



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

**MOZART MARIANO CARNEIRO NETO**

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO  
(*GEOFOAM*) POR MEIO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

Bauru  
2019



**MOZART MARIANO CARNEIRO NETO**

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO  
(*GEOFOAM*) 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



Bauru  
2019

Carneiro Neto, Mozart Mariano.  
Avaliação da degradação do poliestireno expandido  
(geofóam) por meio de ensaios de laboratório / Mozart  
Mariano Carneiro Neto, 2019  
104 p.

Orientador: Paulo César Lodi

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista.  
Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia Geotécnica. 3.  
Geotecnia Ambiental. 4. Poliestireno Expandido. I. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MOZART MARIANO CARNEIRO NETO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 11 dias do mês de novembro do ano de 2018, às 14:00 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. CARLOS EDUARDO JAVARONI 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 MOZART MARIANO CARNEIRO NETO, intitulada **AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO POR MEIO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO**. Após a exposição o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. 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. CARLOS EDUARDO JAVARONI

Prof. Dr. JOSÉ ORLANDO AVESANI NETO

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO


A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO  
MOZART MARIANO CARNEIRO NETO

DE: "AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO POR MEIO DE ENSAIOS DE  
LABORATÓRIO"

PARA:

" Avaliação da Degradação do Poliestireno expandido  
(Gestfoam) por meio de ensaios de laboratório "

Bauri, 11 de novembro de 2019.

  
Prof. Dr. Paulo César Lodi  
Orientador

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais, por toda dedicação e empenho na minha educação, aos meus avós Otávio e Hilda pelo aporte que me deram durante a vida e principalmente na graduação e à minha amada esposa Letícia, pelo apoio permanente e incondicional.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Paulo César Lodi pela amizade e por ter aceitado meu pedido para me orientar durante este mestrado e posteriormente no doutorado.

Às discentes Beatriz Garcia Silva e Isabella Lagazzi Mazzon Marcicano Morandini, pelo apoio com os ensaios de laboratório.

À empresa Termotécnica, que cedeu as amostras de EPS que foram utilizadas na realização dos ensaios.

Ao Centro Universitário Toledo de Araçatuba por me proporcionar flexibilidade na carga horária, possibilitando assim que eu pudesse viajar em dias de semana para assistir às aulas em Bauru.

Aos amigos e colegas de profissão, Rafael Marçal, Régis Marçal e Pedro Sérgio Hortolani Rodrigues por proporcionarem momentos agradáveis de boa conversa durante nossas cansativas viagens à Bauru.

## RESUMO

CARNEIRO NETO, M. M. (2019) **Avaliação da degradação do poliestireno expandido (*geofoam*) por meio de ensaios de laboratório**. Bauru, 105 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

O poliestireno expandido (EPS), que entre vários materiais, também da origem a um gessintético, o geoexpandido, que é muito utilizado em obras geotécnicas, pois quando comparado a outros materiais, possui um menor peso específico o que diminui o peso próprio da estrutura, minimizando eventuais recalques. Além disso, a combinação de alta resistência e baixa compressibilidade o tornam uma boa escolha para obras geotécnicas. No entanto, o EPS é extremamente susceptível a solventes, hidrocarbonetos e raios ultravioletas. Nesse sentido, poucos trabalhos tem explorado os aspectos de degradação do material em aplicações geotécnicas. Assim, o presente trabalho avaliou a degradação do poliestireno expandido (EPS) por meio de ensaios laboratoriais. Para tanto, utilizaram-se amostras de EPS em cinco diferentes massas específicas, a saber: 10,0, 14,5, 18,0, 22,0 e 33,5 kg/m<sup>3</sup>. O processo de degradação das amostras foi avaliado por meio da exposição à intempérie por catorze, trinta e quarenta e cinco dias e exposição ao vapor de gasolina por sete, catorze e trinta dias. Para avaliação do processo degradativo foram realizados ensaios de absorção de água, compressão uniaxial e cisalhamento direto de interface (EPS/EPS). Os ensaios foram realizados após cada período de exposição e os resultados obtidos foram comparados aos valores de referência das amostras intactas. Os resultados mostram que os valores de absorção de água, para ambos os tipos de exposição, apresentam comportamento similar, de forma que a absorção é inversamente proporcional à massa específica. Em relação à resistência uniaxial, notou-se que a exposição às intempéries gerou resultados aleatórios, enquanto que para exposição ao vapor de gasolina, afetou de maneira significativa a resistência do EPS. Quanto aos ensaios de cisalhamento direto de interface, analisando a resistência de ruptura, observou-se que as amostras expostas às intempéries, os valores obtidos foram bastante aleatórios, gerando dificuldade de interpretação deste resultado. Já para as amostras expostas ao vapor de gasolina, observou-se uma tendência à perda de resistência ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** Geotecnia, Geossintéticos, Durabilidade.



## ABSTRACT

CARNEIRO NETO, M. M. (2019) **Evaluation of the degradation of expanded polystyrene (geofoam) by laboratory tests.** Bauru, 94 p. Dissertation (Master Degree) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Expanded polystyrene (EPS), which among many materials, also gives rise to a gessynthetic, geo-expanded, which is widely used in geotechnical works, because when compared to other materials, has a lower specific weight which decreases the structure's own weight. , minimizing any repression. In addition, the combination of high strength and low compressibility make it a good choice for geotechnical works. However, EPS is extremely susceptible to solvents, hydrocarbons and ultraviolet rays. In this sense, few studies have explored the degradation aspects of the material in geotechnical applications. Thus, the present work evaluates the degradation of expanded polystyrene (EPS) by results of laboratory tests. For this purpose, EPS samples were used in five different specific masses, namely: 10.0, 14.5, 18.0, 22.0 and 33.5 kg/m<sup>3</sup>. The degradation process of the samples was evaluated by exposure to the weather for fourteen, thirty and forty five days and exposure to gasoline vapor for seven, fourteen and thirty days. To evaluate the degradation process water absorption, uniaxial compression and (EPS/EPS) interface direct shear tests were performed. The tests were performed after each exposure period and the results obtained were compared to the reference values of the fresh samples. The main results show that the water absorption values, for both types of exposure, present similar behavior, so that the absorption is inversely proportional to the specific mass. Regarding uniaxial resistance, it was noted that weathering generated random results, while for gasoline vapor exposure, it significantly affected EPS resistance. Regarding the interface direct shear tests, analyzing the breaking strength, it was observed that the samples exposed to the weather, the values obtained were quite random, causing difficulty of interpretation of this result. For samples exposed to gasoline vapor, a tendency to loss of resistance over time was observed.

**Keywords:** Expanded Polystyrene, Degradation, Laboratory Tests.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Correlação entre Módulo de Elasticidade e massa específica.....	17
Figura 2 - Diagrama de tensão x deformação para várias massas específicas .....	17
Figura 3 – Encontro de viaduto em Jundiaí/SP .....	22
Figura 4 – Encontro de ponte na BR 101, divisa PB e PE .....	23
Figura 5 – Inclusão de EPS acima de tubo e aduela de concreto .....	23
Figura 6 – Disposição de EPS atrás de muros de arrimo.....	24
Figura 7 - Inclusão de EPS na lateral de paredes e abaixo de lajes.....	25
Figura 8 – Comportamento do EPS na compressão axial .....	26
Figura 9 – Diferentes Módulos de Elasticidade do EPS.....	27
Figura 10 – Ensaio triaxial para amostra de 12 kg/m <sup>3</sup> de massa específica .....	28
Figura 11 – Ensaio triaxial para amostra de 15 kg/m <sup>3</sup> de massa específica .....	28
Figura 12 – Ensaio triaxial para amostra de 20 kg/m <sup>3</sup> de massa específica .....	28
Figura 13 – Relação entre resistência à tração e massa específica .....	29
Figura 14 – Valores de resistência à tração para diferentes massas específicas.....	30
Figura 15 – Ensaio de compressão para amostras de massa específica de 12 kg/m <sup>3</sup> .....	31
Figura 16 – Ensaio de compressão para amostras de massa específica de 15 kg/m <sup>3</sup> .....	31
Figura 17 – Ensaio de compressão para amostras de massa específica de 20 kg/m <sup>3</sup> .....	32
Figura 18 – Ensaio de compressão axial à diferentes velocidades .....	33
Figura 19 – Ensaio de compressão axial para diferentes velocidades.....	34
Figura 20 – Ensaio de fluência em diferentes taxas de aplicação de carga.....	36
Figura 21 – Comparação entre ensaio de compressão axial e ensaio de fluência .....	37
Figura 22 – Ensaios de fluência para diferentes massas específicas .....	38
Figura 23 – Ensaio de fluência para corpo de prova cilíndrico (100 x 200) .....	39
Figura 24 – Ensaio de compressão em amostras secas e úmidas a diferentes velocidades. 40	40
Figura 25 – Ensaio de absorção de água em amostras de 20 kg/m <sup>3</sup> .....	41
Figura 26 – Ensaio de absorção de água em amostras de 15, 20 e 30 kg/m <sup>3</sup> .....	41
Figura 27 – Ensaio de absorção de água em amostras de 20 e 29 kg/m <sup>3</sup> .....	42
Figura 28 - Ensaios tri axiais para amostras úmidas e secas .....	42
Figura 29 – Perda de massa com diferentes taxas de aumento de temperatura.....	45
Figura 30 – Perda de massa com diferentes taxas de aumento de temperatura.....	45
Figura 31 – Perda de massa e comportamento térmico .....	46

Figura 32 - Exposição dos corpos de prova à intempérie.....	49
Figura 33 – Corpos de prova em exposição ao vapor de gasolina .....	50
Figura 34 - Estufa utilizada para secagem das amostras .....	51
Figura 35 – Recipiente com amostras em imersão na água.....	52
Figura 36 – Realização de ensaio de compressão axial em amostra cúbica.....	52
Figura 37 – Exemplo de resultados do ensaio de compressão axial compilados .....	53
Figura 38 – Amostra degradada dentro da caixa de cisalhamento direto .....	54
Figura 39 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de cisalhamento direto.....	55
Figura 40 - Resultado obtido de ensaio de compressão uniaxial (intacta -10 kg/m <sup>3</sup> ).....	58
Figura 41 - Relação entre umidade após saturação e massas específicas.....	62
Figura 42 – Relação entre umidades higroscópicas e massas específicas.....	63
Figura 43 - Relação entre umidade após saturação e tempo de exposição.....	63
Figura 44 - Relação entre umidade higroscópica após saturação e tempo de exposição ....	64
Figura 45 – Amarelamento de amostras expostas à intempérie .....	65
Figura 46 – Desprendimento de material de amostras expostas à intempérie.....	65
Figura 47 – Valores de resistência uniaxial - amostras intactas x expostas à intempérie ...	67
Figura 48 - Evolução do Módulo de Elasticidade na fase elástica no período de exposição à intempérie .....	68
Figura 49 - Evolução do Módulo de Elasticidade na fase plástica no período de exposição à intempérie .....	68
Figura 50 - Evolução da Resistência para deformação de 1% em amostras expostas à intempérie.....	70
Figura 51 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 10 kg/m <sup>3</sup> .....	71
Figura 52 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 14,5 kg/m <sup>3</sup> .....	71
Figura 53 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 18,0 kg/m <sup>3</sup> .....	71
Figura 54 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 28,0 kg/m <sup>3</sup> .....	72
Figura 55 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 33,5 kg/m <sup>3</sup> .....	72
Figura 56 - Amostra com degradação das arestas após 45 dias de exposição à intempérie	73
Figura 57 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 10,0 kg/m <sup>3</sup> .....	74
Figura 58 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 14,5 kg/m <sup>3</sup> .....	75
Figura 59 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 18,0 kg/m <sup>3</sup> .....	75

Figura 60 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 28,0 kg/m <sup>3</sup> .....	75
Figura 61 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 33,5 kg/m <sup>3</sup> .....	76
Figura 62 – Relação entre umidade após saturação e massas específicas .....	80
Figura 63 – Relação entre umidades higroscópicas e massas específicas .....	80
Figura 64 - Relação entre umidade após saturação e tempo de exposição .....	81
Figura 65 - Relação entre umidade higroscópica após saturação e tempo de exposição ....	81
Figura 66 – Efeito da exposição de corpos de prova ao de vapor de gasolina .....	82
Figura 67 - Valores de resistência uniaxial - amostras intactas x vapor de gasolina .....	83
Figura 68- Evolução do Módulo de Elasticidade na fase elástica no período de exposição ao vapor de gasolina .....	84
Figura 69 - Evolução do Módulo de Elasticidade na fase plástica no período de exposição ao vapor de gasolina .....	85
Figura 70 - Evolução da Resistência para deformação de 1% em amostras expostas ao vapor de gasolina .....	86
Figura 71 - Corpos de prova expostos ao vapor de gasolina, antes e após ensaio de compressão .....	86
Figura 72 - Corpos de prova degradados após 30 dias após exposição ao vapor de gasolina .....	87
Figura 73 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 10,0 kg/m <sup>3</sup> .....	87
Figura 74 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 14,5 kg/m <sup>3</sup> .....	88
Figura 75 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 18,0 kg/m <sup>3</sup> .....	88
Figura 76 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 28,0 kg/m <sup>3</sup> .....	88
Figura 77 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 33,5 kg/m <sup>3</sup> .....	89
Figura 78 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 10,0 kg/m <sup>3</sup> .....	90
Figura 79 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 14,5 kg/m <sup>3</sup> .....	91
Figura 80 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 18,0 kg/m <sup>3</sup> .....	91
Figura 81 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 28,0 kg/m <sup>3</sup> .....	91

