



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

**ANA JÚLIA DA SILVA GARCIA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO  
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE  
GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO  
DIRETO**

Bauru  
2023



**ANA JÚLIA DA SILVA GARCIA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO  
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE  
GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO  
DIRETO**

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: Prof. Dr. Paulo César Lodi

Bauru  
2023



G216a Garcia, Ana Júlia da Silva  
Avaliação da resistência ao cisalhamento do poliestireno expandido (EPS) com interfaces de geomembranas por meio do ensaio de cisalhamento direto / Ana Júlia da Silva Garcia. -- Bauru, 2023  
71 p. : il., tabs., fotos

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

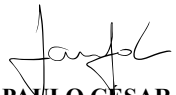
1. resistência de interface. 2. poliestireno expandido. 3. geomembranas poliméricas lisas e texturizadas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ANA JÚLIA DA SILVA GARCIA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 20 dias do mês de outubro do ano de 2023, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ANA JÚLIA DA SILVA GARCIA, intitulada **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COM INTERFACES DE GEOMEMBRANAS POR MEIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO**. 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 / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, 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 pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final:     **APROVADA**    . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



PROF. PAULO CÉSAR LODI

*Aos meus pais Rosana e Claudinei (em memória),  
Pela força, amor e carinho ao longo dos anos.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Prof. Dr. Paulo César Lodi, pela confiança e orientação, sem os quais esse trabalho não seria possível.

Ao grupo de pesquisa, aos discentes de iniciação científica, aos técnicos do laboratório, aos discentes e docentes da Geotecnia e ao departamento de pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), que fizeram parte deste caminho.

À minha banca pelas contribuições neste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e reitoria da Unesp, pelo auxílio financeiro.

À minha família e amigos, pelo incentivo, companheirismo e apoio, e todos aqueles que de alguma forma contribuíram.

À Deus, por tudo.

## RESUMO

GARCIA, A. J. S. (2023) **Avaliação da resistência ao cisalhamento do poliestireno expandido (EPS) com interfaces de geomembranas por meio do ensaio de cisalhamento direto**. Bauru, 71 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Este trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface (adesão e ângulo de atrito), resultantes das envoltórias de resistência de pico e pós-pico e do comportamento tensão-deslocamento em diferentes configurações de interface entre o poliestireno expandido (EPS) e geomembranas poliméricas por meio de ensaios de cisalhamento direto. Esse estudo é fundamental principalmente para a análise de viabilidade do uso de blocos de EPS em obras geotécnicas e no estudo de suas aplicações. Para tanto, foi elaborada uma análise comparativa entre as tensões, a massa específica, a adesão e o ângulo de atrito das interfaces, e uma posterior comparação com os dados da literatura existente. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto de dimensão padrão (caixa de 100x100 mm) com a utilização de 2 materiais geotécnicos diferentes: EPS em cinco massas específicas (10, 14,5, 18, 28 e 33,5 kg/m<sup>3</sup>) e três tipos de geomembranas de PEAD (polietileno de alta densidade): uma lisa e duas texturizadas com espessura de 1,5 mm de núcleo, sendo as texturizadas de face dupla. Os principais resultados mostram que os valores obtidos para tensão de pico e pós-pico variaram entre 24° e 35° e de 15° a 34° para a geomembrana texturizada; 16° e 20° e de 7° a 18° para a geomembrana lisa, para tensão de pico e pós-pico, respectivamente; todos com valores nulos de adesão. A resistência ao cisalhamento na interface EPS-Geomembrana aumentou com a massa específica, exceto para a geomembrana lisa. O melhor desempenho em termos de resistência foi obtido para a interface com geomembrana texturizada de matriz balão seguida da matriz plana. Em comparação com a literatura, os valores obtidos foram validados, complementando a caracterização existente.

**Palavras-chave:** resistência de interface, poliestireno expandido, geomembranas poliméricas lisas e texturizadas.

## ABSTRACT

GARCIA, A. J. S. (2023) **Evaluation of interface shear strength between expanded polystyrene (EPS) blocks and geomembranes using direct shear test**. Bauru, 71 p. Dissertation (Master Degree) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

This work aims to evaluate the interface shear resistance parameters (adhesion and friction angle), resulting from the peak and post-peak resistance envelopes and the stress-displacement behavior in different interface configurations between expanded polystyrene (EPS) and polymeric geomembranes. through direct shear tests. This study is fundamental mainly for analyzing the feasibility of using EPS blocks in geotechnical works and studying their applications. To this end, a comparative analysis was carried out between the tensions, specific mass, adhesion and friction angle of the interfaces, and a subsequent comparison with data from existing literature. Standard dimension direct shear tests (100x100 mm box) were carried out using 2 different geotechnical materials: EPS in five specific masses (10, 14.5, 18, 28 and 33.5 kg/m<sup>3</sup>) and three types of HDPE (high-density polyethylene) geomembranes: one smooth and two textured with a core thickness of 1.5 mm, the textured ones being double-sided. The main results show that the values obtained for peak and post-peak stress varied between 24° and 35° and from 15° to 34° for the textured geomembrane; 16° and 20° and from 7° to 18° for the smooth geomembrane, for peak and post-peak stress, respectively; all with zero membership fees. The shear strength at the EPS-Geomembrane interface increased with density, except for the smooth geomembrane. The best performance in terms of resistance was obtained for the interface with balloon matrix textured geomembrane followed by flat matrix. In comparison with the literature, the values obtained were validated, complementing the existing characterization.

**Keywords:** interface resistance, expanded polystyrene, smooth and textured polymeric geomembranes.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Tipos de documentos publicados (SCOPUS, 2023) .....	4
Figura 3.2 - Documentos por área do conhecimento (SCOPUS, 2023) .....	5
Figura 3.3 - Quantidade de documentos por países (SCOPUS, 2023) .....	5
Figura 3.4 - Quantidade de documentos por ano e principais periódicos.....	6
Figura 3.5 - Quantidade de documentos pelos principais autores .....	6
Figura 3.6 – Quantidade de pesquisas realizadas na interface de EPS com diferentes materiais .....	7
Figura 3.7 – Quantidade de publicações por ano dos estudos na interface do EPS com os materiais: geomembrana, geotêxtil, solo arenoso e solo argiloso .....	8
Figura 3.8 – Quantidade de publicações na interface do EPS (com massas específicas diferentes) e os quatro materiais geotécnicos selecionados.....	8
Figura 3.9 – Aplicações com EPS em: (a) construção de rodovias sobre solos moles; (b) tubulações e estruturas enterradas; (c) estabilização de taludes; (d) paisagismo e telhados verdes; (e) preenchimento e aterro em muros de contenção .....	10
Figura 3.10 - Envoltória fragmentada da interface areia-EPS10.....	22
Figura 3.11 - Envoltória fragmentada da interface areia-EPS20.....	23
Figura 3.12 – Estrutura conceitual para as três fases de interação na interface EPS/solo arenoso: (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.....	23
Figura 3.13 - Marcas da penetração de partículas de duas areias diferentes (S1 e S3, sendo a primeira mais angular e com um índice de vazios menor e a segunda uma areia britada com arestas angulares) na superfície do EPS30 com tensões normais mais baixas (7 kPa) e mais altas (27 kPa).....	25
Figura 4.1 – Geomembranas de polietileno de alta densidade .....	29
Figura 4.2 – Representação de amostras de ensaio em aparelho de cisalhamento único ....	31
Figura 4.3 - Materiais utilizados para a montagem do corpo de prova: (a) materiais para o ensaio da interface EPS/Geomembrana; (b) exemplo da montagem do corpo de prova para ensaio da interface EPS/Geomembrana.....	31
Figura 4.4 - Aparelho de cisalhamento direto .....	31
Figura 5.1 – Curvas tensão-deslocamento e envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 10 \text{ kg/m}^3$ ).....	33

Figura 5.2 - Curvas tensão-deslocamento e envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 14,5 \text{ kg/m}^3$ ).....	33
Figura 5.3 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 18 \text{ kg/m}^3$ ) .....	33
Figura 5.4 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 28 \text{ kg/m}^3$ ) .....	34
Figura 5.5 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 33,5 \text{ kg/m}^3$ ) .....	34
Figura 5.6 - Envoltórias de resistência de pico e pós-pico na interface EPS/Geomembrana texturizada de matriz plana.....	35
Figura 5.7 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 10 \text{ kg/m}^3$ ) .....	36
Figura 5.8 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 14,5 \text{ kg/m}^3$ ) .....	36
Figura 5.9 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 18 \text{ kg/m}^3$ ) .....	37
Figura 5.10 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 28 \text{ kg/m}^3$ ) .....	37
Figura 5.11 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 33,5 \text{ kg/m}^3$ ) .....	37
Figura 5.12 - Envoltórias de resistência de pico e pós-pico na interface EPS/Geomembrana texturizada de matriz balão.....	38
Figura 5.13 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 10 \text{ kg/m}^3$ ) .....	39
Figura 5.14 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 14,5 \text{ kg/m}^3$ ) .....	40
Figura 5.15 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 18 \text{ kg/m}^3$ ) .....	40
Figura 5.16 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 28 \text{ kg/m}^3$ ) .....	40
Figura 5.17 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 33,5 \text{ kg/m}^3$ ) .....	41
Figura 5.18 - Envoltórias de resistência de pico e pós-pico na interface EPS/Geomembrana lisa.....	42

Figura 5.19 - Comparação dos valores de ângulo de atrito <i>versus</i> a massa específica para tensões de pico.....	44
Figura 5.20 - Comparação das envoltórias (na interface EPS/geomembrana texturizada) presentes na literatura com as deste estudo .....	49
Figura 5.21 - Comparação das envoltórias (na interface EPS/geomembrana lisa) presentes na literatura com as deste estudo .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo das principais propriedades das geomembranas.....	15
Tabela 3.2 - Resumo dos dados de ensaio da interface de GBR-P com EPS contidos na literatura.....	16
Tabela 3.3 – Resumo das principais propriedades físicas dos geotêxteis .....	18
Tabela 3.4 - Resumo dos dados de ensaios de cisalhamento da interface de GTX com EPS contidos na literatura .....	19
Tabela 3.5 - Resumo dos dados de ensaios de cisalhamento da interface de solo arenoso com EPS contidos na literatura.....	21
Tabela 3.6 - Resumo dos ensaios de cisalhamento da interface de solo argiloso com o EPS contidos na literatura .....	26
Tabela 4.1 – Síntese da pesquisa .....	28
Tabela 4.2 – Características dos materiais.....	28
Tabela 4.3 – Nomenclaturas dos geossintéticos utilizados.....	29
Tabela 4.4 – Propriedades das geomembranas.....	29
Tabela 4.5 – Resumo das propriedades dos blocos de EPS .....	30
Tabela 5.1 - Valores da resistência ao cisalhamento dos ensaios na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MP.....	32
Tabela 5.2 - Valores de adesão e ângulo de atrito para a interface EPS/Geomembrana texturizada de matriz plana.....	34
Tabela 5.3 - Valores da resistência ao cisalhamento dos ensaios na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB .....	36
Tabela 5.4 - Valores de adesão e ângulo de atrito para a interface EPS/Geomembrana texturizada de matriz balão.....	38
Tabela 5.5 - Valores da resistência ao cisalhamento dos ensaios na interface EPS/GBR-P PEAD lisa.....	39
Tabela 5.6 - Valores de adesão e ângulo de atrito para a interface EPS/Geomembrana lisa .....	41
Tabela 5.7 – Comparação dos resultados deste estudo com a literatura da interface EPS/GBR-P TXT.....	46
Tabela 5.8 – Comparação dos resultados deste estudo com a literatura da interface EPS/GBR-P lisa.....	47

Tabela 5.9 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas aos valores dos parâmetros de resistência de interface.....	54
Tabela 5.10 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas aos efeitos da tensão normal na resistência de interface .....	55
Tabela 5.11 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas aos efeitos da rugosidade e tipo de polímero na resistência de interface .....	55
Tabela 5.12 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas ao comportamento tensão-deformação.....	56
Tabela 5.13 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas aos efeitos da massa específica na resistência de interface .....	56

**LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
EPS	Poliestireno expandido
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
FPP	Polipropileno flexível
GBR-P	Geomembrana polimérica
GTX	Geotêxtil
GTX-K	Geotêxtil tricotado
GTX-NW	Geotêxtil não tecido
GTX-W	Geotêxtil tecido
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
NBR	Norma Brasileira
PEAD	Poliétileno de alta densidade
PEBDL	Poliétileno de baixa densidade linear
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila
UNESP	Universidade Estadual Paulista

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$\delta_h$	Deslocamento horizontal
$\varepsilon$	Deformação
$\sigma$	Tensão normal
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\mu$	Coefficiente de atrito
$\phi$	Ângulo de atrito
$c_a$	Adesão
$c$	Coesão
$\rho$	Massa específica
$\gamma$	Peso específico
$e$	Índice de vazios
$w$	Teor de umidade
$D_{50}$	Tamanho médio de partículas
$C_u$	Coefficiente de uniformidade
$C_c$	Coefficiente de curvatura

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>II</b>
<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
3.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA.....	4
3.2 REVISÃO DA LITERATURA .....	9
3.2.1 <i>Interface EPS-Geomembrana</i> .....	14
3.2.2 <i>Interface EPS-Geotêxtil</i> .....	17
3.2.3 <i>Interface EPS-Solo arenoso</i> .....	20
3.2.4 <i>Interface EPS-Solo argiloso</i> .....	25
3.2.5 <i>Considerações</i> .....	26
<b>4 MATERIAIS E MÉTODO.....</b>	<b>28</b>
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	28
4.2 MÉTODO DA PESQUISA .....	30
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
5.1 ENVOLTÓRIAS E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DA INTERFACE EPS/GEOMEMBRANA.....	32
5.1.1 <i>Interface do EPS com Geomembrana texturizada de matriz plana</i> .....	32
5.1.2 <i>Interface do EPS com Geomembrana texturizada de matriz balão</i> .....	35
5.1.3 <i>Interface do EPS com Geomembrana lisa</i> .....	39
5.2 DISCUSSÕES.....	42
5.2.1 <i>Ensaio de cisalhamento direto de interface</i> .....	42
5.2.2 <i>Validação e comparação com a literatura</i> .....	45
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>



## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O geoexpandido (*geofom* do inglês) é um geossintético na forma prismática (retangular) cujo polímero básico é o EPS (poliestireno expandido) que vem ganhando espaço considerável nos últimos anos em aplicações geotécnicas. Seu estudo começou a partir da década 1960 na Noruega em aplicações de aterros sobre solos moles e, desde então, apesar de seu estudo já ser bastante explorado por sua versatilidade e alta capacidade de isolamento térmica e acústica, bem como sua aplicação na engenharia civil (chapas, placas, aplicações em pisos e lajes, *etc.*), tem-se tornado uma opção interessante dentro do meio geotécnico (TRANDAFIR; BARTLETT; LINGWALL, 2010). Isso ocorre por conta de seu baixo peso específico (15 a 40 kg/m<sup>3</sup>), alta resistência à compressão (70 a 250 kPa), baixa compressibilidade (módulo de elasticidade de 1 a 11 MPa) e rapidez na execução da obra (JAFARI, 2010; STARK *et al.*, 2012; BARTLETT *et al.*, 2015; CARNEIRO NETO, 2019; BORSATTO, 2020).

As principais aplicações geotécnicas do geoexpandido estão concentradas na construção de estradas sobre solos com baixa capacidade de suporte, aterros leves rodoviários, (REFSDAL, 1985; NORWEGIAN ROAD RESEARCH LABORATORY, 1992; STARK *et al.*, 2004; AVESANI NETO, 2008; MARRADI *et al.*, 2012), proteção de tubulações e estruturas enterradas (VASLESTAD, 1990; ROH *et al.*, 2000; YANG e YONGXING, 2005; ZHANG *et al.*, 2006; SUN *et al.*, 2009; JAFARI, 2010; MCGUIGAN e VALSANGKAR, 2011; BARTLETT *et al.*, 2015; MEGUID *et al.*, 2017; ABDELSALAM *et al.*, 2019), estabilização de taludes (JUTKOFISKY; SUNG; NEGUSSEY, 2000; SHEELEY, 2000; SRIRAJAN, 2001; NEGUSSEY, 2002; MARRADI *et al.*, 2012), muros de contenção no geral (ABDELSALAM *et al.*, 2017; XIE *et al.*, 2020; DING *et al.*, 2021), encontro de pontes e bases de pavimentos (ROLLINS *et al.*, 2017; ROLLINS *et al.*, 2019), amortecimento sísmico (XENAKI e ATHANASOPOULOS, 2001; HORVATH, 2001, 2008), dentre outras (STARK *et al.*, 2012; MOHAJERANI *et al.*, 2017).

Assim, o geoexpandido tem se mostrado muito útil para buscar soluções técnicas na engenharia. Em um aterro convencional existe uma certa tensão de superfície que pode ser diminuída com a introdução de blocos na estrutura do aterro, o que permite reduzir os esforços verticais. Com relação aos esforços horizontais, em estruturas como cabeceiras de pontes e muros de arrimo, o sistema com geoexpandido elimina as forças horizontais que atuam sobre esses elementos, que podem, dessa forma, apresentar dimensões menores. Como estes elementos prismáticos interagem entre si, torna-se importante a avaliação de sua

resistência de interface seja entre os próprios blocos ou com outros materiais geossintéticos (geomembranas e geotêxteis) e/ou solos. O EPS pode estar sujeito ao cisalhamento externo no contato (junta) entre blocos de EPS ou entre o EPS e demais interfaces (SHEELEY, 2000; SHEELEY e NEGUSSEY, 2000; ATMATZIDIS *et al.*, 2001, NEGUSSEY *et al.*, 2001; BARRETT e VALSANGKAR, 2008). Assim, é importante aprofundar a análise das características e parâmetros referentes a ensaios de cisalhamento direto de interface.

A resistência de interface é um fator importante para a análise das aplicações do geoexpandido, pois além das estruturas estarem sujeitas a solicitações horizontais (ação do vento e sobrecargas acidentais), e assim submetidas a esforços de cisalhamento, os geossintéticos (geomembranas e geotêxteis) também são utilizadas na maioria das aplicações como proteção tanto química como de impermeabilização e podem colocar a estrutura em situação de instabilidade (AVESANI NETO, 2008). Segundo Horvath (2001) existe uma lacuna significativa na literatura para valores de atrito de interface nos blocos de EPS com outros materiais.

Um aspecto que não foi considerado ao analisar blocos de EPS com outros materiais por alguns pesquisadores (SHEELEY e NEGUSSEY, 2000; HORVATH, 2001; ÖZER e AKAY, 2016; AVESANI NETO, 2008; CARNEIRO NETO, 2019; BORSATTO, 2020) foi a caracterização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface do EPS com amostras distintas e a análise das máximas tensões (tensões de pico) na interface do EPS com outros materiais.

Verifica-se que a grande maioria das pesquisas relacionadas ao geoexpandido estão no contexto internacional, em particular, em aplicações de aterros sobre solos moles (WILLIAMS e SNOWDON, 1990; DUSKOV, 1991; NEGUSSEY *et al.*, 2001), encontros de pontes e viadutos (MCDONALD e BROWN, 1993; NEGUSSEY e SUN, 1996; ABU-HEJLEH *et al.*, 2003; ATHANASOPOULOS *et al.*, 2007; HORVATH, 2008) e bases de pavimentos (REFSDAL, 1985; AABOE, 1987; MAGNAN e SERRATRICE, 1989; FRYDENLUND, 1991; SKUGGEDAL e AABOE, 1991; DUSKOV, 1998; AABOE, 2000; ZOU *et al.*, 2000). Outros autores avaliaram o comportamento mecânico do material em diferentes situações (FRYDENLUND e AABOE, 1996; HORVATH, 1997; ZOU e LEO, 1998; ATHANASOPOULOS *et al.*, 1999; ATMATZIDIS *et al.*, 2001; ELRAGI, 2006; STARK *et al.*, 2012).

No Brasil, poucas pesquisas foram desenvolvidas até o presente momento. Algumas abordam aspectos gerais de propriedades do geoexpandido. Avesani Neto (2008) estudou as propriedades hidráulicas e mecânicas do EPS e sugeriu a complementação do estudo da

resistência ao cisalhamento de interface com a quantificação do ângulo de atrito de interface do EPS com outros materiais (geotêxteis, geomembranas, solo, *etc.*) e a análise de valores intermediários de massa específica entre 20 e 30 kg/m<sup>3</sup> e acima destas. Carneiro Neto (2019) avaliou diversas propriedades do EPS em contato com hidrocarboneto (vapor de gasolina) e agentes intempéricos (radiação solar, vento, precipitação, *etc.*). Borsatto (2020) apresenta um estudo de diversas propriedades do EPS inclusive de resistência ao cisalhamento. No entanto, em termos de resistência ao cisalhamento, essa pesquisa apresenta apenas resultados de interfaces EPS/EPS e do corpo de prova como um todo. Não foram abordadas outras interfaces.

Nesse sentido, essa pesquisa visa estudar a resistência de interface do geoexpandido em diferentes massas específicas com geomembranas poliméricas lisas e texturizadas de forma a avaliar e fomentar o comportamento tensão *versus* deslocamento dos materiais bem como dos parâmetros de resistência (adesão e atrito de interface).

## **2 OBJETIVO**

Avaliar a resistência ao cisalhamento na interface de blocos de poliestireno expandido (EPS) em diferentes massas específicas com geomembranas lisas e texturizadas por meio do ensaio de cisalhamento direto.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

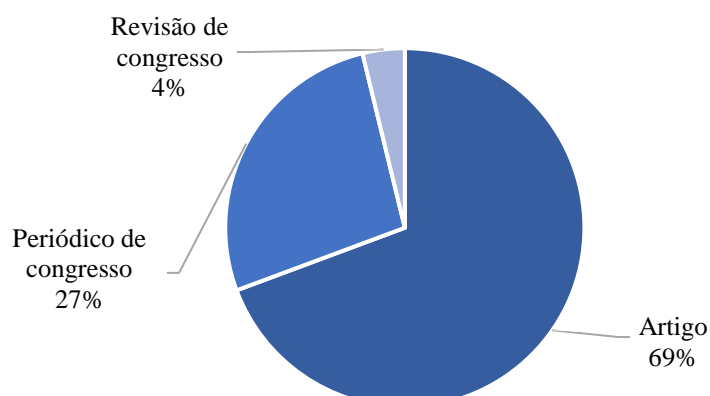
#### 3.1 Revisão bibliométrica

Para uma melhor compreensão dos aspectos relativos à avaliação da resistência ao cisalhamento e do cenário atual do assunto é necessário que se faça algumas considerações iniciais acerca dos materiais e parâmetros utilizados para a pesquisa, portanto o presente capítulo apresenta uma revisão bibliométrica para a implementação e análise dos resultados do ensaio de cisalhamento direto abordado.

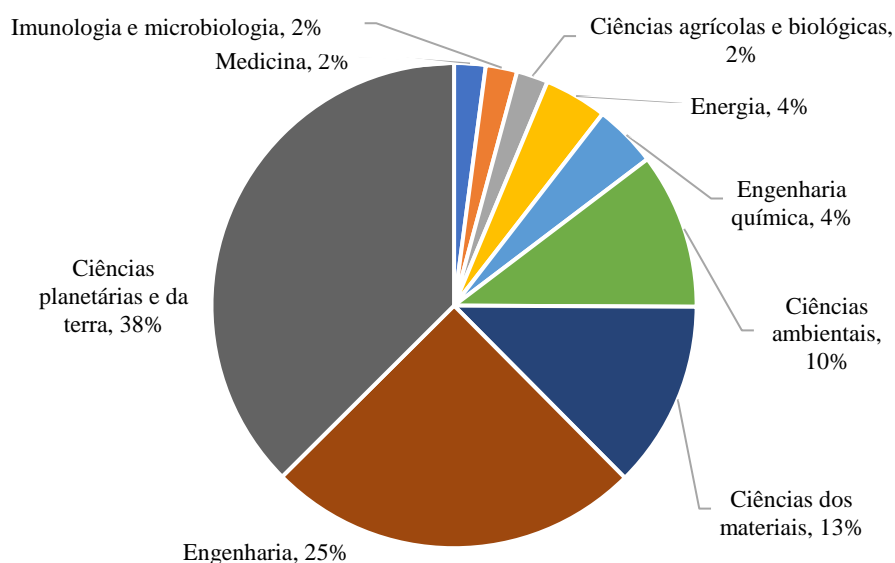
A elaboração da revisão bibliográfica foi feita por meio de uma pesquisa nas bases de dados SCOPUS, Web of Science e Science Direct, relacionada ao poliestireno expandido e resistência ao cisalhamento de interface, por meio de palavras-chave (*geof foam or “expanded polystyrene” or EPS and “interface shear strength” or “interface shear” or “interface friction”*). Foram encontrados 26, 19 e 90 artigos como resultado, respectivamente, porém apenas 27 artigos foram relevantes para a pesquisa, selecionados a partir de seus resumos, e desses apenas 22 foram publicados nos últimos 10 anos. Outros artigos também foram encontrados aleatoriamente em outras bases de dados, como acervos de trabalhos acadêmicos e livros.

Da base de dados SCOPUS foram retirados alguns gráficos para obter algumas informações e avaliar o cenário da pesquisa. A Figura 3.1 apresenta os tipos de documentos publicados, a Figura 3.2 os documentos por área do conhecimento e a Figura 3.3 a quantidade de documentos por países.

