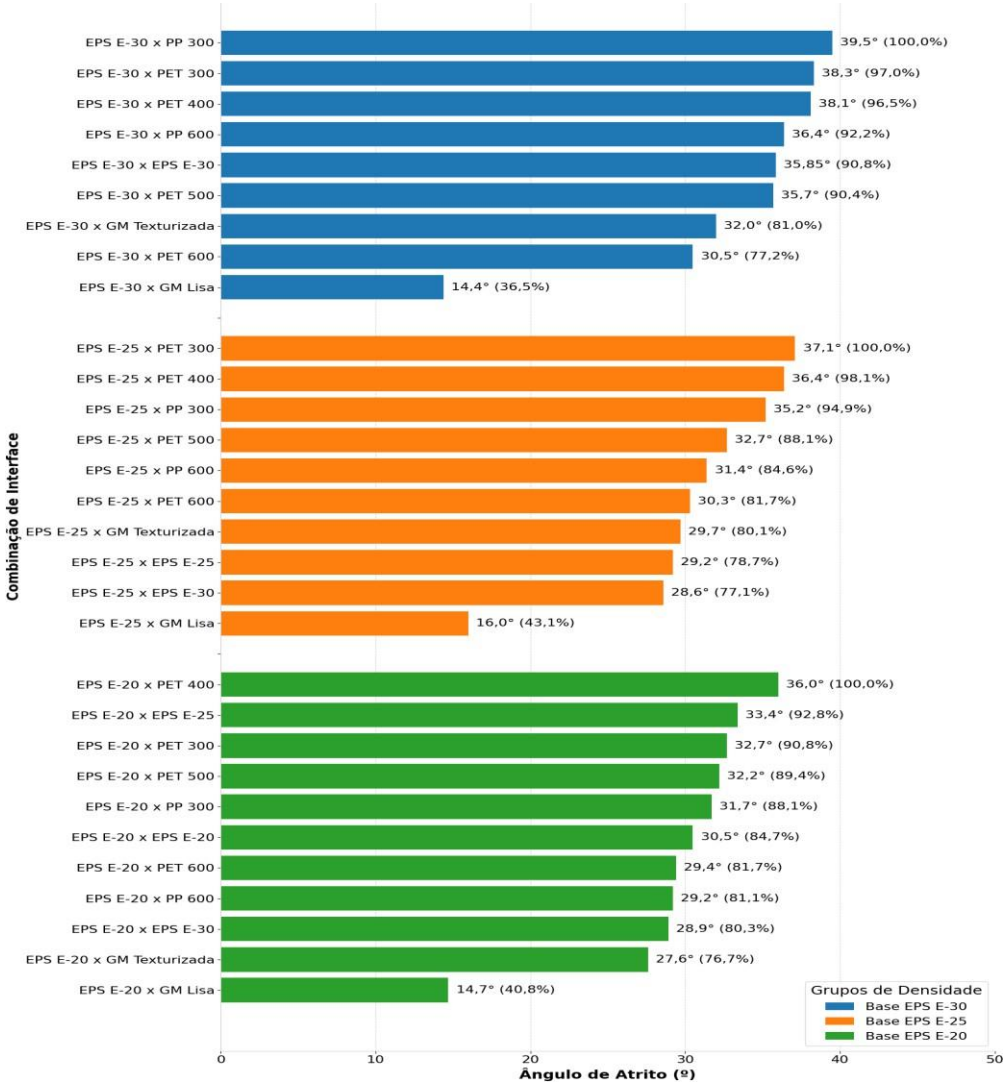
O patamar de alta eficiência (retenção superior a 90% do atrito máximo) ficou restrito a um grupo de oito combinações, formado pelas interações do geofoam com geotêxteis de

menor gramatura. Abaixo desse nível, formou-se um patamar intermediário amplo, concentrado na faixa de 70% a aproximadamente 85% do valor de referência. Esse grupo reuniu, de forma homogênea, todos os contatos internos do poliestireno (EPS-EPS), as geomembranas texturizadas e as interfaces com geotêxteis mais densos (600 g/m²).

No extremo oposto, o gráfico mostrou uma distância importante no patamar inferior. Observou-se uma queda abrupta e isolada de desempenho nas interfaces com geomembrana lisa, que retiveram apenas entre 36,5% e 40,5% do atrito máximo mobilizado. Em termos quantitativos, os percentuais mostram que a passagem do topo para a base dessa classificação representa uma redução de mais de 60% da capacidade de cisalhamento do sistema.

A separação por subgrupos também foi considerada importante, ou seja, apresentar os dados separados pela densidade do EPS de base (E-20, E-25 e E-30) facilitou identificar, dentro de um mesmo tipo de base, quais interfaces apresentaram melhor comportamento. Diferentemente do gráfico da Figura 32, o gráfico da Figura 33 adota como referência de 100% a interface com melhor desempenho dentro do subgrupo analisado, e não a melhor interface geral.

Figura 33 – Comparativo da interface analisada x ângulo de atrito obtido – com filtragem de subgrupos (E-20, E-25 e E-30) expresso em percentual do termo de referência (maior).



Fonte: Autor (2026).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusão

A presente dissertação desenvolveu um programa experimental em escala ampliada com o objetivo de caracterizar, de forma sistemática e abrangente, a resistência ao cisalhamento de interfaces formadas por blocos de EPS (*geofoam*) e geossintéticos correntemente empregados em obras de engenharia. Os ensaios contemplaram, na interface EPS-EPS, contatos entre blocos de mesma densidade e de densidades diferentes, interfaces com geomembranas de PEAD (lisas e texturizadas) e interações com geotêxteis não tecidos de PET e PP.

Os dados levantados, sob tensões normais compatíveis com as condições de serviço, mostraram que a estabilidade de sistemas que integram EPS e geossintéticos não é governada por uma variável isolada. Trata-se de uma resposta mecânica que depende de vários fatores combinados: a densidade e a rigidez do geoexpandido, a textura da superfície do geossintético, a gramatura das mantas e a escala do equipamento de ensaio. A partir da análise dos resultados, destacam-se as seguintes conclusões:

- Comportamento Friccional das Interfaces EPS-EPS.

Nas interações diretas entre os blocos de Poliestireno Expandido, constatou-se a mobilização de ângulos de atrito de pico variando entre aproximadamente 29° e 36°. O decréscimo de resistência na fase pós-pico mostrou-se relativamente modesto, configurando um contato de elevada capacidade friccional com amolecimento (*softening*) limitado dentro da faixa de tensões normais investigada. Tais valores confirmaram a estabilidade interna de maciços formados pela superposição de blocos de *geofoam*.

- Influência da Texturização nas Geomembranas de PEAD.

As interfaces compostas por EPS e geomembrana lisa apresentaram os menores ângulos de atrito de todo o programa experimental, situando-se na ordem de 14° a 17°. Esse resultado confirmou a premissa técnica de que superfícies lisas de PEAD constituem planos de fraqueza, com alto potencial de escorregamento. Em contrapartida, a utilização de geomembranas com textura do tipo matriz balão elevou substancialmente os ângulos de atrito para o patamar de 28° a 32°. Esse aumento mostrou que o engrenamento mecânico (*interlocking*) das asperezas com a matriz celular do EPS é altamente efetivo, com ganhos consistentes que aumentam à medida que se utilizam densidades maiores de geoexpandido.

- O Efeito da Gramatura nas Interfaces EPS-Geotêxtil

Observou-se que as mantas de menor massa por unidade de área (entre 300 e 400 g/m²) mobilizaram os ângulos de atrito mais elevados (da ordem de 33° a 39°). De forma contraintuitiva, o incremento da gramatura para 600 g/m² não se traduziu em ganhos adicionais de resistência. Pelo contrário, em diversas combinações, levou à redução do atrito. Esse fenômeno indicou a transição para um regime mecânico no qual a alta compressibilidade interna da manta mais espessa passa a dissipar parte da energia de cisalhamento, prejudicando a ancoragem efetiva (*bite*) das fibras na superfície do EPS.

- Amolecimento após o pico (Strain-Softening)

Em todas as famílias de interfaces ensaiadas, a comparação entre os parâmetros de pico e de pós-pico apontou para uma retenção típica de 90% a 95% da resistência máxima. Perdas de resistência mais pronunciadas foram detectadas apenas em arranjos muito específicos de EPS-geotêxtil. Esse comportamento indicou a ocorrência de strain-softening moderado no intervalo de deslocamentos imposto pela caixa de cisalhamento.

- Implicações Metodológicas

Do ponto de vista instrumental, a adoção da caixa de cisalhamento de 300 × 300 mm e o rigor na preparação e no corte das amostras mostraram-se fundamentais. A eliminação dos efeitos de borda permitiu a obtenção de envoltórias puramente friccionais, conferindo alta coerência interna aos dados.

Desse modo, a pesquisa cumpriu seu objetivo principal, oferecendo à literatura e à prática de engenharia um banco de dados consistente sobre a interação entre o EPS e os geossintéticos.

6.2 Recomendações futuras

Com base nas limitações e nos resultados desta pesquisa, propõem-se as seguintes diretrizes para o aprofundamento das investigações sobre a interface EPS-geossintéticos:

- **Expansão Paramétrica e Análise de Extremos:** Ampliar a matriz de ensaios com densidades extremas de EPS (≤ 15 e ≥ 35 kg/m³), novas gramaturas de geotêxteis (ex.: 200 e > 600 g/m²) e diferentes padrões de texturização de geomembranas. Isso permitirá identificar o ponto ótimo de engrenamento mecânico (*bite*) e verificar se a tendência linear de resistência observada se mantém em cenários de fronteira.
- **Espectro de Tensões e Esforços Dinâmicos:** Executar ensaios sob tensões normais superiores a 55 kPa, com variadas taxas de deslocamento e cargas cíclicas.

Essa etapa simulará as solicitações severas de obras de grande porte, como aterros sanitários e fundações, permitindo avaliar a fadiga do material e a fluência (*creep*) a longo prazo.

- **Análise Microestrutural e Modelagem Numérica:** Associar os ensaios macroscópicos a técnicas de imagem avançadas (como MEV e tomografia) e modelagem por elementos finitos (MEF). O mapeamento visual da interação fibra-EPS fornecerá as leis de contato reais para alimentar modelos constitutivos, promovendo análises preditivas mais refinadas sobre a estabilidade global.
- **Condições Hídricas e Ambientais Realistas:** Avaliar as interfaces sob diferentes graus de saturação, ciclos de umedecimento/secagem e presença de contaminantes. Como a água pode atuar como lubrificante e reduzir drasticamente o atrito, essa simulação é crucial para evitar a superestimativa de parâmetros de projeto em estruturas sujeitas a oscilações freáticas ou climáticas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELAAL, F.B.; SOLANKI, R. Effect of geotextile ageing and geomembrane surface roughness on the geomembrane-geotextile interfaces for heap leaching applications. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 50, n. 1, p. 55–68, 2022.

ABDELRAHMAN, G.E.; KAWABE, Shohei; TSUKAMOTO, Yoshimichi; *et al*. Small-Strain Stress-Strain Properties of Expanded Polystyrene Geofoam. **Soils and Foundations**, v. 48, n. 1, p. 61–71, 2008.

AKIS, E.; GUVEN, G.; LOTFISADIGH, B. Predictive models for mechanical properties of expanded polystyrene (EPS) geofoam using regression analysis and artificial neural networks. **Neural Computing and Applications**, v. 34, n. 13, p. 10845–10884, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7973:

Poliestireno expandido - EPS - Determinação da absorção de água.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8081:

Poliestireno expandido - EPS - Determinação da permeabilidade ao vapor d’água.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8082:

Poliestireno expandido - EPS - Determinação da resistência à compressão.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11752:

Produtos de poliestireno expandido (EPS) para aplicações em engenharia civil e geotecnia. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11948:

Poliestireno expandido - EPS - Determinação da classe de reação ao fogo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11949:

Poliestireno expandido - EPS - Determinação da massa específica aparente.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12094:

Poliestireno expandido - EPS - Determinação da condutividade térmica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17148:

Poliestireno expandido (EPS) — Blocos para aplicações geomecânicas (Geofoam). 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 10318-1: Geossintéticos - Parte 1: Termos e definições. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 10319: Geossintéticos - Ensaio de tração faixa larga.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 12236: Geossintéticos - Ensaio de puncionamento estático (ensaio CBR).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 12956: Geossintéticos - Determinação da abertura característica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 12957-1: Geossintéticos - Determinação das características de atrito - Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto. 2013.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C203-05a(2017): Standard Test Methods for Breaking Load and Flexural Properties of Block-Type Thermal Insulation. 2017.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C272: Standard Test Method for Water Absorption of Core Materials for Sandwich Constructions.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C273: Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C518-21: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. 2021. ASTM INTERNATIONAL. ASTM C1338: Standard Test Method for Determining

Fungi Resistance of Insulation Materials and Facings.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D297: Standard Test Methods for Rubber Products-Chemical Analysis.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D460: Standard Test Methods for Sampling and Chemical Analysis of Soaps and Soap Products.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D573: Standard Test Method for Rubber-Deterioration in an Air Oven.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D624: Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D648: Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D696: Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D732: Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D751: Standard Test Methods for Coated Fabrics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D792: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity of Plastics by Displacement.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D794: Standard Practice for Determining Permanent Effect of Heat on Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D882: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1004: Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting. 2013.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1149: Standard Test Methods for Rubber Deterioration-Cracking in an Ozone Controlled Environment.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1204: Standard Test Method for Linear Dimensional Changes of Nonrigid Thermoplastic Sheeting.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1238: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1435: Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1505: Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1593: Standard Specification for Nonrigid Vinyl Chloride Plastic Film and Sheeting.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1603: Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1621: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1622: Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1623: Standard Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1693: Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2126: Standard Test Method for Response of Rigid Cellular Plastics to Thermal and Humid Aging.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2228: Standard Test Method for Rubber Property-Relative Abrasion Resistance.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2240: Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2263: Standard Test Method for Tearing Strength of Woven Fabrics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2863: Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-Like Combustion of Plastics (Oxygen Index).

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3015: Standard Practice for Microscopical Examination of Pigment Dispersion in Plastic Compounds.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3417: Standard Test Method for Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by DSC.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3418: Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by DSC.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3421: Standard Practice for Extraction and Analysis of Plasticizer Mixtures from Vinyl Chloride Plastics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3767: Standard Practice for Rubber - Measurement of Dimensions.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3776: Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D3895: Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4355: Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc-Type Apparatus.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4437: Standard Test Method for Non-destructive Testing (NDT) for Determining the Integrity of Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4491: Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4533: Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4595: Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4833: Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products. 2013.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5199: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5261: Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5262: Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Geosynthetics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5322: Standard Practice for Laboratory Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5397: Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5596: Standard Test Method for Microscopic Evaluation of the Dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5617: Standard Test Method for Multi-Axial Tension Test for Geosynthetics.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5721: Standard Practice for Air-Oven Aging of Polyolefin Geomembranes.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5747: Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geomembranes to Liquids.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5994: Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembrane. 2015.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6370: Standard Test Method for Rubber-Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA).

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6392: Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6693: Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes. 2015.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6767: Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6817: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam. 2013.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D7466: Standard Test Method for Measuring the Asperity Height of Textured Geomembrane. 2015.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E96: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E831: Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E1131: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G21: Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G22: Standard Practice for Determining Resistance of Plastics to Bacteria.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G153: Standard Practice for Operating Enclosed Carbon Arc Light Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G154: Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G155: Standard Practice for Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials.

ATMATZIDIS, Dimitrios K; MISSIRLIS, Emmanuel G; THEODORAKOPOULOS, Elias B. SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.

AVESANI NETO, José Orlando. **Caracterização do comportamento geotécnico do EPS através de ensaios mecânicos e hidráulicos**. Mestrado em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-24062008-101540/>. Acesso em: 22 maio 2026.

BACAS, Belén M.; CAÑIZAL, Jorge; KONIETZKY, Heinz. Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 7, n. 6, p. 638–645, 2015.

BANYHUSSAN, Qais S.; HASSAN, Hanan A.; HAMAD, Badr A. Investigation of Shear Strength of Subbase-Subgrade Interface with Geosynthetics Reinforcement Utilizing A Large-Scale Direct Shear Test. **E3S Web of Conferences**, v. 427, p. 03007, 2023.

BEJU, Y.Z.; MANDAL, J.N. Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: Preliminary Characteristic Evaluation. **Procedia Engineering**, v. 189, p. 239–246, 2017.

BULUT, Abdulkadir; SENGUL, Tayfun. Investigation of the Dewatering Process with Geotextile Tubes by Sedimentation, One- and Two-Dimensional Filtration Test Methods. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 50, n. 3, p. 2091–2108, 2025.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. IS 3346: Method for the determination of thermal conductivity of thermal insulation materials.

CARNEIRO, José Ricardo; LOPES, Maria De Lurdes. Weathering of a Nonwoven Polypropylene Geotextile: Field vs. Laboratory Exposure. **Materials**, v. 15, n. 22, p. 8216, 2022.

CAZZUFFI, Daniele; RECALCATI, Piergiorgio; CALVARANO, Lidia Sarah; *et al*. A REVIEW OF DIRECT SHEAR AND INCLINED PLANE TESTS RESULTS FOR DIFFERENT INTERFACES IN LANDFILL CAPPING. **Detritus**, n. 20, p. 100–111, 2022.

CERATO, Ab; LUTENEGGER, Aj. Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands. **Geotechnical Testing Journal**, v. 29, n. 6, p. 507–516, 2006.

CHANG, Ji-Yun; FENG, Shi-Jin. A constitutive model for geosynthetic interfaces considering nonlinear softening behavior. **Computers and Geotechnics**, v. 143, p. 104633, 2022.

CHATRABHUJ; MESHRAM, Kundan. Use of geosynthetic materials as soil reinforcement: an alternative eco-friendly construction material. **Discover Civil Engineering**, v. 1, n. 1, p. 41, 2024.

CHIU, P.; FOX, P. J. Internal and interface shear strengths of unreinforced and needle-punched geosynthetic clay liners. **Geosynthetics International**, v. 11, n. 3, p. 176–199, 2004.

CHRYSIKOS, D. A.; ATMATZIDIS, D.K.; MISSIRLIS, E.G. EPS geofoam surface shear resistance. **Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics (8 ICG)**, 2006. Disponível em: <https://library.geosyntheticssociety.org/wp-content/uploads/resources/proceedings/E.14.06%20EPS%20geofoam%20surface%20shear%20resistance.pdf>.

CHUN, Byung Sik; LIM, Hae-Sik; SAGONG, Myung; *et al*. Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 22, n. 4, p. 223–237, 2004.

DI BATTISTA, Vanessa; ROWE, R. Kerry. TCE and PCE diffusion through five geomembranes including two coextruded with an EVOH layer. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, n. 5, p. 655–666, 2020.

DING, Zezhao; BABAR, Aijaz Ahmed; WANG, Chao; *et al*. Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications: Manufacturing and structural design. **Composites Communications**, v. 25, p. 100481, 2021.

DING, Zezhao; BABAR, Aijaz Ahmed; WANG, Chao; *et al*. Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications: Manufacturing and structural design. **Composites Communications**, v. 25, p. 100481, 2021.

DOVE, J.E.; FROST, J.D.; DOVE, P.M. Geomembrane Microtopography by Atomic Force Microscopy. **Geosynthetics International**, v. 3, n. 2, p. 227–245, 1996.

DOVE, Joseph E.; FROST, J. David. Peak Friction Behavior of Smooth Geomembrane-Particle Interfaces. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, n. 7, p. 544–555, 1999.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA 9090: Compatibility Test for Wastes and Membrane Liners.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 826: Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1602: Thermal insulating products for building applications - Determination of the apparent density.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12086: Thermal insulating products for building applications - Determination of water vapour transmission properties.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12087: Thermal insulating products for building applications - Determination of long term water absorption by immersion.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12667: Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 13501-1: Fire classification of construction products and building elements.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN ISO 12957-2: Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 2: Inclined plane test.

FERREIRA, F. B.; VIEIRA, C. S.; LOPES, M. L. Direct shear behaviour of residual soil–geosynthetic interfaces – influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type. **Geosynthetics International**, v. 22, n. 3, p. 257–272, 2015.

FERREIRA, Fernanda Bessa; PEREIRA, Paulo M.; VIEIRA, Castorina Silva; *et al*. Time-Dependent Response of a Recycled C&D Material-Geotextile Interface under Direct Shear Mode. **Materials**, v. 14, n. 11, p. 3070, 2021.

FERREIRA, Fernanda; VIEIRA, Castorina; DE LURDES LOPES, Maria. Cyclic and Post-cyclic Shear Behaviour of a Granite Residual Soil – Geogrid Interface. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 379–386, 2016.

FOWMES, Gary John; DIXON, Neil; FU, Liwei; *et al*. Rapid prototyping of geosynthetic interfaces: Investigation of peak strength using direct shear tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, n. 6, p. 674–687, 2017.

FRANCO, Yara Barbosa; VALENTIN, Clever Aparecido; KOBELNIK, Marcelo; *et al*. Accelerated Aging Ultraviolet of a PET Nonwoven Geotextile and Thermoanalytical Evaluation. **Materials**, v. 15, n. 12, p. 4157, 2022.

GARCIA, A.J.S. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO. 2023.

GE, Qi; ZUO, Wenhao; LIU, Renkuan; *et al*. Experimental Studies for Shear and Multi-Impact Resistance Performance of Sand–Geofoam Material. **Buildings**, v. 12, n. 5, p. 633, 2022.

GENERAL SERVICES ADMINISTRATION. FTMS 101C: Federal Test Method Standard 101C - Puncture Resistance.

GEOSYNTHETIC INSTITUTE. GRI GM13: Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes.

GEOSYNTHETIC INSTITUTE. GRI GM14: Selecting Variable Intervals for Taking Geomembrane Destructive Seam Samples.

GEOSYNTHETIC INSTITUTE. GRI GM19: Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Polyolefin Geomembranes.

GHAZAVI, Mahmoud; ARAEI, Ata Aghaei; AZADNOUR, Behnam. Dynamic properties of geofoam (EPS) from dry to fully saturated conditions. **Construction and Building Materials**, v. 462, p. 139864, 2025.

GILBERT, R.B.; BYRNE, R.J. Strain-Softening Behavior of Waste Containment System Interfaces. **Geosynthetics International**, v. 3, n. 2, p. 181–203, 1996.

GILBERT, R.B.; BYRNE, R.J. Strain-Softening Behavior of Waste Containment System Interfaces. **Geosynthetics International**, v. 3, n. 2, p. 181–203, 1996.

HALAKE, Kantappa; SHARMA, Sanjay; JAIN, Gaurav. Overview of Polyethylene Based Multi-layered Geomembrane Through Blown Extrusion Process. **E3S Web of Conferences**, v. 368, p. 02013, 2023.

HE, Pengfei; CAO, Haitao; DONG, Jianhua; *et al*. Experimental study on the effect of freeze-thaw cycles on the shear characteristics of frozen soil-composite geotextile interface. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 54, p. 104011, 2024.

HEBELER, G; FROST, J; MYERS, A. Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane-geotextile systems. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 1, p. 77–105, 2005.

HORVATH, J.S. Expanded Polystyrene (EPS) geofoam: An introduction to material behavior. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 13, n. 4, p. 263–280, 1994.

HOU, Juan; XING, Xing; BENSON, Craig H. Thermo-Hydro-Mechanical Shear Behavior of Interfaces between a Textured Geomembrane and Geosynthetic Clay Liner. *In*: **Geo-Congress 2023**. Los Angeles, California: American Society of Civil Engineers, 2023, p. 545–553. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784484685.055>. Acesso em: 21 maio 2026.

HWANG, Gin-Shing; HWU, Bao-Lin; HSING, Wen-Hao; *et al*. Manufacturing effects on the hydraulic properties of needlepunched nonwoven geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 16, n. 6, p. 355–363, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 354: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10456: Building materials and products - Hygrothermal properties.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12957-1: Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 1: Direct shear test. 2018.

JIE, Soon Yuan; HOE, Leow Zhi; PAUL, Suvash Chandra; *et al*. Characterizing the Tensile Behaviour of Woven and Composite Fabrics under UV Exposure. **Applied Sciences**, v. 12, n. 22, p. 11440, 2022.

JOTISANKASA, Apiniti; RURGCHAISRI, Natthapat. Shear strength of interfaces between unsaturated soils and composite geotextile with polyester yarn reinforcement. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 46, n. 3, p. 338–353, 2018.

JUNIOR, Costa; DA [UNESP, Sergio Luiz. Avaliação da resistência de interface entre geomembranas e diferentes geossintéticos. 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/192021>. Acesso em: 22 maio 2026.

KANDPAL, L.; VANGLA, P. New insights into geotribology of non-dilative interfaces from novel experimental studies. **Geosynthetics International**, v. 31, n. 5, p. 524–540, 2024.

KHAJEH, Aghileh; JAMSHIDI CHENARI, Reza; PAYAN, Meghdad. A Review of the Studies on Soil-EPS Composites: Beads and Blocks. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 4, p. 3363–3383, 2020.

KHALAJ, Omid; MOHAMMAD AMIN GHOTBI SIABIL, Seyed; NASER MOGHADDAS TAFRESHI, Seyed; *et al*. The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS). **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 723, n. 1, p. 012014, 2020.

KHAN, Muhammad Imran; MEGUID, Mohamed A. Evaluating the Role of Geofoam Properties in Reducing Lateral Loads on Retaining Walls: A Numerical Study. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 4754, 2021.

KHAN, Muhammad Imran; MEGUID, Mohamed A. Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 4, n. 2, p. 12, 2018.

KHAN, Rizwan; LATHA, Gali Madhavi. Multi-scale understanding of sand-geosynthetic interface shear response through Micro-CT and shear band analysis. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 51, n. 3, p. 437–453, 2023.

KOERNER, George R.; KOERNER, Robert M. Puncture resistance of polyester (PET) and polypropylene (PP) needle-punched nonwoven geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, n. 3, p. 360–362, 2011.

KOERNER, Robert M.; WONG, W. K. (Connie); KOERNER, George R. Index Puncture Resistance of Geomembranes Using Various Protection Geosynthetics. **Geotechnical Testing Journal**, v. 35, n. 5, p. 762–770, 2012.

LAVOIE, Fernando Luiz; VALENTIN, Clever Aparecido; KOBELNIK, Marcelo; *et al*. HDPE Geomembranes for Environmental Protection: Two Case Studies. **Sustainability**, v. 12, n. 20, p. 8682, 2020.

LEÓN, Andrés; ZÚÑIGA, Daniel. Evaluating the integrity of HDPE geomembranes in high-stress heap leaching projects. **E3S Web of Conferences**, v. 569, p. 16001, 2024.

LI, Jia-Hsun; SHIU, Bing-Chiuan; LOU, Ching-Wen; *et al*. Mechanical properties of needle-punched/thermally treated non-woven fabrics produced from recycled materials. **The Journal of The Textile Institute**, v. 112, n. 1, p. 23–29, 2021.

LI, Yuhang; ZOU, Weilie; HAN, Zhong; *et al*. Monotonic and Cyclic Shear Behaviors of EPS Geofoam: Experiments and Hypoplastic Modeling. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 50, n. 4, p. 2060–2077, 2026.

LIN, J.; STARK, T. D.; IDRIES, A. Extrapolating residual GMX/GDC interface strength from direct shear tests. **Geosynthetics International**, v. 31, n. 6, p. 1011–1021, 2024.

LIN, J.; STARK, T. D.; IDRIES, A.; *et al*. GMX/GDC strength loss mechanisms.

Geosynthetics International, v. 31, n. 6, p. 824–834, 2024.

LIN, Jia Horng; HSIEH, Jing Chzi; LI, Jia Hsun; *et al*. Effects of Needle-Punch Depth on Properties of PET/LPET/Kevlar Nonwoven Geotextiles. **Advanced Materials Research**, v. 910, p. 266–269, 2014.

LIN, Jia-Horng; HSIEH, Jing-Chzi; HSING, Wen-Hao; *et al*. Applications of geotextiles made of PET-filament-based nonwoven fabrics. **Fibers and Polymers**, v. 17, n. 11, p. 1955–1962, 2016.

LIU, Zhanlei; SHI, Jianyong; LIN, Hai; *et al*. Strength Characteristics of a Smooth HDPE Geomembrane/Nonwoven Geotextile Interface Based on a Novel Ring Shear Apparatus. **Polymers**, v. 15, n. 11, p. 2497, 2023.

MARKIEWICZ, Anna; KODA, Eugeniusz; KAWALEC, Jacek. Geosynthetics for Filtration and Stabilisation: A Review. **Polymers**, v. 14, n. 24, p. 5492, 2022.

MCCARTNEY, John S.; ZORNBERG, Jorge G.; SWAN, Robert H. Analysis of a Large Database of GCL-Geomembrane Interface Shear Strength Results. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 2, p. 209–223, 2009.

MEGUID, Mohamed A.; KHAN, Muhammad Imran. On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 10, n. 1, p. 6, 2019.

MÜLLER, Werner W; SAATHOFF, Fokke. Geosynthetics in geoenvironmental engineering. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 16, n. 3, p. 034605, 2015.

MULUTI, Shade Sitwala; KALUMBA, Denis; SOBHEE-BEETUL, Laxmee; *et al*. Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 9, n. 3, p. 33, 2023.

NAREJO, D.; KOERNER, R.M.; WILSON-FAHMY, R.F. Puncture Protection of Geomembranes Part II: Experimental. **Geosynthetics International**, v. 3, n. 5, p. 629–653, 1996.

NEGUSSEY, D; ANASTHAS, N; SRIRAJAN, S. INTERFACE FRICTION PROPERTIES OF EPS GEOFOAM.

NETO, José O.A.; BUENO, Benedito S. Laboratory Research on EPS Blocks Used in Geotechnical Engineering. **Soils and Rocks**, v. 35, n. 2, p. 169–180, 2012.

OBER S/A INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **GeoFort — Geotêxtil Poliéster — Linha GH — 100% Poliéster**. Nova Odessa: Ober Geossintéticos, 2021. Disponível em: <https://obergeo.com.br/catalogo/2021/Catalogo-GeoFort-Geotextil-Poliester.pdf>. Acesso em: 19 maio 2026.

OBER S/A INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **GeoFort: geotêxtil não tecido de polipropileno — Linha GF. Catálogo técnico**. Nova Odessa: Ober Geossintéticos, 2021. Disponível em: <https://obergeo.com.br/catalogo/2021/Catalogo-GeoFort-Geotextil-Polipropileno.pdf>. Acesso em: 19 maio 2026.

ÖZER, A. Tolga; AKAY, Onur. Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofoam. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 4, p. 04015156, 2016.

PADADE, A. H.; MANDAL, J. N. Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 1, p. 66–71, 2014.

PALIOTTO, Andrea; MEOCCI, Monica; TERROSI, Alessandro; *et al*. Systematic review, evaluation and comparison of different approaches for the implementation of road network safety analysis. **Heliyon**, v. 10, n. 7, p. e28391, 2024.

PALMEIRA, Ennio Marques. Soil–geosynthetic interaction: Modelling and analysis. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 5, p. 368–390, 2009.

PAOLO PAVANELLO; PAOLO CARRUBBA; NICOLA MORACI. Evaluation of geosynthetic interface friction at low normal stress: comparison between two different test procedures. **ACTA SCIENTIARUM POLONORUM - Architectura Budownictwo**, v. 21, n. 4, 2023. Disponível em: <https://www.architectura.actapol.net/pub/21_4_3.pdf>.

Acesso em: 21 maio 2026.

PAVANELLO, P.; CARRUBBA, P.; MORACI, N. The characterisation of geosynthetic interface friction by means of the inclined plane test. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 49, n. 1, p. 257–275, 2021.

PAVANELLO, Paolo; CARRUBBA, Paolo; MORACI, Nicola. Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress: Two Approaches with Increasing Shear Loading. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, p. 1065, 2022.

PUPPALA, Anand J.; RUTTANAPORAMAKUL, Pinit; CONGRESS, Surya Sarat Chandra. Design and construction of lightweight EPS geofoam embedded geomaterial embankment system for control of settlements. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 47, n. 3, p. 295–305, 2019.

RAMLI SULONG, Nor Hafizah; MUSTAPA, Siti Aisyah Syaerah; ABDUL RASHID, Muhammad Khairi. Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 20, p. 47529, 2019.

RARISON, Ramanambelina Faneva Mamambina; MBONIMPA, Mamert; BUSSIÈRE, Bruno; *et al*. Properties of HDPE Geomembrane Exhumed 20 Years After Installation in a Mine Reclamation Cover System. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 9, n. 1, p. 1, 2023.

ROWE, R. K.; JONES, D. D.; RUTTER, A. Polychlorinated biphenyl diffusion through HDPE geomembrane. **Geosynthetics International**, v. 23, n. 6, p. 408–421, 2016. ROWE, R. Kerry; YU, Yan. Tensile Strains in Geomembrane Landfill Liners. *In*: LI, Lin; CETIN, Bora; YANG, Xiaoming (Orgs.). **Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Ground Improvement and Geosynthetics**. Singapore: Springer Singapore, 2018, p. 1–10. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-0122-3_1>. Acesso em: 21 maio 2026.

SCHEIRS, John. **A Guide to Polymeric Geomembranes**. 1. ed. [s.l.]: Wiley, 2009. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470748213>. Acesso em: 21 maio 2026.

SCHOLZ, Philipp; FALKENHAGEN, Jana; WACHTENDORF, Volker; *et al*. Investigation on the Durability of a Polypropylene Geotextile under Artificial Aging Scenarios. **Sustainability**, v. 16, n. 9, p. 3559, 2024.

SCHOLZ, Philipp; PUTNA-NIMANE, Ieva; BARDA, Ieva; *et al*. Environmental Impact of Geosynthetics in Coastal Protection. **Materials**, v. 14, n. 3, p. 634, 2021.

SHADABI, Sadri; PARVIZI, Mansour; RABETI MOGHADAM, Masoud; *et al*. Attenuation Potential of Geofoam as Cover Material in Cut and Cover Tunnels during Earthquakes. **Journal of Earthquake Engineering**, v. 26, n. 14, p. 7194–7221, 2022.

SHEELEY, Michael; NEGUSSEY, Dawit. An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior. *In*: **Soft Ground Technology**. Noordwijkerhout, the Netherlands: American Society of Civil Engineers, 2001, p. 292–303. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/40552%28301%2923>. Acesso em: 22 maio 2026.

SHUKLA, Sanjay Kumar. **An Introduction to Geosynthetic Engineering**. 0. ed. [s.l.]: CRC Press, 2017. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781498778091>. Acesso em: 21 maio 2026.

SIMPSON, A; RATTIGAN, Ig; KALAVSKY, E; *et al*. Thermal conductivity and conditioning of grey expanded polystyrene foams. **Cellular Polymers**, v. 39, n. 6, p. 238–262, 2020.

SOHRABVEISEH; YOUSEFI, Ali A. Compressive behavior and thermal conductivity-density correlation of expanded polystyrene thermal insulators. **Iranian Polymer Journal**, v. 30, n. 8, p. 849–854, 2021.

SREEKANTAN, P. G.; VANGLA, P.; RAMANA, G. V. Image-aided physical and compression characterisation of expanded polystyrene geofoam. **Geosynthetics International**, v. 31, n. 3, p. 283–295, 2024.

THIEL, R. Selection of long-term shear strength parameters for strain softening geosynthetic interfaces (Rowe lecture). *In*: BIONDI, Giovanni; CAZZUFFI, Daniele; MORACI, Nicola; *et al* (Eds.). **Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet**.

1. ed. London: CRC Press, 2023, p. 70–102. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781003386889/chapters/10.1201/9781003386889-3>. Acesso em: 21 maio 2026.

TOUZE-FOLTZ, Nathalie. Quantification of Diffusive Transfers in Multicomponent Geosynthetic Clay Liners. *In*: **Geo-Chicago 2016**. Chicago, Illinois: American Society of Civil Engineers, 2016, p. 59–68. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784480144.007>. Acesso em: 21 maio 2026.

TRIPLETT, Eric J.; FOX, Patrick J. Shear Strength of HDPE Geomembrane/Geosynthetic Clay Liner Interfaces. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 6, p. 543–552, 2001.

VALENTIN, Clever Aparecido; KOBELNIK, Marcelo; FRANCO, Yara Barbosa; *et al*. Study of the Ultraviolet Effect and Thermal Analysis on Polypropylene Nonwoven Geotextile. **Materials**, v. 14, n. 5, p. 1080, 2021.

VIANA, Laura Aline Nogueira. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO EM DIFERENTES INTERFACES.

WANG, J.; GUTIERREZ, M. Discrete element simulations of direct shear specimen scale effects. **Géotechnique**, v. 60, n. 5, p. 395–409, 2010.

WASTI, Y. Geomembrane–geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 19, n. 1, p. 45–57, 2001.

WOJTASIK, Dariusz. An analysis of physical, hydraulic and mechanic properties of nonwoven needle-punched geotextiles. **Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation**, v. 40, n. 1, p. 115–123, 2008.

XENAKI, V.C.; ATHANASOPOULOS, G.A. Experimental Investigation of the Interaction Mechanism at the EPS Geofoam-Sand Interface by Direct Shear Testing. **Geosynthetics International**, v. 8, n. 6, p. 471–499, 2001.

XIAO, Shuxiong; DAMIANS, Ivan P.; HU, Wei. A Review of the Soil–Geosynthetic Interface Direct Shear Test and Numerical Modelling. **Buildings**, v. 16, n. 1, p. 43, 2025.

XU, Gaojie; SHI, Jianyong; LI, Yan. Change pattern of geomembrane surface roughness for geotextile/textured geomembrane interfaces. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 51, n. 1, p. 88–99, 2023.

XUE, Qiang; ZHANG, Qian; LI, Zhen-Ze; *et al*. The Tension and Puncture Properties of HDPE Geomembrane under the Corrosion of Leachate. **Materials**, v. 6, n. 9, p. 4109–4121, 2013.

YESILLER, N; CEKIC, A. Determination of Surface and Thickness Characteristics of Textured Geomembranes Using Image Analysis. **Geotechnical Testing Journal**, v. 28, n. 3, p. 275–287, 2005.

ZHOU, Jie; BAN, Chao; LIU, Chengjun; *et al*. Cemented soil-soil interface shear strength evaluation II: Roughness impact and quantitatively practical model based on RQD. **Rock Mechanics Bulletin**, p. 100270, 2025.

ZOU, Weilie; LI, Yuhang; HAN, Zhong; *et al*. Stress-strain responses of EPS geofoam upon cyclic simple shearing: Experimental investigations and constitutive modeling. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 53, n. 1, p. 350–364, 2025.

ASTM D4595.

APÊNDICE A – TABELAS DE CARACTERIZAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS LISAS E GEOMEMBRANAS TEXTURIZADAS.

Tabela 19 – Determinação de aspereza conforme ASTM D 5994 (2015a).

Corpo de Prova	GM LISA (mm)	GM TXT-AR (mm)
01	1,88	2,03
02	1,81	2,16
03	1,94	1,99
04	1,86	2,17
05	1,84	2,18
06	1,92	2,18
07	1,83	2,11
08	1,80	2,05
09	1,94	2,06
10	1,85	2,20
Média	**1,87**	**2,11**
CV (%)	**2,75%**	**3,56%**

Fonte: Autor (2026) adaptado de Costa Júnior (2020).

Tabela 20 – Determinação de aspereza conforme ASTM D 7466 (2015c)

Corpo de Prova	GM TXT-AR (mm)
01	0,362
02	0,356
03	0,336
04	0,354
05	0,345
06	0,374
07	0,354
08	0,359
09	0,342
10	0,334
Média	**0,352**
CV (%)	**3,53%**

Fonte: Autor (2026) adaptado de Costa Júnior (2020).

Tabela 21 – Determinação dos parâmetros de resistência à tração da Geomembrana Lisa conforme ASTM D 6693 (2015b)

Corpo de Prova	Resistência ao Escoamento (kN/m)	Deformação no Escoamento (%)	Resistência a Ruptura (kN/m)	Deformação na Ruptura (%)
01	32,80	16,60	57,10	757,70
02	33,40	16,30	58,30	765,60
03	35,50	15,70	59,10	784,40
04	33,70	14,70	61,40	805,20
05	34,70	15,90	59,80	782,70
06	35,00	15,20	63,00	884,50
07	36,10	14,10	67,60	942,70
08	33,40	13,40	60,70	877,60
09	35,80	14,20	56,50	808,10
10	33,00	13,50	54,60	802,70
Média	**34,34**	**14,96**	**59,81**	**821,12**
CV (%)	**3,56%**	**7,69%**	**6,17%**	**7,34%**

Fonte: Costa Júnior (2020).

Tabela 22 – Determinação dos parâmetros de resistência à tração da Geomembrana Texturizada conforme ASTM D 6693 (2015b)

Corpo de Prova	Resistência ao Escoamento (kN/m)	Deformação no Escoamento (%)	Resistência a Ruptura (kN/m)	Deformação na Ruptura (%)
01	39,10	13,30	46,70	613,10
02	40,00	13,40	35,30	128,00
03	40,10	13,20	36,10	273,80
04	39,40	13,70	46,80	613,50
05	41,70	13,50	37,80	354,20
06	37,90	15,50	41,50	467,50
07	38,50	15,00	45,60	500,80
08	38,60	15,90	44,00	463,40
09	38,20	14,50	41,60	473,10
10	37,40	14,70	37,20	421,80
Média	**39,09**	**14,27**	**41,26**	**430,92**
CV (%)	**3,24%**	**6,89%**	**10,76%**	**34,42%**

Fonte: Costa Júnior (2020).

Tabela 23 – Determinação dos parâmetros de resistência à perfuração da geomembrana lisa (GM LISA) e geomembrana texturizada (GM TXT-AR) conforme ASTM D4833 (2013b).

Corpo de Prova	GM LISA (N)	GM TXT-AR (N)
01	786	849
02	794	889
03	739	816
04	772	841
05	780	859
Média	**774**	**851**
CV (%)	**2,75%**	**3,13%**

Fonte: Costa Júnior (2020).

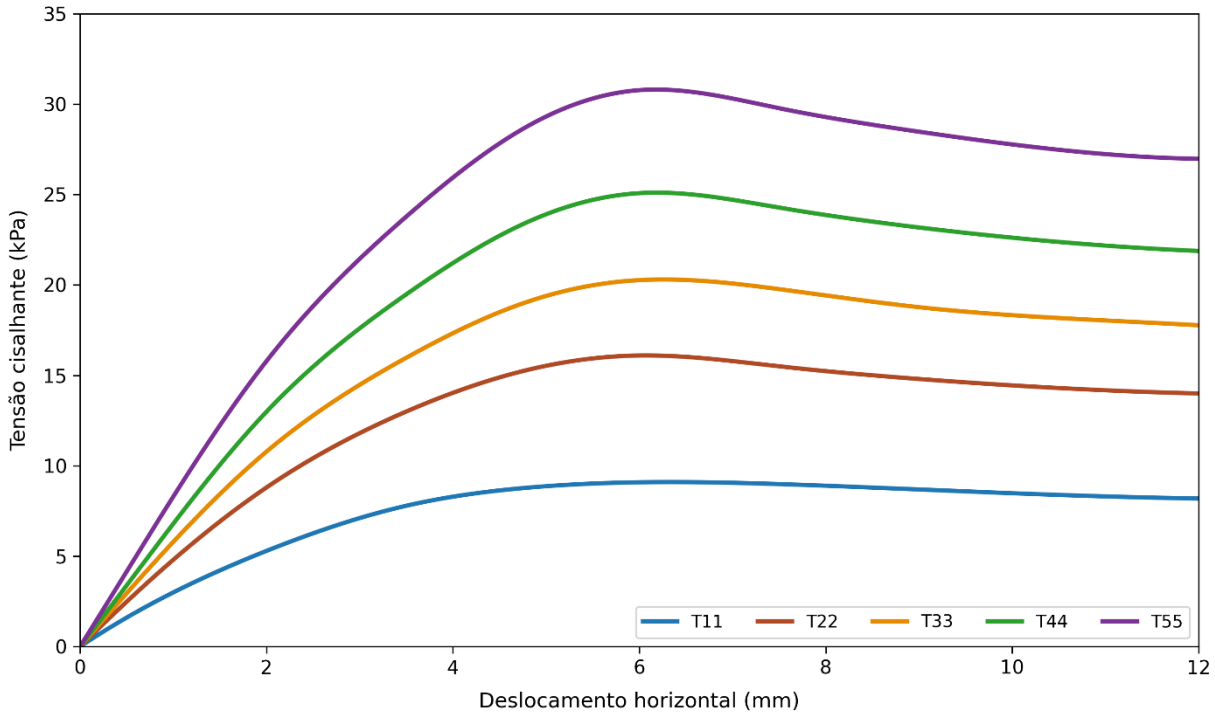
Tabela 24 – Determinação dos parâmetros de resistência ao rasgo da geomembrana lisa (GM LISA) e geomembrana texturizada (GM TXT-AR) conforme ASTM D1004 (2013a).

