



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



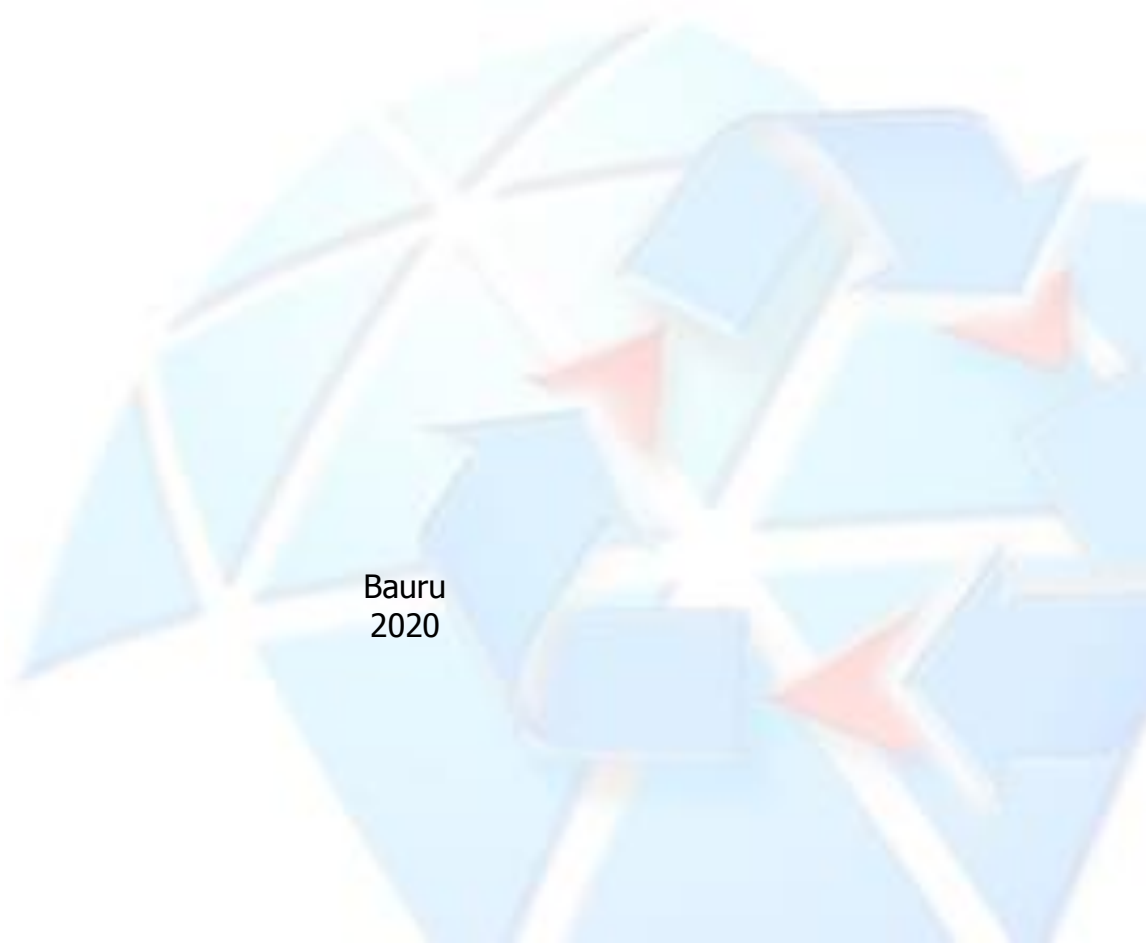
Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

MARIANA BASOLLI BORSATTO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO
GEOEXPANDIDO (EPS) POR MEIO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

Bauru
2020



MARIANA BASOLLI BORSATTO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO
GEOEXPANDIDO (EPS) POR MEIO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

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

B738a

Borsatto, Mariana Basolli

Avaliação das propriedades hidráulicas e mecânicas do
geoexpandido (EPS) por meio de ensaios de laboratório / Mariana
Basolli Borsatto. -- Bauru, 2020

116 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Paulo César Lodi

1. Poliestireno expandido. 2. Geoexpandido. 3. Ensaios de
laboratório. 4. Resistência mecânica. 5. Ensaios hidráulicos. 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 MARIANA BASOLLI BORSATTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 29 dias do mês de novembro do ano de 2019, às 10:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO CESAR LODI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOSÉ ORLANDO AVESANI NETO do(a) Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica - PEF / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARIANA BASOLLI BORSATTO, intitulada **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO POLIESTIRENO EXPANDIDO POR MEIO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO CESAR LODI

Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES

Prof. Dr. JOSÉ ORLANDO AVESANI NETO

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

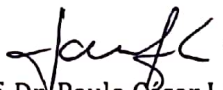
A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA:
MARIANA BASOLLI BORSATTO

DE: "AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS DO POLIESTIRENO
EXPANDIDO POR MEIO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO"

PARA:

"Avaliação das propriedades hidráulicas e mecânicas
do poliestireno expandido (EPS) por meio de ensaios de
laboratório"

Bauru, 29 de novembro de 2019.


Prof. Dr. Paulo César Lodi
Orientador

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Edinan e Márcia

À minha irmã, Juliana

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo César Lodi, pela orientação e amizade desde a graduação, quando proporcionou a oportunidade de me tornar bolsista de iniciação científica.

Aos técnicos Sergio Gimenez Junior e Gustavo Pinheiro, do Laboratório de Mecânica dos Solos da FEB, pela grande ajuda durante a realização dos ensaios.

Aos meus pais, Edinan e Márcia, e à minha irmã, Juliana, por todo incentivo, companheirismo e por proporcionar todo o apoio necessário para chegar até aqui.

Ao meu namorado, Pedro, por tempo dedicado às revisões dessa dissertação, por todo amor e companheirismo de todas as horas.

À Deus, por colocar essas pessoas maravilhosas em minha vida.

*“Seja corajoso, seja curioso, seja determinado,
supere as probabilidades. É possível.”*

(Stephen Hawking)

RESUMO

BORSATTO, M. B. (2020) **Avaliação das propriedades hidráulicas e mecânicas do geoexpandido (EPS) por meio de ensaios de laboratório**. Bauru, 116 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Esse trabalho avaliou as propriedades do poliestireno expandido (EPS) para verificar a viabilidade e emprego deste em obras geotécnicas. Foram estudadas as propriedades mecânicas e hidráulicas do material, por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento direto, compressão triaxial, compressão uniaxial simples e cíclica, absorção de água, permeabilidade e empuxo conforme as normas vigentes e métodos utilizados pela literatura corrente. Utilizou-se uma gama variada de massas específicas de EPS (10, 15, 20, 25 e 30 kg/m³), incluindo duas recicladas (10 e 12,5 kg/m³). Os principais resultados mostram que os parâmetros de resistência ao cisalhamento direto apresentam variações crescentes conforme aumenta-se a massa específica, assim como os valores de resistência à compressão simples e cíclica. O mesmo é válido para o módulo de elasticidade, que também aumenta com a massa específica. As amostras de baixa massa específica apresentaram um significativo intercepto coesivo, enquanto que as maiores possuem elevada parcela de ângulo de atrito. Os parâmetros de absorção de água tendem a diminuir com o aumento da massa específica e todas apresentaram valores muito próximos de permeabilidade. Além disso, valor de 20 kg/m³ é um valor de transição da massa específica com relação ao comportamento das amostras.

Palavras-chave: Poliestireno expandido, geoexpandido, ensaios de laboratório, resistência mecânica, ensaios hidráulicos.

ABSTRACT

BORSATTO, M. B. (2020) **Evaluation of hydraulic and mechanical properties of geofoam (EPS) by laboratory tests**. Bauru, 116 p. Master's thesis - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

This work evaluated the properties of expanded polystyrene (EPS) to verify its feasibility and use in geotechnical works. The mechanical and hydraulic properties of the material were studied by tests of direct shear strength, triaxial, simple and cyclic uniaxial compression, water absorption, permeability and thrust according to current standards and methods used in the current literature. A wide range of specific masses (10, 15, 20, 25 and 30 kg/m³) were used, including two recycled (10 and 12.5 kg/m³). The main results show that the direct shear strength parameters show increasing variations as the specific mass increases, as well as the simple and cyclic compressive strength values. The same is true for the modulus of elasticity, which also increases with the specific mass. The samples of low specific mass presented a significant cohesive intercept, while the larger ones had a high proportion of friction angle. Water absorption parameters tend to decrease with increasing specific mass and all presented very close permeability values. In addition, a value of 20 kg/m³ is a specific mass transition value with respect to sample behavior.

Keywords: Expanded polystyrene, geofoam, laboratory tests, shear strength, hydraulic tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais revistas e quantidade de publicações (SCOPUS, 2018).	17
Figura 2. Principais autores (SCOPUS, 2018).....	18
Figura 3. Tipos de documentos publicados (SCOPUS, 2018).....	18
Figura 4. Áreas de conhecimento (SCOPUS, 2018).....	19
Figura 5. Número de publicações ao longo dos anos (SCOPUS, 2018).....	20
Figura 6. Principais países em publicações (SCOPUS, 2018).....	20
Figura 7. Amostras separadas para pesagem.	35
Figura 8. Etapas de montagem do ensaio.....	36
Figura 9. Ensaio de empuxo sendo realizado em amostra.	38
Figura 10. Detalhe da caixa de cisalhamento direto com o corpo de prova.	40
Figura 11. Equipamento utilizado para os ensaios de cisalhamento direto.	41
Figura 12. Detalhe da câmara de ensaios triaxiais.	42
Figura 13. Etapas de montagem do ensaio.....	43
Figura 14. Ensaio de compressão uniaxial sendo realizado em corpo de prova.....	44
Figura 15. Comportamento tensão deformação de amostra de EPS de 21 kg/m^3 (HORVATH, 1994).....	45
Figura 16. Equipamento utilizado no ensaio de compressão cíclica.	46
Figura 17. Relação entre as massas específicas e porcentagem de absorção de água e umidade higroscópica em massa.	50
Figura 18. Relação entre as massas específicas e porcentagem de absorção de água em volume.	51
Figura 19. Comparação da relação entre as massas específicas e porcentagem de absorção de água em volume para imersão em 24 horas e em 28 dias.....	53
Figura 20. Resultado do ensaio de empuxo submerso em água.	55
Figura 21. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS reciclado de 10 kg/m^3	57
Figura 22. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS reciclado de $12,5 \text{ kg/m}^3$	57
Figura 23. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de	58

Figura 24. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de	58
Figura 25. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de	59
Figura 26. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de	59
Figura 27. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de	60
Figura 28. Envoltória de resistência das amostras de EPS no ensaio de cisalhamento direto de interface.	61
Figura 29. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS reciclado de.....	63
Figura 30. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS reciclado de 12,5 kg/m ³	63
Figura 31. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 10 kg/m ³	64
Figura 32. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 15 kg/m ³	64
Figura 33. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 20 kg/m ³	65
Figura 34. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 25 kg/m ³	65
Figura 35. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 30 kg/m ³	66
Figura 36. Envoltória de resistência das amostras de EPS no ensaio de cisalhamento direto interno.	67
Figura 37. Corpo de prova de densidade elevada e submetido a uma tensão de 10 kPa durante o ensaio.	68
Figura 38. Corpo de prova ensaiado.	68
Figura 39. Envoltórias de resistência do ensaio de cisalhamento direto para um deslocamento de 5 mm (AVESANI NETO, 2008).	69
Figura 40. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m ³ reciclado.....	70

Figura 41. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m ³ reciclado.	71
Figura 42. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 12,5 kg/m ³ reciclado.....	71
Figura 43. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 12,5 kg/m ³ reciclado.	72
Figura 44. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m ³	72
Figura 45. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m ³	73
Figura 46. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m ³	73
Figura 47. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 15 kg/m ³	74
Figura 48. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 15 kg/m ³	74
Figura 49. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 15 kg/m ³	75
Figura 50. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 20 kg/m ³	75
Figura 51. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 20 kg/m ³	76
Figura 52. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 20 kg/m ³	76
Figura 53. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 25 kg/m ³	77
Figura 54. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 25 kg/m ³	77
Figura 55. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 25 kg/m ³	78
Figura 56. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 30 kg/m ³	78
Figura 57. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 30 kg/m ³	79
Figura 58. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 30 kg/m ³	79
Figura 59. Comparação entre um corpo de prova não ensaiado e um que sofreu perda de estabilidade lateral.	80
Figura 60. Comparação entre um corpo de prova não ensaiado e um que não sofreu perda de estabilidade lateral.	81
Figura 61. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial sob tensão confinante de 20 kPa.....	82

Figura 62. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial sob tensão confinante de 30 kPa.....	82
Figura 63. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial sob tensão confinante de 40 kPa.....	83
Figura 64. Valores de coesão e ângulo de atrito obtidos do ensaio triaxial.....	84
Figura 65. Comparação de corpos de prova ensaiados e não ensaiados no ensaio de compressão uniaxial simples.	86
Figura 66. Módulo de elasticidade inicial em função da massa específica.	89
Figura 67. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de	91
Figura 68. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de	91
Figura 69. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de	92
Figura 70. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de	92
Figura 71. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de	93
Figura 72. Comparação de corpos de prova ensaiados e não ensaiados no ensaio de compressão cíclica.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Sistema de classificação e codificação das referências analisadas.	21
Tabela 2. Classificação e codificação das referências analisadas.	22
Tabela 3. Características do Poliestireno expandido fornecido por empresa nacional.	34
Tabela 4. Massa específica dos corpos de prova.	48
Tabela 5. Massa de água absorvida pelas amostras de EPS saturadas por um período de 24 horas e valores de absorção em porcentagem para amostras saturadas.	49
Tabela 6. Volume de água absorvido pelas amostras saturadas por um período de 24 horas.	50
Tabela 7. Volume de água absorvido pelas amostras saturadas por um período de 28 dias e em umidade higroscópica de EPS.	52
Tabela 8. Resultados do ensaio de permeabilidade.	54
Tabela 9. Comparação dos valores de permeabilidade.	54
Tabela 10. Valores do intercepto de coesão e ângulo de atrito do ensaio de cisalhamento direto de interface.	61
Tabela 11. Valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito do ensaio de cisalhamento direto interno.	67
Tabela 12. Resultados obtidos dos ensaios de compressão uniaxial.	85
Tabela 13. Comparação dos valores obtidos para o módulo de elasticidade.	88
Tabela 14. Comparação dos valores de tensão.	90
Tabela 15. Valores de módulo de elasticidade do ensaio de compressão uniaxial cíclica.	90
Tabela 16. Comparação dos valores de resistência.	94
Tabela 17. Comparação dos valores de módulo de elasticidade com Dias et al (2016).	95
Tabela 18. Comparação dos valores de módulo de elasticidade inicial.	95
Tabela 19. Comparação dos valores de módulo de elasticidade com diferentes massas específicas.	96
Tabela 20. Comparação dos valores de resistência com o ensaio de compressão simples.	97

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAPEX	Associação Brasileira Do Poliestireno Expandido
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFC	Clorofluorcarbono
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EPS	Poliestireno Expandido
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
HCFC	Hidroclorofluorcarboneto
NBR	Norma Brasileira
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos do Alfabeto Latino

C.V.	Coeficiente de variação
E	Módulo de elasticidade
E _i	Módulo de elasticidade inicial
E _r	Módulo de elasticidade residual
E _p	Módulo de plasticidade
K	Coeficiente de permeabilidade

Símbolos do Alfabeto Grego

μ	Coeficiente de atrito
σ	Tensão
σ_{esc}	Tensão obtida no escoamento
σ_{final}	Tensão obtida no final do ensaio
ε	Deformação
ε_{esc}	Deformação específica no escoamento
ε_{final}	Deformação específica no escoamento
ρ	Massa específica
$\emptyset$	Ângulo de atrito
τ	Tensão de cisalhamento
δ_h	Deslocamento horizontal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	12
2. OBJETIVO	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 Metodologia de Elaboração da Revisão Bibliográfica	16
3.2 Revisão da literatura	23
3.2.1 O material.....	23
3.2.2 Processo de Fabricação	23
3.2.3 Utilização como geossintético	24
3.2.4 Aplicações.....	25
3.2.5 Ensaios e Propriedades	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1 Ensaios hidráulicos	34
4.1.1 Ensaio de absorção de água	34
4.1.2 Ensaio de permeabilidade	36
4.1.3 Ensaio de empuxo	38
4.2 Ensaios mecânicos.....	39
4.2.1 Ensaio de cisalhamento direto	39
4.2.1.1 Ensaio de cisalhamento direto de interface (junta)	39
4.2.1.2 Ensaio de cisalhamento direto interno	41
4.2.2 Ensaio de compressão triaxial.....	42
4.2.3 Ensaio de compressão uniaxial simples.....	44
4.2.4 Ensaio de compressão cíclica.....	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 Ensaios hidráulicos	49
5.1.1 Ensaio de absorção de água	49
5.1.2 Ensaio de permeabilidade	53
5.1.3 Ensaio de empuxo	55
5.2 Ensaios mecânicos.....	56
5.2.1 Ensaio de cisalhamento direto	56
5.2.1.1 Ensaio de cisalhamento direto de interface (junta)	56
5.2.1.2 Ensaio de cisalhamento direto interno	63
5.2.2 Ensaio de compressão triaxial.....	70

5.2.3 Ensaio de compressão uniaxial simples.....	85
5.2.4 Ensaio de compressão cíclica.....	90
5.3 Considerações finais.....	98
6. CONCLUSÕES	101
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICES.....	109

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O Poliestireno Expandido (EPS) é um caso particular de geossintético cujo nome comercial ganhou destaque como “isopor”. Esse geossintético, também chamado de geoexpandido (geofoam), apresenta três dimensões e tem sido utilizado em diversas aplicações geotécnicas cujo uso primário pode ser: construção de estradas sobre solos com baixa capacidade de suporte (AVESANI NETO, 2008), alargamento de rodovias, aterros de encontros de pontes/viadutos rodoviários (REFSDAL, 1985; STARK et al. 2004) e ferroviários, proteção de tubulações, oleodutos, pontões e estruturas enterradas (VASLESTAD, 1990; ROH et al., 2000; YANG; YONGXING, 2005; KANG et al. 2007; SUN et al. 2009; MCGUIGAN; VALSANGKAR, 2010; JAFARI, 2010; BARTLETT; LINGWALL; VASLESTAD, 2015), paisagismo e telhados verdes, estabilização de taludes (JUTKOFISKY et al. 2000; SHEELEY, 2000; NEGUSSEY, 2002), assentos/arquibancadas em estádios e teatros, barragens, aeroportos e pistas para taxiamento em geral bem como outras aplicações especializadas (ZHANG et al. 2006; STARK et al. 2012).

Os geossintéticos já possuem excelência de uso na Engenharia Civil e Ambiental. Com uma gama enorme de aplicações e tipos, esses materiais proporcionam rapidez de execução, baixo custo e propriedades técnicas aceitáveis sob diferentes aspectos de projetos. O bloco de geoexpandido é um geossintético de grande robustez, livre de danos físicos significativos e reações químicas, se comparados com os outros tipos de geossintéticos.

A utilização de geoexpandidos data de 1960 quando o laboratório de Pesquisas de estradas da Noruega passou a utilizar o material para construção em aterros sobre solos moles. Desde então, o EPS tornou-se uma opção interessante para diversas utilizações geotécnicas (TRANDAFIR; BARTLETT; LINGWALL, 2010a).

A ideia principal de sua utilização é a de se introduzir materiais leves no corpo do aterro de modo a reduzir a magnitude dos recalques. Outra vantagem é a rapidez de execução da obra. O EPS é muito utilizado em obras geotécnicas pois, comparado a outros materiais, possui menor peso específico (15 a 40 kg/m³) e alta resistência à compressão (70 a 250 kPa), além de apresentar alta compressibilidade (módulo de elasticidade de 1 a 11 MPa). Sua escolha deve levar em conta o tipo de aterro e as cargas móveis atuantes. Por ser um plástico inerte, não-biodegradável, não dissolvível, não possui valores nutritivos para abrigar microorganismos e outros animais e não é quimicamente afetado no contato com o solo e a água (BASF, 1990; 1991). Suas propriedades sugerem que, se corretamente aplicado, pode apresentar um desempenho adequado ao longo da vida útil da obra. As principais

desvantagens são a fragilidade a solventes (degradação química) e o alto custo que pode inviabilizar o projeto.

O controle no processo de fabricação do EPS permite obter um produto com diferentes valores de massa específica. Esses valores podem variar aproximadamente entre 10 a 100 kg/m³ (STARK et al., 2004). Contudo, na prática é comum encontrar-se valores de massa específica para os blocos de EPS de 15 a 40 kg/m³, variando de 5 em 5 kg/m³ (HORVATH, 1994).

Quando utilizado em aterro sobre solos moles, sub-base de pavimentos, encontro de pontes e outras aplicações subterrâneas, o poliestireno expandido (EPS) sofre solicitações dinâmicas causadas pelo tráfego de veículos e solicitações de cargas constantes. Some-se a isso ainda os efeitos de intempérie como variações de temperaturas, umidade e chuvas causadas pelas mudanças sazonais dos países tropicais. Em qualquer aplicação, deve ser evitada a radiação solar direta, bem como outros tipos de radiações ricas em energia que deterioram o EPS (sofre um amarelecimento) por alterarem a sua estrutura química. Este processo é, porém, lento e dependente da intensidade de radiação e do tempo de exposição. Em conjunto com as intempéries o processo pode ser acelerado. Quando exposto à temperatura elevada, o EPS derreterá com valores de aproximadamente 150°C. Caso exista uma fonte de ignição, este se torna inflamável. Porém, como característica deste material, ao se retirar a fonte de calor, a chama se extingue (material auto - extingüível). Em se tratando de resíduos/líquidos, há poucos tipos que dissolvem o EPS. Os únicos encontrados nas aplicações mais correntes do plástico são os solventes orgânicos (derivados petrolíferos, tais como óleos, gasolina e diesel).

Apesar de diversas pesquisas sobre o produto e suas aplicações, nota-se que o manancial de informações sobre o EPS está restrito ainda ao contexto internacional, em particular, em aplicações de aterros sobre solos moles (WILLIAMS; SNOWDON, 1990; DUSKOV, 1991; FRYDENLUND, 1991; FRYDENLUND; AABOE, 1996; NEGUSSEY et al., 2001), encontros de pontes e viadutos (SKUGGEDAL; AABOE, 1991; MCDONALD; BROWN, 1993; HORVATH, 2008), bases de pavimentos (REFSDAL, 1985; AABOE, 1987; MAGNAN; SERRATRICE, 1989; HORVATH, 1994; DUSKOV, 1997; ZOU et al., 2000), proteção de tubulações (JAFARI, 2010; BARTLETT et al., 2015), estabilização de taludes (JUTKOFISKY et al. 2000; SHEELEY, 2000; SRIRAJAN, 2001; NEGUSSEY, 2002), redução de pressão lateral em muros (NEGUSSEY; SUN, 1996) e sob solicitações sísmicas (ATHANASOPOULOS et al. 2007), além de diversos outros estudos (ZOU; LEO 1998; ATHANASOPOULOS et al. 1999; ELRAGI, 2000; ATMATZIDIS et al. 2001;

MCGUIGAN; VALSANGKAR, 2010). Enquanto no Brasil poucos trabalhos foram desenvolvidos sobre o assunto. Dentre eles, cita-se o trabalho de Avesani Neto (2008), no qual foram avaliadas propriedades mecânicas e de resistência de diferentes densidades de EPS.

Essas características apresentadas conduzem a situações de solicitações complexas para avaliar o desempenho do produto. Para tanto, é necessário conhecer adequadamente os parâmetros de projeto. Com uma classificação sólida é possível criar uma expectativa de comportamento do produto, facilitando a sua recomendação nas fases iniciais de projetos (AVESANI NETO, 2008).

Dessa forma, essa pesquisa visa estudar em laboratório as propriedades hidráulicas (absorção de água, permeabilidade e empuxo) e mecânicas (cisalhamento direto, compressão triaxial, compressão uniaxial simples e cíclica) do EPS em diferentes massas específicas de forma a ampliar a gama de resultados do comportamento do material do ponto de vista geotécnico. Além disso, esses resultados podem servir de base para pesquisas futuras, aumentando as informações referentes ao poliestireno expandido no contexto nacional.

2. OBJETIVO

Avaliar as propriedades hidráulicas e mecânicas do poliestireno expandido (EPS) em diferentes massas específicas por meio de ensaios de laboratório a fim de reunir informações técnicas sobre o material que podem servir de apoio a futuras pesquisas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Metodologia de Elaboração da Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica apresentada neste trabalho foi feita conforme a proposta de revisão estruturada apresentado no artigo *“Information systems and sustainable supply chain management towards a more sustainable society: Where we are and where we are going”* (DE CAMARGO FIORINI; JABBOUR, 2017), o qual apresenta uma proposta de elaboração de revisão bibliográfica.

O artigo apresenta uma metodologia de pesquisa dividida em 5 passos, Sendo eles: Pesquisar artigos em banco de dados por meio de palavras-chaves; filtrar a seleção de artigos lendo os resumos; desenvolver e adotar um sistema de classificação; fornecer uma visão geral da produção científica; identificar os *“gaps”* na literatura para pesquisas futuras.

Dessa forma, inicialmente foi elaborada uma busca na base de dados SCOPUS, da qual foram retiradas as informações apresentadas a seguir:

A busca inicial foi realizada priorizando artigos publicados em revistas e congressos, resultando em 190 artigos, os quais foram filtrados de acordo com as principais revistas, áreas de conhecimento e tipo de documentos. Com os artigos encontrados na base de dados da SCOPUS, foi feita a análise que será mostrada.

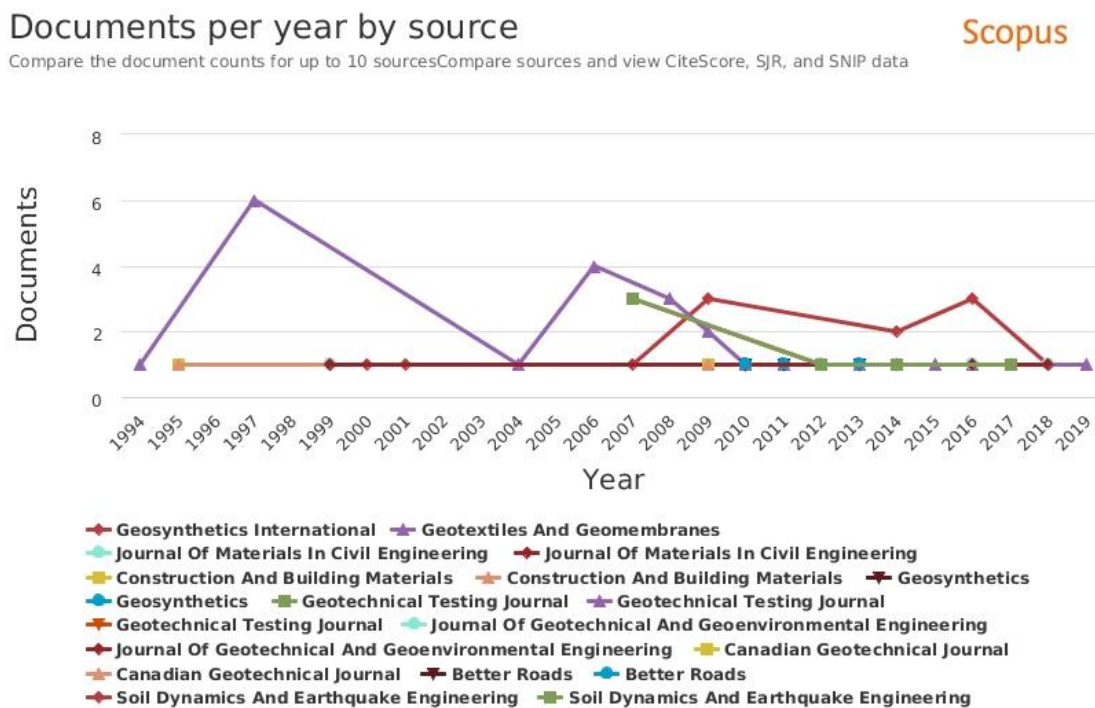
A Figura 1 mostra as principais revistas e a quantidade de publicações em cada uma desde o início do estudo sobre o Poliestireno Expandido. Nota-se que as revistas *“Geotextiles And Geomembranes”* e *“Geosynthetics International”* destacam-se pelo número de publicações em grande parte do período estudado, sendo relevantes na área ainda hoje.

Os principais autores são apresentados na Figura 2, considerando o número de publicações no período analisado, sendo este de 2010 à 2019, incluindo artigos aceitos para publicação que já estão presentes na base de dados. Horvath foi um dos pioneiros na pesquisa deste material como geossintético. Este autor publicou o artigo *“Expanded Polystyrene (EPS) geofoam: An introduction to material behavior”* em 1994, fornecendo uma visão geral sobre as propriedades do geoexpandido do ponto de vista da engenharia geotécnica.

As Figuras 3 e 4, respectivamente, mostram os tipos de documentos publicados e as áreas de conhecimento aos quais se aplicam. Nota-se que mais de 90% das publicações concentram-se em artigos de revistas e congressos, e desses, quase 50% são artigos de revista, mostrando a relevância do assunto para a produção científica mundial. Além disso, observa-se que grande parte dessa produção está dentro da Engenharia, o que mostra o grande potencial

de utilização do material nesta área, destacando-se ainda na Ciência dos Materiais e na Ciência Ambiental, abrangendo quase 80% das áreas de conhecimento apresentadas.

Figura 1. Principais revistas e quantidade de publicações (SCOPUS, 2018).



Copyright © 2018 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Figura 2. Principais autores (SCOPUS, 2018).

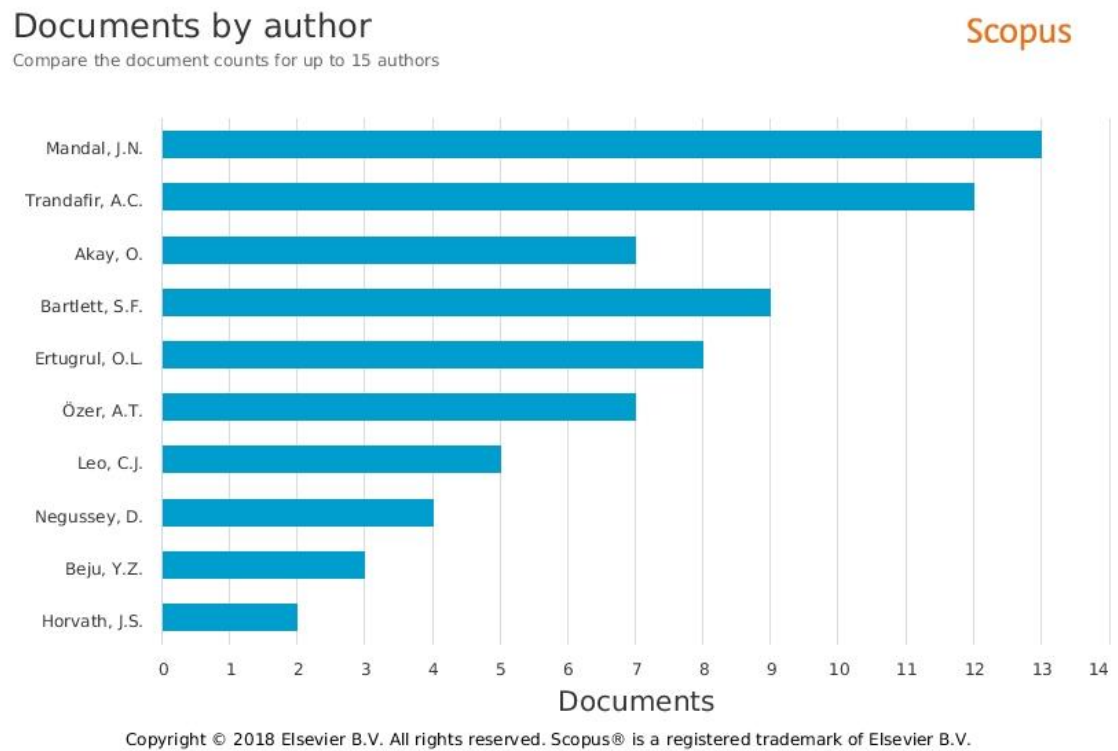


Figura 3. Tipos de documentos publicados (SCOPUS, 2018).

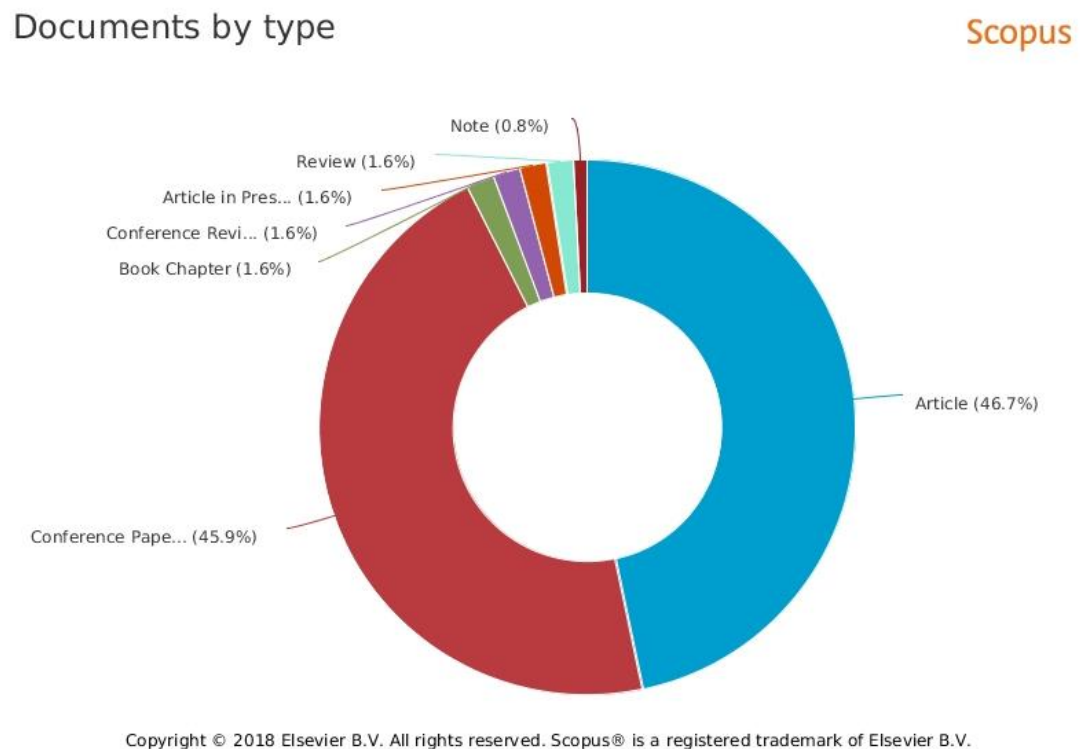
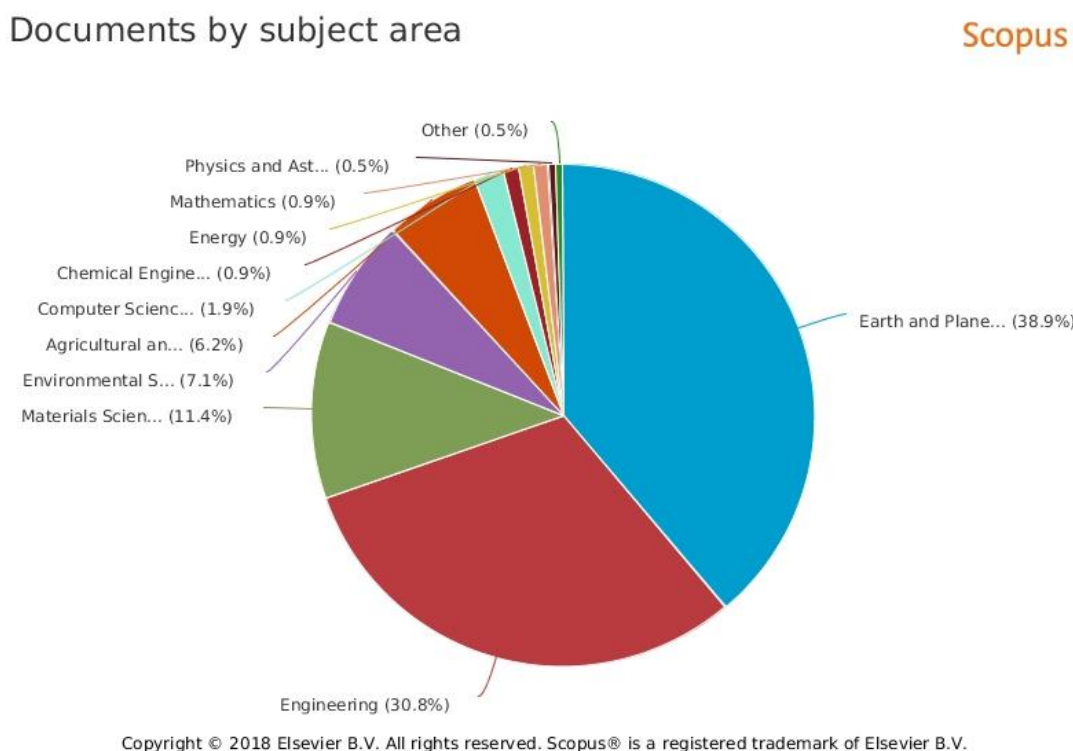


Figura 4. Áreas de conhecimento (SCOPUS, 2018).