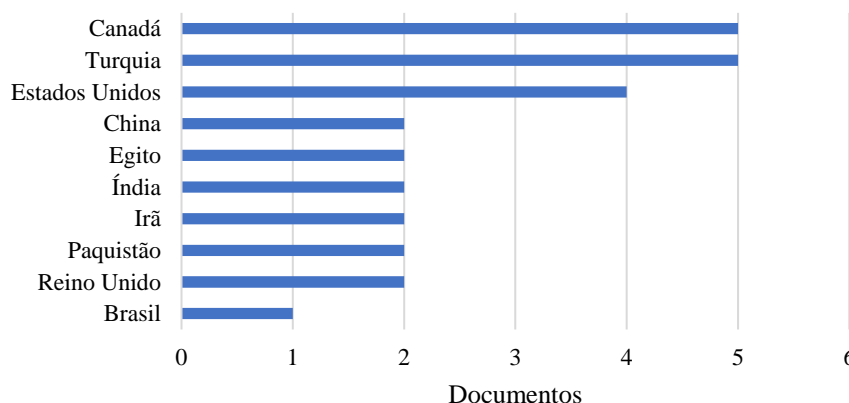
Figura 3.1 - Tipos de documentos publicados (SCOPUS, 2023)



**Figura 3.2 - Documentos por área do conhecimento (SCOPUS, 2023)**



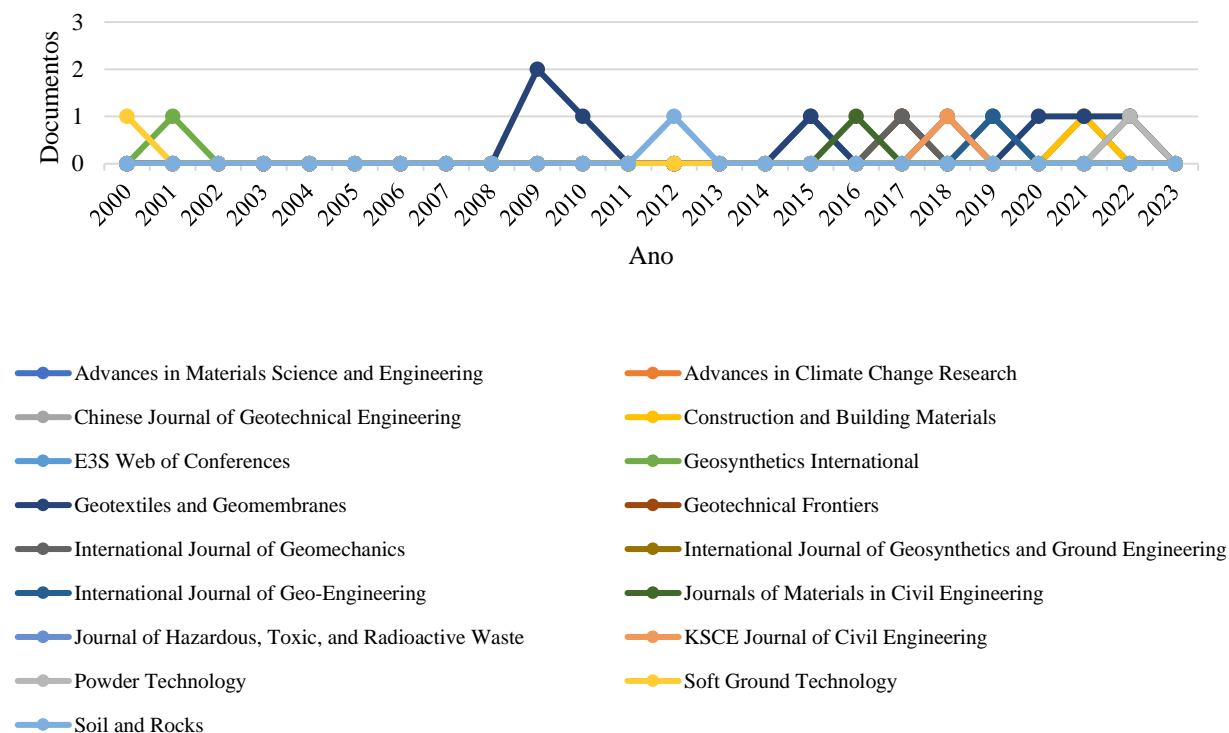
**Figura 3.3 - Quantidade de documentos por países (SCOPUS, 2023)**



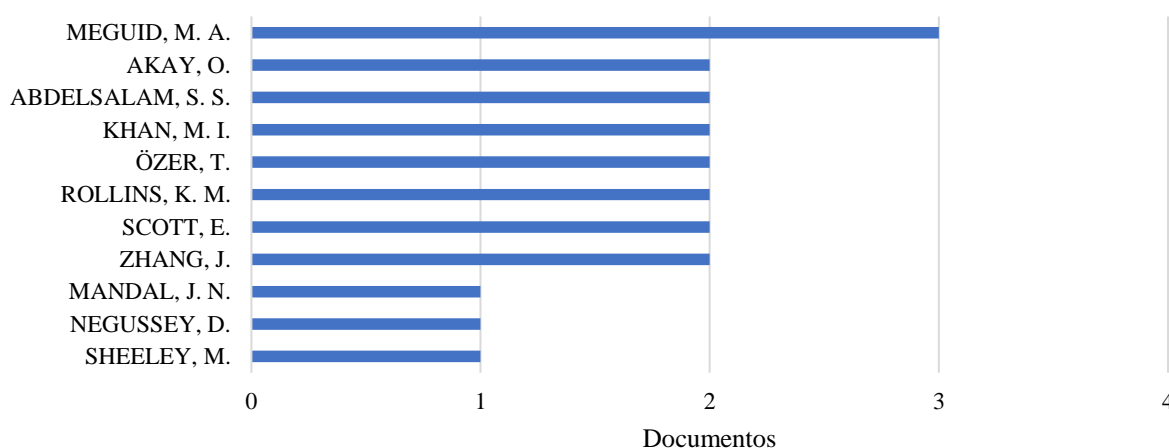
Desses gráficos, infere-se que a maioria das publicações estão em formato de artigos de revistas, sendo 69% de todos os documentos, e seguidos dos periódicos de congressos com 27%, grande parte dessas pesquisas estão relacionadas com a área do conhecimento de Ciências planetárias e da terra, com 38%, seguida da Engenharia com 25%, Ciências dos materiais com 13%, e Ciências ambientais com 10%, totalizando em 86% de todos os documentos encontrados nesta base. Os países com mais publicações são o Canadá e a Turquia, seguidos dos Estados Unidos, e deixando o Brasil na décima posição, evidenciando a importância da pesquisa para contribuição no cenário nacional, principalmente para conhecimento dos materiais que são disponibilizados comercialmente, nos projetos com aplicações que utilizam o material e conhecimento do seu comportamento.

Dos 27 documentos selecionados foram feitos outros gráficos a fim de se aprofundar mais na pesquisa. A Figura 3.4 apresenta a quantidade de publicações e seus principais periódicos em todos os anos encontrados e a Figura 3.5 a quantidade de publicações pelos principais autores.

**Figura 3.4 - Quantidade de documentos por ano e principais periódicos**



**Figura 3.5 - Quantidade de documentos pelos principais autores**

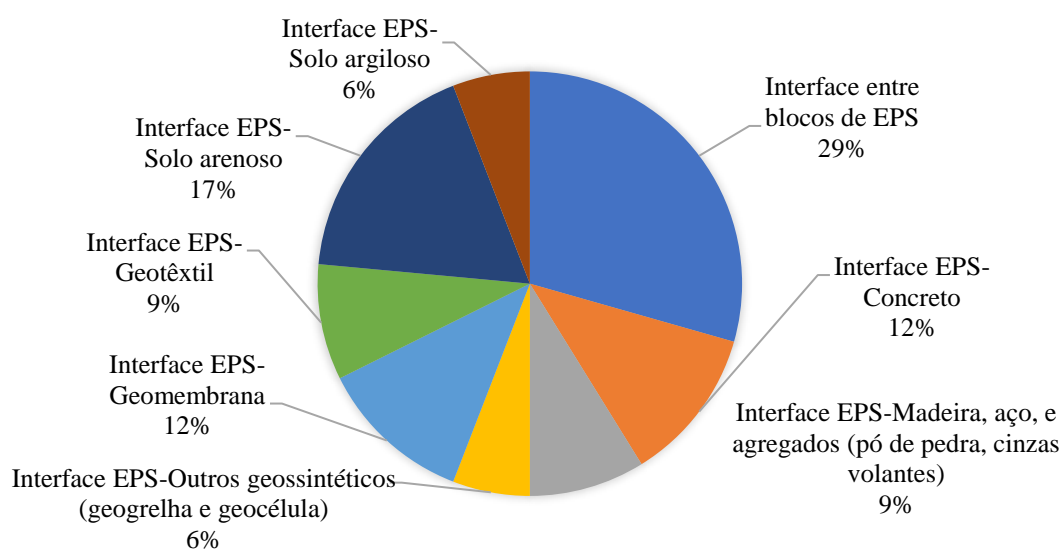


O periódico que teve mais publicações ao longo dos anos foi “*Geotextiles and Geomembranes*”, sendo o principal no assunto, e seguido de “*Construction and Building Materials*”, “*Geosynthetics International*” e “*Journals of Materials in Civil Engineering*”,

com a mesma quantidade de publicações, e o principal autor foi Meguid, seguido de Akay, AbdelSalam, Khan, Özer, Rollins, Scott e Zhang.

Com a seleção de documentos relacionados com resistência de interface do EPS foi possível obter uma visão geral do assunto. A literatura vem avaliando os parâmetros de resistência de interface, principalmente para calibração de modelos numéricos, caracterização do comportamento do material e o estudo das suas aplicações. A Figura 3.6 apresenta um resumo das pesquisas que realizaram ensaios de interface com a utilização do EPS e diferentes materiais.

**Figura 3.6 – Quantidade de pesquisas realizadas na interface de EPS com diferentes materiais**

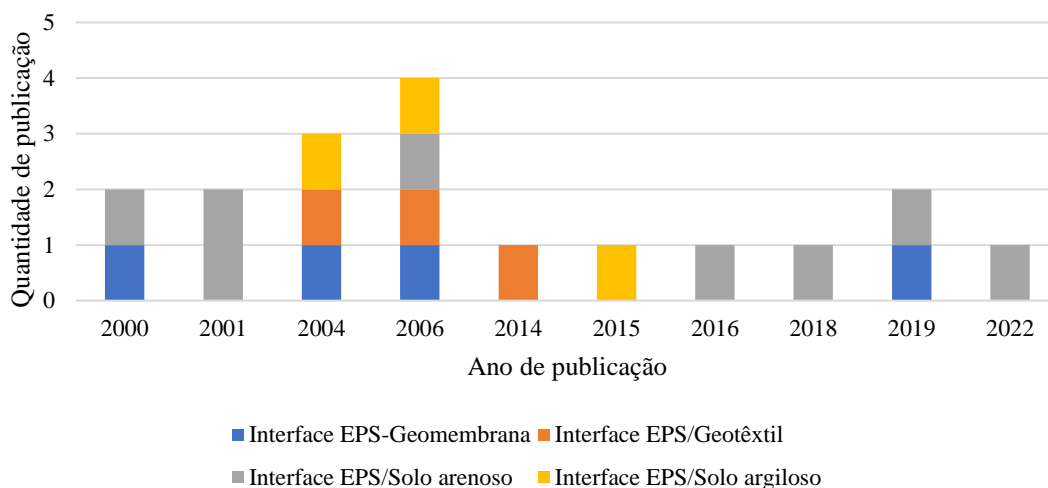


Dessas pesquisas encontradas, 29% realizaram ensaios em interface entre blocos, 12% com concreto, 9% com madeira, aço e alguns agregados (como pó de pedra e cinzas volantes), 6% com outros geossintéticos (como geogrelha e geocélula), 12% com geomembrana, 9% com geotêxtil, 17% com solo arenoso e apenas 6% com solo argiloso.

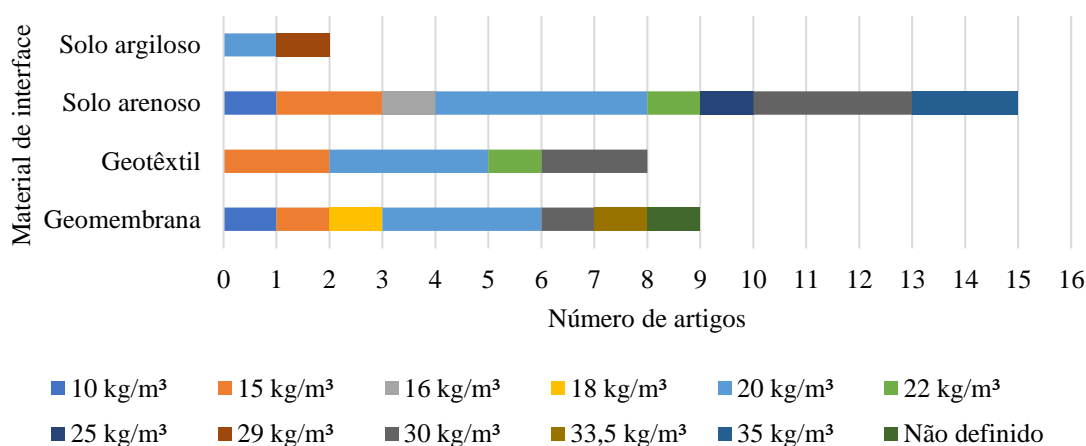
Considerando que uma das principais aplicações do EPS no meio geotécnico é em aterros sobre solos moles e preenchimento leve, e a maioria utilizam geomembranas e geotêxteis para desempenhar diversas funções, foram selecionados 4 materiais geotécnicos comumente utilizados em conjunto (o solo argiloso e arenoso, o geotêxtil e a geomembrana) para complementar um pouco mais dos resultados e contribuir com as pesquisas disponíveis nessa área. Esses 4 materiais juntos somam em torno de 40% dos estudos relacionados com interfaces de EPS.

A Figura 3.7 apresenta a quantidade de publicações por ano dos estudos na interface do EPS com esses materiais e a Figura 3.8 a quantidade de publicações pelas combinações com massas específicas diferentes do EPS.

**Figura 3.7 – Quantidade de publicações por ano dos estudos na interface do EPS com os materiais: geomembrana, geotêxtil, solo arenoso e solo argiloso**



**Figura 3.8 – Quantidade de publicações na interface do EPS (com massas específicas diferentes) e os quatro materiais geotécnicos selecionados**



No primeiro as pesquisas estão concentradas principalmente nos anos de 2004 e 2006; e em alguns anos, principalmente nos últimos, não tiveram muitos estudos, e apenas com solos arenosos, no segundo teve uma diversificação maior de combinações com solo arenoso e geomembrana, e para solo argiloso e geotêxtil essas combinações já são mais reduzidas, e ambos demonstram a falta das pesquisas na interface do EPS com esses materiais.



### 3.2 Revisão da literatura

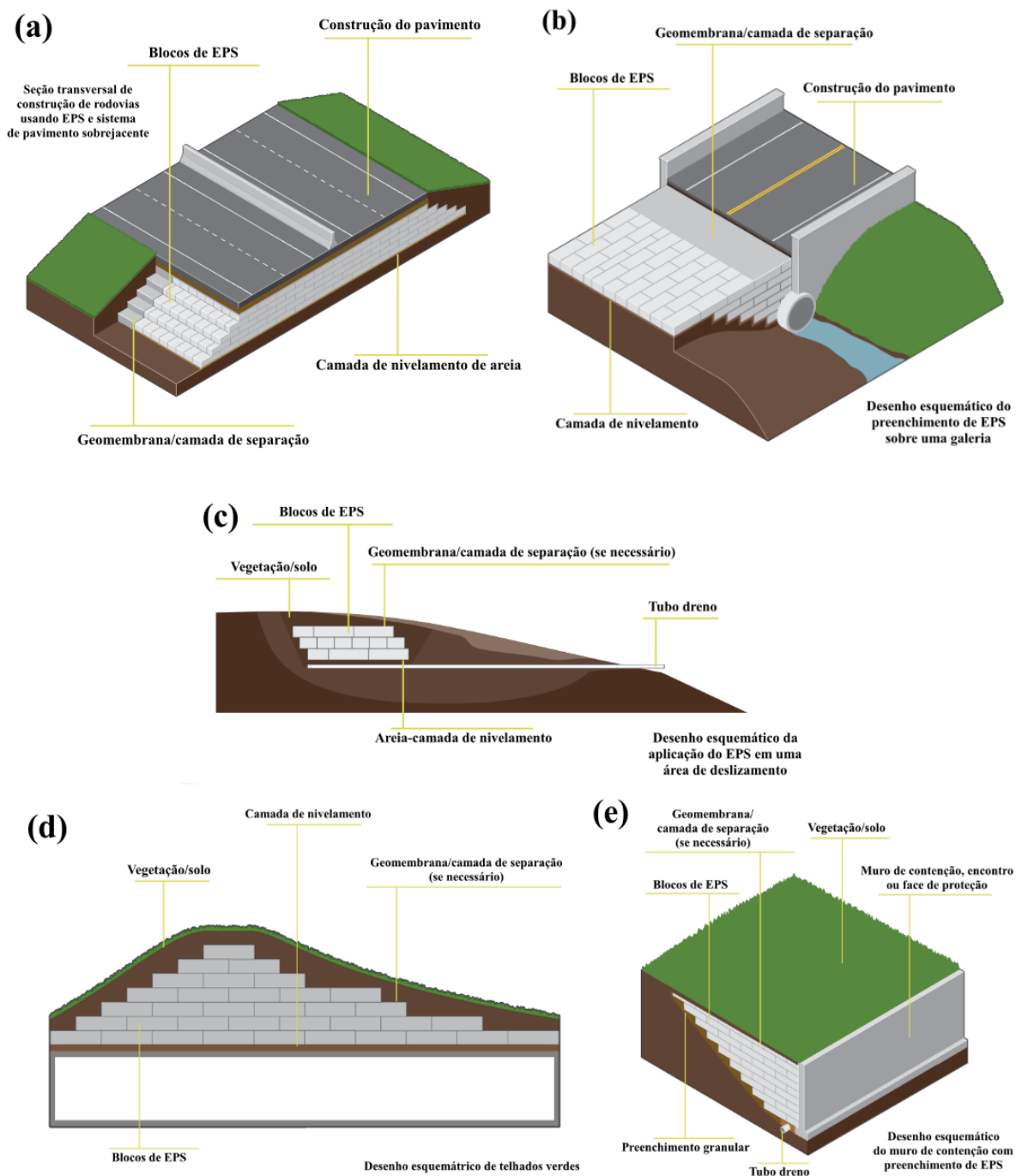
O geoexpandido (*geofoam* do inglês, podendo ser encontrado também como *geoblock*, *geoboard*, *geoinclusion* e *geosolid*) é um material sintético, cujo polímero básico é o EPS (poliestireno expandido), popularmente conhecido no Brasil como “isopor”, um polímero expandido da classe dos termoplásticos (moldados a partir de diferenciais de temperatura e pressão) (CANEVALORO JÚNIOR, 2006). A diversificação de suas propriedades na fabricação permite a obtenção de várias características como dimensões e formas pré-definidas e valores diferentes de massa específica (comumente encontrado entre 15 e 40 kg/m<sup>3</sup>, um material mais leve do que a água). Essas características físicas são importantes, proporcionando diferentes comportamentos frente às propriedades hidráulicas e mecânicas, e de grande interesse para aplicações geotécnicas, assim como a sua compressibilidade, alta resistência a flexão e ruptura no cisalhamento, facilidade de manuseio, com redução de tempo e custos de construção, por ser um material sustentável, reutilizado e reciclado em diversas situações (AVESANI NETO, 2008; STARK *et al.*, 2012).

As principais propriedades do geoexpandido são a sua densidade nominal, resistência à flexão, resistência à compressão, absorção de água e índice de oxigênio, que vem sendo estudadas no Projeto de Norma ABNT: Poliestireno rígido celular expandido aplicado à engenharia geotécnica (geoexpandido) elaborado pela Comissão Especial de Geossintéticos (CEE-175) (ABNT NBR 16866, 2022).

Antes de se aprofundar nos estudos da resistência ao cisalhamento de interface desses materiais com o EPS é necessário primeiramente entender como elas estão presentes no campo. A Figura 3.9 apresenta algumas dessas aplicações na geotecnia. Nela, é possível observar a forma como os blocos são utilizados na geotecnia, principalmente para alívio de tensões no solo. Elas apresentam desenhos esquemáticos da aplicação em: (a) construção de rodovias sobre solos moles, (b) em estruturas enterradas, (c) na estabilização de taludes, (d) paisagismo e telhados verdes e (e) preenchimento e aterro em muros de contenção. Em (a) o EPS é utilizado para substituir solos compressíveis ou materiais de preenchimento pesados pois os solos são incapazes de suportar cargas adicionais, em (b) ele é utilizado quando as estruturas enterradas não foram projetadas para suportar cargas adicionais, em (c) como substituição de parte do solo em taludes aliviando as cargas e melhorando a estabilidade, em (d) para criar relevos sem adicionar cargas significativas às estruturas como em edifícios urbanos e em (e) para reduzir tensões laterais nas estruturas de contenção. Em todas essas aplicações o EPS está em contato com os solos arenoso e argiloso e como pode ser observado

nas figuras todas podem ser aplicadas com uma camada de separação na superfície do EPS que podem desempenhar funções de reforço, separação ou filtração, e essas camadas podem ser geotêxteis, geomembranas, geogrelhas, geocélulas *etc.* (STARK; BARTLETT; ARELLANO, 2012).

**Figura 3.9 – Aplicações com EPS em: (a) construção de rodovias sobre solos moles; (b) tubulações e estruturas enterradas; (c) estabilização de taludes; (d) paisagismo e telhados verdes; (e) preenchimento e aterro em muros de contenção**



Fonte: STARK *et al.* (2012)

Dessa forma, é importante conhecer e avaliar as suas propriedades, e como para qualquer outro material de engenharia, propriedades básicas são necessárias para o uso em projetos e análises de estabilidade de estruturas. O material pode estar sujeito ao cisalhamento interno do bloco ou ao cisalhamento externo, do contato com outros blocos ou outros materiais (STARK *et al.*, 2004; AVESANI NETO, 2008), que geralmente tende a ser mais sensível na interface quando comparado à sua resistência interna, por exemplo. Portanto, o plano de ruptura mais fraco do EPS submetido a um carregamento encontra-se na superfície, faceando os materiais, o que faz o conhecimento dessa propriedade fundamental (PADADE e MANDAL, 2014; ABDULMUTTALIP e AKBULUT, 2022).

A literatura tem avaliado os parâmetros que afetam a resistência ao cisalhamento de interface, principalmente para calibração de modelos numéricos, um fator muito importante para caracterização do seu comportamento, análise de suas aplicações, de estabilidade interna e externa dessa interação e viabilidade em projetos geotécnicos (ABDULMUTTALIP e AKBULUT, 2022). Além do EPS ser combinado com vários outros materiais, podendo estar em contato diretamente com os solos e os geossintéticos (aplicados principalmente como proteção tanto química como de impermeabilização), essa estrutura também pode estar sujeita a solicitações horizontais (ação do vento e sobrecargas acidentais), e assim submetidas a esforços de cisalhamento; assim como pode estar sujeita a condições de carregamentos estáticos e dinâmicos (XENAKI e ATHANASOPOULOS, 2001; AVESANI NETO, 2008; PADADE e MANDAL, 2014).

Não há um método específico para o ensaio de resistência das interfaces tratadas, porém a sua avaliação é similar ao ensaio de cisalhamento direto utilizado para a interface de solos e geossintéticos (ASTM D 5321, 2021), bem como o ensaio de cisalhamento direto de solos sobre condições consolidadas drenadas (ASTM D 3080, 2011). Portanto, ela pode ser avaliada simulando os materiais e condições esperados em suas aplicações, condições de confinamento como tensões normais representativas, condições diversas de umidade e degradação da superfície, propriedades morfológicas como a rugosidade e a rigidez da superfície, formato e tamanho de partículas, e seu comportamento de pico e pós-pico (SHEELEY e NEGUSSEY, 2000; ABDULMUTTALIP e AKBULUT, 2022).

O ensaio consiste em deslizar a interface de um material sobre outra, aplicando uma tensão normal constante e variando a cisalhante a fim de obter um gráfico de deslocamento horizontal (mm) *versus* tensão cisalhante (kPa) -  $\delta_h \times \tau$  - para cada tensão normal ( $\sigma$ ) aplicada, em kPa. A partir desses gráficos, é possível construir as envoltórias de resistência

( $\sigma \times \tau$ ), e delas são obtidos os parâmetros de resistência de interface, valores de ângulo de atrito ( $\phi$ ) e adesão ( $c_a$ ), utilizados em projetos (conforme Equação 1).

$$\tau = c + \sigma \cdot u = c + \sigma \cdot \text{tg}(\phi) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde “ $\tau$ ” é a resistência ao cisalhamento da interface, “ $c$ ” é a coesão ou adesão das interfaces geossintéticos-geossintéticos ou geossintéticos-solos, “ $\sigma$ ” é a tensão axial aplicada e “ $\phi$ ” e “ $u$ ” é o ângulo e o coeficiente de atrito das interfaces, respectivamente.

Ambos os valores da função ( $c$  e  $\phi$ ) são parâmetros básicos de projeto, que segundo Avesani Neto (2008) é necessário conhecê-los para uma melhor visualização e estudo das aplicações desses materiais, simulando situações que ocorrem no campo. Se a coesão das amostras for zero ( $c = 0$  kPa) a representação em função da resistência torna-se uma reta passando pela origem.

A adesão ( $c_a$ ) é geralmente associada a resultados de resistência ao cisalhamento de interface, enquanto a coesão ( $c$ ) é associada com resultados de resistência ao cisalhamento interno envolvendo solos ou GCL, no entanto os termos são idênticos e ambos representam o intercepto em y da envoltória (ASTM D 7702, 2021).

Assim, para cada gráfico são obtidos pontos da envoltória de resistência (tensão normal *versus* tensão cisalhante), tanto para uma situação de ruptura (comportamento de pico, relacionado ao maior valor de resistência ao cisalhamento experimentado durante um ensaio sobre uma dada tensão normal, e obtido na fase elástica, tendo seu limite elástico até 5% de deformação) como para um comportamento pós-pico (relacionado ao valor mínimo de resistência ao cisalhamento que ocorre após ser atingida a resistência ao cisalhamento máxima, e obtido após o limite elástico, estabelecido em um deslocamento horizontal de 10 mm ou deformação de 10%) (ASTM D 7702, 2021).

A resistência ao cisalhamento pode ser em função da tensão normal aplicada, das características do material (como o geossintético, por exemplo), propriedades do solo, tamanho, forma e preparação da amostra, conteúdo de água, condições de drenagem, taxa e magnitude de deslocamento, e outros parâmetros (ASTM D 5321, 2021).

A principal característica do EPS a ser observada é a massa específica ( $\rho$ ), da qual existe uma grande variedade disponível, e em seguida a resistência a compressão, a flexão e índice de oxigênio (ASTM D 6817, 2021). Porém, a maior dificuldade em se usar o EPS em aplicações geotécnicas é a grande incerteza das propriedades do material e suas interfaces,

especialmente na presença de água, que ainda não são bem definidas (ABDELSALAM e AZZAM, 2016).

Horvath (2001) estudou conceitos do EPS nos quais ressaltou uma lacuna nas determinações de valores de atrito de interface entre blocos e materiais encontrados em aplicações para preenchimento leve em rodovias, como os geossintéticos planos (geogrelhas e, principalmente, geotêxteis e geomembranas) e indicou uma necessidade de aprofundamento nos estudos relacionados. Posteriormente, Avesani Neto (2008) estudou as propriedades hidráulicas e mecânicas do EPS e sugeriu uma análise de valores intermediários de massa específica entre 20 e 30 kg/m<sup>3</sup> e acima destes, e a quantificação do ângulo de atrito de interface do EPS com outros materiais (como as geomembranas, os geotêxteis e os solos arenosos e argilosos).

O comportamento mecânico do EPS já vem sendo estudado por vários pesquisadores, como a resistência a compressão, a flexão, fluência, absorção de água, cisalhamento direto interno (STARK *et al.*, 2012; MOHAJERANI *et al.*, 2017; ROLLINS *et al.*, 2019) e externo na interface entre blocos (AVESANI NETO e BUENO, 2012; PADADE e MANDAL, 2014; ÖZER e AKAY, 2016; ABDELSALAM e AZZAM, 2016; BEJU e MANDAL, 2018; KHAN e MEGUID, 2018; BORSATTO *et al.*, 2019; CARNEIRO NETO, 2019; ABDELSALAM *et al.*, 2019; BORSATTO, 2020); ou ainda na interface entre bloco e concreto (ABDELSALAM e AZZAM, 2016; MEGUID e KHAN, 2019; ABDELSALAM *et al.*, 2019; ÖZER e AKAY, 2022), madeira, aço (MEGUID e KHAN, 2019), agregados, como pó de pedra (BEJU e MANDAL, 2018) e cinzas volantes (PADADE e MANDAL, 2014), ou outros geossintéticos, como geogrelha (ALAIE e CHENARI, 2018) e geocélula (ARVIN *et al.*, 2021).