Corpo de Prova	GM LISA (N)	GM TXT-AR (N)
01	276,50	411,40
02	285,50	369,10
03	282,00	364,40
04	296,90	381,50
05	295,60	357,70
06	295,20	339,90
07	288,70	351,80
08	293,90	358,50
09	287,90	359,90
10	299,40	370,40
Média	**290,16**	**366,46**
CV (%)	**2,52%**	**5,29%**

Fonte: Costa Júnior (2020).

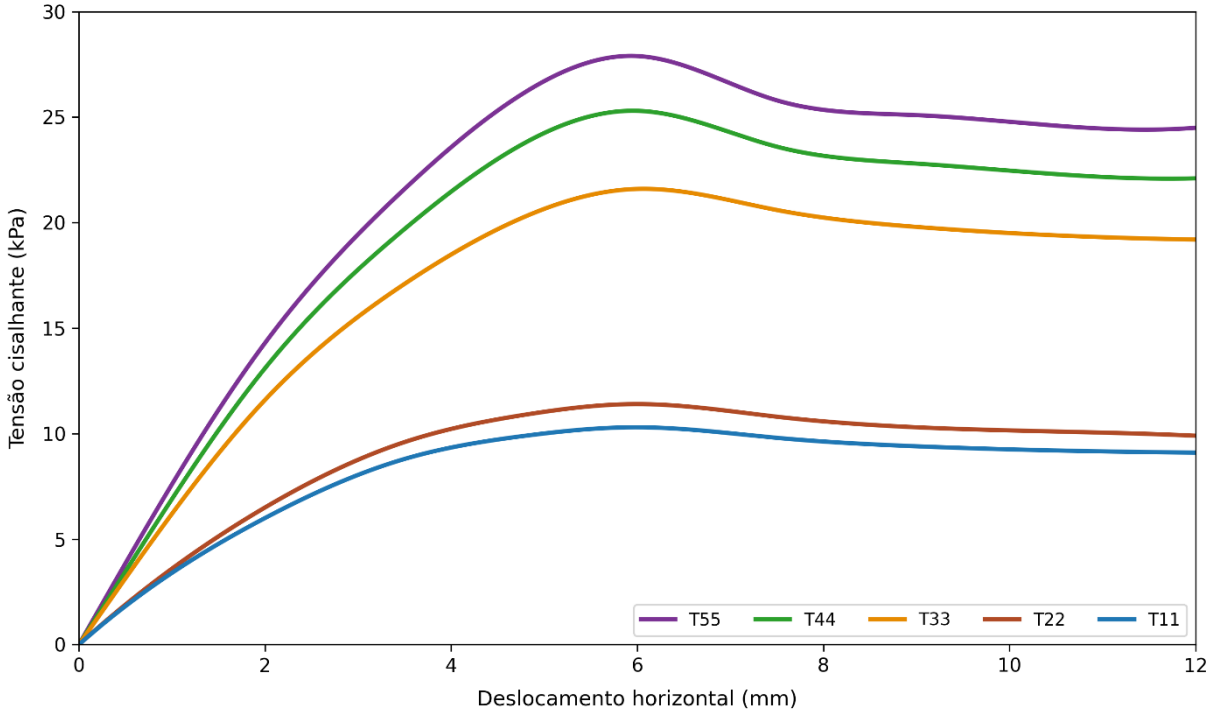
APÊNDICE B – GRÁFICOS DE TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTO HORIZONTAL PARA INTERFACE EPS-EPS.

Figura 34 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x E-20



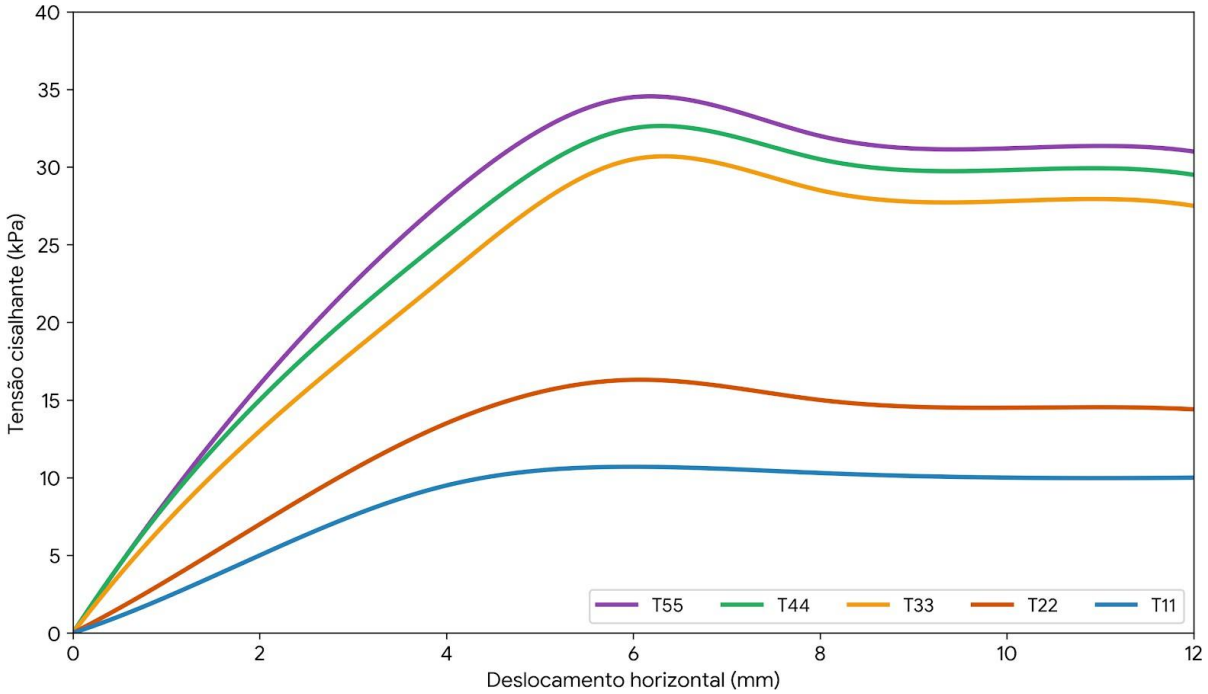
Fonte: Autor (2026).

Figura 35 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x E- 25



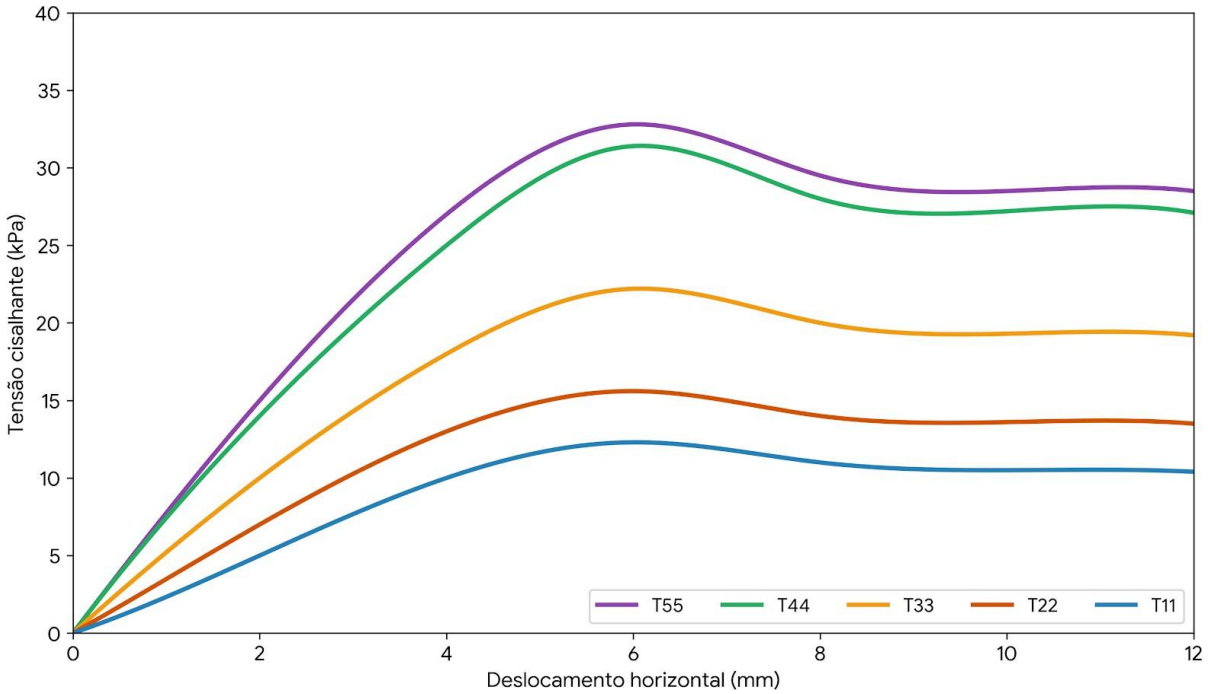
Fonte: Autor (2026).

Figura 36 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x E-30



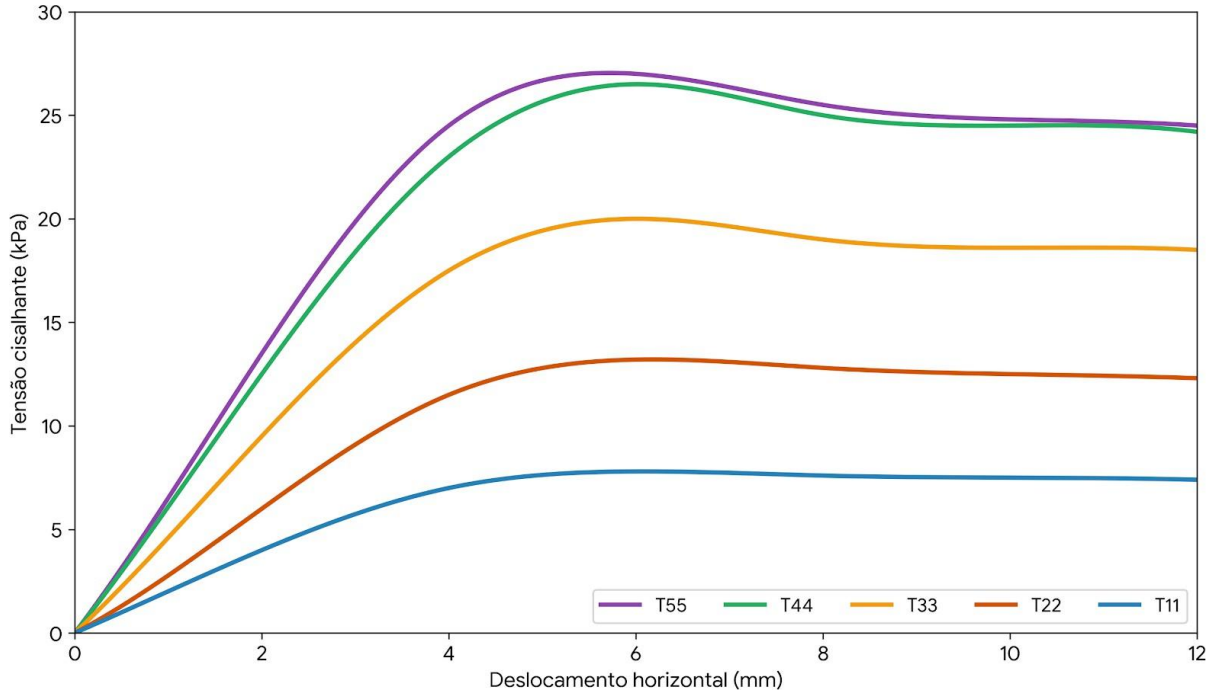
Fonte: Autor (2026).

Figura 37 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x E-25



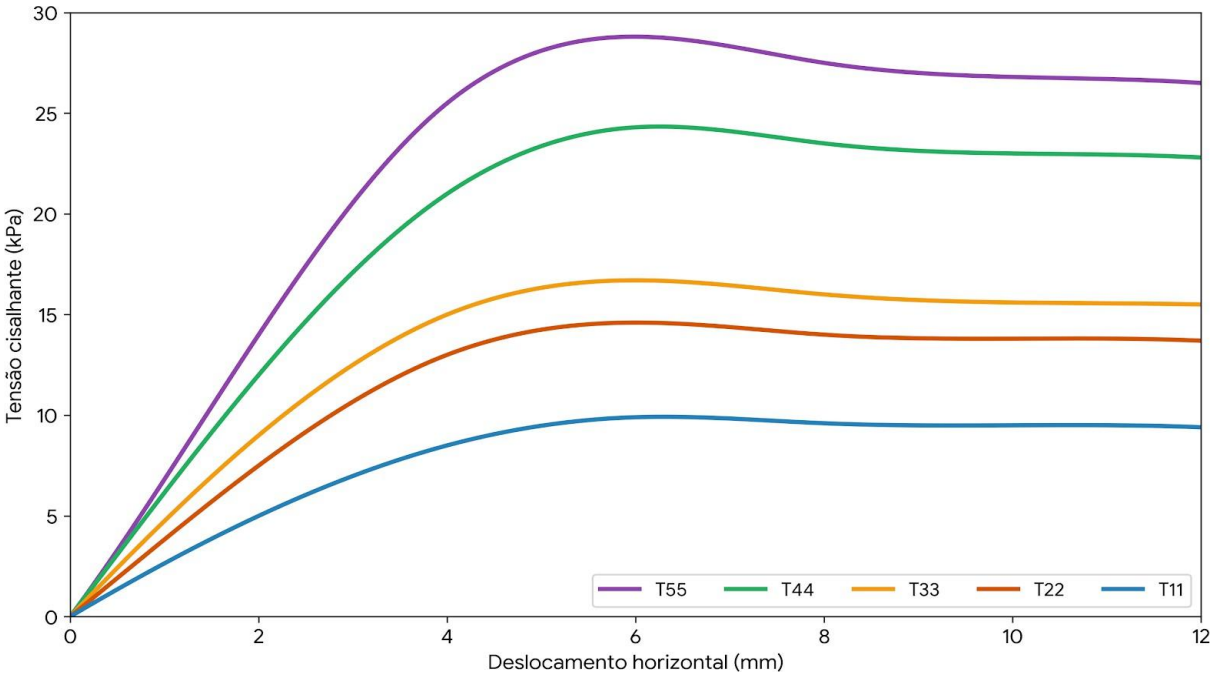
Fonte: Autor (2026).

Figura 38 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x E-30



Fonte: Autor (2026).

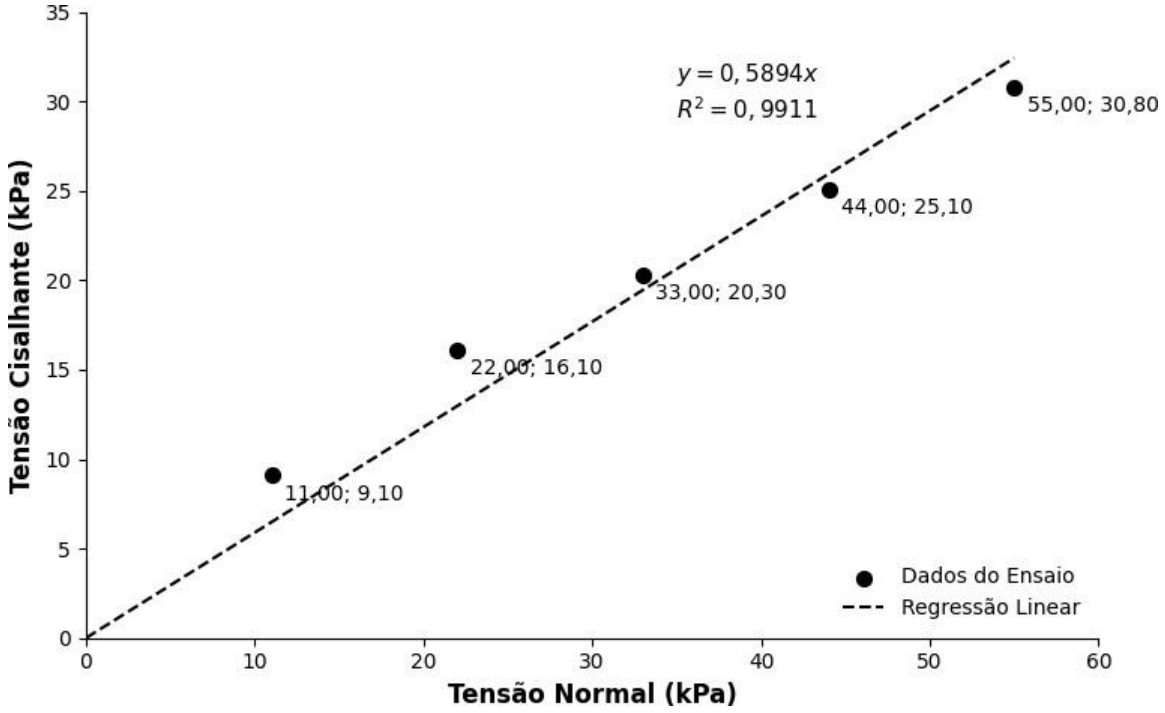
Figura 39 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal - E-25 x E-30



Fonte: Autor (2026).

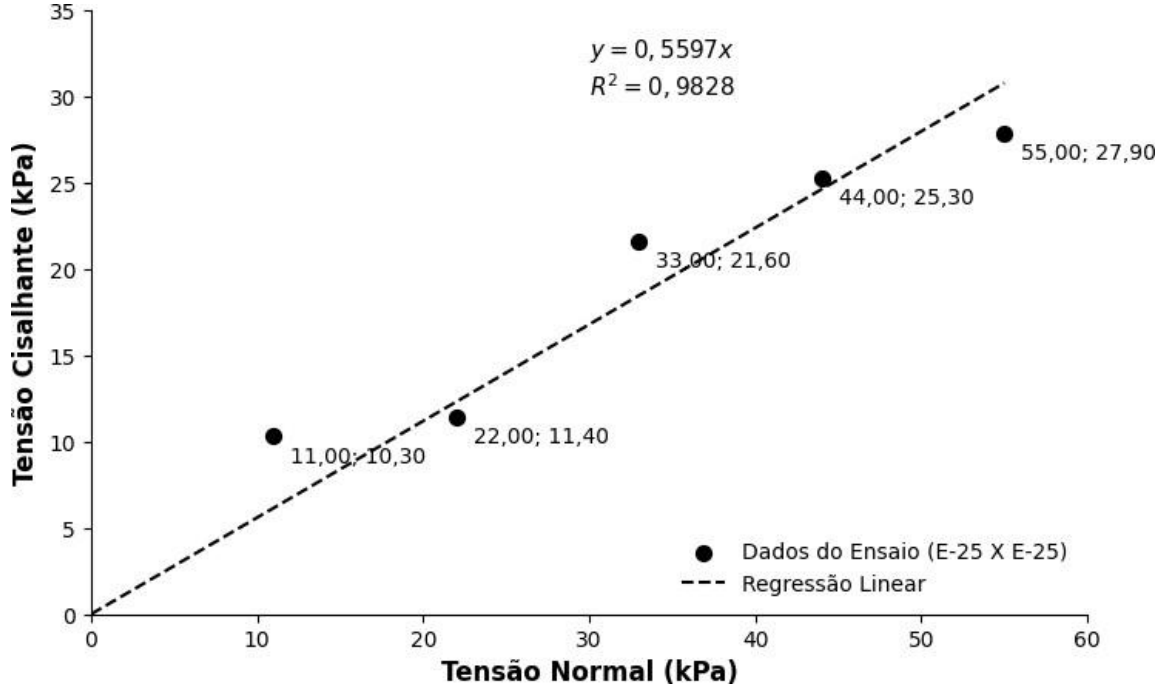
APÊNDICE C – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PICO (τPICO) PARA INTERFACE EPS-EPS

Figura 40 – Envoltória Geoexpandido E-20 X E-20



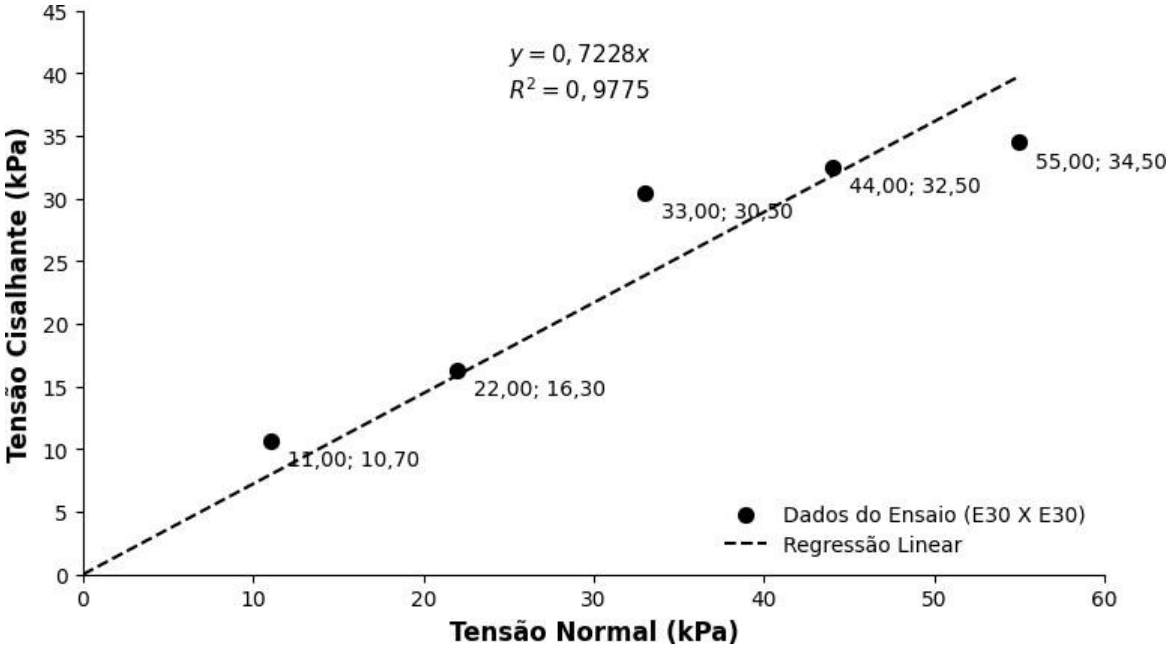
Fonte: Autor (2026).

Figura 41 – Envoltória Geoexpandido E-25 X E-25



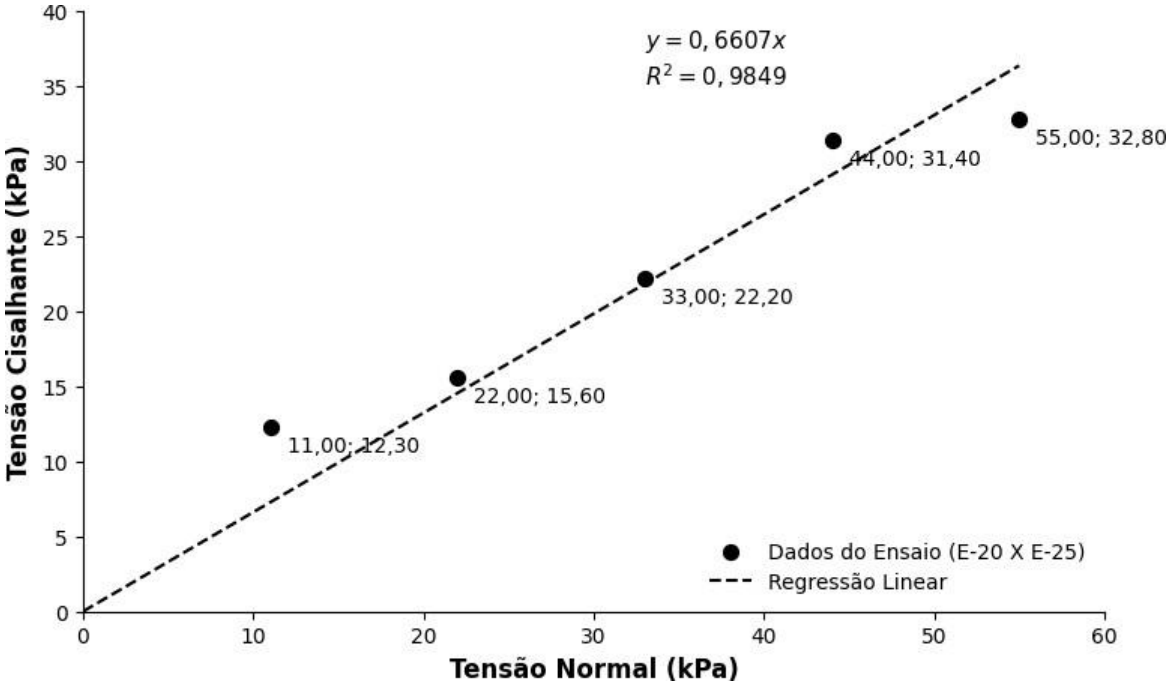
Fonte: Autor (2026).

Figura 42 – Envoltória Geoexpandido E-30 x E-30



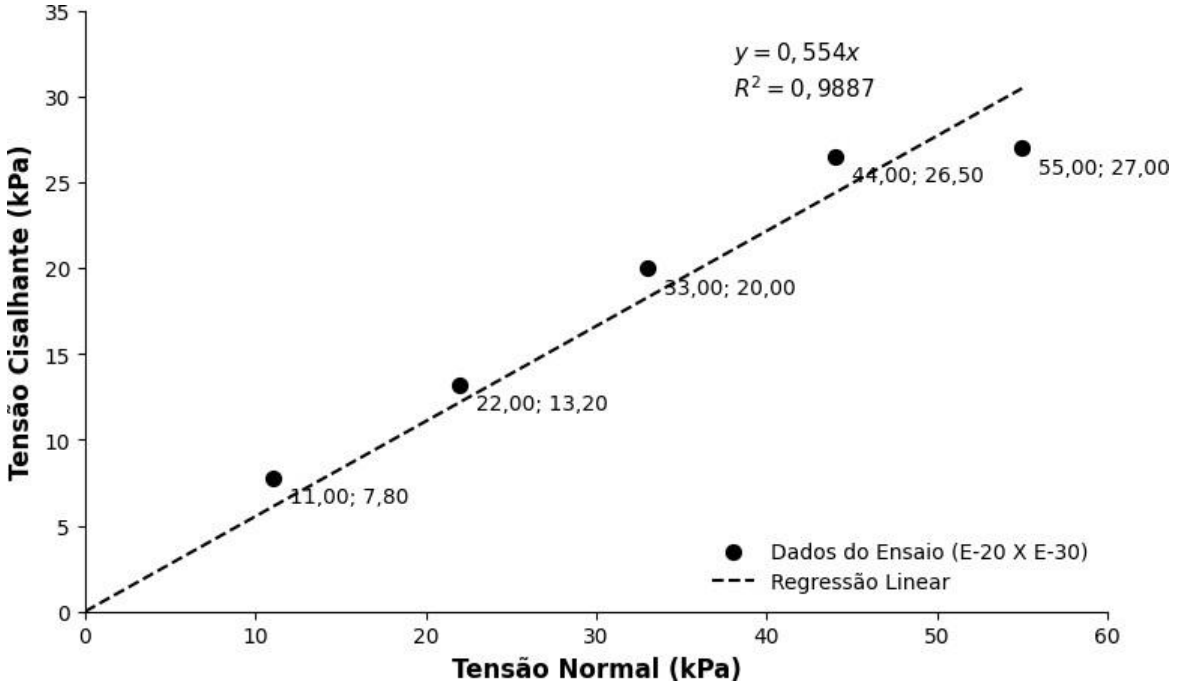
Fonte: Autor (2026).

Figura 43 – Envoltória Geoexpandido E-20 X E-25



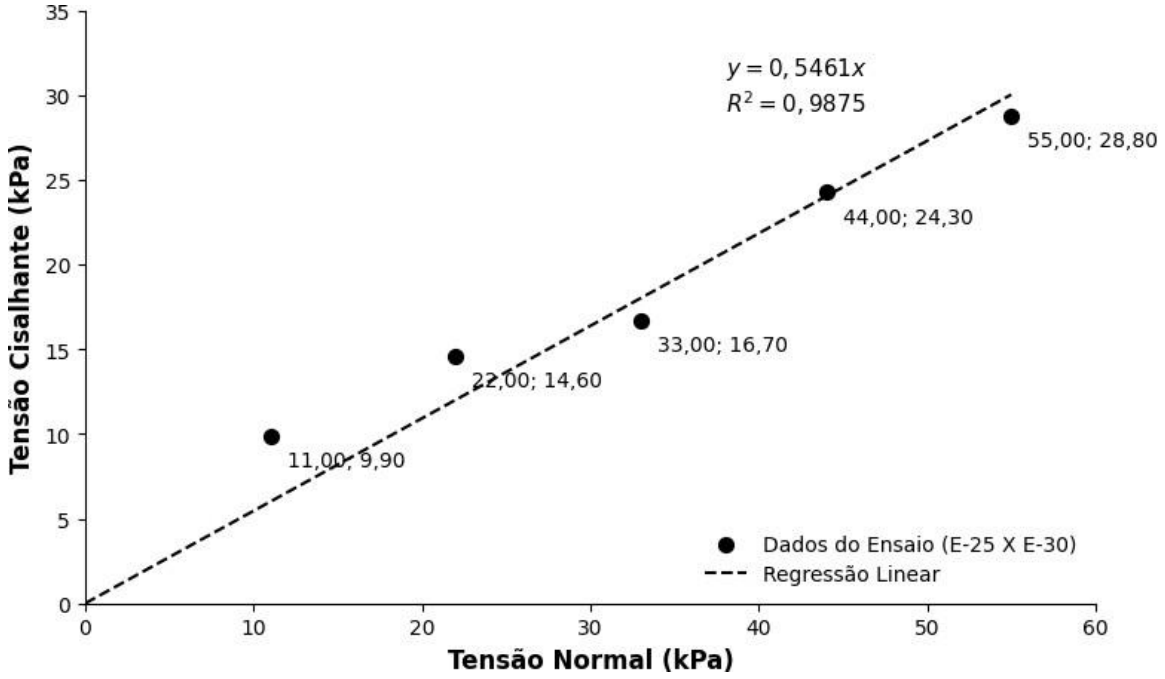
Fonte: Autor (2026).

Figura 44 – Envoltória Geoexpandido E-20 X E-30



Fonte: Autor (2026).

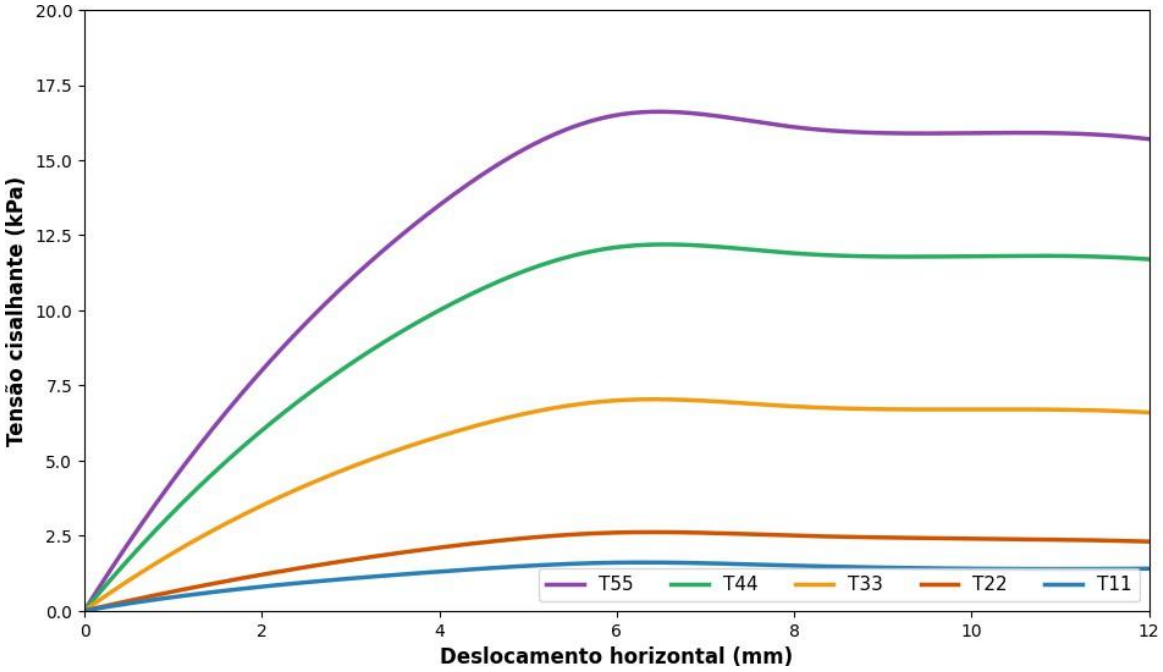
Figura 45 – Envoltória Geoexpandido E-25 x E-30



Fonte: Autor (2026).

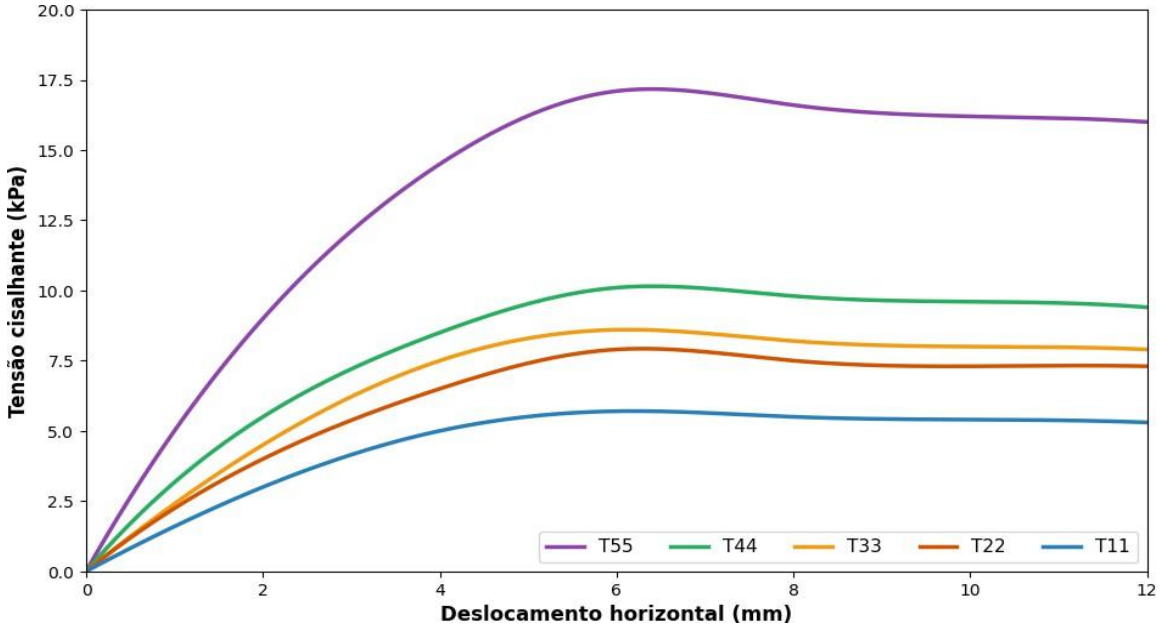
APÊNDICE D – GRÁFICOS DE TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTO HORIZONTAL PARA INTERFACE EPS-GEOMEMBRANA LISA E GEOMEMBRANA TEXTURIZADA.

Figura 46 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geomembrana lisa PEAD



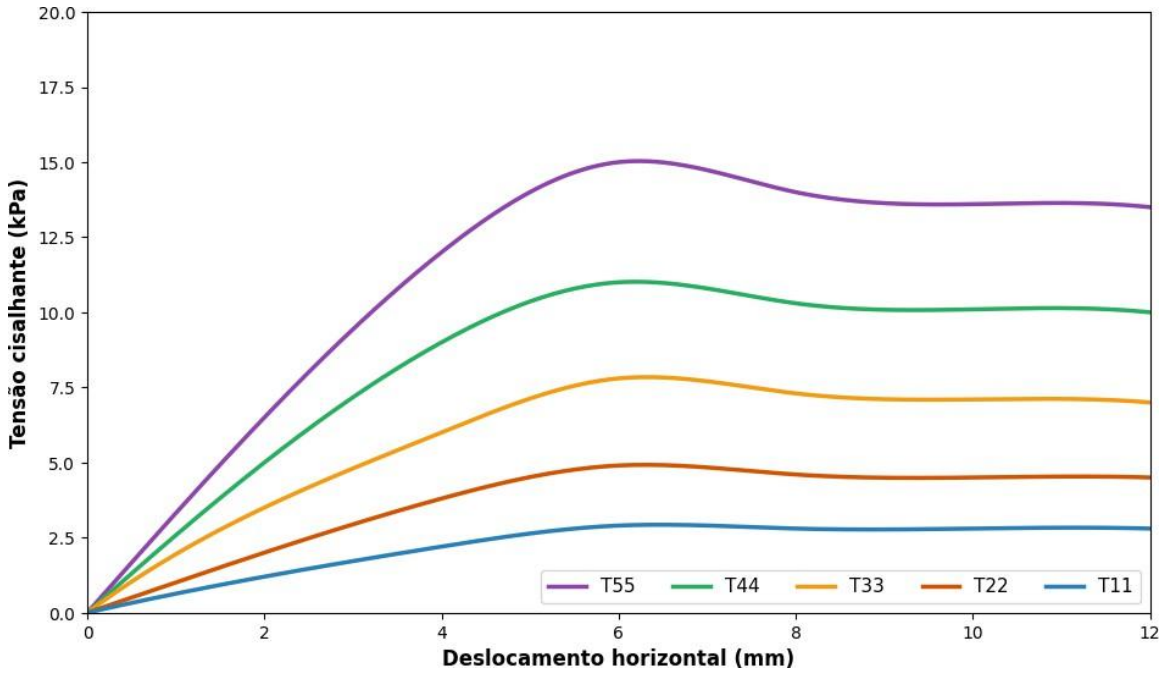
Fonte: Autor (2026).

Figura 47 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geomembrana lisa PEAD



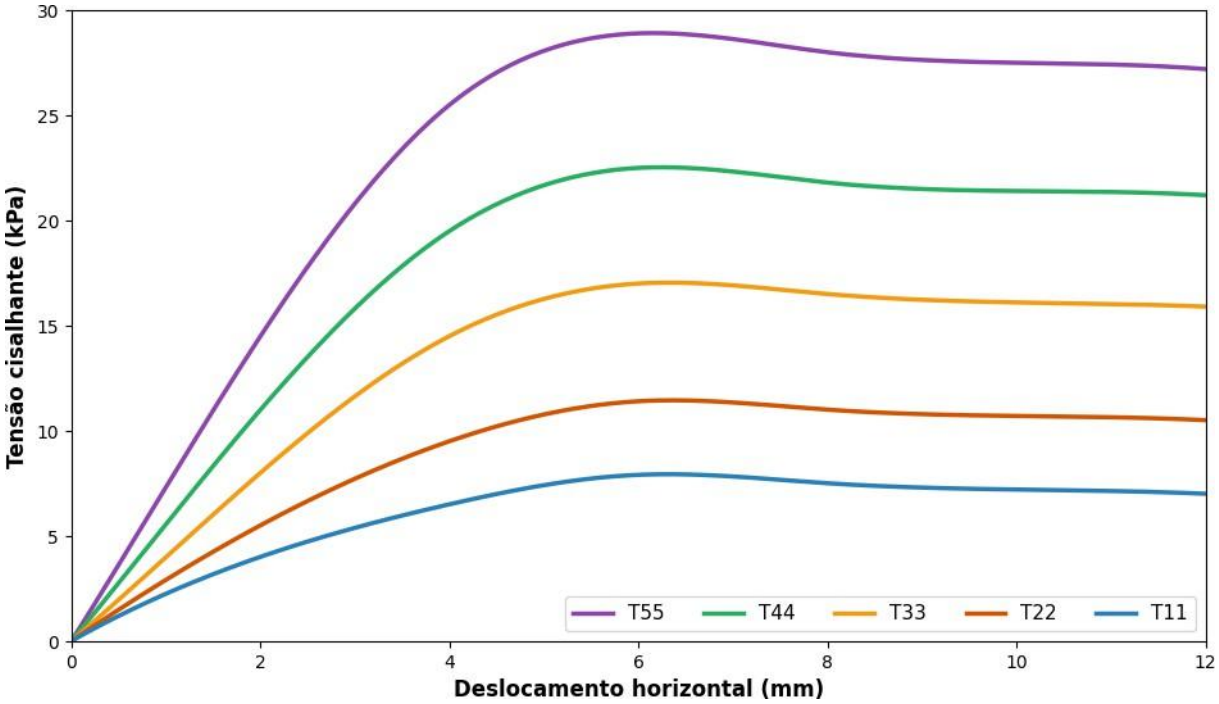
Fonte: Autor (2026).

Figura 48 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geomembrana lisa PEAD



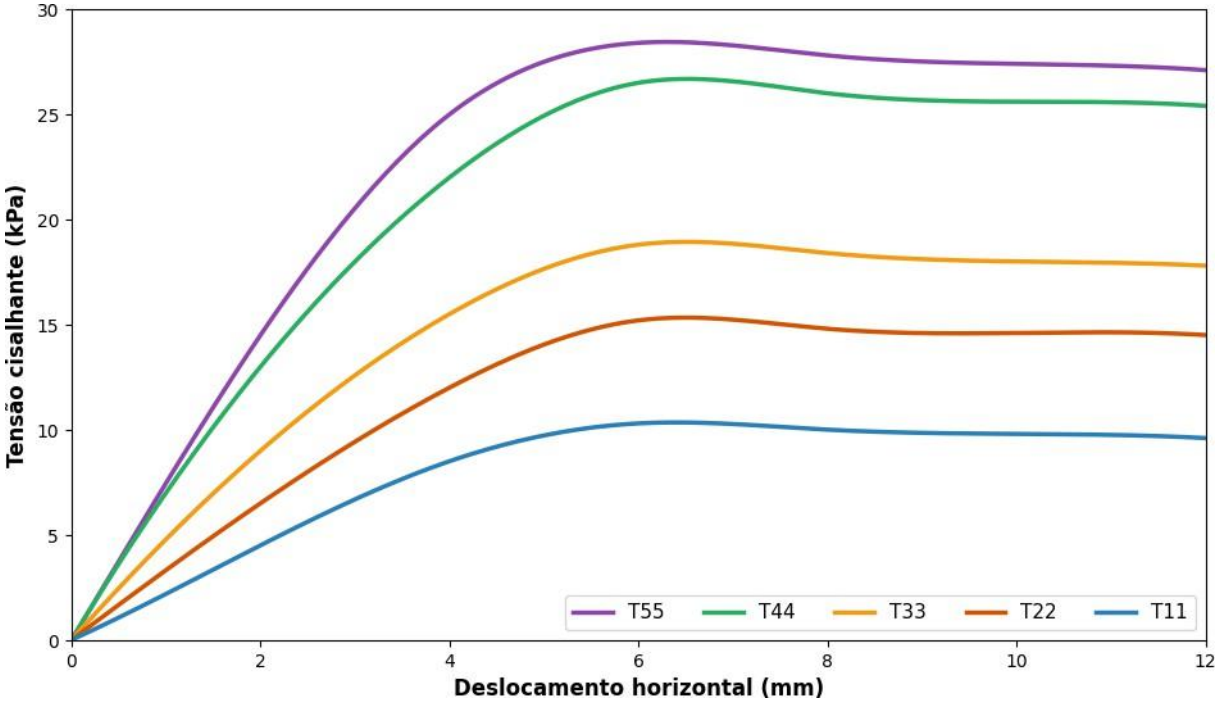
Fonte: Autor (2026).