Figura 82 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 33,5 kg/m <sup>3</sup> .....	92
Figura 83 – Envoltórias de resistência para amostras intactas .....	93
Figura 84 – Envoltórias de resistência para amostras expostas à intempérie após 14 dias .	93
Figura 85 – Envoltórias de resistência para amostras expostas à intempérie após 30 dias .	94
Figura 86 – Envoltórias de resistência para amostras expostas à intempérie após 45 dias .	94
Figura 87 – Envoltórias de resistência para amostras expostas ao vapor de gasolina após 7 dias.....	95
Figura 88 – Envoltórias de resistência para amostras expostas ao vapor de gasolina após 14 dias.....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros referentes à intempérie.....	49
Tabela 2 – Valores das massas secas para as amostras intactas .....	56
Tabela 3 – Valores das massas saturadas para as amostras intactas.....	57
Tabela 4 – Valores das umidades das amostras intactas .....	57
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial para as amostras intactas.....	58
Tabela 6 – Valores das massas naturais (intempérie após 14 dias).....	59
Tabela 7 – Valores das massas secas (intempérie após 14 dias) .....	59
Tabela 8 – Valores das massas saturadas (intempérie após 14 dias).....	60
Tabela 9 – Valores das umidades (intempérie após 14 dias).....	60
Tabela 10 – Valores das massas naturais (intempérie após 30 dias).....	60
Tabela 11 – Valores das massas secas (intempérie após 30 dias) .....	60
Tabela 12 – Valores das massas saturadas (intempérie após 30 dias).....	61
Tabela 13 – Valores das umidades (intempérie após 30 dias).....	61
Tabela 14 – Valores das massas naturais (intempérie após 45 dias).....	61
Tabela 15 – Valores das massas secas (intempérie após 45 dias) .....	61
Tabela 16 – Valores das massas saturadas (intempérie após 45 dias).....	62
Tabela 17 – Valores das umidades (intempérie após 45 dias).....	62
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (14 dias após intempérie) ....	66
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (30 dias após intempérie) ....	66
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (45 dias após intempérie) ....	66

Tabela 21 - Evolução dos Módulos de Elasticidade para amostras expostas às intempéries .....	67
Tabela 22 - Resistência para deformação de 1% em amostras expostas à intempérie .....	69
Tabela 23 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 10,0 kg/m <sup>3</sup> .....	73
Tabela 24 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 14,5 kg/m <sup>3</sup> .....	73
Tabela 25 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 18,0 kg/m <sup>3</sup> .....	74
Tabela 26 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 28,0 kg/m <sup>3</sup> .....	74
Tabela 27 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 33,5 kg/m <sup>3</sup> .....	74
Tabela 28 – Valores das massas naturais (vapor de gasolina após 7 dias) .....	77
Tabela 29 – Valores das massas secas (vapor de gasolina após 7 dias) .....	77
Tabela 30 – Valores das massas saturadas (vapor de gasolina após 7 dias) .....	77
Tabela 31 – Valores das umidades (vapor de gasolina após 7 dias) .....	77
Tabela 32 – Valores das massas naturais (vapor de gasolina após 14 dias) .....	78
Tabela 33 – Valores das massas secas (vapor de gasolina após 14 dias) .....	78
Tabela 34 – Valores das massas saturadas (vapor de gasolina após 14 dias) .....	78
Tabela 35 – Valores das umidades (vapor de gasolina após 14 dias) .....	78
Tabela 36 – Valores das massas naturais (vapor de gasolina após 30 dias) .....	79
Tabela 37 – Valores das massas secas (vapor de gasolina após 30 dias) .....	79
Tabela 38 – Valores das massas saturadas (vapor de gasolina após 30 dias) .....	79
Tabela 39 – Valores das umidades (vapor de gasolina após 30 dias) .....	79
Tabela 40 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (7 dias – vapor de gasolina). .....	82
Tabela 41 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (14 dias – vapor de gasolina) .....	83
Tabela 42 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (30 dias – vapor de gasolina) .....	83
Tabela 43 - Evolução do módulo de elasticidade no regime elástico para amostras expostas ao vapor de gasolina .....	84
Tabela 44 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 10,0 kg/m <sup>3</sup> .....	89

Tabela 45 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 14,5 kg/m <sup>3</sup> .....	89
Tabela 46 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 18,0 kg/m <sup>3</sup> .....	90
Tabela 47 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 28,0 kg/m <sup>3</sup> .....	90
Tabela 48 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 33,5 kg/m <sup>3</sup> .....	90
Tabela 49 – Valores dos parâmetros de resistência para os ensaios de cisalhamento direto .....	96

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
3.1 O POLIESTIRENO EXPANDIDO .....	14
3.1.1 <i>A matéria prima do EPS.....</i>	15
3.1.2 <i>O processo de fabricação do EPS .....</i>	15
3.1.3 <i>Massa específica.....</i>	16
3.1.4 <i>Durabilidade.....</i>	18
3.1.5 <i>Compatibilidade com outros materiais.....</i>	19
3.1.6 <i>Motivos da Utilização do Geoexpandido.....</i>	19
3.1.7 <i>Aplicações do Geoexpandido.....</i>	21
3.2 PROPRIEDADES DE COMPRESSIBILIDADE DO EPS .....	25
3.2.1 <i>Comportamento triaxial.....</i>	27
3.2.2 <i>Propriedades de tração e flexão.....</i>	29
3.2.3 <i>Corpos de prova de EPS.....</i>	30
3.2.4 <i>Taxa de aplicação de carga.....</i>	32
3.3 COMPORTAMENTO DO EPS FRENTE AO CISALHAMENTO.....	34
3.3.1 <i>Resistência ao cisalhamento de interface .....</i>	34
3.4 COMPORTAMENTO QUANTO À FLUÊNCIA .....	36
3.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	39
3.6 A DEGRADAÇÃO DO EPS.....	43
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>48</b>
4.1 MATERIAIS EMPREGADOS .....	48
4.2 MÉTODO DE PESQUISA .....	48
4.2.1 <i>Exposição à intempérie.....</i>	48
4.2.2 <i>Exposição ao vapor de gasolina.....</i>	50
4.3 ENSAIOS LABORATORIAIS .....	50
4.3.1 <i>Ensaio de absorção de água.....</i>	51
4.3.2 <i>Ensaio de Compressão axial.....</i>	52
4.3.3 <i>Ensaio de cisalhamento direto de interface.....</i>	54
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>56</b>
5.1 RESULTADOS PARA AMOSTRAS INTACTAS.....	56
5.1.1 <i>Ensaio de absorção de água.....</i>	56



5.1.2	<i>Ensaio de Compressão Uniaxial</i> .....	58
5.1.3	<i>Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface</i> .....	59
5.2	RESULTADOS PARA AMOSTRAS EXPOSTAS À INTEMPÉRIE.....	59
5.2.1	<i>Ensaio de absorção de água</i> .....	59
5.2.2	<i>Ensaio de Compressão Uniaxial</i> .....	66
5.2.3	<i>Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface</i> .....	70
5.3	RESULTADOS PARA AMOSTRAS EXPOSTAS AO VAPOR DE GASOLINA .....	76
5.3.1	<i>Ensaio de absorção de água</i> .....	76
5.3.2	<i>Ensaio de Compressão Axial</i> .....	82
5.3.3	<i>Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface</i> .....	87
5.4	ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA .....	93
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>97</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A engenharia, de uma forma geral, segue em constante evolução, seja no quesito de qualidade dos materiais, durabilidade, desenvolvimento de novas rotinas de cálculo, refinamento de técnicas existentes, sempre na busca de aperfeiçoar o processo, de forma a se ter resultados rápidos, satisfatórios, econômicos e ecologicamente corretos.

Quando se trata de obras de terra, a engenharia desenvolveu nas últimas décadas, produtos capazes de melhorar o desempenho estrutural e funcional de tais obras e até mesmo em alguns casos, possibilitando a realização de obras que antes não eram viáveis, por alguma questão de logística, tempo, ou falta de qualidade dos materiais utilizados. Esses produtos são os geossintéticos.

De acordo com a NBR ISO 10318-1-2018, classificam-se como Geossintéticos (GSY) os materiais produzidos a partir de um polímero sintético ou natural, utilizado em contato com solo ou outros materiais, em aplicações de engenharia geotécnica ou civil. Entre suas funções destacam-se: separação, proteção, filtração, impermeabilização, drenagem, reforço e controle de erosões.

Os materiais geossintéticos têm sido utilizados no Brasil em diversas obras de engenharia civil/geotécnicas com desempenho inquestionável e custo/benefício favorável. Em algumas situações são praticamente indispensáveis. Existem aplicações que variam desde a utilização em aterros sanitários, aplicações asfálticas, reforço e melhoria de solos (ABINT, 2004; AVESANI NETO, 2008).

O poliestireno expandido (EPS) é um caso particular de geossintético cujo nome comercial ganhou destaque como “isopor”. Esse geossintético, também chamado de geoexpandido, apresenta três dimensões significativas e tem sido utilizado em diversas aplicações geotécnicas, dentre as quais se ressaltam: construção de estradas sobre solos com baixa capacidade de suporte (AVESANI NETO, 2008), aterros leves rodoviários (REFSDAL, 1985) proteção de tubulações e estruturas enterradas (VASLESTAD, 1990; ROH et al., 2000; YANG; YONGXING, 2005; ZHANG et al. 2006; SUN et al. 2009; MCGUIGAN; VALSANGKAR, 2010, JAFARI, 2010; BARTLETT et al., 2015) e estabilização de taludes (JUTKOFISKY et al. 2000; SHEELEY, 2000; SRIRAJAN, 2001; NEGUSSEY, 2002; MARRADI; PINORI; BETTI, 2012).

É importante mencionar alguns trabalhos feitos por meios de ensaios que não visaram à aplicação, mas sim avaliar o comportamento mecânico do material em diferentes

situações (FRYDENLUND; AABOE 1996; HORVATH, 1997; ZOU; LEO 1998; ATHANASOPOULOS et al. 1999; ATMATZIDIS et al. 2001; ELRAGI, 2006; STARK et al. 2012).

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 et al., 2010).

De acordo com Horvath (1994), foi a partir de 1960 que a utilização de plásticos rígidos expandidos em obras geotécnicas se fixou de forma consistente, recebendo o nome, na classe dos geossintéticos, de geofoam, ou geoexpandido em português.

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 moles (WILLIAMS; SNOWDON, 1990; DUSKOV, 1991; NEGUSSEY et al. 2001), encontros de pontes e viadutos (MCDONALD, BROWN, 1993; NEGUSSEY; SUN, 1996; ABU-HEJLEH et al., 2003; ATHANASOPOULOS et al. 2007; HORVATH, 2008) e bases de pavimentos (REFSDAL, 1985; AABOE, 1987; MAGNAN; SERRATRICE, 1989, FRYDENLUND, 1991; SKUGGEDAL, AABOE, 1991; DUSKOV, 1998; AABOE, 2000; ZOU et al. 2000).

O EPS é amplamente utilizado em obras geotécnicas, pois quando comparado a outros materiais, ele possui menor peso específico (0,15 a 0,40 kN/m<sup>3</sup>), o que diminui o peso próprio da estrutura, evitando eventuais recalques. Além disso, a combinação de alta resistência (70 a 250 kPa) e baixa compressibilidade (módulo de elasticidade de 1 a 11 MPa) o tornam uma boa escolha para obras geotécnicas. Por ser um plástico inerte, não biodegradável, não é um ambiente propício para a proliferação de micro-organismos e outros animais e não é quimicamente afetado no contato com o solo e a água (BASF, 1990; 1991).

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 (AVESANI NETO, 2008).

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 densidades de EPS. No entanto, como cita o autor, a pesquisa foi finalizada deixando-se ainda alguns pontos adicionais a serem estudados, dentro estes pontos é interessante ressaltar: estudo complementar de absorção de água com ensaios de

longa duração, estudo complementar dos parâmetros de resistência com a massa específica para valores intermediários entre 20 e 30 kg/m<sup>3</sup> e acima deste, visando obter melhores correlações, verificar de modo qualitativo e quantitativo a degradação química e por U.V. do material EPS por meio de exposição de amostras a condições de degradação (presença de produtos químicos incompatíveis e radiação U.V.) e posterior verificação do decréscimo das propriedades dentre outras possibilidades.

Como visto, um dos pontos relevantes da pesquisa, que não foram abordados foi o estudo da degradação do EPS por hidrocarbonetos e por raios ultravioletas (UV), o que de fato é algo preocupante tendo em vista a aplicação do EPS em aterros para obras viárias e a exposição que este pode sofrer em contato com intempéries.

Ressalta-se que até o momento são poucas as pesquisas sobre o assunto tanto no contexto internacional quanto nacional. No contexto internacional até o momento, a degradação do EPS foi estudada apenas do ponto de vista químico, analisando-se os elementos nos quais o EPS se transforma ao ser degradado, excluindo-se estudos relativos à resistência de tais materiais após a degradação.

Sendo assim, esta pesquisa avaliou diversas propriedades do EPS após a exposição à intempérie e vapor de hidrocarboneto, por meio de ensaios laboratoriais, com o intuito de verificar se a exposição a situações consideradas desfavoráveis à vida útil e bom funcionamento do material interferem na resistência dos mesmo.

## **2 OBJETIVOS**

Avaliar o efeito da degradação do expandido (EPS) por meio de ensaios de laboratório após exposição à intempérie e vapor de gasolina (hidrocarboneto).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais aspectos relacionados ao material poliestireno, bem como o processo de fabricação que envolve sua transformação em poliestireno expandido, suas características, propriedades mecânicas, hidráulicas e o comportamento quando suas características sofrem variação.