No entanto, apenas alguns autores abordaram a investigação experimental nos últimos anos para entender o comportamento e as características de resistência dessas interfaces do EPS com outros materiais geotécnicos, como as geomembranas, os geotêxteis e o solo arenoso e argiloso (PADADE e MANDAL, 2014; BARTLETT *et al.*, 2015; ABDELSALAM e AZZAM, 2016; KHAN e MEGUID, 2018; MALAGHINI *et al.*, 2019; ABDELSALAM *et al.*, 2019; ABDULMUTTALIP e AKBULUT, 2022).

Informações pertinentes à resistência ao cisalhamento na superfície com diferentes materiais ainda são limitadas na literatura disponível. Nesse sentido, esse capítulo tem como objetivo a elaboração de uma revisão bibliográfica da caracterização de ensaios de cisalhamento direto de interface com alguns materiais geotécnicos selecionados (geomembranas, geotêxteis, solo arenoso e solo argiloso) de dados contidos na literatura até

o momento, de forma a avaliar e fomentar o comportamento tensão *versus* deformação desses materiais.

### **3.2.1 Interface EPS-Geomembrana**

O EPS é resistente quimicamente, em temperatura ambiente, a alguns componentes como álcalis, ácidos inorgânicos diluídos, maioria dos álcoois, dentre outros, porém quando exposto diretamente a certos tipos de hidrocarbonetos ou seus vapores, hidrocarbonetos clorados, solventes orgânicos, cetonas, éteres, diesel e gasolina, ácidos concentrados, ele pode sofrer um processo de degradação. Portanto, é necessária uma proteção durante e após a construção com barreiras físicas, como geomembranas resistentes a hidrocarbonetos compatíveis com o material, como polipropileno, polietileno clorossulfonado e liga de interpolímero de etileno. Se ele for utilizado em lugares onde há solo contaminado, por exemplo, ensaios deverão ser realizados para determinar a natureza do contaminante e seus efeitos sobre o material (STARK *et al.*, 2012; ASTM D 7180, 2021). Além disso, o material pode estar exposto a condições diversas de variação hidrológica ou ainda a luz solar, gerando degradação pelos raios ultravioleta, que causam descoloração e poeira na superfície (STARK; BARTLETT; ARELLANO, 2012), assim, ele pode estar em contato com as geomembranas nas camadas de separação entre o sistema de pavimento e os blocos de EPS (STARK *et al.*, 2004).

As geomembranas (GBR-P) são materiais bidimensionais fabricados em forma de lâmina, uma barreira geossintética polimérica (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021), composta por asfaltos, elastômeros ou plastômeros, de baixíssima permeabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃOTECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS, 2001), caracterizadas principalmente pelo tipo de polímero como componente principal (polietileno de alta densidade - PEAD, polietileno de baixa densidade linear – PEBDL -, polipropileno flexível – FPP -, policloreto de vinila – PVC -) (ABNT NBR 16757-2, 2020), pela espessura (variando de 0,5 a 2,5 mm aproximadamente, podendo chegar até 5 mm), densidade e pelo processo de fabricação (lisa ou texturizada), sendo fatores que controlam a sua resistência e aplicabilidade.

Como podem ser de superfície lisa ou texturizada de face única ou dupla (saliências em um ou ambos os lados), elas se diferenciam pelo processo de fabricação, que designa os diferentes tipos de rugosidade, sendo que as texturizadas tendem a ser mais rugosas do que as lisas, e podem ser de matriz plana ou de matriz balão, e as texturas das geomembranas

produzidas em matriz plana tendem a ser mais uniformes do que as produzidas em matriz balão, devido a seus processos de fabricação (ASTM D 7466, 2010; GRI GM13, 2021).

Elas são utilizadas como geossintéticos com funções de controle de fluxo (impermeabilização), proteção e separação em condições de solicitação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃO TECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS, 2001). As principais propriedades das geomembranas estão resumidas na Tabela 3.1, a seguir.

**Tabela 3.1 – Resumo das principais propriedades das geomembranas**

<b>Propriedades</b>	<b>Normas</b>
Espessura nominal	ASTM D 5199 (2019) ABNT NBR ISO 9863-1 (2021)
Espessura do núcleo (para as texturizadas)	ASTM D 5994 (2021)
Altura de aspereza	ASTM D 7466 (2010) GRI GM13 (2021)
Densidade	ISO 1183-2 (2019) ASTM D 1505 (2018) ASTM D792 (2020)
Resistência à tração na ruptura	ASTM D 6693 (2020) ABNT NBR 15856 (2010)
Deformação à tração na ruptura	ASTM D 6693 (2020) ABNT NBR 15856 (2010)
Resistência ao rasgo	ASTM D 1004 (2021)
Resistência ao puncionamento estático	ASTM D 4833 (2020) ABNT NBR ISO 12236 (2013)
Resistência ao <i>stress crack</i>	ASTM D 5397 (2020)
Teor de negro de fumo	ASTM D 4218 (2020) ASTM D 1603 (2020)
Dispersão de negro de fumo	ASTM D 5596-03 (2021)
Resistência à oxidação	ASTM D 3895 (2023) ASTM D 5885 (2020) EN 14575 (2005)
Resistência à lixiviação	EN 14415 (2004)
Envelhecimento térmico	ASTM D 5721 (2022) ASTM D 5885 (2020)
Resistência UV	ASTM D 7238 (2020) ASTM D 5885 (2020)

Assim, há a necessidade de investigação dos possíveis efeitos no comportamento dessa interface, efeitos da degradação, como também as possíveis diferenças na resistência de interface entre superfícies secas e molhadas, pois um aterro pode não estar protegido durante a construção e estar submerso por longos períodos (SHEELEY e NEGUSSEY, 2000).

A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos dados de ensaios de cisalhamento da interface de GBR-P com o EPS existentes na literatura.

**Tabela 3.2 - Resumo dos dados de ensaio da interface de GBR-P com EPS contidos na literatura**

<b>Interface (GBR-P)</b>	<b>Características do ensaio</b>	<b>Ângulo de atrito (<math>\phi</math>)</b>	<b>Referências</b>	
GBR-P PEAD	Texturizada (1,5 mm)	Cisalhamento direto (caixas de dimensão: 100x100x25 mm), 1,2 mm/min (taxa de deslocamento), $\sigma = 14$ a 48 kPa	45,0° (pico e residual) ( $\sigma \leq 25$ kPa) 38,7° (pico e residual) ( $\sigma \approx 45$ kPa)	SHEELEY e NEGUSSEY (2000)
	Texturizada (saliências de 0,4 mm)	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	38,7° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)
	Texturizada (micro pontas de 0,55 mm)		31,4° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	
	Texturizada de matriz plana (3 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25), 0,2 mm/min até 10 mm, $\sigma = 11, 22, 33, 44$ e 55 kPa	25,0° (pico), 23,6° (pós-pico) ( $\rho = 10$ kg/m <sup>3</sup> ) 24,3° (pico), 22,9° (pós-pico) ( $\rho = 18$ kg/m <sup>3</sup> ) 28,6° (pico), 26,9° (pós-pico) ( $\rho = 33,5$ kg/m <sup>3</sup> )	MALAGHINI <i>et al.</i> (2019)
	Lisa (1,5 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25 mm), 1,2 mm/min, $\sigma = 14$ a 48 kPa	16,2° (pico), 13,0° (residual) (independente da $\sigma$ )	SHEELEY e NEGUSSEY (2000)
Lisa	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	15,1° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)	
GBR-P PP	Lisa	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	25,6° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)
GBR-P PVC	Texturizada (0,8 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25 mm), 1,2 mm/min, $\sigma = 14$ a 48 kPa	$\approx 26,6^\circ$ (residual) (reduz levemente com a $\sigma$ )	SHEELEY e NEGUSSEY (2000)
	Lisa (0,8 mm)		35,0° (pico), $\approx 21,8^\circ$ (residual)	
PVC	Lisa	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	31,8° ( $\rho = 15$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)
			33,0° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> ) 38,0° ( $\rho = 30$ kg/m <sup>3</sup> )	

Sheeley e Negussey (2000) realizaram ensaios de cisalhamento direto da interface de EPS com geomembranas lisas e texturizadas (de PEAD e PVC), e indicaram que a resistência entre EPS e GBR-P é baixa, consideravelmente menor do que a interface entre blocos (com exceção da PEAD texturizada), o efeito da  $\rho$  foi insignificante e não houve diferença significativa nas condições seca e molhada com a variação da  $\sigma$  utilizada.

Chryzikos *et al.* (2006) avaliaram resultados de EPS com outros materiais de construção, incluindo geomembranas de PEAD, PP e PVC, e concluíram que as resistências das interfaces foram atritivas, com valores altos e baixos. O tipo de polímero afetou significativamente o  $\phi$  entre eles, como também para superfícies mais rugosas (observado para as GBR-P PEAD) que melhoraram o atrito da interface, excedendo a média do valor de  $\phi$  entre blocos (38,7°), no entanto os de superfície lisa foram caracterizados com valores baixos.



Malaghini *et al.* (2019) avaliaram a resistência de interface do EPS com geomembrana texturizada de polietileno e concluíram que para baixas  $\sigma$  o atrito de interface foi muito próximo para essas  $\rho$ , as envoltórias foram pouco influenciáveis por elas, com uma tendência no aumento do  $\phi$  (diminuição de cerca de 15% do EPS com  $\rho$  de 33,5 kg/m<sup>3</sup> para o de 18 kg/m<sup>3</sup>) e o comportamento de pico e pós-pico foi muito próximo (redução em cerca de 6% dos seus parâmetros). Eles identificaram pouca sensibilidade ao  $\delta_h$ , sendo que a máxima  $\tau$  ocorreu na metade do ensaio, sem ruptura brusca (pico bem definido), uma leve tendência de diminuição das  $\tau$  quando atingida a deformação ( $\epsilon$ ) pós-pico ( $\delta_h$  de 10 mm), tendendo a um valor constante próximo ao máximo, e quanto maior a  $\sigma$  as  $\tau$  foram se distanciando.

Os resultados do trabalho dos mesmos autores também mostraram que a maior  $\rho$  (33,5 kg/m<sup>3</sup>) apresentou o melhor desempenho, com os valores do  $\phi$  próximos aos dos solos arenosos (aproximadamente 30°), a menor  $\rho$  (10 kg/m<sup>3</sup>) sofreu deformação vertical ( $\delta_v$ ) (plástica) muito grande quando aplicadas maiores  $\sigma$  (33, 44 e 55 kPa), apesar do valor alto do atrito, que inviabilizou o ensaio e a envoltória foi analisada com apenas dois pontos (para  $\sigma$  de 11 e 22 kPa). Para maiores  $\sigma$  as saliências da geomembrana penetraram a superfície do EPS, que contribuiu com a resistência, e essa penetração foi mais profunda e alongada para  $\rho$  menores (MALAGHINI *et al.*, 2019).

### 3.2.2 Interface EPS-Geotêxtil

Os Geotêxteis têm aplicabilidade na “agricultura (drenagem), áreas verdes, barragens, canais, captação de águas subterrâneas, construção civil, construção industrial, controle de erosão, esporte e lazer, obras de contenção, obras marítimas, proteção ao meio ambiente e obras viárias” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃOTECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS, 2001). Em aterros que utilizam os blocos de EPS o geotêxtil pode ser usado na camada entre o sistema de pavimento e os blocos ou entre os blocos e o solo de fundação natural, com a função de separação e proteção contra a migração das partículas de solo do sistema de pavimento para dentro dos blocos (STARK *et al.*, 2004).

O geotêxtil (GTX) é um material bidimensional, permeável e polimérico, com uma estrutura tecida (GTX-W), não tecida (GTX-NW) ou tricotada (GTX-K). O GTX-NW é a junção de fibras cortadas, filamentos contínuos, interligados por agulhagem (processo mecânico), calandragem (processo térmico) ou resinagem (processo químico), o GTX-K é o cruzamento de fios por tricotamento, e o GTX-W é o cruzamento de fios perpendiculares entre si, no sentido transversal – trama – e longitudinal - urdume) (ABNT NBR ISO 10318-

1, 2021). Porém, os mais utilizados em projetos de engenharia são os geotêxteis não tecidos. As principais propriedades dos geotêxteis estão resumidas na Tabela 3.3, a seguir.

**Tabela 3.3 – Resumo das principais propriedades físicas dos geotêxteis**

<b>Propriedade</b>	<b>Norma</b>
Gramatura ou massa por unidade de área	ASTM D 5261 (2018)
	ABNT NBR ISO 9864 (2013)
	GRI GT12A (2017)
Resistência a tração	ASTM D 4632 (2015)
	ASTM D 4595 (2017)
	ABNT NBR ISO 10319 (2013)
	ABNT NBR 12824 (2013)
Resistência ao rasgo	GRI GT12A (2017)
	ASTM D 4533 (2015)
Resistência ao puncionamento	ABNT NBR ISO 13937-2 (2021)
	ASTM D 6241 (2014)
	ABNT NBR ISO 12236 (2013)
	ABNT NBR 13359 (1995)
Resistência aos raios ultravioleta	GRI GT12A (2017)
	ABNT NBR ISO 9863-1 (2021)
	ASTM D 5199 (2019)
Espessura	GRI GT12A (2017)
	ABNT NBR ISO 9863-1 (2021)
	ASTM D 5199 (2019)
Permissividade	GRI GT12A (2017)
Permeabilidade	ASTM D 4491 (2022)
Transmissividade	ASTM D 4491 (2022)
Abertura de filtração	ASTM D 4716 (2022)
	ASTM D 4751 (2021)

Os tipos de GTX diferenciam-se pelo processo de fabricação, sendo as matérias-primas mais utilizadas o polipropileno (PP), poliéster (PET), poliamida (PA) e polietileno (PE) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃOTECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS, 2001), podendo ser 100% virgem ou com 10% de material reciclado (exceto para a função de reforço) (ABNT NBR 16757-1, 2021).

Ele pode exercer funções de separação e reforço (entre materiais diferentes, separando suas características mecânicas e físicas), proteção (contra erosão) e filtração (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃOTECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS, 2001; ASTM D 4439, 2020).

Alguns pesquisadores realizaram ensaios de interface entre geotêxteis ou com GTX/solo ou GTX/concreto, por exemplo (ABDELSALAM *et al.*, 2019), porém resultados da resistência da interface dele com EPS ainda precisam ser realizados devido às poucas pesquisas que abordaram essa interface. A Tabela 3.4, a seguir, apresenta um resumo dos dados de ensaios de cisalhamento da interface de GTX com o EPS já relatados.

**Tabela 3.4 - Resumo dos dados de ensaios de cisalhamento da interface de GTX com EPS contidos na literatura**

Interface	Características do ensaio	Ângulo de atrito ( $\phi$ )	Referências	
GTX-NW	PP (205 g/m <sup>2</sup> )	Larga escala (amostra superior de 305x305 mm e inferior de 305x356 mm), 0,37 mm/min, $\sigma = 12, 20$ e 26 kPa	25,2° (pico), 17,7° (residual) ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	STARK <i>et al.</i> (2004)
	Agulha perfurada, fios de PP	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até $\delta_h$ 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	31,8° ( $\rho = 15$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)
	Termoligado, filamentos contínuos de PP		33,0° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	
Liso de PP, fitas de 1,5 mm	23,8° – 25,6° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )			
GTX-W	Rugoso de PP, saliências de 0,2 mm, fitas de 1,9 a 2,3 mm		20,8° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	
	720 g/m <sup>2</sup> , 1,8 mm	Larga escala (300x300x100 mm), 1 mm/min, $\sigma = 25, 50, 75$ e 100 kPa	9,7° e adesão de 20 kPa ( $\rho = 15$ kg/m <sup>3</sup> ) 10,8° e adesão de 22 kPa ( $\rho = 20, 22$ e 30 kg/m <sup>3</sup> )	PADADE e MANDAL (2014)

Stark *et al.* (2004) realizaram ensaios na interface entre bloco de EPS e GTX-NW. Eles apresentaram uma resistência de pico e residual significativamente menor do que interfaces de EPS/GBR-P, portanto sendo mais crítica para análises de estabilidade. Assim, foi recomendado que um valor de 25° para o  $\phi$  fosse usado para projetos que utilizem geotêxteis similares.

Posteriormente, Chryzikos *et al.* (2006) avaliaram resultados de ensaios da interface entre blocos e geotêxteis tecidos e não tecidos, seus resultados apresentaram resistências atritivas, valores relativamente altos de  $\phi$  para GTX-NW agulhado e GTX-W com superfície rugosa (31,8° ou maior). Interfaces com GTX-NW termoligado produziram valores de  $\phi$  significativamente mais baixos (em torno de 30 a 35%) do que os valores obtidos para o GTX-NW agulhado. E, como esperado, o GTX-W liso produziu o menor valor de  $\phi$ .

Padade e Mandal (2014) conduziram ensaios do EPS com GTX-W e indicaram uma relação não linear entre a  $\tau$  e a  $\epsilon$ , sem apresentar valores de resistência de pico e residual bem definidos, e a  $\tau$  foi constante depois de 2% de  $\epsilon$ . As envoltórias de resistência foram encontradas serem quase lineares e os resultados indicaram que para todas as  $\rho$  do EPS não teve uma variação significativa no valor do  $\phi$  de interface. Entretanto, um ligeiro aumento na adesão foi observado com o aumento da  $\rho$ .

AbdelSalam *et al.* (2019) relataram que há um efeito redutivo nas propriedades de interface do EPS quando utilizado com GTX, porém não quantificaram os parâmetros de resistência dessa interface, apenas com eles mesmos, com solo arenoso ou com concreto.

### 3.2.3 Interface EPS-Solo arenoso

O EPS pode ser usado para redução de carregamentos no solo, compensação de fundações e redução de tensões laterais do solo e recalques diferenciais (NORWEGIAN ROAD RESEARCH LABORATORY, 1992; SHEELEY e NEGUSSEY, 2000). Dentro de um aterro esse material pode ser utilizado na camada de separação entre os blocos e o solo de fundação natural, que pode ser arenoso ou argiloso. Materiais que são utilizados algumas vezes entre blocos e o solo de fundação natural incluem camadas de materiais granulares como a areia. Situações de deslizamento (mecanismos potenciais de falha entre blocos e solo de fundação, como por exemplo, instabilidade sísmica, vento, deslizamentos hidrostáticos) também devem ser consideradas ao avaliar essa interface (STARK *et al.*, 2004).

As principais características dos solos arenosos são as suas propriedades físicas (teor de umidade, peso específico ( $\gamma$ ), índice de vazios ( $e$ ), porosidade, grau de saturação, dentre outros), a sua compactidade (fofa, medianamente compacta ou compacta), granulometria e textura (fina, média e grossa), estrutura e forma dos grãos (anguloso, sub-anguloso, sub-arredondado, arredondado ou esférico), cor (matéria orgânica), dentre outras.

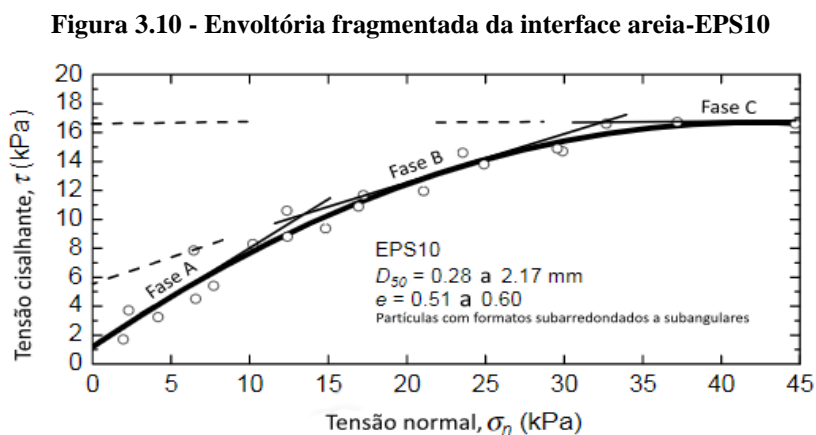
Vários pesquisadores avaliaram ensaios de geossintéticos com solo, como geogrelhas (LIU *et al.*, 2009), geotêxteis (ANUBHAV e BASUDHAR, 2010) e geomembranas (ABDULMUTTALIP e AKBULUT, 2022), porém informações sobre a interação da interface solo-EPS ainda é limitado na literatura e são essenciais para entender esse comportamento. A Tabela 3.5, a seguir, apresenta um resumo dos dados de ensaios de cisalhamento da literatura existente na interface de EPS com solos arenosos.

Tabela 3.5 - Resumo dos dados de ensaios de cisalhamento da interface de solo arenoso com EPS contidos na literatura

Interface	Características do ensaio	Ângulo de atrito ( $\phi$ )	Referências
Solo arenoso	-	35,0° (espessura da camada < 35 mm) ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ ) 28,8° (espessura da camada > 35 mm) ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ )	MIKI (1996) <i>apud</i> SHEELEY e NEGUSSEY (2000)
Solo arenoso	-	30,0° (estimativa conservadora, comparável ao da areia)	HORVATH (2001)
Solo arenoso: - $D_{50}$ de 0,28 a 2,17 mm - e variando entre 0,51 e 0,72 - $\phi$ interno de pico de 31° a 40°	Cisalhamento direto (100x100 mm), 0,4 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, valores crescentes de $\sigma$	34,0° ( $\sigma$ de 0 a 15 kPa) ( $\rho = 10 \text{ kg/m}^3$ ) (fase A) 19,0° e adesão de 5,5 kPa ( $\sigma$ de 15 a 30 kPa) ( $\rho = 10 \text{ kg/m}^3$ ) (fase B) $\Phi$ nulo e adesão de 16,5 kPa ( $\sigma > 30 \text{ kPa}$ ) ( $\rho = 10 \text{ kg/m}^3$ ) (fase C) 32,0° ( $\sigma$ de 0 a 35 kPa) ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ ) (fase A) 15,0° e adesão de 15 kPa ( $\sigma > 35 \text{ kPa}$ ) ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ ) (fase B) - ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ ) (fase C pode necessitar de valores de $\sigma$ maiores)	XENAKI e ATHANASOPOULOS (2001)
Solo arenoso: -Grãos sub angulares entre 0,60 mm e 0,85 mm - $e = 0,65$ - $\phi$ interno de 46°	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	37,2° ( $\rho = 15 \text{ kg/m}^3$ ) 38,0° ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ ) 37,6° ( $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)
Solo de areia grossa bem graduado	Cisalhamento direto (100x100x50 mm), até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma = 10$ a 40 kPa	33,4° e adesão 2,4 kPa (seco), 31,6° e adesão 2 kPa (inundado) ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ )	ABDELSALAM e AZZAM (2016)
Areia silicosa bem graduada ( $\rho = 1,60 \text{ g/cm}^3$ ): - Cu (coeficiente de uniformidade) = 1,9 Cc (coeficiente de curvatura) = 1,3 $\phi$ de 41° (pico), e $\phi$ de 35° (residual)	Cisalhamento direto (100x100x50 mm), 0,9 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma = 18, 36$ e 54 kPa	20,0° e adesão de 12 kPa ( $\rho = 15 \text{ kg/m}^3$ ) 32,0° e adesão de 8 kPa ( $\rho = 22 \text{ kg/m}^3$ ) 38,0° e adesão de 2,5 kPa ( $\rho = 35 \text{ kg/m}^3$ )	KHAN e MEGUID (2018)
Solo arenoso: - $\gamma = 20,42 \text{ kN/m}^3$ - $\gamma_{\text{sat}} = 31,42 \text{ kN/m}^3$ - $\phi$ interno de 46° e coesão de 2 kPa	Cisalhamento direto (amostra de 60x60x25 mm), 2 mm/min até $\delta_h$ de 8 mm	37,6° e adesão de 4,5 kPa (média da $\rho$ de 25, 30 e 35 $\text{kg/m}^3$ )	ABDELSALAM <i>et al.</i> (2019)
Areia grossa mal graduada (areia de praia): - $D_{50}$ de 2,5 mm - $e_{\text{max}}$ de 0,71 - $e_{\text{min}}$ de 0,55 - $\phi = 38^\circ$ (pico)		46,9° (pico) ( $\rho = 16 \text{ kg/m}^3$ ) 43,8° (pico) ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ ) 42,0° (pico) ( $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ )	
Areia grossa mal graduada (areia britada com bordas arredondadas): - $D_{50}$ de 2,5 mm - $e_{\text{max}}$ de 0,8 - $e_{\text{min}}$ de 0,63 - $\phi = 43^\circ$ (pico)	Cisalhamento direto (amostra de 90x90x25 mm), 0,5 mm/min até 12% de $\epsilon$ , $\sigma = 7, 14$ e 27 kPa	49,0° (pico) ( $\rho = 16 \text{ kg/m}^3$ ) 46,9° (pico) ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ ) 46,9° (pico) ( $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ )	ABDULMUTTALIP e AKBULUT (2022)
Areia grossa mal graduada (areia britada com bordas angulares): - $D_{50}$ de 2,5 mm - $e_{\text{max}}$ de 0,82 - $e_{\text{min}}$ de 0,68 - $\phi = 49^\circ$ (pico)		45,0° (pico) ( $\rho = 16 \text{ kg/m}^3$ ) 49,0° (pico) ( $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ ) 50,0° (pico) ( $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ )	

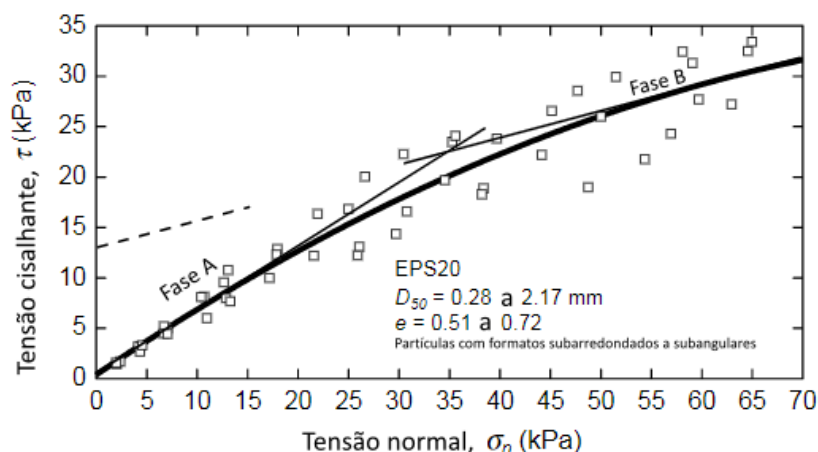
Norwegian Road Research Laboratory (1992) sugeriu um valor de  $\phi$  de  $35^\circ$  para a resistência de interface entre blocos e solos granulares e Horvath (2001) estimou conservadoramente em  $30^\circ$ , comparável ao  $\phi$  interno da areia (durante o cisalhamento os grãos de areia se incorporam ao EPS e o plano de ruptura ocorre nela). Foram apresentados também valores de  $\phi$  (para blocos com  $\rho$  de  $20 \text{ kg/m}^3$ ), que mudaram com a espessura da camada de areia:  $35^\circ$  (para camadas menores que 35 mm) e  $28,8^\circ$  (para camadas maiores que 35 mm, aproximadamente (MIKI *apud* SHEELEY e NEGUSSEY, 2000).