Figura 49 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geomembrana texturizada tipo matriz balão



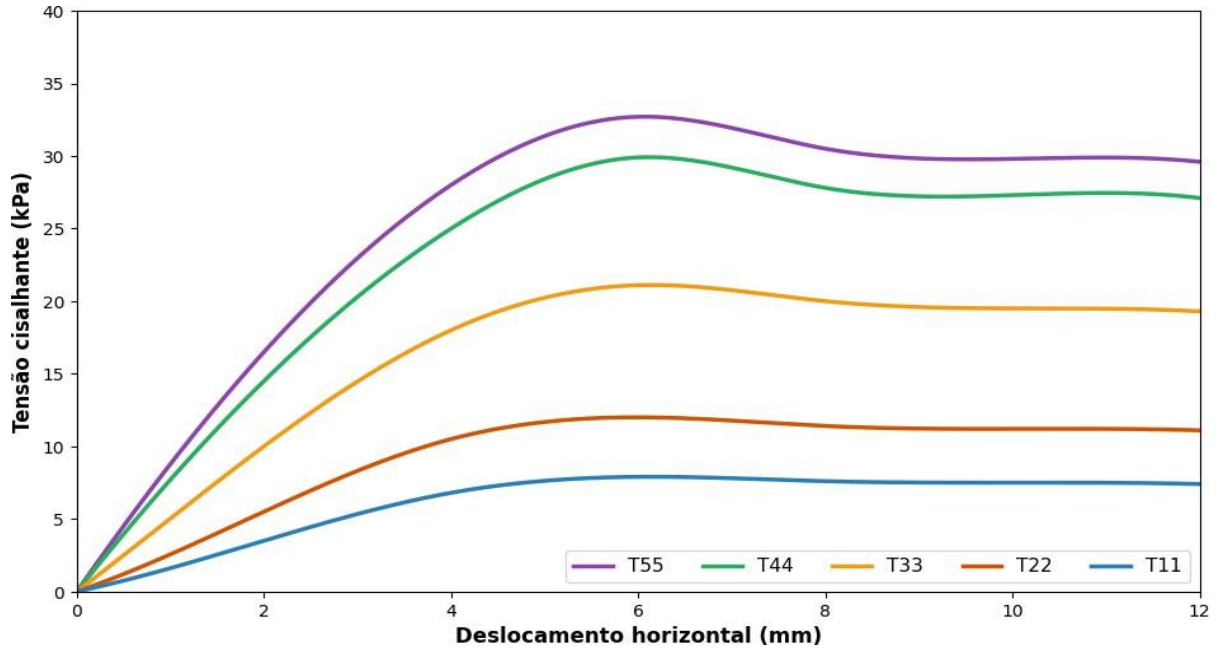
Fonte: Autor (2026).

Figura 50 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geomembrana texturizada tipo matriz balão



Fonte: Autor (2026).

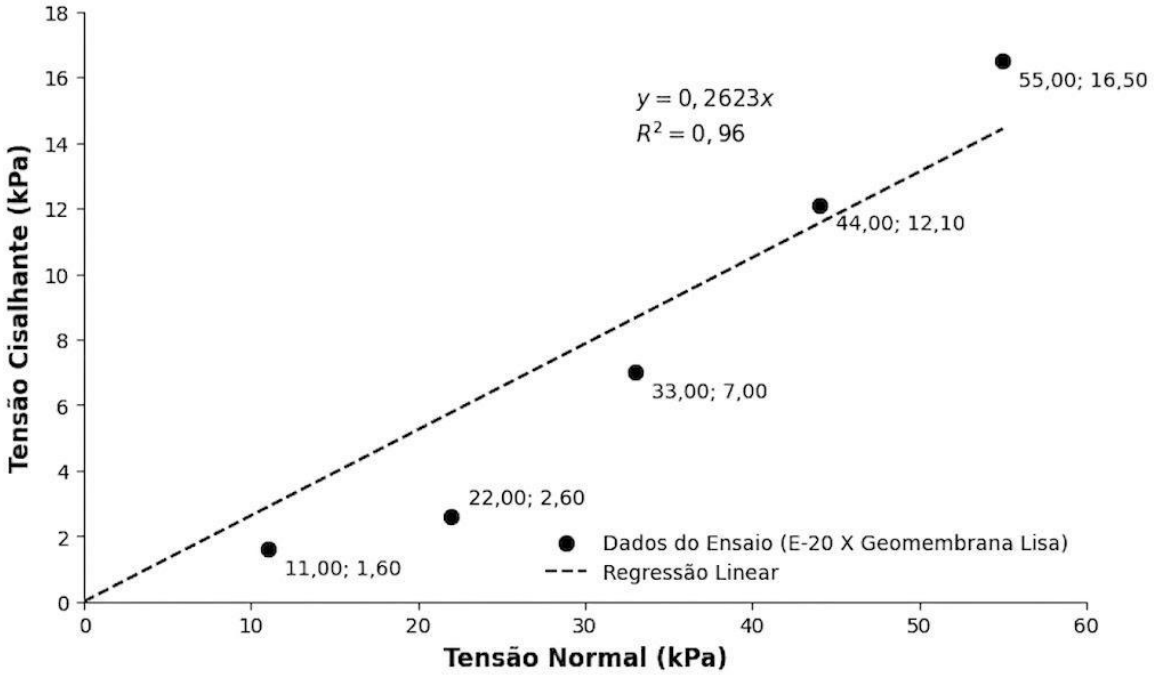
Figura 51 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geomembrana texturizada tipo matriz balão



Fonte: Autor (2026).

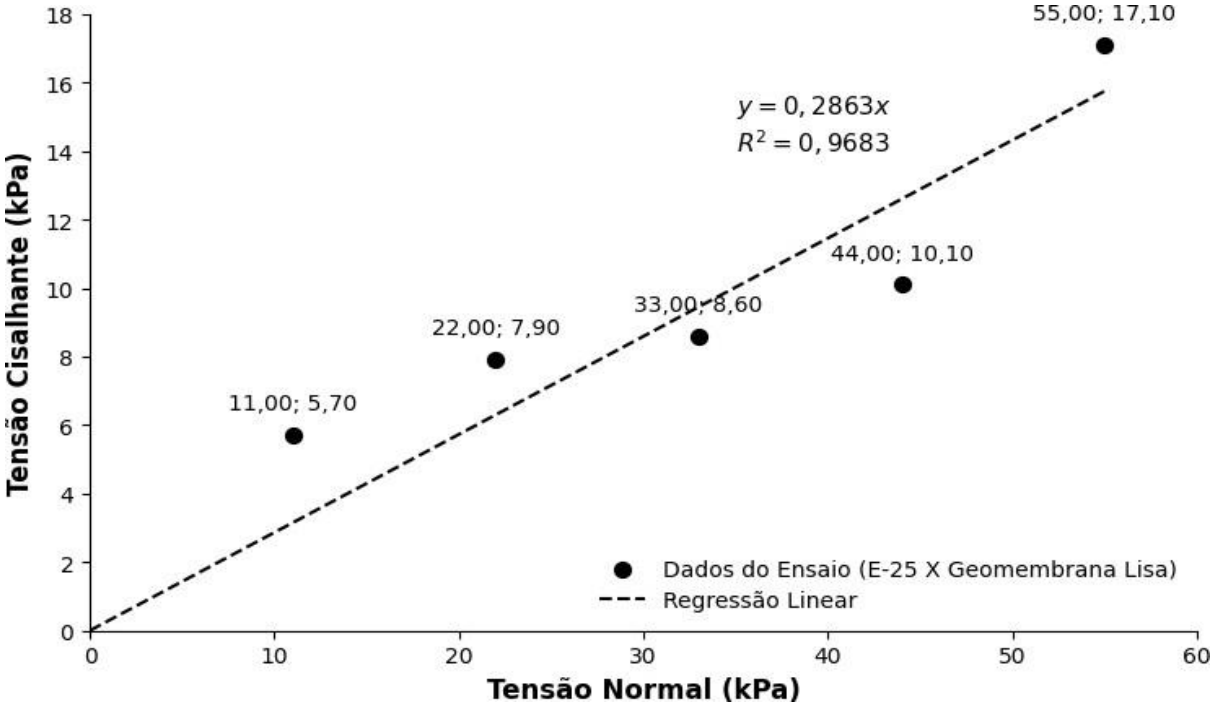
APÊNDICE E – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PICO (τPICO) PARA INTERFACE EPS-GEOMEMBRANA LISA E GEOMEMBRANA TEXTURIZADA.

Figura 52 – Envoltórias E-20 x Geomembrana Lisa PEAD



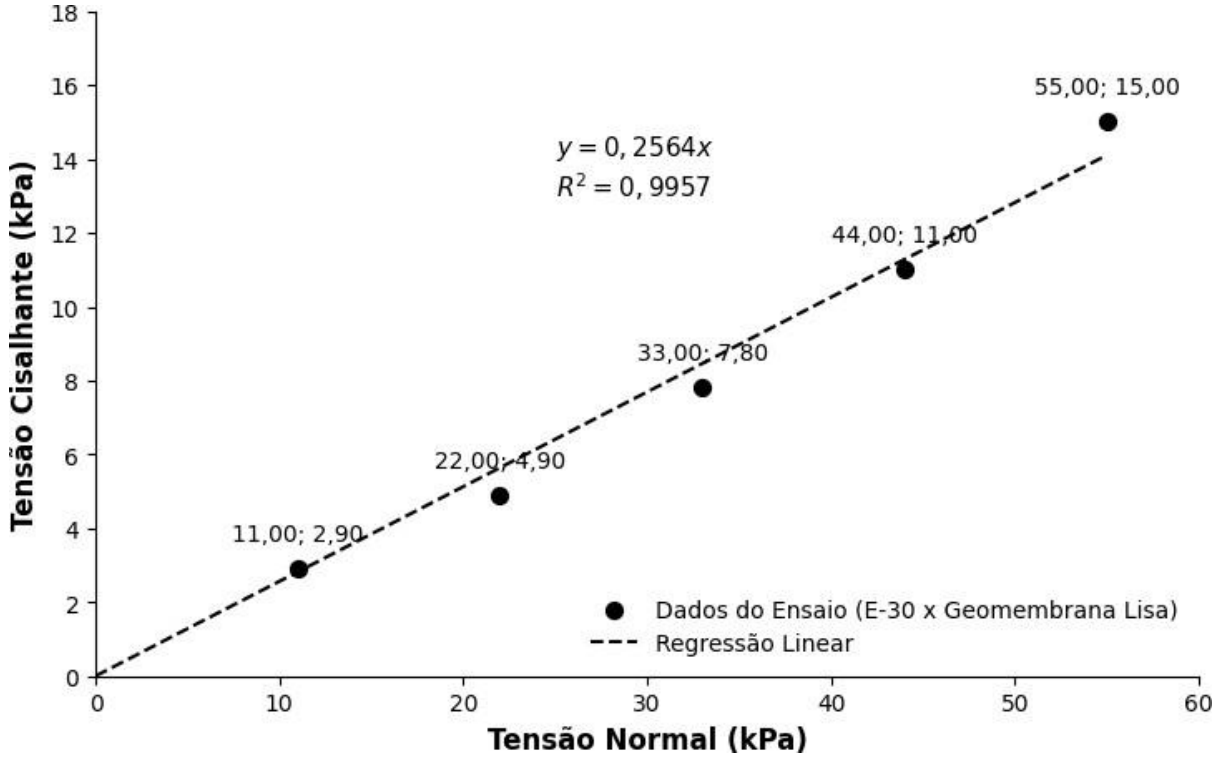
Fonte: Autor (2026).

Figura 53 – Envoltória E-25 x Geomembrana lisa PEAD



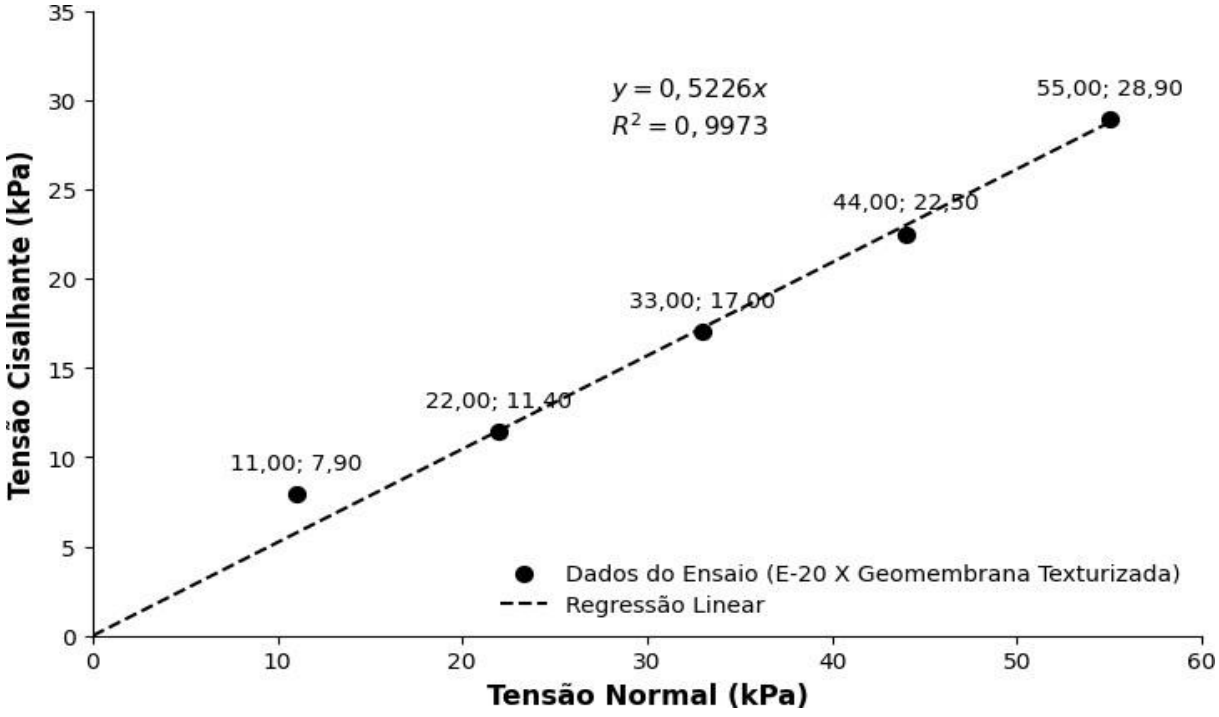
Fonte: Autor (2026).

Figura 54 – Envoltória E-30 x Geomembrana lisa PEAD



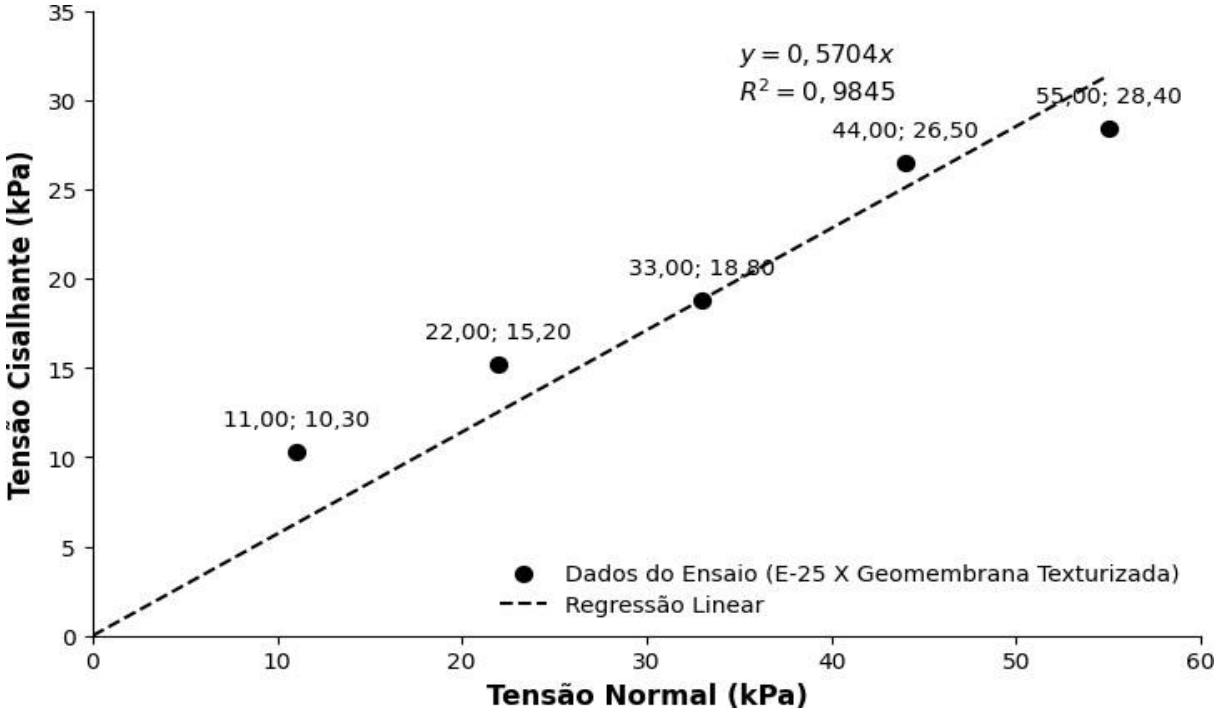
Fonte: Autor (2026).

Figura 55 – Envoltória E-20 x Geomembrana texturizada do tipo matriz balão



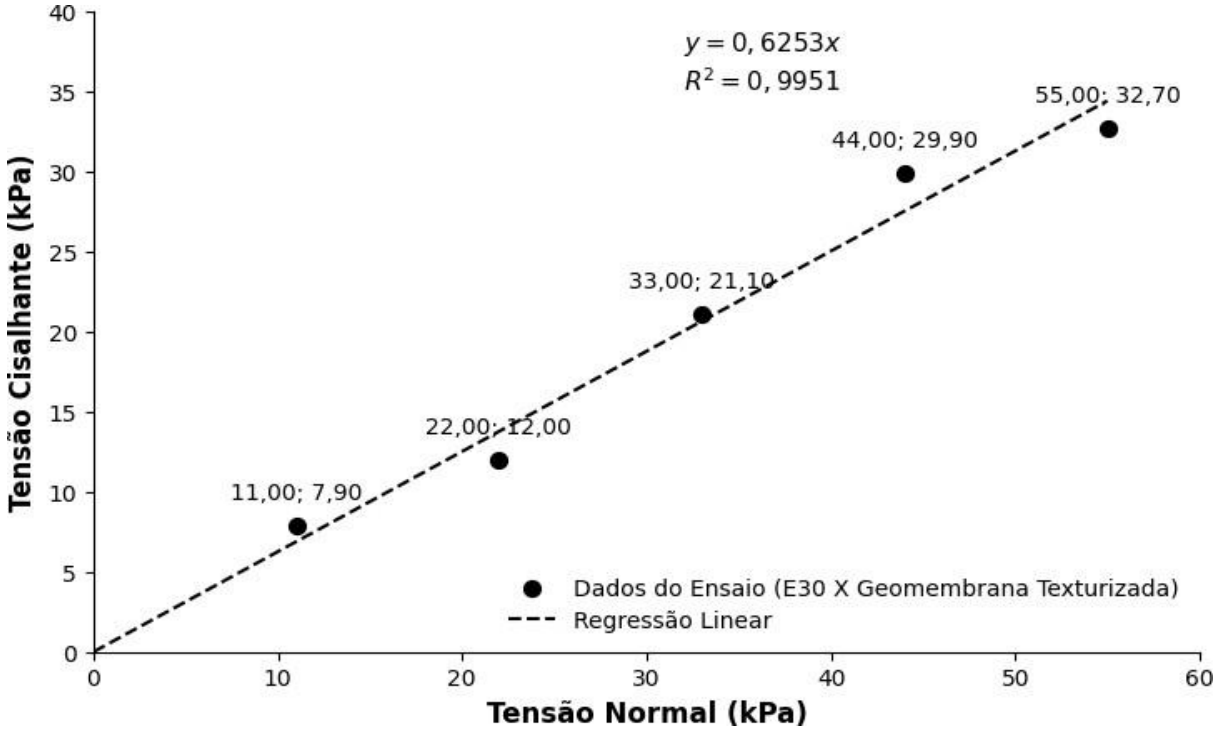
Fonte: Autor (2026).

Figura 56 – Envoltória E-25 x Geomembrana texturizada do tipo matriz balão



Fonte: Autor (2026).

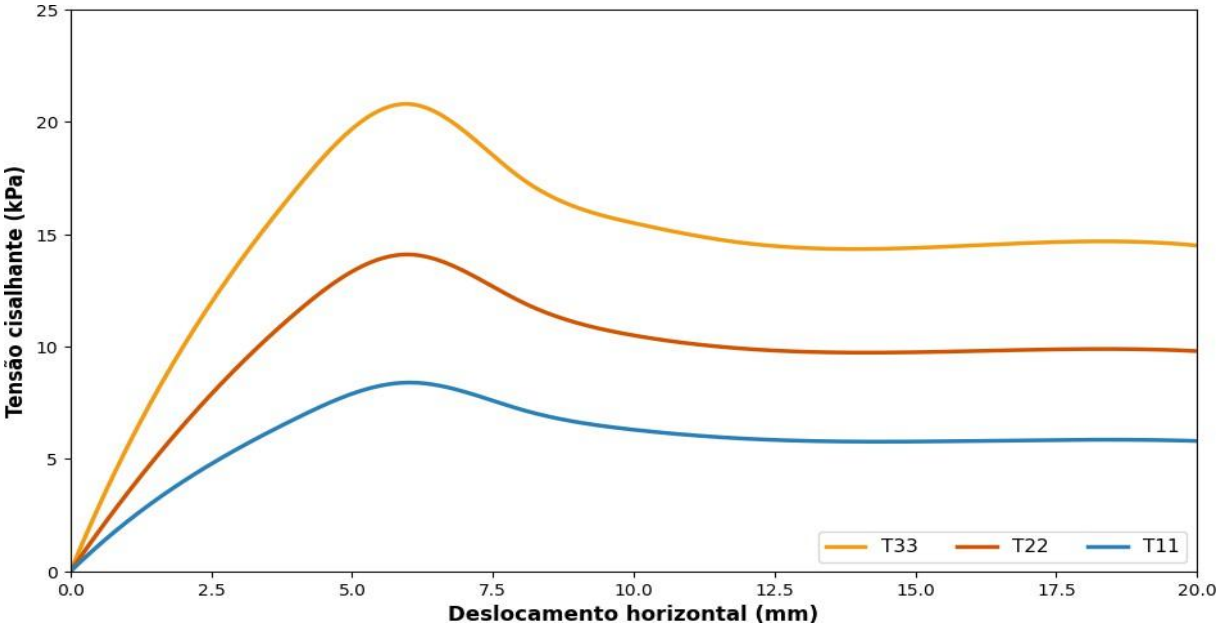
Figura 57 – Envoltória E-30 x Geomembrana texturizada do tipo matriz balão



Fonte: Autor (2026).

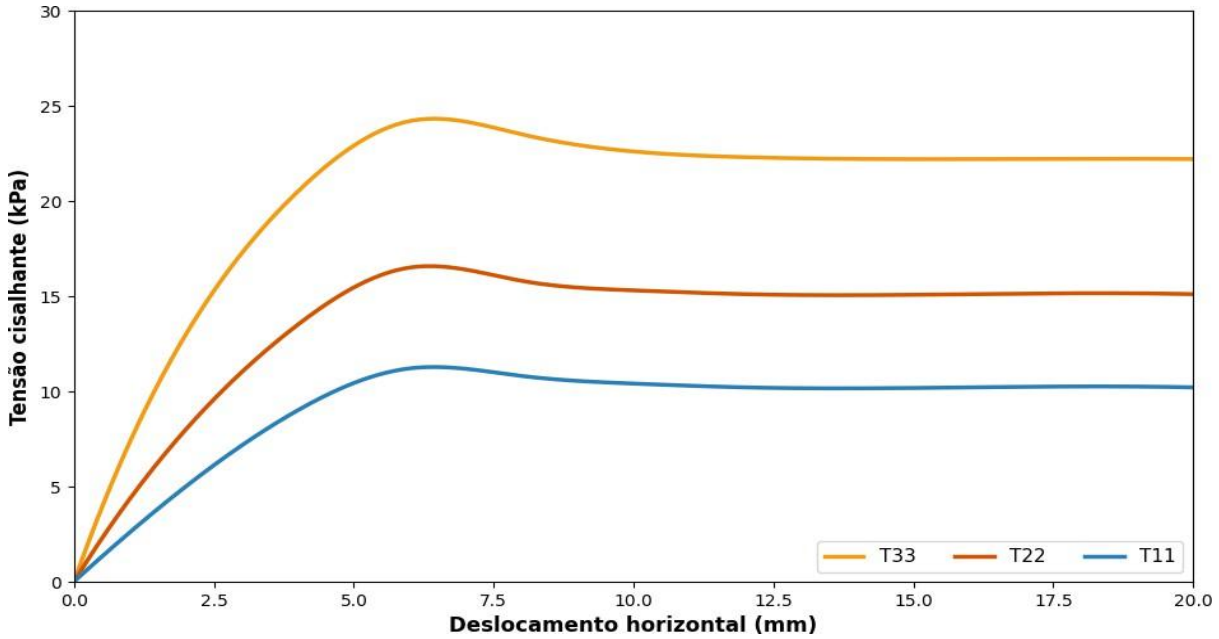
APÊNDICE F – GRÁFICOS DE TENSÃO CISALHANTE X DESLOCAMENTO HORIZONTAL PARA INTERFACE EPS-GEOTÊXTIL PET E EPS-GEOTÊXTIL PP

Figura 58 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PET 300 g/m²



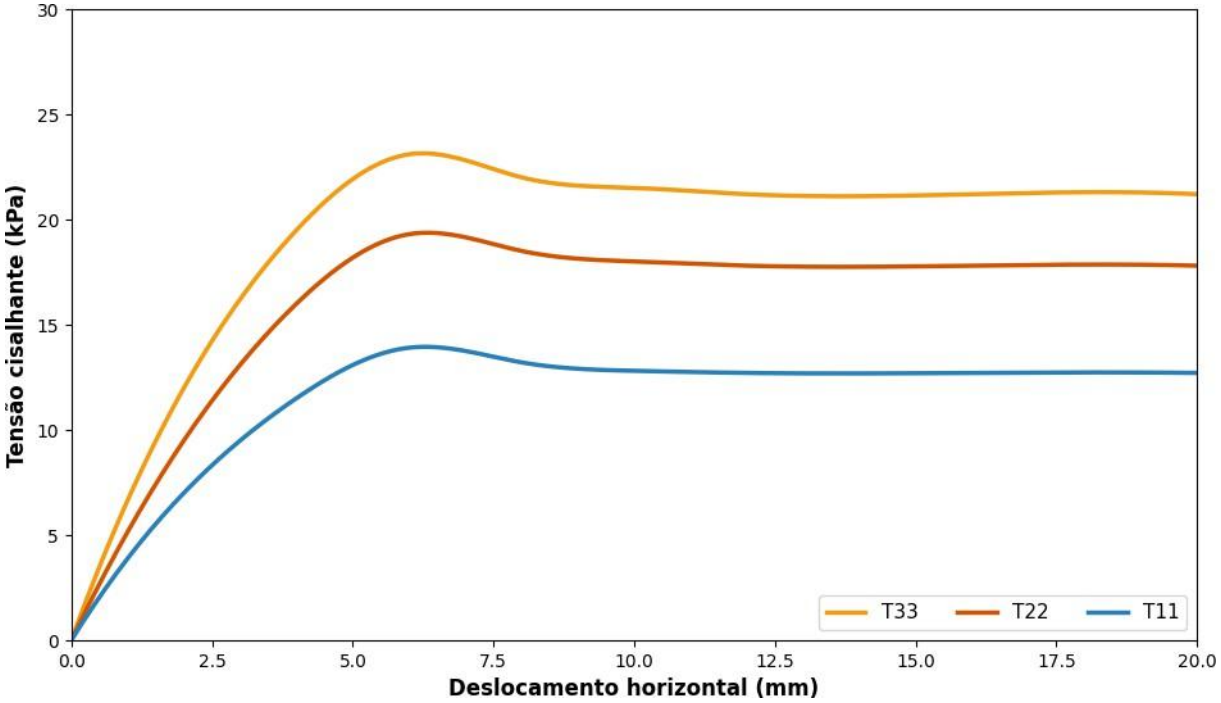
Fonte: Autor (2026).

Figura 59 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PET 300 g/m²



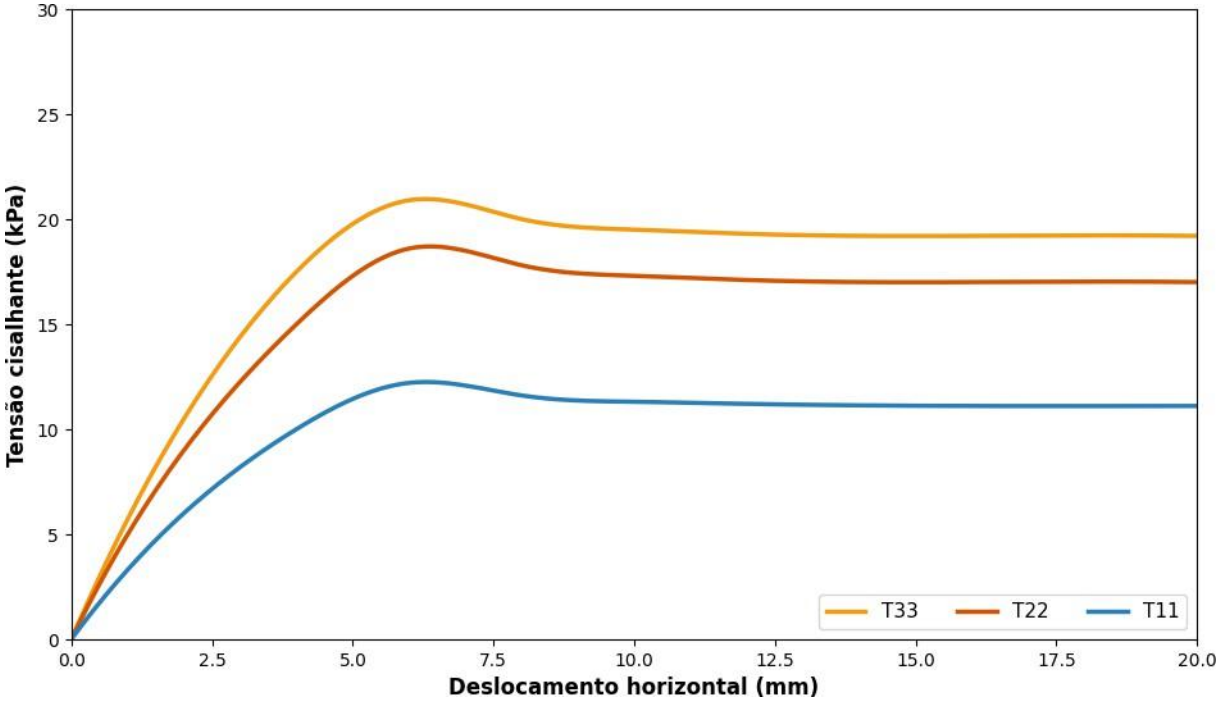
Fonte: Autor (2026).

Figura 60 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PET 300 g/m²



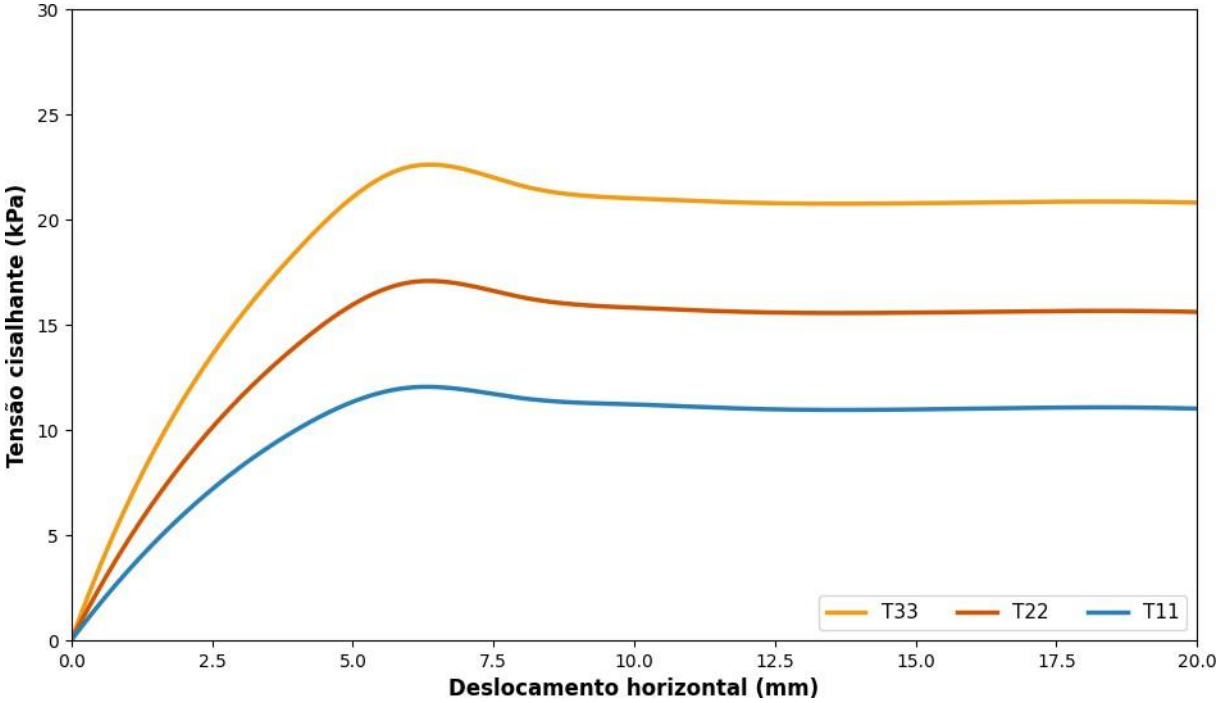
Fonte: Autor (2026).

Figura 61 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PET 400 g/m²



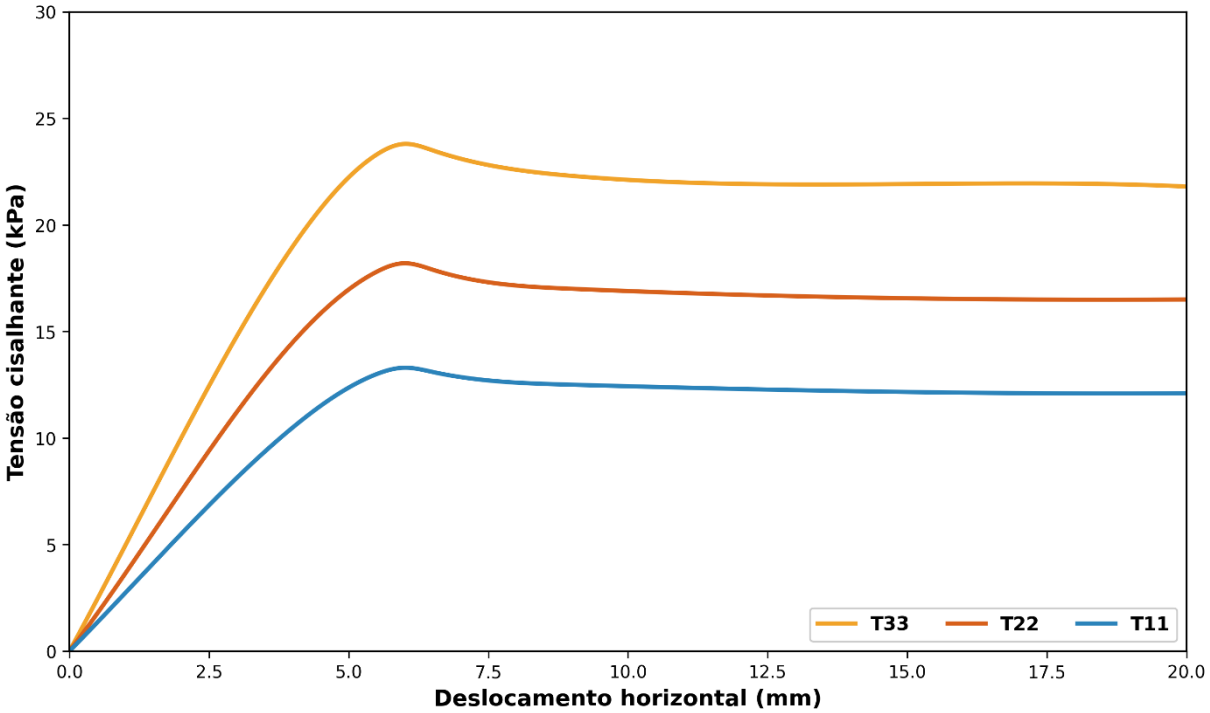
Fonte: Autor (2026).

Figura 62 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PET 400 g/m²



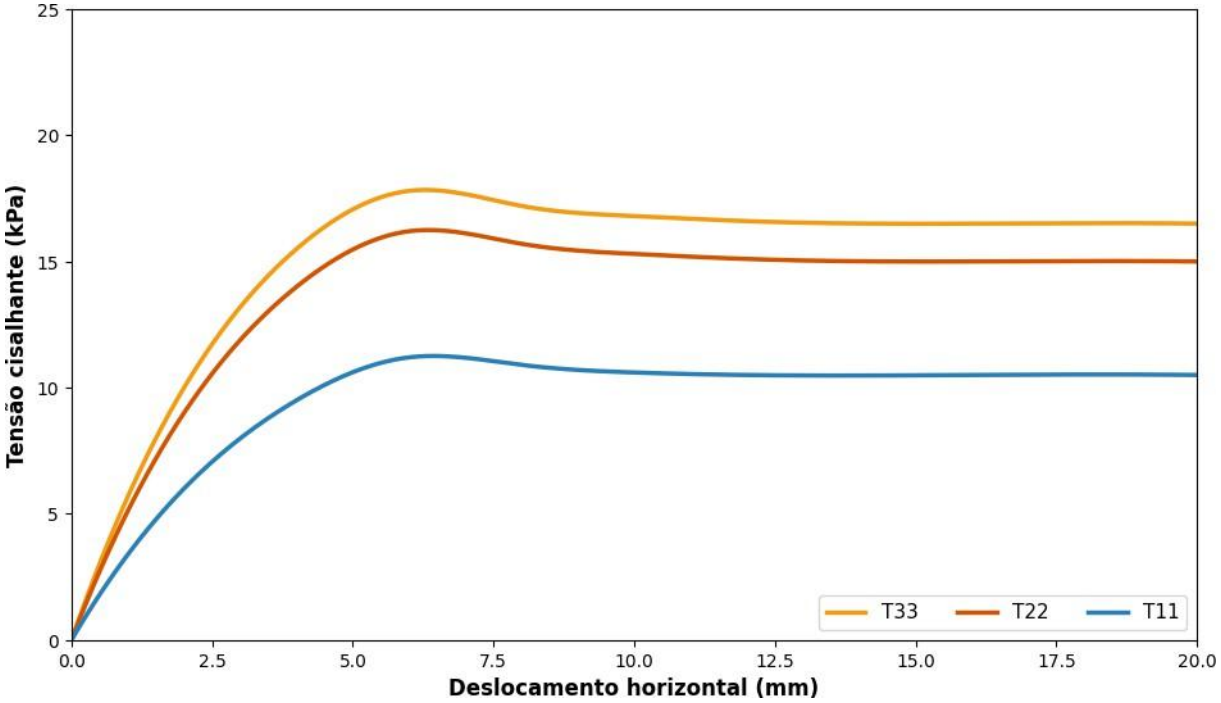
Fonte: Autor (2026).

Figura 63 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PET 400 g/m²



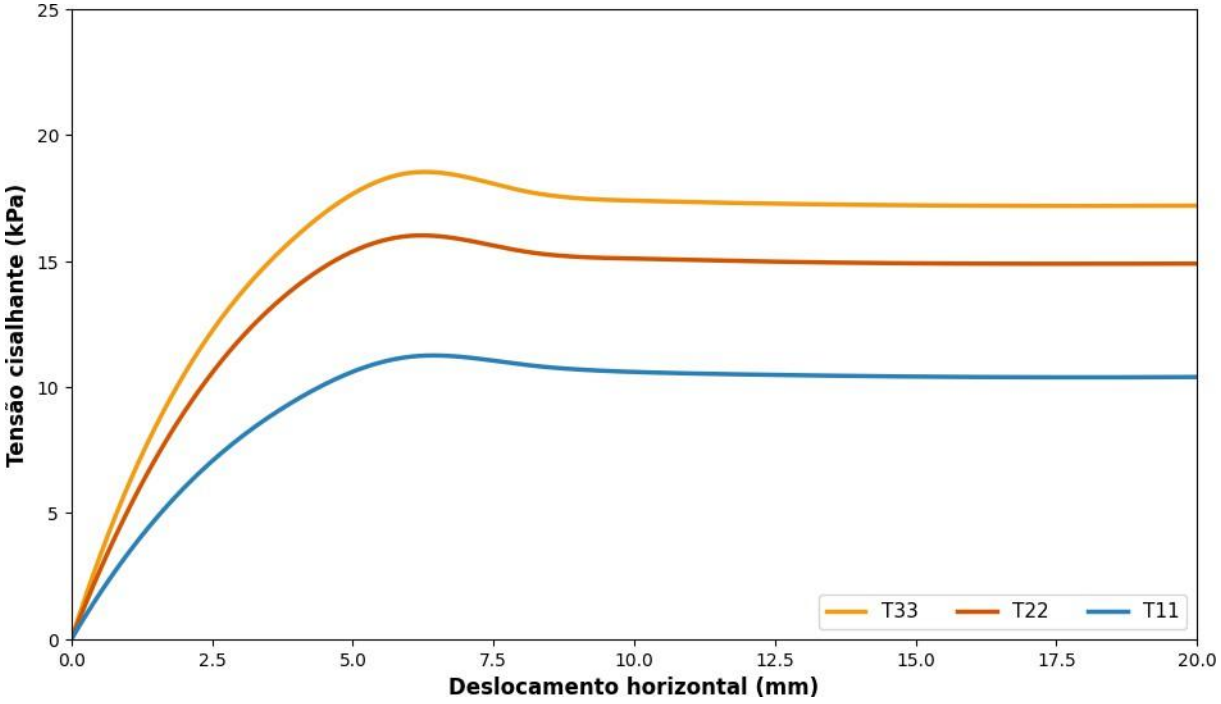
Fonte: Autor (2026).