A Figura 5 apresenta o número de publicações ao longo dos anos desde o início das pesquisas do Poliestireno Expandido como geossintético por Horvath, em 1994. É nítido o crescente interesse pelo estudo do material nas últimas décadas, entretanto, nota-se um decaimento da quantidade de publicações nos últimos três anos. Observa-se na Figura 6 que o manancial de informações a respeito desse geossintético está restrito ao cenário internacional, sendo os Estados Unidos o país que mais possui publicações, seguido pela Índia, Turquia, China, Canadá e Austrália.

O Brasil aparece em décimo lugar no número de publicações nos últimos 10 anos, mostrando a importância de se desenvolver o estudo do EPS no país, para que se crie padrões adequados na produção do material em empresas nacionais, garantindo que o material aplicado em obras de Engenharia tenha qualidade e atenda aos critérios de projeto, promovendo segurança e economia. Enquanto os países mostrados na Figura 6 já estão esgotando a busca por informações, o que é comprovado pelo decréscimo de publicações nos últimos três anos, o Brasil tem ainda grande potencial para se desenvolver na pesquisa desse material.

Figura 5. Número de publicações ao longo dos anos (SCOPUS, 2018).

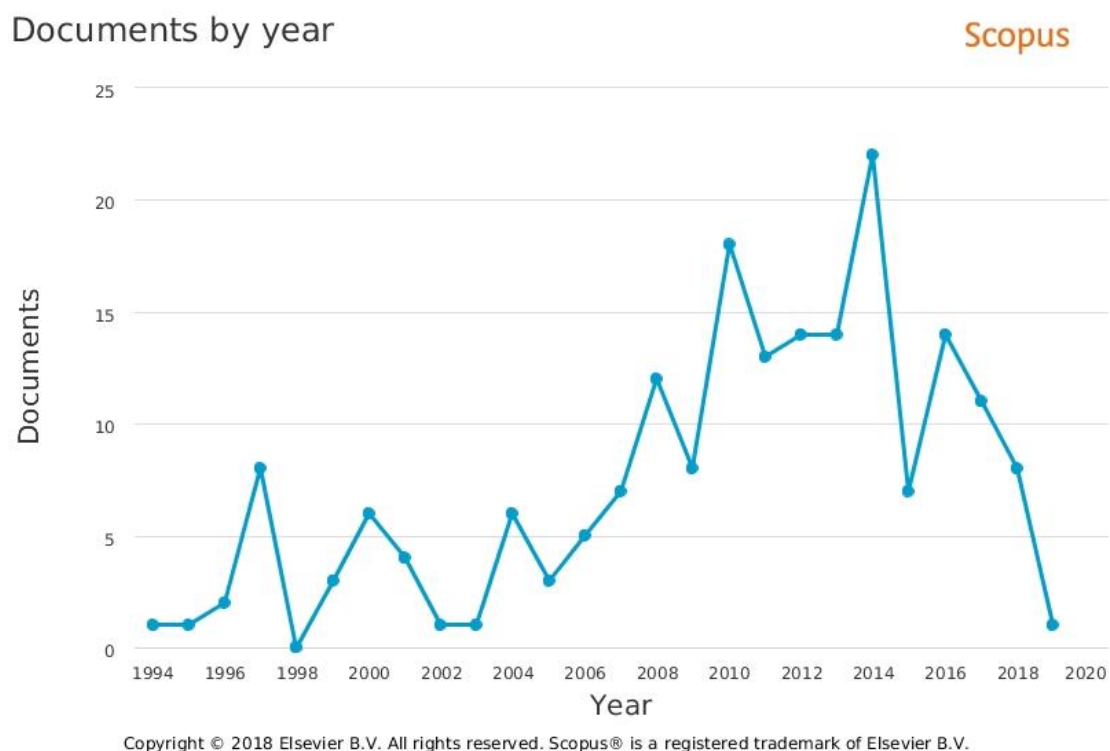
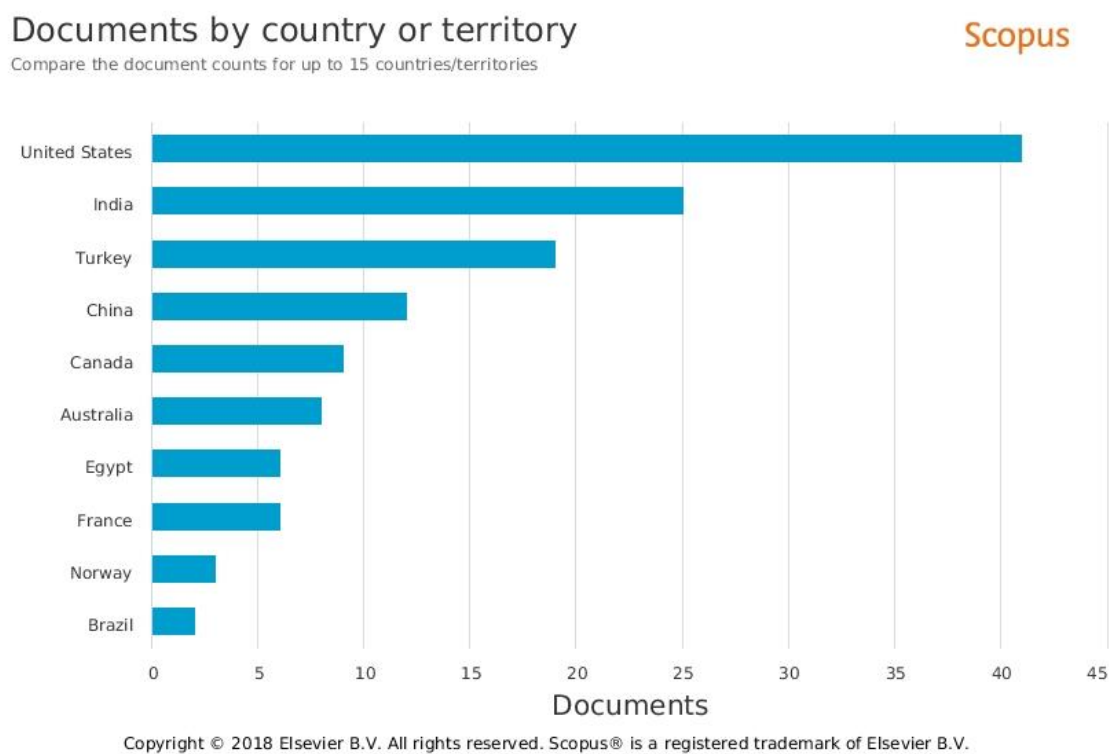


Figura 6. Principais países em publicações (SCOPUS, 2018).



Após realizar essas análises, foi possível filtrar os documentos selecionando as principais revistas, autores, países e áreas do conhecimento, assim procedeu-se a busca na base de dados SCOPUS com os filtros aplicados e com base nos títulos e no resumo apresentado, resultando em 33 documentos, como sugerido no artigo da proposta de revisão bibliográfica estruturada, aos quais foram adicionados outros artigos relevantes ao estudo que não apareceram na pesquisa, bem como dissertações, normas e livros.

Com isso, foi desenvolvido e adotado um sistema de classificação para fornecer uma visão geral da produção científica. Os critérios adotados e a classificação das referências obtidas na pesquisa estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Esses critérios foram baseados nas propostas sugeridas por de Camargo Fiorini & Jabbour (2017), sendo divididos em contexto, referindo-se ao país de origem da pesquisa, ao foco do estudo apresentado, ao método de pesquisa utilizado e ao tipo de dado do estudo, sendo este a principal fonte dos resultados obtidos.

Tabela 1. Sistema de classificação e codificação das referências analisadas.

Classificação	Significado	Categorias por código	
1	Contexto	A	País desenvolvido
		B	País em desenvolvimento
		C	Não se aplica
2	Foco	A	Ensaio de laboratório
		B	Ensaio de campo
		C	Estudo de campo
		D	Simulação
		E	Aplicação
3	Método de pesquisa	A	Qualitativo
		B	Quantitativo
		C	Revisão
		D	Estudo de caso
4	Tipo de dados	A	Compressão simples
		B	Compressão cíclica
		C	Cisalhamento direto
		D	Triaxial
		E	Absorção de água
		F	Sísmicos
		G	Outros
		H	Recomendações
		I	Não citado

Tabela 2. Classificação e codificação das referências analisadas.

Pesquisa	Contexto	Foco	Método de Pesquisa	Tipo de dados
(AKAY et al., 2013)	1A	2A, 2C, 2D	3B, 3D	4G
(ATHANASOPOULOS - ZEKOS; LAMOTE; ATHANASOPOULOS, 2012)	1A	2B, 2E	3B	4F, 4G
(AVESANI NETO, 2009)	1B	2A	3B	4A, 4C, 4D, 4E, 4G
(BARTLETT; LINGWALL; VASLESTAD, 2015)	1A	2A, 2B, 2C, 2D, 2E	3A, 3B	4I
(BEINBRECH; HILLMANN, 1997)	1A	2C, 2E	3A, 3D	4B, 4H
(BEJU; MANDAL, 2017)	1A	2A	3B	4A, 4D, 4E, 4G
(DIAS et al, 2016)	1B	2A	3B	4A, 4B
(EKANAYAKE; LIYANAPATHIRANA; LEO, 2014)	1A	2C, 2D, 2E	3A, 3B	4F, 4G
(ERTUGRUL; TRANDAFIR, 2011)	1A	2C, 2D	3A, 3B	4G
(ERTUGRUL; TRANDA, 2013)	1A	2D, 2E	3B	4G, 4H
(GNIP et al., 2006)	1A	2A	3B	4E
(GREELEY, 1997)	1A	2E	3C	4H
(HORVATH, 1994)	1A	2E	3C	4H
(HORVATH, 1997)	1A	2E	3C	4H
(HORVATH, 2008)	1A	2E	3C, 3D	4H
(JUTKOFISKY; SUNG; NEGUSSEY, 2000)	1A	2A, 2E	3B, 3D	4G, 4H
(LEO et al., 2008)	1A	2A	3B	4D
(LIYANAPATHIRANA; EKANAYAKE, 2016)	1A	2D, 2E	3A, 3B	4F
(MEGUID et al., 2017)	1A	2C, 2D, 2E	3A, 3B	4I
(MOHAJERANI et al., 2017)	1A	2E	3C, 3D	4H
(OSSA; ROMO, 2011)	1A	2A	3B	4B
(OSSA; ROMO, 2012)	1A	2A	3B	4A, 4D, 4E
(ÖZER et al., 2014)	1A	2A, 2D	3B	4G
(ÖZER; AKAY, 2016)	1A	2A	3B	4C
(SNOW; NICKERSON, 2004)	1A	2E	3D	4H
(STUEDLEIN; NEGUSSEY, 2013)	1A	2C, 2E	3D	4G, 4H
(TRANDAFIR; BARTLETT; LINGWALL, 2010b)	1A	2A, 2E	3C	4B
(TRANDAFIR; ERTUGRUL, 2011)	1A	2D	3A, 3B	4F
(TRANDAFIR; ERICKSON, 2012)	1A	2A	3C	4B
(YANG; HUANG; WANG, 2003)	1A	2A, 2D, 2E	3A, 3B	4G

Com isso foi possível selecionar e relacionar com diferentes tópicos os artigos utilizados na elaboração da revisão bibliográfica desta pesquisa, que será apresentada no próximo item.

3.2 Revisão da literatura

3.2.1 O material

EPS, de acordo com a Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (ABRAPEX), por definição da norma DIN ISO 1043/78, é a sigla internacional do Poliestireno Expandido. Essa material foi descoberto em 1949, na Alemanha, pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz, que trabalhavam nos laboratórios da Basf.

No Brasil o material ficou popularmente conhecido como “Isopor ®”, sendo a marca registrada da Knauf que designa os produtos de poliestireno expandido vendidos pela empresa.

3.2.2 Processo de Fabricação

De acordo com o Manual de Utilização do EPS na Construção Civil (ABRAPEX, 2006) seu processo produtivo não compromete o meio ambiente, visto que não é utilizado gás CFC ou qualquer um de seus substitutos na sua fabricação. O pentano é o agente expensor para a transformação do EPS, sendo este um hidrocarboneto que se deteriora rapidamente pela reação fotoquímica gerada pelos raios solares. Esse material resulta da polimerização do estireno em água, sendo um plástico celular rígido.

O produto final desse processo são pérolas de até 3 milímetros de diâmetro, as quais serão destinadas à expansão. Essas pérolas tendem a aumentar em até 50 vezes durante o processo de transformação, e por meio do vapor de água fundem-se, podendo então ser moldadas em diversas formas.

Destaca-se que, após o processo de expansão, as pérolas apresentam 98% do seu volume de ar e apenas 2% de poliestireno. Além disso, os produtos de EPS são inodoros, não contaminam o solo, ar ou água e são completamente reaproveitáveis e recicláveis, podendo, assim, voltar à condição de matéria-prima.

Apesar de que muitos materiais tenham sido usados como geoexpandidos, um deles foi e continua sendo muito mais usado que os demais. Esse material é o poliestireno Expandido (EPS), os principais motivos da sua ampla utilização são a sua disponibilidade em qualquer parte do mundo e o fato de que este é o único polímero que não utiliza como agente expensor CFC, HCFC ou qualquer outro gás nocivo à camada de ozônio, além de não liberar formaldeído (HORVATH, 1994).

O rígido controle do valor da massa específica do EPS se deve a grande relevância que essa possui nas mais variadas propriedades do material, tanto mecânicas como hidráulicas. Devido a esta característica, é possível obter as mais diversas correlações entre massa específica e propriedades mecânicas e térmicas, importantes para a utilização deste polímero não apenas na área geotécnica (HORVATH, 2008; AVESANI NETO, 2008).

3.2.3 Utilização como geossintético

A ABRAPEX classifica os geossintéticos como planos (filmes, laminados e grelhas), tendo a característica de melhorar significativamente as características do solo, mas são incapazes de alterar o peso específico do maciço, ou volumétricos, como é o caso dos blocos de EPS, sendo o tipo de geoexpandido mais utilizado. A utilização deste geossintético proporciona a redução do peso específico do maciço para cerca de 1%, sem perder a resistência mecânica, devido ao seu baixo peso específico (em torno de 1% do peso específico do solo) e boa resistência mecânica (aproximadamente igual à um solo perfeitamente compactado). Além da redução da sobrecarga, a utilização do geossintético volumétrico com blocos de EPS apresenta benefícios por ser um material isotrópico, eliminar possíveis carreamentos de finos pela água, por possuírem volumes já compactados com controle industrial e pela facilidade e rapidez de execução da obra.

A categoria de geossintéticos “geofoam” ou geoexpandido (em português) foi proposta em 1992 e abrange espumas poliméricas e não poliméricas usadas em aplicações geotécnicas. O geoexpandido desempenha funções que não são desempenhadas por geossintéticos tradicionais, podendo ainda ser usado para complementar ou melhorar a função de outros geossintéticos. Assim, geoexpandidos usados sozinhos ou com outros geossintéticos oferecem soluções novas e de bom custo benefício para uma ampla gama de problemas da geotecnia (HORVATH, 1994).

Entretanto, antes mesmo de receber essa classificação, a utilização de geoexpandidos teve início em 1960, quando o laboratório de pesquisas de estradas da Noruega passou a utilizar o material para construção em aterros sobre solos moles. Desde então, o EPS tornou-se uma opção interessante para diversas utilizações geotécnicas (TRANDAFIR; BARTLETT; LINGWALL, 2010a).

3.2.4 Aplicações

O EPS possui aplicações em diversas áreas, como embalagens industriais, artigos de consumo, agricultura. Mas é na Engenharia Civil que esse material se destaca, por ser um material isolante, resistente e extremamente leve, trazendo ainda inúmeras vantagens como baixa condutividade térmica, resistência mecânica e à compressão, baixa absorção de água, facilidade de manuseio, resistência ao envelhecimento, absorção de choque, entre outras.

Sendo resistente, de fácil recorte, leve e durável, é um dos melhores materiais para preenchimento de rabaixos e vazios em diversos processos construtivos, principalmente em lajes e painéis pré-fabricados. Por apresentar essas qualidades, também é a solução para aterros estáveis sobre solos frágeis.

Esse material é muito aplicado na construção civil, podendo servir para o nivelamento de lajes e fôrmas para concreto, em lajes industrializadas e nervuradas, devido à sua leveza e resistência, por ser um excelente isolante térmico e oferecer baixa absorção de água, o que permite uma cura melhor e mais rápida do concreto. Além disso, o poliestireno expandido não serve de alimento a nenhum ser vivo, sendo sua utilização favorecida por não atrair cupins ou apodrecer.

Existe também a aplicação de EPS em concretos leves, sendo este um concreto do tipo cimento-areia que, no lugar da pedra britada, é utilizado EPS em forma de pérolas expandidas, proporcionando um concreto de baixa densidade aparente. Esse tipo de concreto é utilizado em componentes que não exigem grandes esforços, tanto em pequenas residências quanto em obras de grande porte, resultando em um dimensionamento mais econômico devido à redução do peso próprio dos elementos.

Outras aplicações desse material são no isolamento térmico de lajes, telhados, paredes externas, dutos de ar condicionado, tubulações e reservatórios, e isolamento acústico ou de ruído de impacto em pavimentos flutuantes, por exemplo.

Na geotecnia, esse material se destaca em fundações para estradas, assim como em juntas de dilatação e drenagem. Um dos problemas críticos em geotecnia é obter um traçado geométrico com elevação da cota que garanta capacidade de suporte sobre solos moles, os esforços introduzidos devido à sobrecarga em aterros sobre esses solos exigem intervenções trabalhosas e normalmente onerosas. Assim, quando os esforços resistentes são menores que os esforços solicitantes, é necessário que se faça um reforço para garantir a qualidade da obra. Existem soluções com recursos naturais, como o rebeneficiamento ou compactação, ou com recursos externos, onde se destaca o reforço com geossintéticos.

As funções do EPS como um geoexpandido são isolamento térmico, enchimento ultraleve, inclusão compressível e amortecimento de ondas de pequena amplitude, em casos de vibrações do solo. Esse material oferece aos engenheiros geotécnicos uma ferramenta que pode ser usada para desenvolver soluções para uma ampla variedade de problemas, pelo fato de que o geoexpandido de EPS pode desempenhar funções que geossintéticos mais tradicionais não desempenham (HORVATH, 1994).

Muitos autores estudaram diversas aplicações, como construção de estradas sobre solos com baixa capacidade de suporte (BEINBRECH; HILLMANN, 1997; MOHAJERANI et al., 2017), alargamento de rodovias, aterros leves de encontros de pontes/viadutos rodoviários (YANG; HUANG; WANG, 2003; SNOW; NICKERSON, 2004; STUEDLEIN; NEGUSSEY, 2013) e de aterros ferroviários, proteção de tubulações como oleodutos e estruturas enterradas (BARTLETT; LINGWALL; VASLESTAD, 2015b), estabilização de taludes (JUTKOFISKY; SUNG; NEGUSSEY, 2000; AKAY et al., 2013), redução da pressão lateral em muros (ERTUGRUL; TRANDA, 2013), assentos/arquibancadas em estádios e teatros, submetido à solicitações sísmicas (TRANDAFIR; BARTLETT; LINGWALL, 2010b; ATHANASOPOULOS - ZEKOS; LAMOTE; ATHANASOPOULOS, 2012; EKANAYAKE; LIYANAPATHIRANA; LEO, 2014; LIYANAPATHIRANA; EKANAYAKE, 2016), além de outras aplicações (GREELEY, 1997; HORVATH, 1994, 1997, 2008; MEGUID et al., 2017).

Mohajerani et al. (2017) estudaram o uso do Poliestireno Expandido na construção de pavimentos para combater a questão dos solos que possuem subleitos com baixa capacidade de carga, uma aplicação que tem obtido muito sucesso e, por isso, foi amplamente adotada e utilizada por mais de quatro décadas. Outras aplicações do EPS incluem isolamento térmico, inclusão compressível, estabilidade de taludes, construção de pilares de pontes, construção de estádios e até amortecimento de ruídos/vibrações.

A primeira aplicação do geofoam EPS na construção de pavimentos ocorreu na Alemanha, na década de 1950, durante uma investigação que avaliou a adequação do EPS como isolante de pavimento. Nesta investigação, placas foram usadas no lugar da proteção convencional contra congelamento. Apesar de seu sucesso nesta aplicação, o uso de geofoam EPS no isolamento de pavimentos foi restrito especificamente a terras altas e áreas montanhosas onde invernos rigorosos exigiriam a implementação de medidas de proteção contra geadas (MOHAJERANI et al., 2017).

Dessa forma, os geossintéticos tem fornecido ótimas soluções técnicas para a engenharia. Em um aterro convencional existe uma certa pressão de superfície que pode ser

diminuída com a introdução de blocos de EPS na estrutura do aterro, o qual permite reduzir os esforços verticais. Com relação aos esforços horizontais, em estruturas como cabeceiras de pontes e muros de arrimo, o sistema EPS elimina as forças horizontais que atuam sobre esses elementos, que podem, dessa forma, apresentar dimensões menores.

Em muros de arrimo, o EPS também é utilizado com a função de drenagem, nesse caso é utilizado um tipo especial de placa de poliestireno expandido que, no processo de fabricação, utiliza-se um artifício para obter uma soldagem parcial homogênea e controlada das pérolas de EPS pré-expandidas, o que fornece qualidades drenantes às placas devido à presença de microcanais que funcionam como dreno de grande eficiência. Essas placas são aplicadas sobre a impermeabilização, garantindo também uma proteção mecânica, diretamente na face interna do muro, tendo na base um tubo drenante para o esgotamento da água, o aterro pode ser feito em contato direto com o EPS.

Destaca-se que o dimensionamento deve ser feito em função das cargas solicitantes, do tipo de solo e das características do EPS, já que suas propriedades mecânicas são alteradas em função da massa específica dos blocos. Quanto maior a massa específica, melhor serão suas propriedades mecânicas, no geral, e para o uso em geotecnia a massa específica do EPS não poderá ser inferior a 20 kg/m^3 pois as características mecânicas e deformações não serão compatíveis para tais aplicações.

O coeficiente de atrito entre as faces dos blocos de EPS normalmente é $\mu = 0,5$, porém é possível utilizar chapas dentadas na interface entre os blocos para uni-los, garantindo uma melhor solidarização do maciço.

Quando utilizado em situações que exista a possibilidade de ataques químicos, é necessário que sejam adotadas medidas de proteção dos blocos, como o envelopamento do conjunto com um filme de polietileno, evitando o contato do EPS com hidrocarbonetos.

Uma das principais funções do geoexpandido de EPS na geotecnia é sua utilização como uma inclusão compressível. Inclusão compressível é qualquer material que se comprime mais facilmente, pelo menos em uma direção, sob uma tensão aplicada ou deslocamento comparado a outros materiais que estejam em contato ou na vizinhança. Em aplicações geotécnicas, uma inclusão compressível é tipicamente colocada entre uma estrutura abaixo do solo e o solo circundante (solo ou rocha). Como a inclusão é o componente mais compressível do sistema estrutura-inclusão-solo, esta se deformará mais rapidamente do que os outros componentes do sistema sob uma tensão ou deslocamento aplicado (HORVATH, 1997).

Ainda de acordo com Horvath (1997), o uso de inclusões compressíveis em aplicações geotécnicas é antigo, materiais como fardos de feno tem sido usados desde o início do século

XX para reduzir tensões verticais sobre a tubulação. A utilização do EPS com essa função pode resultar em uma variedade de benefícios, na maioria das vezes, pode reduzir significativamente as cargas sobre a estrutura e em muitos casos é uma alternativa mais econômica do que projetar a estrutura para suportar a maior carga, isto é observado principalmente no caso de uma estrutura existente que esteja sobrecarregada e requeira alguma forma de restauração, ou ainda que requeira atualizações para resistir a cargas maiores do que aquelas para as quais foi originalmente projetada.

A utilização de EPS como enchimento leve para aterros e como isolamento térmico para estradas, ferrovias e edifícios é bastante comum, já as aplicações onde esse material desempenha a função de inclusão compressível são menos conhecidas, e por consequência disso, menos usadas.

3.2.5 Ensaios e Propriedades

Existem algumas normas brasileiras que determinam métodos de ensaios para o poliestireno expandido, sendo as principais: a NBR 7973 para determinação de absorção água; NBR 8082 de resistência à compressão; NBR 11948 de ensaio de flamabilidade; NBR 12094 para determinação da condutividade térmica e a NBR 11949 para determinação da massa específica aparente.

Resistência à compressão

As tensões de compressão do EPS são uma função da massa específica, e as curvas tensão-deformação mostram que a maior massa específica do geoexpandido desenvolve alta resistência à compressão e natureza das curvas tensão-deformação são análogas para todas as massas específicas e tamanhos de amostras testados. A tensão de escoamento do EPS também aumenta com a massa específica (BEJU; MANDAL, 2017).

A compressão é o modo predominante de carregamento de EPS em aplicações geotécnicas, portanto a resistência à compressão é um parâmetro extremamente importante. Destaca-se que a resistência à compressão do EPS é dada pela tensão de compressão a uma deformação de 10%, conforme estipulado pelos padrões ASTM, já que o poliestireno expandido não falha na forma típica de ruptura quando colocado sob uma carga de compressão, ao contrário, ele se esmaga unidimensionalmente (MOHAJERANI et al., 2017). Horvath sugere que deve-se projetar dentro da faixa elástica do EPS, de modo a manter a tensão compressiva de longo prazo dentro de uma faixa aceitável.

Carregamento à curto prazo

Esse tipo de comportamento é normalmente determinado em laboratório com ensaios de compressão simples em amostras cúbicas (comumente com lado de 50 mm). As taxas de carregamentos são rápidas, em torno de 1 a 20% por minuto, sendo comum utilizar 10% por minuto, e os ensaios são realizados em condições comuns de laboratório (HORVATH, 1994).

Horvath (1994) também destaca que da curva tensão versus deformação para amostra com massa específica em torno de 20 kg/m³ tem-se características de comportamento elástico linear até 2% de força, sendo que o limite elástico aumenta com o aumento da massa específica do EPS assim como a resistência à compressão.

O comportamento tensão versus deformação é afetado pela temperatura, com a resistência à compressão aumentando com a diminuição da temperatura e vice-versa (BASF, 1987 apud HORVATH, 1994).

Carregamento a longo prazo

O EPS é um material termoplástico, dessa forma espera-se que o comportamento dependente do tempo seja considerado no projeto, assim como é feito para os demais geossintéticos poliméricos. Esse tipo de comportamento inclui tanto a fluência (deformação sob carga constante no tempo) quanto relaxamento (mudança de tensão sob deformação constante no tempo). O efeito da fluência aumenta com a diminuição da massa específica. Além disso, alguns ensaios indicam que o efeito da fluência aumenta com o aumento da temperatura para uma dada massa específica de EPS (HORVATH, 1994).

O geoexpandido quando utilizado em aterro sobre solos moles, sub-base de pavimentos, encontro de pontes e outras aplicações subterrâneas sofre solicitações dinâmicas causadas pelo tráfego de veículos e solicitações de cargas constantes, por isso há uma grande necessidade de estudar o comportamento deste material sob efeito de carga cíclica, alguns estudos tem sido conduzidos na análise do comportamento do EPS submetido a carregamentos cíclicos (BEINBRECH; HILLMANN, 1997; OSSA; ROMO, 2011; TRANDAFIR; BARTLETT; LINGWALL, 2010a; TRANDAFIR; ERICKSON, 2012).

Na literatura nacional, Dias et al (2016) também analisaram resultados de ensaios de compressão uniaxial cíclica em poliestireno expandido, obtendo dados característicos do material analisado, como módulo de elasticidade e resistência à deformação em diferentes estágios e tensão de escoamento, que são essenciais para a utilização do material em diferentes obras de terra.

Existem outros três modos de deformação, além da compressão, nos quais amostras de EPS são normalmente ensaiadas: tensão, cisalhamento e flexão. Em cada um desses ensaios, amostras relativamente pequenas são submetidas a um carregamento controlado até que ocorra sua ruptura física. A tensão máxima calculada no corpo de prova é definida pela tensão de ruptura (HORVATH, 1994).

Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento do poliestireno expandido pode ser dividida em dois tipos diferentes, estas são as forças de cisalhamento internas e externas. O primeiro diz respeito à resistência de um bloco EPS, enquanto o segundo relaciona-se com a resistência ao deslizamento na interface entre os blocos EPS, e também a resistência ao deslizamento na interface entre os blocos EPS e outros materiais (MOHAJERANI et al., 2017).

Por meio de investigações conduzidas pela BASF, descobriu-se que há uma relação direta entre a resistência ao cisalhamento interna e a massa específica, onde um bloco EPS de maior massa específica terá maior resistência ao cisalhamento.

A resistência ao cisalhamento externa é dividida em duas subcategorias, a primeira, que é a resistência ao cisalhamento na interface EPS/EPS, pode ser calculada pela equação Mohr-Coulomb modificada, da qual sabe-se que a resistência ao cisalhamento nesta interface é dependente da tensão gerada pelo peso dos blocos EPS. Além disso, é importante observar que quando ocorre um carregamento horizontal excessivo pode ser necessário instalar conectores mecânicos para garantir que os blocos não se desloquem lateralmente. A segunda subcategoria é a resistência ao cisalhamento na interface entre o EPS e outros materiais, também pode ser calculada pela equação da teoria de Mohr-Coulomb modificada, a única diferença é o ângulo de atrito que é usado, uma vez que o ângulo de atrito varia para diferentes materiais. No entanto, é aceitável que o projetista assuma 30° para o ângulo de atrito para uma interface de geoexpandido/areia, 55° para uma interface EPS/geomembrana e 25° para uma interface EPS/geotêxtil (MOHAJERANI et al., 2017). O valor de 55° para uma interface EPS/geomembrana, sugerido por Mohajerani et al (2017), é elevado em relação aos usuais encontrados em outras literaturas e na prática corrente de laboratório.

No contexto da análise de estabilidade de estruturas leves que utilizam blocos, é necessário realizar análises internas e externas dos modos de ruptura. Em particular, uma análise de estabilidade externa de uma estrutura de blocos de geoexpandido requer conhecimento sobre o comportamento do cisalhamento de um bloco individual porque, frequentemente, o fator de segurança do plano de ruptura que passa através da montagem de

bloco é investigado. Dessa forma, o comportamento da resistência ao cisalhamento ao longo da interface entre dois blocos de geoexpandido (EPS/EPS) necessita ser avaliado (ÖZER; AKAY, 2016). Vários estudos tem sido conduzidos para avaliar as propriedades desse tipo de resistência ao cisalhamento (SHEELEY, 2000; SHEELEY; NEGUSSEY 2000; ATMATZIDIS et al., 2001; NEGUSSEY et al., 2001; BARRETT, 2008).

Ensaio triaxial

Ensaio triaxiais não consolidados (UU) foram realizados por Beju & Mandal (2017) nas amostras de geofoam EPS com dimensões de 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura, para diferentes massas específicas. O tempo médio de carregamento necessário para cada amostra foi de cerca de 15 minutos e durante o ensaio nenhum padrão de falha definido foi observado. Para todas as massas específicas do EPS, o comportamento das curvas tensão-deformação é quase similar e linear até 1,5% da deformação axial e, posteriormente, um aumento muito pequeno na tensão desviadora foi observado com o aumento da deformação axial. As curvas obtidas mostram o comportamento não linear de tensão-deformação para diferentes massas específicas de EPS, e após o ponto de escoamento a inclinação diminui, passando rapidamente para o estágio de plástico. As envoltórias obtidas são praticamente horizontais, o que mostra um comportamento predominantemente coesivo do material, observa-se assim que a coesão é um parâmetro importante que contribui para a resistência ao cisalhamento do geoexpandido de EPS e é uma função da massa específica. Enquanto isso, o valor do ângulo de atrito interno aumenta muito menos com um aumento da massa específica.

Quando utilizado em aplicações subterrâneas no geral, o poliestireno expandido fica confinado, mesmo que sob baixas tensões, mostrando a necessidade de estudar o comportamento deste material por meio de ensaios triaxiais. Vários estudos têm sido conduzidos para melhor entender o comportamento do EPS submetido ao confinamento (BEJU; MANDAL, 2017; LEO et al., 2008; OSSA; ROMO, 2012).

Na literatura nacional, Avesani Neto (2008) afirma que estudar o comportamento do EPS quando submetido a solicitação triaxial é necessária para uma melhor interpretação de suas propriedades, mesmo sabendo que durante sua vida útil os blocos de EPS são solicitados por tensões de confinamento de pequena magnitude.

Absorção de água

Beju & Mandal (2017) realizaram ensaios de absorção de água de acordo com o método de ensaio padrão da ASTM C272-12. Foram utilizados os corpos de prova com

dimensões de 75 mm de comprimento, 75 mm de largura e 13 mm de espessura. A massa seca das amostras foi coletada com uma balança de alta precisão e o ensaio foi realizado imergindo a amostra em um recipiente com água por 24 horas. Depois disso, os corpos de prova foram retirados do recipiente e enxugou-se toda a superfície com um pano limpo e seco até que não haja água visível e imediatamente a massa úmida das amostras foi pesada e registrada com a mesma precisão. A absorção de água do EPS em porcentagem é calculada como a massa de água absorvida pela amostra de EPS em relação a sua massa seca inicial. O resultado do ensaio mostra que a propriedade de absorção de água do EPS é baixa e diminui à medida que aumenta sua massa específica.

Deve-se notar que o processo de absorção de água no EPS é reversível. Observações de campo de longo prazo indicaram flutuações sazonais no conteúdo de água do EPS, similar às aquelas observadas na zona vadosa do solo (HORVATH, 1994).

Massa específica

É possível produzir blocos de EPS em diferentes massas específicas dentro de certos limites com precisão, o que é importante, já que as propriedades geotécnicas do material se relacionam bem com sua massa específica. Os blocos podem ser produzidos numa faixa entre aproximadamente 10 kg/m³ e 40 kg/m³. Na prática é comum utilizar massas específicas entre 15 kg/m³ e 30 kg/m³, normalmente variando de 5 em 5 kg/m³ e na maioria das aplicações geotécnicas usa-se o material de 20 kg/m³ (HORVATH, 1994).

Para Mohajerani et al. (2017), as propriedades de engenharia do poliestireno expandido estão diretamente relacionadas à massa específica. Isso inclui resistência à compressão, módulo de elasticidade e comportamento de fluência. Como resultado, é importante usar um bloco EPS que tenha uma massa específica adequada.

Durabilidade

O EPS é não-biodegradável, quimicamente inerte tanto no solo quanto na água e não possui valores nutritivos para organismos vivos (BASF, 1990 apud HORVATH, 1994). O material ainda é hidrofóbico e sua estrutura de células fechadas inibe a absorção de água, entretanto, a água, tanto na fase líquida quanto vapor, pode entrar nos pequenos vazios entre as células.

Quando exposto à radiação ultravioleta por um longo período de tempo, a superfície do EPS tende a amarelar e tornar-se mais frágil, então, assim como para outros geossintéticos, a exposição à radiação ultravioleta por longos períodos é indesejável. Existem poucos líquidos

que dissolvem o EPS, para as aplicações geotécnicas, os mais importantes são os combustíveis de veículos, sendo hidrocarbonetos, como gasolina e diesel. Em aplicações como aterros rodoviários, onde existe o risco de derramamento de combustível, a superfície do EPS pode ser facilmente protegida por uma geomembrana ou outro material (BASF, 1990 apud HORVATH, 1994).