Xenaki e Athanasopoulos (2001) identificaram que a envoltória de cisalhamento é não linear e pode ser aproximada por linhas tangenciais à envoltória, divididas em três fases de interação (A, B e C), conforme Figura 3.10 e Figura 3.11, relacionadas a diferentes níveis de penetração das partículas de areia na superfície, representados na Figura 3.12. O primeiro segmento linear (fase A, onde o nível de penetração é insignificante), desenvolvido para valores baixos de  $\sigma$  (até 10 kPa para o EPS10 e até 2,5 kPa para o EPS20) define um comportamento puramente atritivo, com um valor do  $\phi$  de interface aproximadamente igual ao da areia, pois a superfície de cisalhamento está localizada inteiramente na interface. Para valores mais altos de  $\sigma$  (fase B, onde as partículas de areia começam a penetrar no EPS mudando parte da superfície de cisalhamento para dentro dele) o comportamento vai se tornando atritivo-adesivo, com redução contínua dos valores do  $\phi$  da interface e aumento dos valores de adesão. E, acima de um certo valor crítico (35 kPa para o EPS10 e acima de 78,5 kPa para o EPS20) o comportamento se torna puramente adesivo (fase C, onde todas as partículas de areia, ou a maior parte, penetram na superfície do EPS e a superfície de cisalhamento fica localizada quase inteiramente dentro do EPS, que desenvolve um valor máximo de adesão igual ao valor da coesão do bloco, que aumenta com a  $\rho$ ).



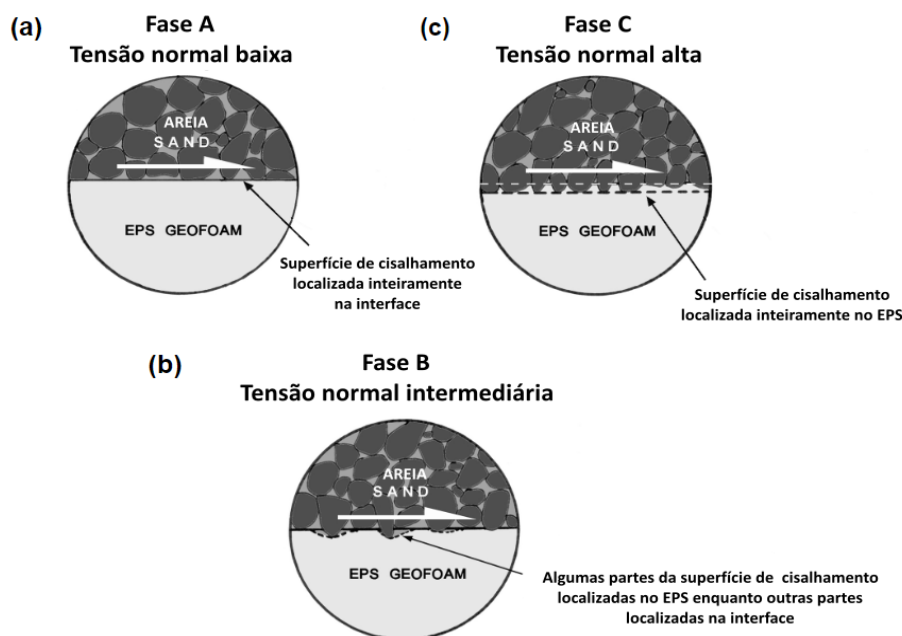
Fonte: Xenaki e Athanasopoulos (2001)

Figura 3.11 - Envoltória fragmentada da interface areia-EPS20



Fonte: Xenaki e Athanasopoulos (2001)

Figura 3.12 – Estrutura conceitual para as três fases de interação na interface EPS/solo arenoso: (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C



Fonte: Xenaki e Athanasopoulos (2001)

Essa penetração está relacionada aos diferentes formatos (angularidade) das partículas de areia e à resistência da interface (que é esperada aumentar com a massa específica e com a redução do tamanho médio das partículas ( $D_{50}$ ), que aumenta o número de contatos por unidade de área, como também com o aumento da  $\sigma$  (exceto para o EPS10, que desenvolveu maior resistência do que o EPS20 para baixas  $\sigma$ , reduzindo o efeito do  $D_{50}$ ), influenciado também pelo  $e$  (mas não consideravelmente quando comparado ao efeito do  $D_{50}$ ). Seus resultados também indicaram um comportamento predominantemente afetado pela  $\rho$  para valores altos de  $\sigma$ , assim como o formato e a posição da envoltória. Para  $\sigma$  maiores do que

os valores críticos, o número de contatos na superfície deixa de aumentar considerando que a penetração das partículas de areia começa a se desenvolver. Assim, o efeito do  $D_{50}$  é esperado diminuir gradualmente e acaba se tornando insignificante (XENAKI e ATHANASOPOULOS, 2001).

Chrysikos *et al.* (2006) avaliaram que nessa interface o valor do  $\phi$  não foi afetado pela  $\rho$  dos blocos e teve um valor que é muito bem comparável com valores já reportados ( $37,6^\circ$ ) e com a média do valor do atrito entre blocos ( $38,7^\circ$ ), podendo exceder apenas se os blocos estão em contato com geossintéticos mais rugosos, solos mais angulares ou agregados.

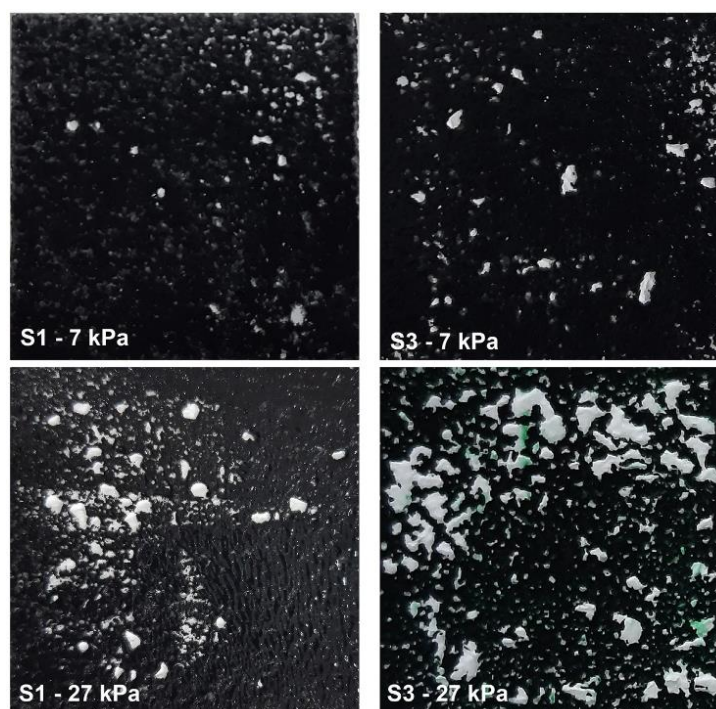
Abdelsalam e Azzam (2016) conduziram ensaios em condição seca e submerso em água (por 24 horas antes, e durante todo o ensaio) com o objetivo de usar essas propriedades para calibrar um modelo numérico do comportamento de muros rígidos e flexíveis com inclusões de EPS, e concluíram que em uma  $\sigma$  de 10 e 30 kPa, a resistência ao cisalhamento máxima na interface alcançou valores de 9,3 e 22,5 kPa, respectivamente, e o efeito da água nas propriedades não foi tão significativo como em interface entre blocos.

Khan e Meguid (2018) concluíram que a maioria das resistências de interface desenvolveram para pequenos  $\delta$  e que com o aumento da  $\rho$  o atrito aumentou, porém, a adesão diminuiu (a maior  $\rho$  desenvolveu menos interação com as partículas de areia comparado às mais leves). As  $\tau$  aumentaram rapidamente com o aumento do  $\delta_h$  até cerca de 2 mm. Em valores baixos de  $\sigma$  (pouca interação na interface), a diferença entre as  $\tau$  para as três  $\rho$  é desprezível. Com o aumento na  $\sigma$  (partículas penetram na superfície) a  $\rho$  começou a afetar o desenvolvimento das  $\tau$  (valores mais altos).

Abdulmuttalip e Akbulut (2022) investigaram efeitos da dimensão fractal no comportamento de cisalhamento de interface usando ensaios de cisalhamento direto. Essa teoria fractal pode ser aplicada em problemas que envolvem interfaces descrevendo quantitativamente as propriedades morfológicas, ou geometria, desses materiais. Concluíram que o  $\phi$  de interface aumenta proporcionalmente com a dimensão fractal das partículas de areia e superfície do geossintético (irregularidade), existindo uma proporção do atrito da interface e o atrito interno da areia (maior que 1 significa que as partículas de areia penetraram no EPS e o atrito da interface é maior que o interno da areia). O grau de penetração é diretamente proporcional ao estado de  $\sigma$  e a dimensão fractal da partícula (como mostrado na Figura 3.13), assim como a variação do atrito correlaciona-se diretamente com a rigidez da superfície. Afirmaram que uma superfície com rugosidade superficial relativamente alta e baixa rigidez seria ideal para projetos do ponto de vista da resistência da interface.



**Figura 3.13 - Marcas da penetração de partículas de duas areias diferentes (S1 e S3, sendo a primeira mais angular e com um índice de vazios menor e a segunda uma areia britada com arestas angulares) na superfície do EPS30 com tensões normais mais baixas (7 kPa) e mais altas (27 kPa)**



Fonte: Abdulmuttalip e Akbulut (2022)

### 3.2.4 Interface EPS-Solo argiloso

O EPS pode ser usado para tratar estabilidade de taludes de aterros, reaterros de muros de contenção de terra para redução de tensões laterais e recalques, envolvendo solos argilosos (JUTKOFISKY; SUNG; NEGUSSEY, 2000). Situações de deslizamento envolvendo solos moles e blocos deve ser considerado também para avaliar a interface desses materiais, como em aterros nas camadas entre os blocos de EPS e o solo de fundação natural ou em bases de muros de contenção (STARK *et al.*, 2004).

As principais características dos solos argilosos são as suas propriedades físicas (teor de umidade ( $w$ ), peso específico, índice de vazios, porosidade, grau de saturação, dentre outros), limites (LL e LP) e estados de consistência (muito mole, mole, média, rija ou dura), granulometria conjunta ou sedimentação, composição mineralógica (argila caulinítica, argila siltosa, com ferro, alumínio, *etc.*), estrutura e forma dos grãos, cor (matéria orgânica), dentre outras.

Alguns pesquisadores avaliaram a interface de solos argilosos com concreto WANG *et al.*, 2021; HE *et al.*, 2021), porém a interface com blocos de EPS ainda está muito limitada

na literatura. A Tabela 3.6, a seguir, apresenta um resumo dos dados de ensaios de cisalhamento da interface de solo argiloso com o EPS contidos na literatura.

**Tabela 3.6 - Resumo dos ensaios de cisalhamento da interface de solo argiloso com o EPS contidos na literatura**

	Interface	Características do ensaio	Ângulo de atrito ( $\phi$ )	Referência
	-	-	27,0°	STARK <i>et al.</i> (2004)
Solo argiloso	Argila caulinita (limite de plasticidade de 23, limite de liquidez de 46, teor de 33%), coesão não drenada de 14 kPa e índice de vazios de 1,1	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	22,3° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)
	Argila (massa específica de 1765 kg/m <sup>3</sup> , $\phi$ de 24° e coesão de 59,9 kPa)	Cisalhamento direto (-)	24,0° e adesão de 9 kPa ( $\rho = 29$ kg/m <sup>3</sup> )	BARTLETT <i>et al.</i> (2015)

Stark *et al.* (2004) estimaram, para interfaces de solo no geral, um valor de 27° para o ângulo de atrito. Chryssikos *et al.* (2006) avaliaram resultados de ensaios de cisalhamento direto na interface entre blocos e uma argila caulinitica, e identificou que interfaces significativamente mais fracas do que para areia são formadas quando os blocos estão em contato com argila, e devem ser evitados desde que a interface aplicada seja caracterizada por valores baixos de  $\phi$ .

Ensaio laboratoriais foram desenvolvidos também por Bartlett *et al.*, (2015) para avaliar métodos de proteção de tubulações e estruturas enterradas usando EPS, com a utilização das propriedades de interface na modelagem numérica, pois deformações nas inclusões compressíveis proporcionam mobilização da resistência ao cisalhamento do solo acima da estrutura, e um desses ensaios foi o cisalhamento direto do EPS com solos argilosos e foram determinados valores de resistência relativamente baixos da interface, similar aos já encontrados na literatura.

### 3.2.5 Considerações

As principais conclusões acerca do comportamento de resistência ao cisalhamento das interfaces do EPS encontradas na literatura foram:

- Para a interface com geomembrana, as pesquisas abordaram principalmente as texturizadas de polietileno e massa específica dos blocos de 20 kg/m<sup>3</sup>, com valores de ângulo de atrito máximo de 24° a 45° para superfícies texturizadas

e de 15° a 38° para superfícies lisas, destacando a falta de dados relacionados a outros tipos de geomembranas, espessuras e polímeros diferentes e outras massas específicas de EPS.

- Para a interface com geotêxtil, o EPS de massa específica de 20 kg/m<sup>3</sup> também foi o mais ensaiado, juntamente com o geotêxtil não tecido agulhado de polipropileno, com valores de ângulo de atrito variando de 24° a 38° para geotêxtil não tecido e de 10° (com adesão de 20 kPa) a 32° (sem adesão) para o tecido, destacando também a falta de dados para outras variações de massas específicas e outros tipos de geotêxtil, gramaturas, polímeros e processos de fabricação diferentes.
- Para a interface com solo arenoso, as massas específicas mais utilizadas foram de 20 e 30 kg/m<sup>3</sup>, com valores de ângulo de atrito 0 a 50° (e adesão de 0 a 16,5 kPa), dependendo da tensão normal. A maioria dos trabalhos utilizou solos locais, destacando a falta da abordagem de solos característicos do Brasil, como também influência das suas características na superfície, como o tamanho médio das partículas, e variação da massa específica.
- E para a interface com solo argiloso, as massas específicas de 20 e 30 kg/m<sup>3</sup> foram as únicas abordadas, com valores de ângulo de atrito variando de 22° a 24° (com adesão de 9 kPa).

Grande parte das pesquisas conduziram ensaios em caixas de cisalhamento direto quadradas de (100x100) mm, destacando a falta de ensaios com uma abordagem mais representativa, como ensaios de plano inclinado ou de larga escala. Destaca-se também a falta de ensaios com variações do conteúdo de água, comportamento de pico e residual para todos os materiais abordados, e o efeito da tensão normal sobre os parâmetros de resistência (atrito e adesão), rugosidade e degradação da superfície, outros valores de deslocamento pós-pico (como 5, 10 e 15 mm).

A avaliação da resistência dessas interfaces requer uma abordagem completa ao invés de evidenciar situações discretas. Essas avaliações permitem modelagens numéricas abordando as diversas aplicações do EPS com esses materiais comumente utilizados, fundamentais para análise de viabilidade em projetos geotécnicos.

## 4 MATERIAIS E MÉTODO

### 4.1 Materiais utilizados

Para o desenvolvimento da pesquisa foram realizados ensaios de cisalhamento direto de dimensão padrão (caixa de 100x100 mm) com a utilização de 2 materiais geotécnicos diferentes: EPS em cinco massas específicas (10, 14,5, 18, 28 e 33,5 kg/m<sup>3</sup>) e três tipos de geomembranas de PEAD (polietileno de alta densidade): uma lisa e duas texturizadas com espessura de 1,5 mm de núcleo, sendo as texturizadas de face dupla.

A Tabela 4.1 e Tabela 4.2 apresentam uma visão geral da pesquisa. Os materiais (EPS e geomembranas) foram fornecidos por empresas nacionais. As geomembranas fornecidas têm espessuras de 1,5 mm confeccionadas em matrizes plana e balão e são de polietileno de alta densidade (PEAD), conforme Figura 4.1.

Para facilitar a apresentação dos resultados, as geomembranas foram nomeadas conforme a Tabela 4.3. As Tabela 4.5 e Tabela 4.4 apresentam as características dos materiais utilizados na pesquisa, conforme apresentadas pelos catálogos dos fabricantes e normas referenciadas.

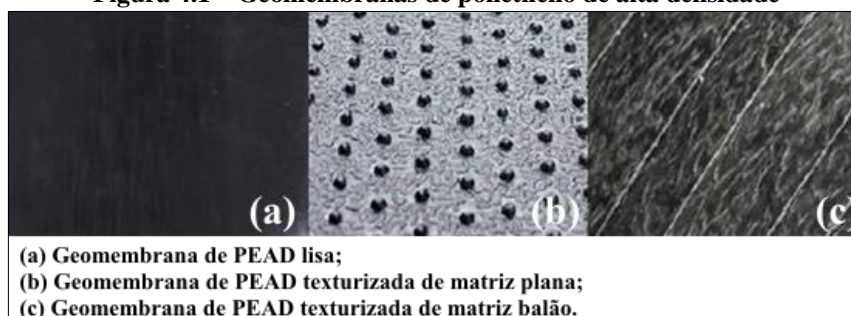
**Tabela 4.1 – Síntese da pesquisa**

Material	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Ensaio	Interfaces	Principais Análises
EPS	10	Cisalhamento Direto	GBR-P TXT-MP GBR-P TXT-MB GBR-P lisa	Avaliação das curvas tensão x deslocamento com ênfase nos pontos máximos e residuais
	14,5			
	18			
	28	Massa específica		Avaliação dos parâmetros de resistência das interfaces (adesão e ângulo de atrito)
	33,5			

**Tabela 4.2 – Características dos materiais**

Material	Característica	Dimensões (mm)
EPS (massa específica em kg/m <sup>3</sup> )	10	100x100x25
	14,5	
	18	
	28	
	33,5	
Geomembrana de PEAD	Texturizada	100x100x1,5
	Lisa	

**Figura 4.1 – Geomembranas de polietileno de alta densidade**



**Tabela 4.3 – Nomenclaturas dos geossintéticos utilizados**

Geossintético	Característica	Nomenclatura
Geomembrana	PEAD – Lisa	GBR-P PEAD LISA
	PEAD – Texturizada – Textura regular (matriz plana)	GBR-P PEAD TXT-MP
	PEAD – Texturizada – Textura irregular (matriz balão)	GBR-P PEAD TXT-MB

**Tabela 4.4 – Propriedades das geomembranas**

Propriedades	Método de ensaio	Valores especificados	
		GBR-P PEAD lisa	GBR-P PEAD texturizada
Espessura (mm)	ASTM D 5199 ASTM D 5994	1,5 mm Nominal - 10%	1,5 mm Nominal -5%
Altura da aspereza (mm)	ASTM D 7466	-	0,40
Densidade (mín.) (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D 1505/ D792	0,94	0,94
Resistência à tração no escoamento (méd.mín.) (kN/m)	ASTM D 6693 Tipo IV	22	22
Deformação no escoamento (méd.mín.) (%)	ASTM D 6693 Tipo IV	12	12
Resistência à tração na ruptura (méd.mín.) (kN/m)	ASTM D 6693 Tipo IV	40	16
Deformação na ruptura (méd.mín.) (%)	ASTM D 6693 Tipo IV	700	100
Resistência ao rasgo (méd.mín.) (N)	ASTM D 1004	187	187
Resistência ao puncionamento (méd.mín.) (N)	ASTM D 4833	480	400
Resistência ao fissuramento sob tensão (mín.) (Hrs)	ASTM D 5397	500	500
Teor do Negro de Fumo (%)	ASTM D 1603	2 – 3	2 – 3
Dispersão do Negro de Fumo	ASTM D 5596	*	*
Tempo de Indução Oxidativa (min.)	Padrão ASTM D 3895	100	100
OIT (mín.)	Alta Pressão ASTM D 5885	400	400
Envelhecimento Térmico	ASTM D 5721		55%
	ASTM D 5885	55%	80%
Resistência UV	ASTM D 7238	80%	
	ASTM D 5885	50%	50%

\*Dispersão do Negro de Fumo para 10 corpos de prova diferentes: 9 corpos de prova nas categorias 1 e 2; 1 corpo de prova na categoria 3.

Fonte: catálogo do fabricante (2023). Disponível em: <<https://www.neoplastic.com.br/products/mining-and-infrastructure/geo-pead-text.php>>.

**Tabela 4.5 – Resumo das propriedades dos blocos de EPS**

Propriedades	Método de ensaio	Tipos de EPS				
		Tipo 1	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 6	Tipo 7
Densidade aparente nominal (kg/m <sup>3</sup> )	NBR 16866	10,0	14,5	18,0	28,0	33,5
Absorção de água (% em volume)	NBR 16866	4,3	3,8	2,6	1,5	1,6
Resistência a compressão com deformação de 10% (kPa)	NBR 16866	≥ 33	≥ 65	≥ 80	≥ 145	≥ 165
Resistência mínima à flexão (kPa)	NBR 16866	≥ 50	≥ 120	≥ 160	≥ 275	≥ 340

Fonte: adaptado de ABNT NBR 16866 (2022).

## 4.2 Método da pesquisa

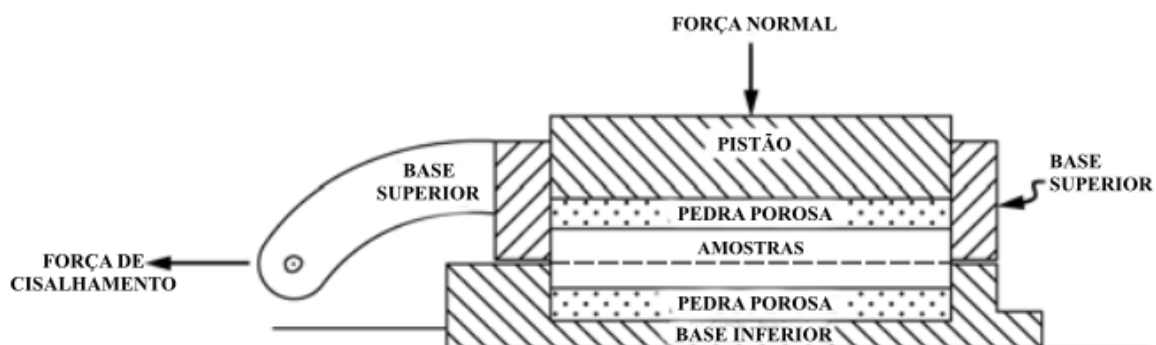
Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados utilizando um equipamento convencional disponível no laboratório de geotecnia da Faculdade de Engenharia de Bauru - FEB (Figura 4.4). Para uma melhor precisão, foram realizados pelo menos 3 ensaios para cada massa específica de amostra de EPS. Dessa forma, a força de cisalhamento foi registrada em função do deslocamento de cisalhamento da seção em movimento da caixa de cisalhamento, conforme representado na Figura 4.2 (ASTM D 3080, 2011). Com os resultados obtidos foi possível obter a envoltória de resistência de pico e pós-pico, com os respectivos parâmetros de adesão e ângulo de atrito de interface.

Os ensaios foram realizados pelo cisalhamento do EPS em relação à interface GBR-P com tensões normais constantes de 11, 22, 33, 44 e 55 kPa, conforme ASTM D 5321 (2021). A velocidade de ensaio utilizada foi de 0,2 mm/min (menor velocidade utilizada em função da limitação do equipamento) até atingir-se um deslocamento pós-pico de 10 mm (deformação de 10%). Esse valor é superior aos valores utilizados em projetos (geralmente deformação de até 5% onde a fase elástica acontece).

Para as amostras de geomembranas foi necessário a utilização de um bloco de madeira para a montagem do corpo de prova para posicionamento na caixa de cisalhamento, e de forma que não houvesse deslizamento das mesmas sobre o bloco. Não foi utilizado nenhum material colante na superfície (Figura 4.3), bem como a utilização de parafusos nas laterais da caixa. Assim, um bloco de madeira foi posicionado juntamente com a geomembrana e, o bloco de EPS na parte superior. Um exemplo da montagem dos corpos de prova do ensaio está apresentado na Figura 4.3. Dessa forma, foi possível obter um gráfico de tensão de cisalhamento por deslocamento para cada tensão normal, e construir as envoltórias de resistência, de pico e pós-pico, obtendo-se os parâmetros de resistência (o intercepto de adesão e o ângulo de atrito).

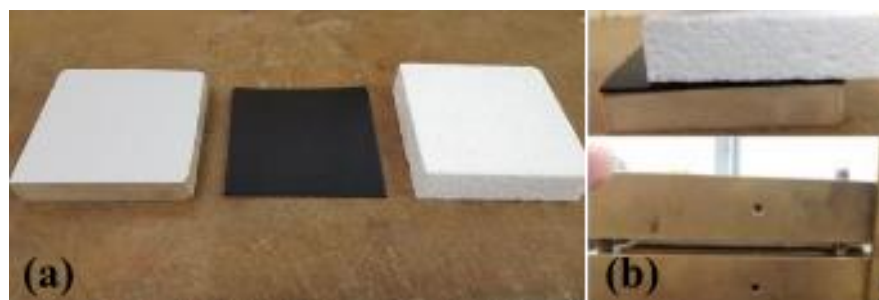
O EPS com a menor massa específica ( $10 \text{ kg/m}^3$ ) precisou de menos pontos de ensaios devido à grande deformação vertical apresentada em tensões normais a partir de  $33 \text{ kPa}$ , o que alterou o plano de cisalhamento impossibilitando o ensaio para esses pontos.

**Figura 4.2 – Representação de amostras de ensaio em aparelho de cisalhamento único**



Fonte: adaptado de ASTM D 3080 (2011).

**Figura 4.3 - Materiais utilizados para a montagem do corpo de prova: (a) materiais para o ensaio da interface EPS/Geomembrana; (b) exemplo da montagem do corpo de prova para ensaio da interface EPS/Geomembrana**



**Figura 4.4 - Aparelho de cisalhamento direto**



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Envoltórias e parâmetros de resistência da interface EPS/Geomembrana

A avaliação dos resultados dos ensaios foi realizada de acordo com critérios já mencionados na literatura e a (ASTM D 7702, 2021). Os resultados podem ser influenciados principalmente pelo formato e dimensão da amostra, pela variação da aplicação da carga, pela absorção da água, pela massa específica e temperatura, e pela interface utilizada. Assim, foi possível analisar a resistência das interfaces distintas pelos gráficos traçados a partir dos ensaios e realizar uma análise comparativa entre as características e configurações obtidas em cada uma delas e com os dados existentes na literatura.