Figura 64 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PET 500 g/m²



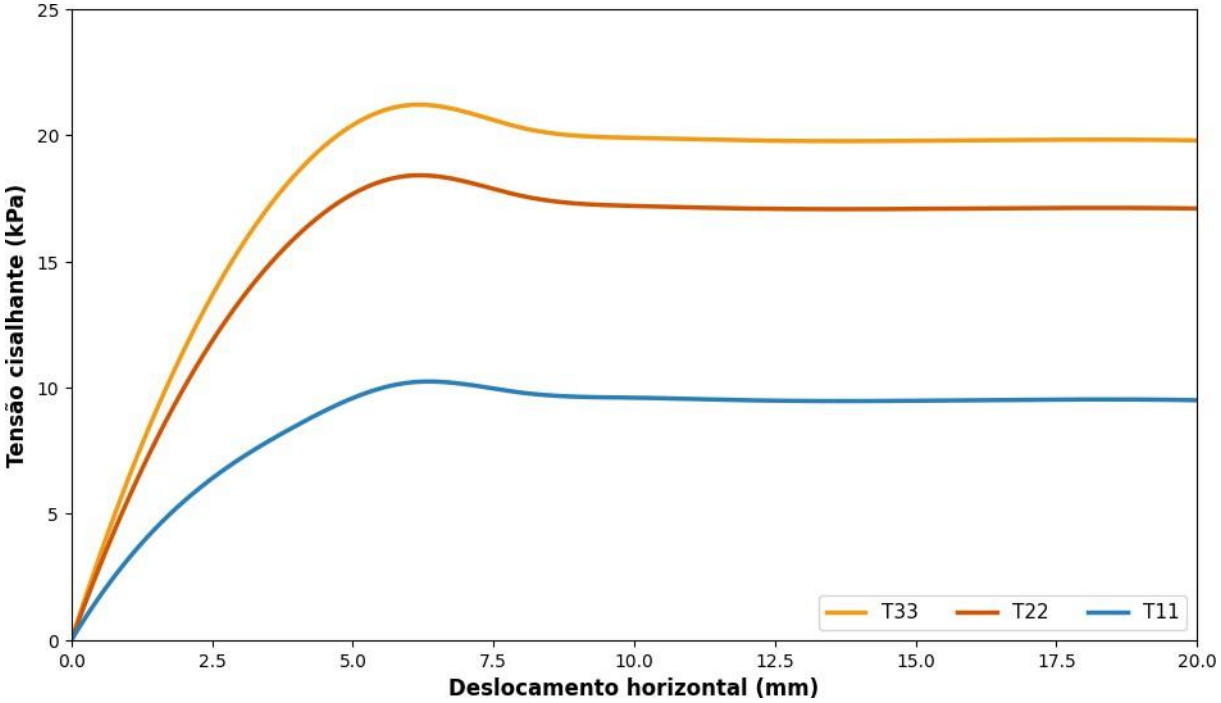
Fonte: Autor (2026).

Figura 65 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PET 500 g/m²



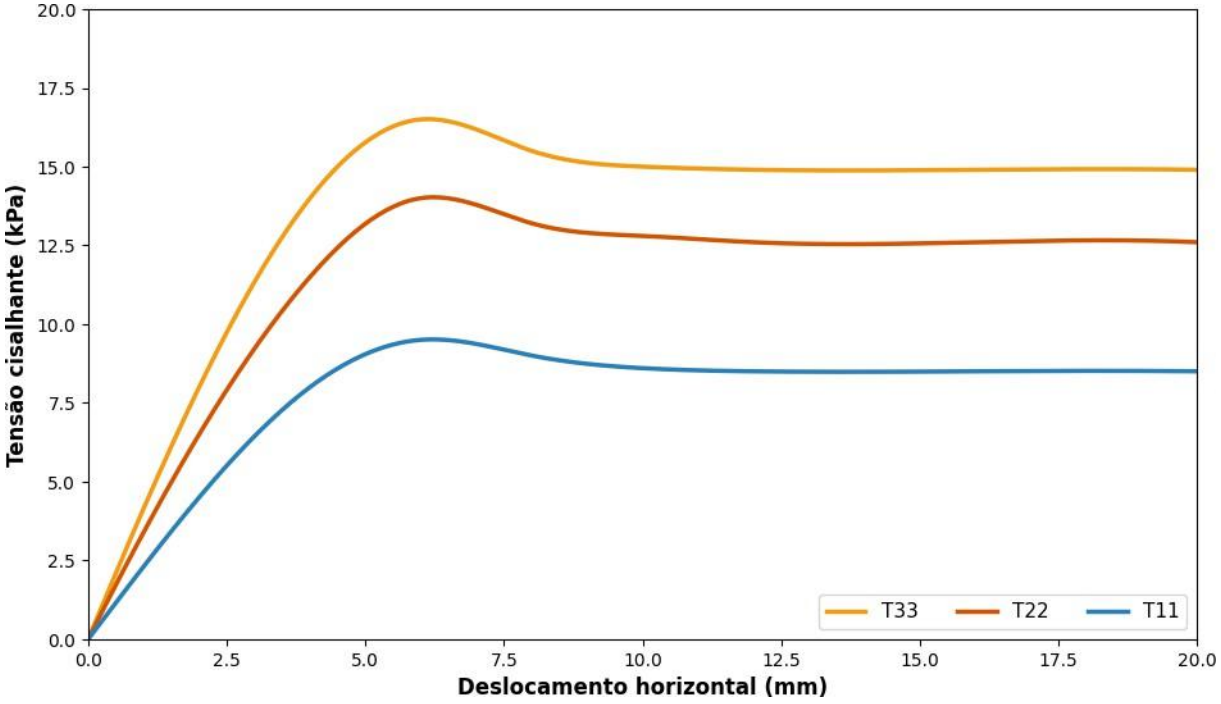
Fonte: Autor (2026).

Figura 66 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PET 500 g/m²



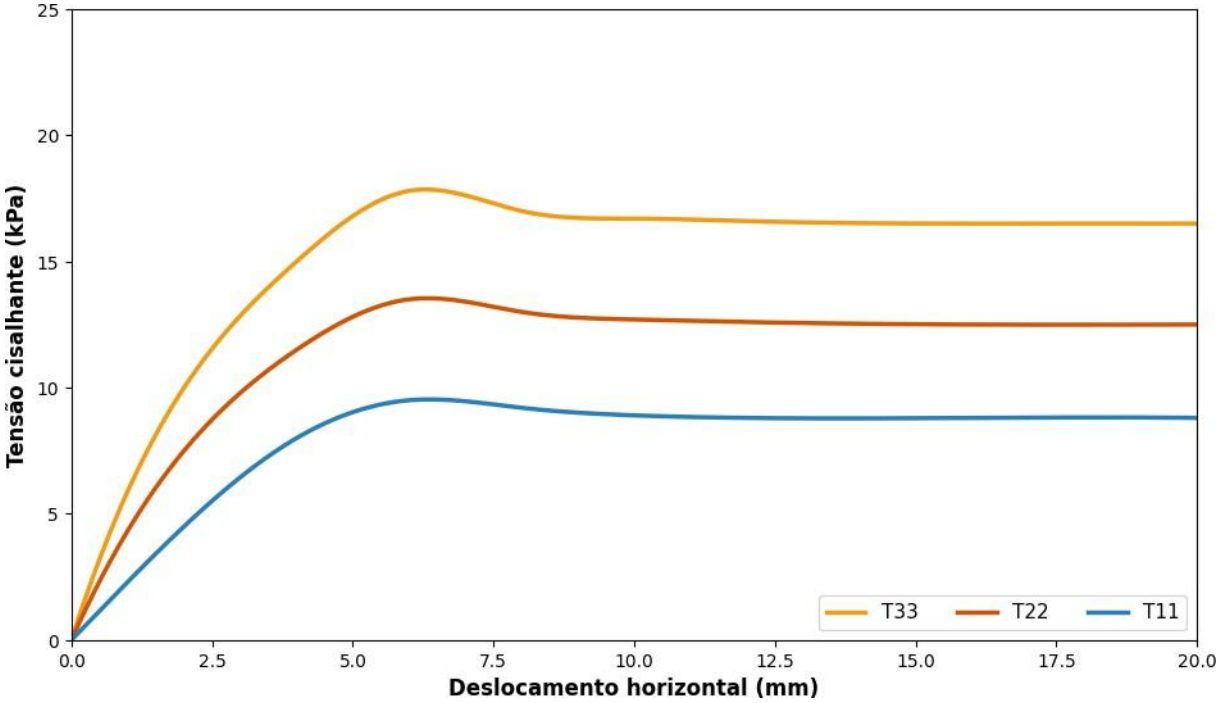
Fonte: Autor (2026).

Figura 67 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PET 600 g/m²



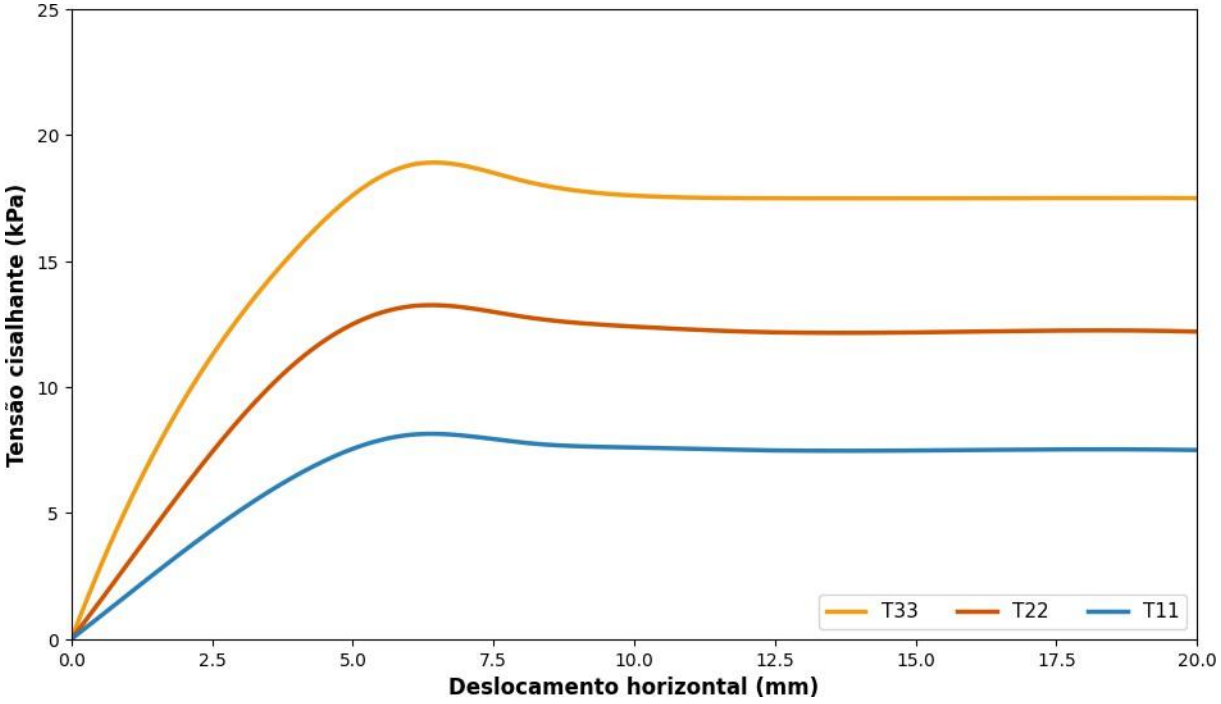
Fonte: Autor (2026).

Figura 68 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PET 600 g/m²



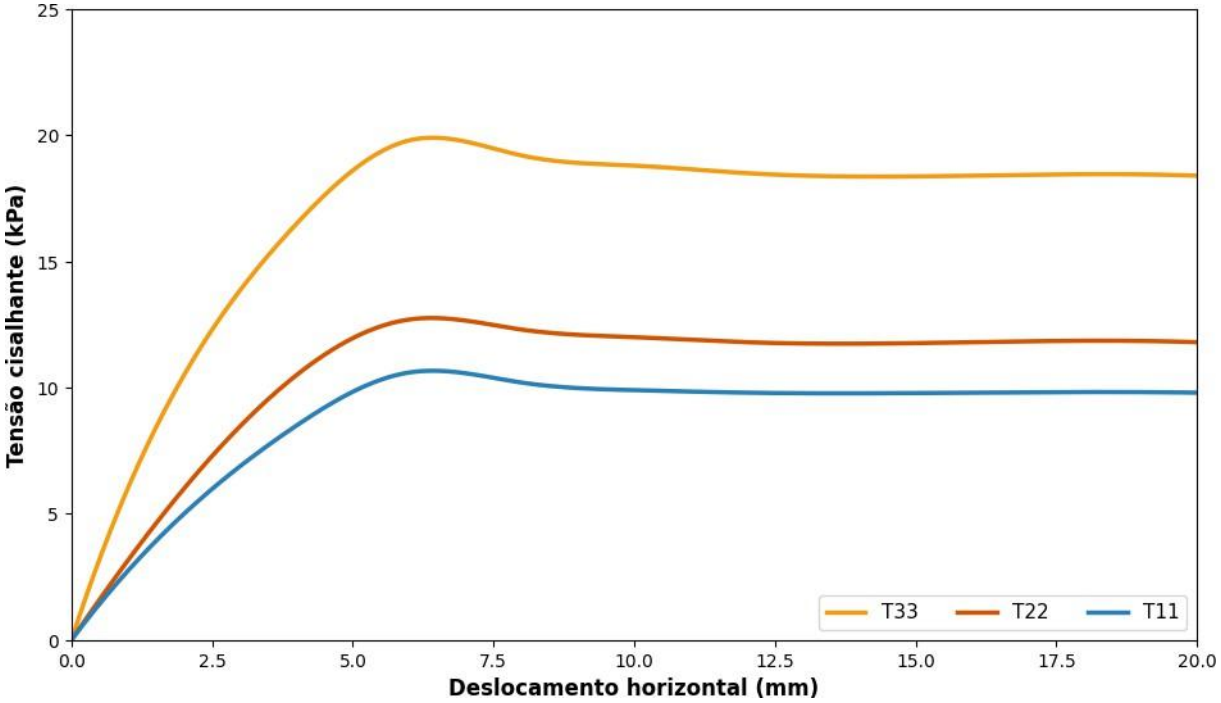
Fonte: Autor (2026).

Figura 69 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PET 600 g/m²



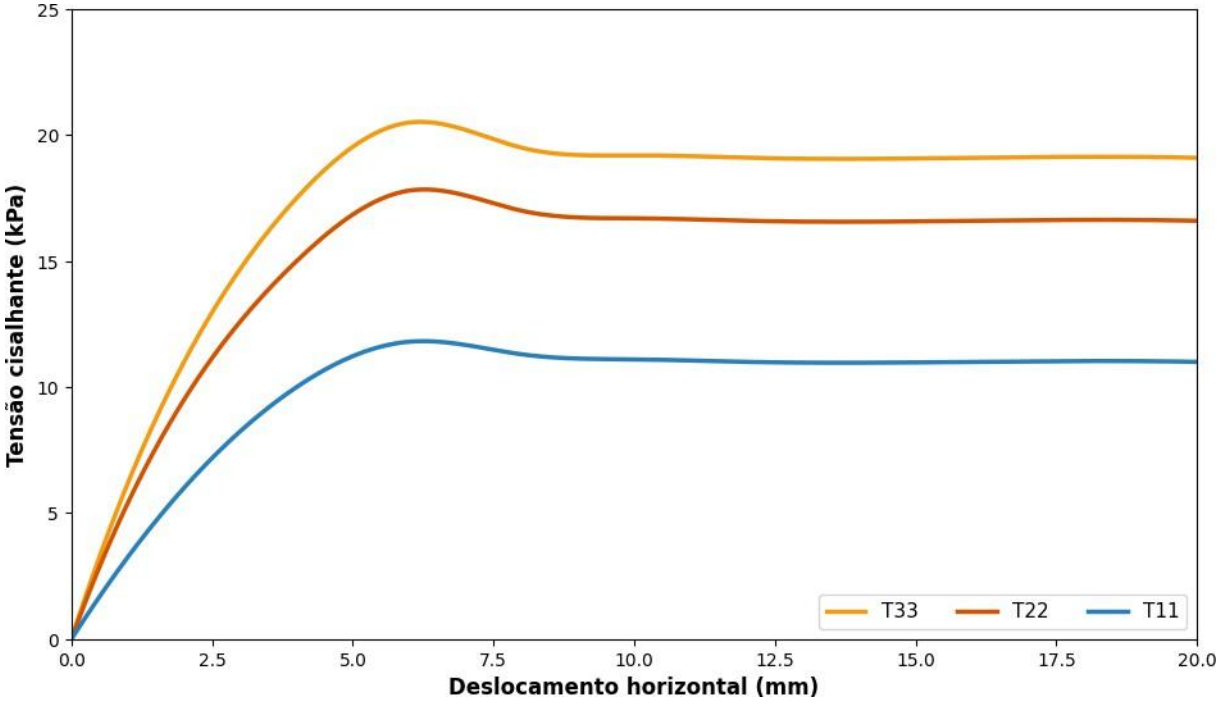
Fonte: Autor (2026).

Figura 70 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PP 300 g/m²



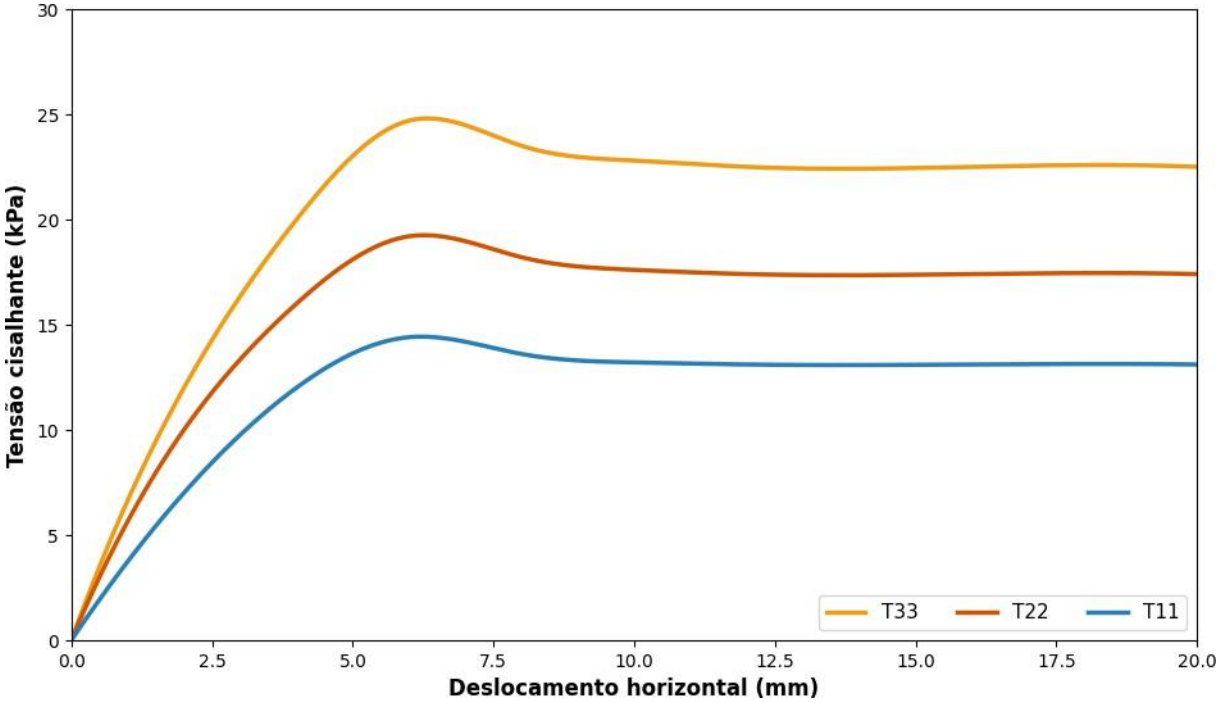
Fonte: Autor (2026).

Figura 71 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PP 300 g/m²



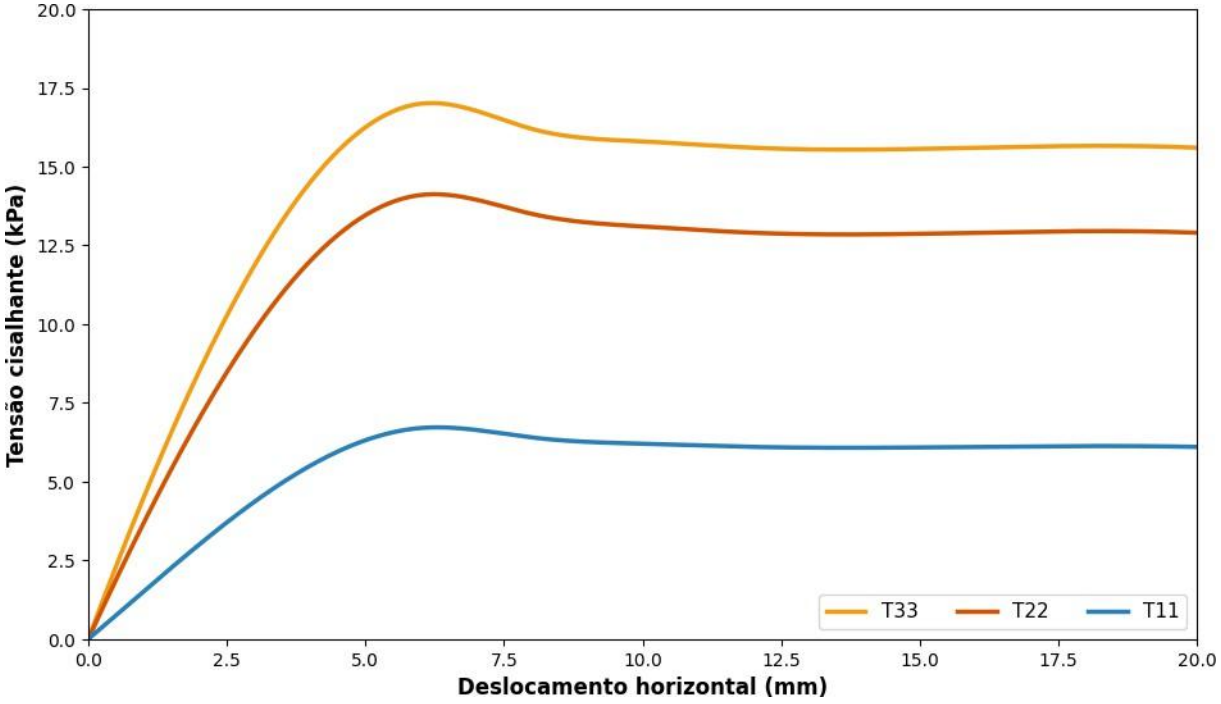
Fonte: Autor (2026).

Figura 72 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PP 300 g/m²



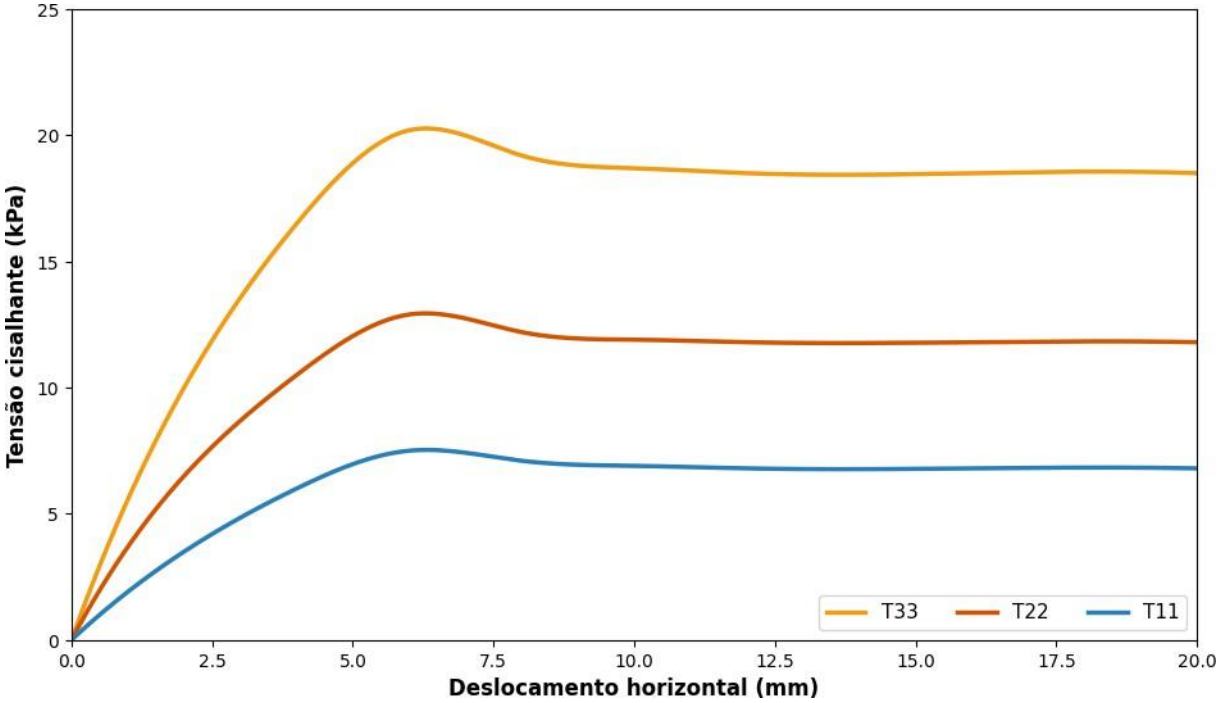
Fonte: Autor (2026).

Figura 73 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-20 x Geotêxtil PP 600 g/m²



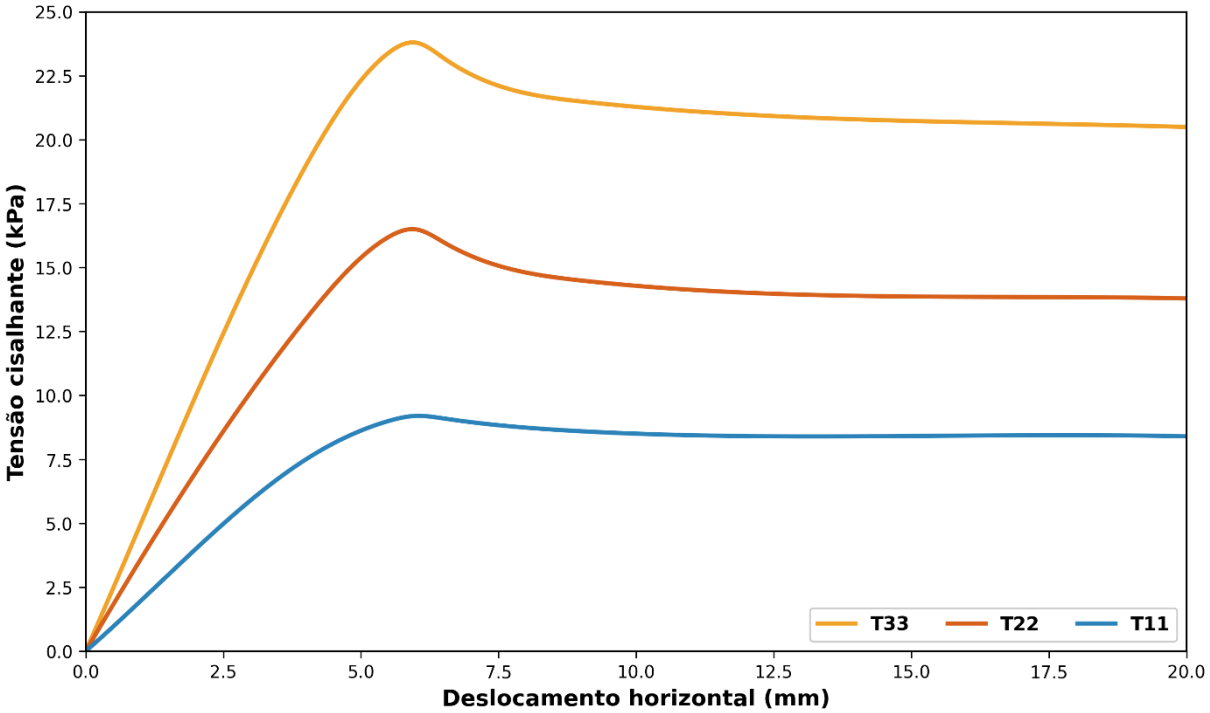
Fonte: Autor (2026).

Figura 74 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-25 x Geotêxtil PP 600 g/m²



Fonte: Autor (2026).

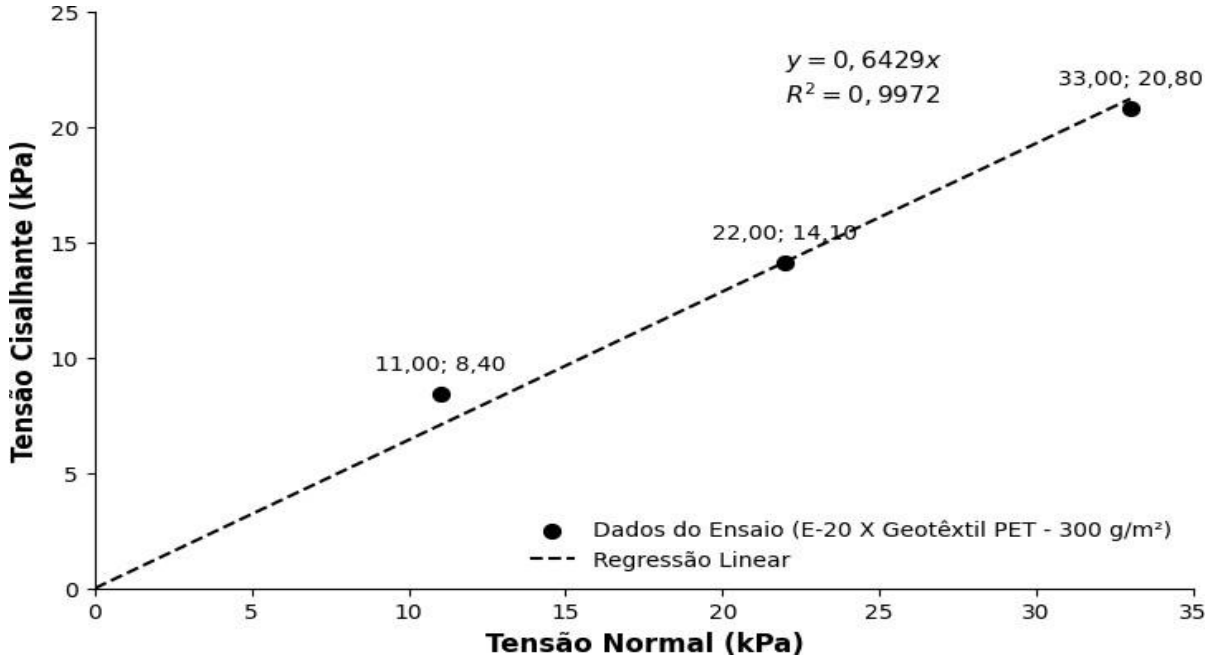
Figura 75 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal – E-30 x Geotêxtil PP 600 g/m²



Fonte: Autor (2026).

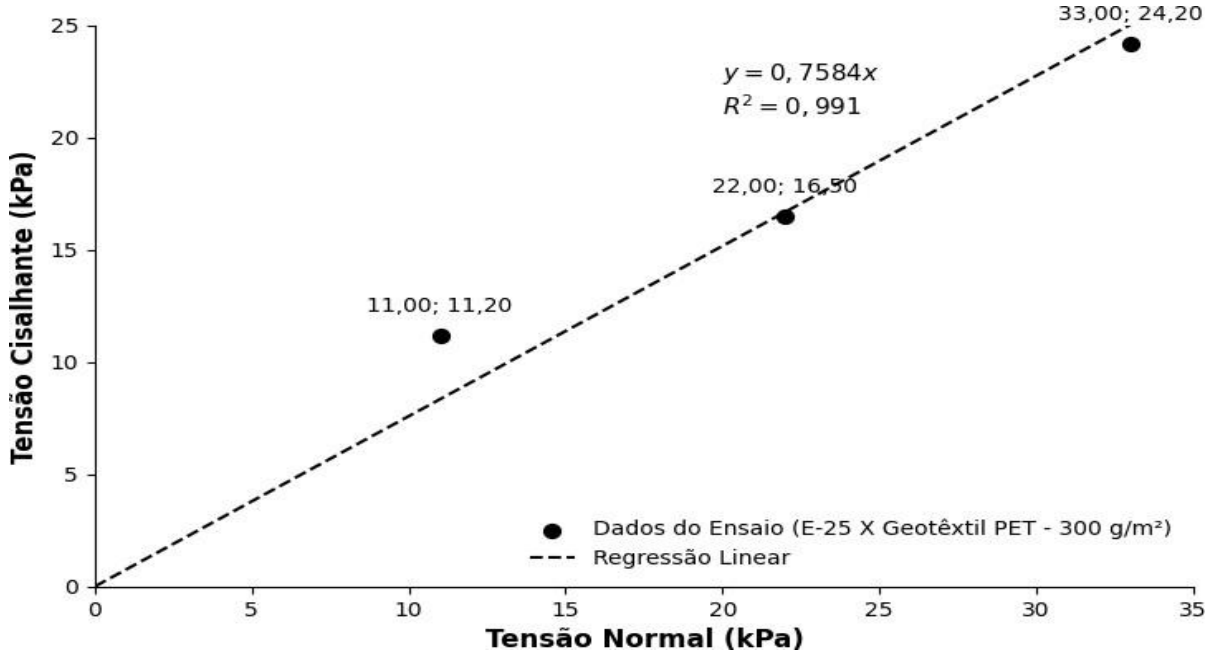
APÊNDICE G – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PICO (τPICO) PARA INTERFACE EPS-GEOTÊXTIL PET E INTERFACE EPS-GEOTÊXTIL PP

Figura 76 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PET 300 g/m²



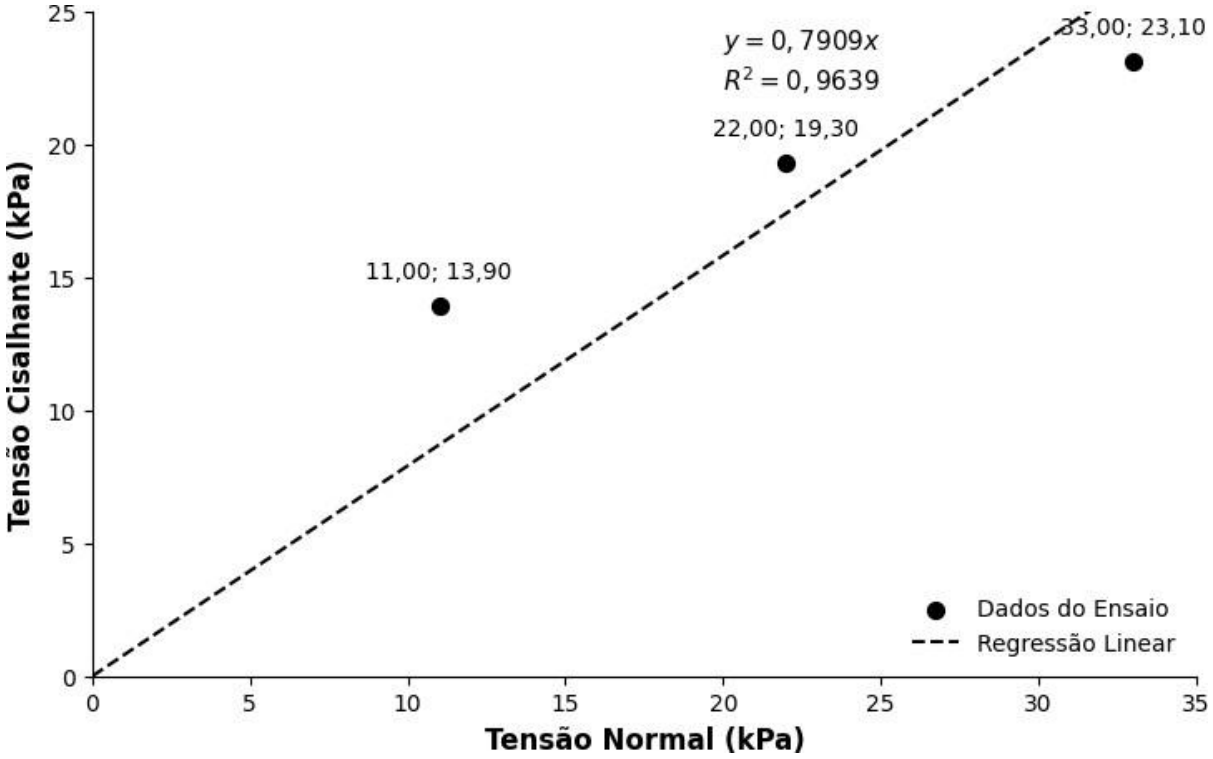
Fonte: Autor (2026).

Figura 77 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PET 300 g/m²



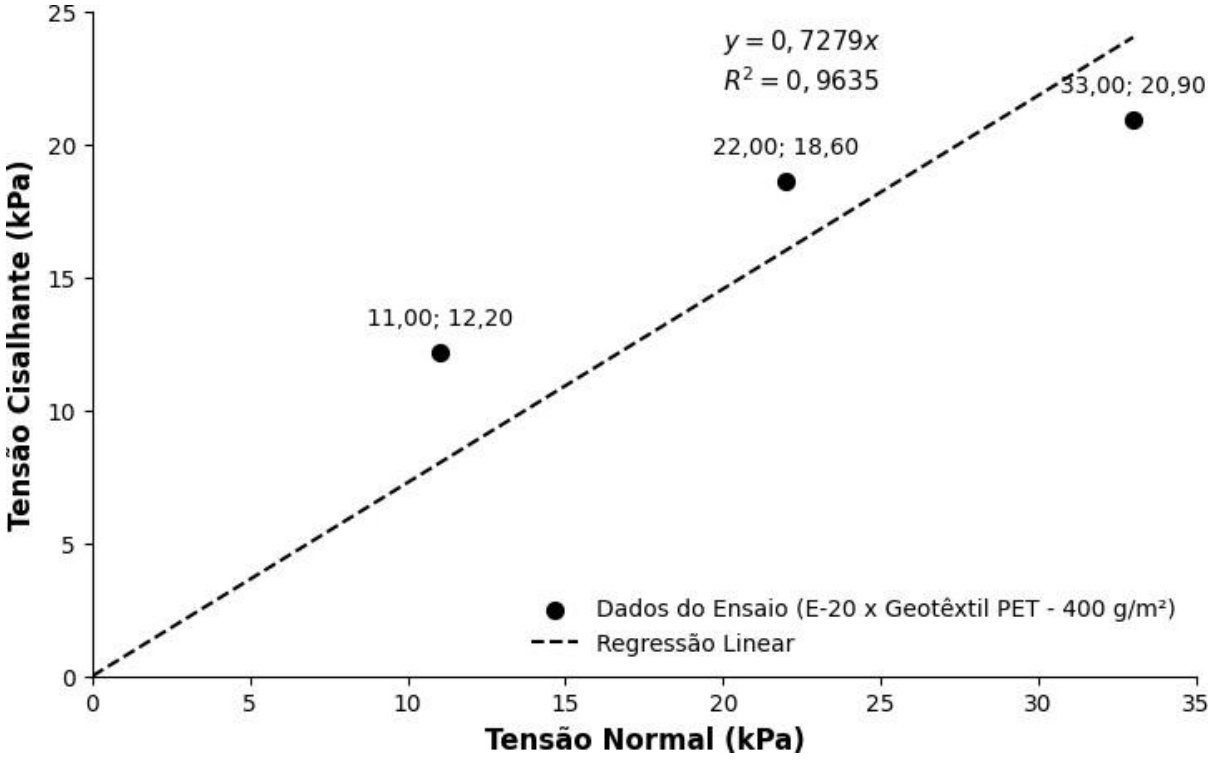
Fonte: Autor (2026).

Figura 78 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PET 300 g/m²



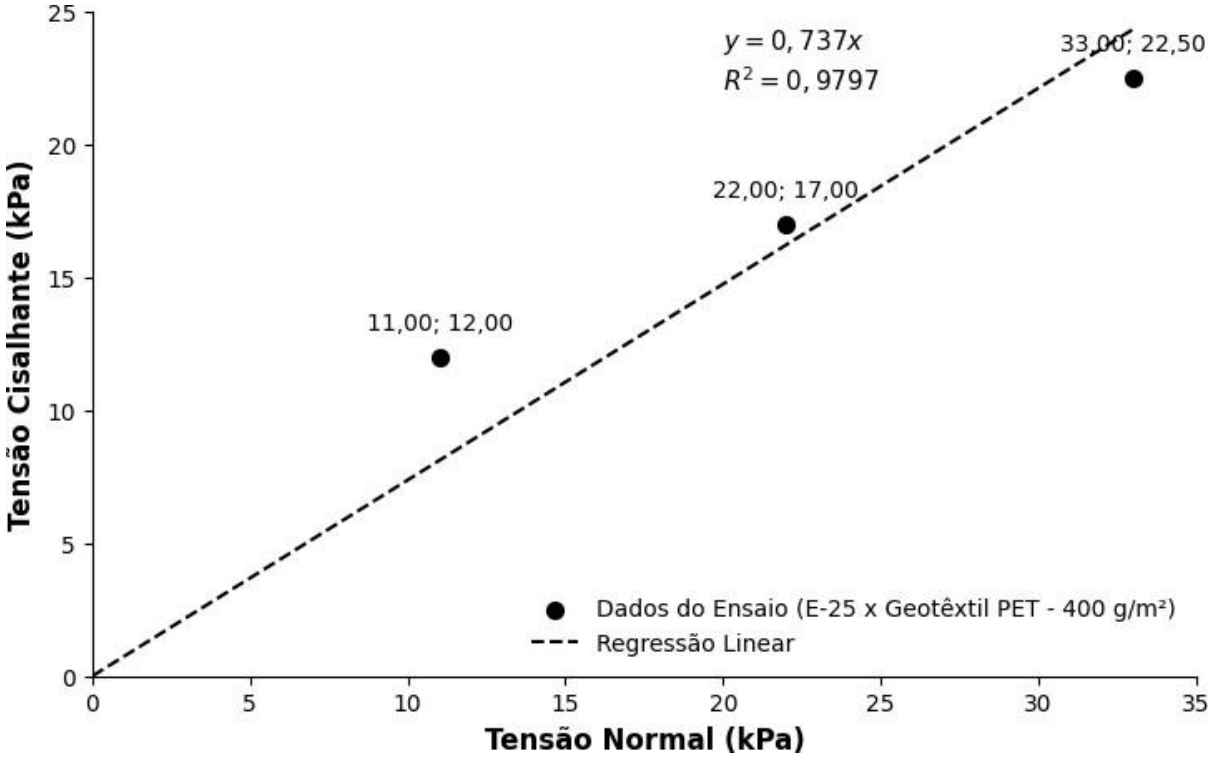
Fonte: Autor (2026).

Figura 79 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PET 400 g/m²



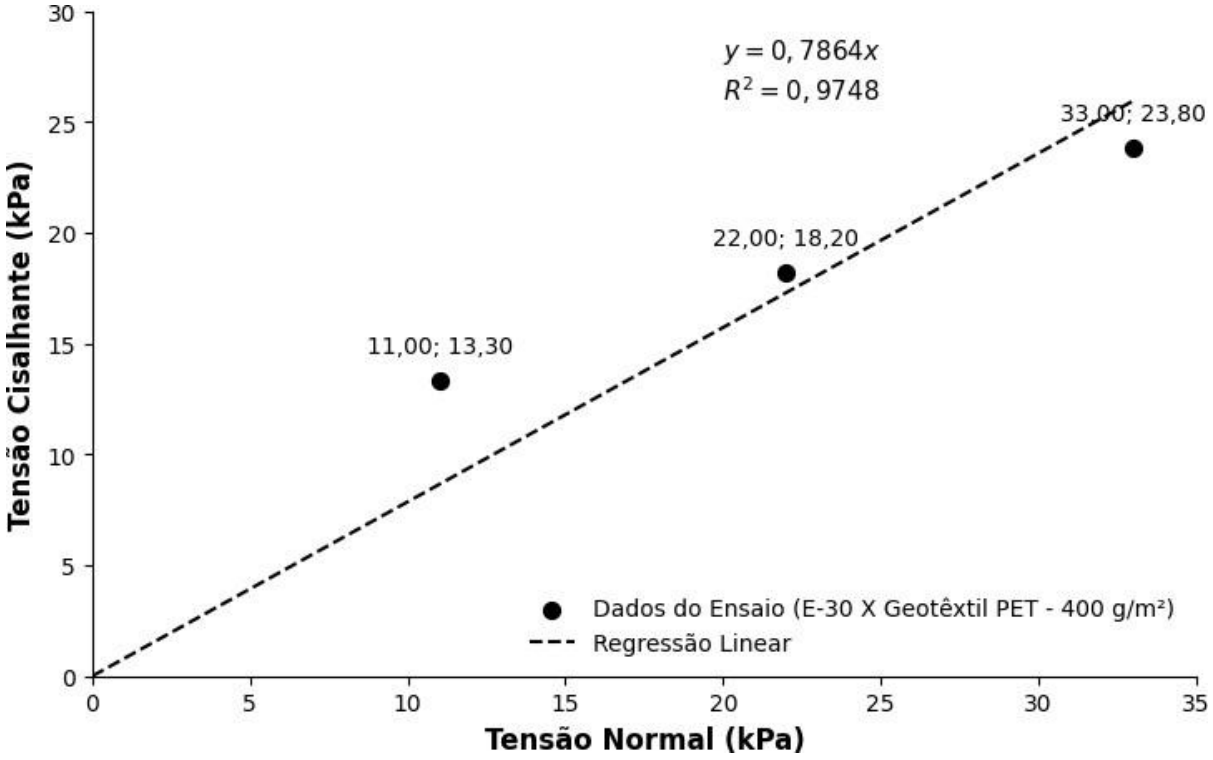
Fonte: Autor (2026).