Dentre as características, serão abordadas massa específica e durabilidade, em relação às propriedades mecânicas, falar-se-á da compressibilidade, do cisalhamento e da fluência. Quanto às propriedades hidráulicas, enquadram-se aqui a absorção de água e a permeabilidade.

#### 3.1 O Poliestireno Expandido

O poliestireno expandido (EPS) é um material geossintético polimérico espumoso, fabricado em forma de placa ou bloco e usado principalmente por sua leveza e às vezes por suas propriedades isolantes. As aplicações originais como preenchimento leve se deram na Noruega em 1972 e, posteriormente, em toda a Escandinávia (KOERNER, 2016).

Segundo a Associação Brasileira de Poliestireno Expandido (ABRAPEX) (2019), nos últimos 35 anos esse material ganhou uma posição estável na construção civil, não apenas por suas características isolantes, mas também por sua leveza, resistência, facilidade de manuseio e custo competitivo com outros materiais. Sua versatilidade permite ainda conceber peças técnicas para a indústria de automóvel, aeronáutica ou indústria de precisão, como também possibilita a sua utilização na criação de inúmeras soluções para as áreas desportivas, de lazer, *design*, decoração, e até mesmo na agricultura.

O consumo aparente de poliestireno no mercado brasileiro aparece na quinta colocação, com 9% entre os termoplásticos, sendo ultrapassado pelos polietilenos de alta e baixa densidade (42%), polipropileno (22%), policloreto de vinila (17%), polietileno tereftalato (10%) (BNDES, 2002). De 1999 a 2012, o consumo aparente nacional de EPS cresceu 113,5% (ou 6,0% a.a.). No mesmo período, a produção subiu a uma velocidade de 6,8% a.a. (EPS Brasil, 2017).

### 3.1.1 A matéria prima do EPS

O Poliestireno (PS) é produzido quando o monômero de estireno (subproduto da nafta) é polimerizado em cadeias longas num reator com água. Um gás chamado pentano é usado como um agente de expansão para conduzir o poliestireno ao seu estado final de baixo peso e forma celular expandida, originando a espuma de poliestireno, o material bruto da partida para a fabricação de espuma de poliestireno expandido. Durante o processo de produção, o pentano que tem baixa volatilidade é rapidamente decomposto em dióxido de carbono e água (ACEPE, 2019).

Segundo a ABRAPEX (2019), o EPS é um material plástico, na forma de espuma, com micro células fechadas, consiste em até 98% de vazios contendo ar e apenas 2% de poliestireno. Em 1 m<sup>3</sup> de EPS, por exemplo, existem de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar. Ele possui 3 grupos de massa específica aparente: de 13 a 16 kg/m<sup>3</sup>, de 16 a 20 kg/m<sup>3</sup> e de 20 a 25 kg/m<sup>3</sup>. É produzido em duas versões: Classe P, não retardante à chama, e Classe F, retardante à chama. Além disso, os produtos finais de EPS são inodoros, não contaminam o solo, água e ar, são 100% reaproveitáveis e recicláveis e podem voltar à condição de matéria-prima.

Os diversos processos para o reaproveitamento e a reciclagem dos materiais à base de EPS são aplicados conforme a utilização final do produto. Os rejeitos podem ser processados para incorporação na moldagem de novas placas e blocos, para uso como substratos no melhoramento de solo, para drenagens em jardineiras, na aeração de substâncias para melhoria da decomposição, podem ser reutilizados na construção civil ou até gerar energia elétrica ou calorífica por combustão direta (TESSARI, 2006).

### 3.1.2 O processo de fabricação do EPS

Segundo Tessari (2006), o poliestireno que é obtido através da polimerização do estireno, deve ter um alto grau de pureza (maior que 99,6%), pois os contaminantes provenientes do seu processo de produção, como o etilbenzeno, cumeno e xilenos, afetam o peso molecular do poliestireno. Assim, é possível garantir as propriedades adequadas de resistência do material.

Horvath (1994) definiu este processo em apenas duas fases, pré-expansão e moldagem. Entretanto, a Associação Industrial do Poliestireno Expandido (ACEPE)

(2019), define o processo em mais etapas, são elas; pré-expansão, armazenamento para estabilização, expansão e moldagem. Fases estas que serão descritas a seguir:

Nessa primeira fase do processo de fabricação do EPS o polímero de poliestireno é pré-aquecido em máquinas especiais chamadas de pré-expansores, com vapor de água e pentano, a temperaturas que variam entre 80° e 100°C. O calor faz com que o poliestireno amoleça e o pentano vaporize. A expansão do pentano dentro do poliestireno produz esferas, cada uma aproximadamente 50 vezes maior em volume em relação ao tamanho original, com esfera contendo numerosas células fechadas. Após este processo, as esferas aguardam algumas horas de modo a serem arrefecidas.

Após o resfriamento, cria-se um vácuo no interior dos grânulos, que é necessário ser compensado com a penetração de ar utilizando o artifício da difusão. Este processo ocorre durante o repouso do material pré-expandido em silos ventilados. Ao mesmo tempo os grânulos são secos.

Posteriormente, os grânulos são introduzidos em moldes onde são novamente aquecidos com vapor de água. Vapor este que é o responsável pela união dos grânulos, como uma solda térmica, criando assim o formato desejado.

### **3.1.3 Massa específica**

Este parâmetro é o principal índice que rege a maioria das propriedades do material. Tais como: resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, resistência à tração, resistência à flexão, rigidez e comportamento à fluência (ELRAGI, 2006). Embora Sheeley (2000), tenha determinado que a massa específica tem efeito insignificante na resistência de interface EPS/EPS.

O custo de fabricação do EPS é considerado diretamente proporcional à sua massa específica. Propriedades não mecânicas, como os coeficientes de condutividade térmica, também são dependentes da massa específica (ELRAGI, 2006).

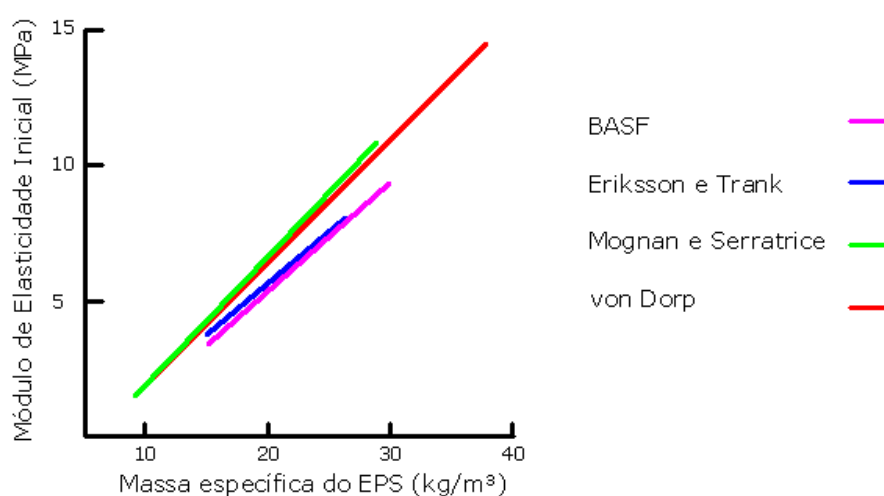
O poliestireno expandido é considerado um material leve e assim sendo apresenta valores baixos de massa específica que podem variar de acordo com processo de fabricação.

No mercado podem-se encontrar valores de massa específica que variam aproximadamente entre 10 a 100 kg/m<sup>3</sup>. Porém, segundo Horvath (1994) no dia a dia se

encontram com maior frequência valores de massa específica para os blocos de EPS variando de 15 a 40 kg/m<sup>3</sup>.

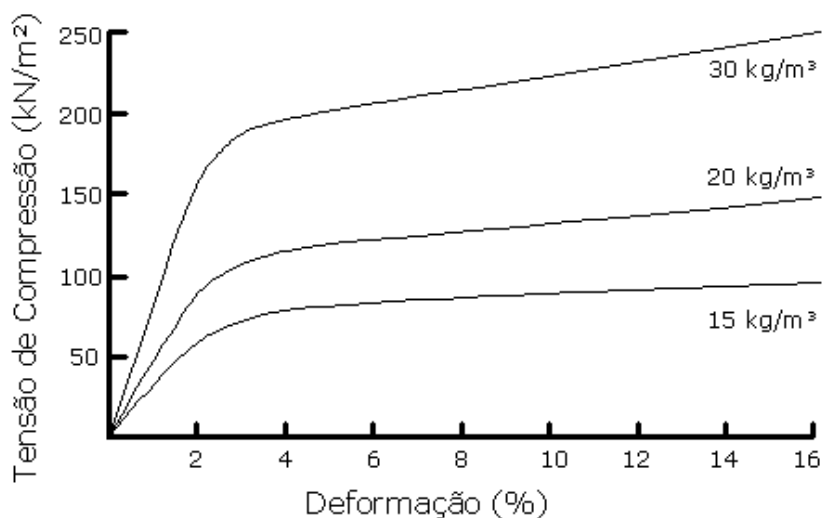
Beju e Mandal (2017) afirmam com base em resultados de ensaios de compressão, que a massa específica é um parâmetro significativo que afeta as propriedades mecânicas do EPS, sendo que quanto maior sua massa específica, maior será sua resistência, algo que também foi observado por Horvath (1994) ao analisar vários ensaios, conforme ilustrado na figura 1. Outras pesquisas também corroboram essas afirmações: Marradi; Pinori e Betti (2012) e Knauf Isopor (2019) (figura 2).

Figura 1 – Correlação entre Módulo de Elasticidade e massa específica



Fonte: modificado de Horvath (1994)

Figura 2 - Diagrama de tensão x deformação para várias massas específicas



Fonte: modificado de Knauf Isopor (2019)



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 e térmicas. Devido a esta característica, é possível obter as mais diversas correlações entre massa específica e as propriedades anteriormente mencionadas, importantes para a utilização deste polímero não apenas na área geotécnica, como em outras áreas da construção e indústria (HORVATH, 2008; AVESANI NETO 2008).

### **3.1.4 Durabilidade**

Segundo a Basf (1990) o bloco de geoexpandido de EPS é um geossintético de grande robustez, livre de danos físicos significativos e reações químicas, se comparados com os outros tipos de geossintéticos. É um plástico inerte, não-biodegradável, não dissolvível que não possui valores nutritivos para abrigar microorganismos e outros animais e além disso não é quimicamente afetado no contato com o solo e a água. Quando exposto à radiação ultravioleta (UV) por um período prolongado de tempo, a superfície do EPS ficará amarela e um pouco frágil. Vale ressaltar que EPS derrete quando exposto a temperaturas superiores a aproximadamente 150° C e é inflamável se existir uma fonte de ignição. Embora, como visto no item 3.1.1, existe uma classe de EPS que recebe aditivos que o tornam um material retardante à chamas.

Apesar de não possuir valor nutricional, não é resistente ao ataque de animais, a habitação por insetos pode ser um problema para o EPS. Pois eles podem passar através dos blocos para chegar à comida ou para estabelecer uma casa confortável. Alguns animais marinhos também podem atacar poliestireno expandido (ELRAGI, 2006).

Ainda segundo Elragi (2006) ataque químico geralmente resulta no amolecimento e craqueamento dos plásticos. Poliestireno expandido tem a mesma resistência a reagentes químicos como poliestireno de uso geral e a maioria dos ácidos, no entanto ácidos com forte poder oxidativo fazem as paredes celulares afinarem e a grande superfície exposta de poliestireno expandido o torna sensível ao ataque por solventes orgânicos, ou seja, derivados petrolíferos, tais como óleos, gasolina e diesel. Algo que também foi abordado por Horvath (1994), que ressaltou que, a superfície do EPS pode ser facilmente protegida por uma geomembrana ou outro material.

Em pesquisa feita por Frydenlund (1996) pode ser justo concluir que não são esperados efeitos de deterioração dos taludes de EPS colocados no solo para um ciclo de

vida normal de 100 anos. Isto deve ser válido desde que as forças de flutuação resultantes dos níveis de água flutuantes sejam devidamente contabilizadas, os blocos estejam devidamente protegidos contra derramamentos acidentais de agentes de dissolução e o nível de tensão aplicado de cargas mortas seja mantido abaixo de 30-50% da resistência do material. O desempenho observado dos muitos projetos sobre estes princípios em todo o mundo até agora se apoiam nesta conclusão.

Por se tratar de um polímero, não se pode saber ao certo o tempo de vida útil do material. No entanto, as propriedades do EPS impõem a sua correta aplicação para que seja garantido um desempenho adequado ao longo do tempo (ACEPE, 2019).

### **3.1.5 Compatibilidade com outros materiais**

O EPS é compatível com a maioria dos materiais utilizados na construção. No entanto, ele é sensível a alguns materiais que contenham solventes compostos por hidrocarbonetos. Nestes casos deve-se evitar o contato ou exposição a vapores destes materiais. A estrutura celular é danificada pelos solventes sendo este processo acelerado com temperaturas elevadas (ACEPE 2019).

### **3.1.6 Motivos da Utilização do Geoexpandido**

De acordo com a ABRAPEX (2019), o EPS conquista cada vez mais espaço na área da construção civil e isso se dá pelo fato de este oferecer diversas vantagens na sua utilização, a saber:

- Baixa condutibilidade térmica; devido à estrutura de células fechadas que possui, contendo ar, que inibe a passagem do frio ou calor.
- Baixo peso específico; com massas específicas entre 10 e 40 kg/m<sup>3</sup>, que permitem trabalhos de construção seguros e leves.
- Resistência mecânica; por serem leves, os produtos de EPS possuem boas propriedades mecânicas (resistência à compressão, força de cisalhamento, força de tração, resistência à flexão, rigidez e comportamento de fluência).
- Baixa absorção de água; isto ajuda na manutenção das propriedades térmicas e mecânicas que seriam afetadas pela umidade, por isso, o EPS é um material isolante

com melhor desempenho que materiais que não têm o mesmo comportamento em relação à umidade.