#### 5.1.1 Interface do EPS com Geomembrana texturizada de matriz plana

A Tabela 5.1, a seguir, apresenta os valores de resistência ao cisalhamento dos ensaios na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MP.

**Tabela 5.1 - Valores da resistência ao cisalhamento dos ensaios na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MP**

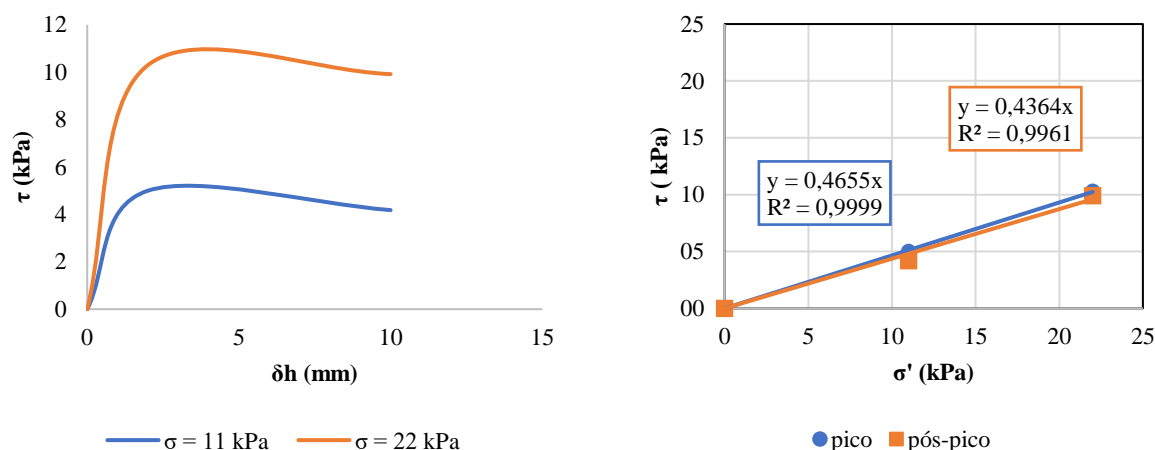
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	10		14,5		18		28		33,5	
	$\tau$ (kPa)									
$\sigma$ (kPa)	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$
	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	5,0	4,2	7,2	7,0	6,4	5,2	8,8	7,6	5,7	5,2
22	10,3	9,9	8,8	5,2	11,6	11,0	17,0	15,9	11,3	10,2
33	-	-	16,5	15,2	16,5	14,9	19,3	17,0	12,6	11,8
44	-	-	19,6	17,8	18,0	16,7	23,7	20,9	26,5	25,1
55	-	-	23,2	22,5	23,9	23,0	23,7	20,6	31,1	29,0

$\rho$  – massa específica;  $\sigma$  = tensão normal;  $\tau_p$  – tensão de pico;  $\tau_{pp}$  – tensão pós-pico.

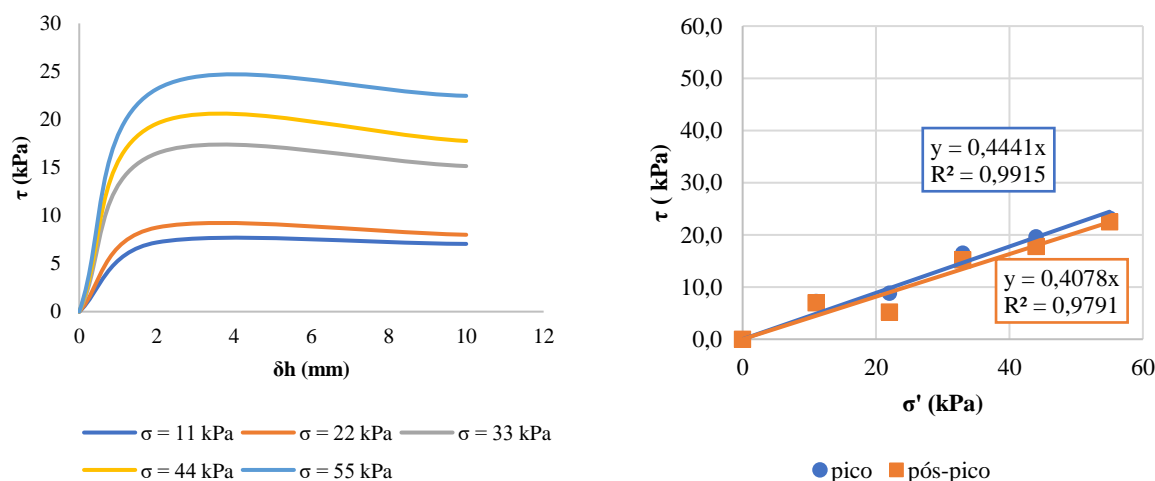
As figuras a seguir apresentam as curvas tensão-deslocamento e envoltórias obtidas dos ensaios na interface do EPS com geomembrana texturizada de matriz plana.



**Figura 5.1 – Curvas tensão-deslocamento e envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 10 \text{ kg/m}^3$ )**



**Figura 5.2 - Curvas tensão-deslocamento e envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 14,5 \text{ kg/m}^3$ )**



**Figura 5.3 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 18 \text{ kg/m}^3$ )**

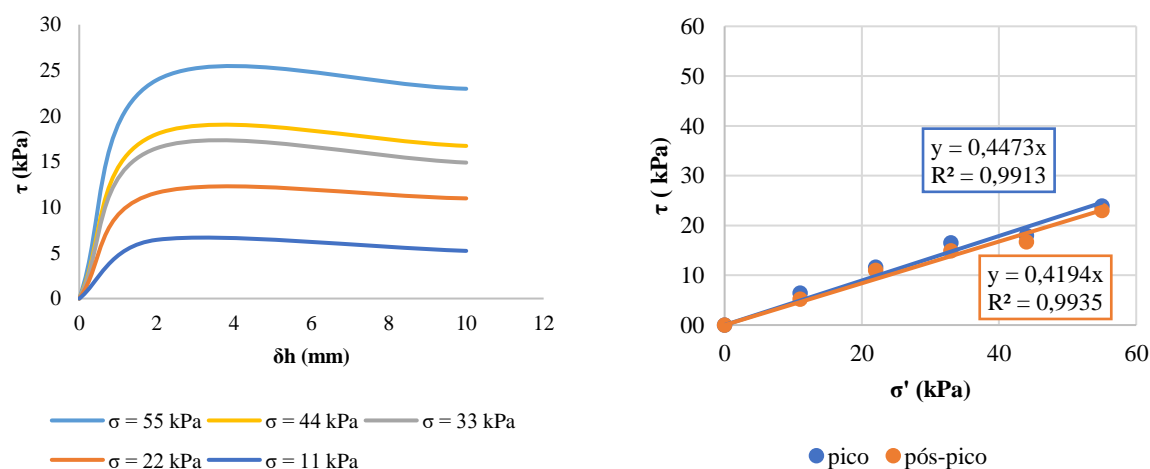


Figura 5.4 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 28 \text{ kg/m}^3$ )

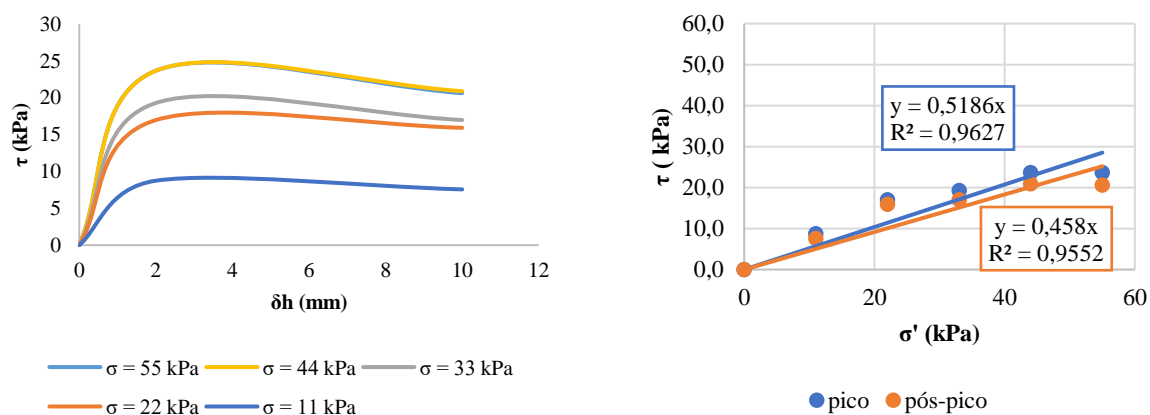
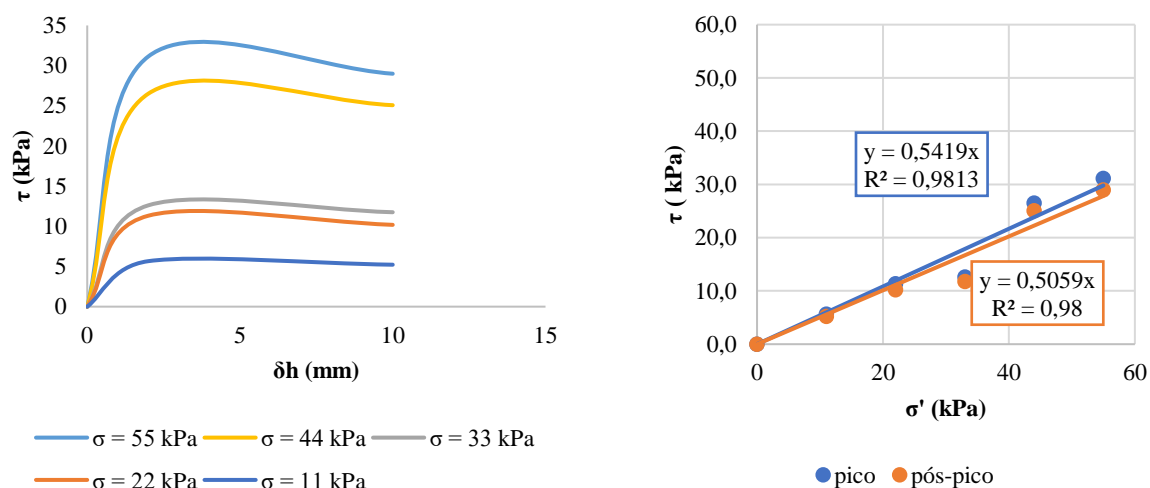


Figura 5.5 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MP ( $\rho = 33,5 \text{ kg/m}^3$ )



A Tabela 5.2 e a Figura 5.6 mostram um resumo dos dados obtidos e das envoltórias de pico e pós-pico na interface do EPS e geomembrana texturizada de matriz plana, respectivamente.

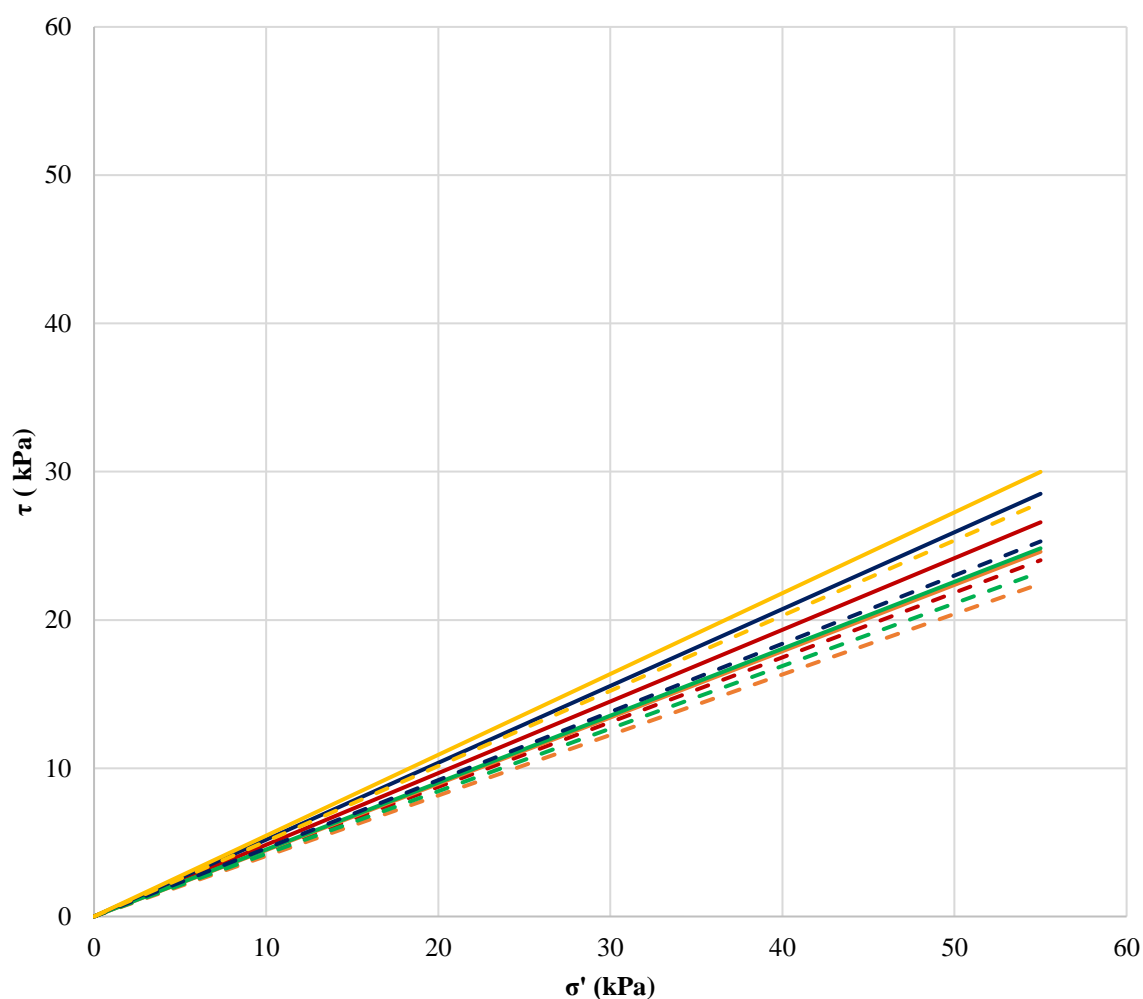
Tabela 5.2 - Valores de adesão e ângulo de atrito para a interface EPS/Geomembrana texturizada de matriz plana

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	10		14,5		18		28		33,5	
$\tau$ (kPa)	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$
$c_a$ (kPa)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\phi$ (°)	25,8	23,6	24,1	22,2	24,3	22,9	27,4	24,7	28,6	26,9
Redução de $\phi$ *	5,7%		7,8%		5,9%		10,0%		5,8%	

$\rho$  – massa específica;  $\phi$  – ângulo de atrito;  $\tau_p$  – tensão de pico;  $\tau_{pp}$  – tensão pós-pico;  $c_a$  – adesão.

(\*) Redução do  $\phi$  de pico para o  $\phi$  pós pico em 10 mm.

**Figura 5.6 - Envoltórias de resistência de pico e pós-pico na interface EPS/Geomembrana texturizada de matriz plana**



### 5.1.2 Interface do EPS com Geomembrana texturizada de matriz balão

A Tabela 5.3, a seguir, apresenta os valores de resistência ao cisalhamento dos ensaios na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB.

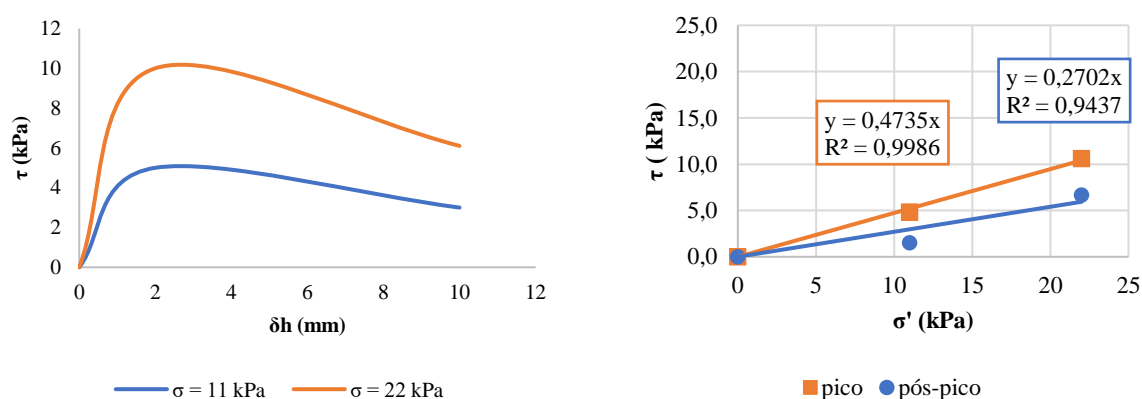
**Tabela 5.3 - Valores da resistência ao cisalhamento dos ensaios na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB**

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\tau$ (kPa)									
	10		14,5		18		28		33,5	
$\sigma$ (kPa)	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	4,8	1,5	9,0	8,2	7,4	7,3	7,7	5,5	7,7	4,5
22	10,6	6,7	14,1	12,7	19,3	16,4	13,5	10,9	14,1	8,5
33	-	-	14,8	13,6	25,1	24,9	16,1	8,8	21,9	14,5
44	-	-	26,0	19,1	29,6	29,4	27,0	23,6	31,8	16,4
55	-	-	29,9	25,2	35,7	35,8	37,0	31,8	38,6	26,4

$\rho$  – massa específica;  $\sigma$  = tensão normal;  $\tau_p$  – tensão de pico;  $\tau_{pp}$  – tensão pós-pico.

As figuras a seguir apresentam as envoltórias obtidas dos ensaios na interface do EPS com geomembrana texturizada de matriz balão.

**Figura 5.7 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 10$  kg/m<sup>3</sup>)**



**Figura 5.8 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 14,5$  kg/m<sup>3</sup>)**

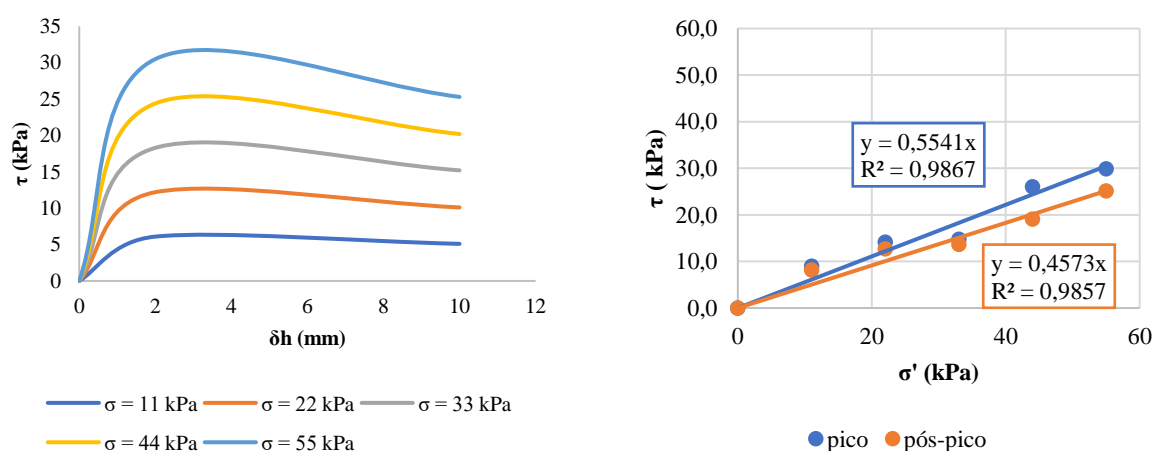


Figura 5.9 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 18 \text{ kg/m}^3$ )

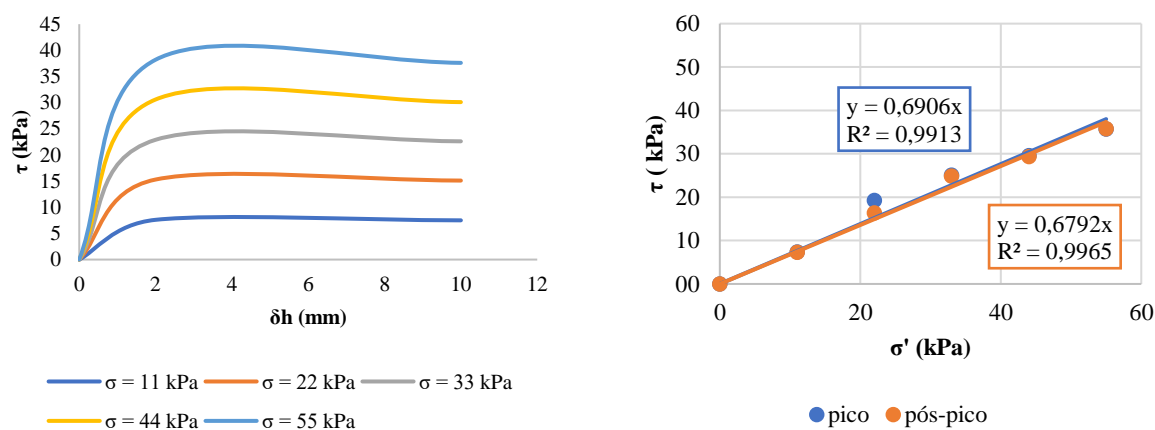


Figura 5.10 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 28 \text{ kg/m}^3$ )

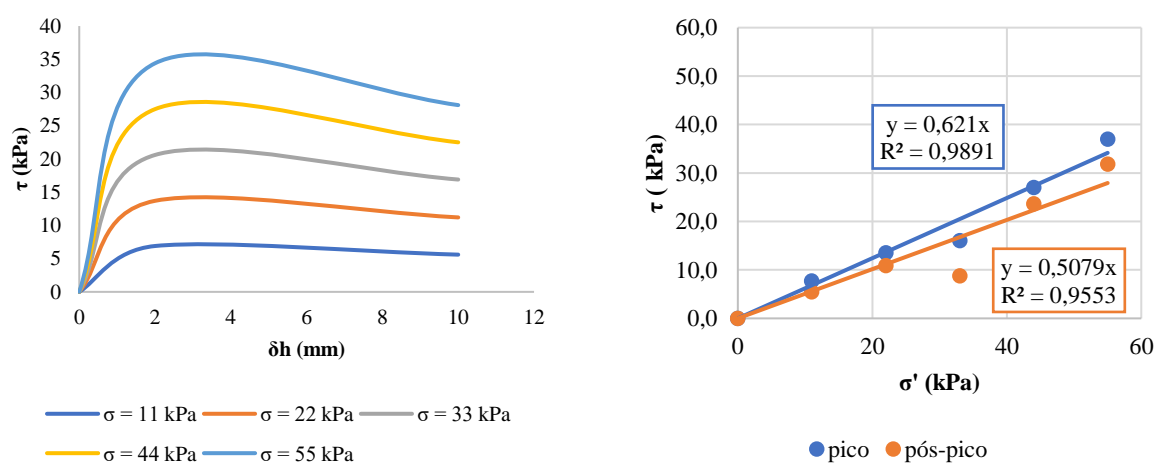
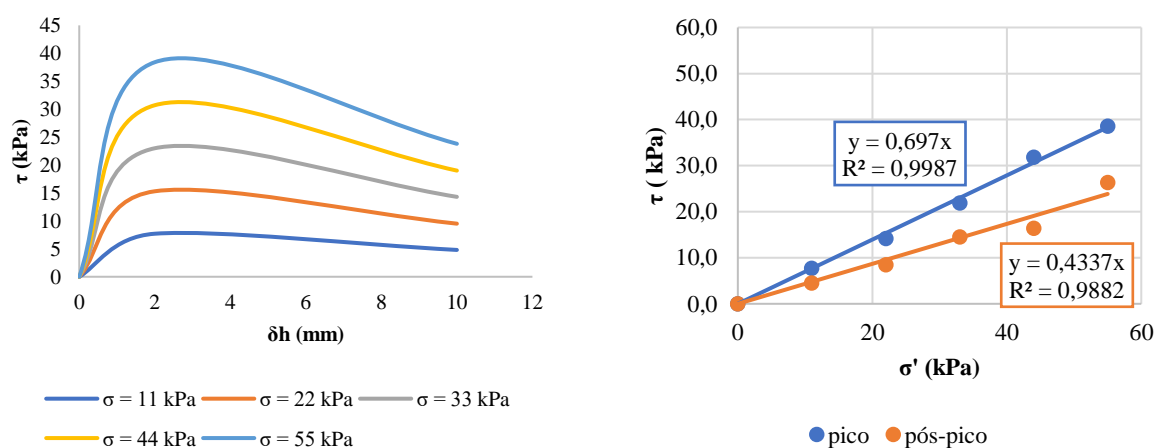


Figura 5.11 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD TXT-MB ( $\rho = 33,5 \text{ kg/m}^3$ )



A Tabela 5.4 e a Figura 5.12 mostram um resumo dos dados obtidos e das envoltórias de pico e pós-pico na interface do EPS e geomembrana texturizada de matriz balão, respectivamente.