O poliestireno expandido irá derreter quando exposto a temperaturas superiores a 150°C e é inflamável se existir uma fonte de ignição (BASF, 1990 apud HORVATH, 1994). Pérolas de EPS que contém aditivos retardadores de chama também estão disponíveis, porém seu uso na produção de blocos para aplicações geotécnicas não é comum em diversos países e deve ser especificado, caso seja necessário no projeto. Não há diferença visual entre o EPS com ou sem esse aditivo, nem alteração nas suas propriedades do ponto de vista da engenharia (HORVATH, 1994).

As propriedades apresentadas por Horvath (1994) são para o material virgem, o autor destaca que blocos de EPS fabricados com uma grande quantidade de material reciclado podem ter propriedades diferentes, especialmente sob compressão. Entretanto a utilização de material reciclado não foi amplamente abordada, sendo uma questão importante a ser estudada.

Como exposto anteriormente, existem inúmeras pesquisas sobre o produto e suas aplicações, no entanto, estas estão restritos ainda ao contexto internacional, em particular, em aplicações de aterros sobre solos moles, encontros de pontes e viadutos e bases de pavimentos conforme citado anteriormente, aos quais somam-se estudos sobre algumas propriedades e características do material (GREELEY, 1997; HORVATH, 1994, 1997, 2008; ZOU; SMALL; LEO, 2000; BEJU; MANDAL, 2017), além de estudar a absorção de água (GNIP et al., 2006; OSSA; ROMO, 2012), ensaios triaxiais (LEO et al., 2008), solicitações dinâmicas (OSSA; ROMO, 2011), ensaios de cisalhamento direto (ÖZER et al., 2014; ÖZER; TRANDAFIR; BARTLETT; LINGWALL, 2010a, 2010b), e estudos sobre sua degradação (TRANDAFIR; ERICKSON, 2012; TRANDAFIR; ERTUGRUL, 2011).

No contexto do Brasil, poucos trabalhos foram desenvolvidos sobre o assunto. Um exemplo de aplicação é o encontro de pontes do complexo viário da cidade de Várzea Paulista (interior do estado de São Paulo). No âmbito das pesquisas e investigação de propriedades do material cita-se o trabalho de Avesani Neto (2008). Esse trabalho avaliou propriedades mecânicas e de resistência de diferentes massas específicas de EPS. No entanto, como cita o autor, existem ainda pontos a serem estudados para que se tenha um conhecimento amplo a respeito desse material em aplicações geotécnicas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado

O material utilizado na pesquisa foi fornecido pela empresa Termotécnica. Esta empresa forneceu as amostras de EPS já cortadas, nas dimensões exigidas para os ensaios realizados, as quais foram acondicionadas em laboratório à temperatura de 23°C, conforme prescreve a ASTM D1621 – 2000. A Tabela 3 apresenta a descrição do material.

Tabela 3. Características do Poliestireno expandido fornecido por empresa nacional.

Material	Massa específica nominal (kg/m ³)
EPS (virgem)	10,0
	15,0
	20,0
	25,0
	30,0
EPS (reciclado 30%)	10,0
	12,5

O material foi inicialmente submetido a ensaios de caracterização, hidráulicos e de resistência mecânica. Todos os ensaios dessa pesquisa foram realizados no laboratório de geotecnia da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP) e na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC - USP).

4.1 Ensaios hidráulicos

4.1.1 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM C272 de 2001. Foram utilizadas três amostras (dimensões cúbicas com aresta de 100 mm) de cada massa específica (10, 15, 20, 25 e 30 kg/m³) a fim de se obter uma média dos valores.

Inicialmente foi medida a massa natural (à temperatura ambiente) das amostras acondicionadas em laboratório conforme prevê a norma, para posteriormente obter-se a umidade higroscópica do material. Em seguida os corpos de prova foram colocados em estufa à uma temperatura de 95°C por um período de 24 horas, a fim de obter sua massa seca. O próximo passo foi obter a massa saturada imergindo as amostras em água destilada durante 24 horas. Após esse período, essas amostras foram retiradas do recipiente e enxugadas para retirar a água excedente na superfície e então pesadas em uma balança de alta precisão.

Realizou-se também ensaios de absorção de água de longa duração, que difere do ensaio simples pelo tempo de imersão das amostras. Neste, os corpos de prova foram mantidos submersos por um período de 28 dias, buscando estudar o comportamento do EPS quando exposto ou em contato com a água por longos períodos de tempo. A Figura 7 ilustra as amostras preparadas para o ensaio.

Figura 7. Amostras separadas para pesagem.



Depois de obtidas todas as massas, a absorção de água do material (em porcentagem) foi obtida pela razão da massa de água absorvida pelo corpo de prova ao ser saturado e a massa seca em estufa. De forma análoga, o teor de umidade higroscópica do material foi obtido da razão entre a massa de água absorvida em condições naturais (sem saturação) e a massa seca em estufa.

4.1.2 Ensaio de permeabilidade

Este ensaio foi realizado de forma análoga aos ensaios realizados com amostras de solo, a montagem da câmara foi feita como mostrado na Figura 8.

Figura 8. Etapas de montagem do ensaio.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Inicialmente preencheu-se o fundo da câmara de ensaio com pedregulho, o qual deve possuir um valor de condutividade hidráulica elevado, para que a água que percola pelo corpo de prova seja facilmente drenada. Sobre esta camada de pedregulho, que deve possuir cerca de $1/3$ da altura da câmara, foi colocado um disco de borracha para servir de “berço” para a camada de bentonita.

O corpo de prova, cuja altura é cerca de $1/3$ da altura da câmara, é posicionado de modo a se encaixar entre o “berço” e em contato direto com a camada de pedregulho, visando permitir o fluxo de água somente nesta região. A camada de bentonita deve ser cuidadosamente colocada, de modo a se evitar um fluxo de água indesejado por fora da amostra.

Após a camada de bentonita é colocado outro disco de borracha para evitar o contato com a camada superior de pedregulho. Essa última camada de pedregulho tem a função de promover a regularização do fluxo na câmara. Por último é colocado uma tela e a tampa da câmara, a qual possui entrada de água para se aplicar o fluxo.

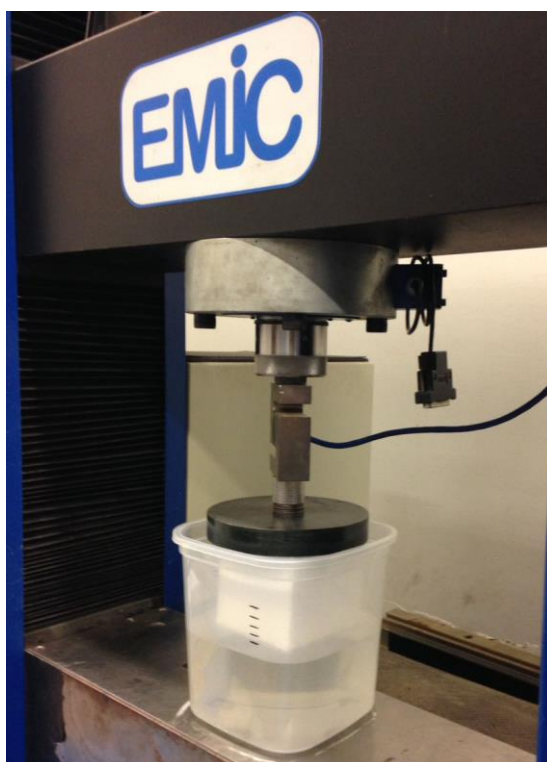
Finalizada a montagem da câmara, é aplicado um gradiente hidráulico que desenvolve o fluxo e a saturação, em todas as amostras realiza-se a medição da permeabilidade à carga constante.

Neste ensaio, onde variou-se apenas a massa específica das amostras, foram utilizadas amostras de 10, 15, 20, 25 e 30 kg/m^3 , sendo estas cilíndricas, com diâmetro de 75 mm e altura de 50 mm.

4.1.3 Ensaio de empuxo

O ensaio de empuxo foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, por meio da imersão gradativa dos corpos de prova em um recipiente contendo água (Figura 9), no qual, para cada volume imerso, sendo este pré determinado, foi registrada a força de suspensão da amostra (empuxo), utilizando uma célula de carga.

Figura 9. Ensaio de empuxo sendo realizado em amostra.



O ensaio foi realizado com amostras de massa específica de 10, 15, 20, 25 e 30 kg/m³, sendo estes cúbicos com arestas de 100 mm.

4.2 Ensaios mecânicos

4.2.1 Ensaio de cisalhamento direto

Foram realizados dois tipos de cisalhamento direto. O primeiro é realizado na interface entre dois corpos de prova (junta) e tem como objetivo de obter parâmetros de contato entre dois blocos ou entre um bloco de EPS e outros materiais, como solo, geomembranas ou outros geossintéticos, o que comumente ocorre na prática, sendo parâmetros importantes.

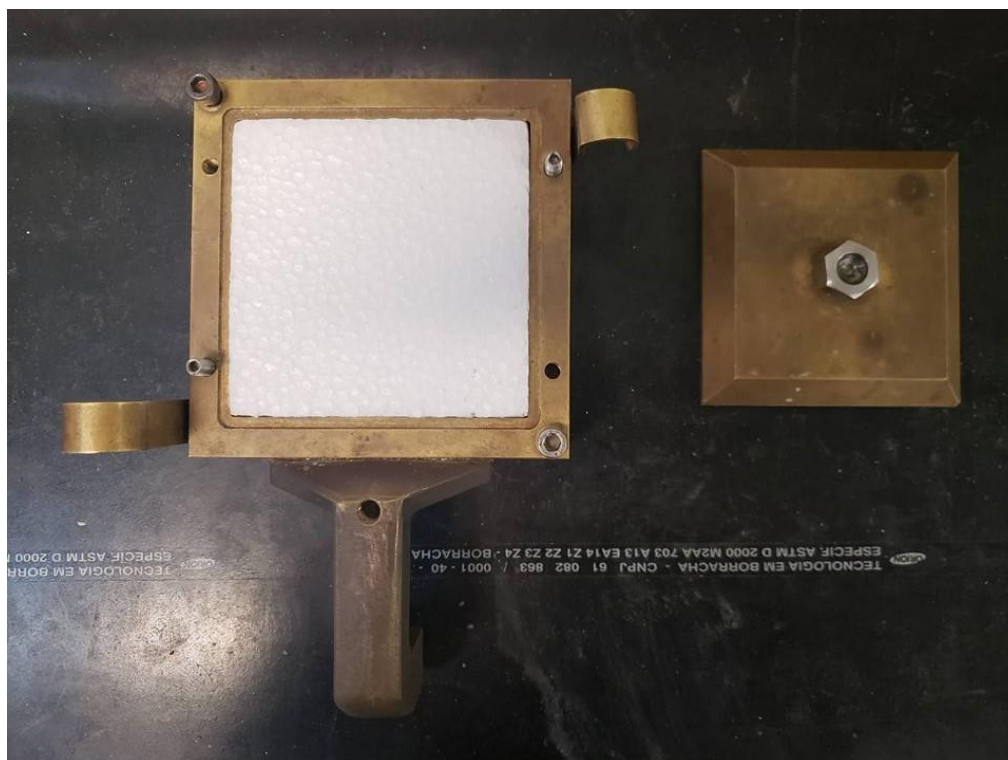
O segundo é feito com um bloco maciço de EPS (interno) e busca obter as propriedades intrínsecas do material, como coesão e ângulo de atrito internos. Em ambos, foram usadas amostras com massas específicas de 10, 15, 20, 25 e 30 kg/m³ e amostras recicladas de 10 e 12,5 kg/m³. A seguir serão explicados os métodos de ensaio dos dois tipos de cisalhamento direto separadamente.

4.2.1.1 Ensaio de cisalhamento direto de interface (junta)

O ensaio de cisalhamento direto em solos é normalizado pela ASTM D3080 de 1998, entretanto, foram feitas algumas alterações no ensaio com EPS seguindo os métodos utilizados por Avesani Neto (2008), a fim de posteriormente comparar os resultados.

Nesse ensaio foram utilizadas duas placas quadradas de EPS com arestas de 100 mm e altura de 25 mm cada, essas placas encaixavam-se perfeitamente no suporte, que permitia o contato entre ambas, como mostra a Figura 10. Dessa forma, estando confinado o corpo de prova e aplicando um deslocamento relativo entre as placas obteve-se parâmetros de contato entre elas. A velocidade utilizada na execução do ensaio foi de 0,50 mm/min.

Figura 10. Detalhe da caixa de cisalhamento direto com o corpo de prova.



Aplicou-se tensões confinantes de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 kPa, sendo as tensões de até 40 kPa utilizadas para as massas específicas menores (até 20 kg/m³) e as tensões maiores (50 e 60 kPa) foram acrescentadas às maiores massas específicas (25 e 30 kg/m³), visando uma melhor representatividade dos resultados. Essas tensões foram adotadas com base nos métodos utilizados por Avesani Neto (2008) e buscando representar as situações de campo, considerando que um aterro de geoexpandido possui baixo peso. O ensaio foi realizado em um equipamento comumente utilizado para ensaios em solo, como é mostrado na Figura 11.

Figura 11. Equipamento utilizado para os ensaios de cisalhamento direto.



4.2.1.2 Ensaio de cisalhamento direto interno

Assim como no ensaio de cisalhamento de interface, este ensaio também toma como base a norma para ensaios de cisalhamento direto em solos, a ASTM D3080 de 1998 e o mesmo equipamento é utilizado para ambos os ensaios.

A principal diferença é a utilização de apenas um bloco de EPS para o cisalhamento interno, tendo este dimensões quadradas com aresta de 100 mm e altura de 50 mm. A caixa de cisalhamento utilizada para montar o corpo de prova é a mesma utilizada em ensaios com solo, no qual a amostra encaixa-se perfeitamente, essa caixa foi posicionada na máquina de cisalhamento e sobre esta aplicou-se uma tensão de confinamento. Aplicando um deslocamento na caixa do ensaio, promoveu-se o cisalhamento do bloco de EPS, obtendo dessa forma os valores de coesão e ângulo de atrito internos.

Foram utilizadas tensões confinantes reduzidas, iguais a 10, 20 e 40 kPa, com o objetivo de representar situações de campo, de forma análoga ao que foi feito no ensaio de cisalhamento direto de interface. A velocidade de execução usada no ensaio foi de 1,00 mm/min, sendo a máxima velocidade permitida pela máquina de ensaios.

4.2.2 Ensaio de compressão triaxial

Foram realizados ensaios triaxiais consolidados não drenados (CU), com as amostras secas, situação comum encontrada na prática, garantindo que não haja pressão neutra envolvida no ensaio. A velocidade de execução foi de 1,14 mm/min e as tensões confinantes aplicadas foram de 20, 30 e 40 kPa (baixas) para representar as situações que ocorrem em campo. Os ensaios foram realizados de acordo com a ASTM D 4757 (2002) sendo utilizadas amostras cilíndricas com dimensões 2:1, de forma análoga às dimensões utilizadas em corpos de prova de solos (diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm). As amostras de EPS foram fornecidas por empresa nacional em diferentes massas específicas (10, 15, 20, 25 e 30 kg/m³), além as amostras recicladas (10 e 12,5 kg/m³).

Para a montagem do ensaio, foi utilizada a câmara mostrada na Figura 12. Os corpos de prova foram revestidos com uma membrana impermeável e posicionados de maneira adequada na câmara de ensaio triaxial, utilizou-se pedras porosas para drenar o ar contido nos vazios dos corpos de prova durante a fase de adensamento. A Figura 13 (a, b, c e d) ilustra o processo de montagem do ensaio triaxial.

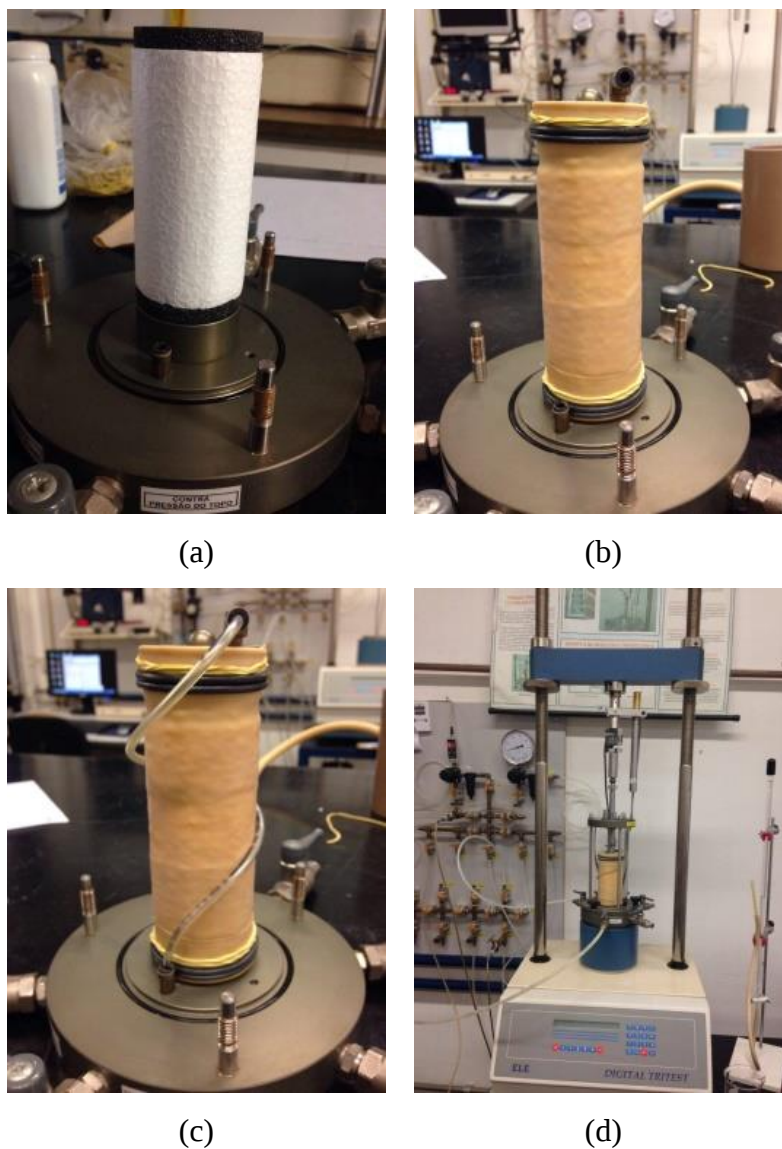
Figura 12. Detalhe da câmara de ensaios triaxiais.



Na fase de consolidação foi registrada a variação do volume do corpo de prova pelo tempo até a sua estabilização. Para as amostras de massas específicas maiores a estabilização volumétrica ocorreu de forma rápida, cerca de 30 a 60 minutos. Já para as massas específicas menores (10 e 15 kg/m^3), a estabilização volumétrica ocorreu de forma rápida quando aplicada uma tensão de 20 kPa , mas de forma lenta para as tensões maiores, demorando até 5 horas para que a variação volumétrica fosse estabilizada.

Na fase de ruptura, além da variação de volume, registrou-se o valor da tensão e da deformação axial. Posteriormente, estes valores foram corrigidos para as novas dimensões da amostra, e a velocidade adotada para o ensaio foi de $1,14 \text{ mm/min}$.

Figura 13. Etapas de montagem do ensaio.



4.2.3 Ensaio de compressão uniaxial simples

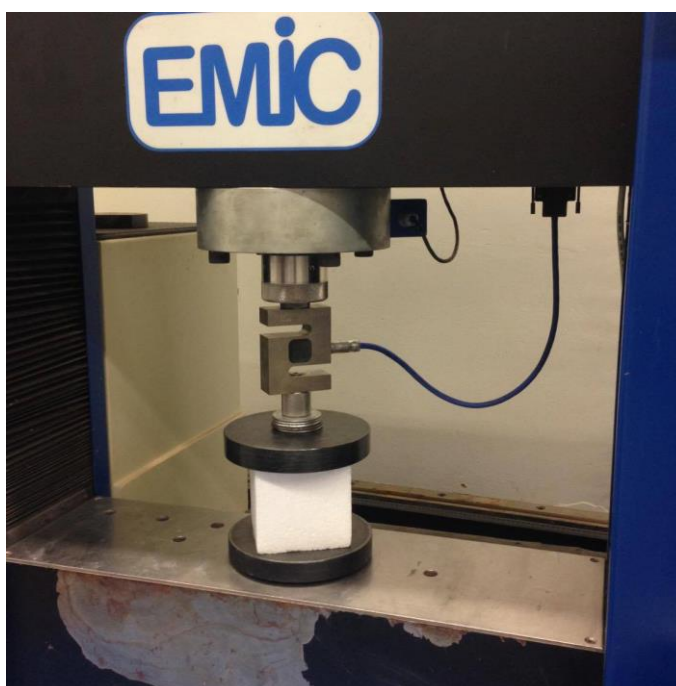
O ensaio de compressão uniaxial, normatizado pela ASTM D1621 – 2000 consiste em comprimir os corpos de prova cujas dimensões e massas são previamente conhecidas e, com isso, obter curvas com valores de tensão e deformação referentes a cada massa específica utilizada, apresentadas no apêndice deste trabalho.

Este ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade de 30 kN (Figura 14). Utilizou-se uma velocidade de execução de 50 mm/min. As amostras utilizadas são cúbicas, com arestas de 100 mm. Para cada massa específica, realizou-se o ensaio com cinco corpos de prova. A Figura 7 mostra o ensaio em andamento com o corpo de prova sendo solicitado.

A norma ASTM D1621 – 2000 especifica que a amostra tenha altura mínima de 25,4 mm e altura máxima menor que sua largura ou diâmetro, com área máxima de 232 cm², além de especificar a velocidade de ensaio sendo de 2,5 mm/min para cada 25,4 mm de espessura, atingindo 10% de deformação por minuto.

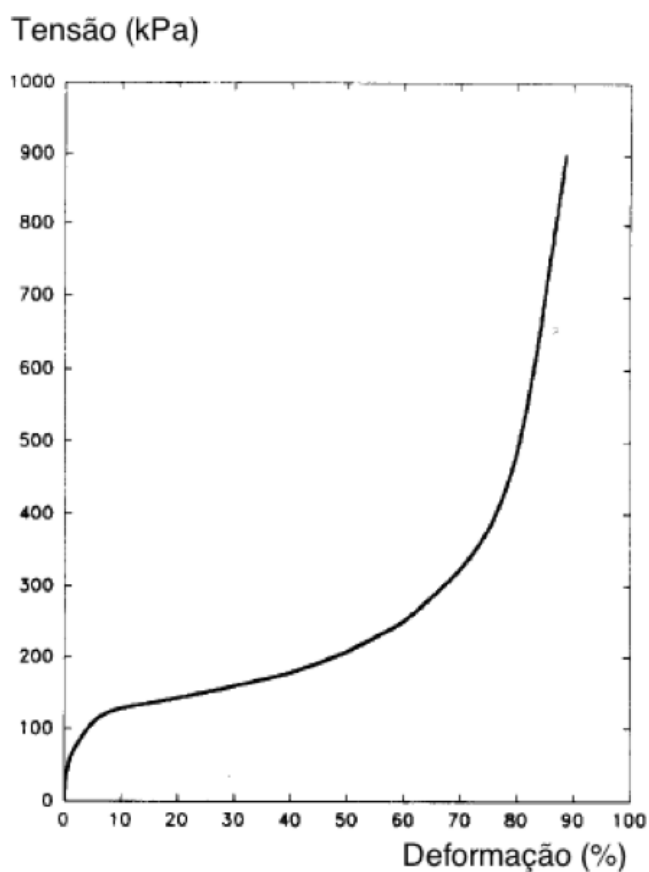
Como utilizou-se amostras cúbicas de 100 mm, supõe-se que a velocidade de execução seja de 10 mm/min, entretanto, foi utilizada uma velocidade de execução de 50 mm/min, assim como a utilizada por Avesani Neto (2008), a fim de comparar os resultados, já que esta é uma das raras pesquisas sobre EPS como geossintético no contexto nacional.

Figura 14. Ensaio de compressão uniaxial sendo realizado em corpo de prova.



De forma a se caracterizar a curva de deformação do material e visualizar-se o ponto de escoamento, bem como o caminhamento de tensões, o equipamento foi ajustado de modo que os ensaios de compressão uniaxial fossem conduzidos até um valor de deformação em torno de 30%. Esse valor foi adotado tendo-se em vista que o comportamento da curva para deformações acima do ponto de escoamento passa a ser do tipo “*work-hardening*”. Eriksson and Tränk (1991 apud Horvath, 1994) afirmam que a inclinação desse trecho linear pós escoamento é de cerca de 5% da inclinação do trecho elástico inicial da curva. Para níveis de deformação maiores que o anterior, o comportamento passa a ser não linear conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15. Comportamento tensão deformação de amostra de EPS de 21 kg/m³ (HORVATH, 1994).



4.2.4 Ensaio de compressão cíclica

O ensaio foi realizado de acordo com a ASTM C165. Foram utilizados corpos de prova cúbicos com arestas de 100 mm com massas específicas nominais de 10, 15, 20, 25 e 30 kg/m³. Embora esta norma recomende a utilização de corpos de prova cúbicos com arestas de 50 mm, a utilização de amostras com 100 mm de aresta é justificada pelo fato que de amostras maiores apresentam maior representatividade nos resultados, visto que esse material é utilizado em campo em blocos de grandes dimensões. O ensaio foi realizado em prensa com servo controle (Figura 16) no laboratório de mecânica das rochas do departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (USP).

Figura 16. Equipamento utilizado no ensaio de compressão cíclica.



Este ensaio é semelhante ao ensaio de compressão simples, entretanto, no cíclico não há elevação da carga acima de um limite extremo suportado pela amostra e nem abaixo de um valor pré estabelecido como um limite inferior de carga e, ocorre repetitivamente, por meio de sucessivas compressões e descompressões, o que garante o ciclo de carregamentos e descarregamentos.

Utilizou-se um valor reduzido de números de ciclos, a fim de se obter os valores do módulo de elasticidade (E) do material em diferentes fases do carregamento. Para tanto, o corpo de prova foi carregado e descarregado manualmente até atingir um valor de deformação em torno de 30%. Utilizou-se uma velocidade de ensaio de 5 mm/min, sendo este um valor intermediário entre os recomendados pela ASTM C165 (0,25 a 12,5 mm por minuto), esse valor também foi utilizado por Dias et al. (2016) em ensaio cíclico.

Buscou-se verificar por meio de ensaios de carga e descarga as variações que podem ocorrer na curva tensão *versus* deformação do EPS avaliando-se os módulos de elasticidade inicial (Ei), residual (Er) e plástico (Ep) do EPS. As amostras foram submetidas a sucessivas compressões e descompressões para cada massa específica. A descompressão foi feita manualmente quando atingidos valores de 8%, 16% e 24% de deformação, a fim de se estudar sua resistência sob este tipo de carregamento e como o módulo de elasticidade é influenciado pelas descompressões e recompressões.

O módulo de elasticidade inicial (Ei) foi obtido a partir da inclinação do trecho inicial da curva tensão *versus* deformação por meio da Lei de Hooke, para deformações de até 1% (fase elástica do material). Os valores dos módulos de elasticidade residual (Er) foram obtidos pela inclinação dos trechos de recompressão após os descarregamentos com 8, 16 e 24% de deformação. Foram obtidos também os valores para a fase plástica (Ep) medidos para a curva antes dos descarregamentos. Após o descarregamento, também foram obtidos os valores de Ep para os as deformações de 8 e 16% (ver Figura 67).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados para a avaliação da resistência do Poliestireno expandido por meio dos ensaios de laboratório, bem como a discussão destes, seguido por considerações finais que englobam, de forma geral, o comportamento do material.

Inicialmente, verificou-se a massa específica dos corpos de prova, já que estes foram fornecidos já cortados e separados conforme solicitado à empresa. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos das massas específicas dos corpos de prova, incluindo as amostras recicladas. São apresentados os valores nominais fornecidos pela empresa bem como os valores obtidos em laboratório.

Tabela 4. Massa específica dos corpos de prova.

Massa específica nominal (kg/m³)	Massa específica média obtida (kg/m³)	Coeficiente de variação (%)
10,0 (reciclado)	12,47	1,2371
12,5 (reciclado)	13,09	0,2960
10,0	11,74	0,8716
15,0	14,82	0,0896
20,0	19,12	0,4421
25,0	25,43	0,2163
30,0	29,35	0,3268

Os resultados mostram que os valores estão de acordo com aqueles fornecidos pela empresa, embora os valores de massa específica obtidos para 10 kg/m³, tanto para amostra virgem quanto reciclada, apresentaram um desvio padrão superior aos outros, os valores para as demais massas específicas apresentando apenas pequenas variações, estando todos dentro de uma faixa de variação aceitável.

5.1 Ensaios hidráulicos

5.1.1 Ensaio de absorção de água

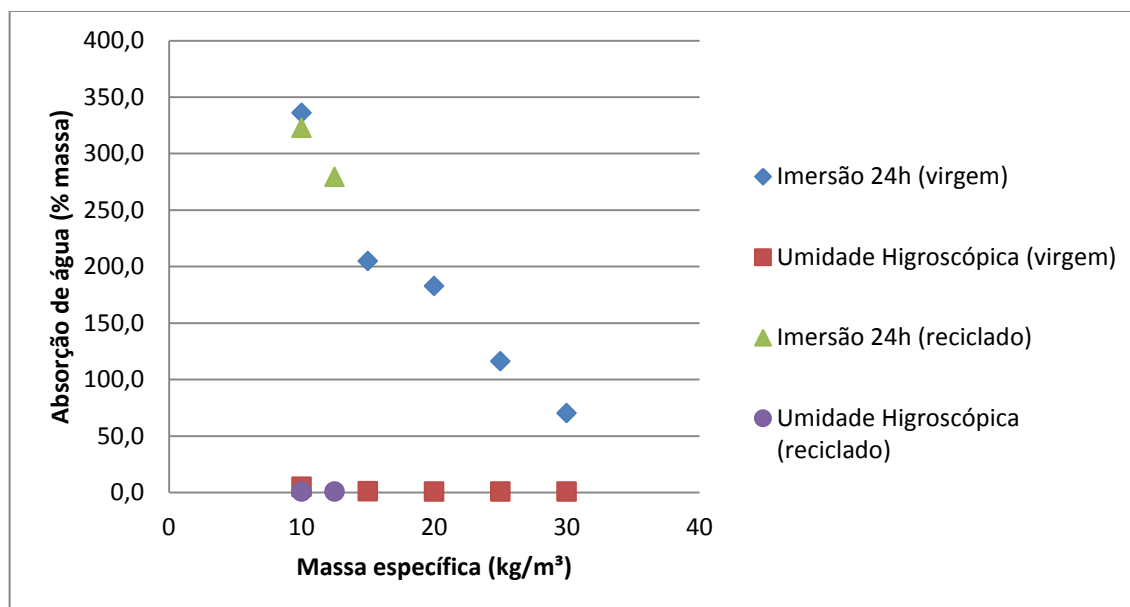
Foram avaliados valores de absorção de água e de absorção de água de longa duração, medidos para amostras saturadas, em períodos de 24 horas e 28 dias, respectivamente, de imersão em água, e também a absorção na umidade higroscópica do material para as amostras de EPS.

Os resultados de absorção de água (em porcentagem de massa) do material para os dois casos citados acima encontram-se nas tabelas seguintes. A Figura 17 mostra a relação entre as massas específicas estudadas e a porcentagem de absorção de água do material e de umidade higroscópica.

Tabela 5. Massa de água absorvida pelas amostras de EPS saturadas por um período de 24 horas e valores de absorção em porcentagem para amostras saturadas.

Massa específica (kg/m³)	Massa natural (g)	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Teor de umidade higroscópica (%)	Absorção de água do material (%)
10,0 (reciclado)	12,45	12,35	52,20	0,83	322,70
12,5 (reciclado)	12,97	12,86	48,81	0,82	279,42
10,0	11,90	11,34	49,43	4,93	336,00
15,0	15,01	14,86	45,29	0,97	204,78
20,0	19,09	18,95	53,59	0,71	182,72
25,0	26,10	25,92	56,00	0,69	116,03
30,0	29,69	29,45	50,13	0,82	70,22

Figura 17. Relação entre as massas específicas e porcentagem de absorção de água e umidade higroscópica em massa.

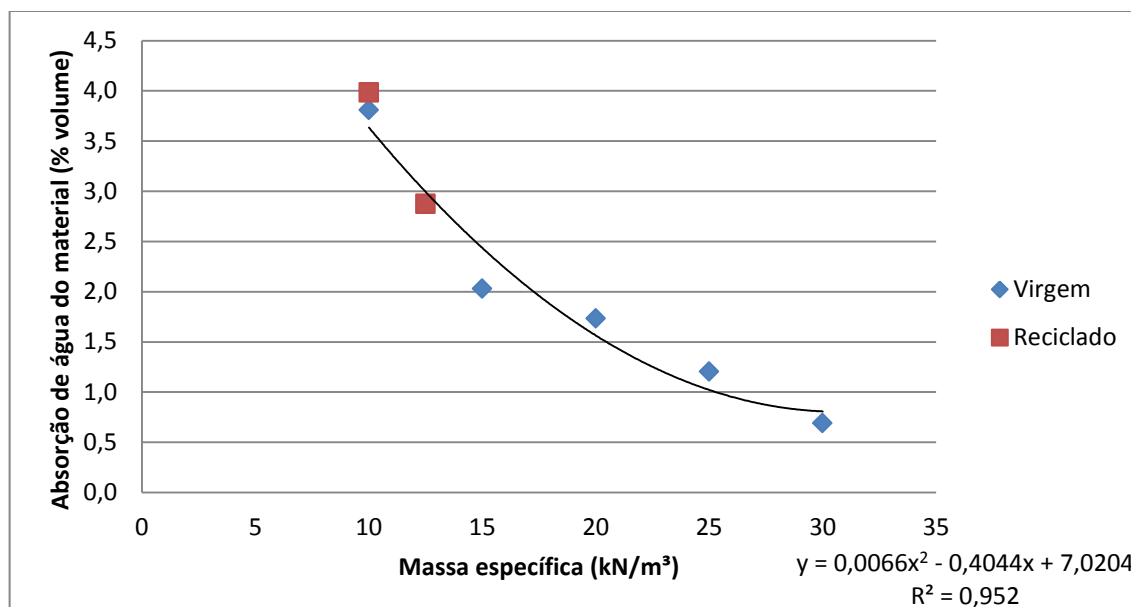


Na literatura é comum a apresentação dos valores de absorção de água em relação ao volume das amostras, assim, tomou-se como base o volume nominal das amostras cúbicas com aresta de 100 mm. Os valores em porcentagem de volume serão utilizados para a discussão a partir daqui. Desse modo, a Tabela 6 apresenta os valores de absorção de água por imersão em porcentagem de volume. Os resultados estão representados na Figura 18.

Tabela 6. Volume de água absorvido pelas amostras saturadas por um período de 24 horas.

Massa específica (kg/m³)	Volume nominal (cm³)	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Volume absorvido (cm³)	Absorção de água do material (% em volume)
10,0 (reciclado)	1000	12,35	52,20	39,85	4,0
12,5 (reciclado)	1000	12,86	48,81	28,76	2,9
10,0	1000	11,34	49,43	38,09	3,8
15,0	1000	14,86	45,29	20,29	2,0
20,0	1000	18,95	53,59	17,32	1,7
25,0	1000	25,92	56,00	12,03	1,2
30,0	1000	29,45	50,13	6,89	0,7

Figura 18. Relação entre as massas específicas e porcentagem de absorção de água em volume.



Nota-se que ocorre uma significativa redução na porcentagem de água absorvida com o aumento da massa específica do EPS após um período de 24 horas submerso, o que ocorre devido à maior presença de vazios nas massas específicas menores. As amostras recicladas apresentaram o mesmo comportamento que as amostras virgens. Além disso, os valores das porcentagens de absorção de água em volume não ultrapassam 4% do volume total das amostras.

Com relação ao teor de umidade higroscópico, observou-se que este é insignificante quando comparado a absorção de água por submersão, tanto para as amostras virgens quanto para as recicladas chegando a, no máximo, 5% da porcentagem em massa do material.

Percebe-se ainda que as amostras recicladas absorvem um volume de água um pouco maior que as amostras virgens, isso pode ser explicado pelo fato de que as amostras recicladas apresentam mais vazios que as intactas.

Isso mostra que há uma perda das características benéficas da utilização de EPS com baixa densidade em aterros, como também foi observado por Avesani Neto (2008). Assim, torna-se importante prever, na prática, um sistema de impermeabilização que evite o contato direto do geoexpandido com a água, além de um sistema de drenagem adequado e eficiente para retirar o mais rapidamente a água em contato com o EPS nas obras.