Figura 80 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PET 400 g/m²



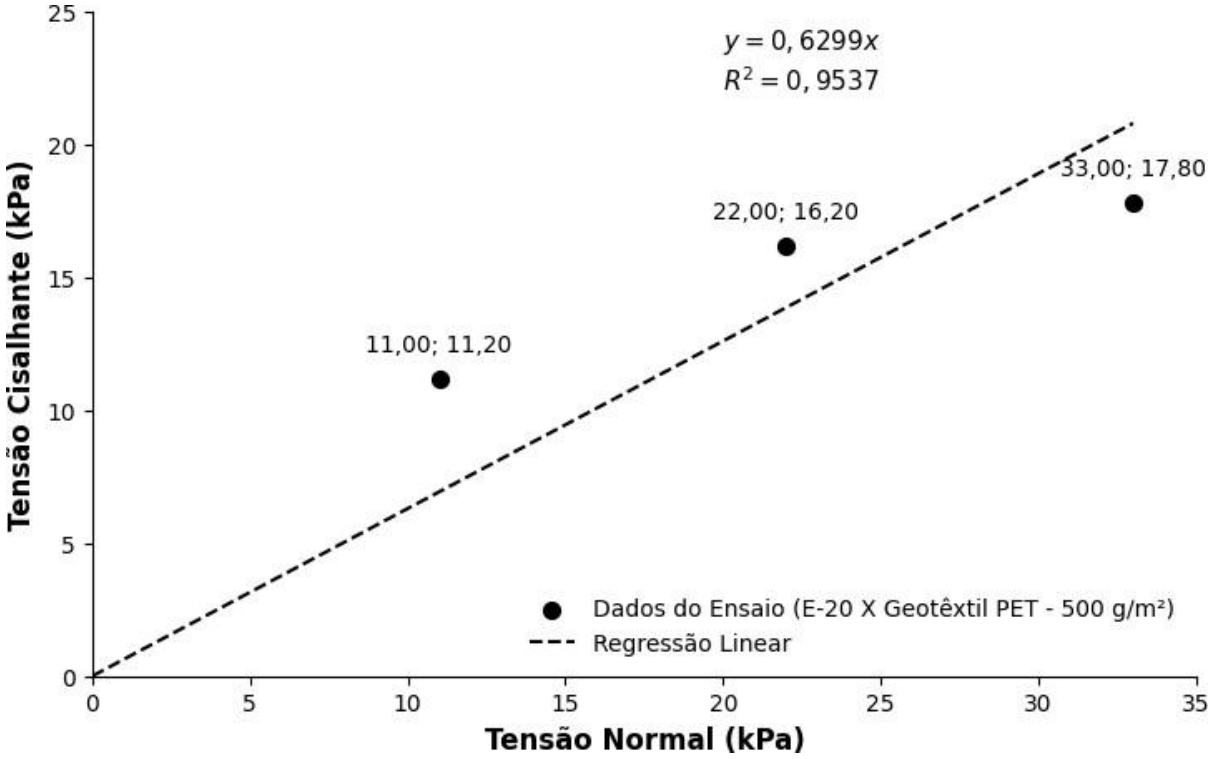
Fonte: Autor (2026).

Figura 81 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PET 400 g/m²



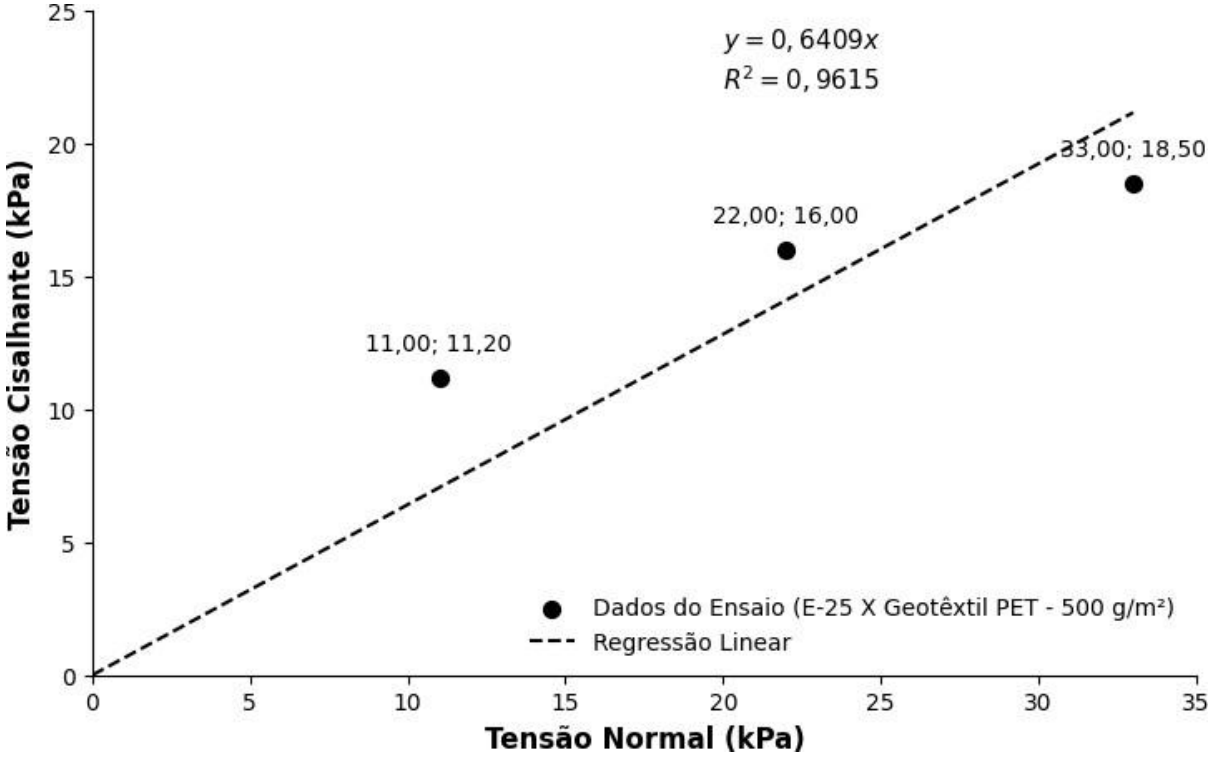
Fonte: Autor (2026).

Figura 82 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PET 500 g/m²



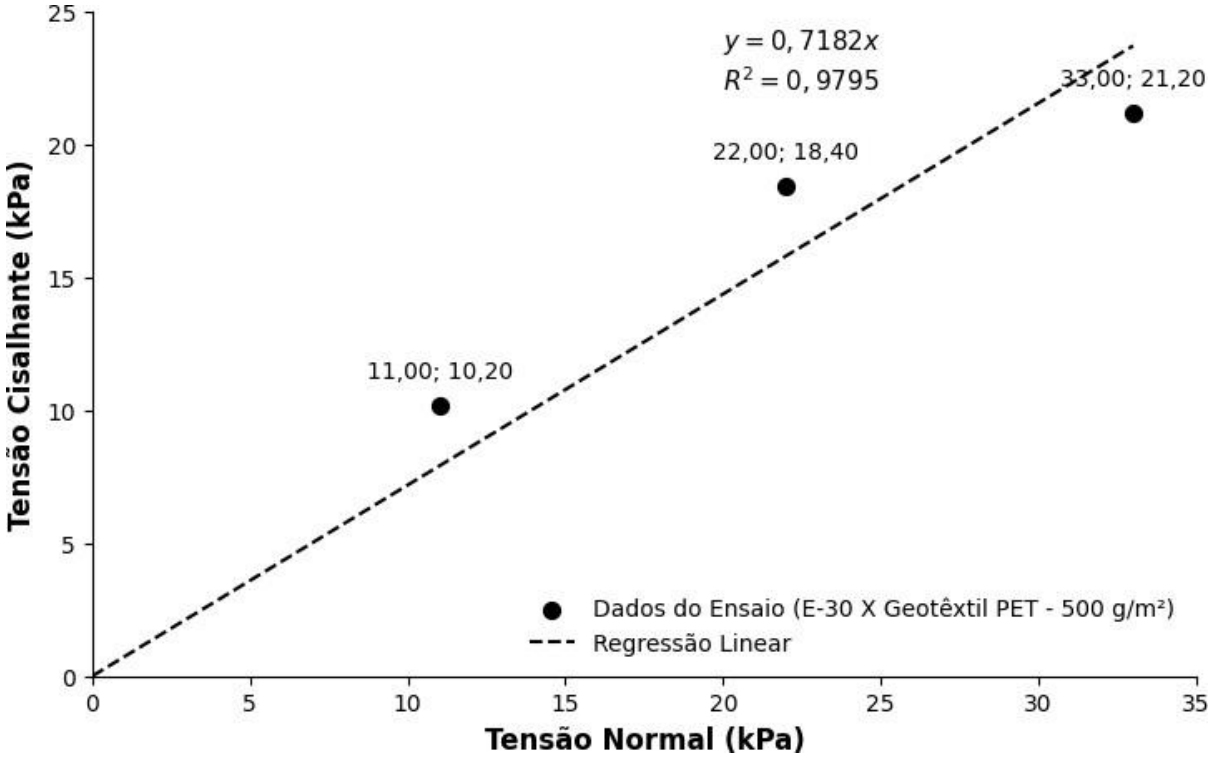
Fonte: Autor (2026).

Figura 83 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PET 500 g/m²



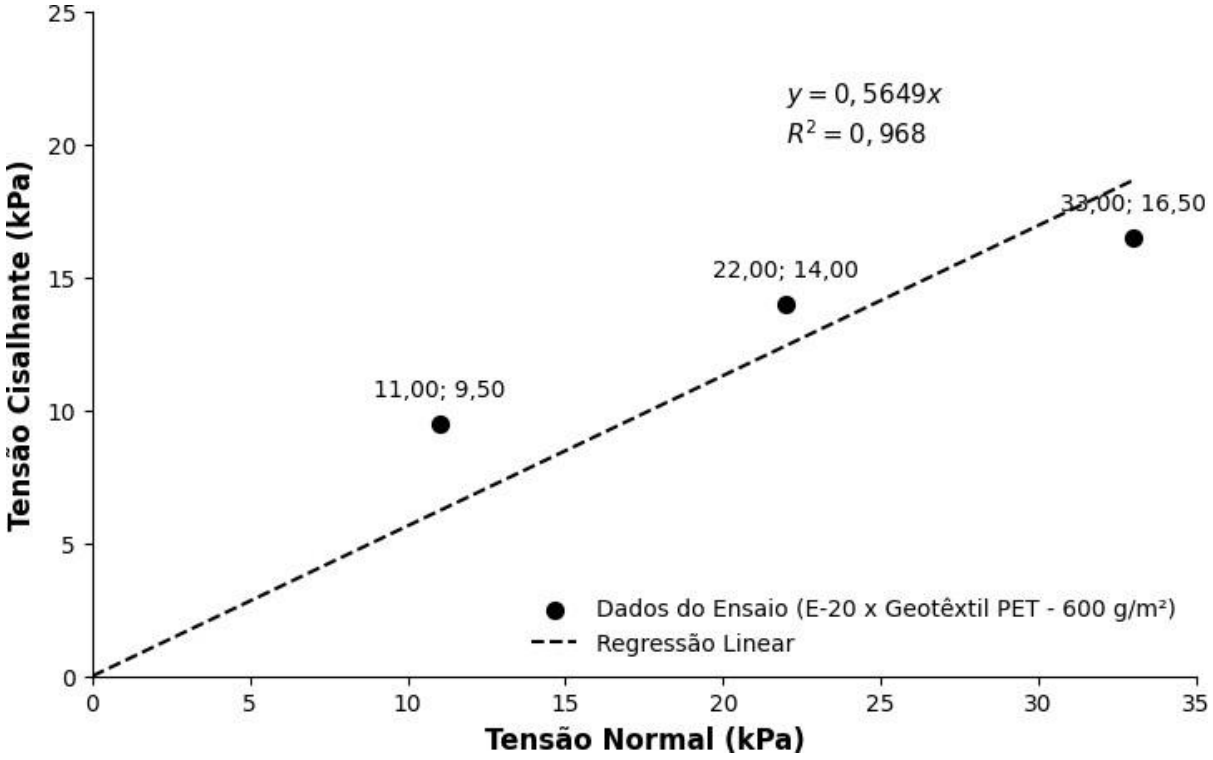
Fonte: Autor (2026).

Figura 84 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PET 500 g/m²



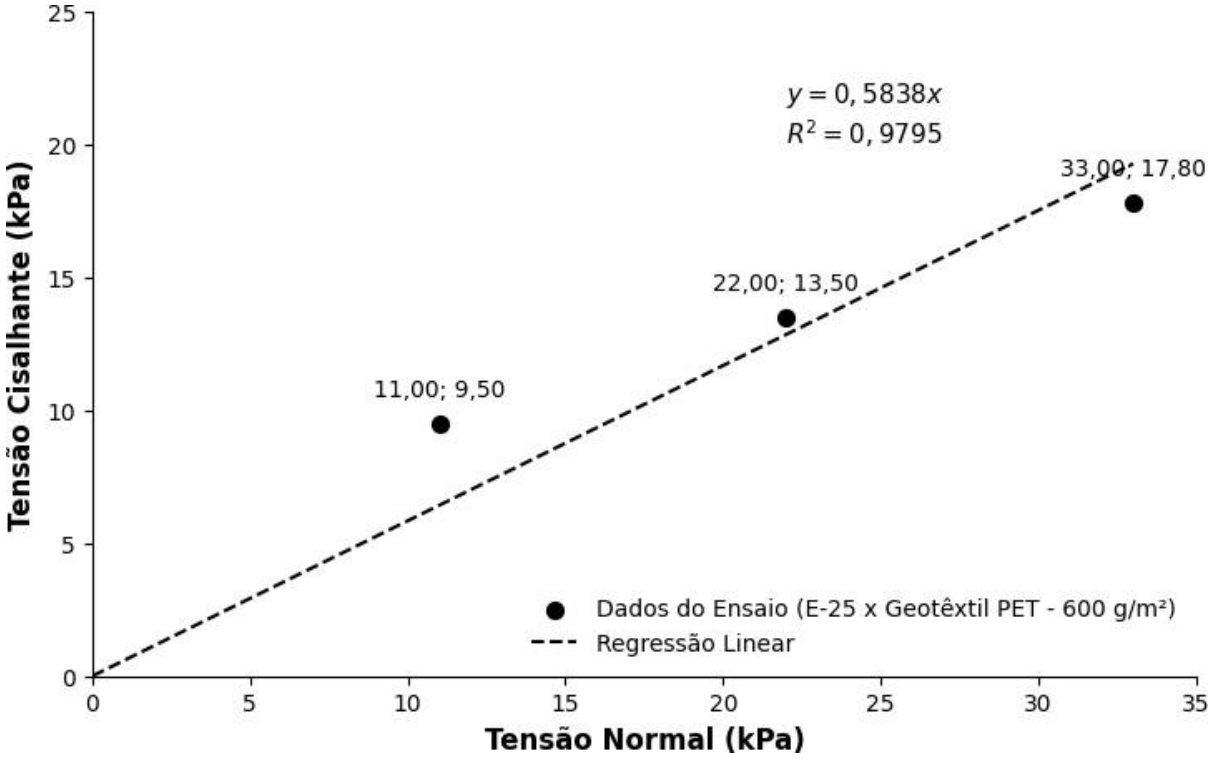
Fonte: Autor (2026).

Figura 85 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PET 600 g/m²



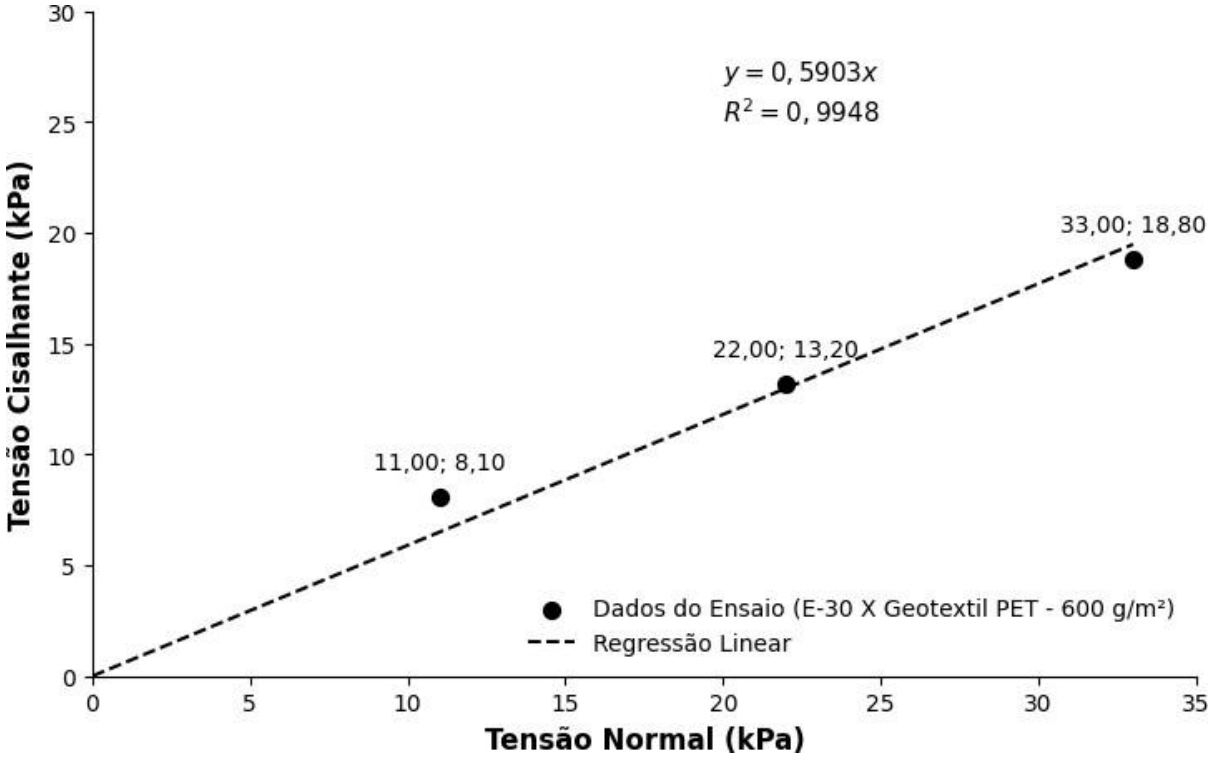
Fonte: Autor (2026).

Figura 86 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PET 600 g/m²



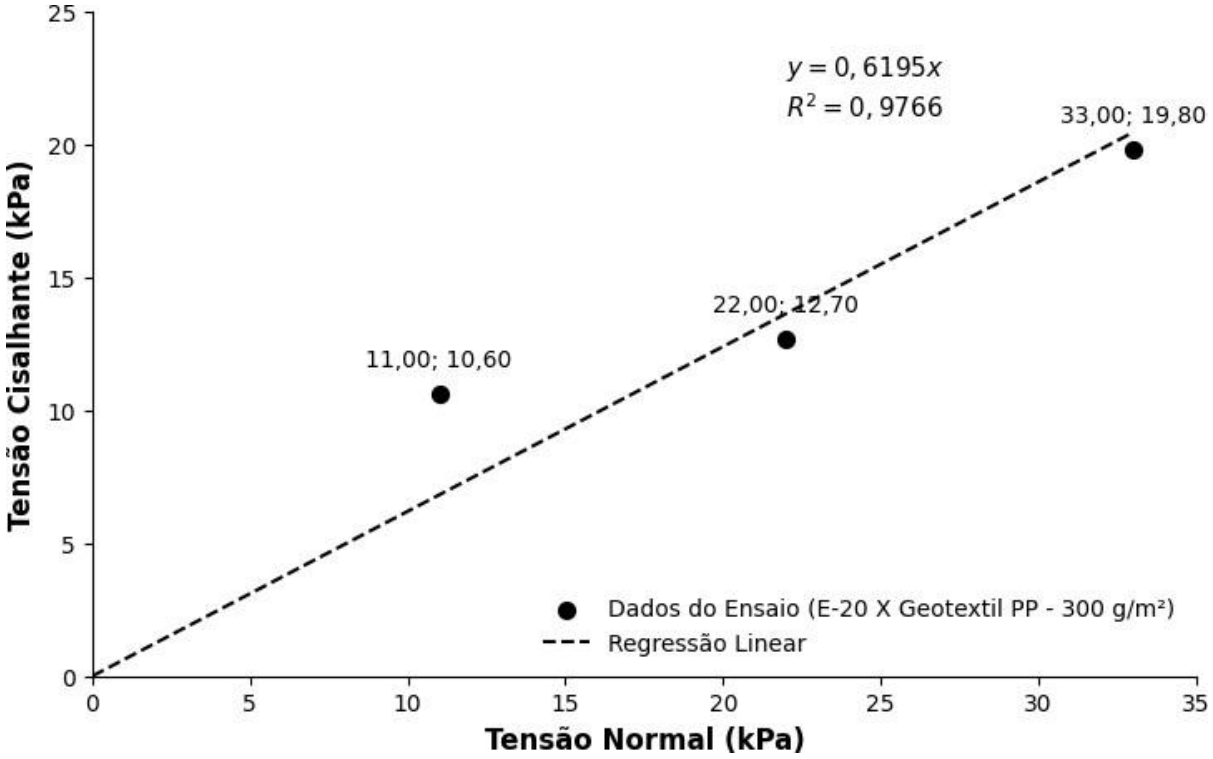
Fonte: Autor (2026).

Figura 87 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PET 600 g/m²



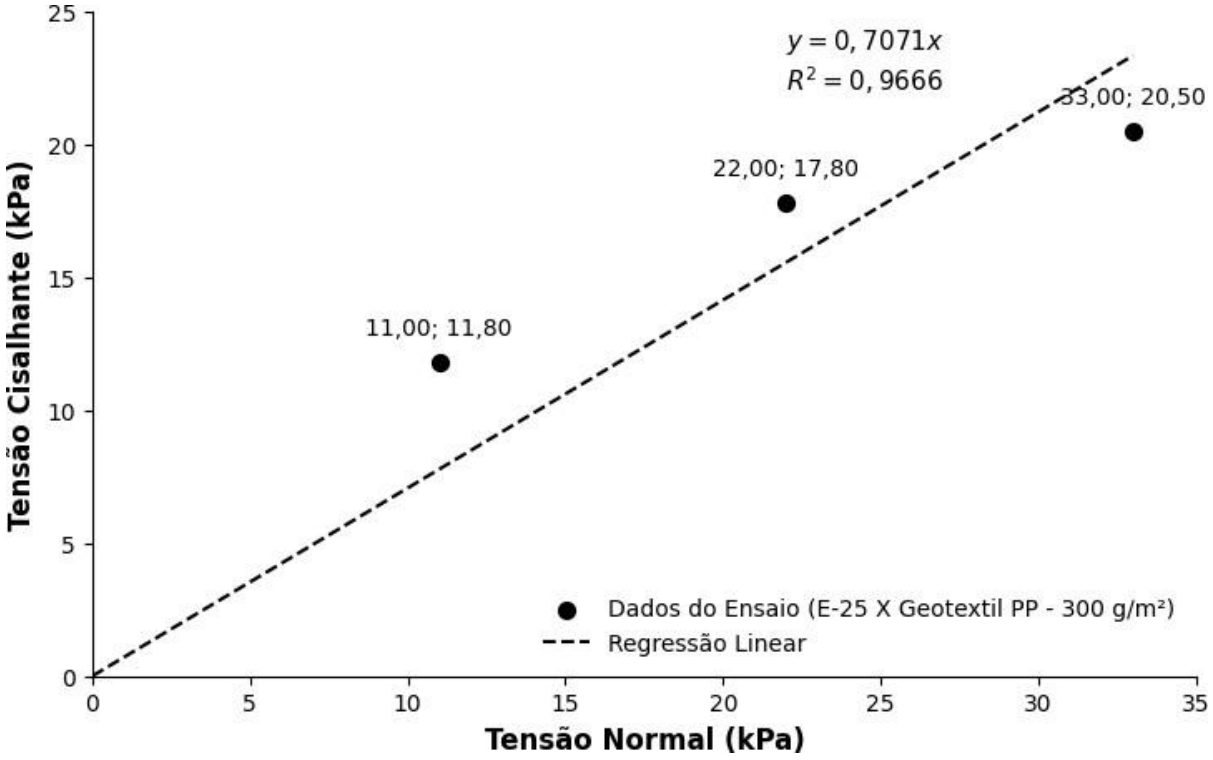
Fonte: Autor (2026).

Figura 88 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PP 300 g/m²



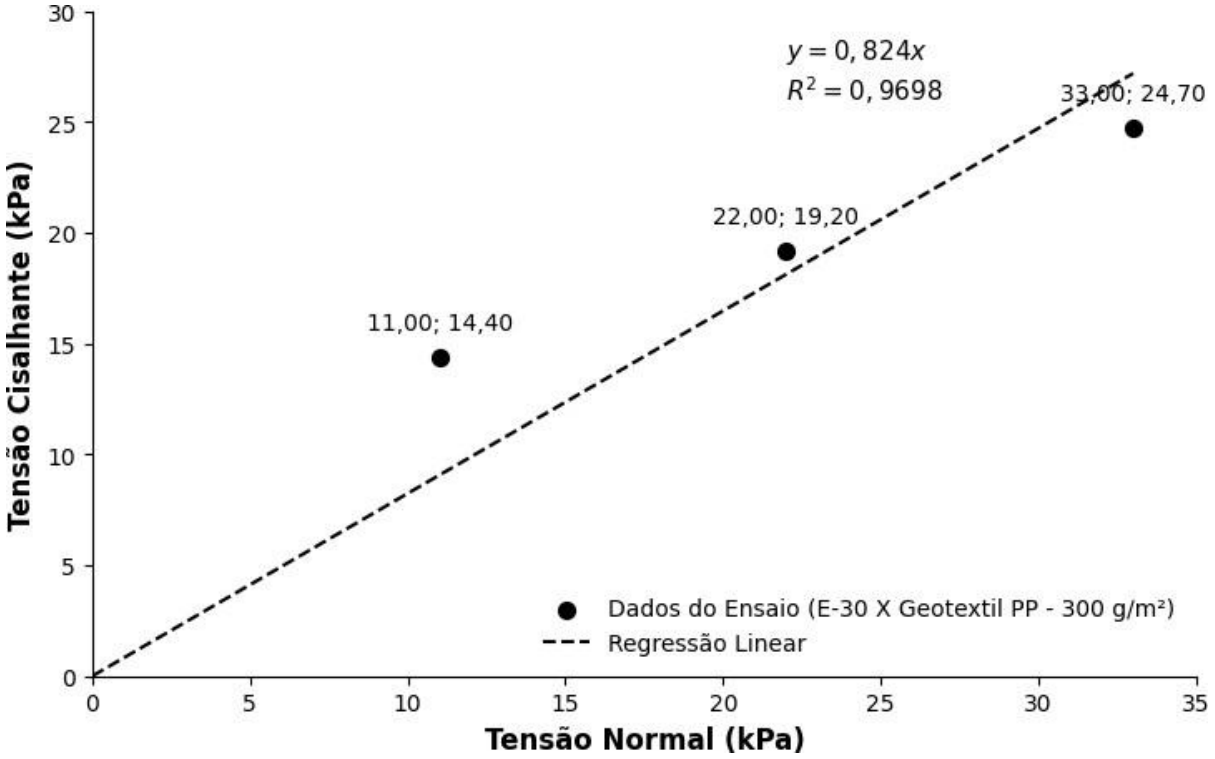
Fonte: Autor (2026).

Figura 89 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PP 300 g/m²



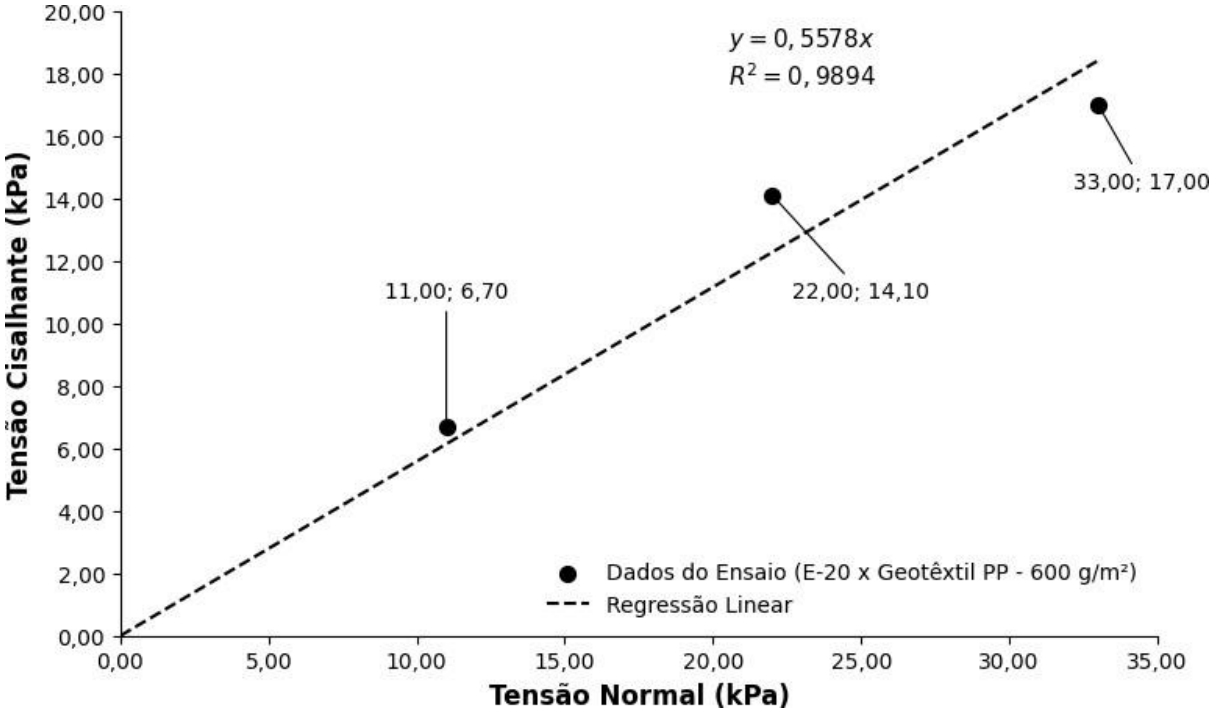
Fonte: Autor (2026).

Figura 90 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PP 300 g/m²



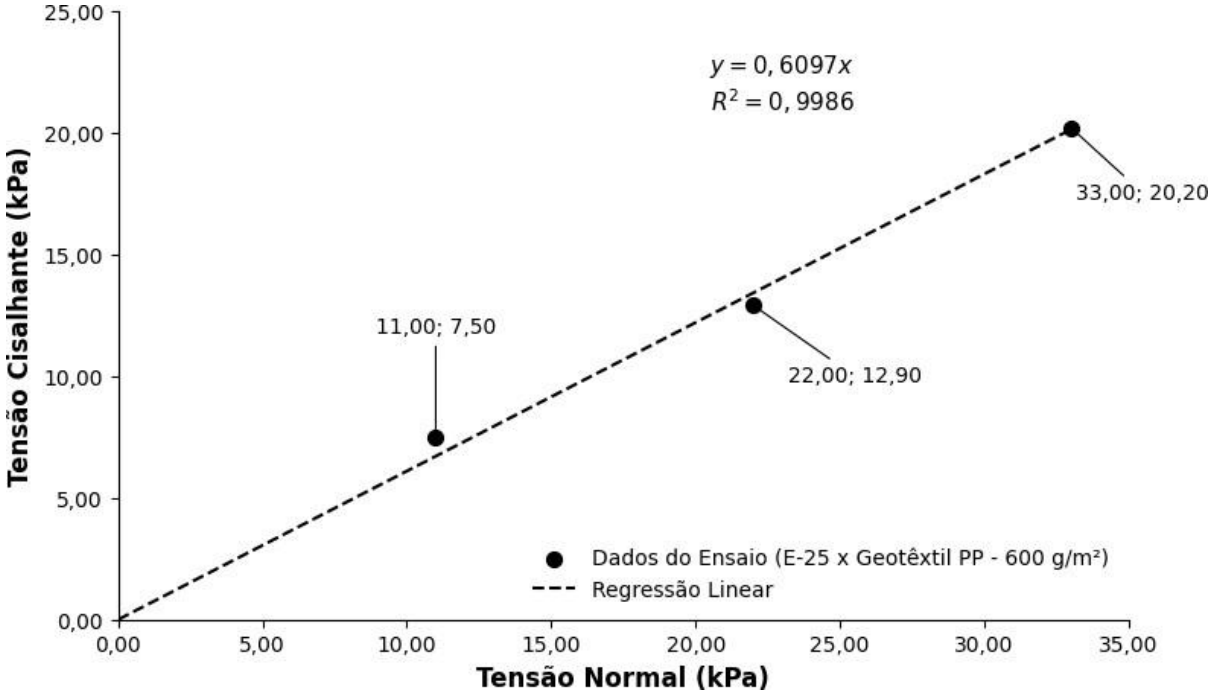
Fonte: Autor (2026).

Figura 91 – Envoltória E-20 x Geotêxtil PP 600 g/m²



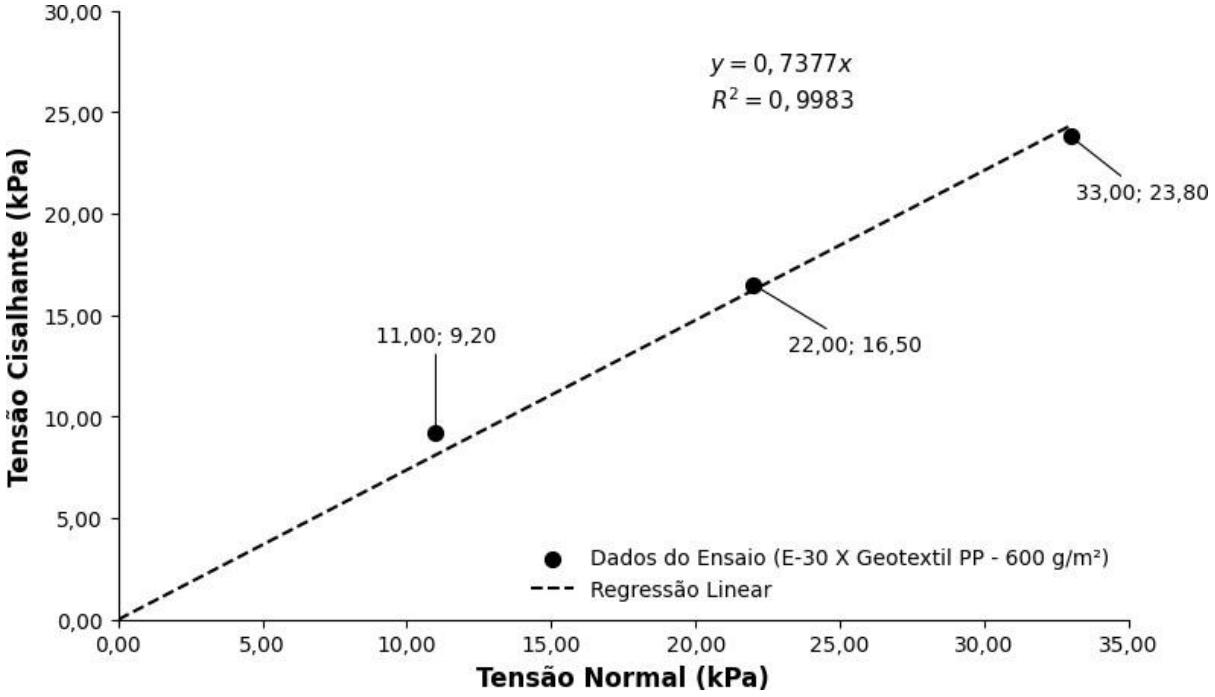
Fonte: Autor (2026).

Figura 92 – Envoltória E-25 x Geotêxtil PP 600 g/m²



Fonte: Autor (2026).

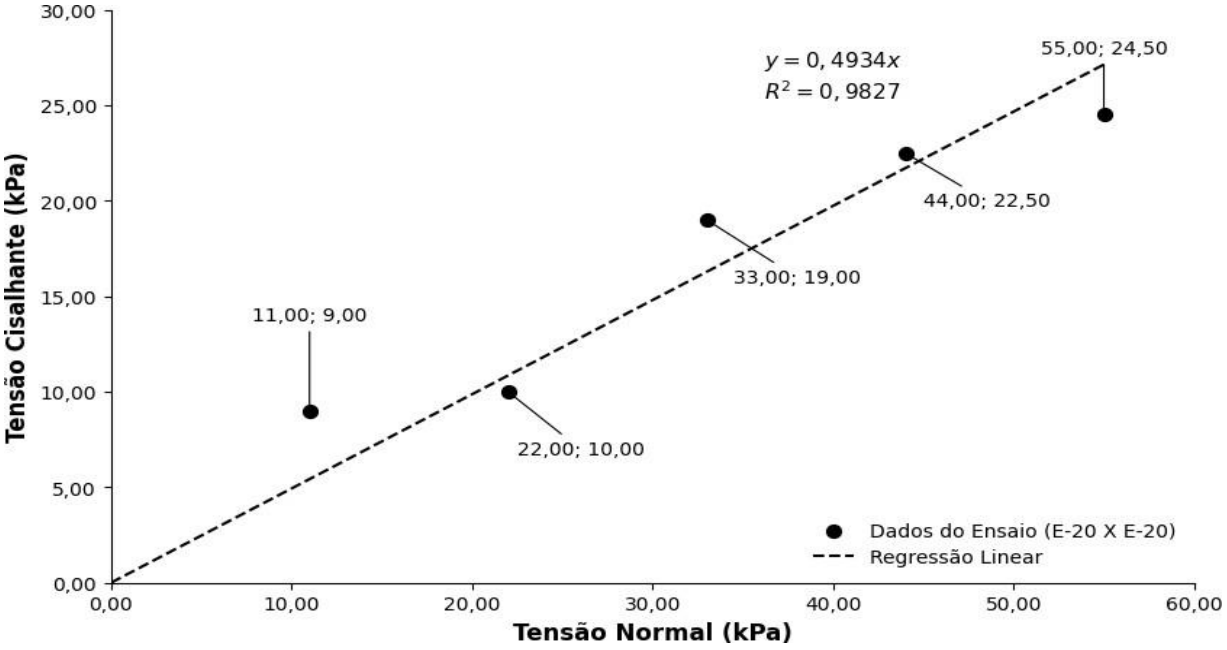
Figura 93 – Envoltória E-30 x Geotêxtil PP 600 g/m²



Fonte: Autor (2026).

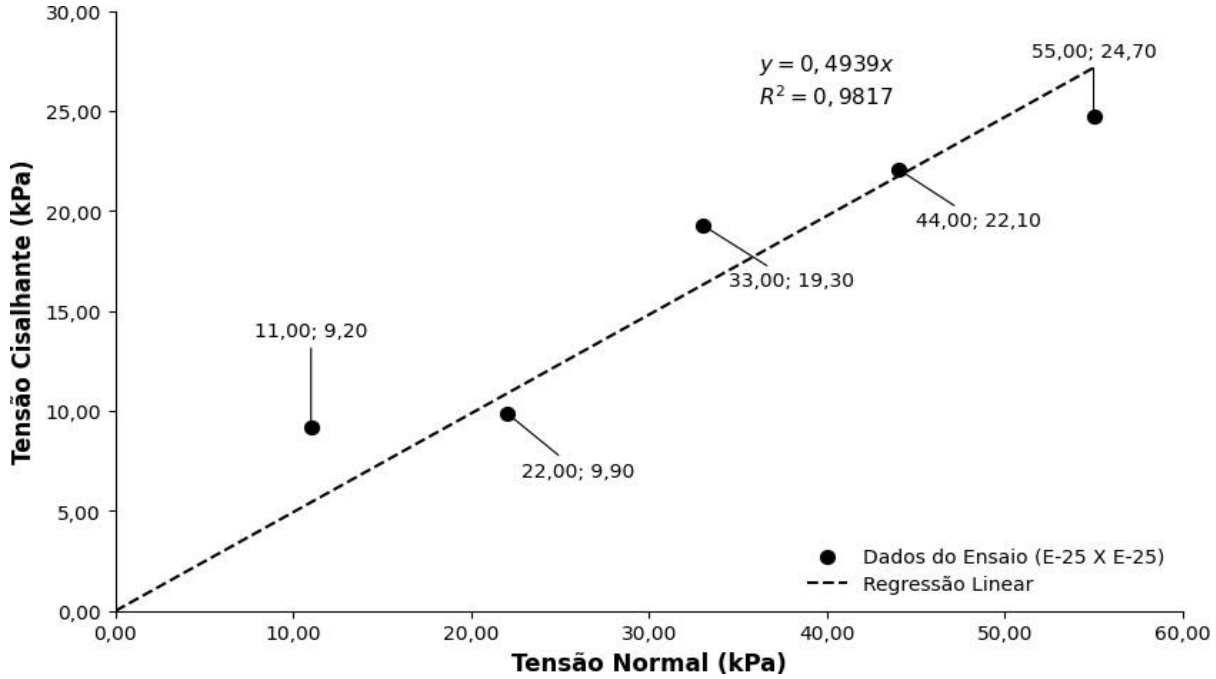
APÊNDICE H – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PÓS - PICO (τ PÓS-PICO) PARA INTERFACE EPS-EPS

Figura 94 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x E20



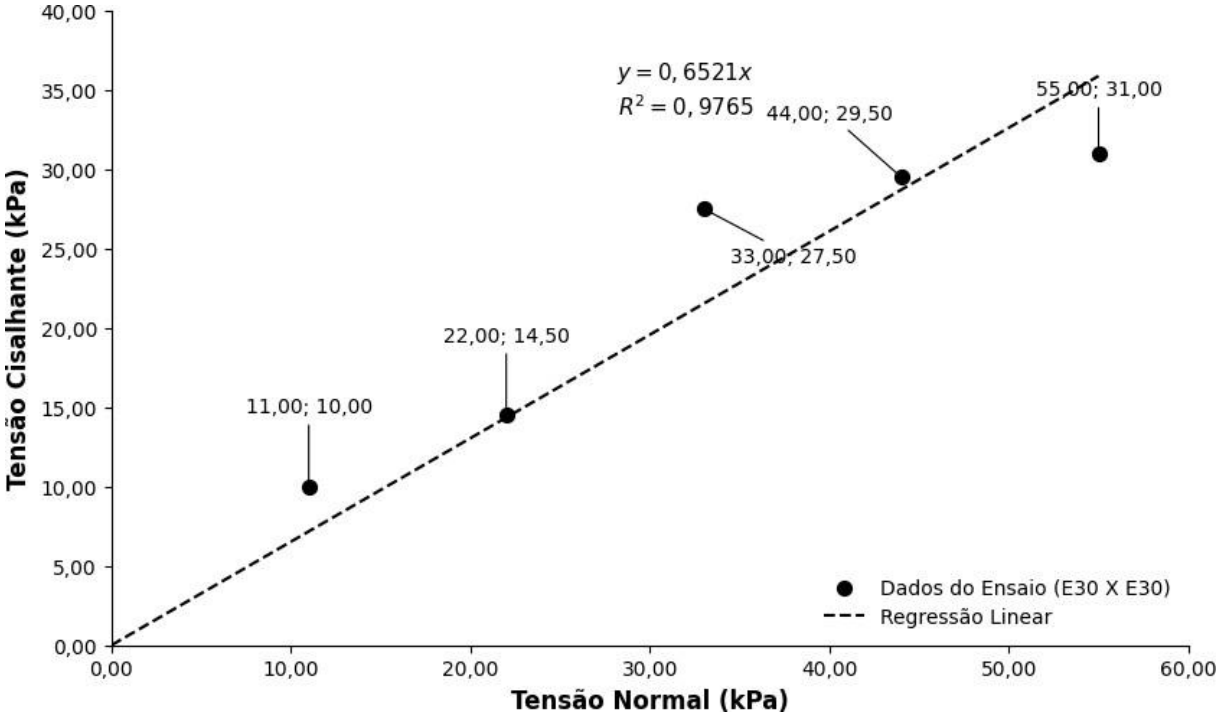
Fonte: Autor (2026).