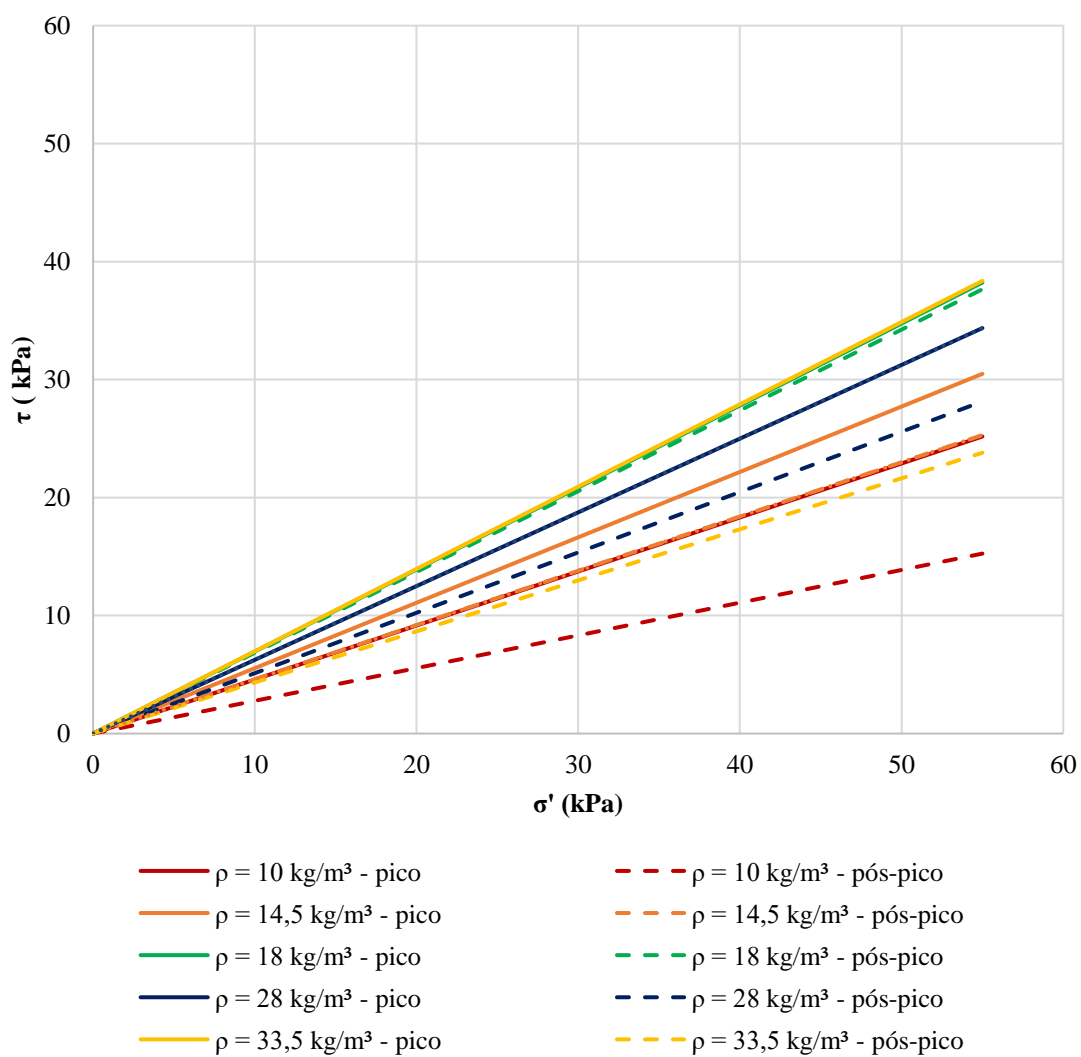
**Tabela 5.4 - Valores de adesão e ângulo de atrito para a interface EPS/Geomembrana texturizada de matriz balão**

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	10		14,5		18		28		33,5	
$\tau$ (kPa)	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$
$c_a$ (kPa)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\phi$ (°)	24,6	15,5	29,0	24,7	34,8	34,4	32,0	27,1	34,9	23,4
Redução de $\phi$ *	37%		15%		1%		15%		33%	

$\rho$  – massa específica;  $\phi$  – ângulo de atrito;  $\tau_p$  – tensão de pico;  $\tau_{pp}$  – tensão pós-pico;  $c_a$  – adesão.

(\*) Redução do  $\phi$  de pico para o  $\phi$  pós pico em 10 mm.

**Figura 5.12 - Envoltórias de resistência de pico e pós-pico na interface EPS/Geomembrana texturizada de matriz balão**



### 5.1.3 Interface do EPS com Geomembrana lisa

A Tabela 5.5, a seguir, apresenta os valores de resistência ao cisalhamento dos ensaios na interface EPS/GBR-P PEAD lisa.

Tabela 5.5 - Valores da resistência ao cisalhamento dos ensaios na interface EPS/GBR-P PEAD lisa

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\tau$ (kPa)									
	10		14,5		18		28		33,5	
$\sigma$ (kPa)	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	4,3	3,7	3,7	3,4	4,4	1,5	3,5	2,2	3,3	1,4
22	7,6	6,9	7,4	6,6	8,7	1,5	6,7	5,4	5,2	2,3
33	-	-	13,2	12,0	10,7	3,1	10,9	8,5	11,5	9,2
44	-	-	14,1	13,2	13,2	6,5	13,3	11,1	12,4	10,0
55	-	-	17,6	17,4	16,3	8,5	16,1	13,5	15,9	12,9

$\rho$  – massa específica;  $\sigma$  = tensão normal;  $\tau_p$  – tensão de pico;  $\tau_{pp}$  – tensão pós-pico.

As figuras a seguir apresentam as envoltórias retiradas dos ensaios na interface do EPS com geomembrana lisa.

Figura 5.13 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 10 \text{ kg/m}^3$ )

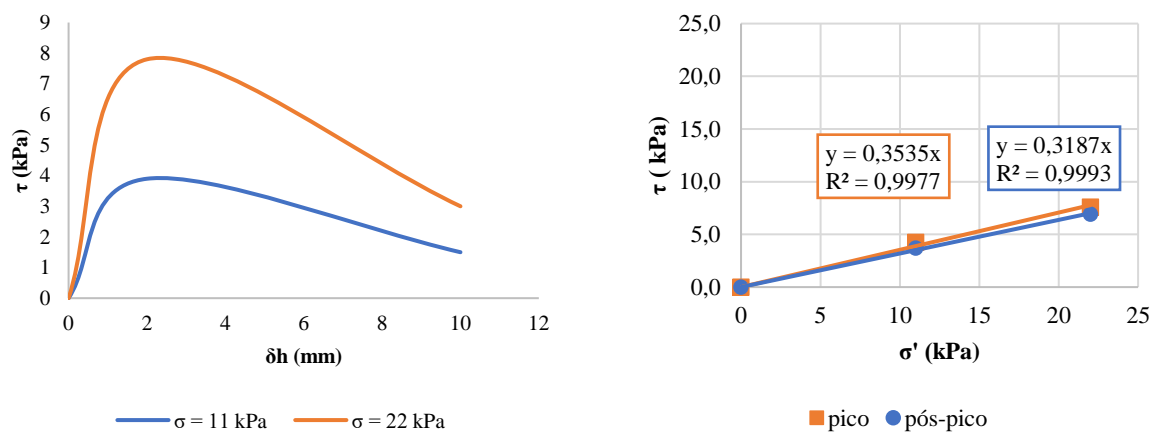


Figura 5.14 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 14,5 \text{ kg/m}^3$ )

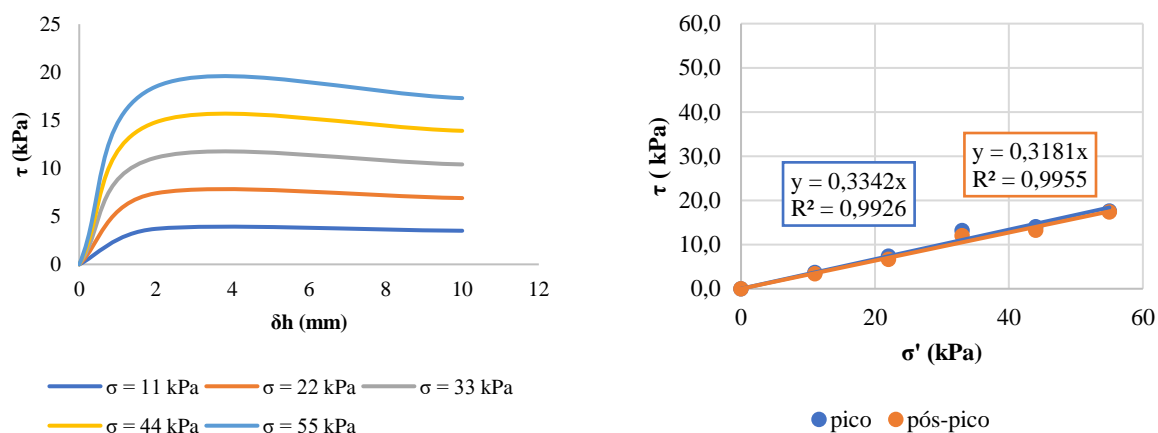


Figura 5.15 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 18 \text{ kg/m}^3$ )

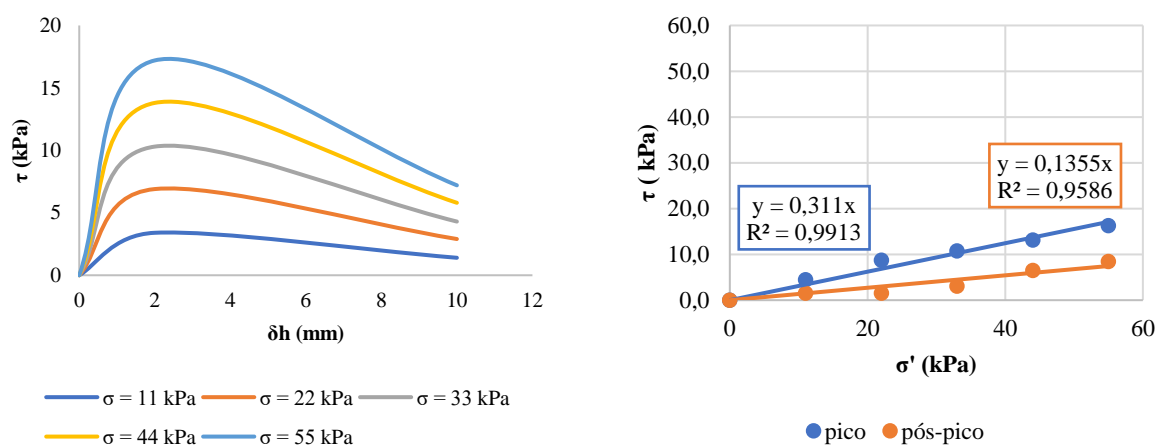
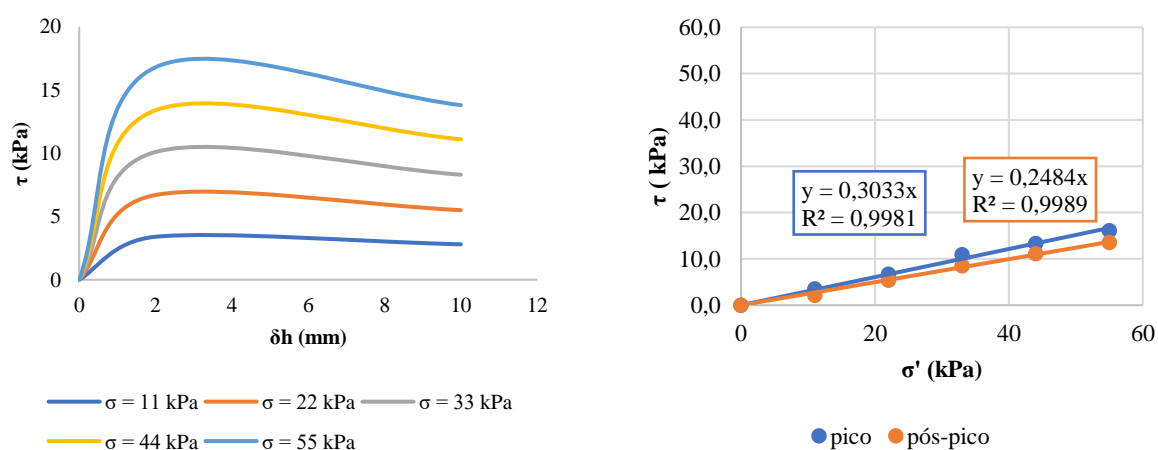
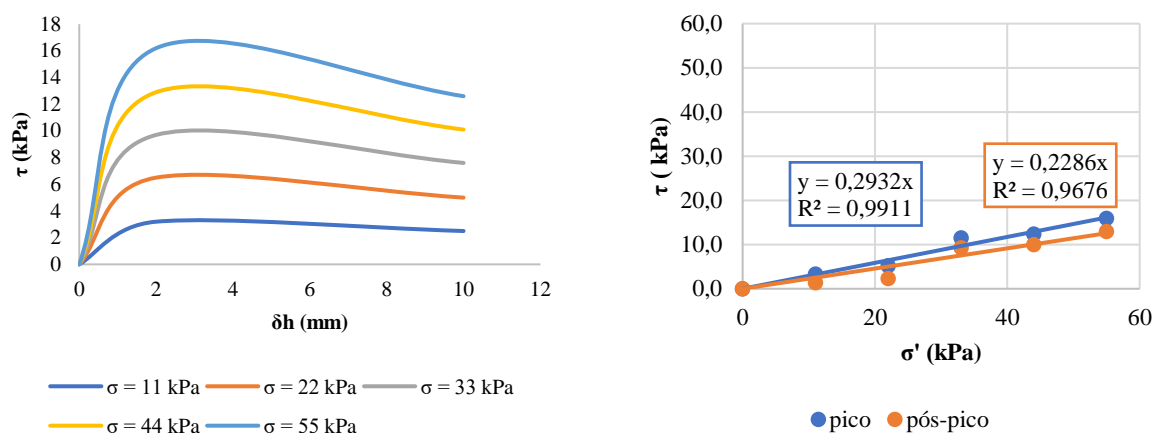


Figura 5.16 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 28 \text{ kg/m}^3$ )





**Figura 5.17 - Envoltórias de cisalhamento na interface EPS/ GBR-P PEAD lisa ( $\rho = 33,5 \text{ kg/m}^3$ )**



A Tabela 5.6 e a Figura 5.18 mostram um resumo dos dados obtidos e das envoltórias de pico e pós-pico na interface do EPS e geomembrana lisa, respectivamente.

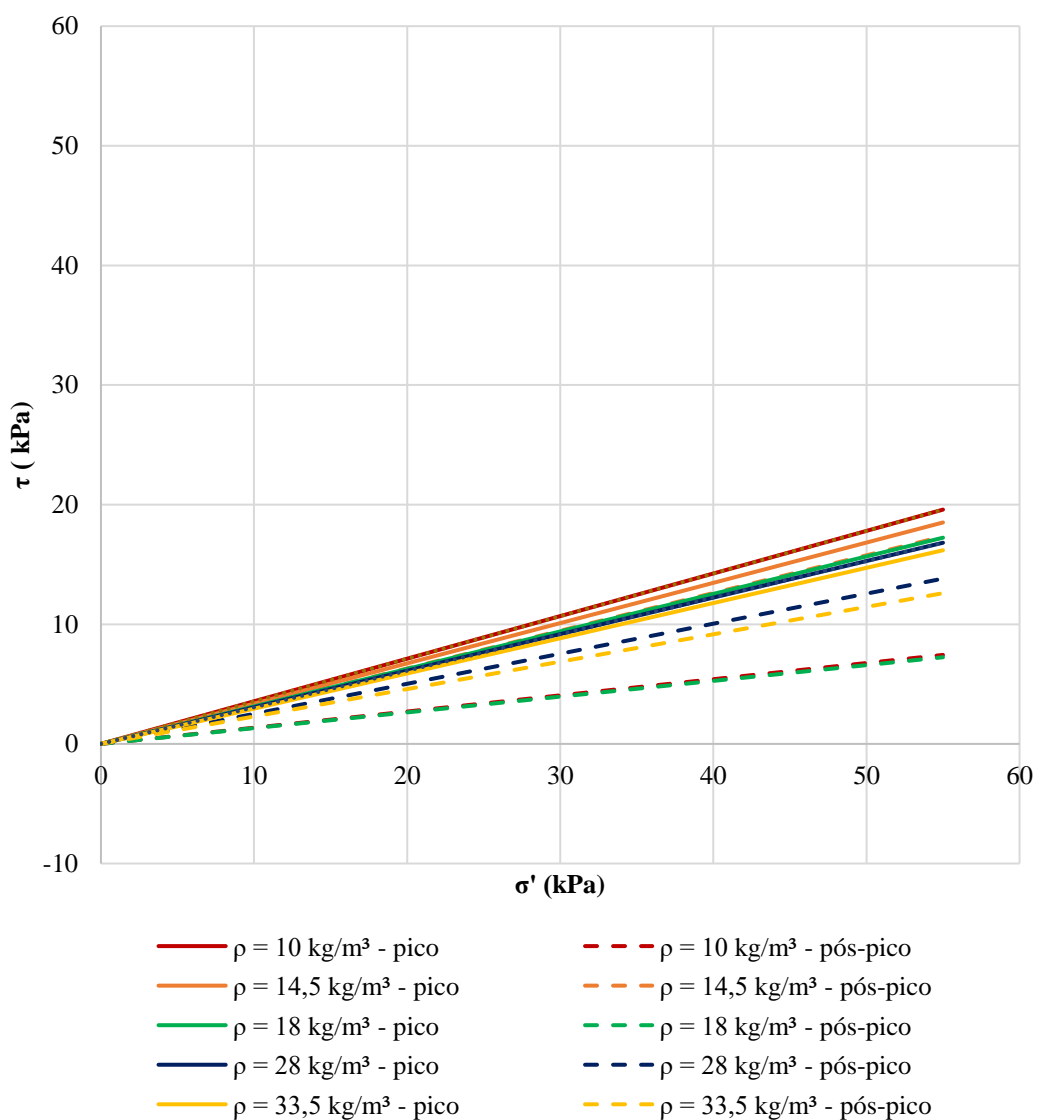
**Tabela 5.6 - Valores de adesão e ângulo de atrito para a interface EPS/Geomembrana lisa**

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	10		14,5		18		28		33,5	
$\tau$ (kPa)	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$	$\tau_p$	$\tau_{pp}$
$c_a$ (kPa)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\phi$ (°)	19,6	17,7	18,6	17,5	17,4	7,5	17,0	14,1	16,4	12,9
Redução de $\phi$ *	10,2%		6,2%		57,1%		17,4%		21,3%	

$\rho$  – massa específica;  $\phi$  – ângulo de atrito;  $\tau_p$  – tensão de pico;  $\tau_{pp}$  – tensão pós-pico;  $c_a$  – adesão.

(\*) Redução do  $\phi$  de pico para o  $\phi$  pós pico em 10 mm.

Figura 5.18 - Envoltórias de resistência de pico e pós-pico na interface EPS/Geomembrana lisa



Com os dados obtidos, é possível fazer uma análise com relação às configurações dos materiais e suas resistências no item seguinte.

## 5.2 Discussões

### 5.2.1 Ensaios de cisalhamento direto de interface

Segundo a ASTM D 7702 (2021), solos e interfaces geossintéticas podem exibir dois tipos de comportamento tensão-deformação: frágeis e dúcteis. O comportamento frágil apresenta uma resistência ao cisalhamento de pico bem definida em baixos deslocamentos, seguida de uma redução acentuada na resistência, até uma resistência residual baixa e relevante ser alcançada (essa redução da resistência pode ser causada pela perda da

rugosidade e aspereza da geomembrana com o deslocamento, ou em interfaces geossintéticas com argilas duras ou areias densas quando o plano de ruptura é forçado para dentro do solo frágil). O comportamento dúctil apresenta pouca redução na resistência, após o pico, com o aumento do deslocamento (característico da geomembrana lisa com interface em outros geossintéticos ou solos e interfaces de geotêxteis não tecidos com geotêxteis, interfaces geossintéticas com argilas moles e areias fofas onde o plano de ruptura é forçada para dentro do solo).

Os materiais apresentaram um comportamento elástico linear até uma deformação de aproximadamente 2%, um gráfico tensão-deslocamento típico de um material elastoplástico, e um comportamento dúctil, que pode ser um indicativo do deslizamento das interfaces. Dessa forma, a ruptura pode ser entendida como a resistência ao cisalhamento suficiente para superar a adesão ou o atrito das interfaces ensaiadas, separando-as, bem como uma possível transferência do plano de cisalhamento para a superfície mais frágil, podendo ser identificado por uma película do material mais frágil retida na superfície adjacente.

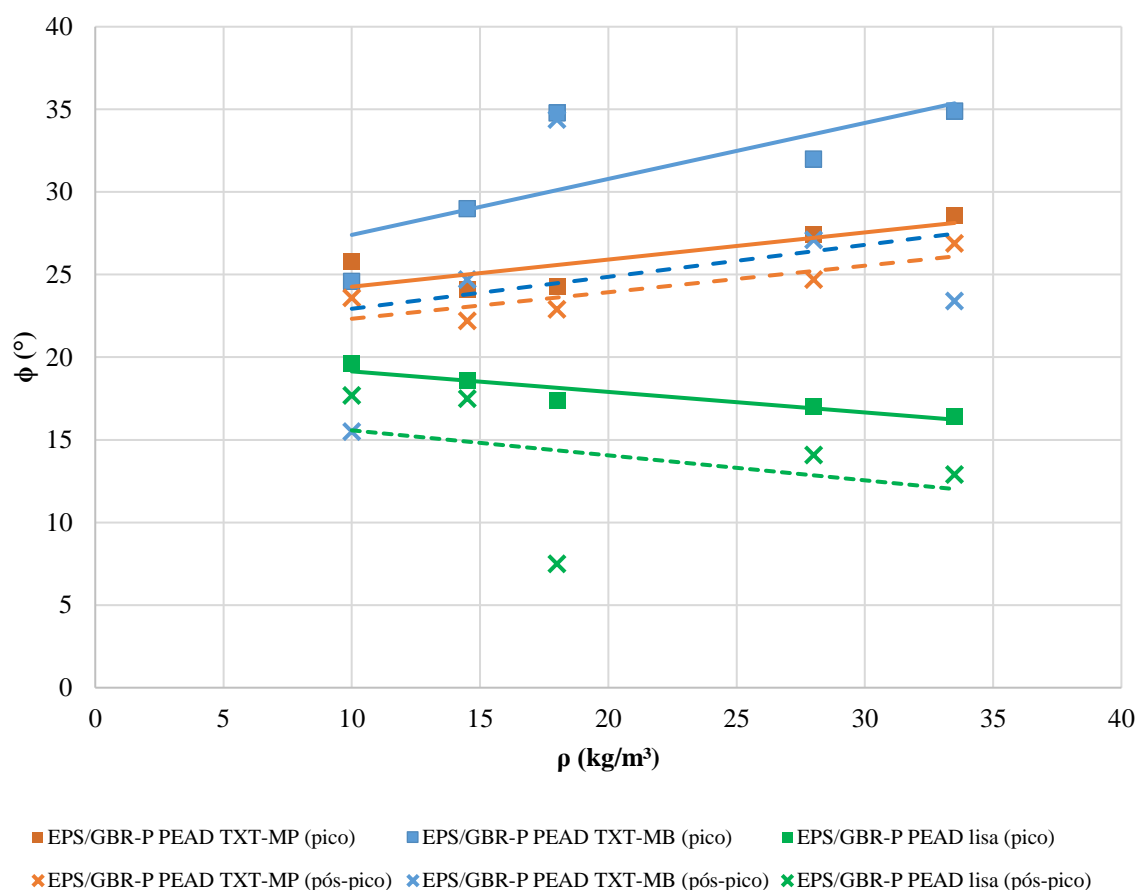
Os valores de adesão obtidos de todos os ensaios, foram nulos, sendo o cisalhamento resistido apenas pelo ângulo de atrito. A inexistência de forças de adesão, ou atração, atuando nas superfícies pode ser explicada pelas características físicas dos materiais ou pela ausência de água, por exemplo. Os valores do ângulo de atrito variaram entre 24° e 29° (pico) e de 22° a 27° (pós-pico) para a interface com geomembrana texturizada de matriz plana, entre 24° e 35° (pico) e de 15° a 34° (pós-pico) para a interface com geomembrana texturizada de matriz balão, e entre 16° e 20° (pico) e de 7° a 18° (pós-pico) para a geomembrana lisa.

As envoltórias foram crescentes (aumento do ângulo de atrito com o aumento da massa específica), exceto para a interface EPS/GBR-P PEAD lisa. O melhor resultado obtido foi para a geomembrana texturizada de matriz balão (melhor solução para aplicação em termos de resistência), seguida da geomembrana texturizada de matriz plana e geomembrana lisa, respectivamente. O melhor desempenho dessa geomembrana pode ser explicado pelo melhor atrito na superfície devido às suas características físicas, como a sua textura, por exemplo.

As envoltórias de pico e pós-pico da interface EPS/GBR-P TXT-MP apresentaram resultados e comportamentos similares, sendo o EPS de  $\rho = 28 \text{ Kg/m}^3$  o que apresentou a máxima diferença entre as resistências, da ordem de 10%. Portanto, eles apresentam um comportamento sem sensibilidade ao deslocamento horizontal, ou seja, sem aumento significativo na tensão cisalhante em relação ao deslocamento aplicado; e que pode ser explicado pela fragilidade do material na superfície.

Como nenhum ensaio de cisalhamento apresentou adesão, sendo o cisalhamento na interface resistido apenas pelo ângulo de atrito, neste trabalho também foram avaliados os valores de ângulo de atrito em função da massa específica para tensões de pico e de pós-pico, conforme comparação apresentada na Figura 5.19, a seguir.

**Figura 5.19 - Comparação dos valores de ângulo de atrito *versus* a massa específica para tensões de pico**



Há um comportamento crescente (linear) nessas correlações ( $\rho \times \phi$ ), indicando que quanto maior a massa específica maior o ângulo de atrito, exceto para as geomembranas lisas, possivelmente devido à menor rugosidade da superfície e redução do atrito. É possível observar também uma proximidade dos valores de ângulo de atrito das geomembranas texturizadas de matriz plana e balão, na maioria das massas específicas (exceto de 10 e 18  $\text{kg/m}^3$ ), com os valores pós-pico.

Pode-se concluir que conforme há a redução da massa específica, é possível observar um comportamento tendencioso aproximando-se a um valor de ângulo de atrito próximo a  $25^\circ$ . Para a geomembrana lisa, quanto maior a massa específica menor o ângulo de atrito na sua interface com o EPS, e conseqüentemente uma redução na resistência ao cisalhamento

desta interface. É possível concluir que quanto maior a massa específica, maior a resistência ao cisalhamento também com o aumento da tensão normal. Nota-se, também, um comportamento diferente para a massa específica de 18 kg/m<sup>3</sup>, pois muitos ensaios geraram *outliers*.

### **5.2.2 Validação e comparação com a literatura**

Quanto à tensão-deformação, todas as curvas apresentaram um comportamento sem pico bem definido, sendo as interfaces EPS/GBR-P PEAD TXT-MB (com  $\rho$  de 10 e 33,5 kg/m<sup>3</sup>) as que apresentaram um pico um pouco mais definido, ou seja, uma variação maior dos valores de tensão cisalhante com o aumento contínuo do deslocamento. Os valores obtidos possuem um comportamento similar ao apresentado na literatura para a interface de EPS/solos em algumas envoltórias; as quais apresentam um comportamento não linear, indicando efeitos diversos na interface e mudanças totais ou parciais do plano de cisalhamento para as tensões normais ou fases de interação diferentes.

A Tabela 5.7 e Tabela 5.8 apresentam uma comparação dos resultados obtidos com os dados existentes na literatura na interface de EPS com geomembrana, demonstrando como este estudo contribuiu para essas pesquisas.