Beju & Mandal (2017) estudaram o comportamento do EPS quanto à absorção de água ao ser submerso por um período de 24 horas, de acordo com a ASTM C272. Os resultados

mostraram uma absorção de 4,41%, 3,6% e 2,88% para amostras de EPS com 12, 15 e 20 kg/m³ respectivamente, sendo bem próximos aos resultados desta pesquisa. E também concluíram que as propriedades de absorção de água do EPS são bem baixas e diminuem com o aumento da massa específica.

O comportamento do EPS quando colocado em contato com a água por um longo período de tempo também foi estudado para que se tenha um melhor entendimento do comportamento desse material nessa condição. Os resultados para amostras submersas por um período de 28 dias são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7. Volume de água absorvido pelas amostras saturadas por um período de 28 dias e em umidade higroscópica de EPS.

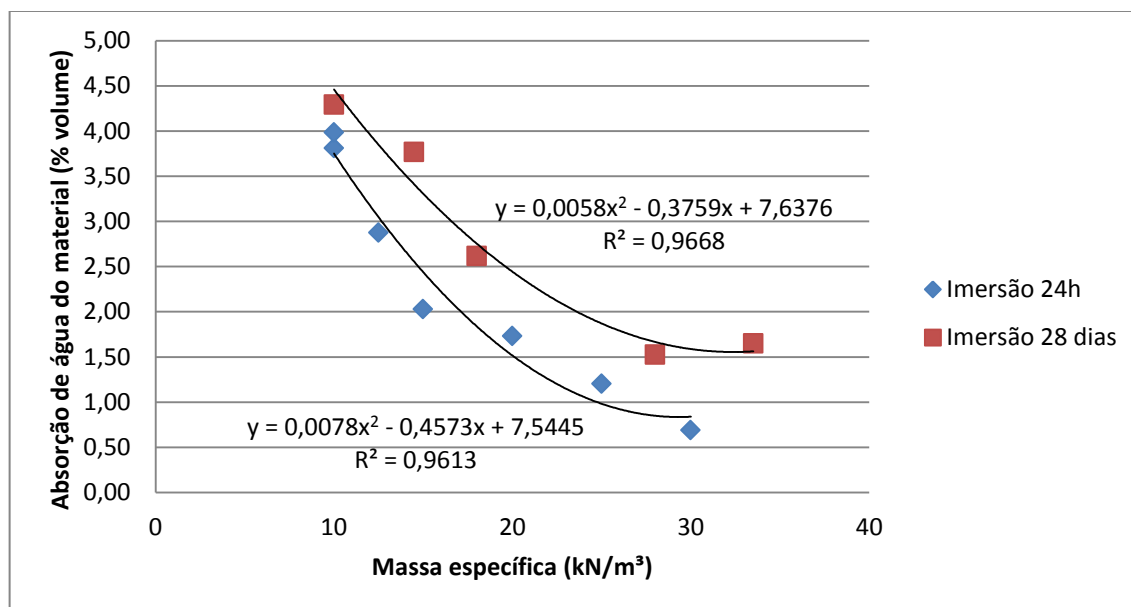
Massa específica (kN/m³)	Volume nominal (cm³)	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Volume absorvido (cm³)	Absorção de água do material (% em volume)
10,0	1000	10,20	53,11	42,91	4,3
14,5	1000	14,13	68,79	37,69	3,8
18,0	1000	17,24	64,34	26,17	2,6
28,0	1000	29,56	72,28	15,26	1,5
33,5	1000	32,85	88,05	16,48	1,6

As comparações entre a absorção de água em volume para os períodos de 24 horas e de 28 dias são mostrados na Figura 19.

A absorção de água aumenta nesse período, porém esse aumento é pouco significativo, aumentando de 4,0% para 4,3% em volume. Todavia, para massas específicas acima de 20 kg/m³ nota-se uma influência maior no tempo de absorção de água, onde o valor para 28 dias de absorção ultrapassa em mais de 100% o valor da absorção para 24 horas.

Ossa & Romo (2012), estudaram a influência de uma tensão confinante na absorção de água do EPS, e notaram que há uma forte influência na variação do teor de água das amostras de EPS. Além disso, para condições não confinadas, há um aumento no conteúdo de água durante os primeiros trinta dias, atingindo valores de 3,9% e 4,7% para amostras de 20 kg/m³ e 29 kg/m³, respectivamente. Depois desse período, a umidade da amostra permanece praticamente inalterada. Vale ressaltar que esses resultados são semelhantes aos relatados por Duškov (1997) para uma massa específica de 20 kg/m³ e ensaiadas sob condições não confinadas.

Figura 19. Comparação da relação entre as massas específicas e porcentagem de absorção de água em volume para imersão em 24 horas e em 28 dias.



Para um maior entendimento das características hidráulicas do Poliestireno Expandido, realizou-se ensaios de permeabilidade e empuxo, buscando entender como as variações de massa específica influenciam nessas propriedades.

5.1.2 Ensaio de permeabilidade

Os resultados do ensaio de permeabilidade estão apresentados na Tabela 8. Para cada amostra de EPS, deixou-se um tempo necessário até que esta estivesse saturada e o fluxo estabilizado para que o ensaio fosse realizado. Devido aos valores de permeabilidade obtidos, foram feitas medições de permeabilidade à carga constante, visto que desta forma obteve-se maior precisão dos valores de tempo medido. Os valores de permeabilidade obtidos também foram comparados com os valores apresentados por Avesani Neto (2008).

Avesani Neto (2008) apresenta também uma equação para o cálculo do coeficiente de permeabilidade em função da massa específica, apresentada pela Equação 1, que foi usada também para comparação. Para isso, foram utilizadas as massas específicas calculadas para cada amostra, a fim de obter um resultado mais fiel às amostras usadas, esses valores são mostrados na Tabela 9.

$$k = -0,0034 * \ln(\rho) + 0,0122 \quad (1)$$

Sendo k o coeficiente de permeabilidade e ρ a massa específica em kg/m³.

Tabela 8. Resultados do ensaio de permeabilidade.

Massa específica Nominal (kg/m³)	Massa específica calculada (kg/m³)	Permeabilidade à carga constante k (cm/s)	Desvio padrão das amostras	Vaores para comparação*	Desvio padrão
10,0	10,40	2,18E-03	0,00037	3,70E-03	0,0008
14,5	14,31	4,26E-03	0,00026	-	-
18,0	16,67	1,70E-03	0,00006	2,20E-03	0,0003
28,0	30,87	2,59E-03	0,00009	1,30E-06	0,0013
33,5	32,71	4,11E-03	0,00054	-	-

* Avesani Neto (2008)

Tabela 9. Comparação dos valores de permeabilidade.

Massa específica Nominal (kg/m³)	Massa específica calculada (kg/m³)	Permeabilidade à carga constante k (cm/s)	Permeabilidade (Equação 1)*	Desvio padrão
10,0	10,40	2,18E-03	4,24E-03	0,0010
14,5	14,31	4,26E-03	3,15E-03	0,0006
18,0	16,67	1,70E-03	2,63E-03	0,0005
28,0	30,87	2,59E-03	5,39E-04	0,0010
33,5	32,71	4,11E-03	3,42E-04	0,0019

Dos resultados, nota-se que todas as massas específicas estudadas apresentaram valores muito próximos de permeabilidade, todos da ordem de 10⁻³, mostrando que a massa específica pouco influencia nessa propriedade. Comparando-se com os resultados de Avesani Neto (2008), percebe-se que os valores obtidos para a massa específica de 28,0 kg/m³, apresentaram elevada divergência, entretanto, como para um valor de massa específica superior (33,5 kg/m³) a permeabilidade continuou em torno de 10⁻³ cm/s, o valor obtido de 2,59 x 10⁻³ para 30 kg/m³ mostra-se coerente. Este fenômeno também é observado em geomembranas, nas quais as diferentes gramaturas pouco influenciam na permeabilidade.

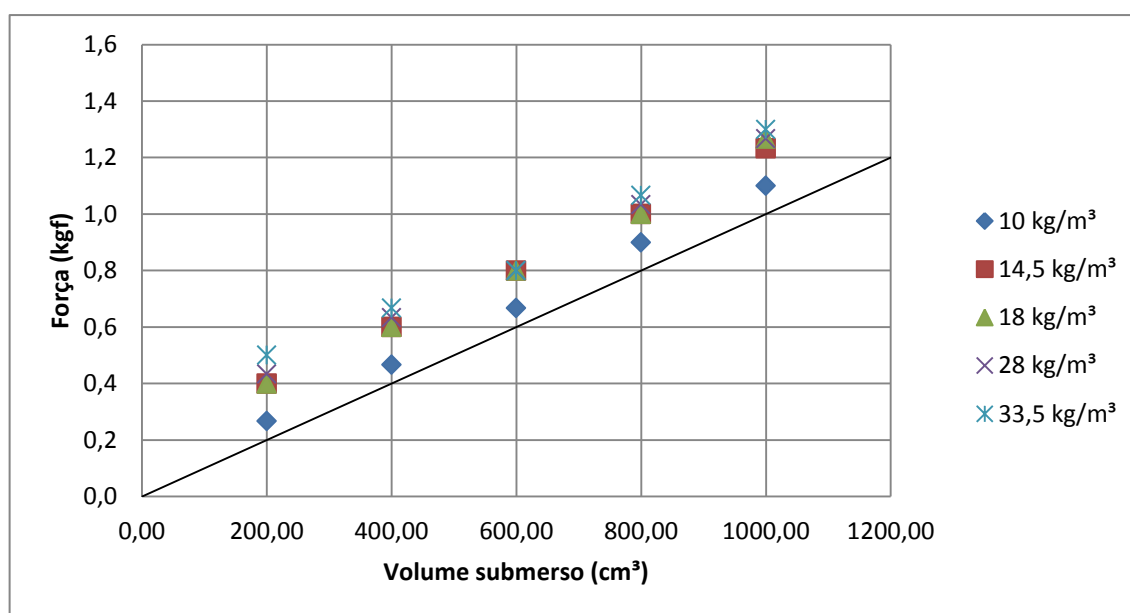
Observando os valores calculados pela Equação 1 para o coeficiente de permeabilidade, nota-se que a equação fornece valores próximos aos obtidos nos ensaios, tendo uma maior divergência para as massas específicas mais elevadas (25 e 30 kg/m³), ainda assim, esses dois valores foram da ordem de 10⁻⁴ cm/s. Esses valores, quando comparados com valores de permeabilidade dos solos, são considerados de alta permeabilidade (solos

permeáveis como areia, por exemplo – 10^{-3} a 10^{-5} cm/s), mostrando que o geoexpandido apresenta alta permeabilidade, reforçando mais uma vez a importância de se prever sistemas de drenagem e impermeabilização adequados em obras geotécnicas.

5.1.3 Ensaio de empuxo

O ensaio com amostras cúbicas foi realizado para se quantificar o valor da força de empuxo quando o EPS encontra-se submerso em água. O resultado do ensaio é apresentado na Figura 20, mostrando os valores obtidos para cada massa específica ensaiada. É apresentado também uma reta que representa valores teóricos obtidos por meio da teoria de Arquimedes.

Figura 20. Resultado do ensaio de empuxo submerso em água.



Nota-se que o material apresenta um comportamento semelhante ao esperado pela teoria de Arquimedes, principalmente para a menor massa específica (10 kg/m^3), comprovando que a intensidade da força aplicada, denominada empuxo, é igual, ou nesse caso próxima, ao peso do volume de fluido deslocado.

Observa-se ainda que, quanto maior a massa específica, maior será a força aplicada para submergir completamente o corpo de prova, isso explica-se pelo fato de que os corpos de prova de menor massa específica possuem maior número de vazios, e consequentemente,

absorvem mais água, apresentando um valor da força de empuxo inferior, já os corpos de prova com massa específica mais elevada possuem menos vazios, o que concede a eles maior resistência ao empuxo e portanto, o valor da força aplicada aumenta.

5.2 Ensaaios mecânicos

5.2.1 Ensaio de cisalhamento direto

Foram realizados dois tipos de ensaios de cisalhamento direto, um deles estuda o comportamento da interface entre os blocos de EPS (junta entre blocos) e o outro estuda internamente o comportamento do bloco de EPS quando submetido ao cisalhamento direto.

5.2.1.1 Ensaio de cisalhamento direto de interface (junta)

Os ensaios de cisalhamento direto de interface foram realizados visando estudar o comportamento do EPS frente à este tipo de solicitação e a fim obter o ângulo de atrito da interface entre blocos.

As Figuras 21 a 27 ilustram as curvas obtidas nos ensaios. Nestas, estão apresentadas no eixo vertical as tensões cisalhantes e no eixo das abscissas os valores dos deslocamentos horizontais.

Figura 21. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS reciclado de 10 kg/m³.

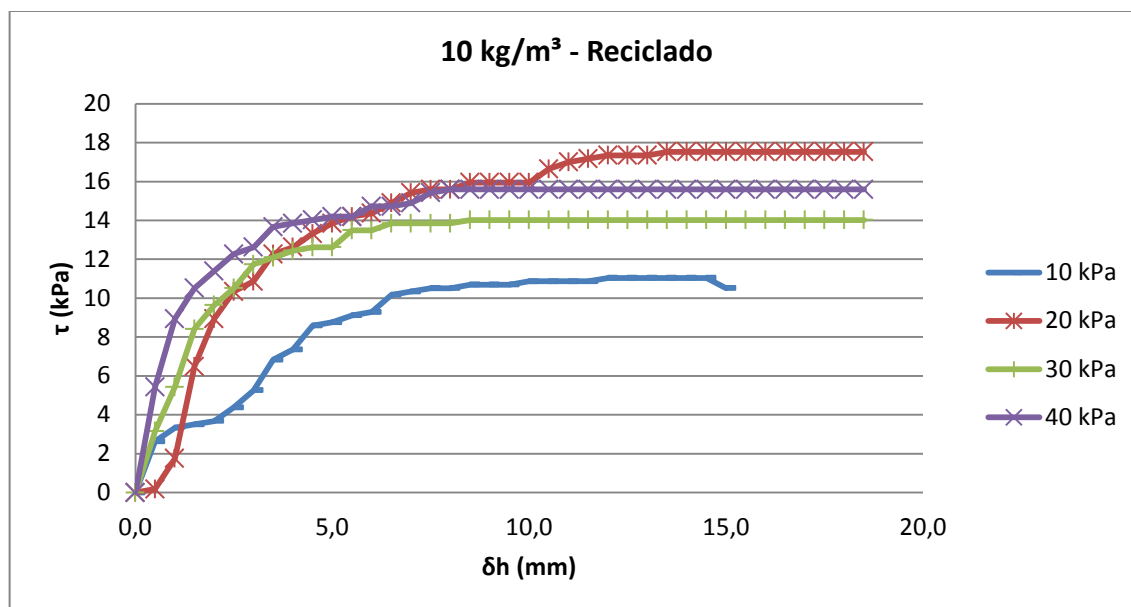


Figura 22. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS reciclado de 12,5 kg/m³.

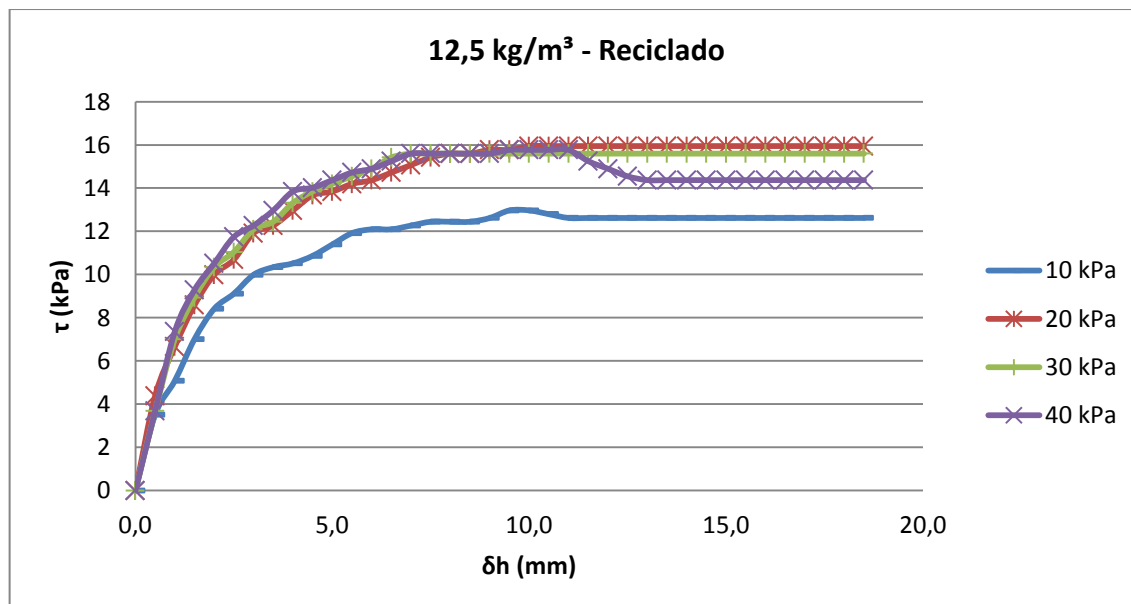


Figura 23. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de 10 kg/m^3 .

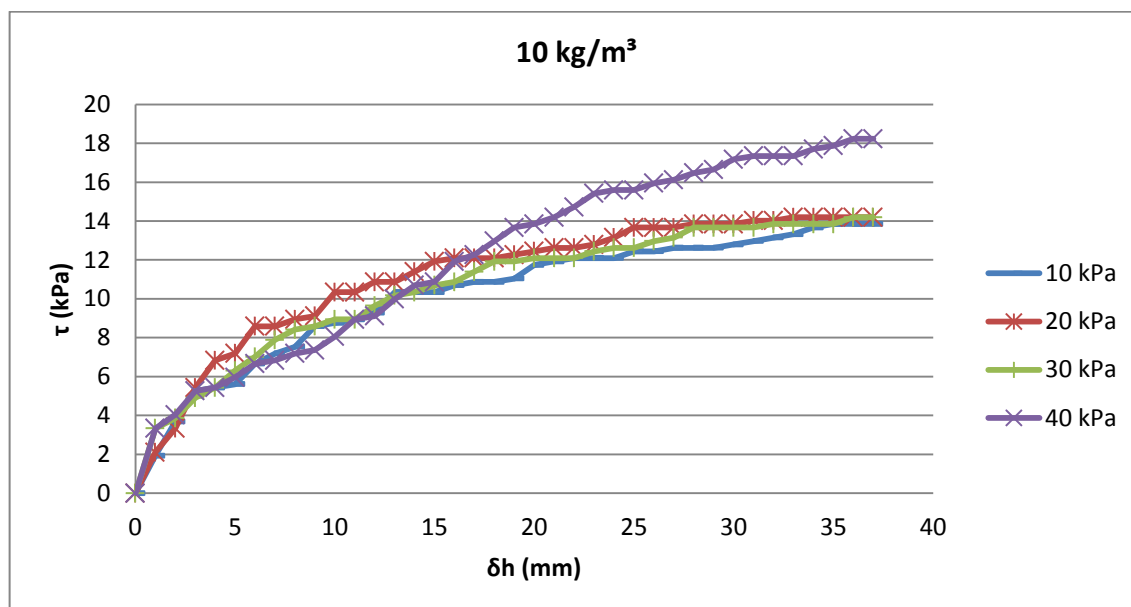


Figura 24. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de 15 kg/m^3 .

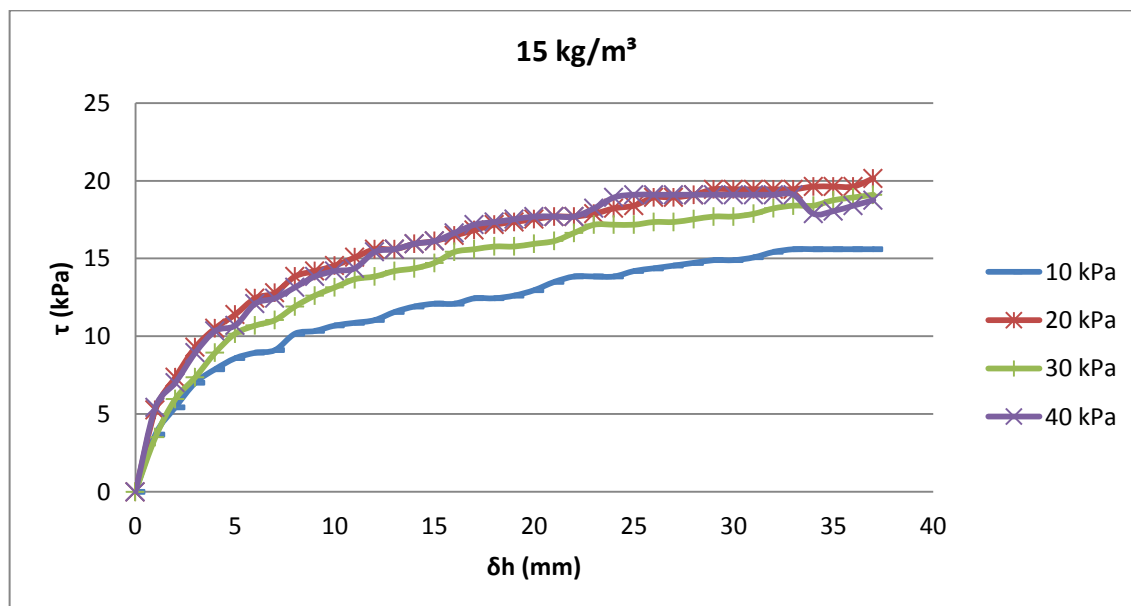


Figura 25. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de 20 kg/m^3 .

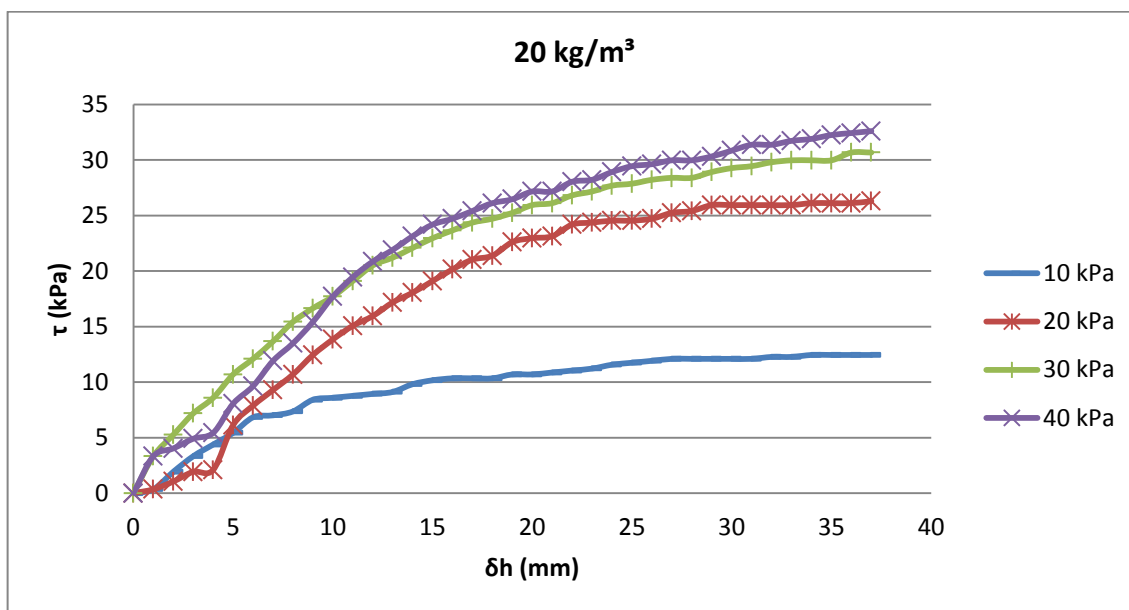


Figura 26. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de 25 kg/m^3 .

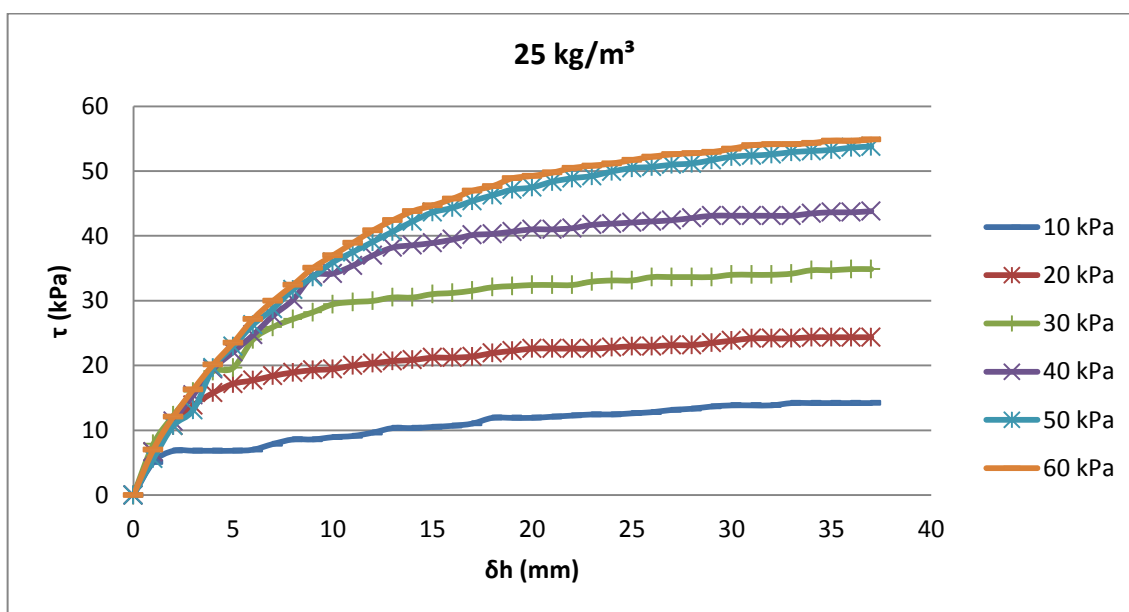
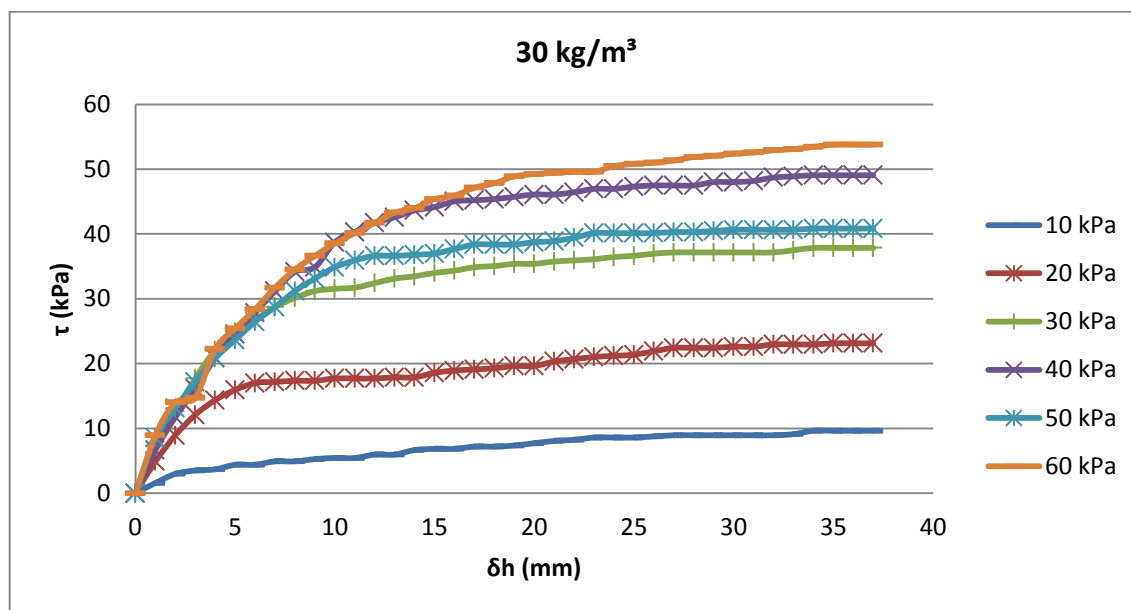


Figura 27. Ensaio de cisalhamento direto de interface realizado na amostra de EPS de 30 kg/m^3 .



Nota-se que para todas as massas específicas estudadas não há um pico de tensão definido, de forma que a curva tende a ficar constante. Observou-se também que nas massas específicas mais elevadas (25 e 30 kg/m^3) o material mostrou um padrão no comportamento quando relacionado com as diferentes cargas aplicadas, apresentando curvas melhor definidas e um aumento nos valores das tensões de cisalhamento, já as densidades menores não apresentam um aumento de tensão cisalhante proporcional à carga aplicada, o mesmo é observado nas amostras recicladas.

Observou-se nos ensaios que as amostras de massa específica entre 10 e 15 kg/m^3 , tanto virgens quanto recicladas, apresentaram valores maiores de resistência quando submetidas a uma tensão de confinamento de 20 kPa , sendo essa resistência menor, em geral, para tensões confinantes maiores. Nas baixas densidades o material é muito deformável, o que interfere nos resultados de elevado confinamento.

Com os dados do ensaio, foi possível traçar as envoltórias de resistência para cada massa específica estudada e desta envoltória determinou-se os valores do intercepto de coesão e ângulo de atrito. Como não há valores de pico, adotou-se a tensão de cisalhamento para um deslocamento de até 20 mm .

As envoltórias estão representadas no mesmo gráfico para facilitar a comparação dos resultados entre as diferentes massas específicas e são mostradas na Figura 28. A Tabela reúne os valores do intercepto de coesão e do ângulo de atrito.

Figura 28. Envoltória de resistência das amostras de EPS no ensaio de cisalhamento direto de interface.

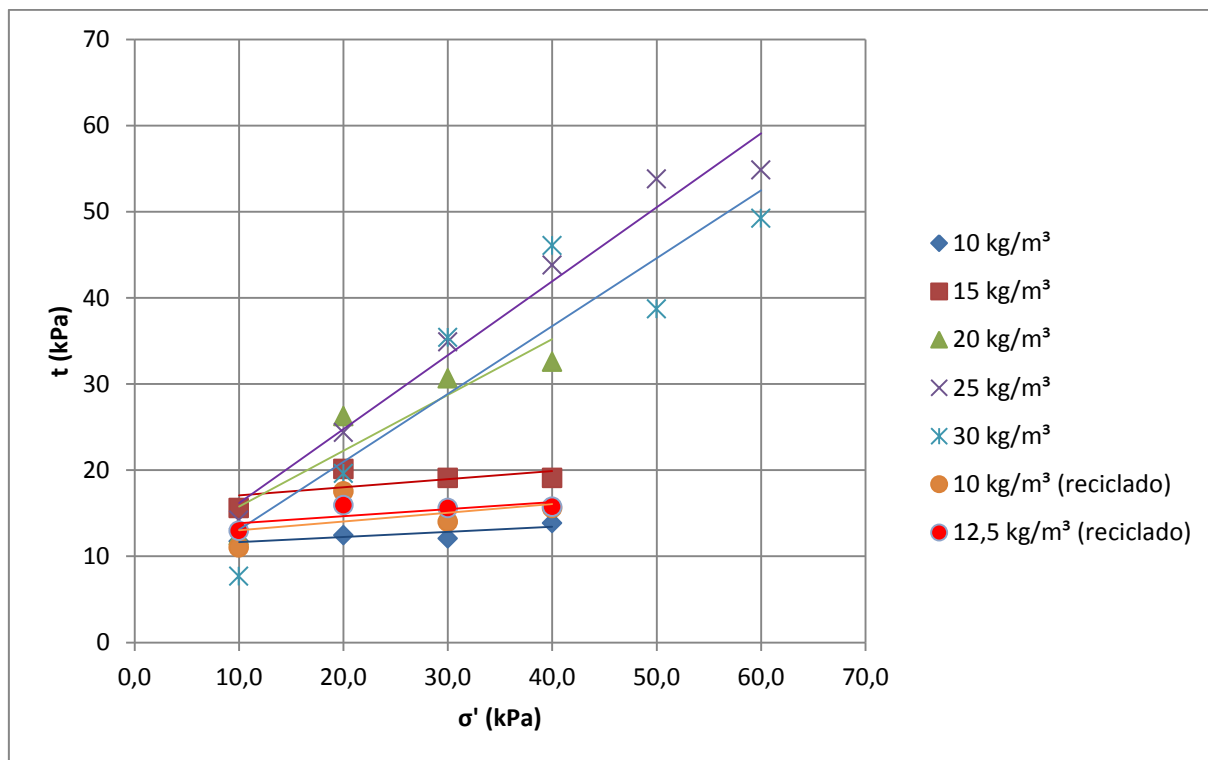


Tabela 10. Valores do intercepto de coesão e ângulo de atrito do ensaio de cisalhamento direto de interface.

Massa específica (kg/m³)	Intercepto de coesão (kPa)	Ângulo de atrito (Ø')
10,0 (reciclado)	12,0	5,8
12,5 (reciclado)	13,1	4,6
10,0	11,0	3,4
15,0	12,9	7,2
20,0	8,6	27,7
25,0	7,1	37,6
30,0	5,2	38,2

Nota-se pela Figura 28 que o material possui uma envoltória diferente para valores de massa específica elevados (20, 25 e 30 kg/m³) quando comparada às envoltórias de massas específicas de 10; 12,5 e 15 kg/m³.

Nas massas específicas mais elevadas, observou-se que há uma parcela de ângulo de atrito significativa, sendo estes bem maiores que os obtidos nas amostras de massas específicas menores, as quais apresentaram maior valor de intercepto de coesão.

Observa-se ainda que para as amostras intactas, o ângulo de atrito é proporcional à massa específica do EPS, assim como foi observado por Avesani Neto (2008), isso mostra que para valores superiores de massa específica, há um aumento do ângulo de atrito. Além disso, é nítido uma relação inversamente proporcional entre o ângulo de atrito e o intercepto de coesão, de modo que com o aumento da massa específica, o ângulo de atrito aumenta e a parcela coesiva diminui.

Os valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito obtidos para as amostras recicladas fogem um pouco desse padrão, apresentado resultados superiores quando comparados à amostras intactas na mesma faixa de massa específica. Além disso, para estas amostras, com o aumento da massa específica o intercepto de coesivo aumenta e o ângulo de atrito diminui, opondo-se ao ocorrido nas amostras virgens, entretanto, como os valores estudados de amostras recicladas são muito próximos (10 e 12,5 kg/m³), não se pode afirmar que este é um comportamento que vale para demais massas específicas, o que reforça a necessidade do estudo de amostras com massas específicas maiores e variando, preferencialmente, de 5 kg/m³ entre elas, para que se tenha uma maior representatividade dos resultados.

Analizando a Figura 28, que mostra as envoltórias de resistência das amostras de EPS, constata-se que quando submetido à valores de tensão normal mais elevados as amostras de EPS com maiores massas específicas possuem maior resistência, enquanto que para tensão normal de 10 kPa, as amostras de menor massas específicas, incluindo as recicladas, possuem maior resistência, esse fenômeno também foi observado por Avesani Neto (2008).

Em sua pesquisa, ele afirma que isto se deve a maior plastificação sofrida pelas amostras de menor massa específica para altas cargas de confinamento, de modo que “para valores de confinamento reduzido (sem plastificação excessiva) a sua superfície com maior rugosidade incrementa o atrito entre os blocos, porém, para confinamentos mais elevados a plastificação é excessiva em ambos os blocos, tornando a transferência de carga menos eficiente e, conseqüentemente, reduzindo o atrito de interface.”.

Isso mostra que quando submetido à tensões confinantes reduzidas, o que é comumente observado na prática, as amostras de EPS de baixas densidades apresentam um comportamento satisfatório. Entretanto, deve-se ter o cuidado ao projetar com massas específicas menores devido à maior variabilidade existente entre elas.

5.2.1.2 Ensaio de cisalhamento direto interno

Este ensaio foi realizado com o intuito de estudar o comportamento do bloco de EPS como um todo e a fim de se determinar a envoltória de resistência das amostras. Os resultados estão apresentados nas Figuras 29 a 35.

Figura 29. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS reciclado de 10 kg/m^3 .