- Facilidade de manipulação e instalação; o EPS pode ser trabalhado com as ferramentas normais, e garante acabamento e ajustes perfeitos. Ao mesmo tempo, seu pouco peso permite que seja fácil transportar materiais ao local de trabalho e garante economia na instalação.
- Resistência química; os materiais de Poliestireno Expandido são perfeitamente compatíveis com os usados na indústria de construção, incluindo cimentos, estuques, água salgada ou doce. Poucos são os materiais que apresentam uma incompatibilidade.
- É muito versátil; pois pode vir em muitos formatos e tamanhos que atendem às necessidades específicas da construção.
- Resistência ao envelhecimento; todas as características acima permanecem ao longo da vida útil do material e esta é igual ao tempo em que durar o prédio onde foram aplicados os produtos. O EPS não é alterado por agentes externos, nem por fungos ou parasitas que não encontrarão qualquer valor nutritivo no material.

Além disso, segundo Avesani Neto (2008) e Horvath (2008), apesar de o geoexpandido, como EPS, ter um custo mais expressivo, se comparado ao custo do solo, a experiência mostra que, no custo final, o uso de geoexpandido é mais atrativo, isto se deve ao fato da relação entre peso específico de ambos os materiais ser apenas cerca de 1%, podendo ser este um condicionante de projeto.

No trabalho realizado por Tessari (2006), esta concluiu que o percentual de empresas que apresentaram vantagens no uso de EPS foi consideravelmente superior àquelas que consideraram alguma desvantagem, comprovando a boa aceitação do material para uso na construção civil. Observa-se novamente que as vantagens apontadas com mais veemência pelas construtoras, são aquelas que exploram as propriedades de baixa densidade e isolamento térmico, inerentes ao material.

Para Frydenlund (1996) o EPS além de reduzir cargas verticais, inclui em suas vantagens cargas horizontais reduzidas, desenhos simplificados, fundações colocadas diretamente em blocos de EPS e maior velocidade e facilidade de execução das atividades de construção.

### 3.1.7 Aplicações do Geoexpandido

O EPS possui algumas aplicações podendo ser encontrado para os mais diversos fins na construção civil, nas embalagens industriais em eletrodomésticos e produtos eletrônicos ou, embalagens alimentares, em peças técnicas para a indústria automóvel, aeronáutica ou indústria de precisão, como também possibilita a sua utilização na criação de inúmeras soluções para as áreas desportivas, de lazer, *design* e decoração, e muito mais.

Na engenharia civil o EPS já possui certo tempo de experiência. As aplicações são bem variadas e podemos encontrá-lo em todas as áreas da construção. A ABRAPEX (2019) destaca algumas dessas aplicações: isolamento térmico em lajes, telhados, dutos de ar, câmaras frigoríficas, concreto leve, forros isolantes, isolamento acústico, pisos flutuantes, juntas de dilatação, fundação para estradas e lajes nervuradas.

Quanto às suas dimensões para utilização como geossintético, Koerner (2016) diz que os blocos de EPS são usados em vários tamanhos, porém as seções transversais de 1,25 m de largura e 0,5 a 1,0 m de altura são as mais utilizadas. Os comprimentos também variam, de 2,0 a 3,0 m.. O volume é o fator limitante no que se refere ao manuseio e colocação em campo. Um bloco de isopor de  $1,25 \times 0,5 \times 2,5$  m com  $15 \text{ kg/m}^3$  de densidade pesa apenas 23 kg. Esses blocos são presos uns aos outros por placas de conexão de aço galvanizado.

O autor ainda diz que as principais utilizações do material são para alívio de solos compressíveis, solos com variação na capacidade de suporte, solos cársticos, encontros de pontes, atrás de muros de arrimo, acima de tubulações enterradas e amortecimento de vibrações em fundações. Algo que também foi descrito por Horvath (1997).

Uma das características mais significativas deste geoexpandido, com vasto potencial de aplicação em todo o mundo e em uma ampla variedade de condições de aterramento, é a redução das pressões laterais nas estruturas de retenção de terra (HORVATH, 2008).

Apesar disto, segundo Avesani Neto (2008) a utilização na área geotécnica não está ainda consolidada, embora possa atender as aplicações com vantagens tecnológicas e econômicas. Este diz ainda que atualmente o maior emprego do EPS na geotecnia se encontra em aterros sobre solos moles, principalmente na construção de estradas sobre rodovias, devido às suas características técnicas e à sua capacidade de permitir a

agilidade da obra, reduzindo prazos e custos. Sua utilização também se mostra vantajosa em outros tipos de aplicações, como encontros de pontes, aterros em encostas, flutuadores, elemento de alívio de empuxos em muros de arrimos e taludes, fundações e proteção de galerias e tubulações enterradas.

Horvath (1994) fez uma classificação das aplicações de EPS segundo sua função, preenchimento leve, inclusão compressível, isolamento térmico e amortecimento de onda de pequena amplitude. Horvath (1997) adiciona ainda mais duas funções: drenagem e estrutural. Outra maneira de classificar as aplicações é por propriedades de engenharia, densidade, compressibilidade, resistência térmica, amortecimento de vibrações e auto-sustentação. Estas podem resolver muitos problemas importantes de engenharia, como problemas de assentamento, de estabilidade de inclinação e de capacidade de suporte.

Como dito anteriormente, o EPS pode ser utilizado em fundações de rodovias, de modo a diminuir o peso próprio da obra e espraizar as cargas, diminuindo a tensão que chega no subleito. Tessari (2006) descreve o procedimento de realização deste serviço. Deve-se colocar, sobre o solo uma camada de areia de modo a nivelar o perfil para receber os blocos de EPS, os quais são colocados em juntas de amarração de modo semelhante ao assentamento de uma parede de tijolos, formando um tronco de pirâmide. Após serem dispostos em camadas, os blocos são cobertos com uma geomembrana para uma proteção contra possíveis incidentes de derramamentos de solventes que possam causar sua degradação. Em seguida, a base da pavimentação pode ser preparada colocando-se solo nas adjacências para o plantio de vegetação e construindo-se drenos no pé do aterro em locais alagadiços a fim de se evitar a ação de empuxo nos blocos (figuras 3 e 4).

Figura 3 – Encontro de viaduto em Jundiaí/SP



Fonte: PET Eng. Civil - UFSC (2019)

Figura 4 – Encontro de ponte na BR 101, divisa PB e PE

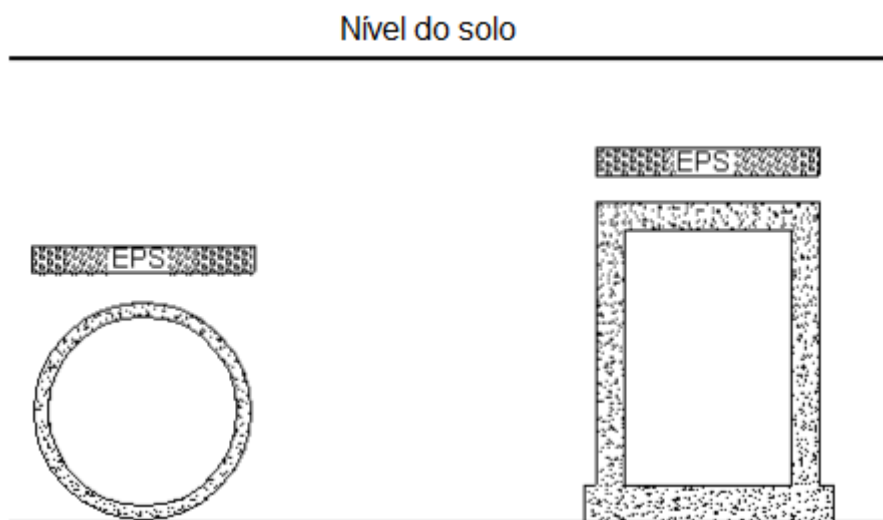


Fonte: Knauf Isopor (2019)

No Japão, um aterro em uma encosta íngreme foi construído usando 1834 metros cúbicos de EPS. O EPS foi utilizado numa secção da estrada com aproximadamente 104 m de comprimento (SUZUKI et al., 1996). Essa solução de uso do EPS foi tomada já que em estruturas muito íngremes é necessária à mudança da inclinação e a solução de clavagem de solo ou qualquer outra do tipo poderia afetar a geometria da encosta ou o relevo circundante, tornando o projeto não viável. O custo total dos esforços de estabilização e o tempo de construção foram reduzidos como resultado da adoção do EPS.

Sergundo Vaslestad, (1990) e Elragi, (2006) a inclusão de EPS pode ser utilizada para reduzir o carregamento acima de tubulações, algo que foi constatado por meio de ensaios, por Lingwall; Bartlett (2014). A figura 5 mostra uma tubulação e uma duela de concreto com blocos de EPS acima das peças.

Figura 5 – Inclusão de EPS acima de tubo e aduela de concreto

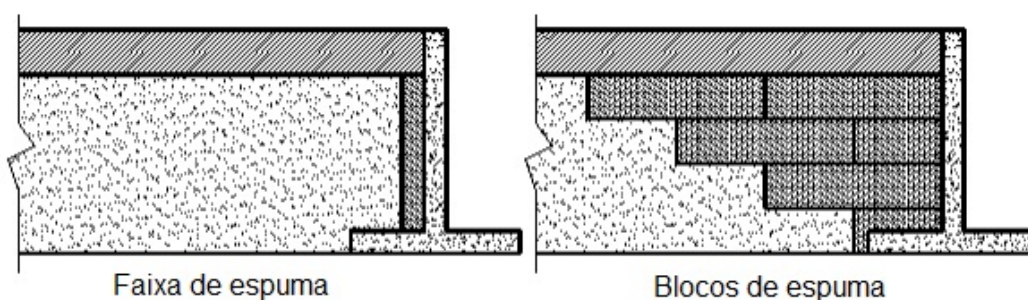


Fonte: Elragi (2006)

Outra aplicação citada por Avesani Neto (2008) é a utilização do EPS nas cabeceiras de pontes, assim como em taludes e encostas. Nesse caso o geoexpandido substitui com inúmeras vantagens os aterros convencionais de solo. Entre elas temos o fato de não criar esforços horizontais no tabuleiro da ponte ou na face do muro de contenção de um talude, facilitando o cálculo e reduzindo o dimensionamento da estrutura para empuxos laterais. Além disso, não cede com o tempo, mantendo sempre o nível do aterro, evitando degraus, tão frequentes nestes pontos e recalques não desejados em faces de muros de arrimo.

Em estruturas de arrimo o EPS também pode ser utilizado para reduzir a pressão que o solo faz sobre o muro ou para ajudar no Sistema de drenagem. O EPS pode ser colocado de duas maneiras principais como se observa na figura 6.

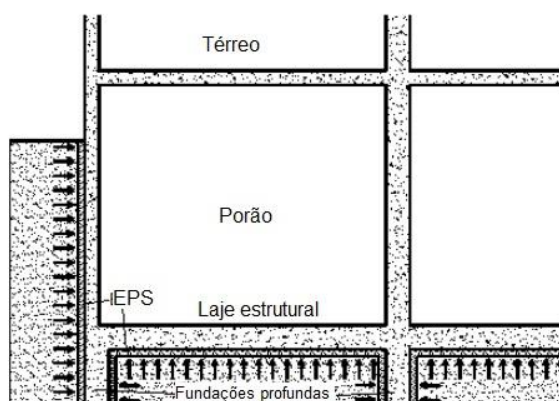
Figura 6 – Disposição de EPS atrás de muros de arrimo



Fonte: Elragi (2006)

Outro exemplo de utilização do EPS é a sua aplicação em solos expansivos, aqueles que aumentam de volume quando em contato com a água. O geoexpandido atua como uma inclusão compressível adjacente a um elemento estrutural, evitando contato direto com o solo (Horvath, 1997). Como exemplo, cita-se a inclusão do EPS nas laterais de paredes e abaixo da laje estrutural servindo também como uma forma para a laje, conforme ilustrado na figura 7.

Figura 7 - Inclusão de EPS na lateral de paredes e abaixo de lajes



Fonte: Elragi (2006)

### 3.2 Propriedades de compressibilidade do EPS

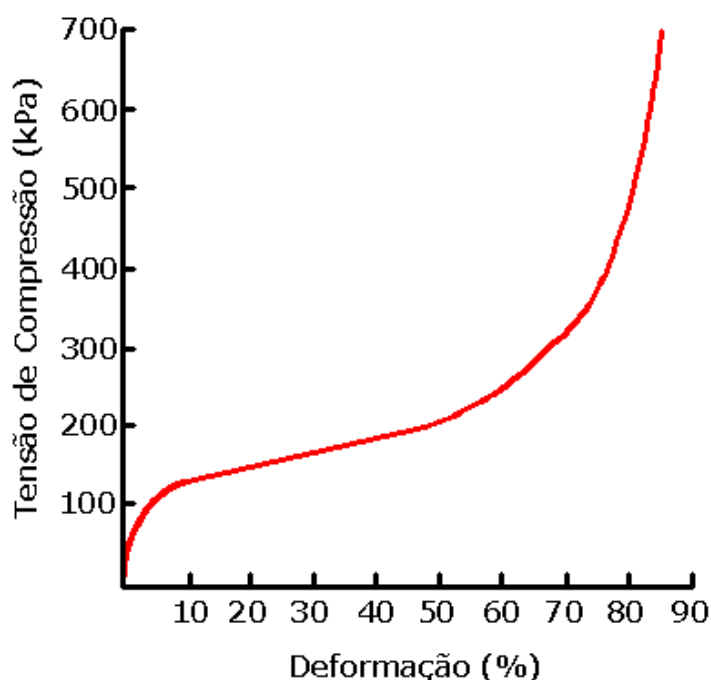
O comportamento do EPS na compressão simples é geralmente determinado em testes em amostras cúbicas de 50 mm de lado. A taxa de aplicação de deformação é relativamente rápida, com valores variando entre 1 a 20% por minuto, sendo o valor de 10% por minuto o mais usual, sobre condições climáticas controladas de 23° C e 50% de umidade relativa (HORVATH, 1994).