Tabela 5.7 – Comparação dos resultados deste estudo com a literatura da interface EPS/GBR-P TXT

Interface (GBR-P)	Características do ensaio	Ângulo de atrito ( $\phi$ )	Referências	
GBR-P PEAD	Texturizada (1,5 mm)	Cisalhamento direto (caixas de dimensão: 100x100x25 mm), 1,2 mm/min (taxa de deslocamento), $\sigma = 14$ a 48 kPa	45,0° (pico e residual) ( $\sigma \leq 25$ kPa) 38,7° (pico e residual) ( $\sigma \approx 45$ kPa)	SHEELEY e NEGUSSEY (2000)
	Texturizada (saliências de 0,4 mm)	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	38,7° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)
	Texturizada (micro pontas de 0,55 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25), 0,2 mm/min até 10 mm, $\sigma = 11, 22, 33, 44$ e 55 kPa	31,4° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	
	Texturizada de matriz plana (3 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25), 0,2 mm/min até 10 mm, $\sigma = 11, 22, 33, 44$ e 55 kPa	25,0° (pico), 23,6° (pós-pico) ( $\rho = 10$ kg/m <sup>3</sup> ) 24,3° (pico), 22,9° (pós-pico) ( $\rho = 18$ kg/m <sup>3</sup> ) 28,6° (pico), 26,9° (pós-pico) ( $\rho = 33,5$ kg/m <sup>3</sup> )	MALAGHINI <i>et al.</i> (2019)
Texturizada (1,5 mm) de matriz plana	Cisalhamento direto (100x100 mm), 0,2 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma = 11, 22, 33, 44, 55$ kPa	25,8° (pico), 23,6° (pós-pico) ( $\rho = 10$ kg/m <sup>3</sup> ) 24,1° (pico), 22,2° (pós-pico) ( $\rho = 14,5$ kg/m <sup>3</sup> ) 24,3° (pico), 22,9° (pós-pico) ( $\rho = 18$ kg/m <sup>3</sup> ) 27,4° (pico), 24,7° (pós-pico) ( $\rho = 28$ kg/m <sup>3</sup> ) 28,6° (pico), 26,9° (pós-pico) ( $\rho = 33,5$ kg/m <sup>3</sup> )	Este estudo	
Texturizada (1,5 mm) de matriz balão	Cisalhamento direto (100x100 mm), 0,2 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma = 11, 22, 33, 44, 55$ kPa	24,6° (pico), 15,5° (pós-pico) ( $\rho = 10$ kg/m <sup>3</sup> ) 29,0° (pico), 24,7° (pós-pico) ( $\rho = 14,5$ kg/m <sup>3</sup> ) 34,8° (pico), 34,4° (pós-pico) ( $\rho = 18$ kg/m <sup>3</sup> ) 32,0° (pico), 27,1° (pós-pico) ( $\rho = 28$ kg/m <sup>3</sup> ) 34,9° (pico), 23,4° (pós-pico) ( $\rho = 33,5$ kg/m <sup>3</sup> )		
GBR-P PVC	Texturizada (0,8 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25 mm), 1,2 mm/min, $\sigma = 14$ a 48 kPa	$\approx 26,6^\circ$ (residual) (reduz levemente com a $\sigma$ )	SHEELEY e NEGUSSEY (2000)

Tabela 5.8 – Comparação dos resultados deste estudo com a literatura da interface EPS/GBR-P lisa

Interface (GBR-P)		Características do ensaio	Ângulo de atrito ( $\phi$ )	Referências
GBR-P PEAD	Lisa (1,5 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25 mm), 1,2 mm/min, $\sigma = 14$ a 48 kPa	16,2° (pico), 13,0° (residual) (independente da $\sigma$ )	SHEELEY e NEGUSSEY (2000)
	Lisa	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	15,1° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)
	Lisa (1,5 mm)	Cisalhamento direto (100x100 mm), 0,2 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma = 11, 22, 33, 44, 55$ kPa	<b>19,6° (pico), 7,7° (pós-pico) (<math>\rho = 10</math> kg/m<sup>3</sup>)</b> <b>18,6° (pico), 17,5° (pós-pico) (<math>\rho = 14,5</math> kg/m<sup>3</sup>)</b> <b>17,4° (pico), 7,5° (pós-pico) (<math>\rho = 18</math> kg/m<sup>3</sup>)</b> <b>17,0° (pico), 14,1° (pós-pico) (<math>\rho = 28</math> kg/m<sup>3</sup>)</b> <b>16,4° (pico), 12,9° (pós-pico) (<math>\rho = 33,5</math> kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Este estudo</b>
GBR-P PP	Lisa	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até $\delta_h$ de 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	25,6° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)
GBR-P PVC	Lisa (0,8 mm)	Cisalhamento direto (100x100x25 mm), 1,2 mm/min, $\sigma = 14$ a 48 kPa	35,0° (pico), $\approx 21,8^\circ$ (residual)	SHEELEY e NEGUSSEY (2000)
	Lisa	Cisalhamento direto (100x100 mm), 1,2 mm/min até 10 mm, $\sigma \pm 10\%$ de 66, 99, 136, 178 e 223 kPa	31,8° ( $\rho = 15$ kg/m <sup>3</sup> ) 33,0° ( $\rho = 20$ kg/m <sup>3</sup> ) 38,0° ( $\rho = 30$ kg/m <sup>3</sup> )	CHRYSIKOS <i>et al.</i> (2006)

Com as informações da Tabela 5.7 foi possível observar que:

- Sheeley e Negussey (2000) apresentaram valores maiores do que os encontrados no estudo para as texturizadas de PEAD, porém o valor da interface com PVC foi próximo. Apresentou também uma redução do  $\phi$  com o aumento da  $\sigma$ ;
- Com os valores apresentados por Chrysikos *et al.* (2006) foi possível constatar que quanto maior a altura de aspereza da GBR-P TXT menor o  $\phi$  na interface abordada. O  $\phi$  encontrado na interface EPS/GBR-P PEAD TXT de saliências de 0,4 mm foi significativamente maior do que os encontrados neste estudo, sendo que os valores na interface de micro pontas de 0,55 mm se aproximaram da interface de GBR-P PEAD TXT de matriz balão abordados neste estudo;
- Os valores encontrados neste estudo complementaram os encontrados por Malaghini *et al.* (2019) apresentando resultados para a mesma interface e valores intermediários de  $\rho$ , esses valores foram praticamente os mesmos, apresentando um comportamento muito semelhante e,
- Houve uma redução significativa (cerca de 30%) dos valores de  $\phi$  encontrados neste estudo da interface de GBR-P PEAD TXT-MB com maior  $\rho$  (33,5 kg/m<sup>3</sup>) para a menor  $\rho$  (10 kg/m<sup>3</sup>).

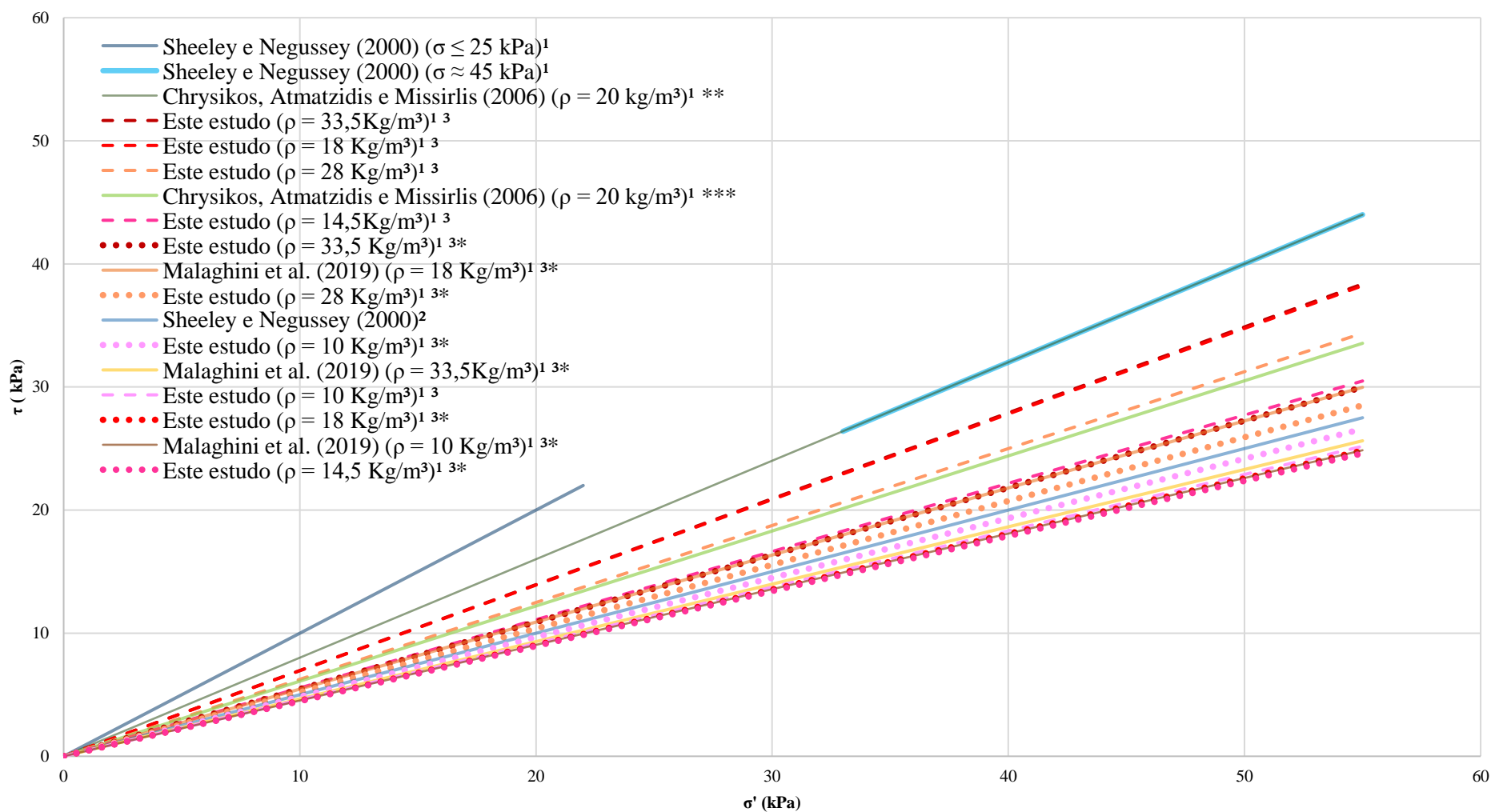
A Figura 5.20 representa as envoltórias dos valores obtidos nestes ensaios e os presentes na literatura para geomembrana texturizada.

A interface com geomembrana texturizada de PVC apresenta resistência menor do que as de PEAD, e também são comparáveis com a resistência na interface utilizando geomembranas de PEAD texturizadas de matriz plana (de todas as massas específicas) ou de matriz balão (com massa específica de 10 kg/m<sup>3</sup>).

As geomembranas texturizadas de matriz plana apresentaram resistências consideravelmente menores do que as texturizadas de matriz balão, sendo que a interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MP com massa específica de 33,5 kg/m<sup>3</sup> apresentou resistência menor do que na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB com massa específica de 14,5 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 5.20 - Comparação das envoltórias (na interface EPS/geomembrana texturizada) presentes na literatura com as deste estudo



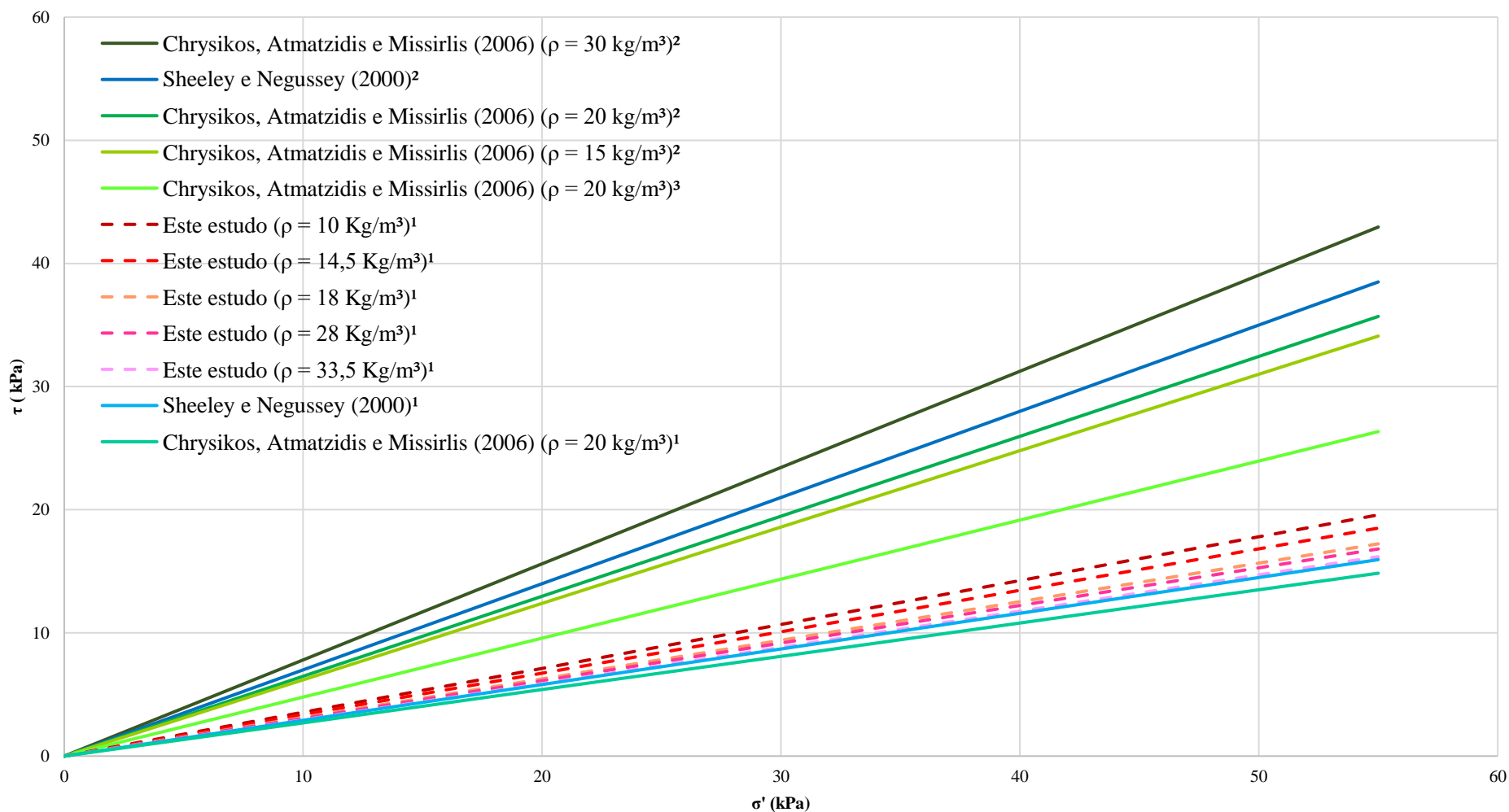
<sup>1</sup> EPS/GBR-P PEAD; <sup>2</sup> EPS/GBR-P PVC; <sup>3</sup> EPS/GBR-P TXT-MB; <sup>3\*</sup> EPS/GBR-P TXT-MP; \*\* saliências de 0,4 mm; \*\*\* micro pontas de 0,55 mm. As linhas contínuas representam estudos da literatura enquanto as tracejadas e pontilhadas representam este estudo, a geomembrana de matriz balão e matriz plana, respectivamente.

Com as informações da Tabela 5.8 foi possível observar que:

- Os valores encontrados para as lisas foram bem menores do que para as texturizadas, bem como apresentado anteriormente na literatura;
- Os valores encontrados foram menores com exceção das lisas de PVC, em que o ângulo de atrito foi maior do que para as lisas de PEAD, apresentados por Sheeley e Negussey (2000);
- Os valores de  $\phi$  encontrados por Sheeley e Negussey (2000) na interface EPS/GBR-P PVC TXT foram menores do que na interface EPS/GBR-P PVC lisa, ao contrário do comportamento encontrado para as interfaces com GBR-P PEAD, em que a texturizada apresentou maiores valores do que a lisa (comportamento também constatado neste estudo para as GBR-P PEAD);
- Segundo os dados de Chrysikos *et al.* (2006) a resistência na interface EPS/GBR-P PEAD lisas foi bem menor do que nas texturizadas e foi bem próxima da encontrada neste estudo;
- Seus dados também apresentaram um comportamento na interface EPS/GBR-P lisa de aumento da resistência com a mudança do tipo de polímero usado no material, sendo que a de PVC apresentou maior valor, seguida da de PP e por último, de PEAD, com o menor valor (apenas para superfícies lisas), e com uma diferença significativa entre o primeiro e o último;
- Os valores de  $\phi$  apresentados por Chrysikos *et al.* (2006) para a interface EPS/GBR-P PVC lisa foram crescentes com a  $\rho$ ;
- Os valores de  $\phi$  encontrados neste estudo para as GBR-P lisas foram bem menores do que as texturizadas e com um comportamento diferente, uma tendência de aumento do  $\phi$  com a redução da  $\rho$ , sendo que para as texturizadas o comportamento foi de redução do  $\phi$  com a redução da  $\rho$ .

A Figura 5.21 representa as envoltórias dos valores obtidos nestes ensaios e os presentes na literatura para geomembrana lisa.

**Figura 5.21 - Comparação das envoltórias (na interface EPS/geomembrana lisa) presentes na literatura com as deste estudo**



<sup>1</sup> EPS/GBR-P PEAD; <sup>2</sup> EPS/GBR-P PVC; <sup>3</sup> EPS/GBR-P PP; <sup>3\*</sup> EPS/GBR-P TXT-MP. As linhas contínuas representam estudos da literatura enquanto as tracejadas representam este estudo.

Na Figura 5.21 é possível comparar as envoltórias existentes com as geradas pelo estudo. As interfaces com geomembranas lisas de PVC apresentaram-se mais resistentes do que as lisas de PEAD, e a de PP apresentou ter uma resistência intermediária entre as duas.

As massas específicas maiores apresentaram menores resistências para as lisas, um comportamento inverso ao constatado para as geomembranas texturizadas.

Com base na literatura, Sheeley e Negussey (2000) avaliaram que a resistência entre EPS/GBR-P é baixa, consideravelmente menor do que interface entre blocos, com exceção da PEAD texturizada; e os valores encontrados neste estudo também apresentaram o mesmo comportamento, porém com valores aumentando e se aproximando aos da interface entre blocos (considerado um valor de  $38^\circ$  aproximadamente). Também concluíram que o efeito da  $\rho$  foi insignificante com a variação da  $\sigma$  utilizada, no entanto, isso não se verificou nos resultados em sua totalidade. Foi significativa para a interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB com  $\rho$  de  $10 \text{ kg/m}^3$  e comportamento pós-pico, e EPS/GBR-P PEAD lisa com  $\rho$  de 10, 18, 28 e  $33,5 \text{ kg/m}^3$  e comportamento pós-pico, sendo que a diferença dos valores de  $\phi$  destoou dos outros valores, bem como o comportamento das outras envoltórias, principalmente as de pico.

Chrysikos; Atmatzidis e Missirlis (2006) concluíram que as resistências também foram atritivas, com adesão nula e valores altos e baixos; sendo o maior  $\phi$  encontrado foi de  $34,9^\circ$  para a interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB e o menor foi de  $16,4^\circ$  para a interface de EPS/GBR-P PEAD lisa, ambos para a maior massa específica do EPS utilizada ( $\rho = 33,5 \text{ kg/m}^3$ ) e comportamento de pico. Eles identificaram que as superfícies mais rugosas afetaram significativamente o  $\phi$  entre eles, observado para as GBR-P PEAD, que melhoraram o atrito da interface excedendo a média de  $38,7^\circ$  entre blocos. E que os valores para a superfície lisa foram caracterizados como baixos, o que também se identificou neste estudo, sendo que a geomembrana mais rugosa, que é com a texturizada de matriz balão, apresentou valores entre  $24$  e  $35^\circ$ , a texturizada de matriz plana valores entre  $24$  a  $29^\circ$  e a lisa entre  $16$  e  $20^\circ$ , no entanto eles não ultrapassaram o valor da média entre blocos de  $38,7^\circ$  como apontado pela literatura.

Malaghini *et al.* (2019) identificaram que para baixas tensões normais, o atrito na interface foi muito próximo para essas massas específicas, o que também foi avaliado no estudo. Sendo apenas de  $10 \text{ kg/m}^3$  para a interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB e de 10, 18, 28 e  $33,5 \text{ kg/m}^3$  para interface EPS/GBR-P PEAD lisa, e todos nos valores residuais, que se distanciaram, tendo valores menores de  $\phi$ . Eles verificaram que as envoltórias foram pouco influenciáveis pelas  $\rho$ , com uma tendência de aumento do  $\phi$  (diminuição de cerca de 15% do

EPS com  $\rho$  de 33,5 kg/m<sup>3</sup> para o de 18 kg/m<sup>3</sup>) com o aumento da  $\rho$ , também constatado neste estudo com as seguintes reduções nos valores de  $\phi$  (pico):

- Na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MP: 4,2% (da  $\rho$  de 33,5 para a de 28 kg/m<sup>3</sup>), 15,0% (de 33,5 para 18 kg/m<sup>3</sup>): 15,7% (de 33,5 para 14,5 kg/m<sup>3</sup>) e 9,8% (de 33,5 para 10 kg/m<sup>3</sup>);
- Na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB: 8,3 % (da  $\rho$  de 33,5 para a de 28 kg/m<sup>3</sup>), 0,3% (de 33,5 para 18 kg/m<sup>3</sup>), 16,9% (de 33,5 para 14,5 kg/m<sup>3</sup>) e 29,5% (de 33,5 para 10 kg/m<sup>3</sup>).

Porém, houve redução apenas para as interfaces com GBR-P texturizadas, já com as geomembranas lisas a tendência foi de aumento do  $\phi$  com a diminuição da  $\rho$  (inversamente proporcional), com os seguintes valores de acréscimo:

- Na interface EPS/GBR-P PEAD lisa: 3,6% (da  $\rho$  de 33,5 para a de 28 kg/m<sup>3</sup>), 6,1% (de 33,5 para 18 kg/m<sup>3</sup>), 13,4% (de 33,5 para 14,5 kg/m<sup>3</sup>) e 19,5% (de 33,5 para 10 kg/m<sup>3</sup>).

Ainda com relação às avaliações de Malaghini *et al.* (2019), o comportamento de pico e pós-pico também foi muito próximo para a interface EPS/GBR-P TXT-MP (redução em cerca de 7% dos seus parâmetros do comportamento de pico para o pós-pico), porém para as interfaces EPS/GBR-P TXT-MB e EPS/GBR-P PEAD lisa os valores apresentaram uma redução de 20% e 22%, respectivamente, sendo valores relativamente expressivos.

Os ensaios também apresentaram pouca sensibilidade ao deslocamento horizontal ( $\delta h$ ), a máxima tensão cisalhante ( $\tau$ ) ocorreu na metade dos ensaios e sem ruptura brusca ou um pico bem definido. Também houve uma leve tendência de diminuição das  $\tau$  quando atingida a deformação pós-pico ( $\delta h$  de 10 mm), tendendo a um valor constante próximo ao máximo e quanto maior a tensão normal, nota-se que as tensões cisalhantes também foram se distanciando com uma tendência de redução dos seus valores.

Para as interfaces texturizadas, a maior densidade (33,5 kg/m<sup>3</sup>) apresentou o melhor desempenho, no entanto, para a interface com GBR-P lisa esse comportamento foi apresentado para a menor densidade (10 kg/m<sup>3</sup>). Os valores do  $\phi$  para as interfaces texturizadas também foram próximos aos dos solos arenosos (considerando um valor de aproximadamente 30°).

A menor densidade ( $10 \text{ kg/m}^3$ ) também sofreu deformação vertical muito grande quando aplicadas maiores de tensões normais (33, 44 e 55 kPa), inviabilizando o ensaio e a análise das envoltórias para esses pontos (analisada apenas para as  $\sigma$  de 11 e 22 kPa). Esse comportamento foi constatado para todos os ensaios (todas as interfaces).

A resistência ao cisalhamento também teve uma contribuição devido à penetração das saliências da geomembrana na superfície do EPS com maiores tensões normais. Esse comportamento também foi constatado como mais intenso em densidades menores (devido ao aumento dos valores da tensão cisalhante).

A seguir, está apresentado um resumo das considerações levantadas pelos autores na literatura e as conclusões tiradas deste estudo por meio de um quadro comparativo.

**Tabela 5.9 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas aos valores dos parâmetros de resistência de interface**

Avaliações da literatura	Avaliações deste estudo
Resistência entre EPS/GBR-P é baixa, consideravelmente menor do que interface entre blocos, com exceção da PEAD texturizada (SHEELEY e NEGUSSEY, 2000).	Os valores encontrados foram consideravelmente menores do que na interface entre blocos, bem como a de PEAD texturizada, porém com valores aumentando e se aproximando aos da interface entre blocos (considerado um valor de $38^\circ$ , aproximadamente).
Resistências foram atritivas, com valores altos e baixos (CHRYSIKOS; ATMATZIDIS; MISSIRLIS, 2006).	As resistências encontradas também foram atritivas, adesão nula, e com valores altos e baixos, sendo o maior $\phi$ encontrado de $34,9^\circ$ para a interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB e o menor de $16,4^\circ$ para a interface de EPS/GBR-P PEAD lisa, ambos para a maior massa específica do EPS utilizada ( $\rho = 33,5 \text{ kg/m}^3$ ) e comportamento de pico.
Os valores com superfície lisa foram caracterizados como baixos. CHRYSIKOS; ATMATZIDIS; MISSIRLIS (2006)	Os valores dos parâmetros de resistência na interface EPS/GBR-P PEAD lisa também foram caracterizados como baixos.
Comportamento de pico e pós-pico foi muito próximo (redução em cerca de 6% dos seus parâmetros) (MALAGHINI <i>et al.</i> , 2019).	O comportamento de pico e pós-pico também foi muito próximo para a interface EPS/GBR-P TXT-MP (redução em cerca de 7% dos seus parâmetros do comportamento de pico para o pós-pico), porém para as interfaces EPS/GBR-P TXT-MB e EPS/GBR-P PEAD lisa os valores apresentaram uma redução de 20% e 22%, respectivamente, sendo valores relativamente expressivos.

**Tabela 5.10 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas aos efeitos da tensão normal na resistência de interface**

Avaliações da literatura	Avaliações deste estudo
Efeito da $\rho$ foi insignificante com a variação da $\sigma$ utilizada (SHEELEY e NEGUSSEY, 2000).	O efeito da $\rho$ com a variação da $\sigma$ utilizada não foi insignificante nos resultados em sua totalidade; foi significativa para a interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB com $\rho$ de 10 kg/m <sup>3</sup> e comportamento pós-pico, e EPS/GBR-P PEAD lisa com $\rho$ de 10, 18, 28 e 33,5 kg/m <sup>3</sup> e comportamento pós-pico; a diferença dos valores de $\phi$ destoou dos outros valores, bem como o comportamento das outras envoltórias, principalmente as de pico.
Para baixas $\sigma$ o atrito de interface foi muito próximo para as $\rho$ (MALAGHINI <i>et al.</i> , 2019).	Para baixas $\sigma$ o atrito de interface também foi muito próximo para as $\rho$ utilizadas, sendo a de 10 kg/m <sup>3</sup> para a interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB e de 10, 18, 28 e 33,5 kg/m <sup>3</sup> para interface EPS/GBR-P PEAD lisa, e todos nos valores residuais, que se distanciaram, tendo valores menores de $\phi$ .