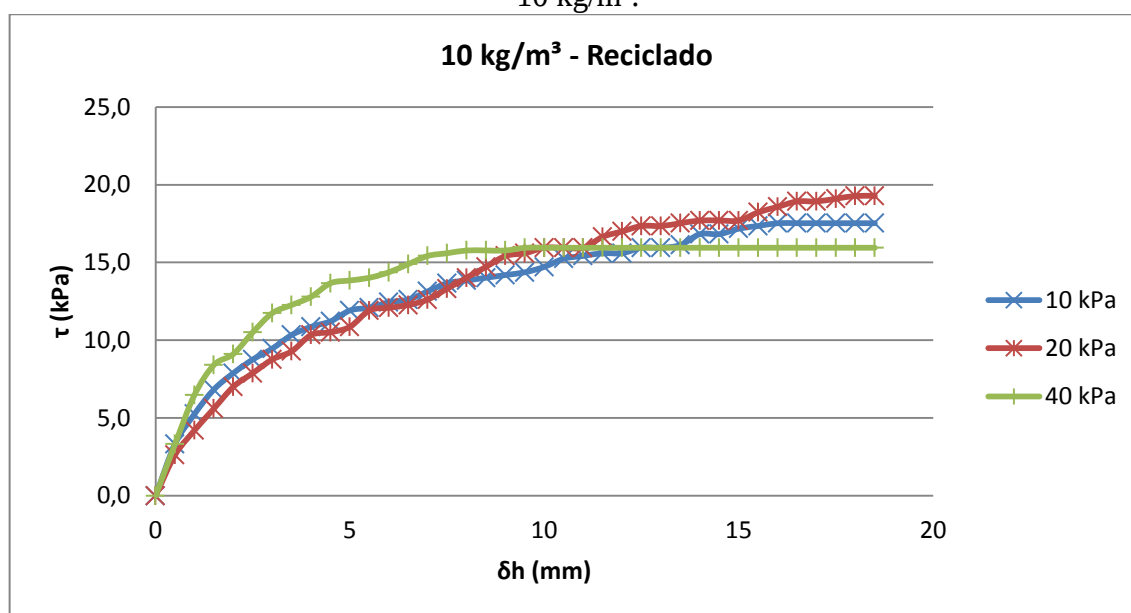


Figura 30. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS reciclado de $12,5 \text{ kg/m}^3$.

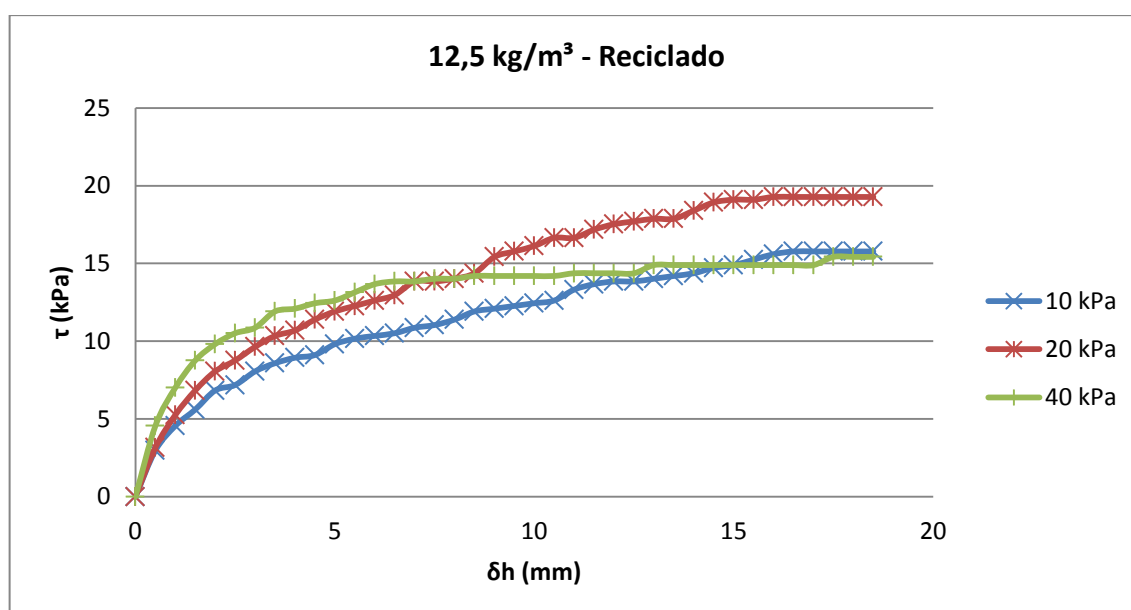


Figura 31. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 10 kg/m³.

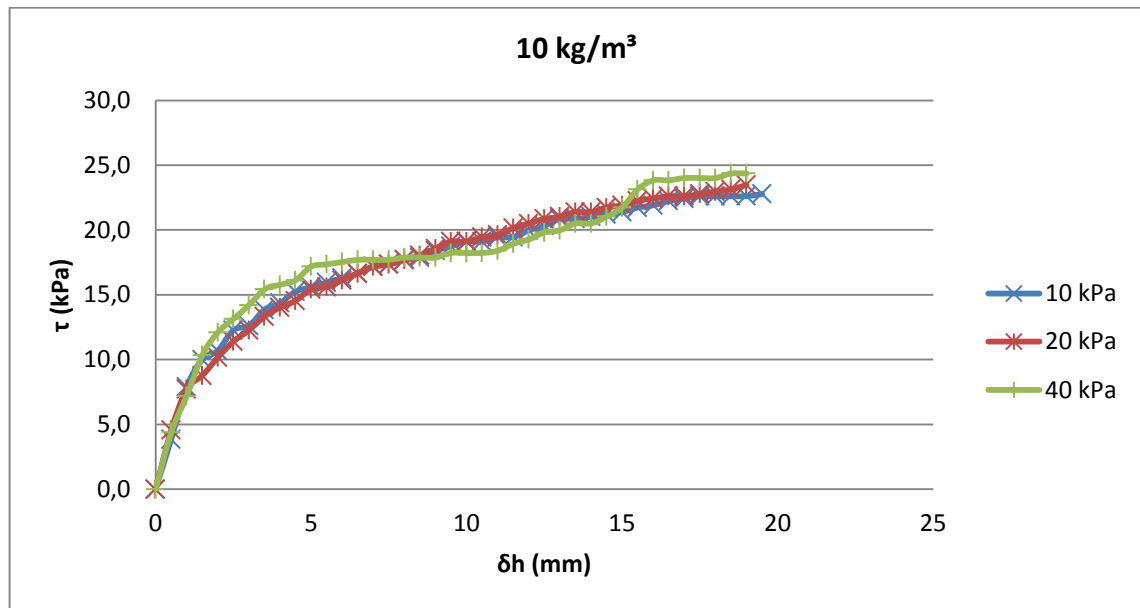


Figura 32. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 15 kg/m³.

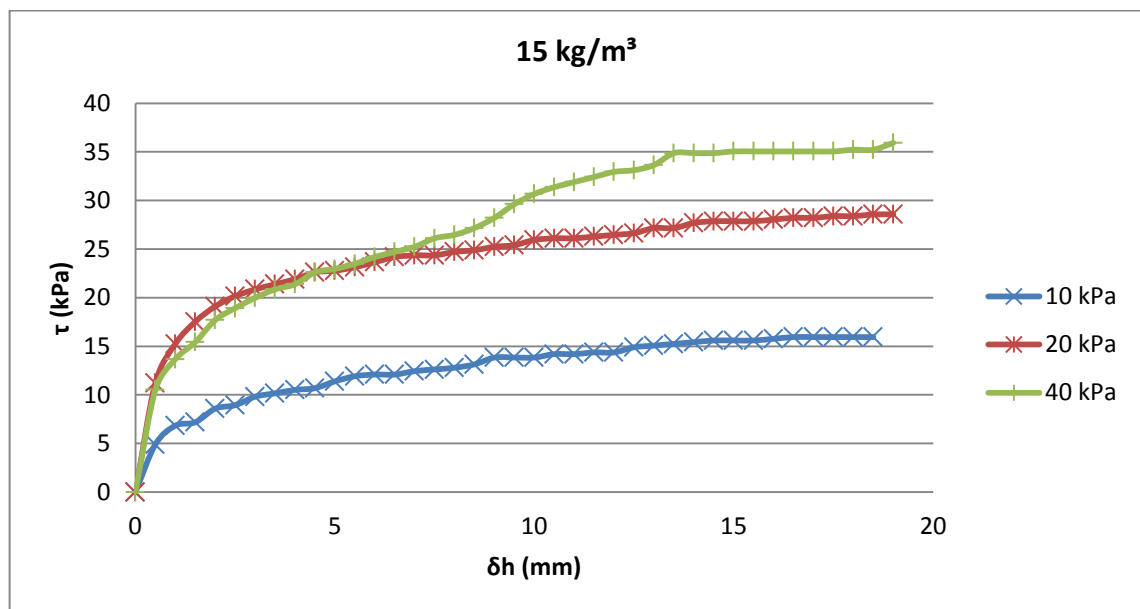


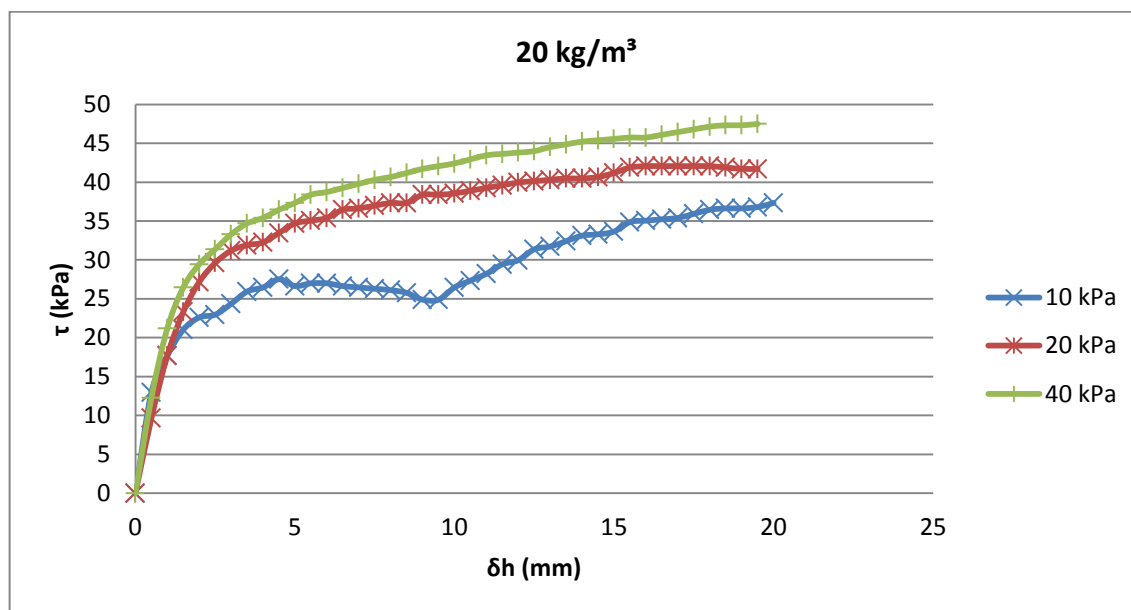
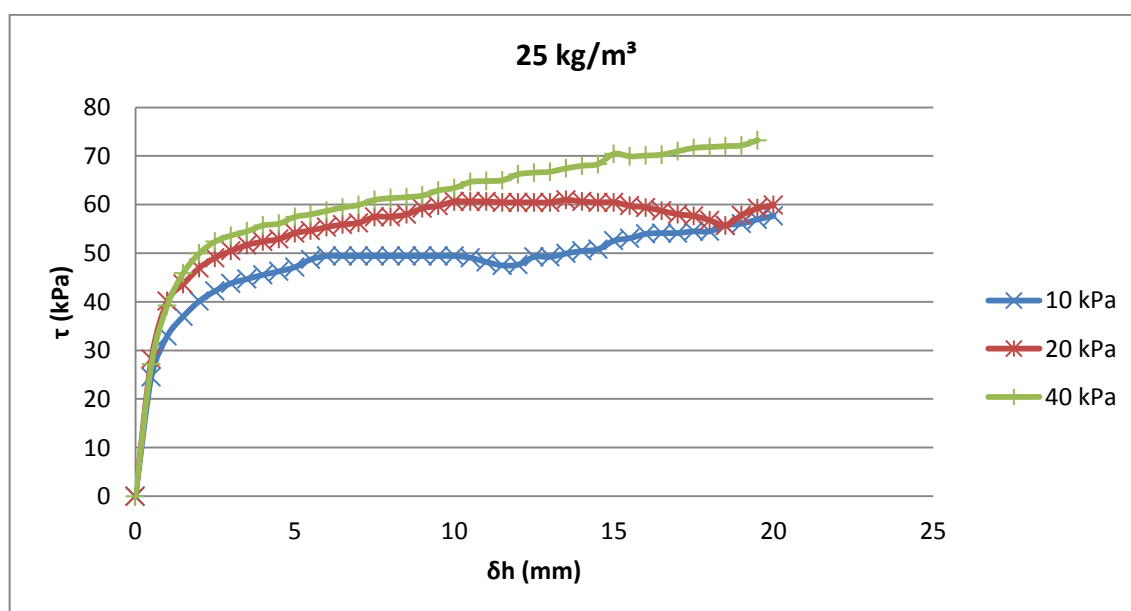
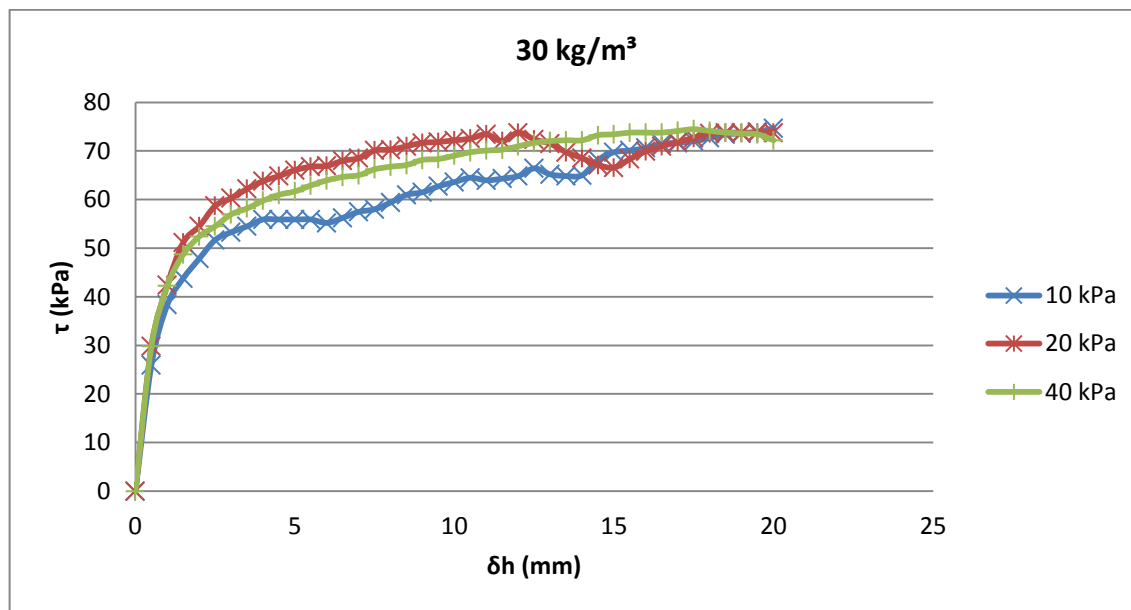
Figura 33. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 20 kg/m³.Figura 34. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 25 kg/m³.

Figura 35. Ensaio de cisalhamento direto interno realizado na amostra de EPS de 30 kg/m³.



Assim como no ensaio de cisalhamento direto de interface, não há valores de pico de tensão definido nas sete massas específicas estudadas, sendo, de modo geral, crescente o ganho de resistência com a deformação

Com esses resultados foi possível obter as envoltórias de resistência ao cisalhamento direto interno, que são mostradas na Figura 36 e na Tabela 11. Para uma melhor entendimento e visualização dos resultados, todas as envoltórias foram reunidas em um único gráfico.

Nota-se que as amostras de 10 kg/m³ e as recicladas (10 kg/m³ e 12,5 kg/m³) apresentam elevado valor de intercepto de coesão, já as massas específicas maiores apresentaram uma parcela significativa do ângulo de atrito.

Figura 36. Envoltória de resistência das amostras de EPS no ensaio de cisalhamento direto interno.

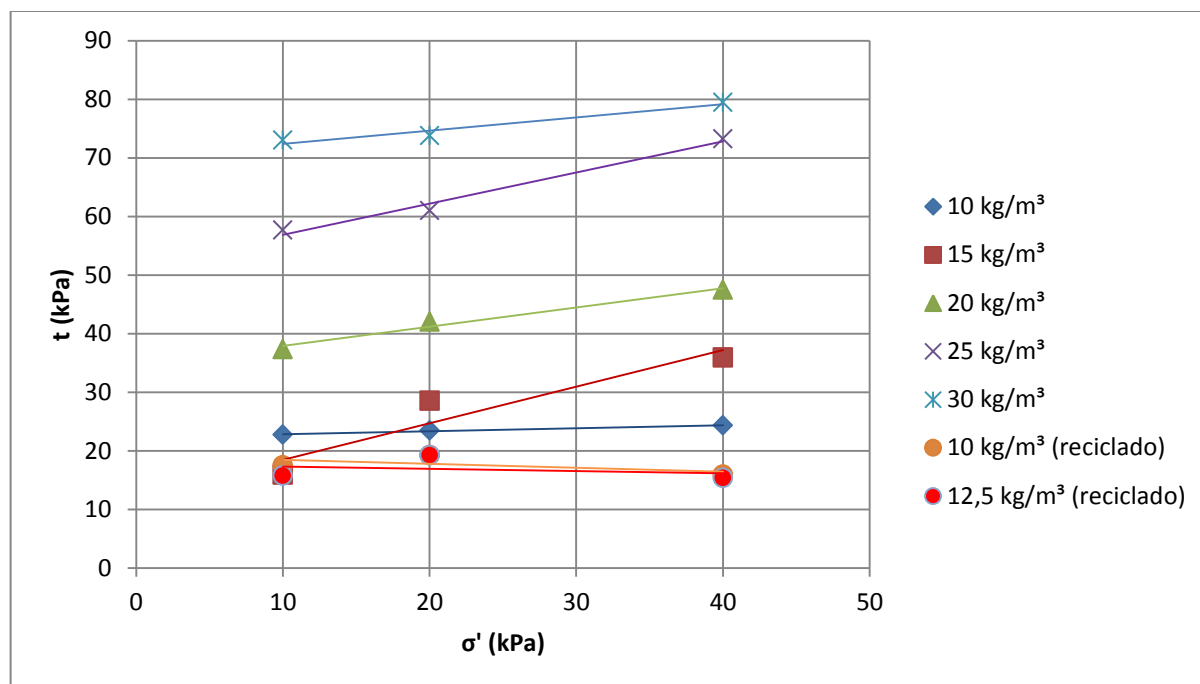


Tabela 11. Valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito do ensaio de cisalhamento direto interno.

Massa específica (kg/m³)	Intercepto de coesão (kPa)	Ângulo de atrito (Ø')
10,0 (reciclado)	19,2	3,9
12,5 (reciclado)	17,7	2,2
10,0	22,3	2,9
15,0	12,3	31,9
20,0	34,6	18,2
25,0	51,5	28,1
30,0	70,1	12,8

O aumento da massa específica proporciona uma redução no volume de vazios das amostras, o que causa um ganho de resistência dos corpos de prova. Na amostra de 10 kg/m³ e nas amostras recicladas (10 e 12,5 kg/m³) o número de vazios é maior, desta forma, há pouco contato entre os grânulos de EPS, de modo que a resistência por atrito entre eles seja muito pequena, conferindo aos corpos de prova a propriedade coesiva observada nas envoltórias.

Com relação às amostras recicladas, reafirma-se que os valores estudados de amostras são muito próximos (10 e 12,5 kg/m³), sendo necessário o estudo de amostras com massas específicas maiores e variando, preferencialmente, de 5 kg/m³ entre elas, para que se tenha uma maior representatividade dos resultados.

Observou-se também que para as massas específicas acima de 20 kg/m^3 ocorria uma pequena inclinação do corpo de prova quando submetido a tensão confinante de 10 kPa. Por ser de uma massa específica mais elevada e apresentar maior resistência ao cisalhamento, as baixas tensões não conseguem confinar o material de uma forma muito eficaz. A Figura 37 mostra um corpo de prova de massa específica elevada e submetido a uma tensão de 10 kPa durante o ensaio e as Figuras 38 (a e b) mostram um corpo de prova ensaiado.

Figura 37. Corpo de prova de densidade elevada e submetido a uma tensão de 10 kPa durante o ensaio.

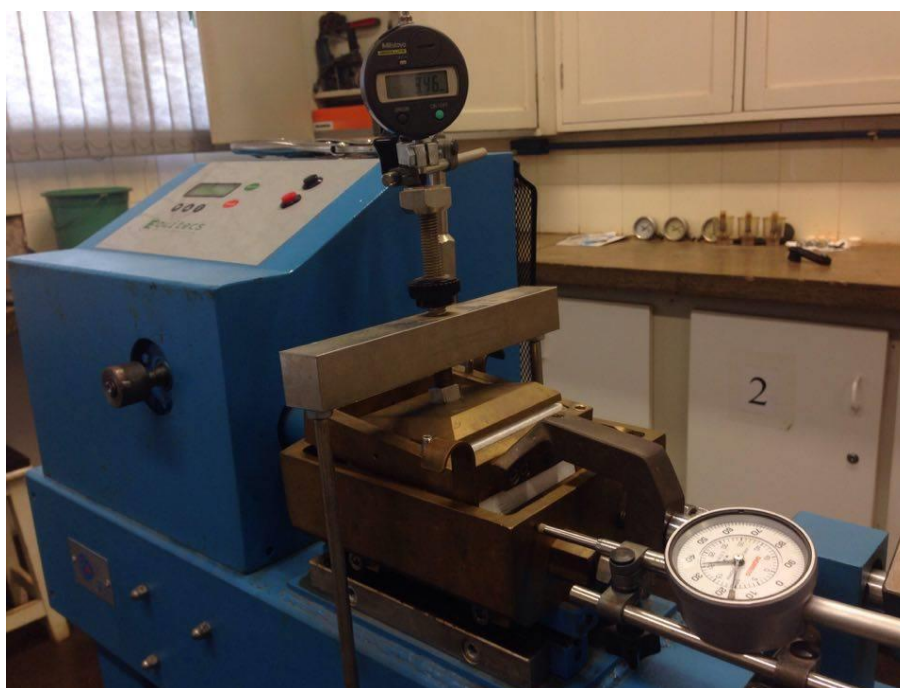
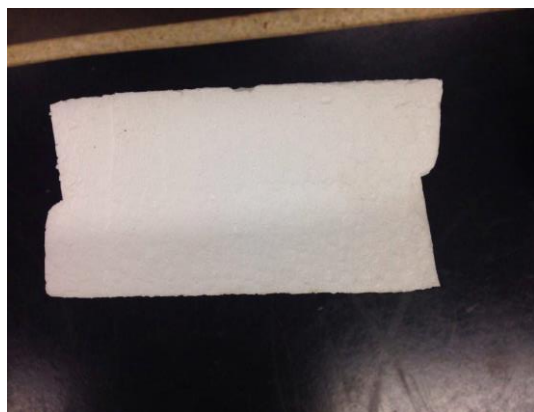


Figura 38. Corpo de prova ensaiado.



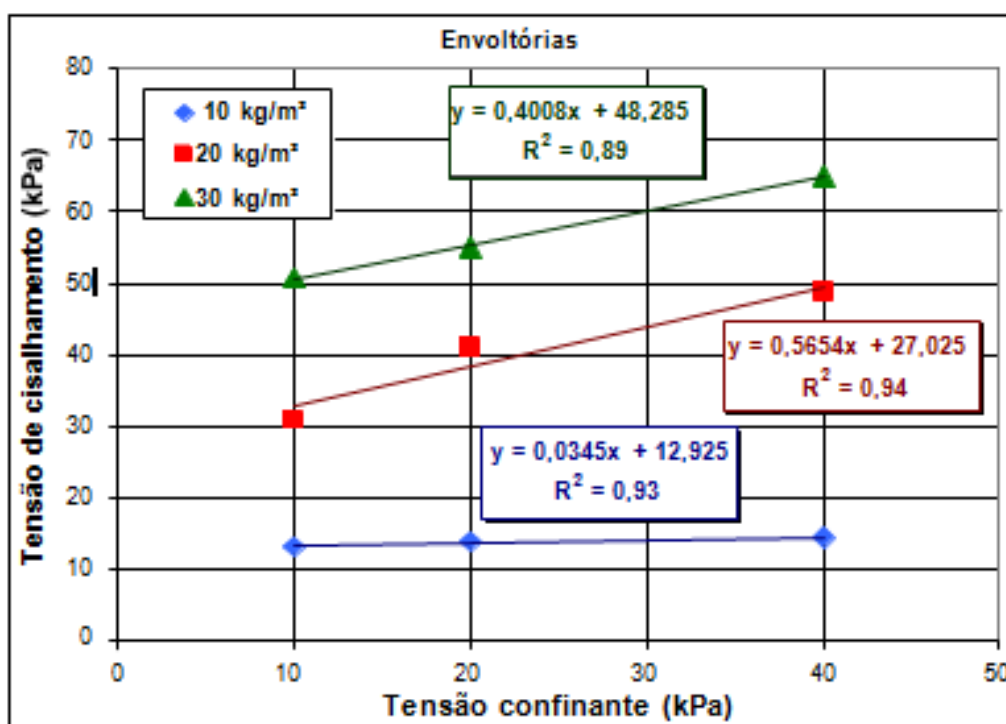
(a)



(b)

Avesani Neto (2008) realizou ensaios de cisalhamento direto interno em amostras de EPS com massas específicas de 10, 20 e 30 kg/m³ e também concluiu que amostras de 10 kg/m³ apresentam maior valor de intercepto de coesão, entretanto, para as massas específicas de 20 e 30 kg/m³ ele obteve um pico de tensão em torno de um deslocamento de 5 mm, o que não ocorreu nesta pesquisa, esse pico de tensão fez com que ele definisse envoltórias para um deslocamento de 5 mm, que são mostradas na Figura 39.

Figura 39. Envoltórias de resistência do ensaio de cisalhamento direto para um deslocamento de 5 mm (AVESANI NETO, 2008).



Nota-se um comportamento semelhante para as envoltórias em comum, mas para as massas específicas intermediárias estudadas (15 e 25 kg/m³) observou-se valores de ângulo de atrito mais elevados.

Em sua pesquisa, Avesani Neto (2008) determinou também envoltórias para deslocamentos de 15 mm e concluiu que “o comportamento geral do material não é afetado para deslocamentos mais elevados (as amostras continuaram com o mesmo tipo de envoltória)”. O que foi confirmado para as envoltórias obtidas nos ensaios, mesmo não ocorrendo um pico de tensão.

Como não houve valores de pico, as envoltórias foram determinadas para os valores máximos de tensão para deslocamentos de até 20 mm, e apresentaram comportamento

semelhante às obtidas por Avesani Neto (2008), o que reafirma que a envoltória não é afetada para deslocamentos mais elevados.

5.2.2 Ensaio de compressão triaxial

Os resultados da fase de adensamento e de cisalhamento (tensão versus deformação) dos corpos de prova são mostrados a seguir, bem como as variações na deformação volumétrica.

Figura 40. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m³ reciclado.

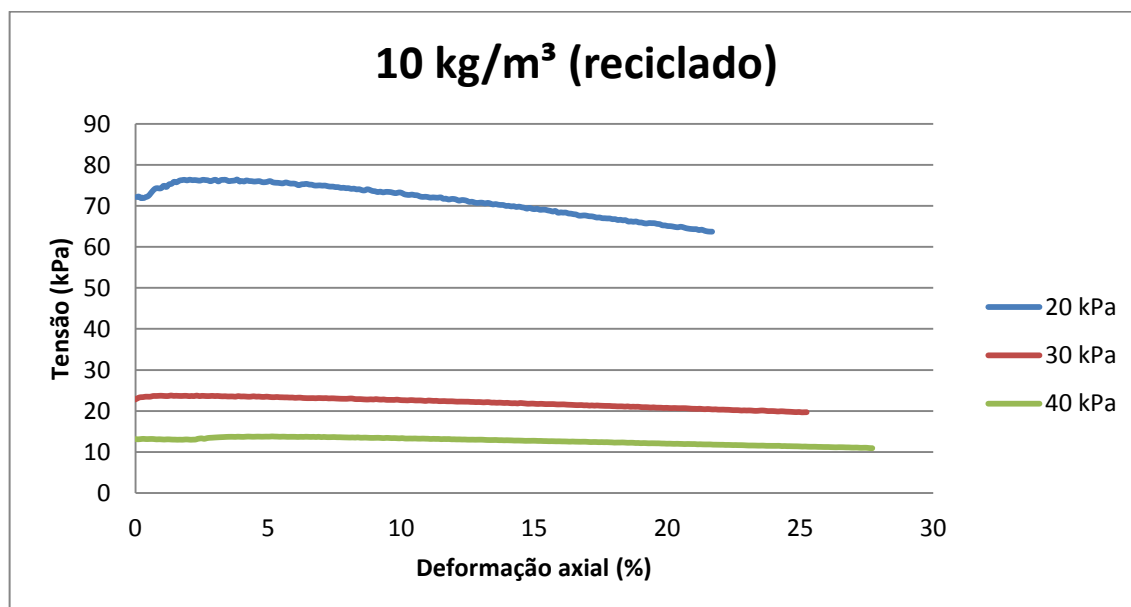


Figura 41. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m³ reciclado.

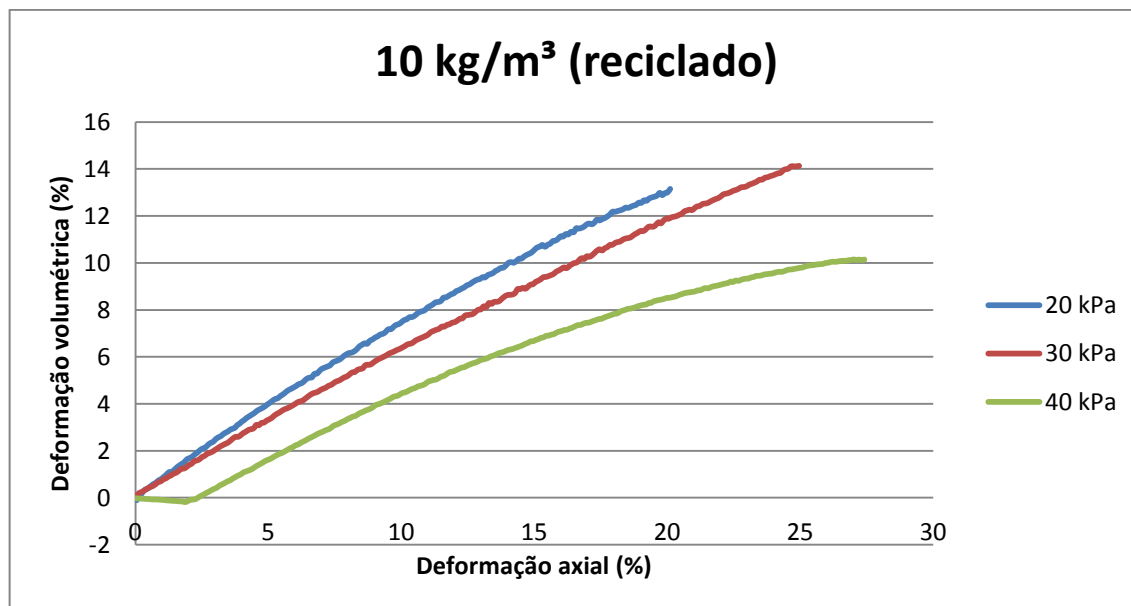


Figura 42. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 12,5 kg/m³ reciclado.

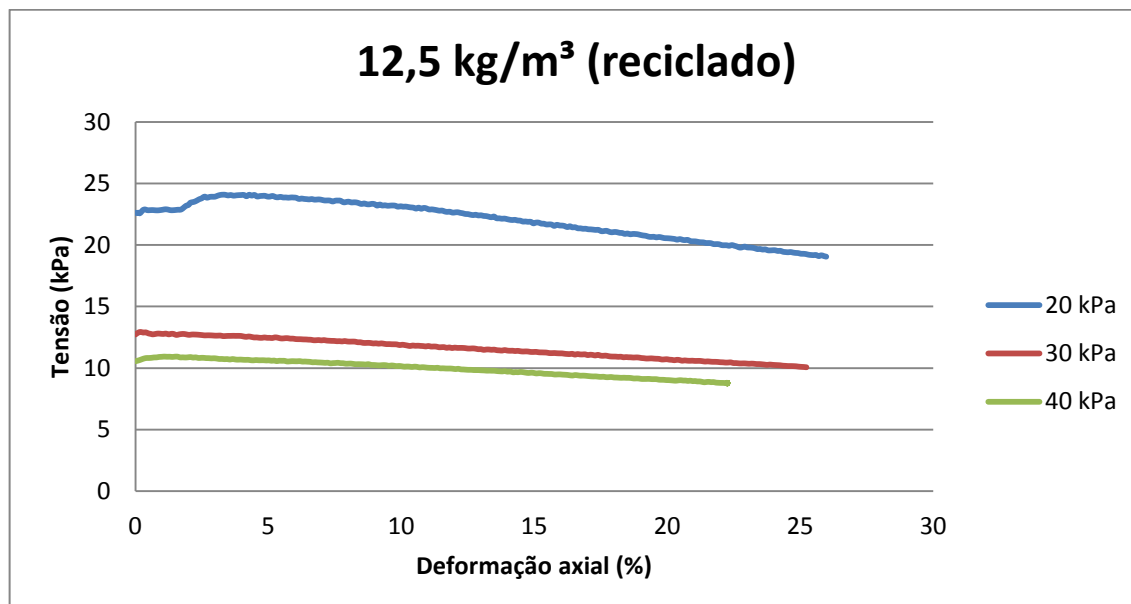


Figura 43. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 12,5 kg/m³ reciclado.

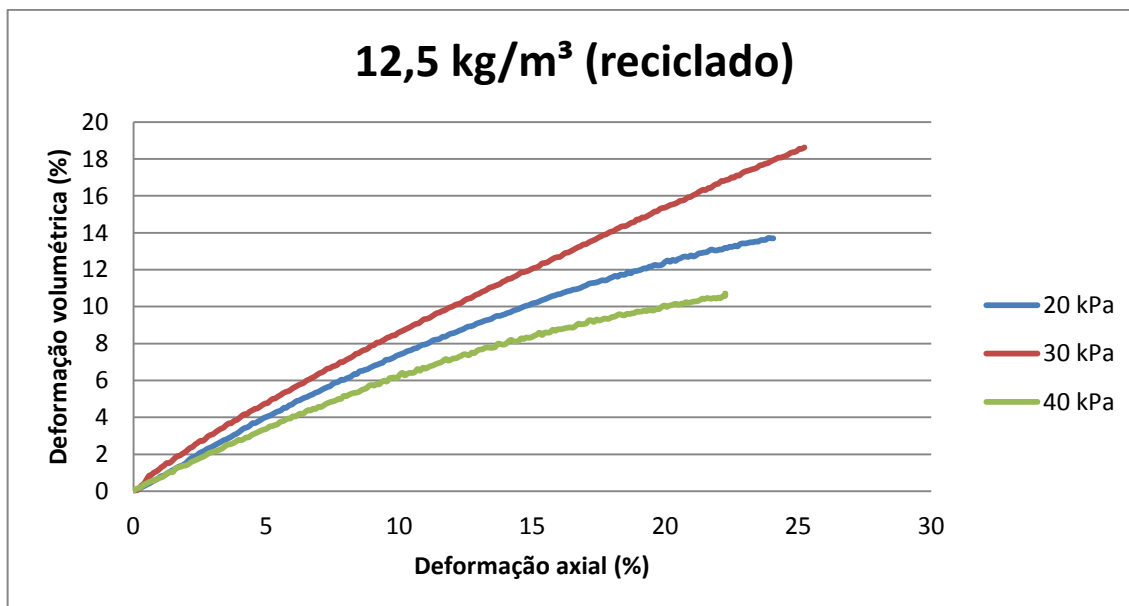


Figura 44. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m³.