Até 2% de deformação, o EPS apresenta um comportamento linear, entretanto para determinar o valor da resistência à compressão, os ensaios são realizados para valores de deformação que se situam entre 5 e 10%, sendo este último o mais comum, algo que também foi relatado por Duskov (1998). Após este valor de deformação, inicia-se um novo patamar de deformação e o comportamento do material é alterado, conforme mostra a figura 8 seguinte.

Vale ressaltar aqui que, os projetos geotécnicos levam em consideração para fins de dimensionamento, uma deformação do EPS em torno de 1%, pois na faixa de 10% de deformação, o material já atingiu o regime plástico.



Figura 8 – Comportamento do EPS na compressão axial



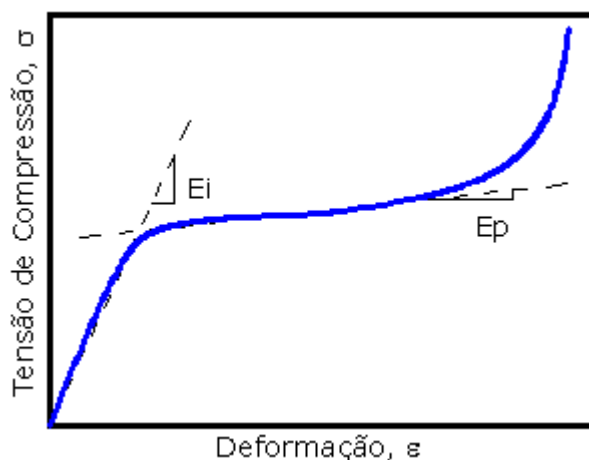
Fonte: modificado de Horvath (1994)

Aumentando-se a carga de compressão, superando o limite da elasticidade do material, verifica-se um trecho plástico na curva tensão versus deformação, no qual as deformações impostas ao corpo de prova se tornam permanentes, porém, sem ruptura.

Resultados de testes de compressão uniaxial cíclicos por deformação controlada indicaram um comportamento elastoplástico do material EPS para deformações com amplitudes de até 1,0%. Amplitudes acima deste limite podem resultar em um comportamento visco-elastoplástico, comportamento caracterizado pela ocorrência de deformações plásticas permanentes que ocorrem ao longo do tempo (TRANDAFIR; BARTLETT; LINGWALL, 2010).

Outra definição do seu comportamento à compressão foi dada por Ossa e Romo (2011), os autores definiram que, o EPS tem um comportamento elástico-linear a baixas tensões, o que pode ser traduzido por uma reta tangente que gera um módulo de elasticidade inicial  $E_i$ , após isto uma tensão de escoamento gera uma segunda zona, com menor inclinação e que apresenta deformações plásticas, caracterizada pelo módulo de plasticidade  $E_p$ . Na terceira fase, a amostra está mais deformada, a estrutura interna do EPS é dramaticamente modificada passando de forma celular para uma pilha de membranas, levando a um estágio de densificação onde grandes tensões axiais e mudanças volumétricas são desenvolvidas, algo que pode ser observado na figura 9.

Figura 9 – Diferentes Módulos de Elasticidade do EPS



Fonte: modificado de Ossa e Romo (2009)

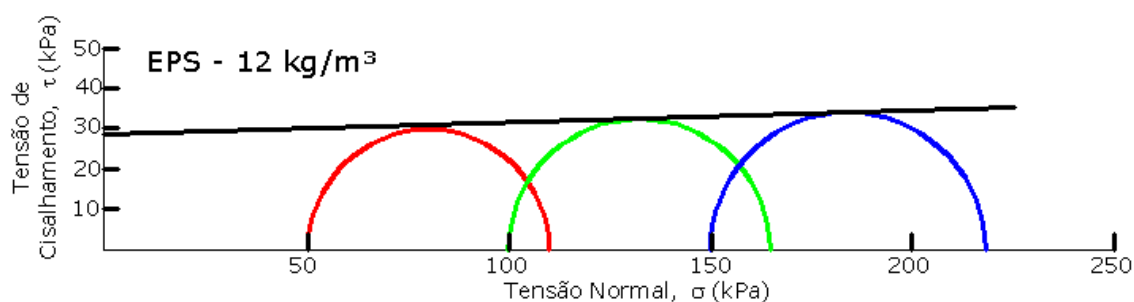
No que tange à mistura de grânulos de EPS ao solo, pode-se citar o trabalho de Shizari; Haydarian; Naseshi (2018), que realizaram ensaios de compressão não confinada de solo argiloso com uma mistura de 12,8% em massa de grânulos de EPS, variando o seu diâmetro, os ensaios demonstraram que, ao passo que se aumenta a porcentagem de substituição do solo, diminui-se a sua coesão e a resistência à compressão axial. Os autores ainda fizeram ensaios de cisalhamento direto com uma mistura de areia e grânulos de EPS, a 0,5% de substituição em massa e constatou-se que a inclusão do geoexpandido causou uma diminuição do ângulo de atrito interno, devido à substituição dos grãos angulares de areia pelos grânulos arredondados de EPS, diminuição da dilatação, devido ao fato de o EPS ter uma menor rigidez que a areia e aumento da coesão aparente.

### 3.2.1 Comportamento triaxial

No que se refere ao comportamento frente a ensaios triaxiais, Chun et al, (2004) desenvolveram um modelo constitutivo utilizando blocos de EPS, sob carga a curto prazo. As amostras tinham massa específica de 15, 20, 25 e 30 kg/m<sup>3</sup> e foram ensaiados sob tensões confinantes de 0, 20, 40 e 60 kPa. Foi averiguado que o material tem um comportamento não-linear de tensão-deformação quando solicitado triaxialmente. Verificou-se ainda que quanto maior a massa específica do EPS, maior a resistência. Além disso, à medida que a tensão de confinamento aumenta, a resistência também aumenta.

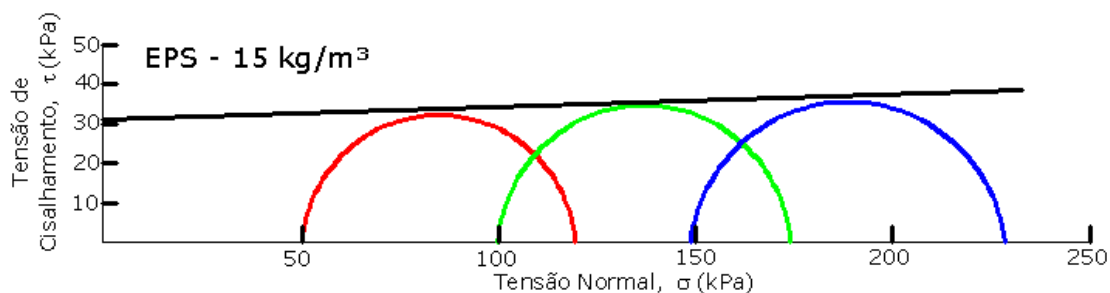
Beju e Mandal (2017) realizaram ensaios do tipo UU em amostras cilíndricas de 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura, com massas específicas de 12, 15 e 20 kg/m<sup>3</sup>, as tensões confinantes aplicadas fora de 50, 100 e 150 kPa. O estudo mostrou que o comportamento do EPS frente a solicitações triaxiais é semelhante para as diferentes massas específicas. A coesão é a grande responsável pela resistência ao cisalhamento e é diretamente proporcional à massa específica, apesar de pouco variar. O ângulo de atrito interno pouco foi alterado para as diferentes massas específicas, sofrendo apenas leves incrementos em seus valores, algo que pode ser visto nas figuras 10, 11 e 12.

Figura 10 – Ensaio triaxial para amostra de 12 kg/m<sup>3</sup> de massa específica



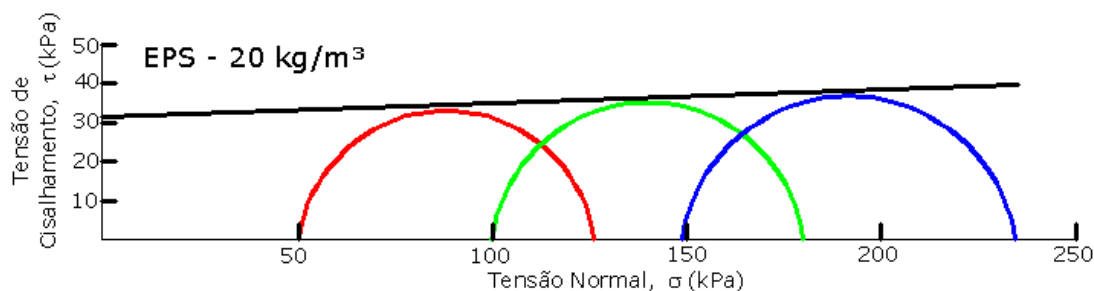
Fonte: modificado de Beju e Mandal (2017)

Figura 11 – Ensaio triaxial para amostra de 15 kg/m<sup>3</sup> de massa específica



Fonte: modificado de Beju e Mandal (2017)

Figura 12 – Ensaio triaxial para amostra de 20 kg/m<sup>3</sup> de massa específica



Fonte: modificado de Beju e Mandal (2017)

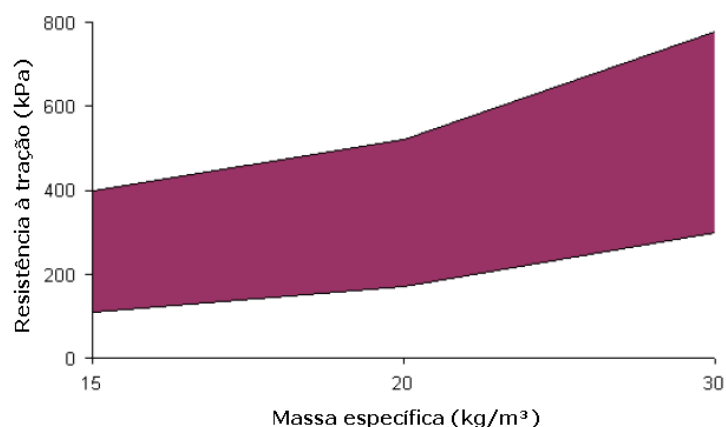
Algo interessante a se mencionar, é que, tanto o trabalho de Chun et. al. (2004), quanto o trabalho de Beju e Mandal (2017) possibilitam enxergar que quanto maior a tensão confinante, maior será o módulo de elasticidade inicial.

### 3.2.2 Propriedades de tração e flexão

Os testes de resistência à flexão são amplamente utilizados como teste de controle de qualidade em fábricas de EPS. A tensão máxima é calculada assumindo que o material é elástico linear até a falha, embora esta não seja uma suposição exata (ELRAGI, 2006).

Vale ressaltar ainda, que, segundo Horvath, 1994 apud Elragi 2006, a resistência à tração do EPS pode ser uma indicação da qualidade da fusão dos seus grânulos. Conforme a figura 13, a resistência à tração do EPS também aumenta à medida que a massa específica aumenta.

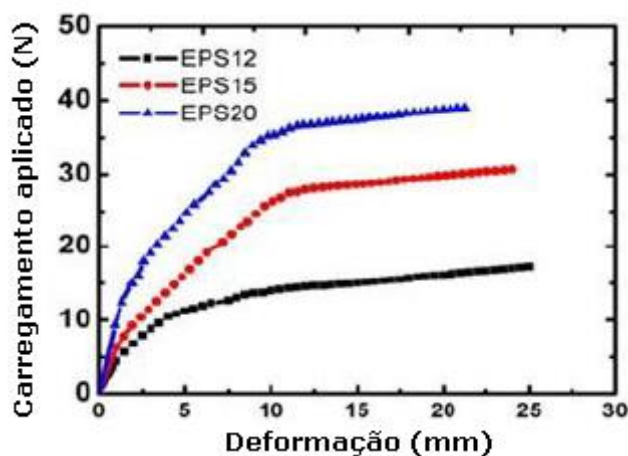
Figura 13 – Relação entre resistência à tração e massa específica



Fonte: modificado de Basf (1997 apud ELRAGI, 2006)

Beju e Mandal (2017) realizaram ensaios a flexão para amostras de 300 x 100 x 25 mm, com uma taxa de carregamento de 4,2 mm/min. Os corpos de prova tinham massa específica de 12, 15 e 20 kg/m<sup>3</sup> e foram carregados até a ruptura. Foi constatado que a resistência à flexão é maior quanto maior for a massa específica e que os corpos de prova com maior massa específica, sofreram ruptura com menores taxas de deformação que aqueles com massa específica mais baixa. Isso se deve à maior rigidez dos corpos de prova com maior densidade. Os resultados podem ser observados na figura 14.

Figura 14 – Valores de resistência à tração para diferentes massas específicas



Fonte: Beju e Mandal (2017)

### 3.2.3 Corpos de prova de EPS

Há basicamente dois tipos de corpos de provas de EPS ensaiados com mais frequência, descritos na literatura. O primeiro é o tipo cilíndrico com relação altura/diâmetro de cerca de 2:1 ( $h = 300$  mm e  $d = 150$  mm, por exemplo). Este tipo de amostra foi introduzido inicialmente possivelmente para se adaptar melhor aos equipamentos dos laboratórios de geotecnia. O segundo tipo é o cúbico, usualmente com 50 mm de lado, padronizado pela norma ASTM D1621 – 16.