**Tabela 5.11 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas aos efeitos da rugosidade e tipo de polímero na resistência de interface**

Avaliações da literatura	Avaliações deste estudo
O tipo de polímero afetou significativamente o $\phi$ entre eles (CHRYSIKOS; ATMATZIDIS; MISSIRLIS, 2006).	No estudo foi utilizado apenas um tipo de polímero, e os valores foram próximos às interfaces que utilizaram o mesmo polímero.
Superfícies mais rugosas afetaram significativamente o $\phi$ entre eles, observado para as GBR-P PEAD, que melhoraram o atrito da interface excedendo a média de 38,7° entre blocos (CHRYSIKOS; ATMATZIDIS; MISSIRLIS, 2006).	As superfícies mais rugosas também afetaram significativamente o $\phi$ entre eles, sendo que a mais rugosa (texturizada de matriz balão) apresentou valores entre 24 e 35°, a texturizada de matriz plana valores entre 24 a 29° e a lisa entre 16 e 20°, no entanto, eles não ultrapassaram o valor da média entre blocos de 38,7° como apontado na literatura.
Para maiores $\sigma$ as saliências da geomembrana penetraram a superfície do EPS, que contribuiu com a resistência, e essa penetração foi mais profunda e alongada para $\rho$ menores (MALAGHINI <i>et al.</i> , 2019).	A resistência ao cisalhamento também teve uma contribuição devido à penetração das saliências da geomembrana na superfície do EPS com maiores $\sigma$ , e esse comportamento também foi constatado como mais intenso em $\rho$ menores (devido ao aumento dos valores da $\tau$ ).

**Tabela 5.12 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas ao comportamento tensão-deformação**

Avaliações da literatura	Avaliações deste estudo
Pouca sensibilidade ao $\delta h$ , sendo que a máxima $\tau$ ocorreu na metade do ensaio, sem ruptura brusca (pico bem definido) (MALAGHINI <i>et al.</i> , 2019).	Os ensaios deste estudo também apresentaram pouca sensibilidade ao $\delta h$ , a máxima $\tau$ ocorreu na metade dos ensaios e sem ruptura brusca ou um pico bem definido.
Leve tendência de diminuição das $\tau$ quando atingida a deformação pós-pico ( $\delta h$ de 10 mm), tendendo a um valor constante próximo ao máximo, e quanto maior a $\sigma$ as $\tau$ foram se distanciando (MALAGHINI <i>et al.</i> , 2019).	Também houve uma leve tendência de diminuição das $\tau$ quando atingida a deformação pós-pico ( $\delta h$ de 10 mm), tendendo a um valor constante próximo ao máximo e quanto maior a $\sigma$ as $\tau$ também foram se distanciando com uma tendência de redução dos seus valores.

**Tabela 5.13 – Quadro comparativo das avaliações deste estudo com a literatura, relacionadas aos efeitos da massa específica na resistência de interface**

Avaliações da literatura	Avaliações deste estudo
As envoltórias foram pouco influenciáveis pelas $\rho$ , com uma tendência de aumento do $\phi$ (diminuição de cerca de 15% do EPS com $\rho$ de 33,5 kg/m <sup>3</sup> para o de 18 kg/m <sup>3</sup> ) (MALAGHINI <i>et al.</i> , 2019).	<p>As envoltórias encontradas também foram pouco influenciáveis pela <math>\rho</math>, com uma tendência de aumento do <math>\phi</math> com o aumento da <math>\rho</math>, com as seguintes reduções nos valores de <math>\phi</math> (pico):</p> <p>Na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MP:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 28 kg/m<sup>3</sup>: 4,2%;</li> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 18 kg/m<sup>3</sup>: 15,0%;</li> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 14,5 kg/m<sup>3</sup>: 15,7%;</li> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 10 kg/m<sup>3</sup>: 9,8%.</li> </ul> <p>Na interface EPS/GBR-P PEAD TXT-MB:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 28 kg/m<sup>3</sup>: 8,3%;</li> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 18 kg/m<sup>3</sup>: 0,3%;</li> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 14,5 kg/m<sup>3</sup>: 16,9%;</li> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 10 kg/m<sup>3</sup>: 29,5%.</li> </ul> <p>Porém, houve a redução apenas para as interfaces com GBR-P texturizadas, com as lisas a tendência foi de aumento do <math>\phi</math> com a diminuição da <math>\rho</math> (inversamente proporcional), com os seguintes valores de acréscimo:</p> <p>Na interface EPS/GBR-P PEAD lisa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 28 kg/m<sup>3</sup>: 3,6%;</li> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 18 kg/m<sup>3</sup>: 6,1%;</li> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 14,5 kg/m<sup>3</sup>: 13,4%;</li> <li>• Da <math>\rho</math> de 33,5 para a de 10 kg/m<sup>3</sup>: 19,5%.</li> </ul>
A maior $\rho$ (33,5 kg/m <sup>3</sup> ) apresentou o melhor desempenho, com os valores do $\phi$ próximos aos dos solos arenosos (aproximadamente 30°) (MALAGHINI <i>et al.</i> , 2019).	<p>Para as interfaces texturizadas a maior <math>\rho</math> (33,5 kg/m<sup>3</sup>) apresentou o melhor desempenho, no entanto para a interface com GBR-P lisa esse comportamento foi apresentado para a menor <math>\rho</math> (10 kg/m<sup>3</sup>).</p> <p>Os valores do <math>\phi</math> para as interfaces texturizadas também foram próximos aos dos solos arenosos (considerando um valor de aproximadamente 30°).</p>



## 6 CONCLUSÕES

As principais conclusões estão sumarizadas a seguir.

- Por meio da revisão bibliográfica foi possível concluir principalmente que há carência de análises para esses materiais utilizando características diferentes, principalmente com variação da massa específica do EPS, ensaios de larga escala ou de plano inclinado (incluindo comparações), e outras variações como conteúdo de água e deslocamentos horizontais.
- Com relação aos parâmetros de resistência foi possível concluir que:
  - Essa interface não apresentou adesão significativa e a resistência foi mantida apenas pelo ângulo de atrito, que variaram de 24°-29° e 22°-27° para a interface com geomembrana texturizada de matriz plana, de 24°-35° e de 15°-34° para a interface com geomembrana texturizada de matriz balão, e de 16°-20° e de 7°-18° para a geomembrana lisa, nos valores de pico e pós-pico, respectivamente;
  - Esses valores aumentaram com a massa específica (exceto para interface com geomembrana lisa que apresentou um comportamento inverso). A geomembrana texturizada de matriz balão apresentou melhor desempenho, em termos de resistência, seguida pela geomembrana texturizada de matriz plana e, por fim, a geomembrana lisa.
- Com base nos resultados obtidos e nos dados existentes na literatura da interface EPS/Geomembrana foi possível concluir principalmente que:
  - Os resultados dos ensaios realizados foram próximos aos encontrados na literatura para as interfaces que utilizaram o mesmo polímero;
  - A interface com geomembrana texturizada de PVC apresentou menor resistência do que as de PEAD. No entanto, as interfaces com geomembranas lisas de PVC foram mais resistentes do que as lisas de PEAD.

É possível inferir, portanto, que o estudo contribuiu de forma a gerar novos dados de parâmetros de resistência e novas avaliações na interface EPS/Geomembrana com valores intermediários de massa específica; bem como apresentando novas discussões na avaliação de interface entre os materiais e observações que podem auxiliar outros estudos com diferentes materiais.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Observando tudo o que foi realizado até o momento, tanto deste trabalho quanto da literatura, é possível ainda fazer algumas outras contribuições para o assunto abordado. Portanto, recomenda-se para pesquisas futuras:

- Realizar ensaios e novas comparações e análises na interface do EPS com geomembranas de outros polímeros usadas comercialmente (como PVC e PP), nas condições seca e inundada, refazer esses ensaios em larga escala, plano inclinado ou outro ensaio que tenha uma abordagem mais representativa, complementando com os dados apresentados;
- Avaliar os parâmetros de resistência de interface (adesão e ângulo de atrito) entre EPS e geomembrana considerando diferentes teores de umidade do EPS;
- Utilizar os dados levantados da literatura para novos estudos em interfaces de EPS com geotêxteis e solos arenoso e argiloso;
- Realizar ensaios e avaliações na interface do EPS com outros materiais de construção como concreto (com agregados mais usados), madeira, aço, geossintéticos (como geogrelha e geocélula) ou materiais reciclados (incluindo EPS reciclado), *etc.*;
- Analisar todos os dados e comparar com resultados de cisalhamento interno do bloco ou de interface entre blocos, bem como impacto de emendas em geomembranas, por exemplo;
- Avaliar, comparar e levantar dados do comportamento tensão *versus* deformação e parâmetros de resistência em todas essas interfaces nas condições seca e inundada, e avaliar os efeitos da dimensão fractal e de fases de interação das interfaces com diferentes tensões normais e;
- Avaliar a influência da dimensão do ensaio utilizando caixas maiores, como ensaios de 60, 100, 200 e 300 mm, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AABOE, R. **13 Years of Experience with Expanded Polystyrene as a Lightweight Fill Material in Road Embankments**. Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, Norway, n. 61, p. 21–27, 1987.

AABOE, R. **Evidence of EPS long term performance and durability as a light weight fill**. Vegteknisk avdeling. Anais...2000.

ABDELSALAM, S. S.; AZZAM, S. A. **Reduction of lateral pressures on retaining walls using geofabric inclusion**. Geosynthetics International, v. 23, n. 6, p. 395–407, 1 dez. 2016.

ABDELSALAM, S. S.; AZZAM, S. A.; FAKHRY, B. M. **Reliability and 3D Modeling of Flexible Walls with EPS Inclusion**. International Journal of Geomechanics, v. 17, n. 7, jul. 2017.

ABDELSALAM, S. S.; JAMA, R. A.; SALAH, M. A. **EPS inclusion to reduce vertical stresses on shallow tunnels**. Geosynthetics International, v. 26, n. 2, p. 121–135, 2019.

ABDULMUTTALIP, A.; AKBULUT, S. **Effect of fractal dimension on sand-geosynthetic interface shear strength**. Powder Technology, v. 401, 1 mar. 2022.

ABU-HEJLEH, N. M. *et al.* **Design assessment of the founders/meadows GRS abutment structure**. Proceedings of TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM, 2003.

ALAIE, R.; CHENARI, R. J. **Cyclic and Post-Cyclic Shear Behaviour of Interface between Geogrid and EPS Beads-Sand Backfill**. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 22, n. 9, p. 3340–3357, 1 set. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1004**: Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting. West Conshohocken: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1505**: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics 1. West Conshohocken: ASTM, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1603**: Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics. West Conshohocken: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken: ASTM, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3895**: Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry. West Conshohocken: ASTM, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4218**: Standard Test Method for Determination of Carbon Black Content in Polyethylene Compounds by the Muffle-Furnace Technique. West Conshohocken: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4439**: Standard Terminology for Geosynthetics. West Conshohocken: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4491**: Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity. West Conshohocken: ASTM, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4533**: Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles 1. West Conshohocken: ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4595**: Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method 1. West Conshohocken: ASTM, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4632**: Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles 1. West Conshohocken: ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4716**: Standard Test Method for Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic

Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head. West Conshohocken: ASTM, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4751**: Standard Test Methods for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile. West Conshohocken: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4833**: Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products. West Conshohocken: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5199**: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics 1. West Conshohocken: ASTM, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5261**: Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles 1. West Conshohocken: ASTM, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5321**: Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear 1. West Conshohocken: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5397**: Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test. West Conshohocken: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5596**: Standard Test Method for Microscopic Evaluation of the Dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics. West Conshohocken: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5721**: Standard Practice for Air-Oven Aging of Polyolefin Geomembranes. West Conshohocken: ASTM, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5885**: Standard Test Method for Oxidative Induction Time of Polyolefin Geosynthetics by High-Pressure Differential Scanning Calorimetry. West Conshohocken: ASTM, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5994**: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics 1. West Conshohocken: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6241**: Standard Test Method for Static Puncture Strength of Geotextiles and Geotextile-Related Products Using a 50-mm Probe 1. West Conshohocken: ASTM, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6693**: Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes. West Conshohocken: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6817**: Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofoam 1. West Conshohocken: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7180**: Designation: D7180/D7180M Standard Guide for Use of Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam in Geotechnical Projects 1. West Conshohocken: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7238**: Standard Test Method for Effect of Exposure of Unreinforced Polyolefin Geomembrane Using Fluorescent UV Condensation Apparatus. West Conshohocken: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7466**: Designation: D7466 – 10 Standard Test Method for Measuring Asperity Height of Textured Geomembranes 1. West Conshohocken: ASTM, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7702**: Standard Guide for Considerations When Evaluating Direct Shear Results Involving Geosynthetics 1. West Conshohocken: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D792**: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement 1. West Conshohocken: ASTM, 2020.

ANUBHAV; BASUDHAR, P. K. **Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results**. Geotextiles and Geomembranes, v. 28, n. 4, p. 403–408, ago. 2010.

ARVIN, M. R.; ABBASI, M.; KHALVATI FAHLIANI, H. **Shear behavior of geocell-geofoam composite**. Geotextiles and Geomembranes, v. 49, n. 1, p. 188–195, 1 fev. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃOTECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS. **Curso Básico de Geotêxteis**. 1. Ed. São Paulo: Comitê Técnico Geotêxtil (CTG), 95 p., 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12824**: Geotêxteis – Determinação da resistência à tração não-confinada – Ensaio de tração de faixa larga – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13359**: Geotêxteis – Determinação da resistência ao puncionamento estático – Ensaio com pistão tipo CBR – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15856**: Geomembranas e produtos correlatos – Determinação das propriedades de tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16757-1**: Geossintéticos – Requisitos para aplicação. Parte 1: Geotêxteis e produtos correlatos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16757-2**: Geossintéticos – Requisitos para aplicação. Parte 2: Barreiras geossintéticas. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16866**: Poliestireno expandido (EPS) - Determinação das propriedades - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9863-1**: Geossintéticos – Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camada única. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9864**: Geossintéticos – Método de ensaio para determinação de massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10318-1**: Geossintéticos. Parte 2: Termos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10319**: Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 12236**: Geossintéticos – Ensaio de punção estático (punção CBR). Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 13937-2**: Têxteis – Propriedades de rasgamento de tecidos. Parte 2: Determinação da força de rasgamento de corpos de prova de rasgo simples (método do rasgo único). Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ATHANASOPOULOS, G. A. *et al.* **Reducing the seismic earth pressure on retaining walls by EPS geofam buffers – numerical parametric study**. CD Proceedings of 2007 Geosynthetics Conference. Washington DC, USA, p. 15, 2007.

ATHANASOPOULOS, G. A.; PELEKIS, P. C.; XENAKI, V. C. **Dynamic properties of EPS geofam**: an experimental investigation. *Geosynthetics Internacional*, v. 6, n. 3, p. 171–194, 1999.



ATMATZIDIS, D. K.; MISSIRLIS, E. G.; CHRYSIKOS, D. A. **an investigation of EPS geofam behavior in compression**. Rio, Patra, Greece, University of Patras, Department of Civil Engineering, p. 1-11, 2001.

AVESANI NETO; BUENO. **Laboratory research on EPS blocks used in geotechnical engineering**. Soils and Rocks, v. 35, n. 2, p. 169-180, 2012.

AVESANI NETO, J. O. **Caracterização do comportamento geotécnico do EPS através de ensaios mecânicos e hidráulicos**. 2008. Dissertação de mestrado—São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 227 p., 2008.

BARRETT, J. C.; VALSANGKAR, A. J. **Effectiveness of connectors in geofam block construction**. Geotextiles and Geomembranes, v. 27, n. 3, p. 211–216, jun. 2008.

BARTLETT, S. F.; LINGWALL, B. N.; VASLESTAD, J. **Methods of protecting buried pipelines and culverts in transportation infrastructure using EPS geofam**. Geotextiles and Geomembranes, v. 43, n. 5, p. 450–461, 1 out. 2015.

BEJU, Y. Z.; MANDAL, J. N. **Experimental Investigation of Shear Strength Behaviors of Stone Dust–EPS Geofam Interface**. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, v. 22, n. 4, out. 2018.

BORSATTO, M. B. *et al.* **Resistência ao cisalhamento direto do poliestireno expandido (EPS)**. Em: AGUILERA, J. G.; ZUFFO, A. M. (Eds.). Ciências Exatas e da Terra e a Dimensão Adquirida através da Evolução Tecnológica. 1. ed. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. v. 4, p. 111–120.

BORSATTO, M. B. **Avaliação das propriedades hidráulicas e mecânicas do geoexpandido (EPS) por meio de ensaios de laboratório**. 2020. Dissertação de mestrado—Bauru: Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, SP, 124 p., 2020.

CANEVALORO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**. 1. ed. São Paulo, SP, Editora Artibler, p. 1-184, 2002.

CARNEIRO NETO, M. M. **Avaliação da degradação do poliestireno expandido (geofoam) por meio de ensaios de laboratório.** 2019. Dissertação de mestrado—Bauru, SP: Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, SP, 111 p., 2019.

CHRYSIKOS, D. A.; ATMATZIDIS, D. K.; MISSIRLIS, E. G. **EPS geofoam surface shear resistance.** *Geosynthetics*, p. 1647–1650, 2006.

DING, L. Q. *et al.* **Modelling and calculating lateral pressure of expansive soil-EPS inclusion-retaining wall system.** *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, v. 43, n. 8, p. 1558–1564, 1 ago. 2021.

DUSKOV, M. **Use of expanded polystyrene (EPS) in flexible pavements on poor subgrades.** *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development*. Vol. 1, Yokohama, Japan, p. 783-788, 1991.

DUSKOV, M. **Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures.** *Geotextiles and Geomembranes*, n. 15, p. 147–181, 1998.

ELRAGI, A. **Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam.** Ph.D, thesis—Syracuse, NY: State University of New York, 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14415:** Geosynthetic barriers – Screening test method for determining the resistance to oxidation. CEN, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14575:** Geosynthetic barriers – Test method for determining the resistance to leaching. CEN, 2004.

FRYDENLUND, T. E. **Expanded Polystyrene-a Lighter Way Across Soft Ground,** International Report No. 1502. Norwegian Road Research Laboratory, Solo, Norway, 12 p., 1991.

FRYDENLUND, T. E.; AABOE, R. **Expanded polystyrene-the light solution.** International Symposium on EPS Construction Method, EPS TOKYO’96, Tokyo, Japan, p. 32-46, 1996.

GEOSYNTHETIC RESEARCH INSTITUTE. **GRI GM13**: Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes. Folsom, Pennsylvania: GRI, 2021.

GEOSYNTHETIC RESEARCH INSTITUTE. **GRI GT12a**: Test Methods and Properties for Nonwoven Geotextiles Used as Protection (or Cushioning) Materials. Folsom, Pennsylvania: GRI 2017.

HE, P. F. *et al.* **Testing and modeling of frozen clay–concrete interface behavior based on large-scale shear tests**. *Advances in Climate Change Research*, v. 12, n. 1, p. 83–94, 1 fev. 2021.

HORVATH, J. S. **The compressible inclusion function of EPS geofoam**. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 15, n. 1–3, p. 77–120, 1997.

HORVATH, J. S. **Concepts for Cellular Geosynthetics Standards with an Example for EPS-Block Geofoam as Lightweight Fill for Roads**. Bronx, New York, Manhattan College, School of Engineering, Center for Geotechnology, p. 1-93, 2001.

HORVATH, J. S. **Extended Veletsos-Younan Model for Geofoam Compressible Inclusions Behind Rigid, Non-Yielding Earth-Retaining Structures**. American Society of Civil Engineers Geo-Institute, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, p. 1–11, 18 maio 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1183-2**: Plastics – Methods for determining the density of non-cellular plastics – Part 2: Density gradient column method. ISO, 2019.

JAFARI, H. **Mechanical and Hydraulic Behavior of Geosynthetic Aggregate Drainage Systems and the Effectiveness of Geofoam as a Compressible Inclusion over Flexible Pipe**. Memphis, Tennessee: University of Memphis, 2010.

JUTKOFISKY, W. S.; SUNG, J. T.; NEGUSSEY, D. **Stabilization of Embankment Slope with Geofoam**. *Transportation Research Record*, v. 1736, n. 00–1315, p. 94–102, 2000.

KHAN, M. I.; MEGUID, M. A. **Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofam.** International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, v. 4, n. 2, 1 jun. 2018.

LIU, C. N.; HO, Y. H.; HUANG, J. W. **Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces.** Geotextiles and Geomembranes, v. 27, n. 1, p. 19–30, fev. 2009.

MAGNAN, J. P.; SERRATRICE, J. F. **Mechanical Properties of Expanded Polystyrene for Applications in Road Embankment.** Laboratoire Central Ponts et Chaussées, Paris, France, Bull Liaison LCPC, n. 164, p. 25–31, 1989.

MALAGHINI, B. R. *et al.* **Avaliação da Resistência de Interface do Poliestireno Expandido com Geomembrana texturizada de Polietileno.** Em: VILAR, O. M.; PORTELINHA, F. H. M. (Eds.). VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos. São Carlos, SP: EESC - USP, 2019. v. 8p. 543–549.

MARRADI, A.; PINORI, U.; BETTI, G. **The Use of Lightweight Materials in Road Embankment Construction.** Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 53, p. 1001–1010, out. 2012.

MCDONALD, O.; BROWN, P. G. **Ultra lightweight polystyrene for bridge approach fill.** Proceedings of the 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, p. 664–668, 1993.

MCGUIGAN, B. L.; VALSANGKAR, A. J. **Earth pressures on twin positive projecting and induced trench box culverts under high embankments.** Canadian Geotechnical Journal, v. 48, n. 2, p. 173–185, fev. 2011.

MEGUID, M. A. *et al.* **Investigation of soil-geosynthetic-structure interaction associated with induced trench installation.** Geotextiles and Geomembranes, v. 45, n. 4, p. 320–330, 1 ago. 2017.

MEGUID, M. A.; KHAN, M. I. **On the role of geofam density on the interface shear behavior of composite geosystems.** International Journal of Geo-Engineering, v. 10, n. 1, 1 dez. 2019.

MOHAJERANI, A. *et al.* **Expanded polystyrene geofoam in pavement construction.** Construction and Building Materials, v. 157, p. 438-448, 30 dez. 2017.

NEGUSSEY, D. *et al.* **Performance of a Geofoam Embankment at 100 South, I-15 Reconstruction Project, Salt Lake City, Utah.** Proceedings of the 3rd International Conference on EPS Geofoam. Salt Lake City, UT: 2001.

NEGUSSEY, D. **Slope Stabilization with Geofoam.** Report to FHWA and the EPS Industry. Geofoam Research Center, Syracuse University, Syracuse, New York. 2002.

NEGUSSEY, D.; SUN, M. **Reducing lateral pressure by geofoam (EPS) substitution.** International Symposium on EPS Construction Method. Tokyo: out. 1996.

NORWEGIAN ROAD RESEARCH LABORATORY. **Use of expanded polystyrene in road embankments: design, construction and quality assurance.** Norwegian Public Roads Administration, Directorate of Public Roads, Oslo, Norway: 1992.

ÖZER, A. T.; AKAY, O. **Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofoam.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, n. 4, p. 1–13, abr. 2016.

ÖZER, A. T.; AKAY, O. **Interface Shear Strength of EPS-Concrete Elements of Various Configurations.** Journals of Materials in Civil Engineering, v. 34, n. 6, p. 1-15, 2022.

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, 1 jan. 2014.

REFSDAL, G. **Plastic Foam in Road Embankments: Future Trends of EPS Use.** Internal Report. Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, Norway: 1985.

ROH, H. S.; CHOI, Y. C.; KIM, S. H. **Earth pressures on culvert during compaction of blackfill.** International Society for Rock Mechanics Symposium, 19 nov. 2000.

ROLLINS, K.; FREDRICKSON, A.; SCOTT, E. **Effect of interface friction on passive force on bridge abutments.** E3S Web of Conferences. V. 92, p. 1-5, 25 jun. 2019.

ROLLINS, K. M.; SCOTT, E.; MARSH, A. **Geofoam Inclusions for Reducing Passive Force on Bridge Abutments Based on Large-Scale Tests**. *Geotechnical Frontiers*, p. 59-68, 2017.

SHEELEY, M. **Slope Stabilization Utilizing Geofoam**. Master's thesis—Syracuse, New York: Syracuse University, 2000.

SHEELEY, M.; NEGUSSEY, D. **An Investigation of Geofoam Interface Strength Behavior**. *Soft Ground Technology*, Geofoam Research Center, Syracuse University, Syracuse, New York, n. 112, p. 292-303, 2000.

SKUGGEDAL, H.; AABOE, R. **Temporary overpass bridge founded on expanded polystyrene**. *Proceeding of the 1st European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 2. Florence, Italy, p. 559-561, 1991.

SRIRAJAN, S. **Recycled Content and Creep Performance of EPS Geofoam in Slope Stabilization**. Master's thesis—Syracuse, New York: Syracuse University, 2001.

STARK, T. D. *et al.* **Geofoam Applications in the Design and Construction of Highway Embankments**. National Cooperative Highway Research Program, p.1-793, 2004.

STARK, T. D.; BARTLETT, S. F.; ARELLANO, D. **Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam Applications & Technical Data**. The EPS Industry Alliance, Crofton, Maryland, New York, p. 1-36, 2012.

SUN, L.; HOPKINS, T. C.; BECKHAM, T. L. **Reduction of stresses on buried rigid highway structures using the imperfect ditch method and expanded polysterene (geofoam)**. Kentucky Transportation Center, University of Kentucky, College of Engineering, Lexington, Kentucky, p. 1-49, 2009.

TRANDAFIR, A. C.; BARTLETT, S. F.; LINGWALL, B. N. **Behavior of EPS geofoam in stress-controlled cyclic uniaxial tests**. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 28, n. 6, p. 514–524, dez. 2010.

VASLESTAD, J. **Soil Structure Interaction of Buried Culverts**. Trondheim, Norway: University of Trondheim, 452 p., 1990.

WANG, X. *et al.* **The influence of roughness on cyclic and post-cyclic shear behavior of red clay-concrete interface subjected to up to 1000 cycles.** *Construction and Building Materials*, v. 273, 1 mar. 2021.

WILLIAMS, D.; SNOWDON, R. A. **A47 Great Yarmouth Western Bypass: Performance During the First Three Years.** Contactor Report 211. Transport and Road Research Laboratory, 1990.

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.

XIE, M. *et al.* **Study of lateral earth pressures on nonyielding retaining walls with deformable geofoam inclusions.** *Geotextiles and Geomembranes*, v. 48, n. 5, p. 684–690, 1 out. 2020.

YANG, J. S.; YONGXING, Z. **Load reduction method and experimental study for culverts with thick blackfills on roadways in mountainous regions.** *China Civ. Eng. J.*, v. 38, n. 7, p. 116–121, 2005.

ZHANG, W.; LIU, B.; XIE, Y. **Field test and numerical simulation study on the load reducing effect of EPS on the highly filled culvert.** *J. Highw. Transp. Res. Dev. China*, v. 23, n. 12, p. 54–57, 2006.

ZOU, Y.; LEO, C. J. **Laboratory studies on the engineering properties of expanded polystyrene (EPS) material for geotechnical applications.** *Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Techniques*. Singapore, p. 581-588. 7 out. 1998.

ZOU, Y.; SMALL, J. C.; LEO, C. J. **Behavior of EPS geofoam in model test on pavements.** *Geosynthetics International*, v. 7, n. 1, p. 1–22, 2000.