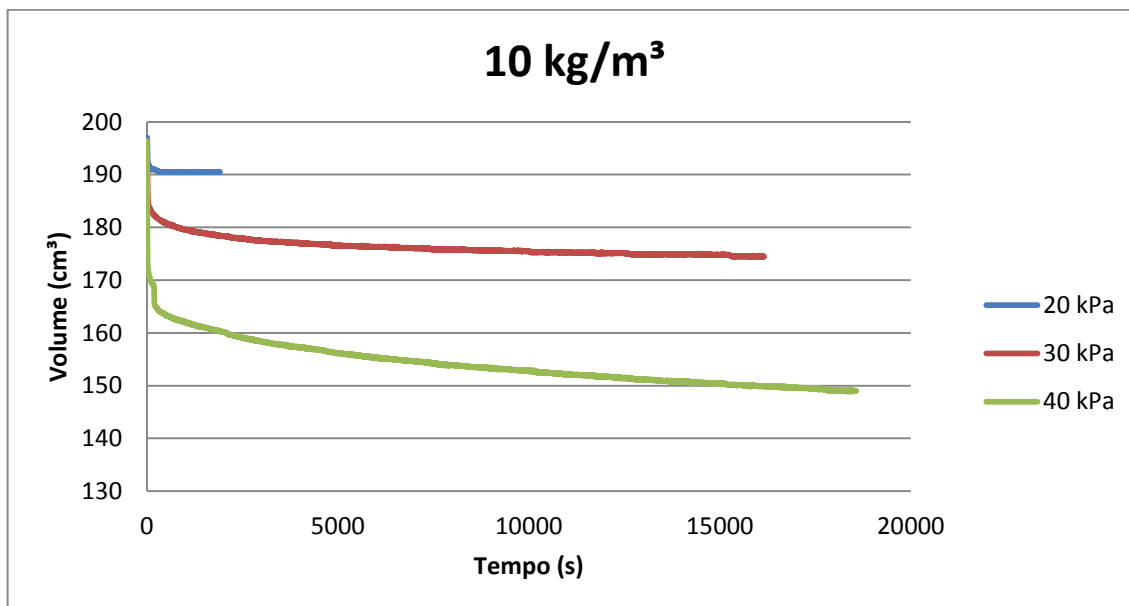


Figura 45. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m³.

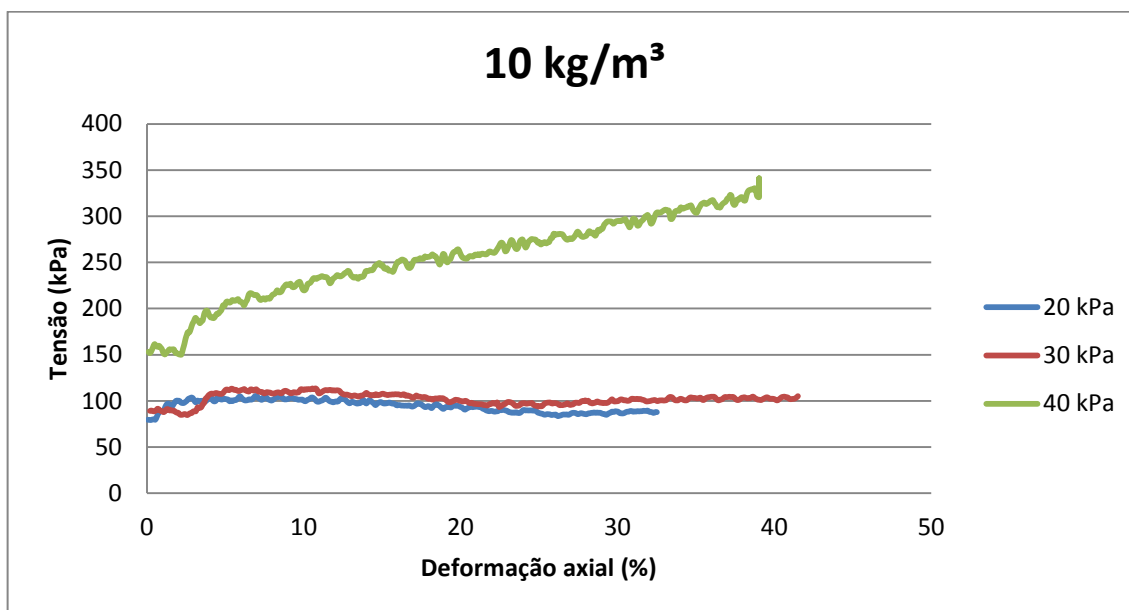


Figura 46. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 10 kg/m³.

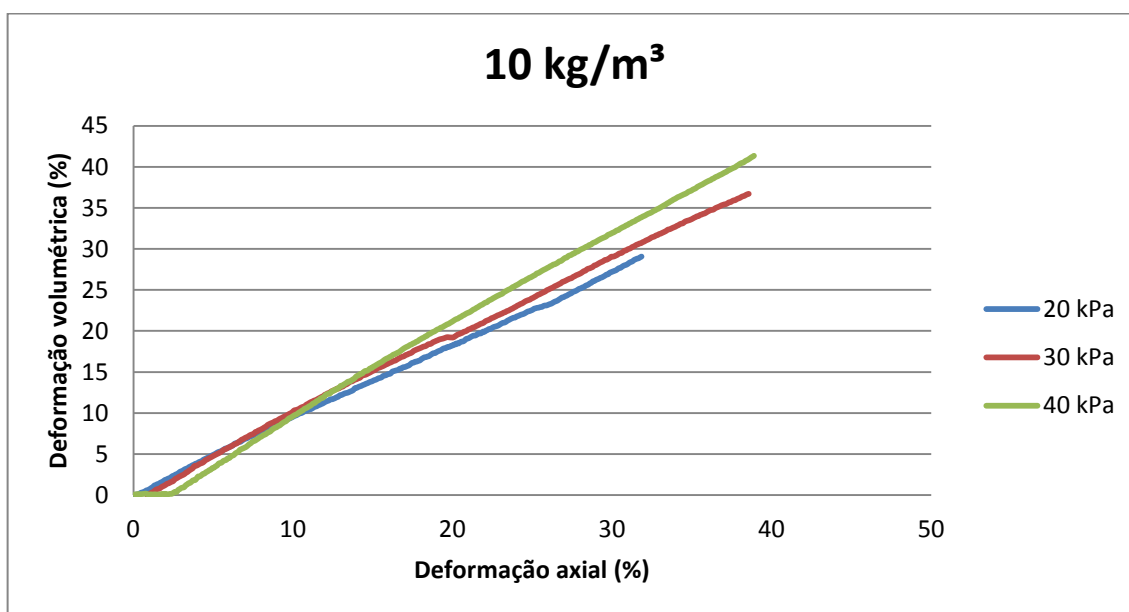


Figura 47. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 15 kg/m³.

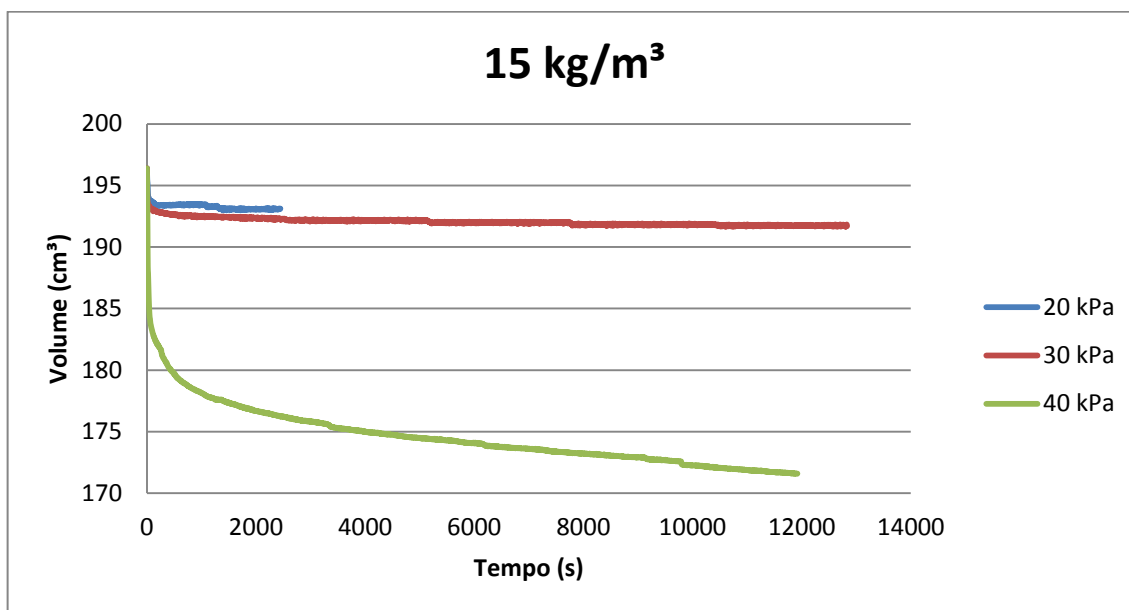


Figura 48. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 15 kg/m³.

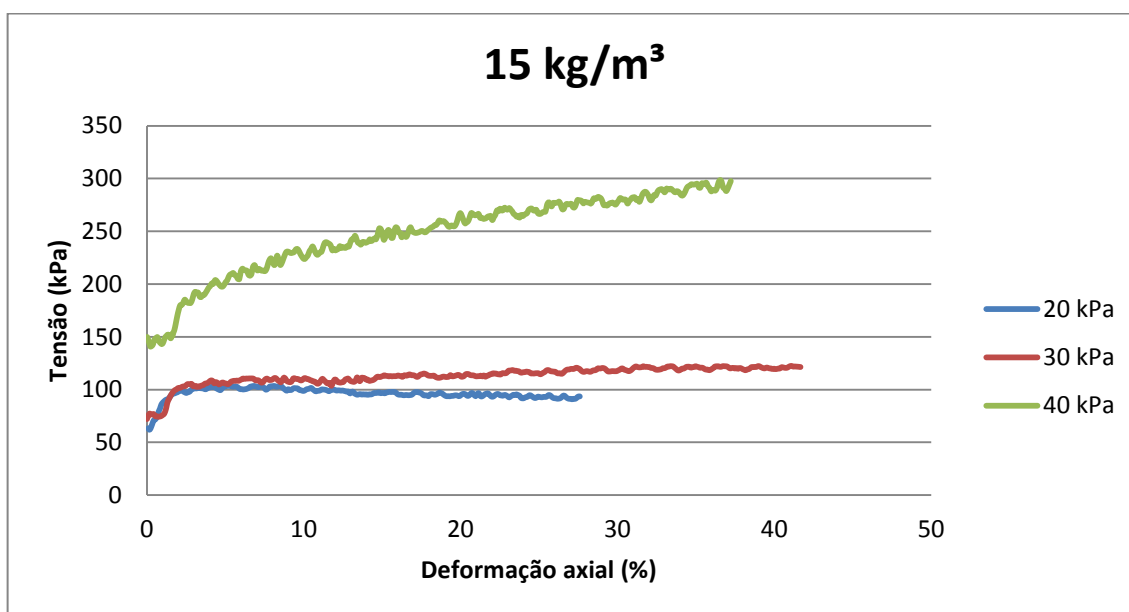


Figura 49. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 15 kg/m³.

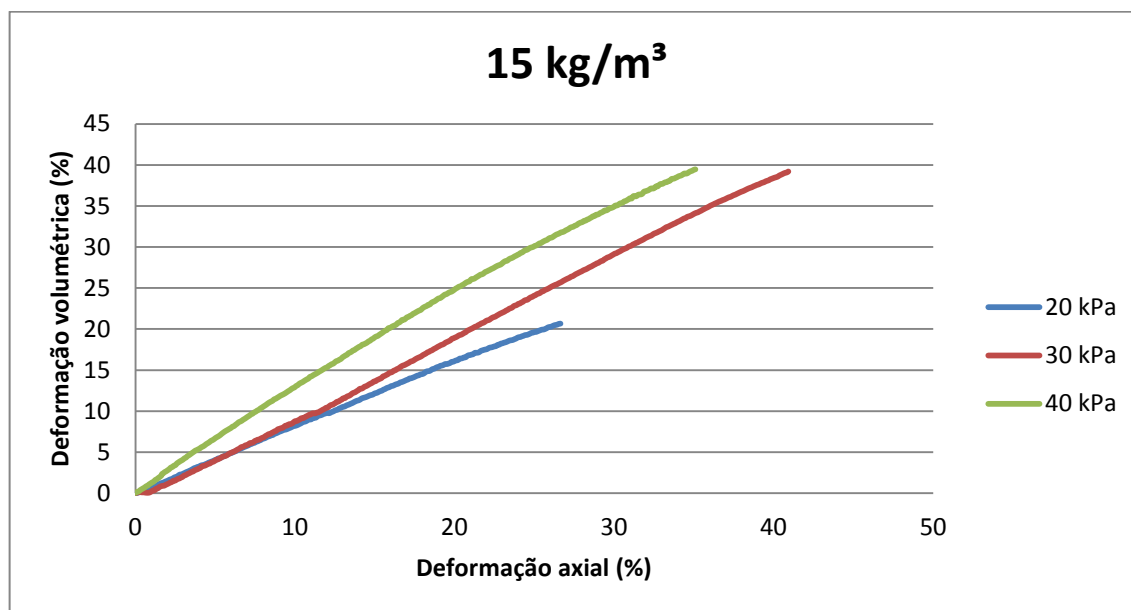


Figura 50. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 20 kg/m³.

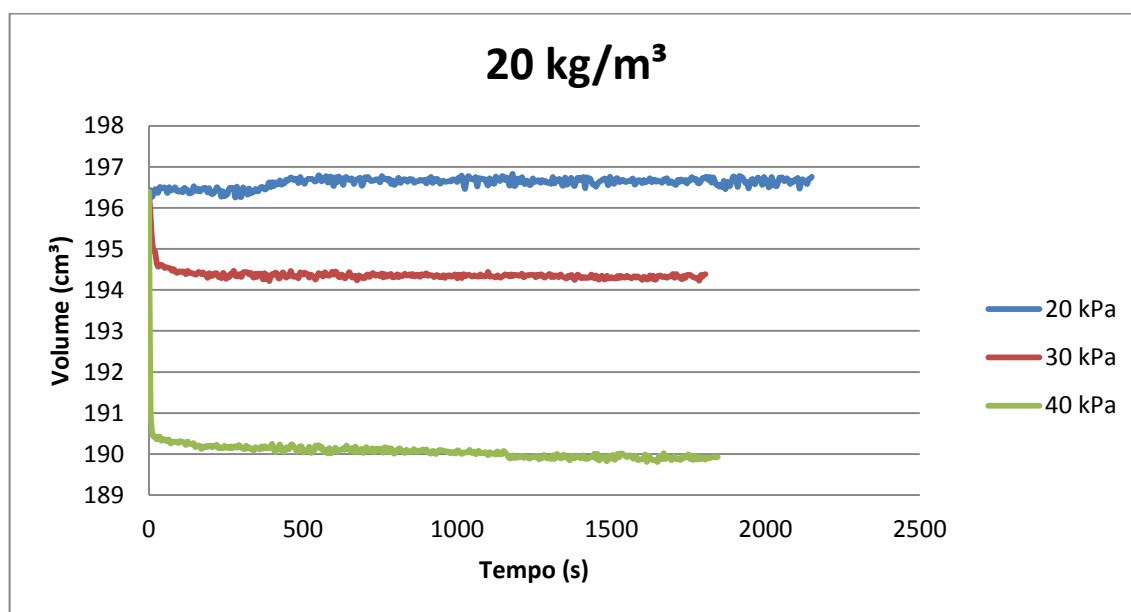


Figura 51. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 20 kg/m³.

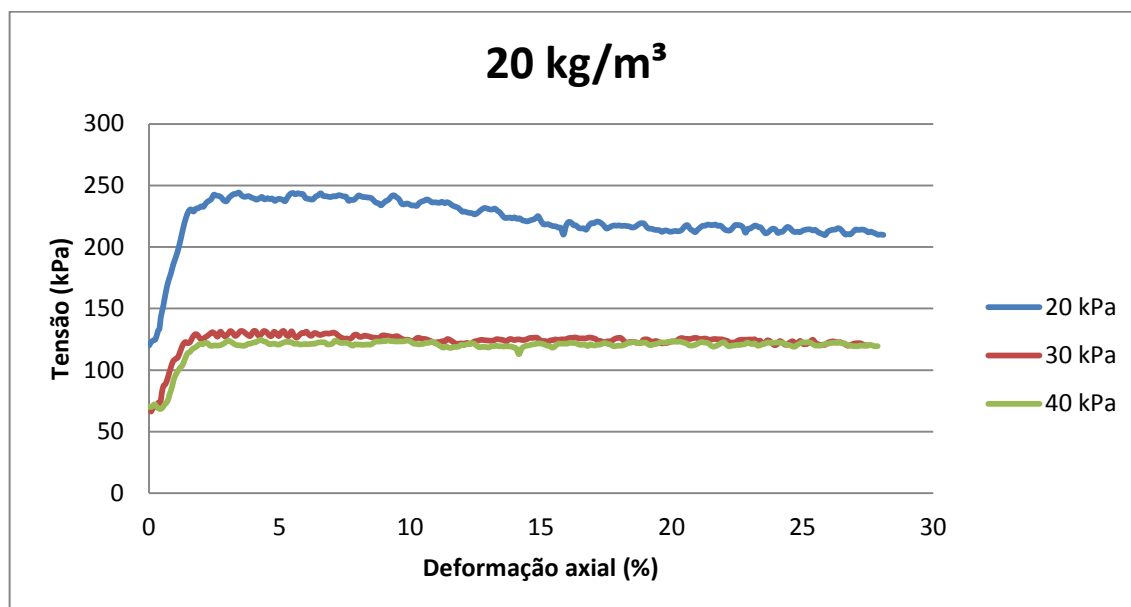


Figura 52. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 20 kg/m³.

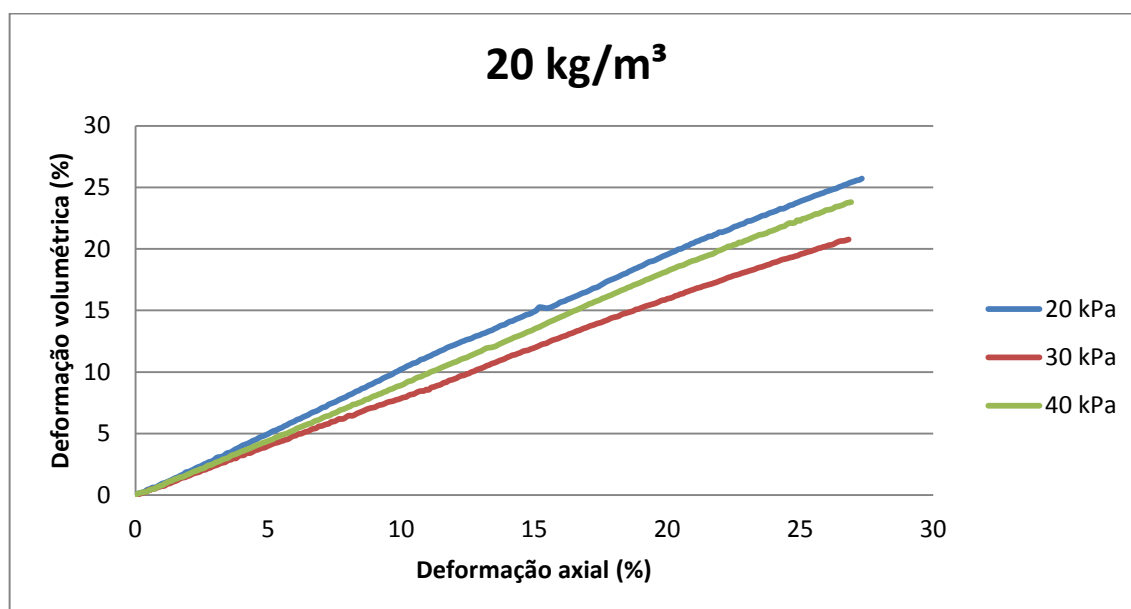


Figura 53. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 25 kg/m³.

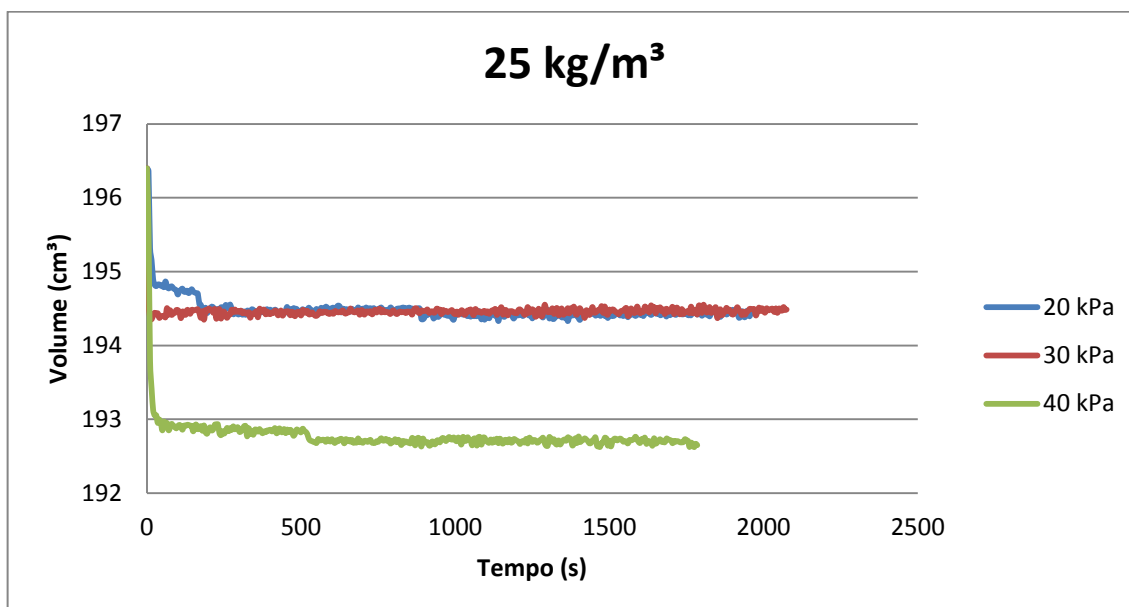


Figura 54. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 25 kg/m³.

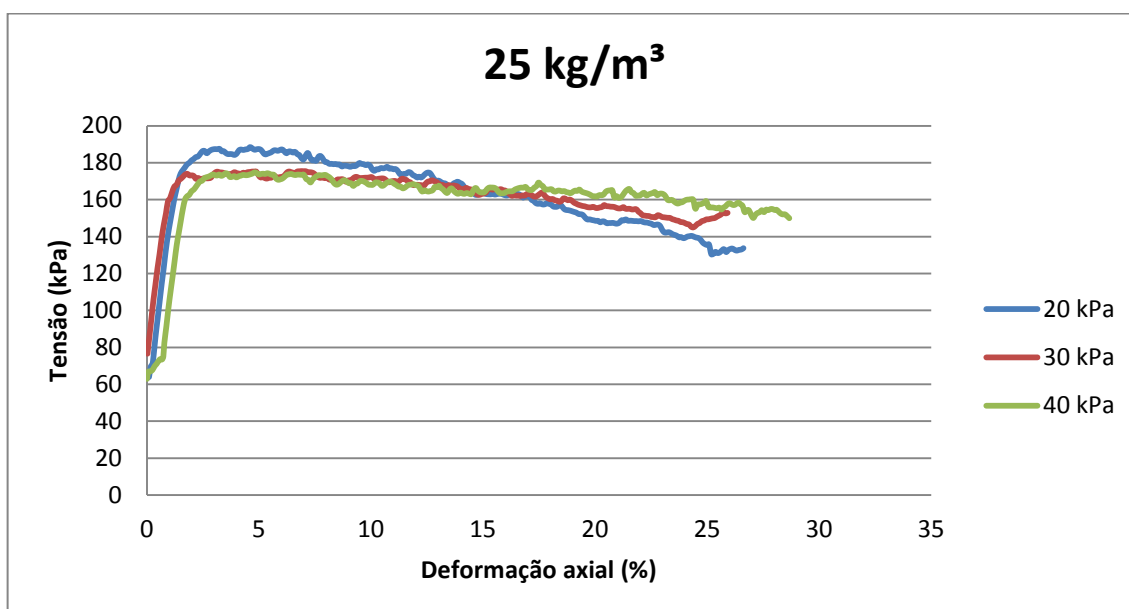


Figura 55. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 25 kg/m³.

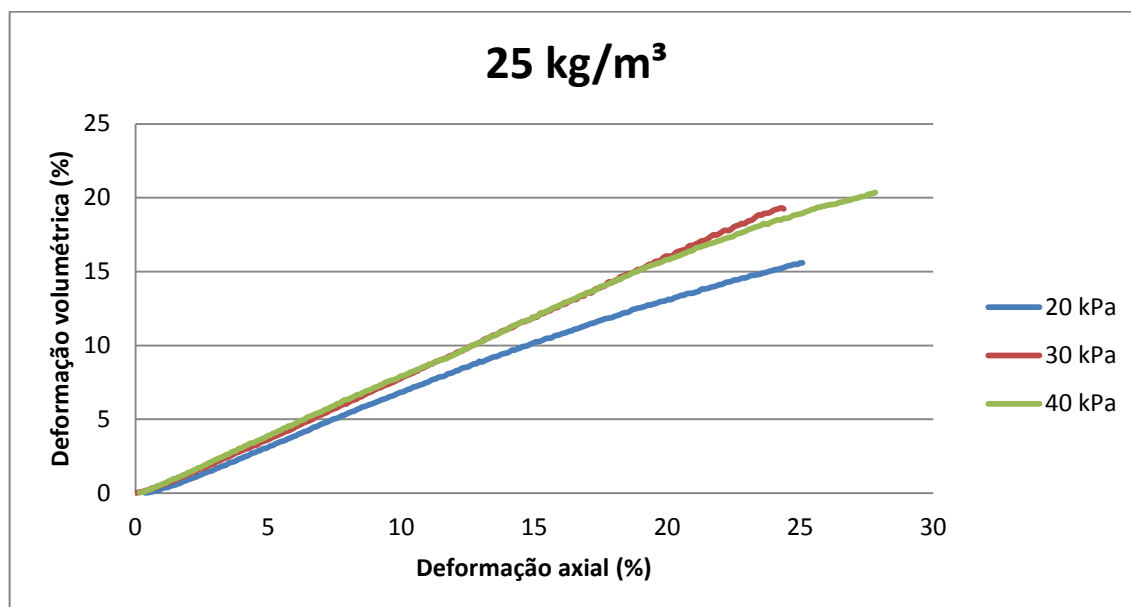


Figura 56. Resultado da fase de adensamento no ensaio triaxial de EPS de 30 kg/m³.

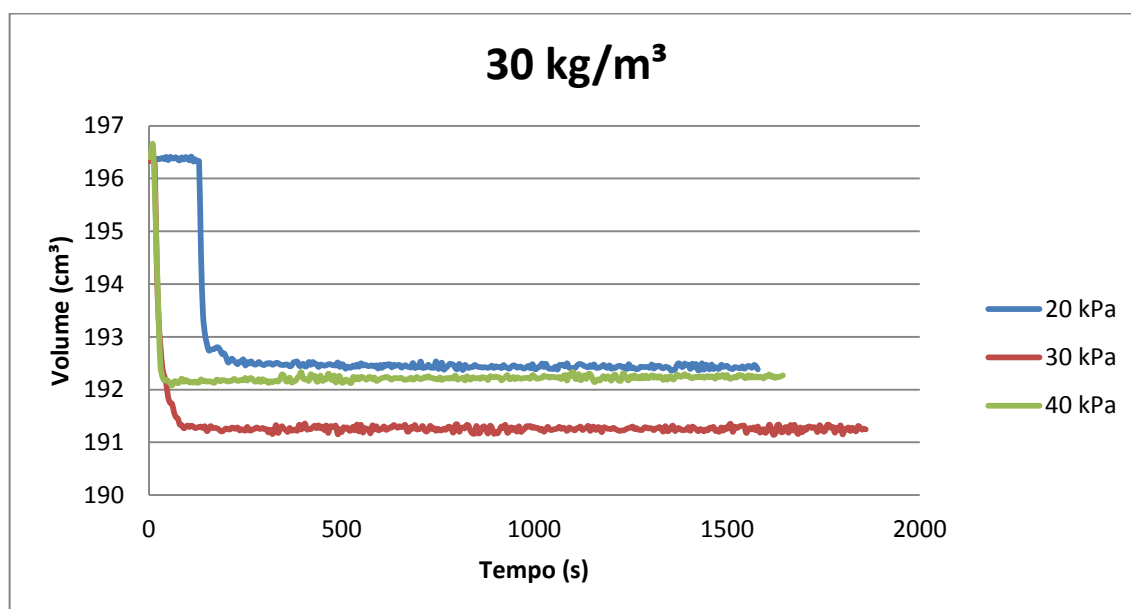


Figura 57. Resultado da fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 30 kg/m³.

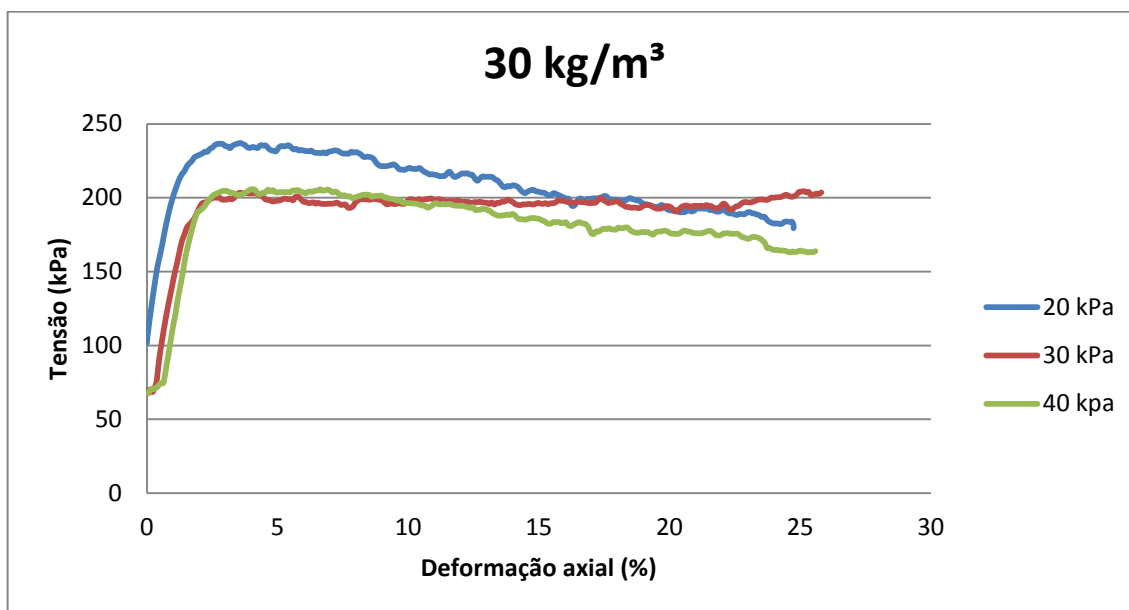
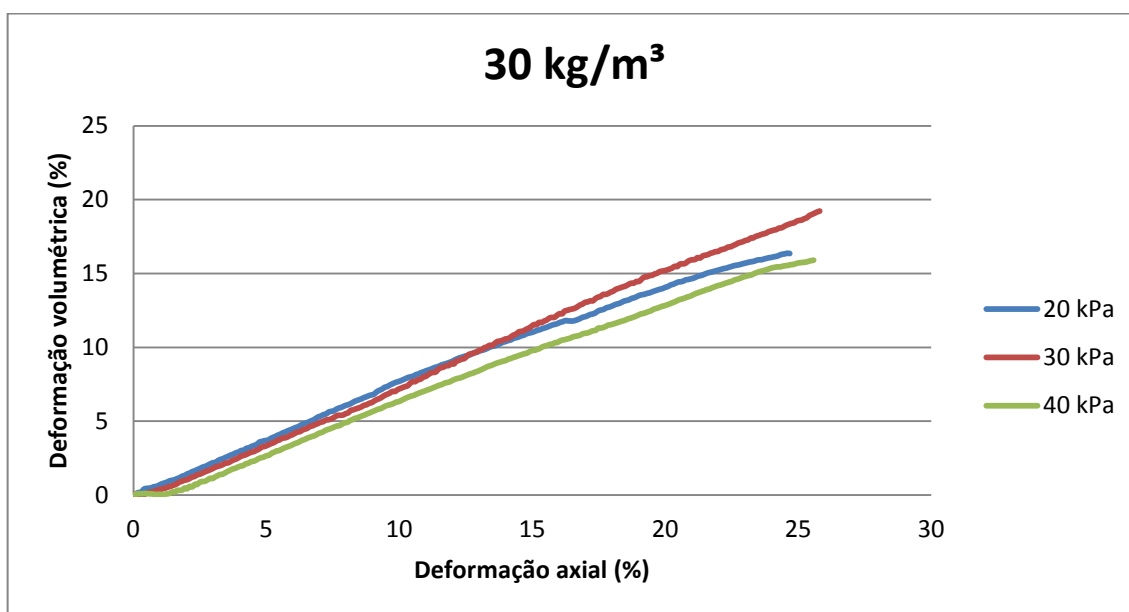


Figura 58. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial de EPS de 30 kg/m³.



Das figuras, nota-se na fase de ruptura um comportamento semelhante ao dos ensaios de cisalhamento direto realizados, apresentando um trecho elástico até uma deformação em torno de 2%, principalmente nas massas específicas maiores (20, 25 e 30 kPa).

Após essa fase, ocorre uma plastificação e como consequência, um ganho de resistência por endurecimento em deformações de até 10%, a partir da qual o material começa a perder resistência devido à instabilidade lateral, esse fenômeno não foi observado nos corpos de prova intactos de 10 e 15 kg/m³ sob tensão confinante de 40 kPa, o que fez com que não houvesse queda de resistência, como pode ser observado nas Figuras 45 e 48.

Avesani Neto (2008) afirma que para amostras que não sofrem perda de estabilidade a curva de deformação volumétrica pela deformação axial resulta em inclinações de aproximadamente 45°, o que pode ser comprovado pelas Figuras 41, 43, 46 e 49, nas quais observa-se esse fenômeno para tensões confinantes de 30 e 40 kPa, tanto nas amostras intactas quanto nas recicladas. Nos demais corpos de prova, nota-se uma inclinação inferior nas curvas de deformação volumétrica, isso ocorre devido à instabilidade lateral observada durante os ensaios. A Figura 59 mostra um corpo de prova não ensaiado (à direita) e um que sofreu perda de estabilidade lateral durante o ensaio e a Figura 60 compara um corpo de prova não ensaiado (à direita) com um que não sofreu perda de estabilidade lateral durante o ensaio.

Figura 59. Comparação entre um corpo de prova não ensaiado e um que sofreu perda de estabilidade lateral.

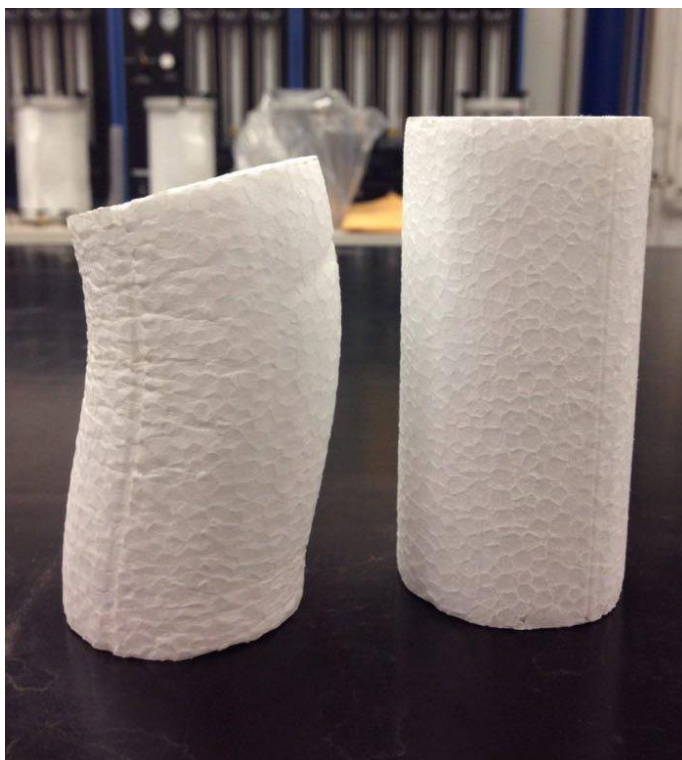


Figura 60. Comparação entre um corpo de prova não ensaiado e um que não sofreu perda de estabilidade lateral.