Estudos mostram que o módulo de elasticidade inicial e o limite de deformação elástica são menores em amostras cilíndricas se comparados às cúbicas. É recomendável a utilização de amostras cúbicas devido à facilidade de obtenção dos corpos de prova (STARK et al., 2004).

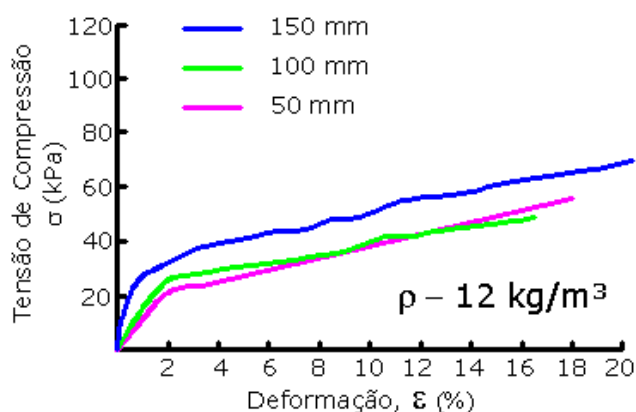
Ensaio realizado por Bueno (2005) com amostras cilíndricas com proporções altura/diâmetro de 3:1 ( $h = 150$  mm e  $d = 50$  mm) não atingiram a ruptura segundo os padrões clássicos, mostrando uma ruptura do material que se assemelhou a uma instabilidade lateral (flambagem).

Em geral, com o aumento das dimensões das amostras, há um acréscimo no módulo de elasticidade inicial. Resultados de ensaios de compressão com amostras cúbicas de 400 mm e 50 mm de lado mostraram que as maiores eram aproximadamente 50% mais rígidas do que as menores. Entretanto, estes resultados não foram conclusivos, necessitando de um estudo mais detalhado (STARK et al., 2004).

Beju e Mandal (2016) ao realizarem ensaios de fluência, para amostras cúbicas com 50 mm e 100 mm de aresta, verificaram que as amostras menores apresentaram valores mais pronunciados de fluência e que a fluência diminuía à medida que a massa específica aumentava. Observou-se também que a qualidade e durabilidade do EPS dependem de sua densidade porque o módulo de elasticidade diminui com a diminuição da massa específica.

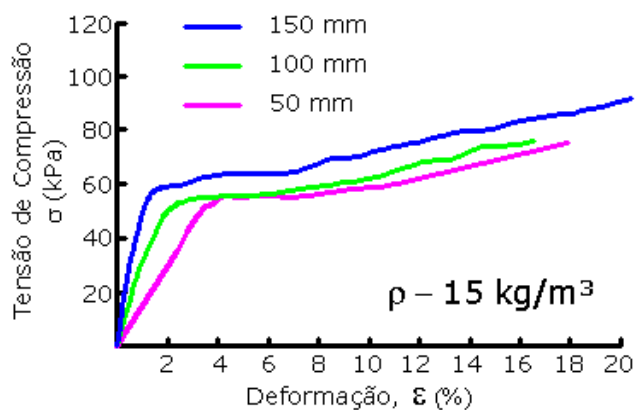
Beju e Mandal (2017) realizaram ensaios de compressão axial para corpos de provas cúbicos com 50, 100 e 150 mm de aresta para massas específicas de 12, 15 e 20 kg/m<sup>3</sup>. As amostras foram comprimidas até 15% de suas espessuras originais, a uma taxa de deformação constante de 2,5 mm/min. Isto possibilitou determinar que o módulo de elasticidade inicial tem uma relação proporcional com o tamanho da amostras, figuras 15, 16 e 17.

Figura 15 – Ensaio de compressão para amostras de massa específica de 12 kg/m<sup>3</sup>



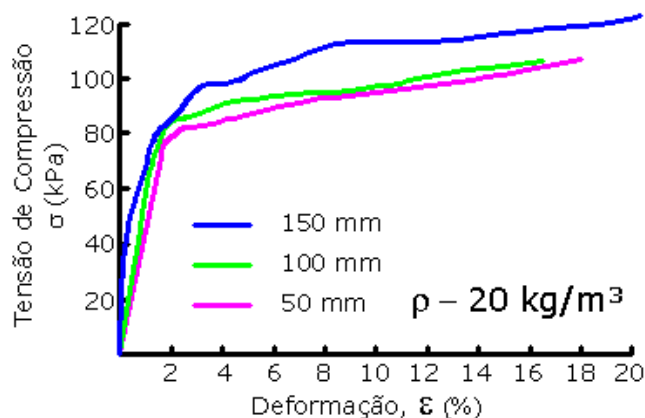
Fonte: modificado de Beju e Mandal (2017)

Figura 16 – Ensaio de compressão para amostras de massa específica de 15 kg/m<sup>3</sup>



Fonte: modificado de Beju e Mandal (2017)

Figura 17 – Ensaio de compressão para amostras de massa específica de 20 kg/m<sup>3</sup>



Fonte: modificado de Beju e Mandal (2017)

Ao se analisar os relatos da literatura apresentada neste item, fica evidente que não é indicado tomar como base valores de laboratório para se dimensionar obras de grandes dimensões, pois a discrepância entre o volume dos corpos de prova e blocos utilizados em obras é exorbitante, utilizar valores de laboratório, apesar de findar em um dimensionamento em prol da segurança, pode em alguns casos afetar o custo/benefício do material.

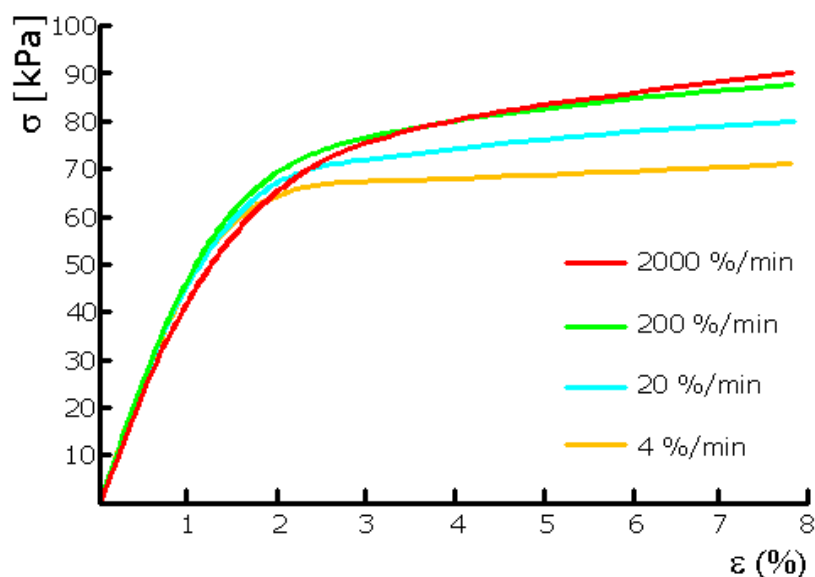
### 3.2.4 Taxa de aplicação de carga

Duskov (1998) realizou ensaios de compressão em amostras cilíndricas de EPS com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro. Os ensaios foram realizados com uma deformação máxima de 10%, com o objetivo de controlar a exposição das amostras ao estado de plastificação, que começa a ocorrer após a deformação de aproximadamente 1,0%.

Os ensaios realizados pelo autor foram efetuados em quatro velocidades de deformação de 0,2, 1,0, 10 e 100 mm/s, que correspondem a valores de taxa de deformação de 4, 20, 200 e 2000%/min, respectivamente.

Os resultados dos ensaios efetuados com amostras de massa específica de 15 kg/m<sup>3</sup> para as quatro diferentes velocidades de ensaios estão mostrados na figura 18.

Figura 18 – Ensaio de compressão axial à diferentes velocidades



Fonte: modificado de Duskov (1998)

A comparação das curvas mostra que a velocidade de ensaio exerce uma pequena influência no comportamento do material seco para o trecho elástico e uma influência mais significativa para os valores da resistência à compressão, nas deformações próximas a 10%, sendo que a resistência é proporcional à deformação.

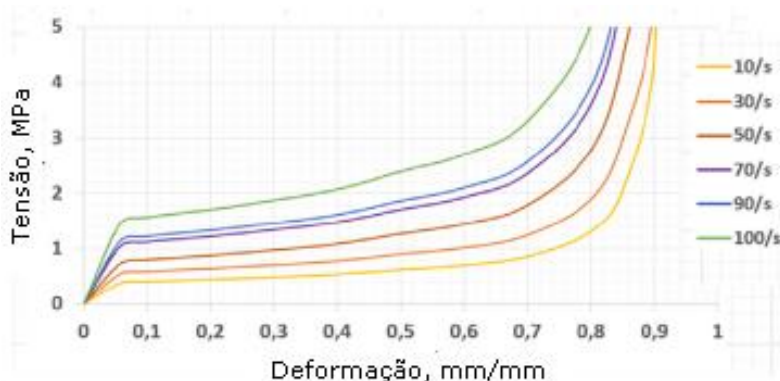
Para o autor, a perda de resistência das amostras ocorre de forma mais sensível a partir da deformação de 1%, na qual a plastificação da estrutura celular do material EPS se torna mais significativa. Com a plastificação da amostra, há o rompimento da estrutura celular, fazendo com que o ar contido nestes vazios, que auxilia na resistência à deformação, comece a escapar pelas fendas geradas na plastificação, oferecendo uma menor resistência.

Entretanto, Stark et al. (2004) realizaram estudos que mostraram que a taxa de aplicação de carga no ensaio de compressão simples não tem um efeito significativo no comportamento do EPS, sendo apenas perceptível sob reduzidos valores de deformação.

Krundaeva et al. (2016) realizaram ensaios de compressão a diferentes taxas de deformação (10mm/s, 30mm/s, 50mm/s, 70mm/s, 90mm/s, 100mm/s) e concluíram que as diferentes taxas pouco afetaram os resultados obtidos; apenas geraram curvas tensão x deformação mais verticais para os casos de maior velocidade de aplicação da carga, como pode-se observar na figura 19.



Figura 19 – Ensaio de compressão axial para diferentes velocidades



Fonte: modificado de Krundaeva et al. (2016)

### 3.3 Comportamento do EPS frente ao Cisalhamento

Segundo Horvath (2001), os blocos de EPS podem estar sujeitos à resistência ao cisalhamento interna. De acordo com STARK et al. (2004), ensaios de cisalhamento interno da amostra não são frequentes, pois são largamente substituídos por ensaios de compressão simples.

Ensaio de cisalhamento direto, feitos em areia, com até 0,5% de porcentagem de substituição de pérolas de EPS, variando seu diâmetro, indicaram que à medida que se aumenta a substituição, diminui-se a dilatação do conjunto durante o ensaio além de ocorrer um decaimento da resistência ao cisalhamento e do ângulo de atrito. Entretanto, há aumento da coesão (SHIRAZI; HAYDARIAN; NASEHI, 2018).

#### 3.3.1 Resistência ao cisalhamento de interface

O atrito de interface entre os blocos de EPS constitui um importante parâmetro de projeto na verificação das estabilidades externas e internas de obras sob cargas horizontais, como a ação do vento, e sobrecargas acidentais. Portanto, a determinação da resistência desta interface, e de outras interfaces (tais como EPS – solo) é um parâmetro importante de projeto.

O atrito de interface entre duas peças de EPS tem sido estudado por alguns pesquisadores, porém, a grande variabilidade das condições empregadas (tamanho e forma de preparação dos corpos de prova e taxa de carregamento) impedem uma

avaliação mais aprofundada. O método usual para a determinação deste atrito de interface EPS/EPS é aquele prescrito pela norma ASTM D 5321-17, utilizada na determinação da resistência ao cisalhamento direto de solos e outros geossintéticos (STARK et al., 2004).

Segundo Horvath (2001), baseado em estudos existentes da força de cisalhamento do contato entre amostras de EPS, uma equação de resistência pode ser definida das condições clássicas de Mohr – Coulomb.

Embora variações das condições de ensaio para a determinação da resistência ao cisalhamento (dimensões das amostras, taxa de aplicação da deformação, rugosidade das superfícies) sejam frequentes, a variação do coeficiente de atrito e do ângulo de atrito obtidos não é elevada. Os valores encontrados para o coeficiente de atrito situam-se entre 0,5 e 0,7, sendo o valor de 0,64 o mais frequente obtido de estudos. Para o ângulo de atrito, valores entre 27 e 32° têm sido determinados. Nos estudos, não se verificou uma interdependência considerável entre o ângulo de atrito e a massa específica do EPS, pois o atrito ocorre na interface das amostras (STARK et al., 2004).

Xenaki e Athanasopoulos (2001) realizaram ensaios de cisalhamento direto com amostras de 10 e 20 kg/m<sup>3</sup> de EPS e três tipos de areia diferentes para determinar a resistência ao cisalhamento de interface entre areia e EPS. Resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento decai quando comparada com o gráfico  $\tau \times \sigma$  das areias que por sua vez tem comportamento linear; já o comportamento do conjunto areia-EPS é não linear. O número de partículas de areia em contato com o EPS e o grau e extensão da penetração de partículas de areia no material do *geofóam*, são os conceitos fundamentais deste conjunto e dependem da tensão normal da interface, da densidade do *geofóam*, do tamanho e forma das partículas de areia e do índice de vazios de areia. Ressaltando-se que a resistência de interface foi maior para os conjuntos que utilizaram EPS com 20 kg/m<sup>3</sup> de massa específica.