Figura 95 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x E25



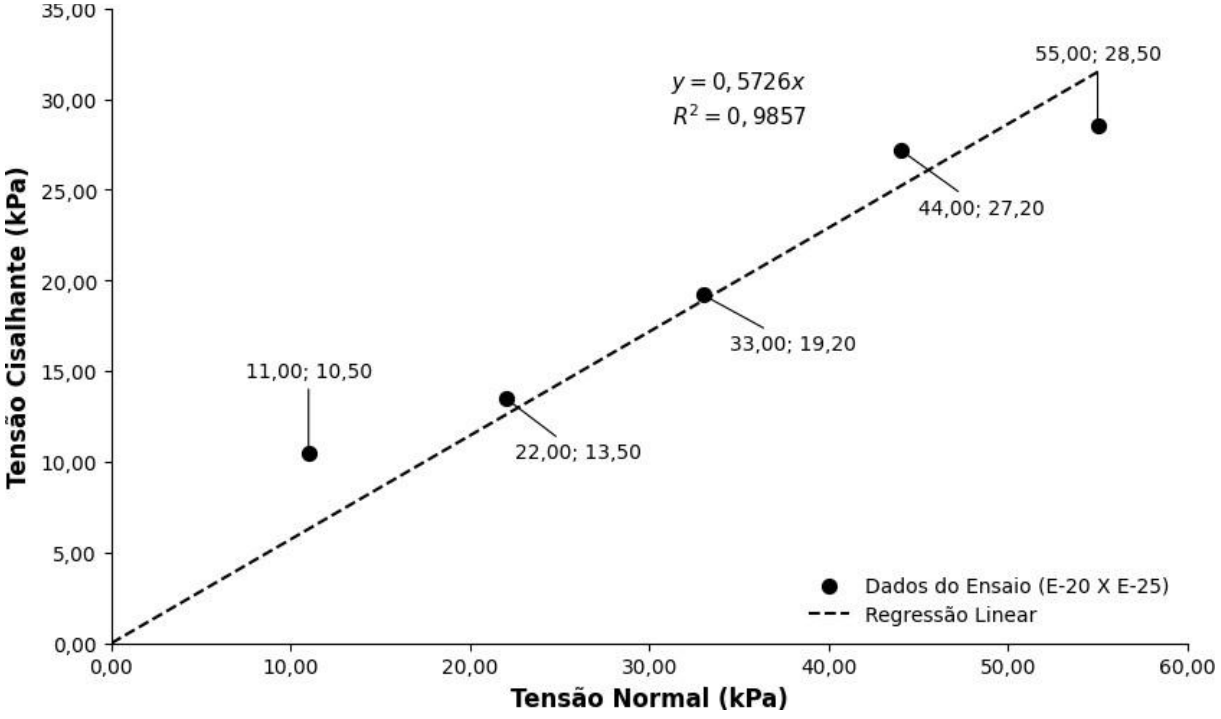
Fonte: Autor (2026).

Figura 96 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x E30



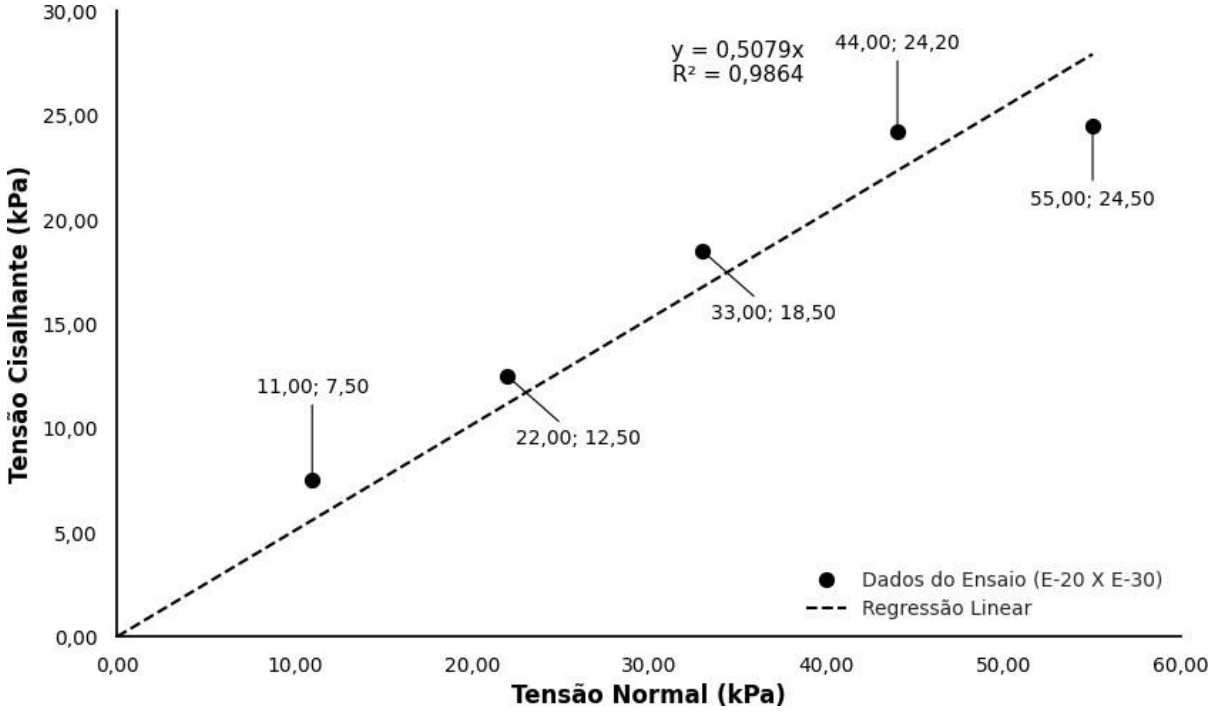
Fonte: Autor (2026).

Figura 97 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x E25



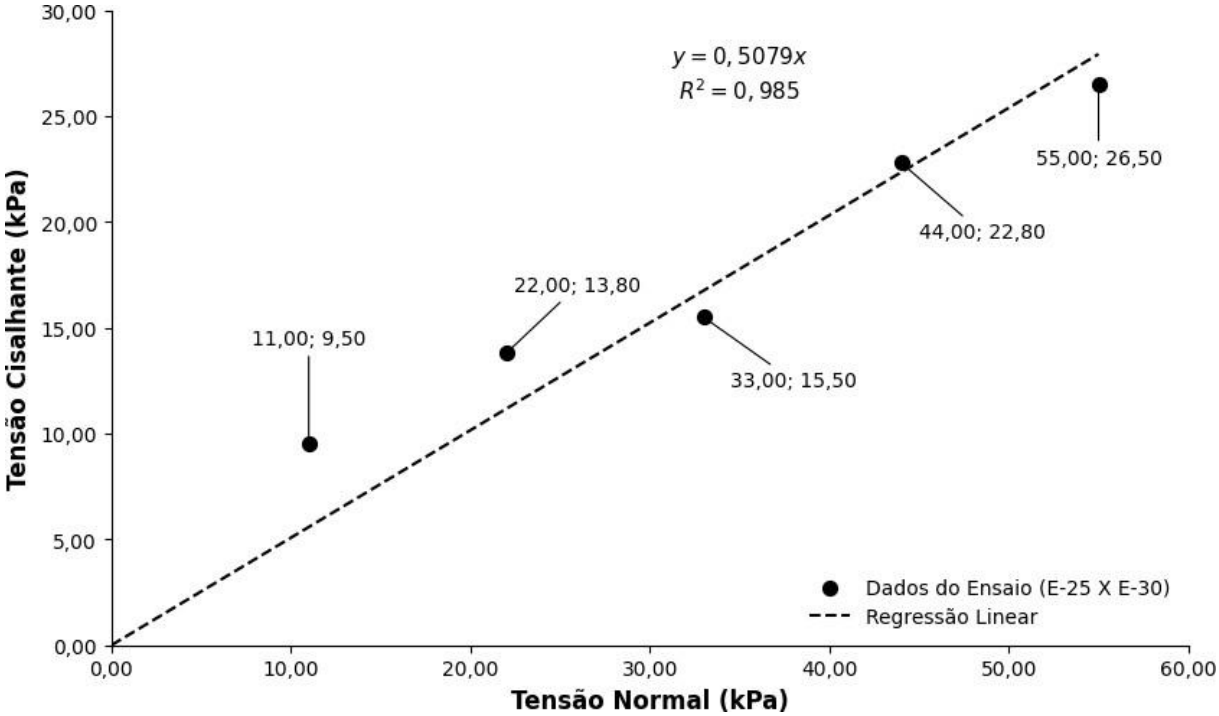
Fonte: Autor (2026).

Figura 98 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x E30



Fonte: Autor (2026).

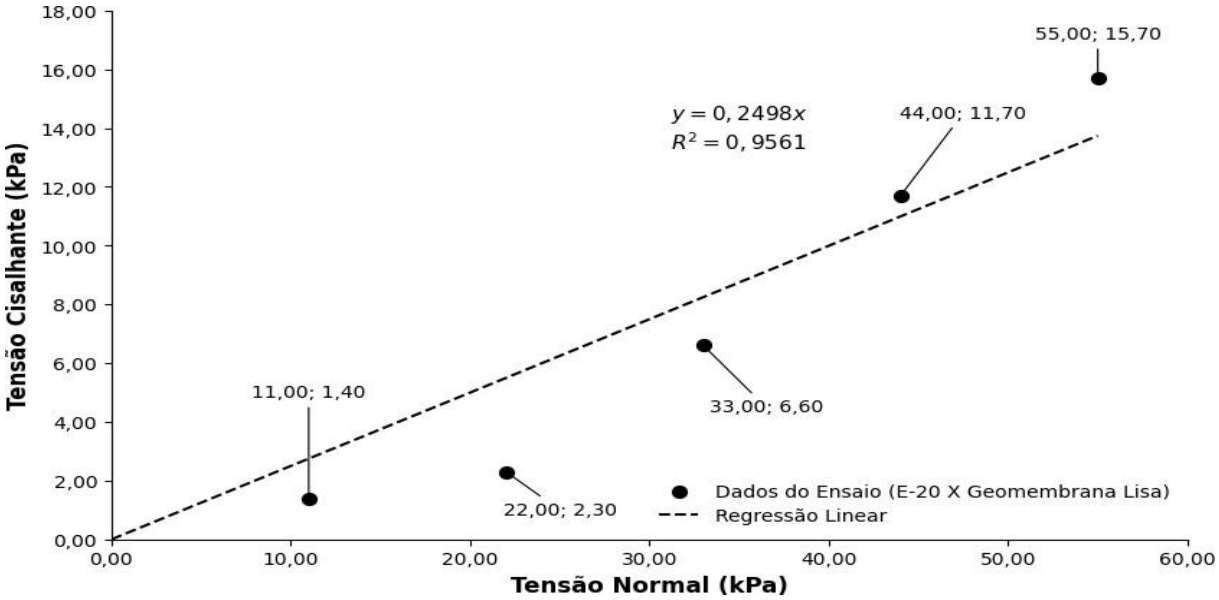
Figura 99 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x E30



Fonte: Autor (2026).

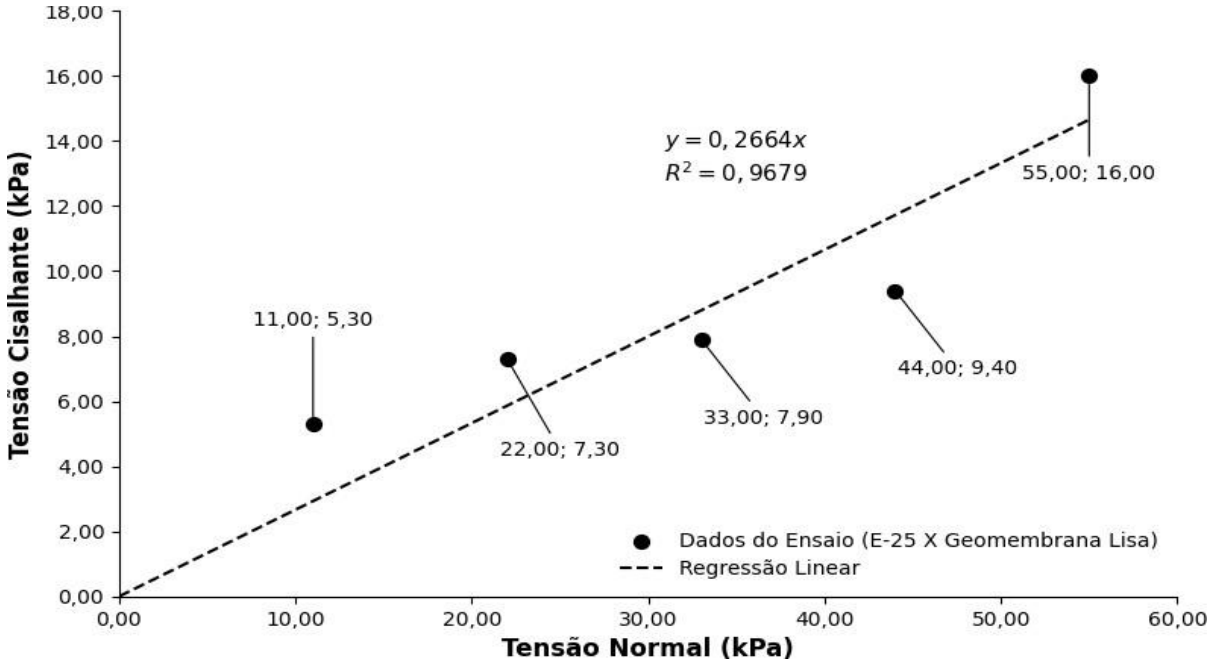
APÊNDICE I – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PÓS - PICO (τ PÓS-PICO) PARA INTERFACE EPS-GEOMEMBRANA LISA E EPS-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA

Figura 100 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geomembrana Lisa



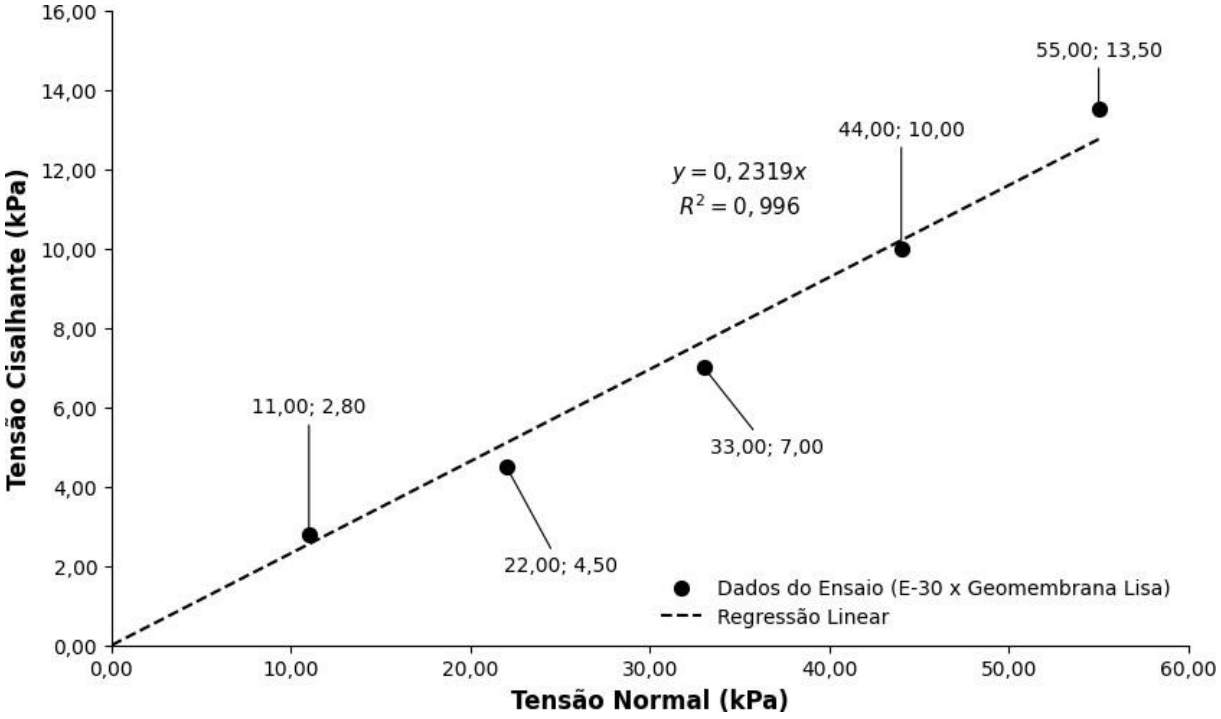
Fonte: Autor (2026).

Figura 101 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geomembrana Lisa



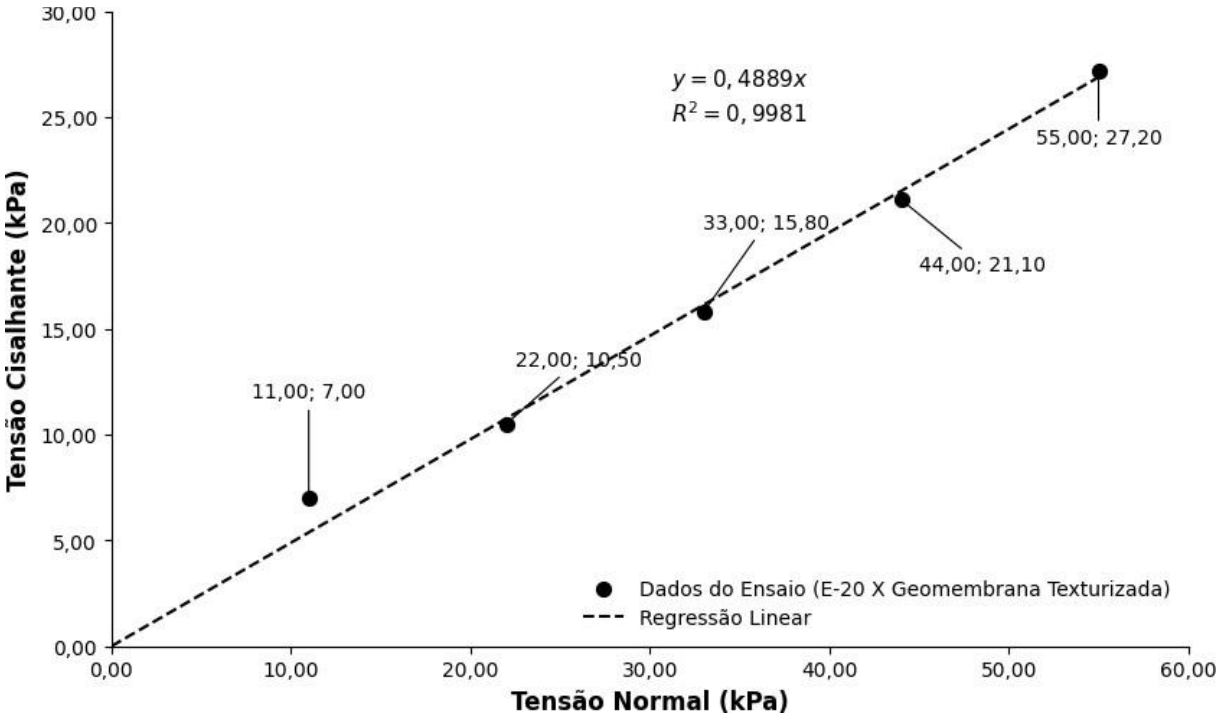
Fonte: Autor (2026).

Figura 102 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geomembrana Lisa



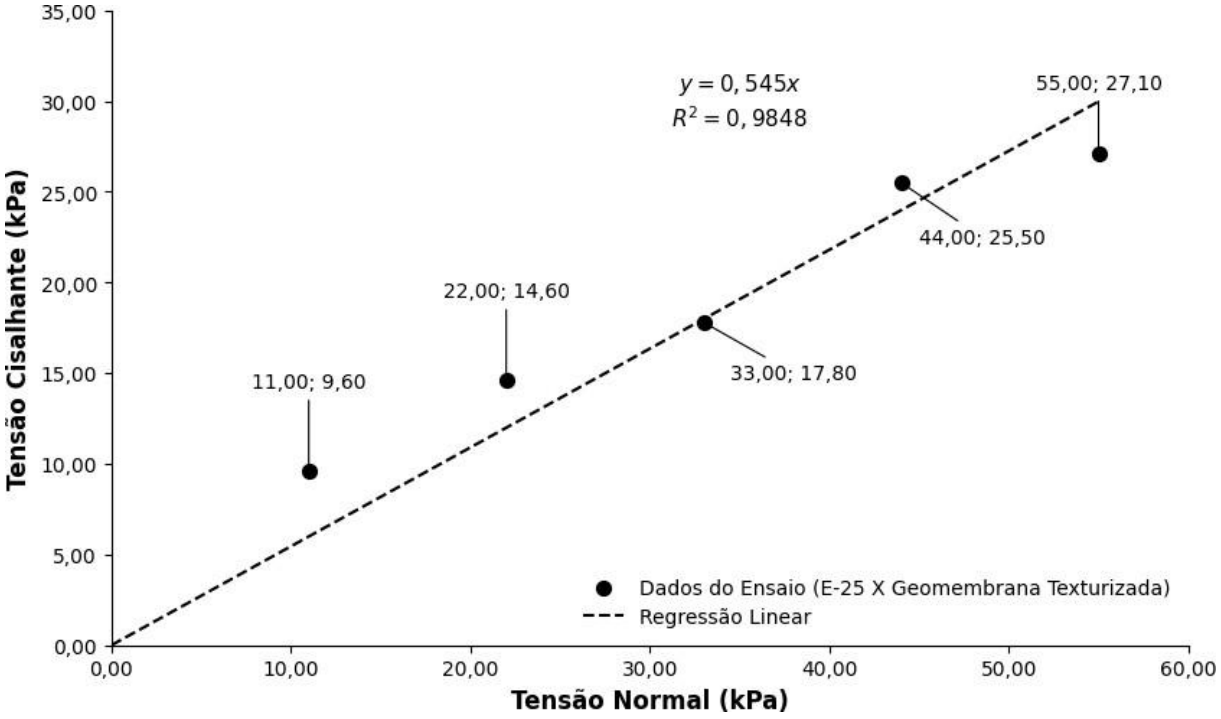
Fonte: Autor (2026).

Figura 103 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geomembrana Texturizada



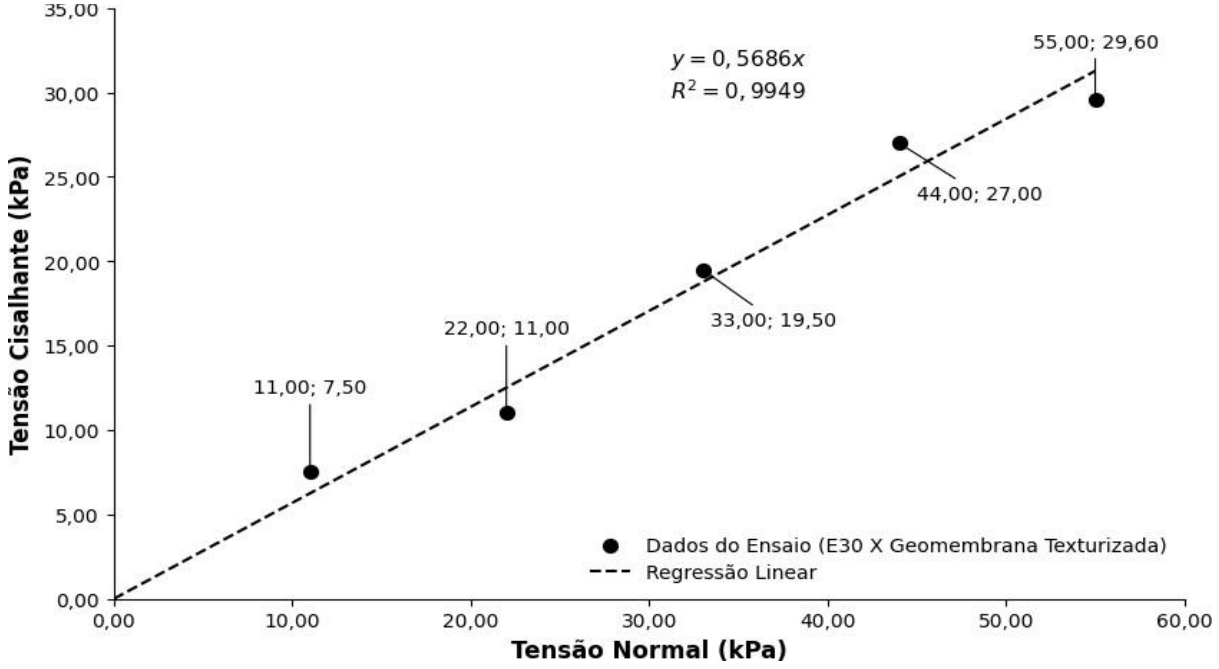
Fonte: Autor (2026).

Figura 104 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geomembrana Texturizada



Fonte: Autor (2026).

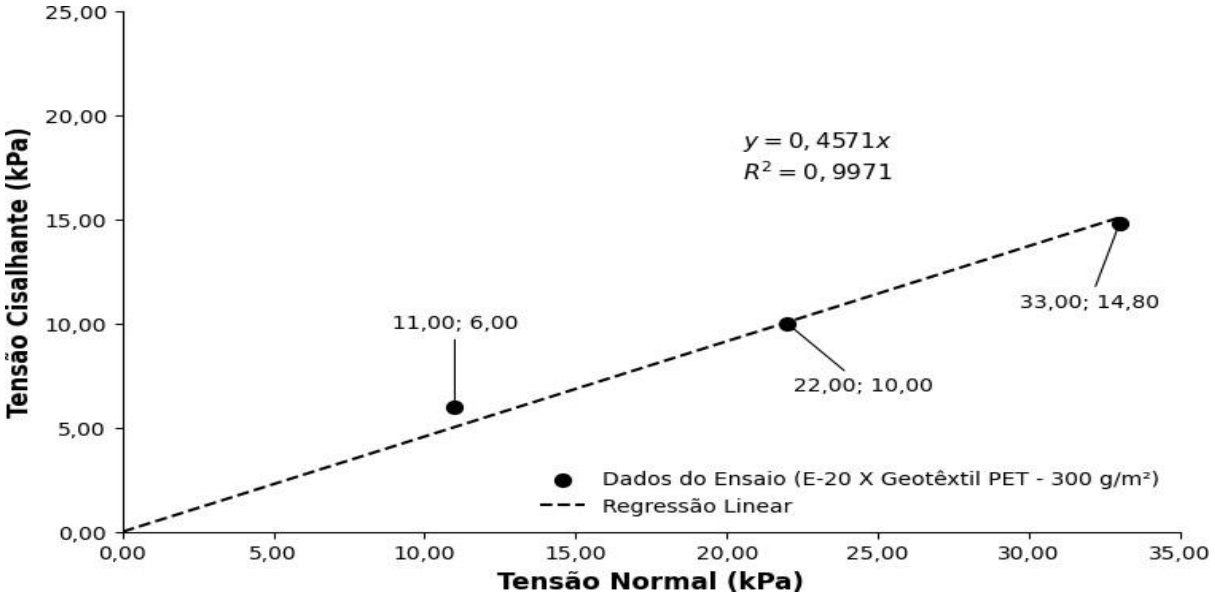
Figura 105 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geomembrana Texturizada



Fonte: Autor (2026).

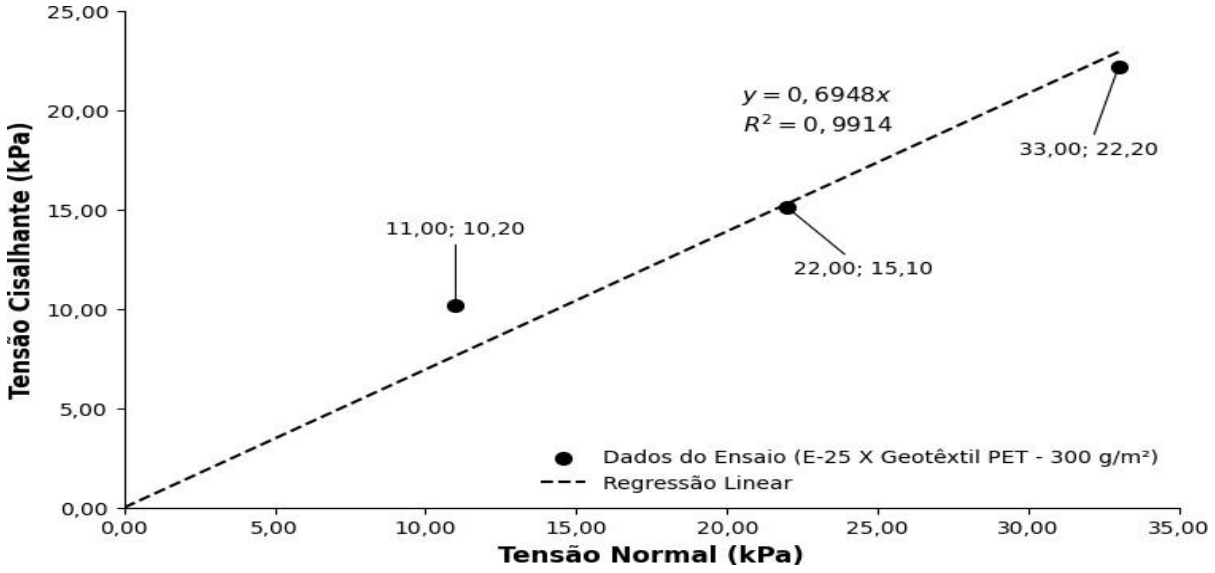
APÊNDICE J – GRÁFICOS DE ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA TENSÃO DE PÓS - PICO (τ PÓS-PICO) PARA INTERFACE EPS-GEOTÊXTIL PET E EPS-GEOTÊXTIL PP

Figura 106 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PET – 300 g/m²



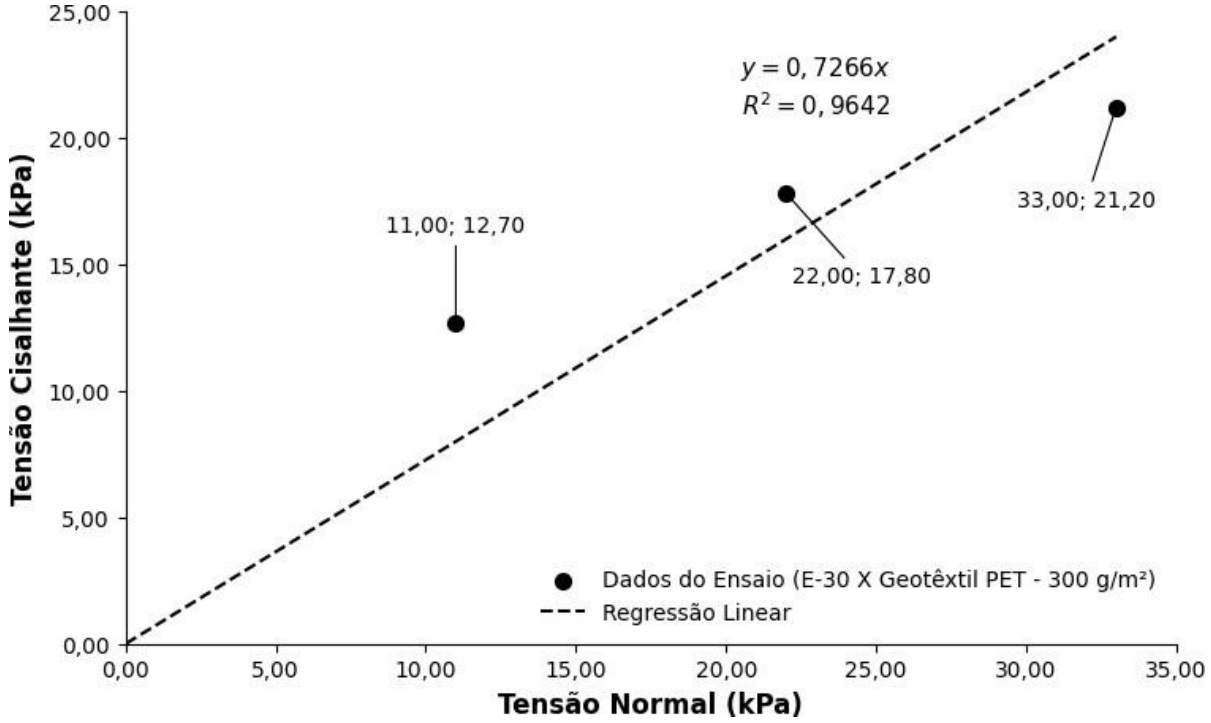
Fonte: Autor (2026).

Figura 107 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PET – 300 g/m²



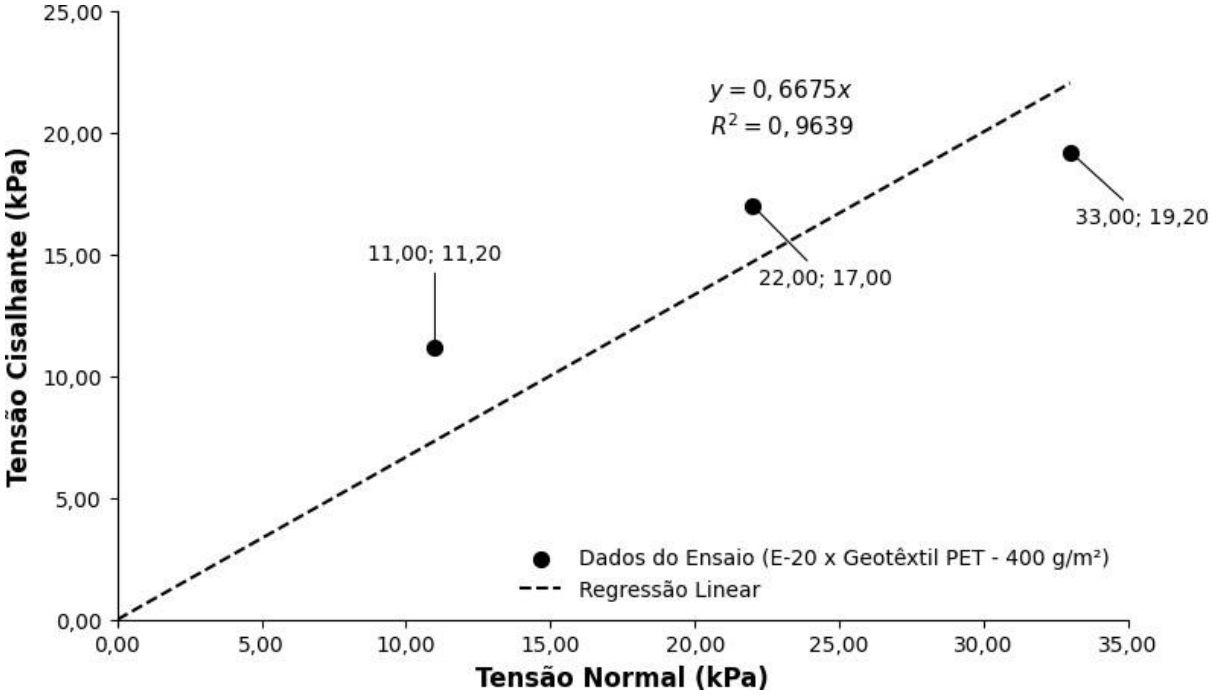
Fonte: Autor (2026).

Figura 108 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PET – 300 g/m²



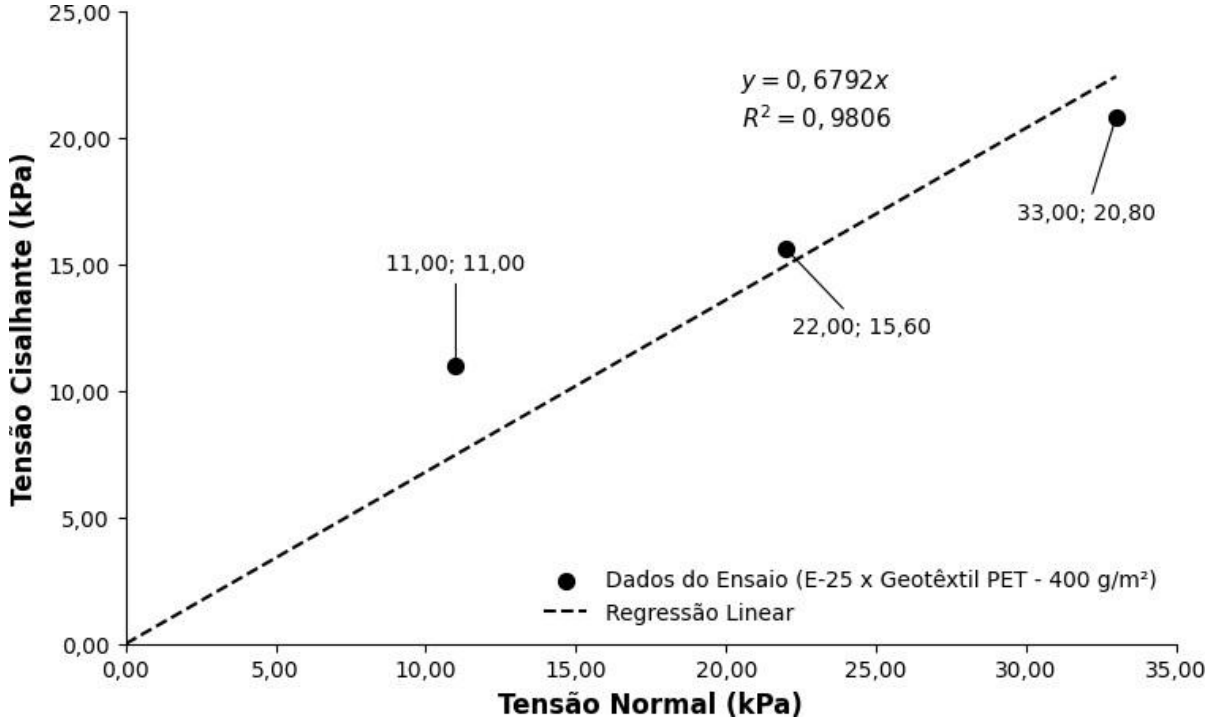
Fonte: Autor (2026).

Figura 109 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PET – 400 g/m²



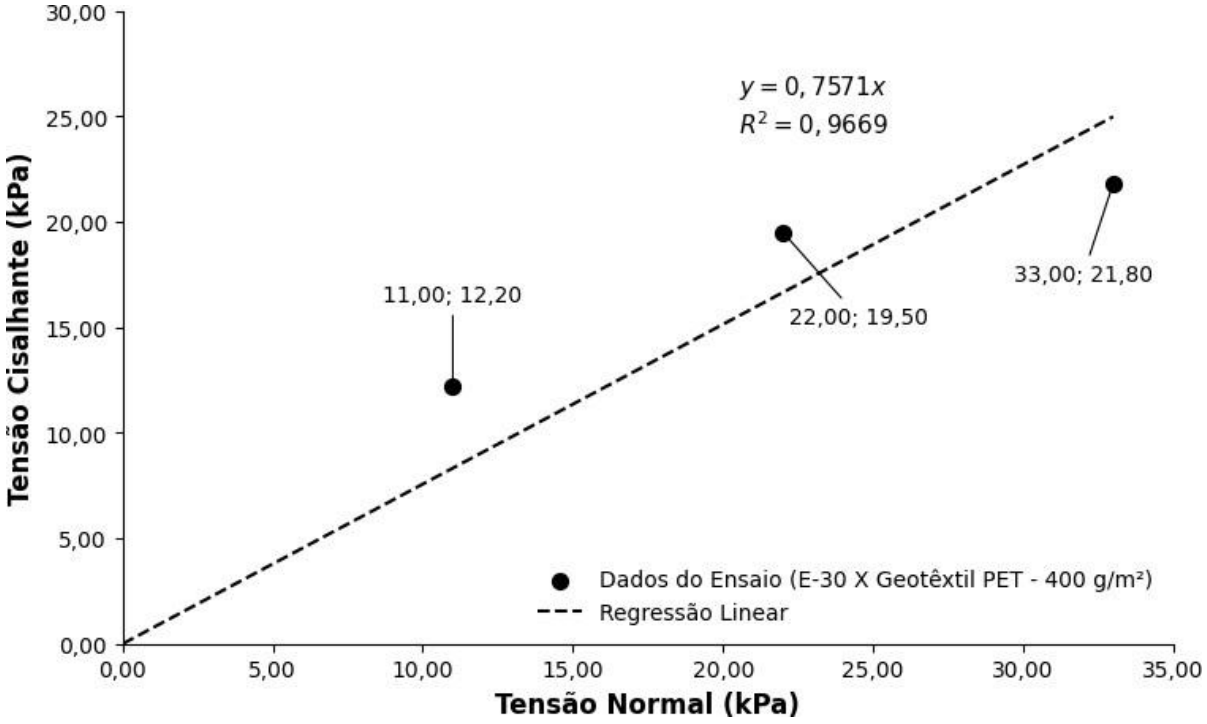
Fonte: Autor (2026).

Figura 110 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PET – 400 g/m²



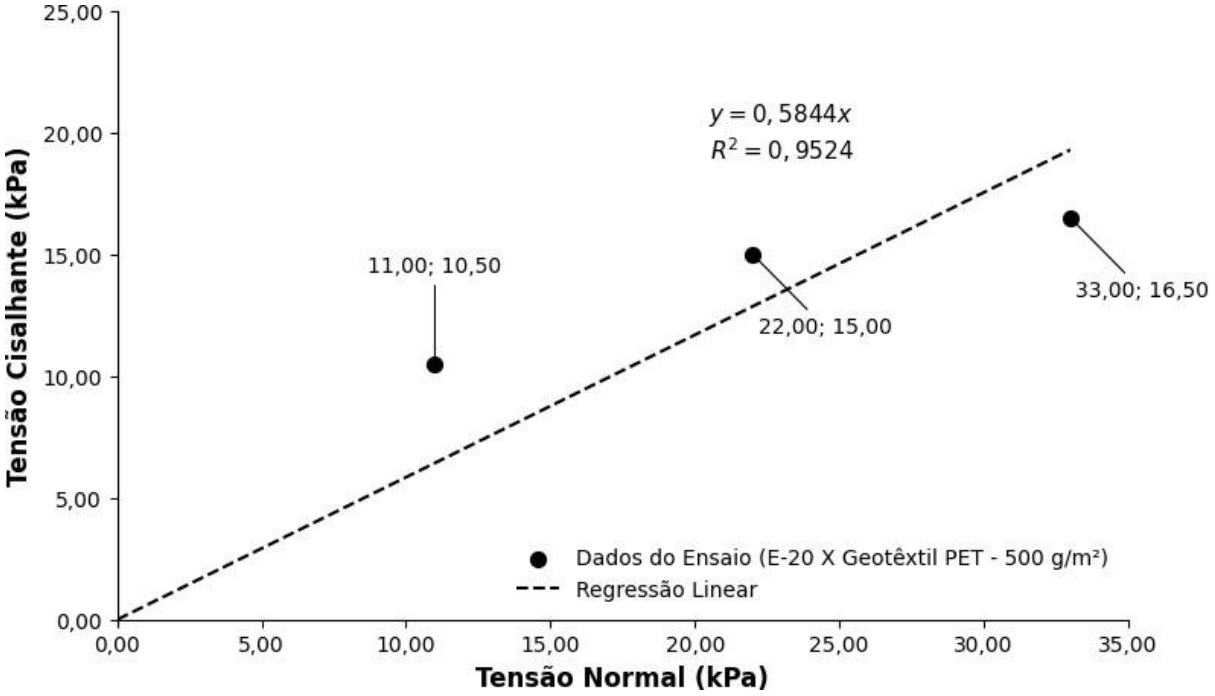
Fonte: Autor (2026).