Observado as Figuras 61 a 63, fica claro que para as tensões aplicadas, nas amostras intactas, os corpos de prova de 10 e 15 kg/m³ apresentam deformações volumétricas superiores quando comparado a massas específicas mais elevadas (20, 25 e 30 kg/m³) para uma mesma deformação axial. Todavia, as amostras recicladas não apresentaram o mesmo comportamento, apresentando uma deformação volumétrica menor, mesmo sendo de baixa massa específica.

Figura 61. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial sob tensão confinante de 20 kPa.

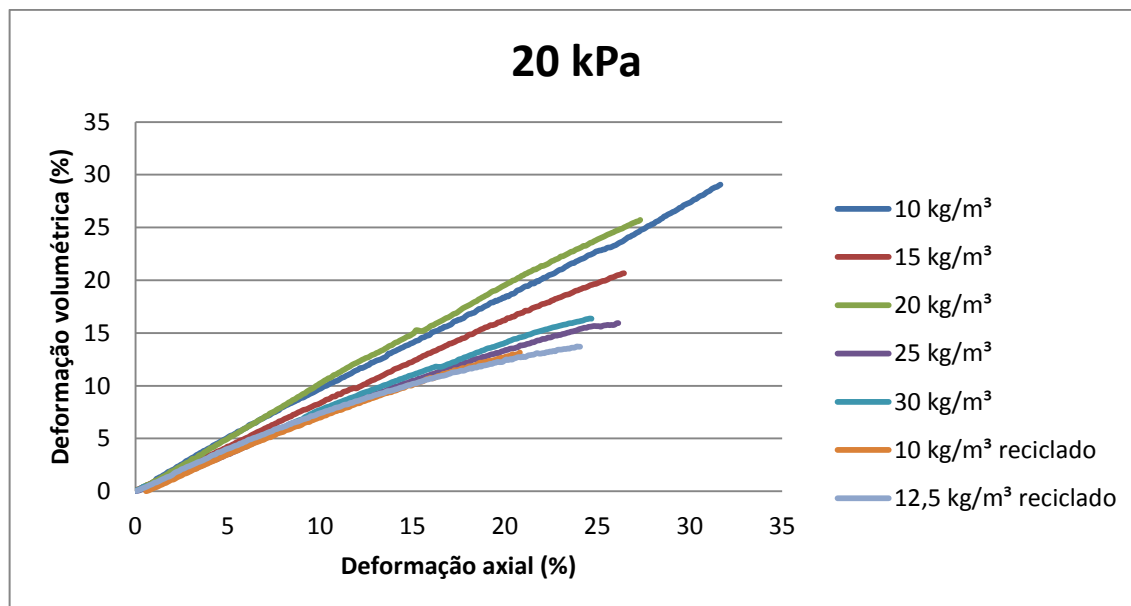


Figura 62. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial sob tensão confinante de 30 kPa.

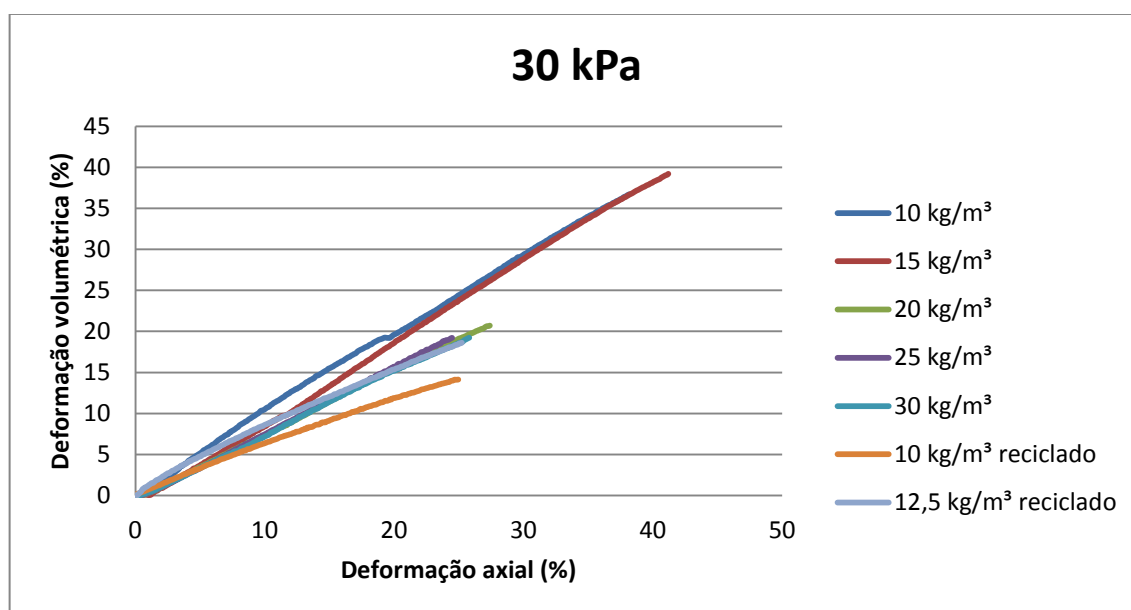
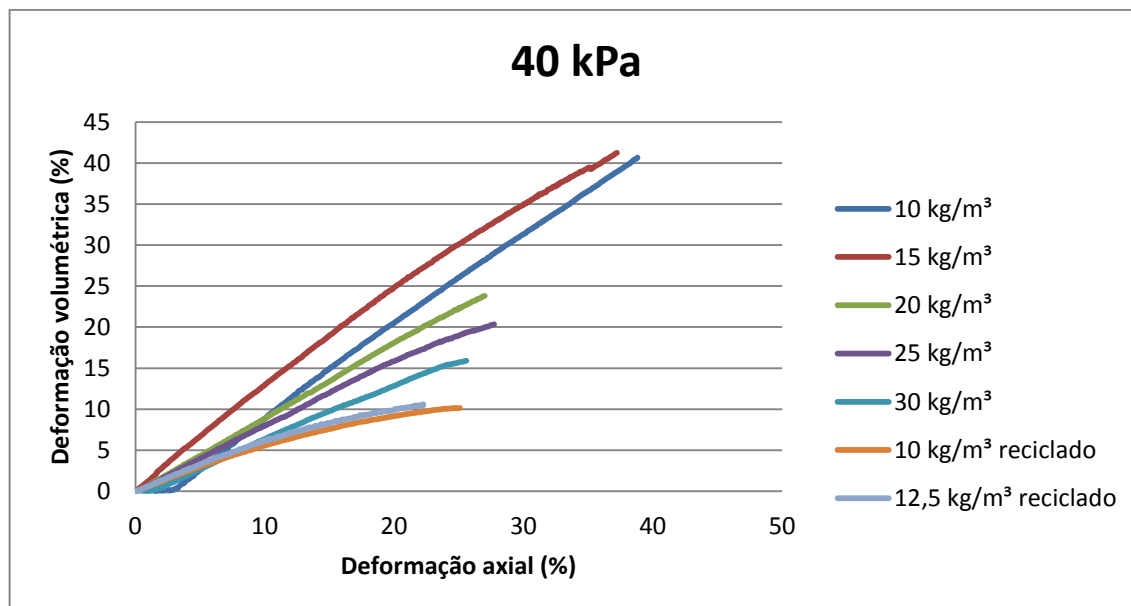


Figura 63. Variação dos volumes na fase de ruptura no ensaio triaxial sob tensão confinante de 40 kPa.



Com esses resultados foi possível obter as envoltórias de resistência ao cisalhamento triaxial a partir dos valores de pico de tensão. As amostras intactas de massas específicas menores (10 e 15 kg/m³) não responderam de forma satisfatória às tensões muito elevadas, devido a isto, não foi considerado a tensão de 40 kPa para traçar a envoltória dessas duas densidades. Já para as massas específicas mais elevadas (25 e 30 kg/m³) não foi considerado a tensão de 20 kPa para traçar as envoltórias, visto que estas também não responderam conforme o esperado, assim como nas amostras recicladas, nas quais também se desconsiderou a menor tensão aplicada. Os valores de coesão e ângulo de atrito obtidos através das envoltórias encontram-se na Tabela 64.

Nota-se que as amostras não recicladas apresentam valores elevados de coesão. É possível verificar que os resultados desta pesquisa indicam uma envoltória do tipo não drenada (quase horizontal) com elevado valor de coesão.

Figura 64. Valores de coesão e ângulo de atrito obtidos do ensaio triaxial.

Massa específica (kg/m³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (Ø')
10,0 (reciclado)	12,5	-
12,5 (reciclado)	15,9	-
10,0	89,3	39,0
15,0	66,5	61,8
20,0	91,0	44,5
25,0	175,7	-
30,0	240,5	-

Beju & Mandal (2017), ao realizarem ensaios triaxiais com EPS, também obtiveram envoltórias praticamente horizontais, mostrando um comportamento predominantemente coesivo do material. Os autores afirmam ainda que a coesão é um parâmetro importante na contribuição para a resistência ao cisalhamento do geoexpandido e varia em função da massa específica, já os valores de ângulo de atrito interno aumentam em uma proporção muito menor.

Nesses ensaios ficou caracterizada uma tendência de comportamento: à medida em que se aumenta a massa específica, aumenta-se o intercepto coesivo. Para o ângulo de atrito não há um padrão bem definido.

Com relação às amostras recicladas, os valores de intercepto de coesão são mais baixos, e estão de acordo com os valores obtidos para essas amostras no ensaio de cisalhamento direto, o que mostra que este comportamento pode ser típico do material.

Cabe ressaltar que os ensaios triaxiais não são de fácil execução para o EPS, nessa pesquisa houve problemas na execução dos ensaios, em particular com a tensão de confinamento de 20 kPa. Além disso, os ensaios realizados com as maiores massas específicas (25 e 30 kg/m³) apresentaram valores inconsistentes para a menor tensão de confinamento (20 kPa). Dessa forma, os resultados aqui apresentados não levam em conta esse valor de confinamento. Parece haver um comportamento não homogêneo do material quando submetido a tensões elevadas de confinamento. Outro fator a ser considerado é a reologia do polímero que pode apresentar variações em seu comportamento quando solicitado a diferentes níveis de tensão. Como os corpos de prova foram fornecidos já no formato dos ensaios, não é possível afirmar se todos possuem as mesmas condições de moldagem.

Avesani Neto (2008) afirma que estudar o comportamento do EPS quando submetido a solicitação triaxial é necessário para uma melhor interpretação de suas propriedades, mesmo sabendo que durante sua vida útil os blocos de EPS são solicitados por tensões de confinamento de pequena magnitude. Os resultados obtidos em sua pesquisa mostram que nas

curvas tensão versus deformação a inclinação é de aproximadamente 45°, concluindo que praticamente toda a deformação volumétrica é fruto da deformação axial.

Com relação às curvas variação volumétrica versus tempo, na fase de adensamento, e as curvas tensão *versus* deformação na fase de ruptura, pode-se concluir que o material não recebe benefícios significativos pelo efeito do confinamento. Observa-se em alguns casos, como na amostra de 30 kg/m³, que mesmo aumentando o valor da tensão confinante não há um acréscimo da resistência do material, nem do volume adensado na fase de consolidação, isso mostrou que o material é puramente coesivo. Além disso, o confinamento pouco influenciou na resistência das amostras de EPS, sendo, todavia, necessário estudar as situações de campo nas quais o material é utilizado, para uma melhor interpretação de suas propriedades (AVESANI NETO, 2008).

5.2.3 Ensaio de compressão uniaxial simples

O item “Apêndices” desta pesquisa apresenta os resultados das curvas obtidas do ensaio de compressão uniaxial para as massas específicas utilizadas. A Tabela 12 mostra os valores sumarizados dos ensaios.

Tabela 12. Resultados obtidos dos ensaios de compressão uniaxial.

Massa específica (kg/m ³)	σ_{esc} (kPa)	ε_{esc} (%)	E_i (kPa)	σ_{final} (kPa)	ε_{final} (%)	Desvio Padrão*	C.V. (%)*
10,0 (reciclado)	32,84	3,96	1000,00	90,20	33,45	3,089	3,424
12,5 (reciclado)	35,73	4,45	1109,14	85,70	33,62	3,352	3,912
10,0	38,62	3,76	1316,65	86,03	31,76	1,906	2,216
15,0	56,28	3,29	2507,31	106,60	33,41	1,351	1,267
20,0	99,31	3,76	4561,69	161,10	31,06	6,302	3,913
25,0	151,72	4,00	7332,99	230,80	31,53	4,217	1,828
30,0	182,07	3,76	8421,05	269,90	31,81	2,564	0,9497

* iguais para tensão de escoamento e tensão final.

σ_{esc} = tensão obtida no escoamento; ε_{esc} = deformação específica no escoamento;

σ_{final} = tensão obtida ao final do ensaio; ε_{final} = deformação específica ao final do ensaio;

E_i = módulo de elasticidade inicial

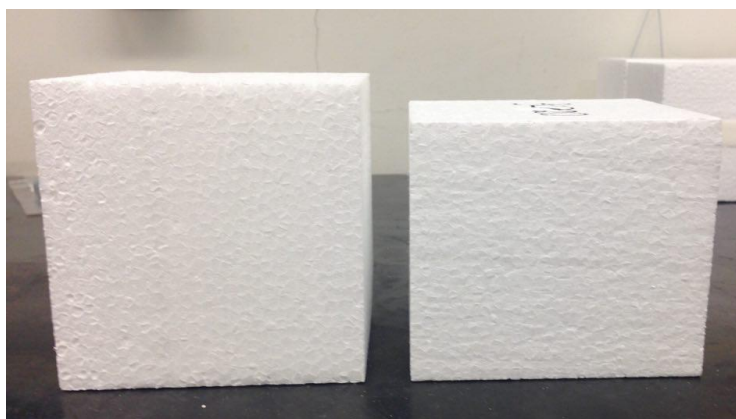
Observando-se os valores apresentados na Tabela 12, nota-se um aumento dos valores da tensão de escoamento (σ_{esc}) com o aumento da massa específica das amostras, bem como dos valores da tensão ao final do ensaio (σ_{final}). O mesmo é observado para o módulo de

elasticidade do material (E_i). Já para as deformações de escoamento (ε_{esc}) e finais (ε_{final}), não foi observado um padrão relacionado diretamente às massas específicas.

Nas amostras recicladas obteve-se valores inferiores de tensão de escoamento (σ_{esc}) e de módulo de elasticidade (E_i), o que mostra que estas apresentam resistência inferior às amostras virgens. Com relação à tensão final e às deformações de escoamento e finais, não notou-se um padrão de comportamento, isso se deve principalmente ao fato de que as massas específicas fornecidas de amostras recicladas são muito próximas (10 e 12,5 kg/m³), de forma que não se tem uma diferenciação adequada das mesmas, sendo necessário estudar amostras com massas específicas com maior variação entre elas, preferencialmente com uma variação de no mínimo 5 kg/m³, para que se tenha maior clareza da variação dos valores de tensão e deformação.

Com base na análise das curvas tensão *versus* deformação, observa-se que o material apresenta um comportamento elástico até atingir deformações em torno de 3,7%. Após esse estágio é notado um comportamento plástico chegando a deformações de 32%, conforme limite adotado. Nas amostras recicladas essas deformações apresentam valores mais elevados, sendo estas em torno de 4,2% e 34%, respectivamente (menor e maior massa específica), embora saiba-se que para esse material há uma fase elástica para deformações de até 1%, que não pode ser garantida após esse valor. De fato, tanto para as amostras virgens quanto recicladas ficou evidente uma redução de aproximadamente 3 cm na altura do corpo de prova, como mostrado na Figura 65, a qual apresenta dois corpos de prova, a saber: à esquerda, um corpo de prova intacto (referência) e à direita, um corpo de prova ensaiado, no qual nota-se uma variação na altura.

Figura 65. Comparação de corpos de prova ensaiados e não ensaiados no ensaio de compressão uniaxial simples.



Como exposto anteriormente, a deformação obtida ao final do ensaio de cada corpo de prova foi limitada em torno de 30%, pois se esse limite não tivesse sido imposto, o corpo de prova continuaria deformando-se até que a aplicação de carga fosse interrompida, como foi mostrado por Horvath (1994) em seu estudo, no qual foram aplicadas tensões até uma faixa de deformação em torno de 90%.

Esse comportamento é mostrado na Figura 15 anterior, na qual nota-se que a fase elástico linear chegou a valores de deformação entre 1 e 2% e o limite de elasticidade cresce com o aumento da densidade do EPS (HORVATH, 1994).

Outro parâmetro interessante e importante de ser avaliado no ensaio de compressão uniaxial é o módulo de elasticidade. Esse parâmetro proporciona uma medida da rigidez do material, sendo esta uma propriedade relacionada à sua composição química e à sua microestrutura. Assim, nota-se um melhoramento da estrutura do material com o aumento da massa específica, o que resulta em um crescente valor de rigidez.

A Lei de Hooke foi utilizada para calcular o valor de E_i , que é obtido pela inclinação da tangente inicial da curva tensão (σ) x deformação (ϵ).

$$\sigma = E_i * \epsilon \quad (2)$$

Horvath (1994) apresenta duas equações (3 e 4 listadas a seguir) que podem ser utilizadas para o cálculo do módulo de elasticidade inicial, as quais foram utilizadas para comparação com os valores obtidos nessa pesquisa.

A primeira equação é uma relação empírica obtida por Eriksson e Tränk (1991), a saber:

$$E_3 = 0,0097 * \rho^2 - 0,014 * \rho + 1,8 \quad (3)$$

ρ representa a massa específica, apresentada em kg/m^3 , e o módulo de elasticidade E_3 é dado em MPa. Sendo que existe uma variação de $\pm 0,5$ MPa para pequenas massas específicas (até 20 kg/m^3) e de $\pm 1,0$ MPa para massas específicas altas (a partir de 20 kg/m^3).

A segunda equação foi obtida por Magnan e Serratrice (1989) e também expressa uma relação empírica para o módulo de elasticidade em função da massa específica, na qual utilizam-se as mesmas unidades da Equação 3.

$$E_4 = 0,479 * \rho - 2,875 \quad (4)$$

Para essa relação, há uma variação de $\pm 1,5$ MPa independente da massa específica. A Tabela 13 apresenta os valores para o módulo de elasticidade obtido pelas três equações anteriores.

Tabela 13. Comparação dos valores obtidos para o módulo de elasticidade.

Massa específica (kg/m³)	E_i (MPa)*	E₃ (MPa)**	Intervalo de variação de E₃ (MPa)	E₄ (MPa)***	Intervalo de variação de E₄ (MPa)
10,0 (reciclado)	1,000	3,135	2,635 - 3,635	3,100	1,600 - 4,600
12,5 (reciclado)	1,109	3,279	2,779 - 3,779	3,396	1,896 - 4,896
10,0	1,317	2,973	2,473 - 3,373	2,750	1,250 - 4,250
15,0	2,507	3,723	3,223 - 4,223	4,224	2,724 - 5,724
20,0	4,562	5,077	4,077 - 6,077	6,281	4,781 - 7,781
25,0	7,333	7,718	6,718 - 8,718	9,307	7,807 - 10,807
30,0	8,421	9,743	8,743 - 10,743	11,182	9,682 - 12,682

* pesquisa atual; ** Eriksson e Tränk (1991) – Eq. 3; *** Magnan e Serratrice (1989) – Eq. 4

Comparando os valores obtidos pelas três equações, percebe-se que existe uma pequena diferença entre eles. Considerando as variações indicadas pelos autores, percebe-se que, de modo geral, o valor do módulo de elasticidade está mais próximo do limite inferior de cada equação, estando ainda dentro da faixa de variação em alguns casos.

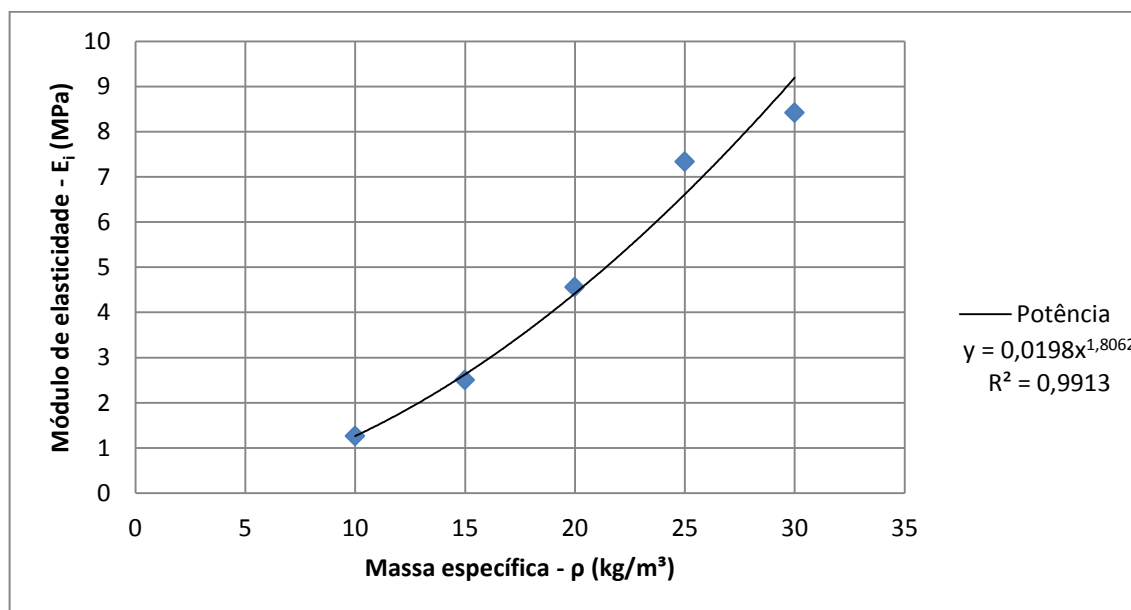
Além disso, nota-se que a Equação 4 (Magnan e Serratrice, 1989) tem uma maior representatividade quando comparado às massas específicas de até 20 kg/m³, enquanto a Equação 3 (Eriksson e Tränk, 1991) representa melhor as massas específicas a partir de 20 kg/m³.

Isso mostra que essas equações podem ser usadas para obter empiricamente os valores de módulo de elasticidade do poliestireno expandido de modo satisfatório, principalmente se utilizado como exposto acima.

A pequena variação que existe e a sua maior proximidade com os limites inferiores de ambas as equações pode ser explicada pela diferença da origem do material. Os autores realizaram suas pesquisas com material produzido em outro país (EUA), o que pode acarretar diferenças nas propriedades do EPS estudado por eles e o avaliado nesta pesquisa, de produção nacional. Isso pode mostrar ainda que o material produzido em indústria nacional apresenta qualidade um pouco inferior ao produzido nos Estados Unidos, reforçando a necessidade de estudo das propriedades de produtos nacionais para que estes sejam aprimorados e atendam aos padrões internacionais, garantindo assim sua correta utilização em projetos de Engenharia.

Considerando o exposto acima, os valores de módulo de elasticidade inicial obtidos para as amostras de EPS foram plotados em função da massa específica e com isso observou-se uma relação entre o módulo de elasticidade e a massa específica como mostrado na Figura 66.

Figura 66. Módulo de elasticidade inicial em função da massa específica.



Da relação observada na Figura 66 obteve-se uma função do tipo $y = a * x^b$. Essa função é dada pela Equação 5, cujo valor de determinação (R^2) é igual a 0,9913. Isso mostra que a curva tem um bom ajuste aos valores. Assim, a Equação 5 permite obter os valores de módulo de elasticidade em função da massa específica de forma empírica para o produto avaliado nesta pesquisa.

$$E_i = 0,0198 * \rho^{1,8062} \quad (5)$$

ρ representa a massa específica, apresentada em kg/m³, e o módulo de elasticidade E_i é dado em MPa. Sendo que existe uma variação de $\pm 0,5$ MPa para qualquer massa específica.

A Equação 5 foi usada para calcular valores de módulo de elasticidade para as amostras utilizadas no ensaio de compressão cíclica, que foram comparados com o módulo de elasticidade inicial obtido no ensaio a fim de se comprovar a aplicabilidade dessa equação empírica. Essa comparação será mostrada no item 5.2.4.

Os resultados do ensaio de compressão simples foram comparados com os resultados obtidos por Avesani Neto (2008), sendo essa uma pesquisa com material nacional, que apresenta valores de tensão correspondentes a 10% de deformação, assim como é sugerido pela literatura internacional para obter-se a resistência à compressão dos plásticos celulares rígidos. Essa comparação está apresentada na Tabela 14.

Tabela 14. Comparação dos valores de tensão.

Massa específica (kg/m ³)	$\sigma_{10\%}$ (kPa) *	$\sigma_{10\%}$ (kPa) **	Diferença	Diferença percentual (%)
10,0 (reciclado)	53,520	48,050	5,470	10,220
12,5 (reciclado)	--	48,404	--	--
10,0	55,250	51,596	3,654	6,614
15,0	79,460	72,128	7,332	9,227
20,0	157,620	118,090	39,530	25,079
25,0	--	173,320	--	--
30,0	264,050	207,980	56,070	21,235

* valores obtidos por Avesani Neto (2008); ** pesquisa atual

Tomando-se como referência a pesquisa de Avesani Neto (2008) nota-se na Tabela 14 que a diferença percentual entre os valores de tensão é pequena (em torno de 10%) para as massas específicas menores (até 15 kg/m³) e aumenta significativamente a partir de 20 kg/m³ (em torno de 23%). Isso mostra uma certa variabilidade nas amostras, sendo esta um pouco maior nas massas específicas elevadas (20, 25 e 30 kg/m³).

5.2.4 Ensaio de compressão cíclica

Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 67 a 71. A Figura 67 apresenta a representação esquemática de como os valores dos módulos de elasticidade (E) foram obtidos. Tais valores estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Valores de módulo de elasticidade do ensaio de compressão uniaxial cíclica.

Massa específica (kg/m ³)	Ei (MPa)	Er (MPa)			Ep (MPa)	Ep (MPa)	
		8% def.	16% def.	24% def.		8% def.	16% def.
10,0	1,287	0,554	0,426	0,392	0,198	0,117	0,108
14,5	2,688	1,210	0,861	0,728	0,208	0,165	0,142
18,0	3,684	1,676	1,238	0,991	0,276	0,172	0,156
28,0	7,910	3,937	3,668	3,063	0,406	0,346	0,336
33,5	10,789	5,338	4,024	3,597	0,486	0,331	0,331

Ei = Módulo de elasticidade inicial; Er = módulo de elasticidade residual; Ep = módulo de elasticidade para a fase plástica.

Figura 67. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de 10 kg/m^3 .

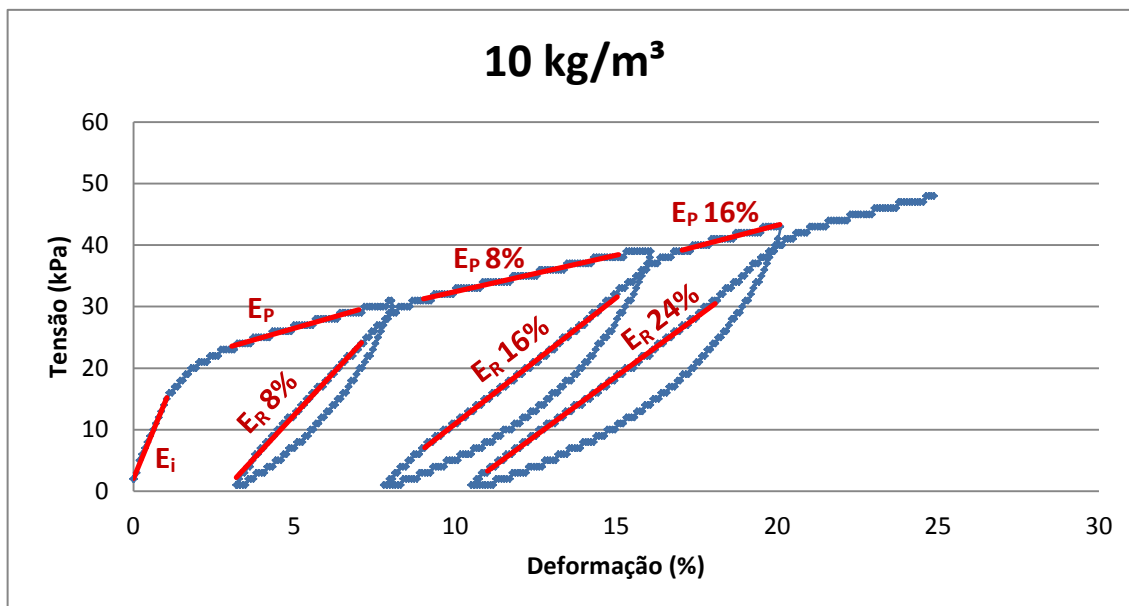


Figura 68. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de 15 kg/m^3 .

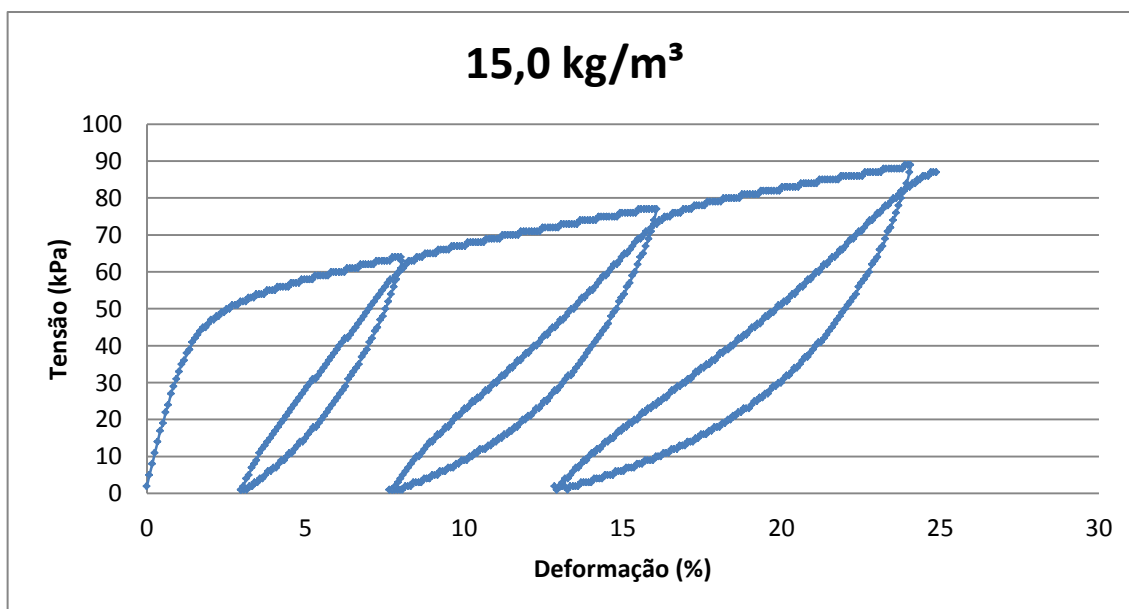


Figura 69. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de 20 kg/m^3 .

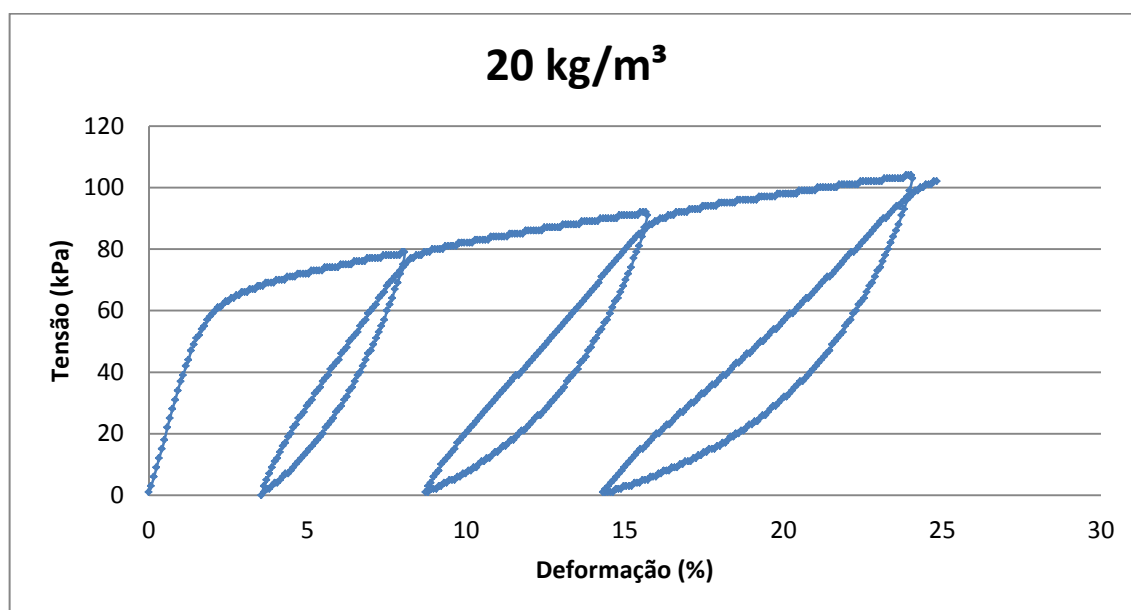


Figura 70. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de 25 kg/m^3 .

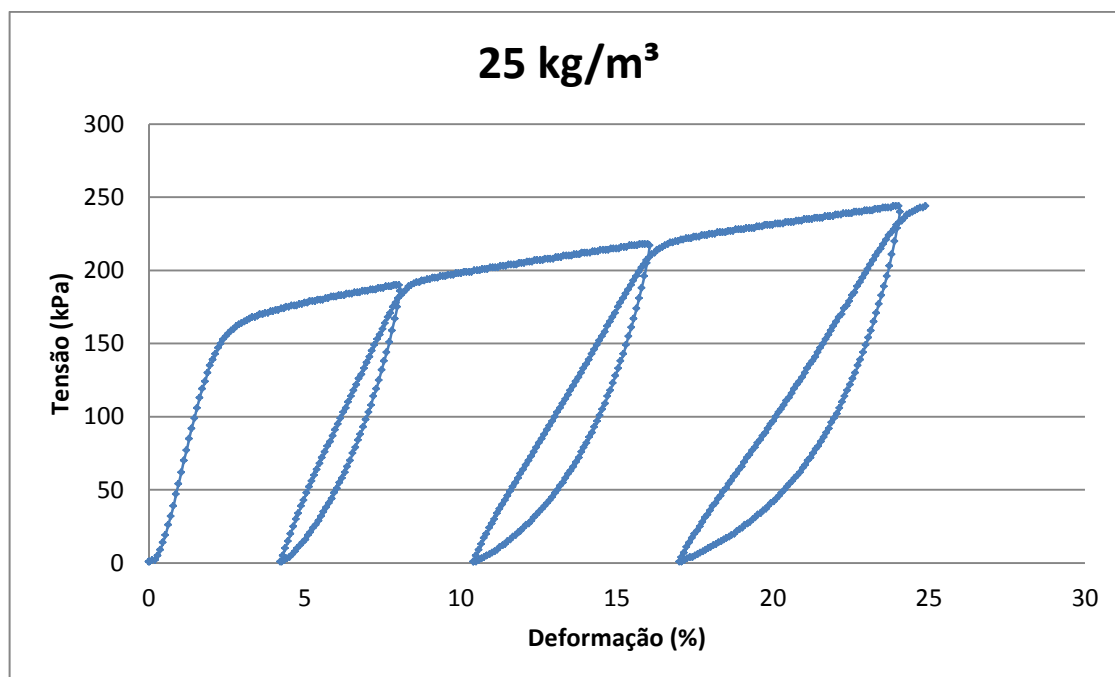
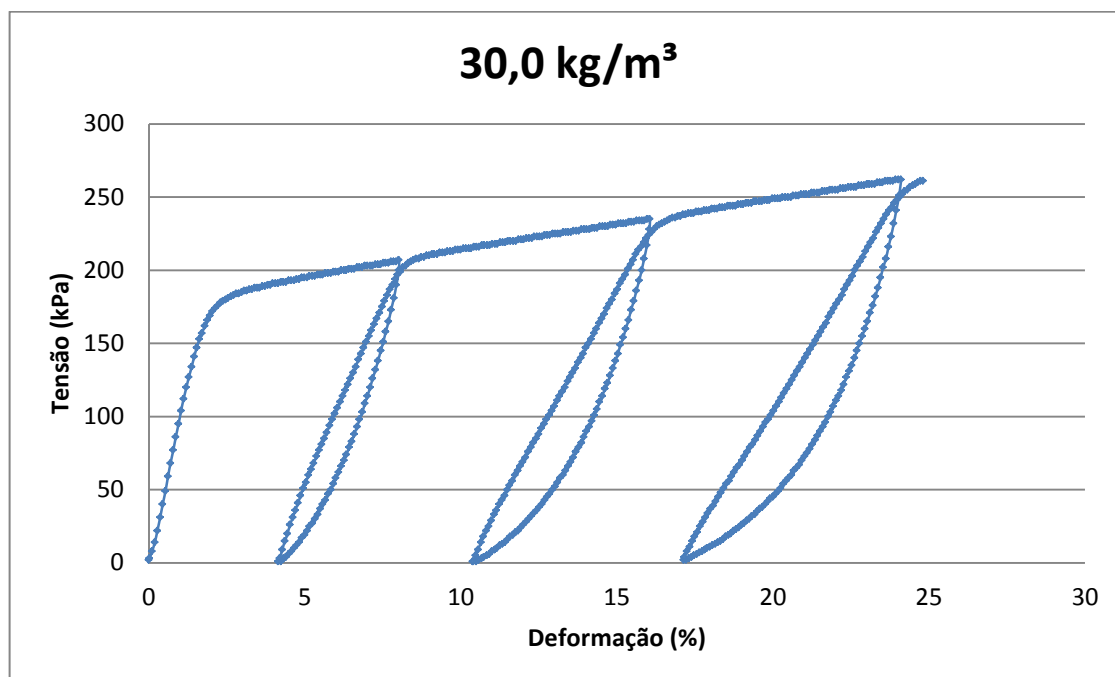


Figura 71. Resultado do ensaio de compressão cíclica realizado na amostra de EPS de 30 kg/m^3 .