Sheeley (2000) fez um estudo abrangente do comportamento de cisalhamento da interface do *geofóam* para amostras de diferentes tamanhos. Houve diferença entre as forças de interface úmidas e secas na faixa de tensões normais usadas na prática e para a exposição de curto prazo à água.

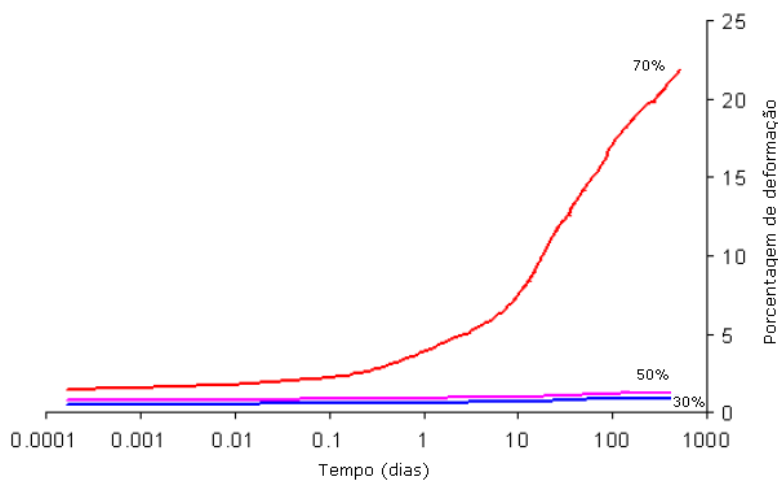
### 3.4 Comportamento quanto à fluência

Duskov (1998) descreve que ao ser utilizado como reforço de pavimentos, as camadas de solo sobrejacentes ao EPS causam uma tensão de compressão constante permanente. Esta tensão ao longo do tempo causa deformações por fluência, e teoricamente, o material continua a se deformar a tensão constante por um período infinito de tempo. Entretanto se a temperatura for muito baixa, em relação à temperatura de amolecimento, este efeito de fluência pode ser desconsiderado.

Vários parâmetros afetam o seu comportamento à fluência, entre os quais a massa específica. Deformações por fluência diminuem com o aumento da massa específica (SUN et al. , 1996).

Sheeley (2000 apud ELRAGI 2006), testou por 500 dias o efeito de fluência para amostras cúbicas de 5 cm de aresta e massa específica de  $18 \text{ kg/m}^3$ , com taxas de aplicação de carga de 30%, 50% e 70%. Foi averiguado que a fluência e o nível de carregamento aplicado são diretamente proporcionais, como mostra a figura 20.

Figura 20 – Ensaio de fluência em diferentes taxas de aplicação de carga



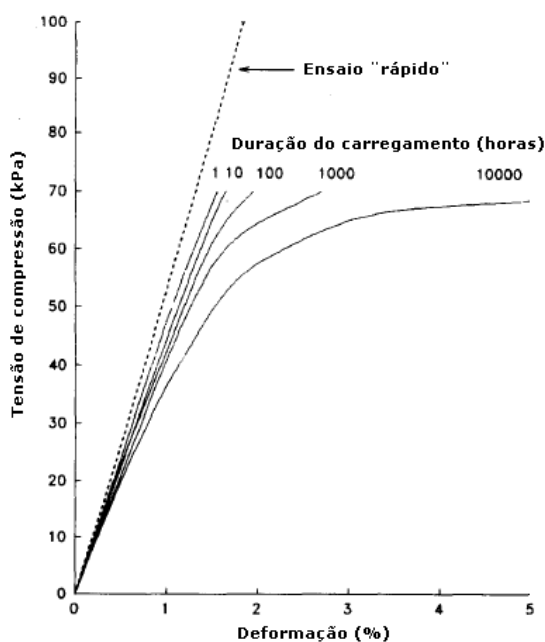
Fonte: modificado de Sheeley, (2000 apud ELRAGI 2006)

Ensaio de fluência foram realizados em laboratório por Aaboe (2000) em corpos de prova com 2m de altura, carregados com 52,5% de sua resistência à compressão. Os resultados observados em um período de três anos mostraram deformação contínua com o tempo. A deformação após os três anos foi de cerca de 1% e aumentou ligeiramente com o tempo.

Também foi acompanhado o fenômeno da fluência em blocos de EPS localizados nos encontros de uma ponte. Os esforços variaram entre 25 e 60% da resistência do EPS e a deformação observada foi de 5%. A deformação observada após 10 anos de operação mostrou uma fluência insignificante.

Horvath (1994) afirma que o comportamento à fluência do EPS pouco sofre influência da massa específica, entretanto, o tempo de duração da aplicação da carga é um importante fator como se observa na figura 21.

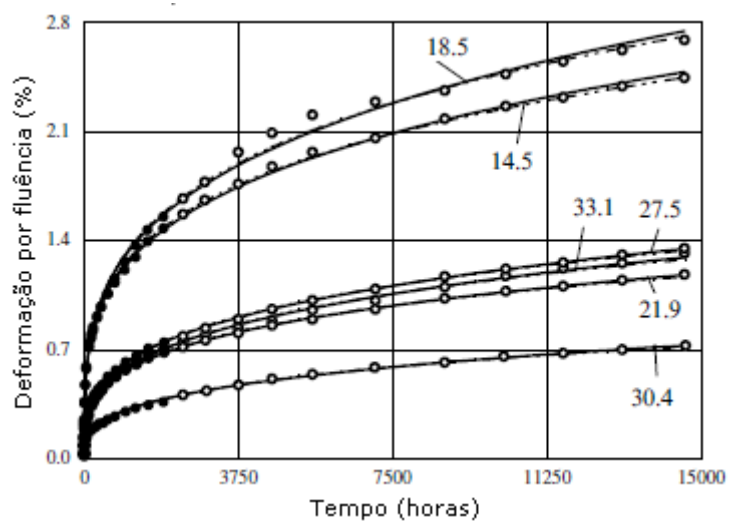
Figura 21 – Comparação entre ensaio de compressão axial e ensaio de fluência



Fonte: modificado de Horvath (1994)

Gnip et al (2007) realizaram ensaios de compressão por 608 dias em amostras cúbicas com 50mm de aresta e de massa específica variando entre 14,5 e 33 kg/m<sup>3</sup>, com tensão constante equivalente a 35% da tensão necessária para causar uma deformação axial de 10%. Os valores de fluência para as diferentes massas específicas podem ser observados na figura 22.

Figura 22 – Ensaio de fluência para diferentes massas específicas

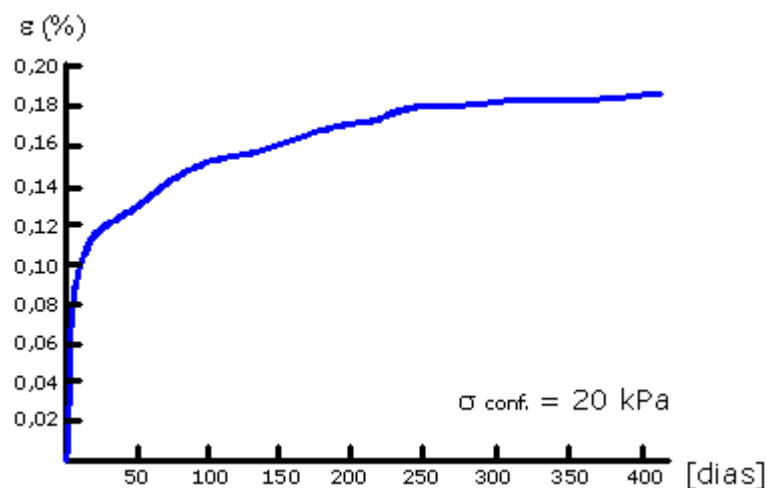


Fonte: Gnip et al. (2007)

O ensaio demonstrou que não se pode estabelecer uma relação entre a massa específica e a fluência. Entretanto, os autores tiveram uma opinião diferente: ressaltaram que os resultados mostraram que a fluência tem um comportamento, na maioria das vezes, inversamente proporcional à massa específica do material, algo também averiguado anteriormente em Gnip (2005) e que confronta o que foi afirmado no estudo de Horvath (1994).

Duskov (1998) estudou o efeito da fluência por meio de dois ensaios, em corpos de prova cilíndricos de 100 e 150 mm de diâmetro e 200 e 300 mm de altura, respectivamente, para massas específicas de 15 kg/m<sup>3</sup> e 20 kg/m<sup>3</sup>. O primeiro ensaio utilizou carga constante de compressão de 20 kPa, por mais de um ano. Notou-se que a maior parte da fluência ocorreu no início do carregamento, entretanto após 400 dias, esta deformação continuou a aumentar. O ensaio para amostras de massa específica 20 kg/m<sup>3</sup> está ilustrado na figura 23.

Figura 23 – Ensaio de fluência para corpo de prova cilíndrico (100 x 200)



Fonte: modificado de Duskov (1998)

No segundo ensaio, foram utilizadas cargas de 10 kPa e 20 kPa e pode-se determinar que a deformação por fluência é proporcional ao valor de carregamento aplicado. Uma parte significativa, cerca de 50%, de fluência foi obtida dentro de um dia após o carregamento. Determinou-se ainda que a massa específica não é um parâmetro importante a se considerar na análise de deformações por fluência, e sim o valor do carregamento aplicado. Algo que também pode ser detectado ao se analisar o trabalho de Veyalis et al. (2010).

### 3.5 Absorção de água

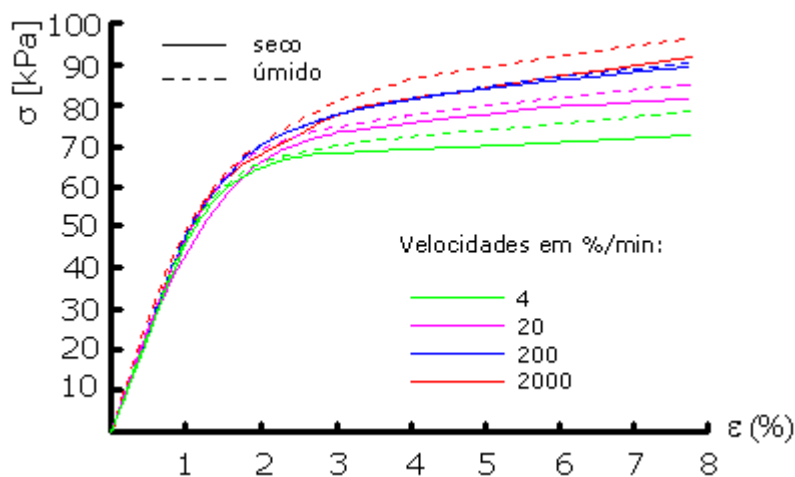
A absorção de água do poliestireno expandido em volume, é baixa, entretanto quando analisada em termos de massa, pelo fato de a massa específica da água ser pelo menos dez vezes maior que a do EPS, uma absorção de 1% em volume, quando convertida em massa, se transforma em uma absorção de 10%.

Embora a absorção de água diminua à medida que a densidade aumenta, a fusão é o fator mais importante que influencia a resistência à umidade do poliestireno expandido. Uma boa fusão reduz a quantidade de absorção de água. Após doze anos de serviço, valores de absorção de água em torno de 9% do volume foram encontrados em EPS instalados abaixo do lençol freático (VAN DORP, 1988).

A influência da absorção de água na resistência à compressão do EPS foi estudada por Duskov (1998) por meio de ensaios em amostras cilíndricas de 300 mm

de altura e 150 mm de diâmetro. Foram estudados materiais em três condições distintas: secos, molhados e por meio de tratamento de ciclos de congelamento e degelo. As taxas de deformação utilizadas foram 4, 20, 200 e 2000%/min e, dentre todas, a condição molhada gerou maior resistência, como pode-se observar na figura 24.

Figura 24 – Ensaio de compressão em amostras secas e úmidas a diferentes velocidades



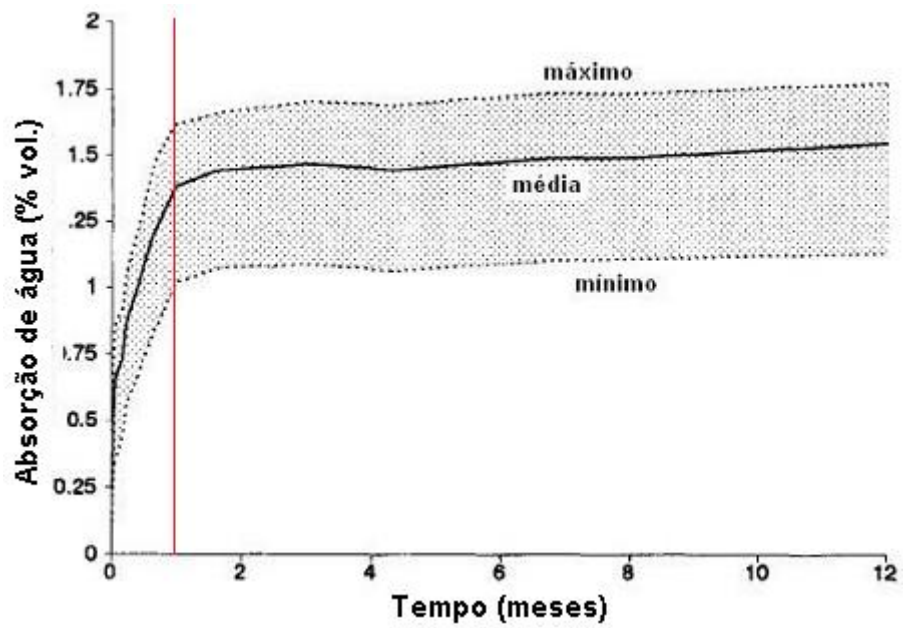
Fonte: modificado de Duskov (1998)

A importância de se estudar esta propriedade deve-se ao fato da água possuir um peso específico muito elevado se comparado ao do EPS seco. Absorvendo uma quantidade expressiva de água, os benefícios existentes no uso de um material extremamente leve desaparecem (DUSKOV 1998).