Figura 111 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PET – 400 g/m²



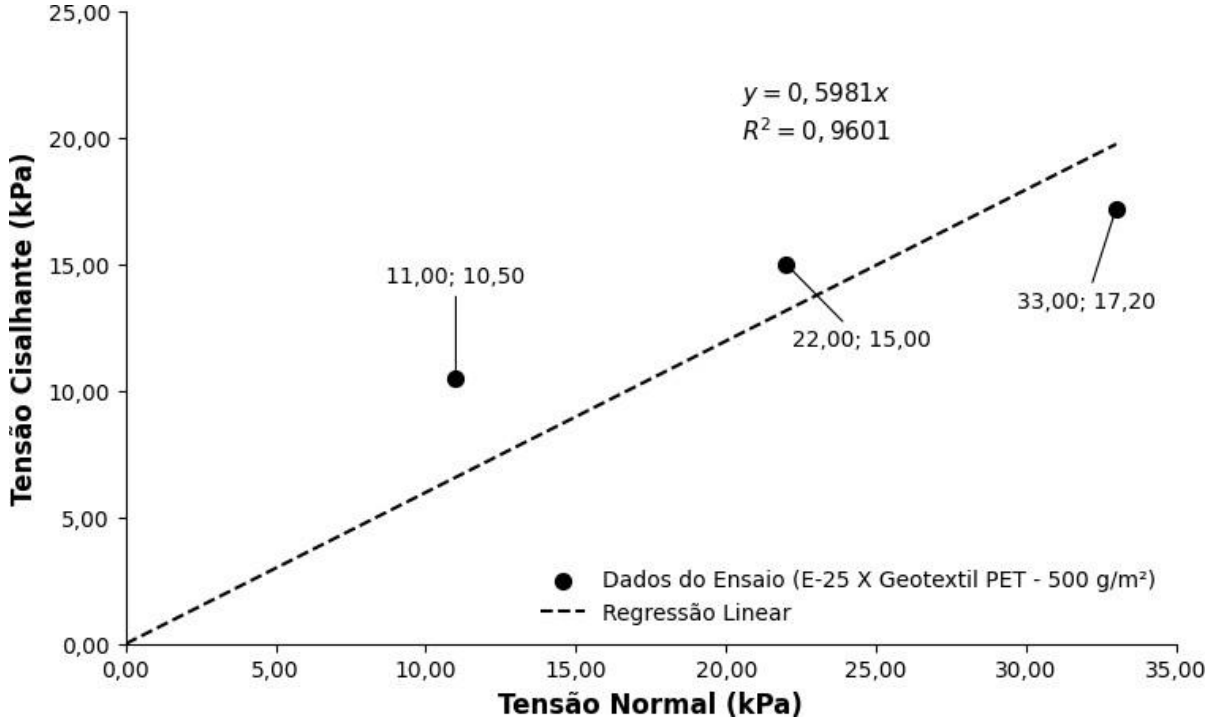
Fonte: Autor (2026).

Figura 112 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PET – 500 g/m²



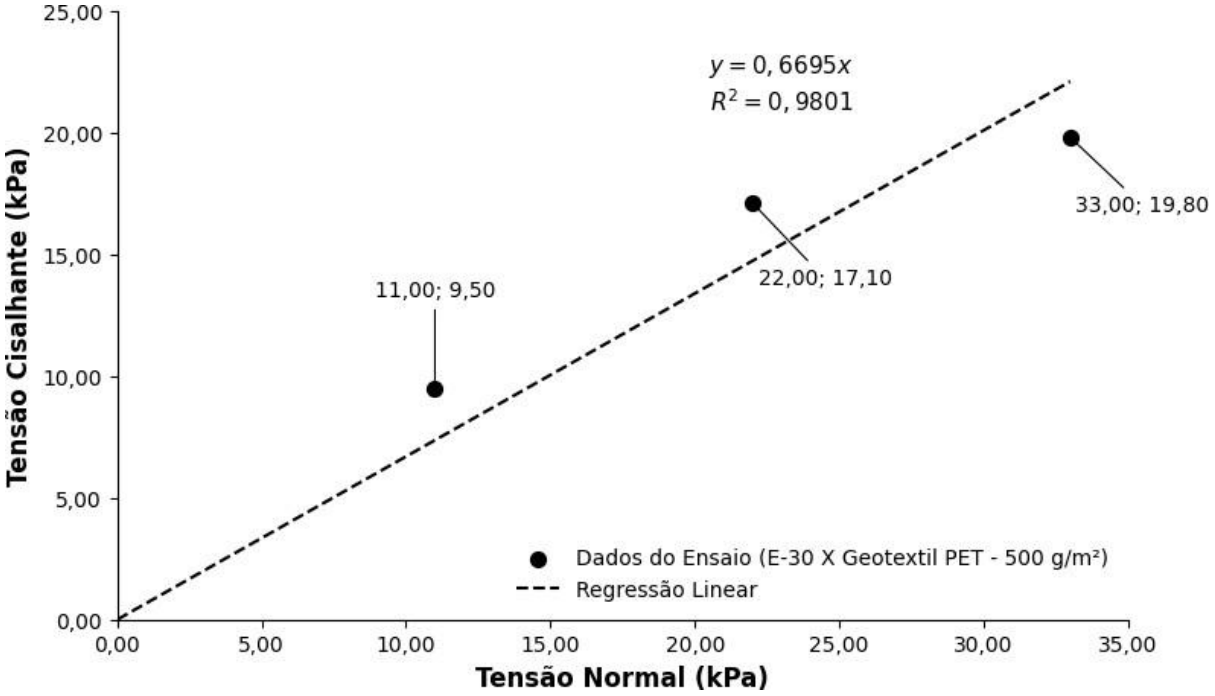
Fonte: Autor (2026).

Figura 113 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PET – 500 g/m²



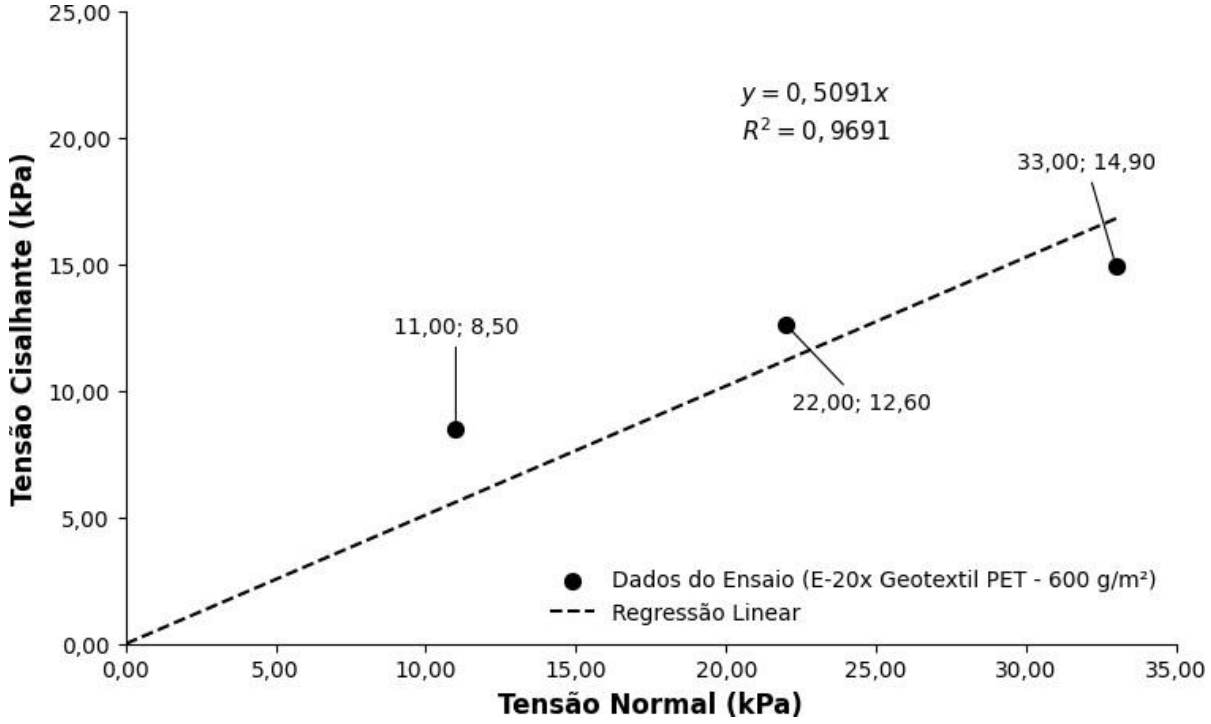
Fonte: Autor (2026).

Figura 114 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PET – 500 g/m²



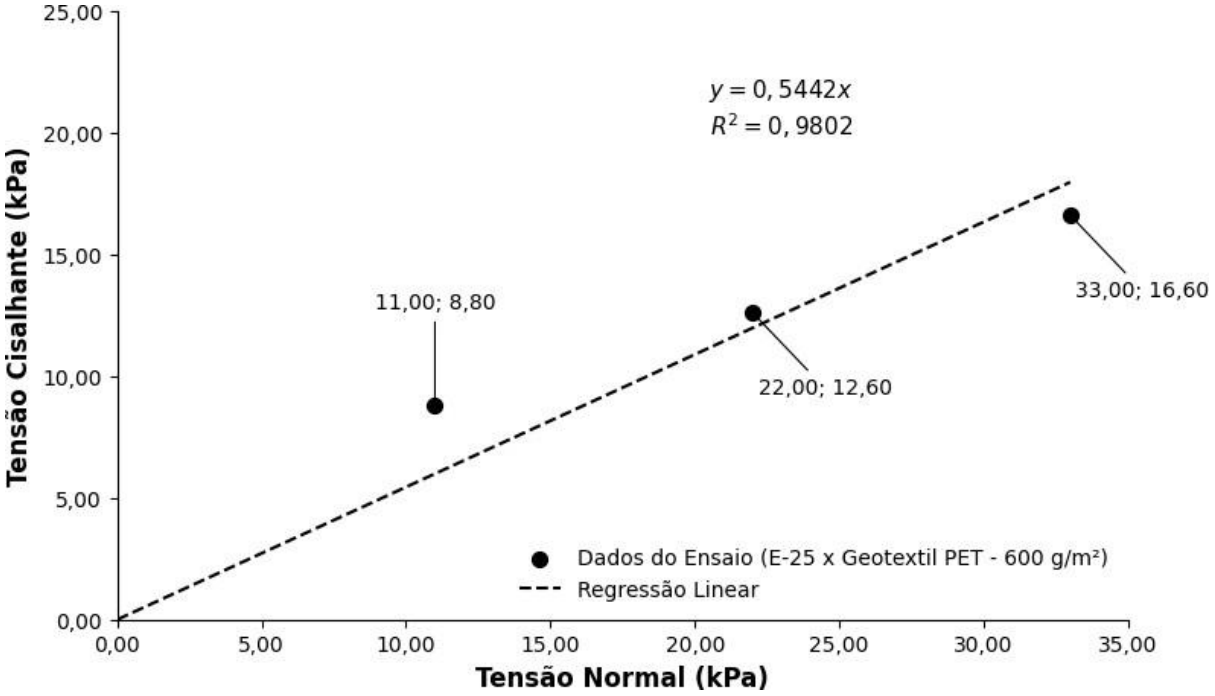
Fonte: Autor (2026).

Figura 115 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PET – 600 g/m²



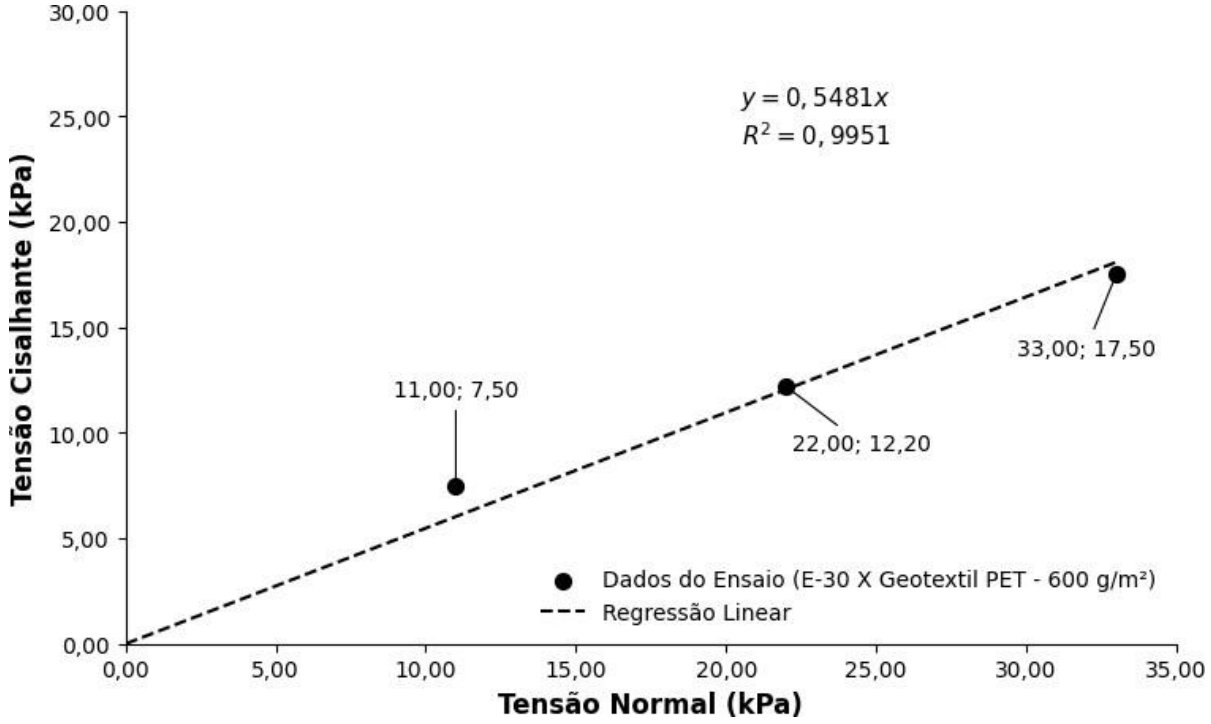
Fonte: Autor (2026).

Figura 116 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PET – 600 g/m²



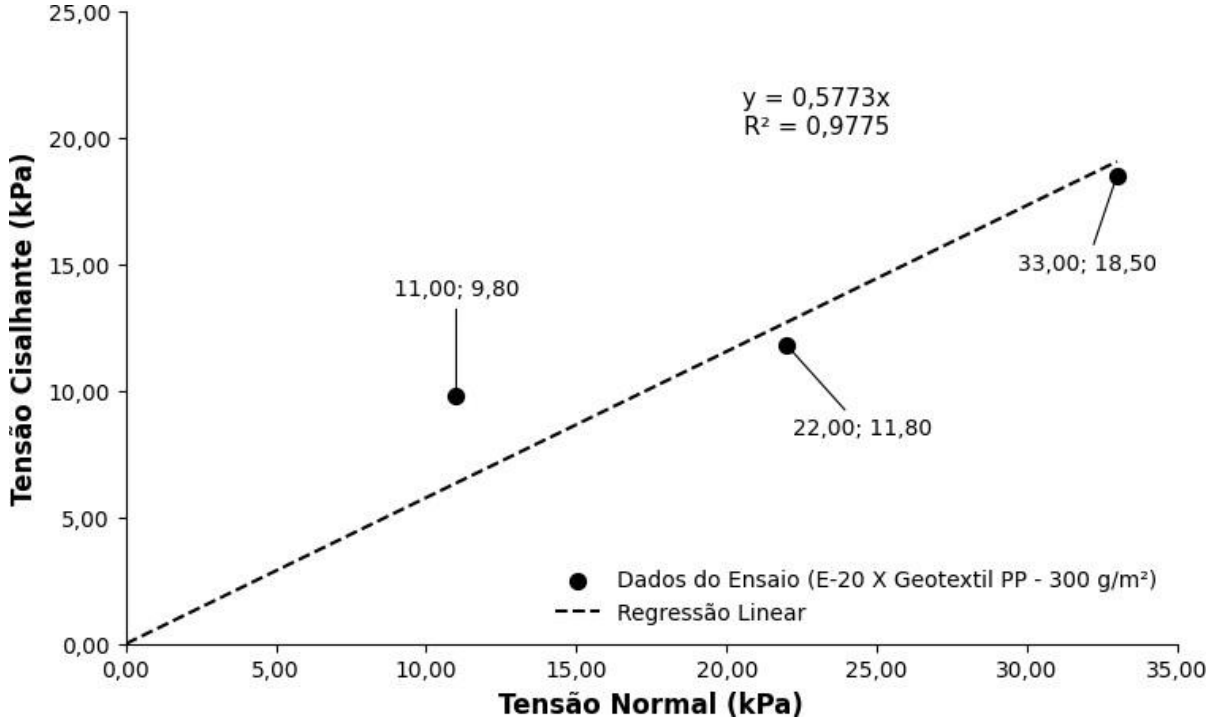
Fonte: Autor (2026).

Figura 117 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PET – 600 g/m²



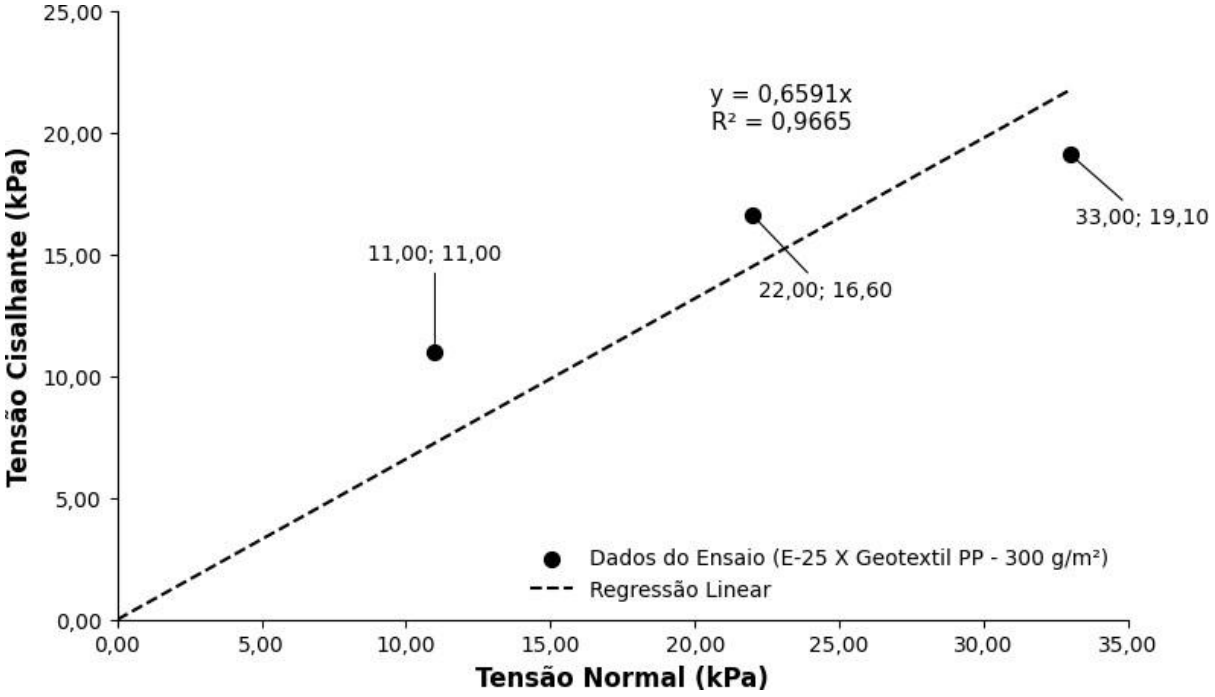
Fonte: Autor (2026).

Figura 118 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PP – 300 g/m²



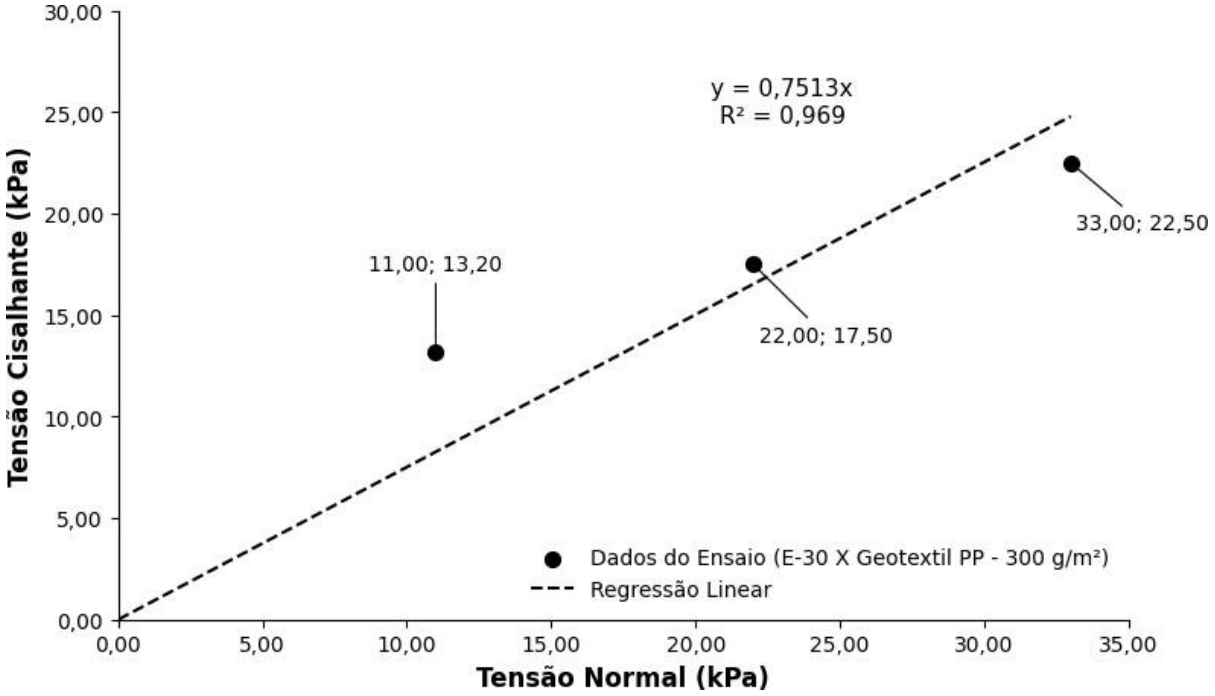
Fonte: Autor (2026).

Figura 119 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PP – 300 g/m²



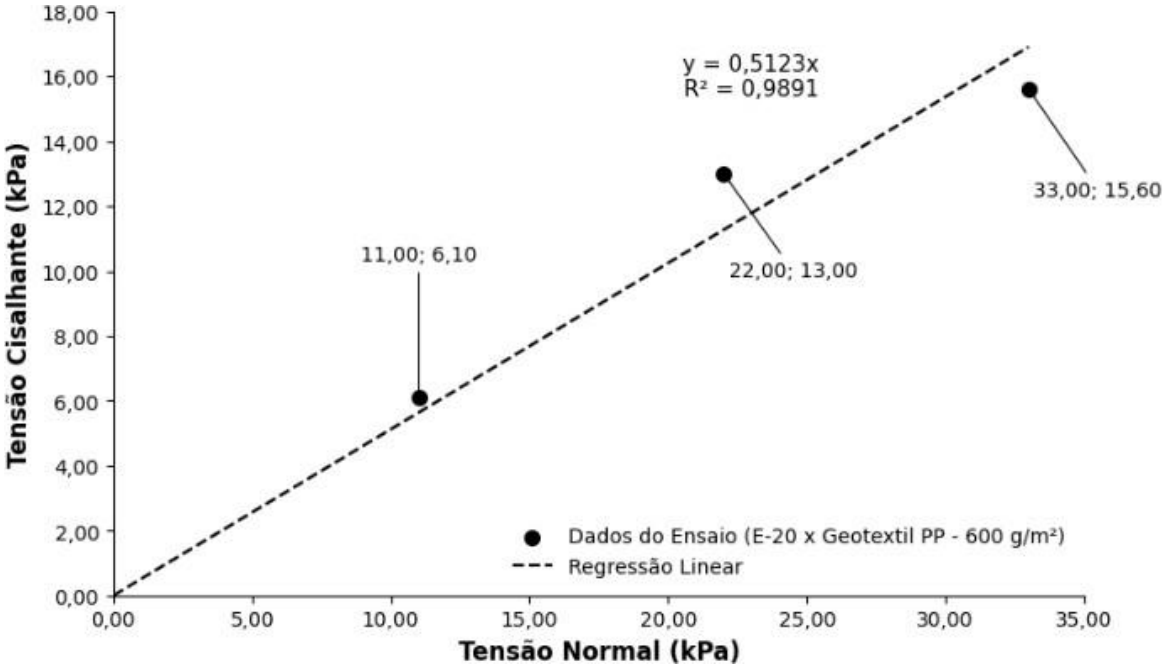
Fonte: Autor (2026).

Figura 120 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PP – 300 g/m²



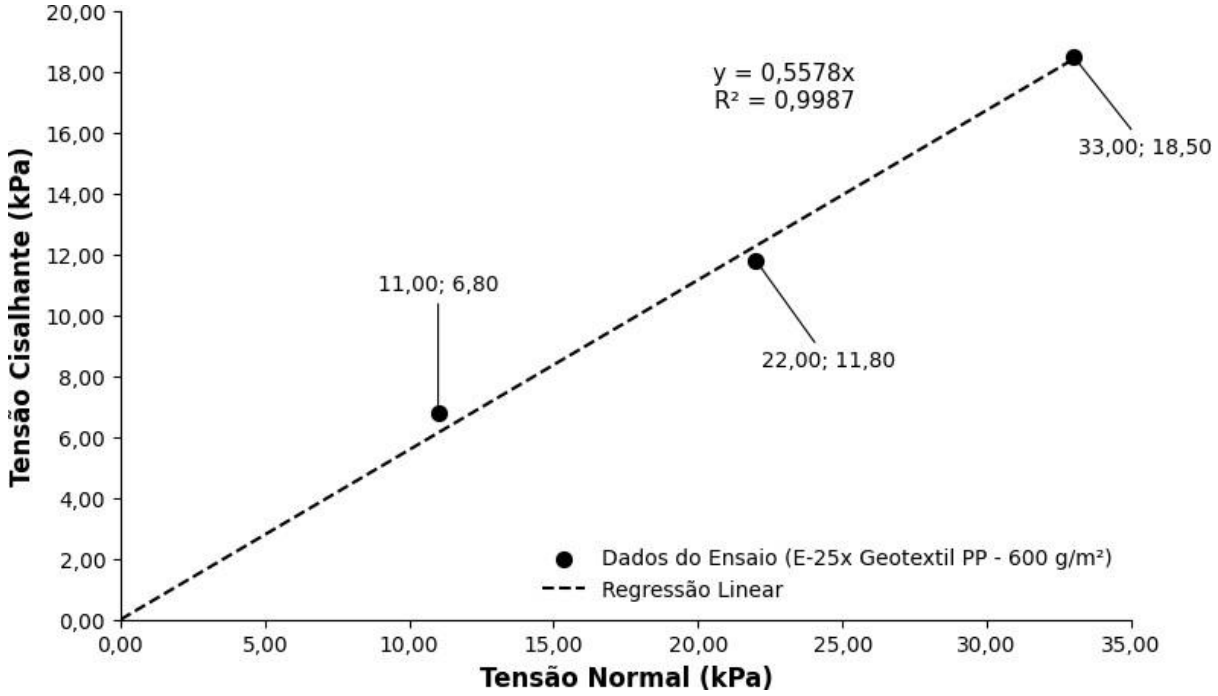
Fonte: Autor (2026).

Figura 121 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-20 x Geotêxtil PP – 600 g/m²



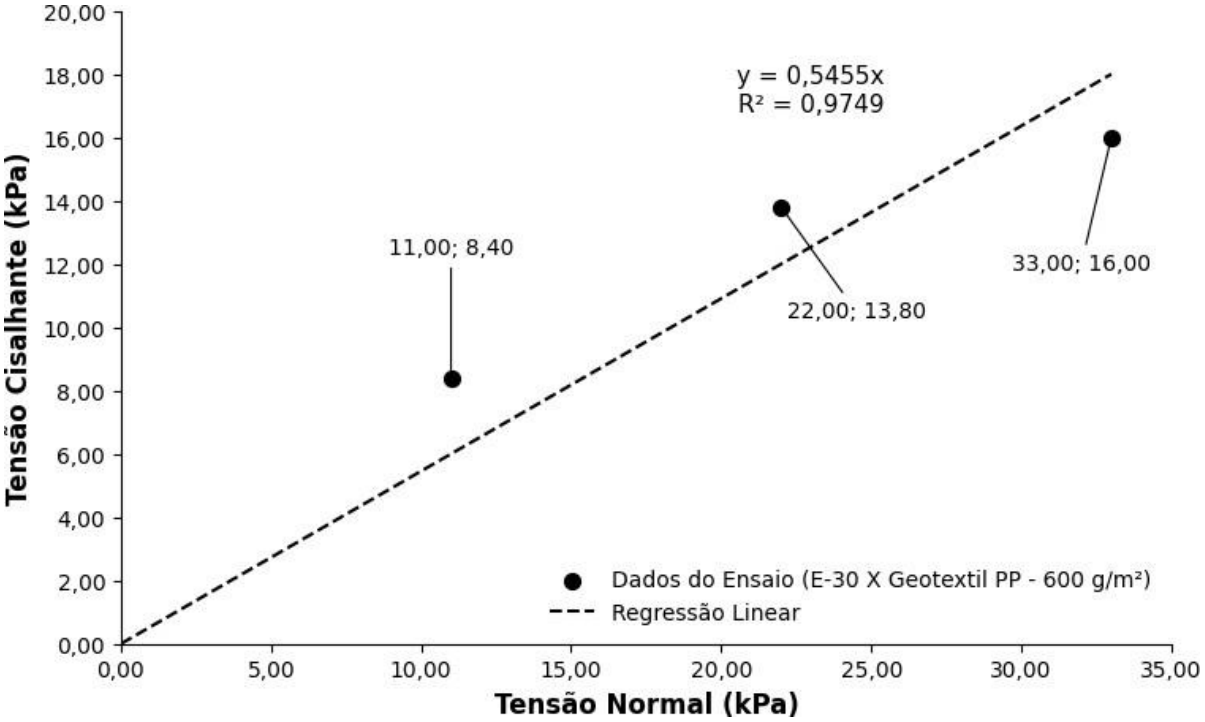
Fonte: Autor (2026).

Figura 122 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-25 x Geotêxtil PP – 600 g/m²



Fonte: Autor (2026).

Figura 123 – Envoltória de resistência – Pós Pico - E-30 x Geotêxtil PP – 600 g/m²



Fonte: Autor (2026).

NOTAS

[i] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 11752: Produtos de poliestireno expandido (EPS) para aplicações em engenharia civil e geotecnia, 2018.
[ii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[iii] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 11752: Produtos de poliestireno expandido (EPS) para aplicações em engenharia civil e geotecnia.
[iv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[v] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 11752: Produtos de poliestireno expandido (EPS) para aplicações em engenharia civil e geotecnia.
[vi] KOERNER, Robert M.; WONG, W. K. (Connie); KOERNER, George R., Index Puncture Resistance of Geomembranes Using Various Protection Geosynthetics, **Geotechnical Testing Journal**, v. 35, n. 5, p. 762–770, 2012.
[vii] SHUKLA, Sanjay Kumar, **An Introduction to Geosynthetic Engineering**, 0. ed. [s.l.]: CRC Press, 2017.
[viii] HORVATH, J.S., Expanded Polystyrene (EPS) geofoam: An introduction to material behavior, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 13, n. 4, p. 263–280, 1994.
[ix] PALMEIRA, Ennio Marques, Soil–geosynthetic interaction: Modelling and analysis, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 5, p. 368–390, 2009.
[x] KOERNER; WONG; KOERNER, Index Puncture Resistance of Geomembranes Using Various Protection Geosynthetics.
[xi] JUNIOR, Costa; DA [UNESP, Sergio Luiz, Avaliação da resistência de interface entre geomembranas e diferentes geossintéticos, 2020.
[xii] PUPPALA, Anand J.; RUTTANAPORAMAKUL, Pinit; CONGRESS, Surya Sarat Chandra, Design and construction of lightweight EPS geofoam embedded geomaterial embankment system for control of settlements, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 47, n. 3, p. 295–305, 2019.
[xiii] KOERNER; WONG; KOERNER, Index Puncture Resistance of Geomembranes Using Various Protection Geosynthetics.
[xiv] MCCARTNEY, John S.; ZORNBERG, Jorge G.; SWAN, Robert H., Analysis of a Large Database of GCL-Geomembrane Interface Shear Strength Results, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 2, p. 209–223, 2009.
[xv] BACAS, Belén M.; CAÑIZAL, Jorge; KONIETZKY, Heinz, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces, **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 7, n. 6, p. 638–645, 2015.
[xvi] KOERNER; WONG; KOERNER, Index Puncture Resistance of Geomembranes Using Various Protection Geosynthetics.
[xvii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[xviii] PALIOTTO, Andrea *et al*, Systematic review, evaluation and comparison of different approaches for the implementation of road network safety analysis, **Heliyon**, v. 10, n. 7, p. e28391, 2024.
[xix] *Ibid.*
[xx] KHALAJ, Omid *et al*, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS), **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 723, n. 1, p. 012014, 2020.
[xxi] HORVATH, Expanded Polystyrene (EPS) geofoam.
[xxii] KHALAJ *et al*, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS).
[xxiii] HORVATH, Expanded Polystyrene (EPS) geofoam.
[xxiv] SREEKANTAN, P. G.; VANGLA, P.; RAMANA, G. V., Image-aided physical and compression characterisation of expanded polystyrene geofoam, **Geosynthetics International**, v. 31, n. 3, p. 283–295, 2024.
[xxv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6817: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam, 2013.
[xxvi] HORVATH, Expanded Polystyrene (EPS) geofoam.
[xxvii] KHALAJ *et al*, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS).
[xxviii] BEJU, Y.Z.; MANDAL, J.N., Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: Preliminary Characteristic Evaluation, **Procedia Engineering**, v. 189, p. 239–246, 2017.
[xxix] *Ibid.*

[xxx] CHUN, Byung Sik *et al*, Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 22, n. 4, p. 223–237, 2004.
[xxxi] GHAZAVI, Mahmoud; ARAEI, Ata Aghaei; AZADNOUR, Behnam, Dynamic properties of geofoam (EPS) from dry to fully saturated conditions, **Construction and Building Materials**, v. 462, p. 139864, 2025.
[xxxii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6817: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam.
[xxxiii] HORVATH, Expanded Polystyrene (EPS) geofoam.
[xxxiv] BEJU; MANDAL, Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam.
[xxxv] AKIS, E.; GUVEN, G.; LOTFISADIGH, B., Predictive models for mechanical properties of expanded polystyrene (EPS) geofoam using regression analysis and artificial neural networks, **Neural Computing and Applications**, v. 34, n. 13, p. 10845–10884, 2022.
[xxxvi] GHAZAVI; ARAEI; AZADNOUR, Dynamic properties of geofoam (EPS) from dry to fully saturated conditions.
[xxxvii] BEJU; MANDAL, Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam.
[xxxix] CHUN *et al*, Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests.
[xl] MEGUID, Mohamed A.; KHAN, Muhammad Imran, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems, **International Journal of Geo-Engineering**, v. 10, n. 1, p. 6, 2019.
[xli] KHALAJ *et al*, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS).
[xlii] AKIS; GUVEN; LOTFISADIGH, Predictive models for mechanical properties of expanded polystyrene (EPS) geofoam using regression analysis and artificial neural networks.
[xliii] KHALAJ *et al*, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS).
[xliv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6817: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam.
[xlv] *Ibid*.
[xlvi] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 17148: Poliestireno expandido (EPS) — Blocos para aplicações geomecânicas (Geofoam), 2023.
[xlvii] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 11752: Produtos de poliestireno expandido (EPS) para aplicações em engenharia civil e geotecnia.
[xlviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6817: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam.
[xlix] HORVATH, Expanded Polystyrene (EPS) geofoam.
[l] KHAN, Muhammad Imran; MEGUID, Mohamed A., Evaluating the Role of Geofoam Properties in Reducing Lateral Loads on Retaining Walls: A Numerical Study, **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 4754, 2021.
[li] HORVATH, Expanded Polystyrene (EPS) geofoam.
[lii] KHAN; MEGUID, Evaluating the Role of Geofoam Properties in Reducing Lateral Loads on Retaining Walls.
[liii] PUPPALA; RUTTANAPORAMAKUL; CONGRESS, Design and construction of lightweight EPS geofoam embedded geomaterial embankment system for control of settlements.
[liv] HORVATH, Expanded Polystyrene (EPS) geofoam.
[lv] KHAN; MEGUID, Evaluating the Role of Geofoam Properties in Reducing Lateral Loads on Retaining Walls.
[lvi] *Ibid*.
[lvii] SHADABI, Sadri *et al*, Attenuation Potential of Geofoam as Cover Material in Cut and Cover Tunnels during Earthquakes, **Journal of Earthquake Engineering**, v. 26, n. 14, p. 7194–7221, 2022.
[lviii] HORVATH, Expanded Polystyrene (EPS) geofoam.
[lix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6817: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam.
[lx] PUPPALA; RUTTANAPORAMAKUL; CONGRESS, Design and construction of lightweight EPS geofoam embedded geomaterial embankment system for control of settlements.
[lxi] HORVATH, Expanded Polystyrene (EPS) geofoam.
[lxii] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[lxiii] KHAN, Muhammad Imran; MEGUID, Mohamed A., Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam, **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 4, n. 2, p. 12, 2018.
[lxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6817: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam.
[lxv] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[lxvi] KHAN; MEGUID, Evaluating the Role of Geofoam Properties in Reducing Lateral Loads on Retaining Walls.
[lxvii] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[lxviii] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[lxix] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[lxx] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[lxxi] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.

[lxxii] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[lxxiii] KHAJEH, Aghileh; JAMSHIDI CHENARI, Reza; PAYAN, Meghdad, A Review of the Studies on Soil-EPS Composites: Beads and Blocks, **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 4, p. 3363–3383, 2020.
[lxxiv] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 10318-1: Geossintéticos - Parte 1: Termos e definições, 2013.
[lxxv] MARKIEWICZ, Anna; KODA, Eugeniusz; KAWALEC, Jacek, Geosynthetics for Filtration and Stabilisation: A Review, **Polymers**, v. 14, n. 24, p. 5492, 2022.
lxxvi *Ibid*.
[lxxvii] MÜLLER, Werner W; SAATHOFF, Fokke, Geosynthetics in geoenvironmental engineering, **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 16, n. 3, p. 034605, 2015.
[lxxviii] CHATRABHUJ; MESHRAM, Kundan, Use of geosynthetic materials as soil reinforcement: an alternative eco-friendly construction material, **Discover Civil Engineering**, v. 1, n. 1, p. 41, 2024.
[lxxix] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 10318-1: Geossintéticos - Parte 1: Termos e definições.
[lxxx] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[lxxxi] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[lxxxii] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[lxxxiii] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[lxxxiv] KHAN; MEGUID, Evaluating the Role of Geofoam Properties in Reducing Lateral Loads on Retaining Walls.
[lxxxv] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[lxxxvi] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[lxxxvii] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[lxxxviii] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[lxxxix] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[xc] NAREJO, D.; KOERNER, R.M.; WILSON-FAHMY, R.F., Puncture Protection of Geomembranes Part II: Experimental, **Geosynthetics International**, v. 3, n. 5, p. 629–653, 1996.
[xci] ROWE, R. Kerry; YU, Yan, Tensile Strains in Geomembrane Landfill Liners, *in*: LI, Lin; CETIN, Bora; YANG, Xiaoming (Orgs.), **Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Ground Improvement and Geosynthetics**, Singapore: Springer Singapore, 2018, p. 1–10.
[xcii] ROWE, R. K.; JONES, D. D.; RUTTER, A., Polychlorinated biphenyl diffusion through HDPE geomembrane, **Geosynthetics International**, v. 23, n. 6, p. 408–421, 2016.
[xciii] SCHEIRS, John, **A Guide to Polymeric Geomembranes**, 1. ed. [s.l.]: Wiley, 2009.
[xciv] *Ibid*.
[xcv] HALAKE, Kantappa; SHARMA, Sanjay; JAIN, Gaurav, Overview of Polyethylene Based Multi-layered Geomembrane Through Blown Extrusion Process, **E3S Web of Conferences**, v. 368, p. 02013, 2023.
[xcvi] SCHEIRS, **A Guide to Polymeric Geomembranes**.
xcvii *Ibid.*
xcviii *Ibid.*
[xcix] HALAKE; SHARMA; JAIN, Overview of Polyethylene Based Multi-layered Geomembrane Through Blown Extrusion Process.
[c] GEOSYNTHETIC INSTITUTE, GRI GM13: Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes.
[ci] LEÓN, Andrés; ZÚÑIGA, Daniel, Evaluating the integrity of HDPE geomembranes in high-stress heap leaching projects, **E3S Web of Conferences**, v. 569, p. 16001, 2024.
[cii] NAREJO; KOERNER; WILSON-FAHMY, Puncture Protection of Geomembranes Part II.
[ciii] XUE, Qiang *et al*, The Tension and Puncture Properties of HDPE Geomembrane under the Corrosion of Leachate, **Materials**, v. 6, n. 9, p. 4109–4121, 2013.
[civ] LAVOIE, Fernando Luiz *et al*, HDPE Geomembranes for Environmental Protection: Two Case Studies, **Sustainability**, v. 12, n. 20, p. 8682, 2020.
[cv] RARISON, Ramanambelina Faneva Mamambina *et al*, Properties of HDPE Geomembrane Exhumed 20 Years After Installation in a Mine Reclamation Cover System, **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 9, n. 1, p. 1, 2023.
[cvi] TOUZE-FOLTZ, Nathalie, Quantification of Diffusive Transfers in Multicomponent Geosynthetic Clay Liners, *in*: **Geo-Chicago 2016**, Chicago, Illinois: American Society of Civil Engineers, 2016, p. 59–68.