Nota-se que na fase elástica, tanto para o trecho inicial quando para os trechos de recompressão, há um aumento do módulo de elasticidade com o aumento da massa específica. Nota-se ainda que o módulo de elasticidade diminui após cada descarregamento, mostrando que o material tende a se tornar mais plástico após cada ciclo, de modo que a inclinação da curva diminui a cada recarregamento.

Considerando a fase residual, verifica-se que os valores do módulo de elasticidade residual (E_r) caem praticamente para a metade de seu valor após o primeiro ciclo, e essa redução do valor de E_r parece ter uma relação semelhante em cada recarregamento, apresentando um valor bem próximo de redução para todas as massas especificar num mesmo ciclo.

O mesmo comportamento é notado na fase plástica com relação ao aumento da massa específica. Além disso, percebe-se que os valores de E_p diminuem após cada recompressão, mostrando que a inclinação da curva no trecho plástico tende a se estabilizar, o que é bem nítido para a maior massa específica (30 kg/m^3), que apresentou os mesmos valores de E_p após as descompressões de 8 e 16%.

Na literatura nacional, Dias et al (2016) também analisaram resultados de ensaios de compressão uniaxial cíclica em poliestireno expandido, obtendo dados característicos do material analisado, como módulo de elasticidade e resistência à deformação em diferentes

estágios e tensão de escoamento, que são essenciais para a utilização do material em diferentes obras de terra. Esses dados foram comparados com referências fornecidas pelas normas americanas ASTM C578 (usada para EPS térmico) e ASTM D6817 (usada para EPS geoexpandido), percebendo-se que, no geral, os dados obtidos pelas amostras analisadas correspondiam com o determinado pelas normas, sendo que a ASTM D6817 sempre apresentou dados mais concisos para classificar o geoexpandido, mostrando a importância de uma norma dedicada para o EPS utilizado como geossintético (DIAS et al, 2016).

Para uma melhor visualização dos resultados, apresenta-se a seguir a comparação com os resultados obtidos por Dias et al. (2016). Com relação aos valores de resistência, tomou-se como base também os valores de referência da ASTM D6817, os quais também foram utilizados para fins de comparação por Dias et al (2016), que analisaram os valores de tensão para deformações de 1, 5 e 10%, conforme mostrado na Tabela 16.

Tabela 16. Comparação dos valores de resistência.

Massa específica nominal (kg/m ³)	Resistência (kPa)*			Resistência (kPa) Dias et al (2016)**			Resistência (kPa) ASTM D6817		
	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
10,0	15	27	33	--	--	--	--	--	--
15,0	33	58	67	34	74	86	40	90	110
20,0	37	72	82	41	115	126	50	115	135
25,0	62	178	198	44	132	145	50	115	135
30,0	104	195	215	79	210	230	75	170	200

* Pesquisa atual; ** Dias et al (2016)

Observando as tensões para 1%, 5% e 10% de deformação, percebe-se que para as menores massas específicas (10 a 20 kg/m³) os valores obtidos na pesquisa atual são menores, tanto quando comparados com os valores Dias et al (2016) quanto com os valores de referência da ASTM D6817. Já, para a maior massa específica, observa-se que os valores de tensões são mais próximos ou maiores que os apresentados por Dias et al (2016) e, pela norma, mostrando que as amostras fornecidas apresentaram uma resistência elevada nas massas específicas nominais de 25 e 30 kg/m³.

Os autores apresentam apenas os valores de módulo de elasticidade inicial da fase elástica (Ei), da fase plástica (Ep) e de uma única recompressão (Er), de modo que este último

foi comparado com o valor de recompressão após 8% de deformação, sendo este o primeiro ciclo. Estes valores são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Comparação dos valores de módulo de elasticidade com Dias et al (2016).

Massa específica nominal (kg/m³)	Ei (MPa)*	Ei (MPa)**	Er (MPa)* 8% def.	Er (MPa)**	Ep (MPa)*	Ep (MPa)**
10,0	1,287	--	0,554	--	0,198	--
15,0	2,688	3,610	1,210	2,300	0,208	0,270
20,0	3,684	4,270	1,676	2,190	0,276	0,250
25,0	7,910	4,450	3,937	2,620	0,406	0,270
30,0	10,789	8,020	5,338	4,460	0,486	0,370

* pesquisa atual; **Dias et al (2016)

Nota-se que para os três estágios, os valores obtidos em ambas as pesquisas, ainda que próximos apresentam pequenas diferenças que podem ocorrer devido aos materiais serem de fornecedores diferentes.

Para verificar a viabilidade de utilizar a equação empírica obtida dos resultados do ensaio de compressão simples para módulo de elasticidade inicial (Equação 5), foi feita uma comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de compressão simples desta pesquisa com os valores calculados pela Equação 5 para as amostras usadas no ensaio de compressão cíclica e com os valores de módulo de elasticidade obtidos diretamente pelo ensaio cíclico. Essas comparações são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18. Comparação dos valores de módulo de elasticidade inicial.

Massa específica (kg/m³)	Ei* (MPa) Equação 5	Variação* ±0,5 MPa	Ei** (MPa)	Ei*** (MPa)
10,0	1,267	0,767 - 1,767	1,287	1,317
14,5	2,479	1,979 - 2,979	2,688	2,507
18,0	3,664	3,164 - 4,164	3,684	4,562
28,0	8,138	7,638 - 8,638	7,910	7,333
33,5	11,251	10,751 - 11,751	10,789	8,421

*Calculado pela Equação 5; **Ensaio cíclico; ***Ensaio de compressão simples.

Percebe-se que, se considerarmos uma variação de $\pm 0,5$ MPa na Equação 5, obtida através dos resultados do ensaio de compressão simples, os valores de módulo de elasticidade inicial obtidos no ensaio cíclico estão dentro da faixa de variação dos valores calculados por

essa equação para as massas específicas utilizadas no ensaio, mostrando que esta pode ser utilizada para estimar empiricamente os valores de módulo de elasticidade inicial.

É importante ressaltar que o cálculo foi feito utilizando as massas específicas reais das amostras (10,0; 14,5; 18,0; 28,0 e 33,5 kg/m³), e não as massas específicas nominais, variando a cada 5 kg/m³ entre 10 e 30 kg/m³, pois, dessa forma, os valores calculados pela equação não representam os valores reais de módulo de elasticidade, ficando fora dos limites pré-estabelecidos, como mostrado na Tabela 19.

Tabela 19. Comparação dos valores de módulo de elasticidade com diferentes massas específicas.

Massa específica nominal (kg/m³)	Ei* (MPa)	Ei** (MPa)	Variação** ±0,5 MPa	Ei*** (MPa)	Variação*** ±0,5 MPa
10,0	1,287	1,267	0,767 - 1,767	1,267	0,767 - 1,767
15,0	2,688	2,479	1,979 - 2,979	2,636	2,136 - 3,136
20,0	3,684	3,664	3,164 - 4,164	4,432	3,932 - 4,932
25,0	7,910	8,138	7,638 - 8,638	6,632	6,132 - 7,132
30,0	10,789	11,251	10,751 - 11,751	9,218	8,718 - 9,718

*Ensaio cíclico; **Equação 5 - cíclico com massa específica real; ***Equação 5 - cíclico com massa específica nominal

Diferentemente do que ocorre quando compara-se os valores de módulo de elasticidade obtidos no ensaio de compressão cíclica com os valores calculados pela equação utilizando a massa específica real, quando compara-se aos calculados com a equação utilizando a massa específica nominal, os valores de módulo de elasticidade do ensaio cíclico ficam fora da faixa de variação estabelecida pela equação, reforçando a importância de utilizá-la com valores reais de massa específica das amostras.

Para complementar o entendimento do material sob carregamento cíclico, comparou-se também os valores de tensão final do ensaio de compressão cíclica com os do ensaio de compressão simples (Tabela 20).

Com relação aos valores de resistência, percebe-se que os valores apresentam menor discrepância com o aumento da massa específica, mostrando que amostras com maior massa específica sofrem menos impacto com compressões e descompressões sucessivas, mostrando-se mais resistentes. Dessa forma, nota-se que para aplicações onde o material esteja submetido a carregamentos cíclicos, recomenda-se que se utilize uma massa específica acima de 20 kg/m³, o que também foi observado em diversas pesquisas.

Tabela 20. Comparação dos valores de resistência com o ensaio de compressão simples.

Massa específica nominal (kg/m³)	σ_{final} (kPa) *	σ_{final} (kPa) **	Diferença Percentual (%)
10,0	86,0	48,0	44,21
15,0	106,6	89,0	16,51
20,0	161,1	104,0	35,44
25,0	230,8	244,0	5,41
30,0	269,9	262,0	2,93

* compressão simples; ** compressão cíclica

Notou-se ainda que a deformação permanente sofrida pelo corpo de prova após as recompressões foi semelhante ao ocorrido no ensaio de compressão simples, como é observado na Figura 72.

Figura 72. Comparação de corpos de prova ensaiados e não ensaiados no ensaio de compressão cíclica.



5.3 Considerações finais

Dos resultados dos ensaios de absorção de água, observou-se que ocorre uma significativa redução na porcentagem de água absorvida com o aumento da massa específica do EPS após um período de 24 horas submerso, o que ocorre devido à maior presença de vazios nas massas específicas menores. Os valores de absorção de água em volume não ultrapassam 4% do volume total das amostras e o teor de umidade higroscópico é insignificante quando comparado a absorção de água por submersão, tanto para as amostras virgens quanto para as recicladas. A absorção de água do material quando imerso por 28 dias apresenta, de modo geral, uma pequena diferença no volume de água absorvido, aumentando de 4,0% para 4,3%.

Pelo ensaio de permeabilidade, nota-se que todas as massas específicas estudadas apresentaram valores muito próximos de permeabilidade, todos da ordem de 10^{-3} , mostrando que a massa específica pouco influenciou nessa propriedade. Sendo que os valores obtidos no ensaio, quando comparados com valores de permeabilidade dos solos, são considerados de alta permeabilidade, mostrando que o geoexpandido apresenta elevada permeabilidade, reforçando mais uma vez a importância de se prever sistemas de drenagem e impermeabilização adequados em obras geotécnicas.

O ensaio de empuxo mostrou um comportamento semelhante ao esperado pela teoria de Arquimedes, sendo que quanto maior a massa específica, maior será a força aplicada para submergir completamente o corpo de prova, já que os corpos de prova com massa específica mais elevada possuem menos vazios, o que concede a eles maior resistência ao empuxo.

No ensaio de cisalhamento direto de interface, não há um pico de tensão definido, de forma que a curva tende a ficar constante. Em se tratando das envoltórias de resistência, nota-se que com o aumento da massa específica o ângulo de atrito aumenta e a parcela coesiva diminui. Este comportamento difere para as amostras recicladas, nas quais a coesão aumenta e o ângulo de atrito diminui, entretanto, recomenda-se que seja feito um estudo com um maior intervalo entre os valores de massa específica em amostras recicladas, visto que os valores estudados são muito próximos e não se pode afirmar que este comportamento seja válido para demais massas específicas. Além disso, devido à plastificação sofrida pelas amostras de menor massa específica, para altas cargas de confinamento, as amostras de EPS com maiores massas específicas possuem maior resistência sob tensões confinantes altas, enquanto para tensão normal de 10 kPa, as amostras de menor massa específica possuem maior resistência. O mesmo ocorre para as amostras recicladas.

No ensaio de cisalhamento direto de interno não há valores de pico definidos nas massas específicas estudadas, assim como ocorreu no cisalhamento direto de interface. Das envoltórias nota-se que o aumento da massa específica proporciona uma redução no volume de vazios das amostras, o que causa um ganho de resistência dos corpos de prova. As amostras de 10 kg/m³ apresentam maior valor de intercepto de coesão. O mesmo ocorre nas amostras recicladas, de baixa massa específica (10 e 12,5 kg/m³). Já as massas específicas maiores apresentaram uma parcela significativa do ângulo de atrito. Além disso, comprovou-se que o comportamento geral do material não é afetado para deslocamentos mais elevados (as amostras continuaram com o mesmo tipo de envoltória).

Dos resultados do ensaio de compressão triaxial, nota-se na fase de ruptura um comportamento semelhante ao dos ensaios de cisalhamento direto realizados. Nesta fase, as curvas apresentam um trecho elástico até uma deformação em torno de 2%, principalmente nas massas específicas maiores, após essa fase ocorre uma plastificação com um ganho de resistência por endurecimento em deformações de até 10%, a partir da qual o material começa a perder resistência devido à perda de estabilidade lateral, este fenômeno não ocorreu nas amostras de menor massa específica (10 e 15 kg/m³) quando submetidas à tensões de 40 kPa, de forma que não houve queda na resistência. Além disso, este ensaio apresentou valores inconsistentes em contraposição aos resultados de cisalhamento direto.

O ensaio de compressão uniaxial simples mostrou um aumento dos valores da tensão de escoamento (σ_{esc}) com o aumento da massa específica das amostras, bem como dos valores da tensão ao final do ensaio (σ_{final}). O mesmo é observado para o módulo de elasticidade do material (E_i). Já para as deformações de escoamento (ϵ_{esc}) e finais (ϵ_{final}), não foi observado um padrão relacionado diretamente às massas específicas. Nas amostras recicladas obteve-se valores inferiores de tensão de escoamento (σ_{esc}), o que mostra que estas apresentam resistência inferior.

Com relação ao módulo de elasticidade, as relações empíricas de Eriksson e Tränk (1991) e de Magnan e Serratrice (1989) podem ser usadas para obter empiricamente os valores de módulo de elasticidade do poliestireno expandido de modo satisfatório. Com os valores de módulo de elasticidade em função da massa específica obteve-se uma função do tipo $y = a * x^b$ que foi usada para calcular valores de módulo de elasticidade para as amostras utilizadas no ensaio de compressão cíclica, que foram comparados com o módulo de elasticidade inicial obtido no ensaio;

O ensaio de compressão uniaxial cíclica mostrou que na fase elástica, tanto para o trecho inicial quanto para os trechos de recompressão, há um aumento do módulo de

elasticidade com o aumento da massa específica e que o módulo de elasticidade diminui após cada descarregamento, mostrando que o material tende a se tornar mais plástico após cada ciclo. Para o módulo de elasticidade inicial, calculado pela equação obtida no ensaio de compressão uniaxial simples e considerando uma variação de $\pm 0,5$, os valores de módulo de elasticidade inicial obtidos no ensaio cíclico estão dentro da faixa de variação dos valores calculados por essa equação para as massas específicas utilizadas no ensaio, mostrando que esta pode ser utilizada para estimar empiricamente os valores de módulo de elasticidade inicial.

Com relação aos valores de resistência, percebe-se as amostras com maior massa específica sofrem menos impacto com compressões e descompressões sucessivas, mostrando-se mais resistentes.

De forma geral, notou-se que existe uma descontinuidade no comportamento das amostras de massa específica inferiores e superiores a 20 kg/m^3 assim como observado por Avesani Neto (2008), de modo que este valor seria um valor de transição entre amostras de baixa e elevada massa específica.

6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados, as principais conclusões podem ser elencadas:

- Os parâmetros de absorção de água tendem a diminuir com o aumento da massa específica. A absorção de água representa cerca de 4% do volume da amostra;
- Todas as massas específicas estudadas apresentaram valores muito próximos de permeabilidade, todos da ordem de 10^{-3} ;
- Quanto maior a massa específica, maior será a força de empuxo;
- Os parâmetros de resistência ao cisalhamento direto, de modo geral, também apresentam variações crescentes conforme aumenta-se a massa específica. Não há valores de pico de ruptura por cisalhamento. Amostras de baixa massa específica apresentam maior valor do intercepto de coesão, enquanto as de maiores massas específicas possuem elevada parcela de ângulo de atrito;
- Do ensaio de compressão triaxial, nota-se na fase de ruptura um comportamento semelhante ao dos ensaios de cisalhamento direto, apresentando um trecho elástico até uma deformação em torno de 2%, principalmente nas massas específicas maiores, após essa fase ocorre uma plastificação com um ganho de resistência;
- Nota-se que os valores de resistência a compressão uniaxial simples são diretamente proporcionais à massa específica, assim como os valores de módulo de elasticidade;
- Do ensaio de compressão uniaxial cíclica notou-se um aumento do módulo de elasticidade com o aumento da massa específica e que o módulo de elasticidade diminui após cada descarregamento, de forma que o material tende a se tornar mais plástico após cada ciclo; e
- O valor de 20 kg/m^3 é um valor de transição da massa específica com relação ao comportamento das amostras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AABOE, R. 13 Years of Experience with Expanded Polystyrene as a Lightweight Fill Material in Road Embankments. Publication No. 61. Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, Norway, pp. 21–27, 1987.

AKAY, O. et al. Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofoam under seepage flow. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 37, p. 81–98, 2013.

ATHANASOPOULOS - ZEKOS, A.; LAMOTE, K.; ATHANASOPOULOS, G. A. Use of EPS geofoam compressible inclusions for reducing the earthquake effects on yielding earth retaining structures. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 41, p. 59–71, 2012.

ATHANASOPOULOS, G.A., PELEKIS, P.C., XENAKI, V.C. Dynamic properties of EPS geofoam: an experimental investigation. **Geosynthetics International** 6 (3), 171–194, 1999.

ATHANASOPOULOS, G.A., NIKOLOPOULOU, C.P., XENAKI, V.C., STATHOPOULOU, V.D. Reducing the seismic earth pressure on retainingwalls by EPS geofoam buffers – numerical parametric study. In: CD **Proceedings of 2007 Geosynthetics Conference**, Washington DC, USA, p. 15., 2007.

ATMATZIDIS, D.K., MISSIRLIS, E.G., CHRYSIKOS, D.A. An investigation of EPS geofoam behaviour in compression. In: EPS Geofoam 2001 – **Proceedings of the 3rd International Conference**, 10–12 December, 2001, Salt Lake City, UT, USA (on CD-ROM), 2001.

AVESANI NETO, J. O. Caracterização do Comportamento Geotécnico do EPS Através de Ensaio Mecânicos e Hidráulicos. **Dissertação de mestrado**, São Carlos, SP. p. 228, 2009.

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

BARTLETT, S. F.; LINGWALL, B. N.; VASLESTAD, J. Methods of protecting buried

pipelines and culverts in transportation infrastructure using EPS geofoam. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 43, n. 5, p. 450–461, 1 out. 2015b.

BASF. Guidelines for use of EPS board products in building construction. Technical Bulletin E-I, Parsippany, N J, USA, 1990.

BASF. Styropor® - Construction; Highway Construction/Ground insulation. Technical Information TI 1 – 800e, BASF, Ludwigshafen, Germany, 1991.

BEINBRECH, G.; HILLMANN, R. EPS in road construction - Current situation in Germany. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 15, n. 1–3, p. 39–57, 1997.

BEJU, Y. Z.; MANDAL, J. N. Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: Preliminary Characteristic Evaluation. **Procedia Engineering**, v. 189, p. 239–246, 1 jan. 2017.

DE CAMARGO FIORINI, P.; JABBOUR, C. J. C. Information systems and sustainable supply chain management towards a more sustainable society: Where we are and where we are going. **International Journal of Information Management**, v. 37, n. 4, p. 241–249, 1 ago. 2017.

DIAS, A. B. A. N. et al. Análise dos Resultados de Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclica em Poliestireno Expandido (EPS) Geofoam. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), n.18, Belo Horizonte, 7 p. 2016.

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

DUSKOV, M. Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures. **Geotextiles and Geomembranes** 15 (1–3), 147–181, 1997.

EKANAYAKE, S. D.; LIYANAPATHIRANA, D. S.; LEO, C. J. Attenuation of ground vibrations using in-filled wave barriers. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 67, p. 290–300, 2014.

ELRAGI, A. Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam. Ph.D. thesis, State University of New York, Syracuse, NY, 2000.

ERTUGRUL, O. L.; TRANDA, A. C. Lateral earth pressures on flexible cantilever retaining walls with deformable geofoam inclusions. **Engineering Geology**, v. 158, p. 23–33, 24 maio 2013.

ERTUGRUL, O. L.; TRANDAFIR, A. C. Reduction of Lateral Earth Forces Acting on Rigid Nonyielding Retaining Walls by EPS Geofoam Inclusions. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 12, p. 1711–1718, 2011.

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

FRYDENLUND, T.E., AABOE, R. Expanded polystyrene-the light solution. In: **International Symposium on EPS Construction Method**, EPS TOKYO'96, Japan, pp. 32–46, 1996.

GNIP, I. Y. et al. Water absorption of expanded polystyrene boards. **Polymer Testing**, v. 25, n. 5, p. 635–641, 1 ago. 2006.

GREELEY, T. R. **Review of expanded polystyrene (EPS) properties, performance and new applications**. ASTM Special Technical Publication. **Anais...**1997

HORVATH, J. S. Expanded Polystyrene (EPS) geofoam: An introduction to material behavior. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 13, n. 4, p. 263–280, 1 jan. 1994.

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. **Using EPS-block geofoam for levee rehabilitation and construction**. Geotechnical Special Publication. **Anais...**2008

JAFARI, H. Mechanical and Hydraulic Behavior of Geosynthetic Aggregate Drainage

Systems and the Effectiveness of Geofoam as a Compressible Inclusion over Flexible Pipe. Submitted in **Partial Fulfillment Of the requirements for a Degree with Honors (Civil Engineering)**, Helen Hardin Honors Program. University of Memphis, 2010.

JUTKOFISKY, W.; SUNG, J.; NEGUSSEY, D. Stabilization of Embankment Slope with Geofoam. **Transportation Research Record**, v. 1736, n. 1, p. 94–102, 2000.

KANG, J., PARKER, F., YOO, C. Soil-Structure interaction and imperfect trench installations for deeply buried Concrete pipes. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 133 (3), 277-285, 2007.

LEO, C. J. et al. Behavior of EPS geofoam in true triaxial compression tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 26, n. 2, p. 175–180, 2008.

LIYANAPATHIRANA, D. S.; EKANAYAKE, S. D. Application of EPS geofoam in attenuating ground vibrations during vibratory pile driving. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 44, n. 1, p. 59–69, 2016.

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, No. 164, pp. 25–31, 1989.

MANUAL DE UTILIZAÇÃO EPS NA CONSTRUÇÃO CIVIL/ABRAPEX – **Associação Brasileira do Poliestireno Expandido**. – São Paulo: Pini, 2006

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

MCGUIGAN, B.L., VALSANGKAR, A.J. Earth pressures on twin positive projecting and induced trench box culverts under high embankments. *Can. Geotech. J.* 47 (2), 147e163, 10.1139/T09-085, 2010.

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, 2017.

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

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

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

NEGUSSEY, D., STUEDLEIN, A., BARTLETT, S.F., FARNSWORTH, F. Performance of a Geofoam Embankment at 100 South, I-15 Reconstruction Project, Salt Lake City. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on EPS Geofoam**, Salt Lake City, UT, 2001.

OSSA, A.; ROMO, M. P. Dynamic characterization of EPS geofoam. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, n. 1, p. 40–50, 1 fev. 2011.

OSSA, A.; ROMO, M. P. Confining stress influence on EPS water absorption capability. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 35, p. 132–137, 1 dez. 2012.

ÖZER, A. T. et al. A new method for remediation of sandy slopes susceptible to seepage flow using EPS-block geofoam. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 42, n. 2, p. 166–180, 2014.

ÖZER, A. T.; AKAY, O. Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofoam. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2016.

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 backfill. In: **International Society for Rock Mechanics Symposium**, Nov. 19th to 24th, 2000, Melbourne, Australia., 2000.

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

SKUGGEDAL, H., AABOE, R. Temporary overpass bridge founded on expanded polystyrene. In: **Proceedings of the 1st European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, vol. 2, Florence, Italy, pp. 559–561, 1991.

SNOW, C. L.; NICKERSON, C. R. **Case study of EPS Geofoam lightweight fill for settlement control at bridge approach embankment**. Geotechnical Special Publication. **Anais...**2004

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

STARK, T. D.; ARELLANO, D.; HORVATH, J. S.; LSHCHINSKY, D. Geofoam Applications in the Design and Construction of Highway Embankments. NCHRP Web Document 65 (Project 24 – 11). TRB of the National Academies (<http://www.nationalacademies.org>), 2004.

STARK, T.D., BARTLETT, S.F., ARELLANO, D. Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam Applications and Technical Data. The EPS Industry Alliance, 1298 Cronson Blvd., Suite 201, Crofton, MD 21114, p. 36, 2012.

STUEDLEIN, A. W.; NEGUSSEY, D. **Use of EPS Geofoam for support of a bridge**. Geotechnical Special Publication. **Anais...**2013

SUN, L., HOPKINS, T.C., BECKHAM, T.L. Reduction of Stresses on Buried Rigid Highway Structures Using the Imperfect Ditch Method and Expanded Polystyrene (Geofoam). Research Report KTC-07-14/SPR-228-01-1F. Kentucky Transportation Center, University of Kentucky, Lexington Kentucky, 49 pp., 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, 2010a.

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, 1 dez. 2010b.

TRANDAFIR, A. C.; ERICKSON, B. A. Stiffness Degradation and Yielding of EPS Geofoam under Cyclic Loading. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 1, p. 119–124, 2012.

TRANDAFIR, A. C.; ERTUGRUL, O. L. **Earthquake response of a gravity retaining wall with geofoam inclusion**. Geotechnical Special Publication. **Anais...**2011

VAN D., T. Building on EPS Geofoam in the “low-lands” experiences in The Netherlands. In: **International Symposium on EPS Construction Method**, EPS TOKYO’96, Japan, pp. 60–69, 1996.

VASLESTAD, J. Soil Structure Interaction of Buried Culverts. Doktor Ingenioravhandling 1990:7 Institute for Geotechnics. University of Trondheim, 452 pp., 1990.

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.

YANG, J. S.; HUANG, S. W.; WANG, M. C. A model study of EPS constructed bridge approach embankment. **Geotechnical Engineering**, v. 34, n. 3, p. 161–166, 2003.

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**. vol. 23 (12), 54–57., 2006.

ZOU, Y., LEO, C.J. Laboratory studies on the engineering properties of expanded polystyrene (EPS) material for geotechnical applications. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Techniques**, 7–9 October, Singapore, pp. 581–588, 1998.

ZOU, Y., SMALL, J.C., LEO, C.J. Behaviour of EPS geofoam in model test on pavements. **Geosynthetics International** 7 (1), 1–22, 2000.

APÊNDICES

UNESP Universidade Estadual Paulista

Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 29**Trabalho nº **2937**

Programa: **Tesc versão 1.13**

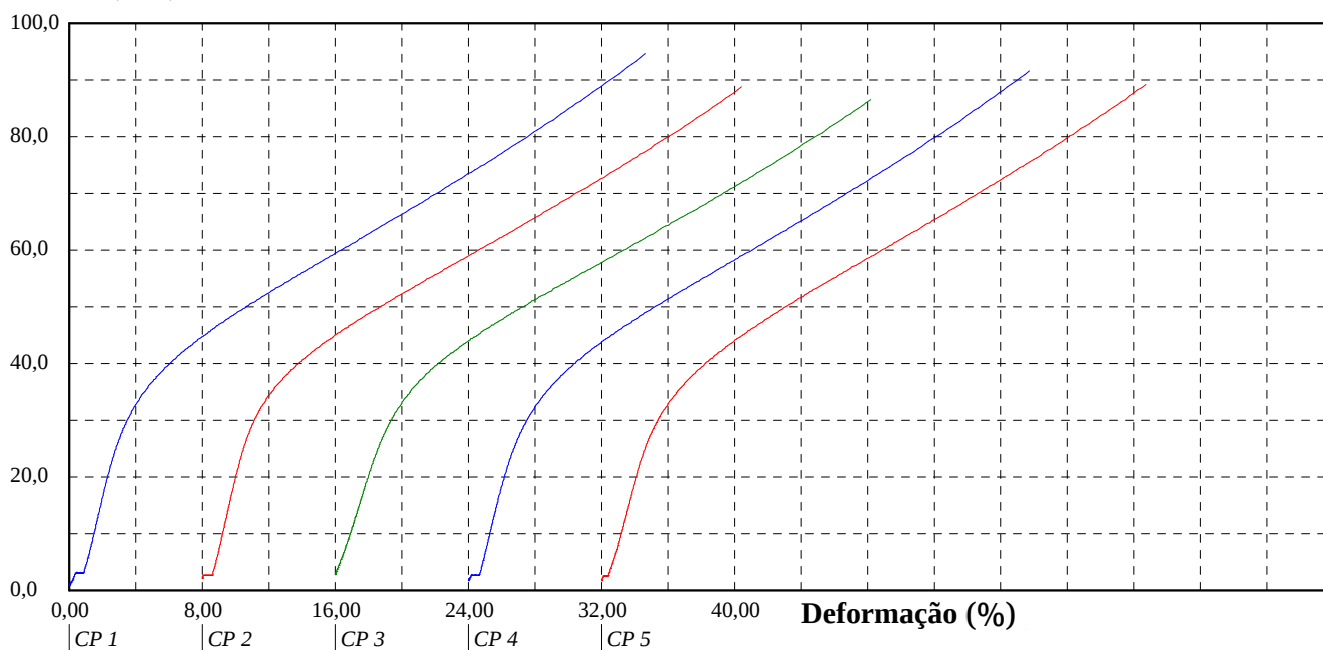
Método de Ensaio: **Compressao CP Prisma Isopor**

Ident. Amostra: >>>>>>>>>>>>>>>>>>>> Espécie: **EPS D - 10** Interessado: Mariana

Operador: **Israel**

Corpo de Prova	largura a (mm)	Largura b (mm)	seção (cm ²)	Fc90,max (kgf)	Tensão (kPa)
CP 1	99,85	101,07	100,92	97,44	94,69
CP 2	100,44	99,34	99,78	90,38	88,83
CP 3	99,52	101,69	101,20	89,32	86,55
CP 4	99,18	99,21	98,40	91,93	91,62
CP 5	99,65	99,42	99,07	90,23	89,32
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	99,73	100,1	99,87	91,86	90,20
Desv.Padrão	0,4668	1,150	1,193	3,259	3,089
Coef.Var.(%)	0,4680	1,148	1,194	3,548	3,424
Mínimo	99,18	99,21	98,40	89,32	86,55
Máximo	100,4	101,7	101,2	97,44	94,69

Tensão (kPa)



Observação:

Resultado do ensaio de compressão simples para amostras recicladas de 10 kg/m³.

UNESP Universidade Estadual Paulista

Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26**Trabalho nº **2938**

Programa: **Tesc versão 1.13**

Método de Ensaio: **Compressao CP Prisma Isopor**

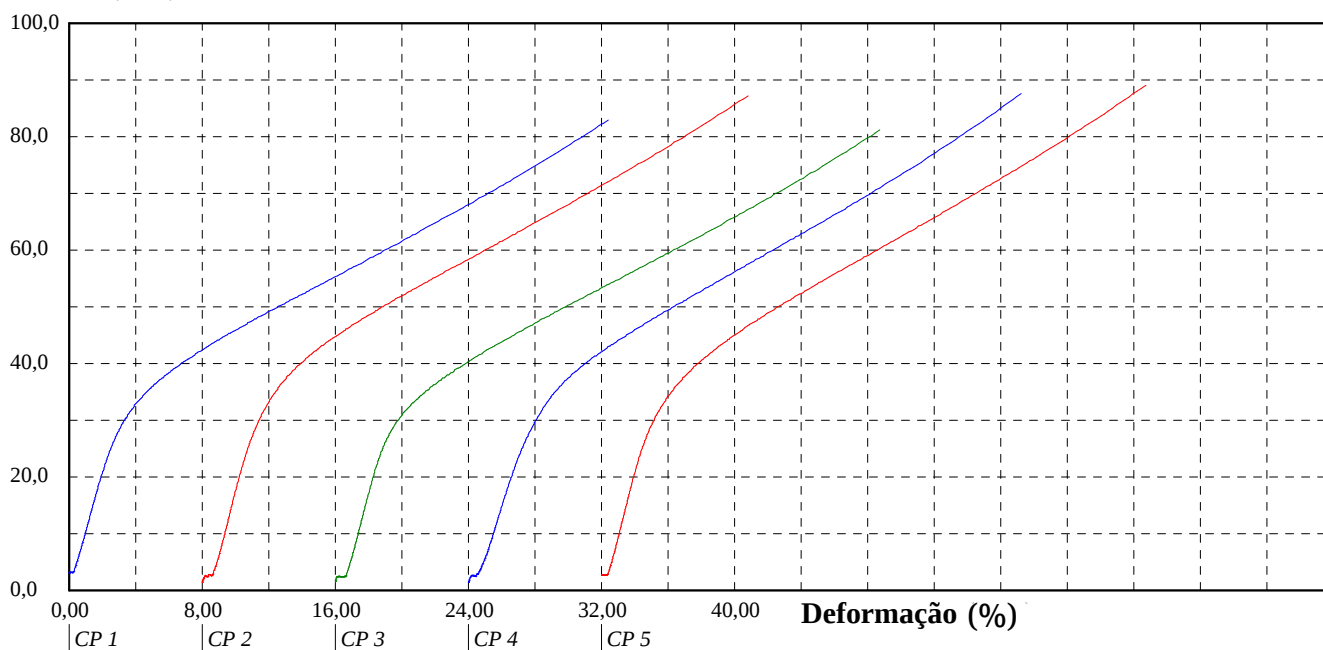
[illegible]

Interessado: Mariana

Operador: **Israel**

Corpo de Prova	largura a (mm)	Largura b (mm)	seção (cm ²)	Fc90,max (kgf)	Tensão (kPa)
CP 1	99,70	100,42	100,12	84,79	83,05
CP 2	99,02	100,87	99,88	88,89	87,28
CP 3	99,83	99,83	99,66	82,60	81,28
CP 4	98,92	98,22	97,16	86,91	87,72
CP 5	99,34	100,71	100,05	90,94	89,14
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	99,36	100,0	99,37	86,83	85,70
Desv.Padrão	0,4019	1,076	1,250	3,285	3,352
Coef.Var.(%)	0,4045	1,076	1,258	3,784	3,912
Mínimo	98,92	98,22	97,16	82,60	81,28
Máximo	99,83	100,9	100,1	90,94	89,14

Tensão (kPa)



Observação:

Resultado do ensaio de compressão simples para amostras recicladas de 12,5 kg/m³.

Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Operador: **Israel**

Resultado do ensaio de compressão simples para amostras de 10 kg/m³.

Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Resultado do ensaio de compressão simples para amostras de 15 kg/m³.

Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Operador: **Israel**

Resultado do ensaio de compressão simples para amostras de 20 kg/m³.

Relatório de Ensaio

Resultado do ensaio de compressão simples para amostras de 30 kg/m³.