[cvii] RARISON *et al*, Properties of HDPE Geomembrane Exhumed 20 Years After Installation in a Mine Reclamation Cover System.
[cviii] DI BATTISTA, Vanessa; ROWE, R. Kerry, TCE and PCE diffusion through five geomembranes including two coextruded with an EVOH layer, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, n. 5, p. 655–666, 2020.
[cix] LEÓN; ZÚÑIGA, Evaluating the integrity of HDPE geomembranes in high-stress heap leaching projects.
[cx] KOERNER; WONG; KOERNER, Index Puncture Resistance of Geomembranes Using Various Protection Geosynthetics.
[cxi] NAREJO; KOERNER; WILSON-FAHMY, Puncture Protection of Geomembranes Part II.
[cxii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1593: Standard Specification for Nonrigid Vinyl Chloride Plastic Film and Sheeting.
[cxiii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5199: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.
[cxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D3767: Standard Practice for Rubber - Measurement of Dimensions.
[cxv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D792: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity of Plastics by Displacement.
[cxvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1505: Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique.
[cxvii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D297: Standard Test Methods for Rubber Products-Chemical Analysis.
[cxviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D3776: Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric.
[cxix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
[cxx] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D882: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting.
[cxxi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D751: Standard Test Methods for Coated Fabrics.
[cxxii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D3417: Standard Test Method for Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by DSC.
[cxxiii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D3418: Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by DSC.
[cxxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6370: Standard Test Method for Rubber-Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA).
[cxxv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM E1131: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.
[cxxvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D648: Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load.
[cxxvii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM E831: Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis.
[cxxviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1238: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.
[cxxix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D297: Standard Test Methods for Rubber Products-Chemical Analysis.
[cxxx] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D2240: Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness.
[cxxxi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D297: Standard Test Methods for Rubber Products-Chemical Analysis.
[cxxxii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D3421: Standard Practice for Extraction and Analysis of Plasticizer Mixtures from Vinyl Chloride Plastics.
[cxxxiii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D297: Standard Test Methods for Rubber Products-Chemical Analysis.
[cxxxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D3895: Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry.
[cxxxv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1603: Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics.
[cxxxvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5596: Standard Test Method for Microscopic Evaluation of the Dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics.
[cxxxvii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D3015: Standard Practice for Microscopical Examination

of Pigment Dispersion in Plastic Compounds.
[cxxxviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1004: Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting, 2013.
[cxxxix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D2263: Standard Test Method for Tearing Strength of Woven Fabrics.
[cxl] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D624: Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers.
[cxli] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5617: Standard Test Method for Multi-Axial Tension Test for Geosynthetics.
[cxlii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4833: Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products, 2013.
[cxliii] GENERAL SERVICES ADMINISTRATION, FTMS 101C: Federal Test Method Standard 101C - Puncture Resistance.
[cxliv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[cxlv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5262: Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Geosynthetics.
[cxlvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D696: Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics.
[cxlvii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1204: Standard Test Method for Linear Dimensional Changes of Nonrigid Thermoplastic Sheeting.
[cxlviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM E96: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.
cxlix *Ibid*.
[cl] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4437: Standard Test Method for Non-destructive Testing (NDT) for Determining the Integrity of Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes.
[cli] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6392: Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams.
[clii] GEOSYNTHETIC INSTITUTE, GRI GM19: Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Polyolefin Geomembranes.
[cliii] GEOSYNTHETIC INSTITUTE, GRI GM14: Selecting Variable Intervals for Taking Geomembrane Destructive Seam Samples.
[cliv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D460: Standard Test Methods for Sampling and Chemical Analysis of Soaps and Soap Products.
[clv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D2228: Standard Test Method for Rubber Property-Relative Abrasion Resistance.
[clvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1435: Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics.
[clvii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D573: Standard Test Method for Rubber-Deterioration in an Air Oven.
[clviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D794: Standard Practice for Determining Permanent Effect of Heat on Plastics.
[clix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5721: Standard Practice for Air-Oven Aging of Polyolefin Geomembranes.
[clx] ASTM INTERNATIONAL, ASTM G153: Standard Practice for Operating Enclosed Carbon Arc Light Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials.
[clxi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM G154: Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials.
[clxii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM G155: Standard Practice for Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials.
[clxiii] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, EPA 9090: Compatibility Test for Wastes and Membrane Liners.
[clxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5747: Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geomembranes to Liquids.
[clxv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5322: Standard Practice for Laboratory Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids.

[clxvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM G22: Standard Practice for Determining Resistance of Plastics to Bacteria.
[clxvii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM G21: Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi.
[clxviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1149: Standard Test Methods for Rubber Deterioration-Cracking in an Ozone Controlled Environment.
[clxix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1693: Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics.
[clxx] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5397: Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test.
[clxxi] DOVE, Joseph E.; FROST, J. David, Peak Friction Behavior of Smooth Geomembrane-Particle Interfaces, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, n. 7, p. 544–555, 1999.
[clxxii] DOVE, J.E.; FROST, J.D.; DOVE, P.M., Geomembrane Microtopography by Atomic Force Microscopy, **Geosynthetics International**, v. 3, n. 2, p. 227–245, 1996.
[clxxiii] DOVE; FROST, Peak Friction Behavior of Smooth Geomembrane-Particle Interfaces.
clxxiv *Ibid*.
[clxxv] YESILLER, N; CEKIC, A, Determination of Surface and Thickness Characteristics of Textured Geomembranes Using Image Analysis, **Geotechnical Testing Journal**, v. 28, n. 3, p. 275–287, 2005.
[clxxvi] HEBELER, G; FROST, J; MYERS, A, Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane-geotextile systems, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 1, p. 77–105, 2005.
[clxxvii] XU, Gaojie; SHI, Jianyong; LI, Yan, Change pattern of geomembrane surface roughness for geotextile/textured geomembrane interfaces, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 51, n. 1, p. 88–99, 2023.
[clxxviii] DOVE; FROST; DOVE, Geomembrane Microtopography by Atomic Force Microscopy.
[clxxix] DOVE; FROST, Peak Friction Behavior of Smooth Geomembrane-Particle Interfaces.
[clxxx] XU; SHI; LI, Change pattern of geomembrane surface roughness for geotextile/textured geomembrane interfaces.
[clxxxi] HEBELER; FROST; MYERS, Quantifying hook and loop interaction in textured geomembrane–geotextile systems.
[clxxxii] YESILLER; CEKIC, Determination of Surface and Thickness Characteristics of Textured Geomembranes Using Image Analysis.
[clxxxiii] DING, Zezhao *et al*, Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications: Manufacturing and structural design, **Composites Communications**, v. 25, p. 100481, 2021.
[clxxxiv] LIN, Jia-Horng *et al*, Applications of geotextiles made of PET-filament-based nonwoven fabrics, **Fibers and Polymers**, v. 17, n. 11, p. 1955–1962, 2016.
[clxxxv] LIN, Jia Horng *et al*, Effects of Needle-Punch Depth on Properties of PET/LPET/Kevlar Nonwoven Geotextiles, **Advanced Materials Research**, v. 910, p. 266–269, 2014.
[clxxxvi] LIN *et al*, Applications of geotextiles made of PET-filament-based nonwoven fabrics.
[clxxxvii] LIN *et al*, Effects of Needle-Punch Depth on Properties of PET/LPET/Kevlar Nonwoven Geotextiles.
[clxxxviii] LIN *et al*, Applications of geotextiles made of PET-filament-based nonwoven fabrics.
clxxxix *Ibid*.
[cxc] WOJTASIK, Dariusz, An analysis of physical, hydraulic and mechanic properties of nonwoven needle-punched geotextiles, **Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation**, v. 40, n. 1, p. 115–123, 2008.
[cxci] LIN *et al*, Effects of Needle-Punch Depth on Properties of PET/LPET/Kevlar Nonwoven Geotextiles.
[cxcii] LI, Jia-Hsun *et al*, Mechanical properties of needle-punched/thermally treated non-woven fabrics produced from recycled materials, **The Journal of The Textile Institute**, v. 112, n. 1, p. 23–29, 2021.
[cxciii] HWANG, Gin-Shing *et al*, Manufacturing effects on the hydraulic properties of needlepunched nonwoven geotextiles, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 16, n. 6, p. 355–363, 1998.
[cxciv] FRANCO, Yara Barbosa *et al*, Accelerated Aging Ultraviolet of a PET Nonwoven Geotextile and Thermoanalytical Evaluation, **Materials**, v. 15, n. 12, p. 4157, 2022.
[cxcv] *Ibid*.
[cxcvi] VALENTIN, Clever Aparecido *et al*, Study of the Ultraviolet Effect and Thermal Analysis on Polypropylene Nonwoven Geotextile, **Materials**, v. 14, n. 5, p. 1080, 2021.
[cxcvii] DING, Zezhao *et al*, Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications: Manufacturing and structural design, **Composites Communications**, v. 25, p. 100481, 2021.
[cxcviii] SCHOLZ, Philipp *et al*, Investigation on the Durability of a Polypropylene Geotextile under Artificial Aging Scenarios, **Sustainability**, v. 16, n. 9, p. 3559, 2024.

cxcix *Ibid*.
[cc] CARNEIRO, José Ricardo; LOPES, Maria De Lurdes, Weathering of a Nonwoven Polypropylene Geotextile: Field vs. Laboratory Exposure, **Materials**, v. 15, n. 22, p. 8216, 2022.
[cci] VALENTIN *et al*, Study of the Ultraviolet Effect and Thermal Analysis on Polypropylene Nonwoven Geotextile.
[ccii] DING *et al*, Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications.
[cciii] VALENTIN *et al*, Study of the Ultraviolet Effect and Thermal Analysis on Polypropylene Nonwoven Geotextile.
[cciv] DING *et al*, Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications.
[ccv] VALENTIN *et al*, Study of the Ultraviolet Effect and Thermal Analysis on Polypropylene Nonwoven Geotextile.
[ccvi] DING *et al*, Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications.
[ccvii] VALENTIN *et al*, Study of the Ultraviolet Effect and Thermal Analysis on Polypropylene Nonwoven Geotextile.
[ccviii] KOERNER, George R.; KOERNER, Robert M., Puncture resistance of polyester (PET) and polypropylene (PP) needle-punched nonwoven geotextiles, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, n. 3, p. 360–362, 2011.
[ccix] DING *et al*, Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications.
[ccx] CARNEIRO; LOPES, Weathering of a Nonwoven Polypropylene Geotextile.
[ccxi] VALENTIN *et al*, Study of the Ultraviolet Effect and Thermal Analysis on Polypropylene Nonwoven Geotextile.
[ccxii] JIE, Soon Yuan *et al*, Characterizing the Tensile Behaviour of Woven and Composite Fabrics under UV Exposure, **Applied Sciences**, v. 12, n. 22, p. 11440, 2022.
[ccxiii] SCHOLZ, Philipp *et al*, Environmental Impact of Geosynthetics in Coastal Protection, **Materials**, v. 14, n. 3, p. 634, 2021.
[ccxiv] VALENTIN *et al*, Study of the Ultraviolet Effect and Thermal Analysis on Polypropylene Nonwoven Geotextile.
[ccxv] SCHOLZ *et al*, Environmental Impact of Geosynthetics in Coastal Protection.
[ccxvi] KOERNER; KOERNER, Puncture resistance of polyester (PET) and polypropylene (PP) needle-punched nonwoven geotextiles.
[ccxvii] CARNEIRO; LOPES, Weathering of a Nonwoven Polypropylene Geotextile.
[ccxviii] DING *et al*, Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications.
[ccxix] BULUT, Abdulkadir; SENGUL, Tayfun, Investigation of the Dewatering Process with Geotextile Tubes by Sedimentation, One- and Two-Dimensional Filtration Test Methods, **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 50, n. 3, p. 2091–2108, 2025.
[ccxx] KOERNER; KOERNER, Puncture resistance of polyester (PET) and polypropylene (PP) needle-punched nonwoven geotextiles.
[ccxxi] KANDPAL, L.; VANGLA, P., New insights into geotribology of non-dilative interfaces from novel experimental studies, **Geosynthetics International**, v. 31, n. 5, p. 524–540, 2024.
[ccxxii] ABDELAAL, F.B.; SOLANKI, R., Effect of geotextile ageing and geomembrane surface roughness on the geomembrane-geotextile interfaces for heap leaching applications, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 50, n. 1, p. 55–68, 2022.
ccxxiii *Ibid*.
[ccxxiv] ÖZER, A. Tolga; AKAY, Onur, Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofoam, **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 4, p. 04015156, 2016.
[ccxxv] ABDELAAL; SOLANKI, Effect of geotextile ageing and geomembrane surface roughness on the geomembrane-geotextile interfaces for heap leaching applications.
ccxxvi *Ibid*.
[ccxxvii] KANDPAL; VANGLA, New insights into geotribology of non-dilative interfaces from novel experimental studies.
[ccxxviii] ABDELAAL; SOLANKI, Effect of geotextile ageing and geomembrane surface roughness on the geomembrane-geotextile interfaces for heap leaching applications.
[ccxxix] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.
[ccxxx] KANDPAL; VANGLA, New insights into geotribology of non-dilative interfaces from novel experimental studies.
[ccxxxi] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.

[ccxxxii] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[ccxxxiii] JOTISANKASA, Apiniti; RURGCHAISRI, Natthapat, Shear strength of interfaces between unsaturated soils and composite geotextile with polyester yarn reinforcement, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 46, n. 3, p. 338–353, 2018.
[ccxxxiv] *Ibid*.
[ccxxxv] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[ccxxxvi] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.
[ccxxxvii] KANDPAL; VANGLA, New insights into geotribology of non-dilative interfaces from novel experimental studies.
[ccxxxviii] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[ccxxxix] KANDPAL; VANGLA, New insights into geotribology of non-dilative interfaces from novel experimental studies.
[ccxl] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.
[ccxli] XU; SHI; LI, Change pattern of geomembrane surface roughness for geotextile/textured geomembrane interfaces.
[ccxlii] FERREIRA, Fernanda Bessa *et al*, Time-Dependent Response of a Recycled C&D Material-Geotextile Interface under Direct Shear Mode, **Materials**, v. 14, n. 11, p. 3070, 2021.
[ccxliii] XIAO, Shuxiong; DAMIANS, Ivan P.; HU, Wei, A Review of the Soil–Geosynthetic Interface Direct Shear Test and Numerical Modelling, **Buildings**, v. 16, n. 1, p. 43, 2025.
[ccxliv] MULUTI, Shade Sitwala *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing, **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 9, n. 3, p. 33, 2023.
[ccxlv] FERREIRA *et al*, Time-Dependent Response of a Recycled C&D Material-Geotextile Interface under Direct Shear Mode.
[ccxlvi] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[ccxlvii] FERREIRA *et al*, Time-Dependent Response of a Recycled C&D Material-Geotextile Interface under Direct Shear Mode.
[ccxlviii] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[ccxlix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[ccl] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.
[ccli] PAOLO PAVANELLO; PAOLO CARRUBBA; NICOLA MORACI, Evaluation of geosynthetic interface friction at low normal stress: comparison between two different test procedures, **ACTA SCIENTIARUM POLONORUM - Architectura Budownictwo**, v. 21, n. 4, 2023.
[cclii] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[ccliii] CAZZUFFI, Daniele *et al*, A REVIEW OF DIRECT SHEAR AND INCLINED PLANE TESTS RESULTS FOR DIFFERENT INTERFACES IN LANDFILL CAPPING, **Detritus**, n. 20, p. 100–111, 2022.
[ccliv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[cclv] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.
[cclvi] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[cclvii] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.
[cclviii] FERREIRA *et al*, Time-Dependent Response of a Recycled C&D Material-Geotextile Interface under Direct Shear Mode.
[cclix] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[cclx] PAOLO PAVANELLO; PAOLO CARRUBBA; NICOLA MORACI, Evaluation of geosynthetic interface friction at low normal stress.
[cclxi] PAVANELLO, Paolo; CARRUBBA, Paolo; MORACI, Nicola, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress: Two Approaches with Increasing Shear Loading, **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, p. 1065, 2022.
[cclxii] PADADE, A. H.; MANDAL, J. N., Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam, **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 1, p. 66–71, 2014.

[cclxiii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[cclxiv] PAOLO PAVANELLO; PAOLO CARRUBBA; NICOLA MORACI, Evaluation of geosynthetic interface friction at low normal stress.
[cclxv] LIU, Zhanlei *et al*, Strength Characteristics of a Smooth HDPE Geomembrane/Nonwoven Geotextile Interface Based on a Novel Ring Shear Apparatus, **Polymers**, v. 15, n. 11, p. 2497, 2023.
[cclxvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[cclxvii] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.
[cclxviii] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[cclxix] XU; SHI; LI, Change pattern of geomembrane surface roughness for geotextile/textured geomembrane interfaces.
[cclxx] CAZZUFFI *et al*, A REVIEW OF DIRECT SHEAR AND INCLINED PLANE TESTS RESULTS FOR DIFFERENT INTERFACES IN LANDFILL CAPPING.
[cclxxi] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[cclxxii] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN ISO 12957-2: Geosynthetics -Determination of friction characteristics - Part 2: Inclined plane test.
[cclxxiii] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress.
[cclxxiv] PAOLO PAVANELLO; PAOLO CARRUBBA; NICOLA MORACI, Evaluation of geosynthetic interface friction at low normal stress.
[cclxxv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[cclxxvi] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 12957-1: Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 1: Direct shear test, 2018.
[cclxxvii] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.
[cclxxviii] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[cclxxix] BACAS; CAÑIZAL; KONIETZKY, Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces.
[cclxxx] XU; SHI; LI, Change pattern of geomembrane surface roughness for geotextile/textured geomembrane interfaces.
[cclxxxi] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[cclxxxii] CAZZUFFI *et al*, A REVIEW OF DIRECT SHEAR AND INCLINED PLANE TESTS RESULTS FOR DIFFERENT INTERFACES IN LANDFILL CAPPING.
[cclxxxiii] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress.
[cclxxxiv] PAOLO PAVANELLO; PAOLO CARRUBBA; NICOLA MORACI, Evaluation of geosynthetic interface friction at low normal stress.
[cclxxxv] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[cclxxxvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[cclxxxvii] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 12957-1: Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 1: Direct shear test.
[cclxxxviii] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN ISO 12957-2: Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 2: Inclined plane test.
[cclxxxix] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress.
[ccxc] PAOLO PAVANELLO; PAOLO CARRUBBA; NICOLA MORACI, Evaluation of geosynthetic interface friction at low normal stress.
[ccxci] XIAO; DAMIANS; HU, A Review of the Soil–Geosynthetic Interface Direct Shear Test and Numerical Modelling.
[ccxcii] CAZZUFFI *et al*, A REVIEW OF DIRECT SHEAR AND INCLINED PLANE TESTS RESULTS FOR DIFFERENT INTERFACES IN LANDFILL CAPPING.
[ccxciii] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress.
[ccxciv] FERREIRA *et al*, Time-Dependent Response of a Recycled C&D Material-Geotextile Interface under Direct Shear Mode.

[ccxcv] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[ccxcvi] TRIPLETT, Eric J.; FOX, Patrick J., Shear Strength of HDPE Geomembrane/Geosynthetic Clay Liner Interfaces, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 6, p. 543–552, 2001.
[ccxcvii] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[ccxcviii] TRIPLETT; FOX, Shear Strength of HDPE Geomembrane/Geosynthetic Clay Liner Interfaces.
ccxcix *Ibid*.
[ccc] *Ibid*.
[ccci] LIU *et al*, Strength Characteristics of a Smooth HDPE Geomembrane/Nonwoven Geotextile Interface Based on a Novel Ring Shear Apparatus.
[cccii] LI *et al*, Mechanical properties of needle-punched/thermally treated non-woven fabrics produced from recycled materials.
[ccciii] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[ccciv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[cccv] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 12957-1: Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 1: Direct shear test.
[cccvi] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress.
[cccvii] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[cccviii] FERREIRA *et al*, Time-Dependent Response of a Recycled C&D Material-Geotextile Interface under Direct Shear Mode.
[cccix] LIU *et al*, Strength Characteristics of a Smooth HDPE Geomembrane/Nonwoven Geotextile Interface Based on a Novel Ring Shear Apparatus.
[cccx] LI *et al*, Mechanical properties of needle-punched/thermally treated non-woven fabrics produced from recycled materials.
cccxi *Ibid*.
[cccxii] CHIU, P.; FOX, P. J., Internal and interface shear strengths of unreinforced and needle-punched geosynthetic clay liners, **Geosynthetics International**, v. 11, n. 3, p. 176–199, 2004.
[cccxiii] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN ISO 12957-2: Geosynthetics -Determination of friction characteristics - Part 2: Inclined plane test.
[cccxiv] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress.
[cccxv] PAVANELLO, P.; CARRUBBA, P.; MORACI, N., The characterisation of geosynthetic interface friction by means of the inclined plane test, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 49, n. 1, p. 257–275, 2021.
[cccxvi] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress.
[cccxvii] PAOLO PAVANELLO; PAOLO CARRUBBA; NICOLA MORACI, Evaluation of geosynthetic interface friction at low normal stress.
[cccxviii] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress.
cccxix *Ibid*.
[cccxx] FERREIRA *et al*, Time-Dependent Response of a Recycled C&D Material-Geotextile Interface under Direct Shear Mode.
[cccxxi] MULUTI *et al*, Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing.
[cccxxii] LIN, J. *et al*, GMX/GDC strength loss mechanisms, **Geosynthetics International**, v. 31, n. 6, p. 824–834, 2024.
[cccxxiii] LIU *et al*, Strength Characteristics of a Smooth HDPE Geomembrane/Nonwoven Geotextile Interface Based on a Novel Ring Shear Apparatus.
[cccxxiv] LIN *et al*, GMX/GDC strength loss mechanisms.
[cccxxv] PAOLO PAVANELLO; PAOLO CARRUBBA; NICOLA MORACI, Evaluation of geosynthetic interface friction at low normal stress.
[cccxxvi] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, The characterisation of geosynthetic interface friction by means of the inclined plane test.
[cccxxvii] PAVANELLO; CARRUBBA; MORACI, Geosynthetic Interface Friction at Low Normal Stress.
[cccxxviii] CERATO, Ab; LUTENEGGER, Aj, Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands, **Geotechnical Testing Journal**, v. 29, n. 6, p. 507–516, 2006.

[cccxxix] WASTI, Y, Geomembrane–geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 19, n. 1, p. 45–57, 2001.
[cccxxx] WANG, J.; GUTIERREZ, M., Discrete element simulations of direct shear specimen scale effects, **Géotechnique**, v. 60, n. 5, p. 395–409, 2010.
[cccxxxi] ZHOU, Jie *et al*, Cemented soil-soil interface shear strength evaluation II: Roughness impact and quantitatively practical model based on RQD, **Rock Mechanics Bulletin**, p. 100270, 2025.
[cccxxxii] KHAN, Rizwan; LATHA, Gali Madhavi, Multi-scale understanding of sand-geosynthetic interface shear response through Micro-CT and shear band analysis, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 51, n. 3, p. 437–453, 2023.
[cccxxxiii] WASTI, Geomembrane–geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests.
[cccxxxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[cccxxxv] BANYHUSSAN, Qais S.; HASSAN, Hanan A.; HAMAD, Badr A., Investigation of Shear Strength of Subbase-Subgrade Interface with Geosynthetics Reinforcement Utilizing A Large-Scale Direct Shear Test, **E3S Web of Conferences**, v. 427, p. 03007, 2023.
[cccxxxvi] ZHOU *et al*, Cemented soil-soil interface shear strength evaluation II.
[cccxxxvii] WASTI, Geomembrane–geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests.
[cccxxxviii] CERATO; LUTENEGGER, Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands.
[cccxxxix] ZHOU *et al*, Cemented soil-soil interface shear strength evaluation II.
[cccxl] WANG; GUTIERREZ, Discrete element simulations of direct shear specimen scale effects.
[cccxli] WASTI, Geomembrane–geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests.
[cccxlii] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam. [cccxliii] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam. [cccxliv] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam. cccxlv *Ibid*.
[cccxlvi] ZHOU *et al*, Cemented soil-soil interface shear strength evaluation II.
[cccxlvii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5321: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
[cccxlviii] BANYHUSSAN; HASSAN; HAMAD, Investigation of Shear Strength of Subbase-Subgrade Interface with Geosynthetics Reinforcement Utilizing A Large-Scale Direct Shear Test.
[cccxlix] ZHOU *et al*, Cemented soil-soil interface shear strength evaluation II.
[cccl] CERATO; LUTENEGGER, Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands.
[cccli] WASTI, Geomembrane–geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests.
[ccclii] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam. [cccliii] WANG; GUTIERREZ, Discrete element simulations of direct shear specimen scale effects. [cccliv] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[ccclv] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[ccclvi] LI, Yuhang *et al*, Monotonic and Cyclic Shear Behaviors of EPS Geofoam: Experiments and Hypoplastic Modeling, **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 50, n. 4, p. 2060–2077, 2026.
[ccclvii] ZOU, Weilie *et al*, Stress-strain responses of EPS geofoam upon cyclic simple shearing: Experimental investigations and constitutive modeling, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 53, n. 1, p. 350–364, 2025.
[ccclviii] ÖZER; AKAY, Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofoam.
[ccclix] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[ccclx] ATMATZIDIS, Dimitrios K; MISSIRLIS, Emmanuel G; THEODORAKOPOULOS, Elias B, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.
ccclxi *Ibid*.
[ccclxii] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[ccclxiii] LI *et al*, Monotonic and Cyclic Shear Behaviors of EPS Geofoam.
[ccclxiv] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[ccclxv] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.
[ccclxvi] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.

[cclxvii] ÖZER; AKAY, Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofoam. [cclxviii] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam. [cclxix] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[cclxx] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[cclxxi] LI *et al*, Monotonic and Cyclic Shear Behaviors of EPS Geofoam.
[cclxxii] ZOU *et al*, Stress-strain responses of EPS geofoam upon cyclic simple shearing.
[cclxxiii] NETO, José O.A.; BUENO, Benedito S., Laboratory Research on EPS Blocks Used in Geotechnical Engineering, **Soils and Rocks**, v. 35, n. 2, p. 169–180, 2012.
[cclxxiv] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[cclxxv] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[cclxxvi] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.
[cclxxvii] ÖZER; AKAY, Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofoam.
[cclxxviii] ZOU *et al*, Stress-strain responses of EPS geofoam upon cyclic simple shearing.
[cclxxix] LI *et al*, Monotonic and Cyclic Shear Behaviors of EPS Geofoam.
[cclxxx] ZOU *et al*, Stress-strain responses of EPS geofoam upon cyclic simple shearing.
[cclxxxi] GE, Qi *et al*, Experimental Studies for Shear and Multi-Impact Resistance Performance of Sand–Geofoam Material, **Buildings**, v. 12, n. 5, p. 633, 2022.
[cclxxxii] LI *et al*, Monotonic and Cyclic Shear Behaviors of EPS Geofoam.
[cclxxxiii] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[cclxxxiv] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[cclxxxv] XENAKI, V.C.; ATHANASOPOULOS, G.A., Experimental Investigation of the Interaction Mechanism at the EPS Geofoam-Sand Interface by Direct Shear Testing, **Geosynthetics International**, v. 8, n. 6, p. 471–499, 2001.
[cclxxxvi] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.
[cclxxxvii] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
cclxxxviii *Ibid*.
[cclxxxix] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[cccxc] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[cccxci] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[cccxcii] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.
cccxciii *Ibid*.
cccxciv *Ibid*.
[cccxcv] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[cccxcvi] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
cccxcvii *Ibid*.
[cccxcviii] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.
[cccxcix] FOWMES, Gary John *et al*, Rapid prototyping of geosynthetic interfaces: Investigation of peak strength using direct shear tests, **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, n. 6, p. 674–687, 2017.
[cd] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[cdi] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.
[cdii] MEGUID; KHAN, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems.
[cdiii] XENAKI; ATHANASOPOULOS, Experimental Investigation of the Interaction Mechanism at the EPS Geofoam-Sand Interface by Direct Shear Testing.
[cdiv] LIN, J.; STARK, T. D.; IDRIES, A., Extrapolating residual GMX/GDC interface strength from direct shear tests, **Geosynthetics International**, v. 31, n. 6, p. 1011–1021, 2024.
[cdv] GILBERT, R.B.; BYRNE, R.J., Strain-Softening Behavior of Waste Containment System Interfaces, **Geosynthetics International**, v. 3, n. 2, p. 181–203, 1996.

[cdvi] FERREIRA, F. B.; VIEIRA, C. S.; LOPES, M. L., Direct shear behaviour of residual soil–geosynthetic interfaces – influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type, **Geosynthetics International**, v. 22, n. 3, p. 257–272, 2015.
[cdvii] KHAN; LATHA, Multi-scale understanding of sand-geosynthetic interface shear response through Micro-CT and shear band analysis.
[cdviii] LIU *et al*, Strength Characteristics of a Smooth HDPE Geomembrane/Nonwoven Geotextile Interface Based on a Novel Ring Shear Apparatus.
[cdix] LIN *et al*, GMX/GDC strength loss mechanisms.
[cdx] LIU *et al*, Strength Characteristics of a Smooth HDPE Geomembrane/Nonwoven Geotextile Interface Based on a Novel Ring Shear Apparatus.
[cdxi] GILBERT, R.B.; BYRNE, R.J., Strain-Softening Behavior of Waste Containment System Interfaces, **Geosynthetics International**, v. 3, n. 2, p. 181–203, 1996.
[cdxii] THIEL, R., Selection of long-term shear strength parameters for strain softening geosynthetic interfaces (Rowe lecture), *in*: BIONDI, Giovanni *et al* (Eds.), **Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet**, 1. ed. London: CRC Press, 2023, p. 70–102.
cdxiii *Ibid.*
[cdxiv] CHANG, Ji-Yun; FENG, Shi-Jin, A constitutive model for geosynthetic interfaces considering nonlinear softening behavior, **Computers and Geotechnics**, v. 143, p. 104633, 2022.
[cdxv] GILBERT; BYRNE, Strain-Softening Behavior of Waste Containment System Interfaces.
[cdxvi] FERREIRA, Fernanda; VIEIRA, Castorina; DE LURDES LOPES, Maria, Cyclic and Post-cyclic Shear Behaviour of a Granite Residual Soil – Geogrid Interface, **Procedia Engineering**, v. 143, p. 379–386, 2016.
[cdxvii] FERREIRA; VIEIRA; LOPES, Direct shear behaviour of residual soil–geosynthetic interfaces – influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type.
[cdxviii] HOU, Juan; XING, Xing; BENSON, Craig H., Thermo-Hydro-Mechanical Shear Behavior of Interfaces between a Textured Geomembrane and Geosynthetic Clay Liner, *in*: **Geo-Congress 2023**, Los Angeles, California: American Society of Civil Engineers, 2023, p. 545–553.
[cdxix] HE, Pengfei *et al*, Experimental study on the effect of freeze-thaw cycles on the shear characteristics of frozen soil-composite geotextile interface, **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 54, p. 104011, 2024.
[cdxx] GILBERT; BYRNE, Strain-Softening Behavior of Waste Containment System Interfaces.
[cdxxi] THIEL, Selection of long-term shear strength parameters for strain softening geosynthetic interfaces (Rowe lecture).
[cdxxii] LIU *et al*, Strength Characteristics of a Smooth HDPE Geomembrane/Nonwoven Geotextile Interface Based on a Novel Ring Shear Apparatus.
[cdxxiii] GILBERT; BYRNE, Strain-Softening Behavior of Waste Containment System Interfaces.
[cdxxiv] THIEL, Selection of long-term shear strength parameters for strain softening geosynthetic interfaces (Rowe lecture).
[cdxxv] CHANG; FENG, A constitutive model for geosynthetic interfaces considering nonlinear softening behavior.
[cdxxvi] LIN; STARK; IDRIES, Extrapolating residual GMX/GDC interface strength from direct shear tests.
[cdxxvii] THIEL, Selection of long-term shear strength parameters for strain softening geosynthetic interfaces (Rowe lecture).
[cdxxviii] KHAN; LATHA, Multi-scale understanding of sand-geosynthetic interface shear response through Micro-CT and shear band analysis.
[cdxxix] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 12957-1: Geossintéticos - Determinação das características de atrito - Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto, 2013.
[cdxxx] CHUN *et al*, Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests.
[cdxxxi] ABDELRAHMAN, G.E. *et al*, Small-Strain Stress-Strain Properties of Expanded Polystyrene Geofoam, **Soils and Foundations**, v. 48, n. 1, p. 61–71, 2008.
[cdxxxii] KHALAJ *et al*, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS).
cdxxxiii *Ibid*. cdxxxiv *Ibid*. cdxxxv *Ibid*.
[cdxxxvi] SOHRABVEISEH; YOUSEFI, Ali A., Compressive behavior and thermal conductivity-density correlation of expanded polystyrene thermal insulators, **Iranian Polymer Journal**, v. 30, n. 8, p. 849–854, 2021.
[cdxxxvii] CHUN *et al*, Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests.
[cdxxxviii] ABDELRAHMAN *et al*, Small-Strain Stress-Strain Properties of Expanded Polystyrene Geofoam.
[cdxxxix] KHALAJ *et al*, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS).

[cdxl] GHAZAVI; ARAEI; AZADNOUR, Dynamic properties of geofoam (EPS) from dry to fully saturated conditions.
cdxli *Ibid.*
cdxlii *Ibid.*
[cdxliii] ABDELRAHMAN *et al*, Small-Strain Stress-Strain Properties of Expanded Polystyrene Geofoam.
cdxliv *Ibid.*
[cdxlv] CHUN *et al*, Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests.
[cdxlvi] RAMLI SULONG, Nor Hafizah; MUSTAPA, Siti Aisyah Syaerah; ABDUL RASHID, Muhammad Khairi, Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review, **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 20, p. 47529, 2019.
cdxlvii *Ibid.* cdxlviii *Ibid*. cdxlix *Ibid*. [cdl] *Ibid*. [cdli] *Ibid*. cdlii *Ibid.*
[cdliii] SOHRABVEISEH; YOUSEFI, Compressive behavior and thermal conductivity-density correlation of expanded polystyrene thermal insulators.
[cdliv] SIMPSON, A *et al*, Thermal conductivity and conditioning of grey expanded polystyrene foams, **Cellular Polymers**, v. 39, n. 6, p. 238–262, 2020.
[cdlv] CHUN *et al*, Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests.
[cdlvi] ABDELRAHMAN *et al*, Small-Strain Stress-Strain Properties of Expanded Polystyrene Geofoam.
[cdlvii] KHALAJ *et al*, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS).
cdlviii *Ibid*.
[cdlix] SOHRABVEISEH; YOUSEFI, Compressive behavior and thermal conductivity-density correlation of expanded polystyrene thermal insulators.
[cdlx] CHUN *et al*, Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests.
[cdlxi] ABDELRAHMAN *et al*, Small-Strain Stress-Strain Properties of Expanded Polystyrene Geofoam.
[cdlxii] KHALAJ *et al*, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS).
[cdlxiii] GHAZAVI; ARAEI; AZADNOUR, Dynamic properties of geofoam (EPS) from dry to fully saturated conditions.
[cdlxiv] ABDELRAHMAN *et al*, Small-Strain Stress-Strain Properties of Expanded Polystyrene Geofoam.
cdlxv *Ibid.*
[cdlxvi] CHUN *et al*, Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests.
[cdlxvii] RAMLI SULONG; MUSTAPA; ABDUL RASHID, Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions.
cdlxviii *Ibid*.
cdlxix *Ibid*.
cdlxx *Ibid*.
cdlxxi *Ibid*.
[cdlxxii] SOHRABVEISEH; YOUSEFI, Compressive behavior and thermal conductivity-density correlation of expanded polystyrene thermal insulators.
[cdlxxiii] SIMPSON *et al*, Thermal conductivity and conditioning of grey expanded polystyrene foams.
[cdlxxiv] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 11949: Poliestireno expandido - EPS - Determinação da massa específica aparente.
[cdlxxv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1622: Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics.
[cdlxxvi] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 1602: Thermal insulating products for building applications - Determination of the apparent density.
[cdlxxvii] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 8082: Poliestireno expandido - EPS - Determinação da resistência à compressão.
[cdlxxviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1621: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics.
[cdlxxix] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 826: Thermal insulating

products for building applications - Determination of compression behaviour.
[cdlxxx] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6817: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam.
[cdlxxxi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM C203-05a(2017): Standard Test Methods for Breaking Load and Flexural Properties of Block-Type Thermal Insulation, 2017.
[cdlxxxii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1623: Standard Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics.
[cdlxxxiii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D732: Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool.
[cdlxxxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM C273: Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials.
[cdlxxxv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D732: Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool.
[cdlxxxvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1621: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics.
[cdlxxxvii] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 826: Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour.
[cdlxxxviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6817: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam.
[cdlxxxix] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 12094: Poliestireno expandido - EPS - Determinação da condutividade térmica.
[cdxc] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 12667: Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance.
[cdxci] BUREAU OF INDIAN STANDARDS, IS 3346: Method for the determination of thermal conductivity of thermal insulation materials.
[cdxcii] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 10456: Building materials and products - Hygrothermal properties.
[cdxciii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM C518-21: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, 2021, c. 518.
[cdxciv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D696: Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics.
[cdxcv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D2126: Standard Test Method for Response of Rigid Cellular Plastics to Thermal and Humid Aging.
[cdxcvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1603: Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics.
[cdxcvii] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 7973: Poliestireno expandido - EPS - Determinação da absorção de água.
[cdxcviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM C272: Standard Test Method for Water Absorption of Core Materials for Sandwich Constructions.
[cdxcix] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 12087: Thermal insulating products for building applications - Determination of long term water absorption by immersion.
[d] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 8081: Poliestireno expandido - EPS - Determinação da permeabilidade ao vapor d'água.
[di] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 12086: Thermal insulating products for building applications - Determination of water vapour transmission properties.
[dii] *Ibid.*
[diii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM E96: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.
[div] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D2863: Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-Like Combustion of Plastics (Oxygen Index).
[dv] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 11948: Poliestireno expandido - EPS - Determinação da classe de reação ao fogo.
[dvi] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 13501-1: Fire classification of construction products and building elements.
[dvii] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 354: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room.

[dviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM C1338: Standard Test Method for Determining Fungi Resistance of Insulation Materials and Facings.
[dix] JUNIOR; DA [UNESP, Avaliação da resistência de interface entre geomembranas e diferentes geossintéticos.
[dx] *Ibid*.
[dxi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5199: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.
[dxii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5994: Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembrane, 2015.
[dxiii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D7466: Standard Test Method for Measuring the Asperity Height of Textured Geomembrane, 2015.
[dxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6693: Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes, 2015.
[dxv] *Ibid*.
[dxvi] *Ibid*.
dxvii *Ibid*.
[dxviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4833: Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products.
[dxix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D1004: Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting.
[dxx] JUNIOR; DA [UNESP, Avaliação da resistência de interface entre geomembranas e diferentes geossintéticos.
[dxxi] OBER S/A INDÚSTRIA E COMÉRCIO, **GeoFort — Geotêxtil Poliéster — Linha GH — 100% Poliéster**, Nova Odessa: Ober Geossintéticos, 2021.
dxxii *Ibid*.
[dxxiii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5261: Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles.
[dxxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5199: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.
[dxxv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4595: Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method.
dxxvi *Ibid*.
[dxxvii] ASTM D4595.
[dxxviii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4595: Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method.
[dxxix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4833: Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products.
[dxxx] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 12236: Geossintéticos - Ensaio de puncionamento estático (ensaio CBR).
[dxxxi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4533: Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles.
dxxxii *Ibid*.
[dxxxiii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6767: Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test.
[dxxxiv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4491: Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity.
dxxxv *Ibid*.
[dxxxvi] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4355: Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc-Type Apparatus.
[dxxxvii] OBER S/A INDÚSTRIA E COMÉRCIO, **GeoFort — Geotêxtil Poliéster — Linha GH — 100% Poliéster**.
dxxxviii *Ibid*.
[dxxxix] OBER S/A INDÚSTRIA E COMÉRCIO, **GeoFort: geotêxtil não tecido de polipropileno — Linha GF. Catálogo técnico**, Nova Odessa: Ober Geossintéticos, 2021.
[dxl] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5261: Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles.
[dxli] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D5199: Standard Test Method for Measuring the Nominal

Thickness of Geosynthetics.
[dxlii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4595: Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method.
dxliii *Ibid*.
dxliv *Ibid*.
[dxlv] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4833: Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products.
[dxlvi] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 12236: Geossintéticos - Ensaio de puncionamento estático (ensaio CBR).
[dxlvii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4533: Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles.
dxlviii *Ibid*.
[dxlix] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D6767: Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test.
[dl] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4491: Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity.
[dli] *Ibid*.
[dlii] ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4355: Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc-Type Apparatus.
[dliii] OBER S/A INDÚSTRIA E COMÉRCIO, **GeoFort: geotêxtil não tecido de polipropileno — Linha GF. Catálogo técnico**.
[dliv] *Ibid*.
[dlv] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 12236: Geossintéticos - Ensaio de puncionamento estático (ensaio CBR).
[dlvi] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 10319: Geossintéticos - Ensaio de tração faixa larga.
[dlvii] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 12956: Geossintéticos - Determinação da abertura característica.
[dlviii] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 12957-1: Geossintéticos - Determinação das características de atrito - Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto.
[dlix] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[dlx] ÖZER; AKAY, Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofoam.
[dlxi] BEJU; MANDAL, Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam.
[dlxii] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[dlxiii] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.
dlxiv *Ibid*.
[dlxv] SHEELEY, Michael; NEGUSSEY, Dawit, An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior, *in*: **Soft Ground Technology**, Noordwijkerhout, the Netherlands: American Society of Civil Engineers, 2001, p. 292–303.
[dlxvi] NEGUSSEY, D; ANASTHAS, N; SRIRAJAN, S, INTERFACE FRICTION PROPERTIES OF EPS GEOFOAM.
[dlxvii] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[dlxviii] CHRYSIKOS, D. A.; ATMATZIDIS, D.K.; MISSIRLIS, E.G., EPS geofoam surface shear resistance, **Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics (8 ICG)**, 2006.
[dlxix] AVESANI NETO, José Orlando, **Caracterização do comportamento geotécnico do EPS através de ensaios mecânicos e hidráulicos**, Mestrado em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
[dlxx] ÖZER; AKAY, Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofoam.
[dlxxi] AVESANI NETO, **Caracterização do comportamento geotécnico do EPS através de ensaios mecânicos e hidráulicos**.
[dlxxii] PADADE; MANDAL, Interface strength behavior of expanded polystyrene EPS geofoam.
[dlxxiii] AVESANI NETO, **Caracterização do comportamento geotécnico do EPS através de ensaios mecânicos e hidráulicos**.
[dlxxiv] KHAN; MEGUID, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam.
[dlxxv] CHRYSIKOS; ATMATZIDIS; MISSIRLIS, EPS geofoam surface shear resistance.

[dlxxvi] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.

dlxxvii *Ibid.*

[dlxxviii] SHEELEY; NEGUSSEY, An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior.

[dlxxix] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.

[dlxxx] GARCIA, A.J.S., AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO, 2023.

[dlxxxi] SHEELEY; NEGUSSEY, An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior.

[dlxxxii] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.

[dlxxxiii] GARCIA, AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.

[dlxxxiv] SHEELEY; NEGUSSEY, An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior.

[dlxxxv] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.

dlxxxvi *Ibid*.

dlxxxvii *Ibid*.

[dlxxxviii] CHRYSIKOS; ATMATZIDIS; MISSIRLIS, EPS geofoam surface shear resistance.

[dlxxxix] GARCIA, AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.

[dxc] KOERNER; KOERNER, Puncture resistance of polyester (PET) and polypropylene (PP) needle-punched nonwoven geotextiles.

[dxci] GARCIA, AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.

[dxcii] SHEELEY; NEGUSSEY, An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior.

[dxciii] CHRYSIKOS; ATMATZIDIS; MISSIRLIS, EPS geofoam surface shear resistance.

dxciv *Ibid.*

[dxcv] GARCIA, AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.

dxcvi *Ibid.*

dxcvii *Ibid*.

[dxcviii] SHEELEY; NEGUSSEY, An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior.

dxcix *Ibid.*

[dc] GARCIA, AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.

[dci] *Ibid.*

[dcii] SHEELEY; NEGUSSEY, An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior.

[dciii] VIANA, Laura Aline Nogueira, AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO EM DIFERENTES INTERFACES.

[dciv] *Ibid*. [dcv] *Ibid*. [dcvi] *Ibid*. dcvii *Ibid*. dcviii *Ibid*. [dcix] *Ibid*.

[dcx] ATMATZIDIS; MISSIRLIS; THEODORAKOPOULOS, SHEAR RESISTANCE ON EPS GEOFOAM BLOCK SURFACES.

[dcxi] *Ibid*. dcxii *Ibid*. dcxiii *Ibid*. dcxiv *Ibid*.

[dcxv] GILBERT; BYRNE, Strain-Softening Behavior of Waste Containment System Interfaces.

[dcxvi] LIN *et al*, GMX/GDC strength loss mechanisms.

[dcxvii] GILBERT; BYRNE, Strain-Softening Behavior of Waste Containment System Interfaces.

[dcxviii] THIEL, Selection of long-term shear strength parameters for strain softening geosynthetic interfaces (Rowe lecture).