O EPS é um material pouco higroscópico, portanto, quando imerso em água, absorve apenas pequeno volume. Por ter estrutura celular fechada e as paredes entre as células impermeáveis, a água fica retida entre estas células. Esta característica indica que o EPS tem a capacidade de secar facilmente, sem perder suas propriedades (DUSKOV, 1998).

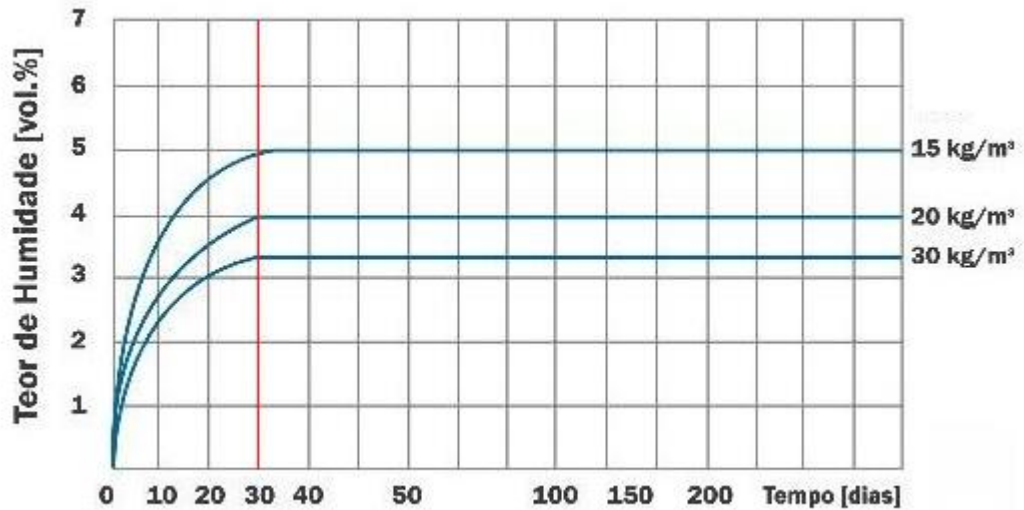
Estudos realizados por Duskov (1998), ACEPE (2019) e Ossa e Romo (2012), indicam que, independente da massa específica do EPS, após trinta dias, a absorção de água tem uma taxa de variação praticamente nula, ou seja, o teor de umidade permanece constante após este período, isto é válido em condições onde a tensão confinante é nula, apenas com imersão do EPS na água. Este fenômeno pode ser visto nas figuras 25, 26 e 27.

Figura 25 – Ensaio de absorção de água em amostras de 20 kg/m<sup>3</sup>



Fonte: modificado de Duskov (2008)

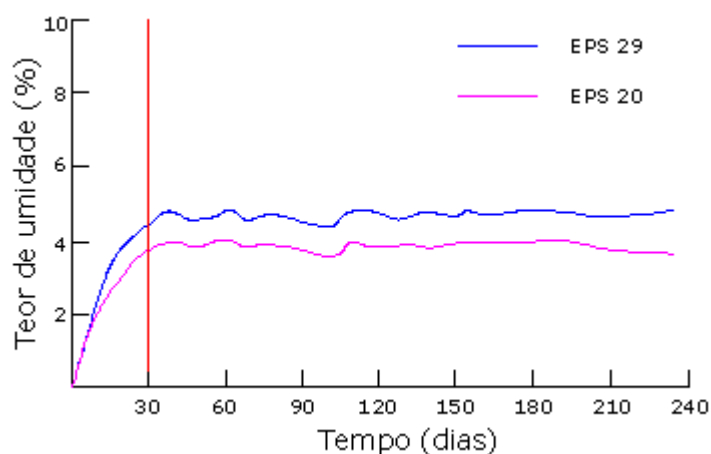
Figura 26 – Ensaio de absorção de água em amostras de 15, 20 e 30 kg/m<sup>3</sup>



Fonte: modificado de ACEPE (2019)



Figura 27 – Ensaio de absorção de água em amostras de 20 e 29 kg/m<sup>3</sup>

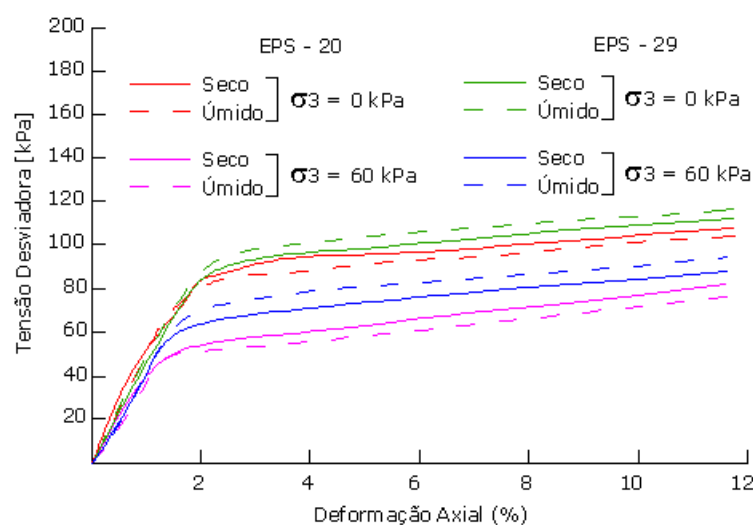


Fonte: modificado de Ossa e Romo (2012)

O trabalho de Ossa e Romo (2012) também indicou que a absorção ao longo do tempo mantém-se crescente quando há tensão confinante, pois esta tensão quebra e enfraquece as conexões das esferas de EPS, permitindo penetração de água nos espaços entre as esferas e também na estrutura celular do EPS.

Este trabalho ainda evidenciou que a tensão desviadora, quando comparada com os valores de amostras secas, pouco foi alterada devido à presença de água ao longo do tempo. Os fenômenos relatados acima podem ser evidenciados na figura 28.

Figura 28 - Ensaio tri axiais para amostras úmidas e secas



Fonte: modificado de Ossa e Romo (2012)

Duskov (1998) afirma que depois de ensaiado por imersão, o EPS apresentou uma absorção máxima de 1,87 % em volume após 1 ano. Já para amostras imersas, após sofrerem uma deformação superior a 10%, estas se tornam suscetíveis à absorção de água, atingindo valores superiores a 4% do seu volume. Este fato pode ser explicado devido ao dano ocorrido na estrutura celular após a plastificação do material, fazendo com que a água consiga penetrar de forma mais eficaz para dentro da estrutura e não se acumular apenas nos espaços das células, mas também nas fissuras e interligações entre células geradas pela plastificação. O autor ainda alerta para o fato de que o tamanho da amostra e a forma de obtenção da mesma podem alterar os resultados. Caso seja cortado com fio de aço quente, pode derreter as células do EPS e dificultar a entrada de água.

Analisando-se os trabalhos descritos, nota-se que a absorção de água não gera um comportamento nocivo significativo ao material. Uma explicação para este fenômeno foi dada por Duskov (1998), interpretando que a estrutura celular do EPS preenchida com água e vapor de água oferece um adicional de resistência em uma solicitação por compressão se comparada com esta mesma estrutura preenchida com ar.

Beju e Mandal (2017) utilizaram amostras prismáticas (75x75x13 mm), com massa específica de 12, 15 e 20 kg/m<sup>3</sup> para testes de imersão durante 24 horas. Os resultados do teste de absorção de água foram de 4,41%, 3,6% e 2,88%, para massa específica de 12,15 e 20 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Isto mostrou que a taxa de absorção de água é inversamente proporcional à massa específica.

Gnip et al. (2006) estudaram a absorção de água por EPS, utilizando corpos de prova prismáticos de 200x200x50 mm, com massa específica variando entre 12 e 35 kg/m<sup>3</sup>, por 7, 14 e 28 dias e, após isso, as leituras foram feitas a cada 28 dias, até se completarem 224 dias. Foi determinado o máximo valor de absorção de água como sendo de 1,25% em volume.

### **3.6 A degradação do EPS**

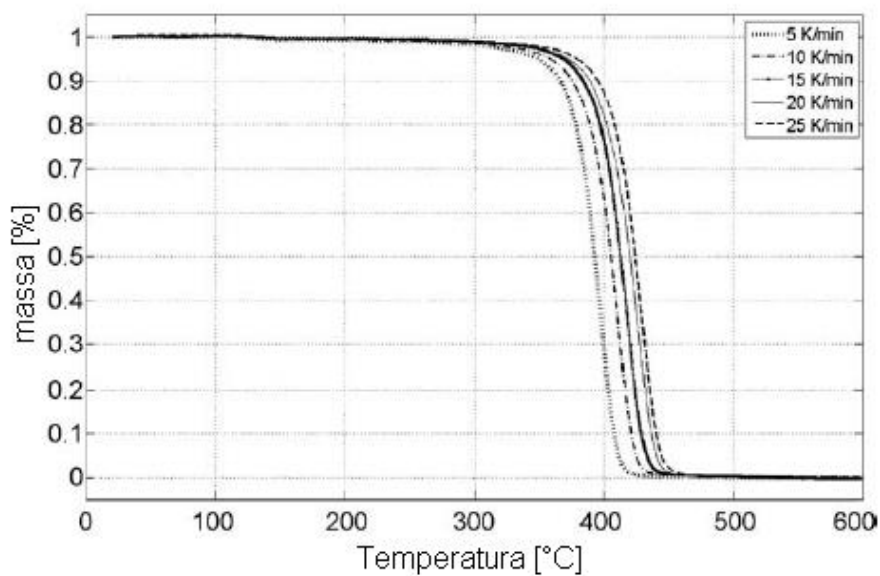
Segundo Shah et al. (2008) e Panda; Singh; Mishra (2010) , o EPS é usado para produzir muitos objetos descartáveis e por ser dificilmente biodegradável, isto aumenta o acúmulo de grandes quantidades de seus resíduos.

Elragi (2006) afirma que expô-lo ao ataque de raios ultravioleta causa uma tonalidade amarelada em sua superfície e pequenos pedaços do material se soltam, deixando uma aparência de pó. Sheeley (2000) testou o efeito da degradação na superfície por meio de ensaio de cisalhamento de interface entre blocos de EPS e concluiu que a degradação por meio de raios ultravioleta diminuiu a resistência.

Uma possibilidade para analisar sua degradação no meio ambiente é estudar sua evolução química em temperaturas diferentes. Huang et al. (2006) e Kannan et al. (2009), verificaram que o EPS se decompõe na forma de alguns produtos voláteis abaixo de 300° C. Entre 300 e 400° C a cisão de cadeias e a despolimerização ocorrem (HUANG et al., 2006; CHUMBHALE et al., 2004). Acima de 500° C, a decomposição térmica produz tolueno, benzeno e estireno (CHAUHAN et al. 2008; KANNAN et al. 2009; KARADUMAN et al. 2002).

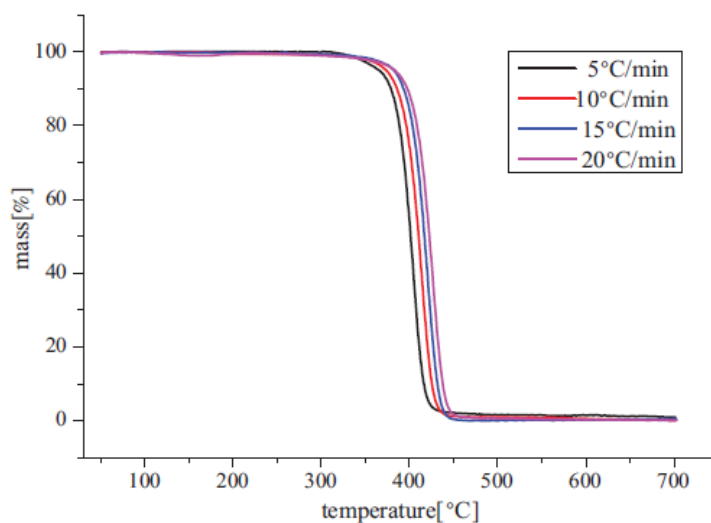
Kannan et al. (2009) afirmam que explorar a decomposição do EPS utilizando taxas de menor aquecimento em um ambiente altamente controlado serve para entender o mecanismo geral de decomposição e explorar os efeitos de vários fatores que afetam o processo. Esta baixa taxa de aquecimento (utilizada por eles de 5 K/min até 25 K/min) é eficiente quando se utiliza análise por termogravimetria. Os autores, além de variar a taxa de aquecimento, também realizaram os ensaios em diferentes atmosferas (ambientes oxidantes, 1%, 5%, 21%, 50% de oxigênio em equilíbrio com nitrogênio em todos os casos) e ambientes não oxidantes (hélio, argônio e nitrogênio). Conforme se aumentou a taxa de aquecimento, a degradação ocorria em temperaturas mais elevadas e com uma taxa de perda de peso maior, algo que também foi observado no estudo de Jiao et al. (2012). Estes fenômenos estão ilustrados nas figuras 29 e 30.

Figura 29 – Perda de massa com diferentes taxas de aumento de temperatura



Fonte: Kannan et. al., (2009)

Figura 30 – Perda de massa com diferentes taxas de aumento de temperatura



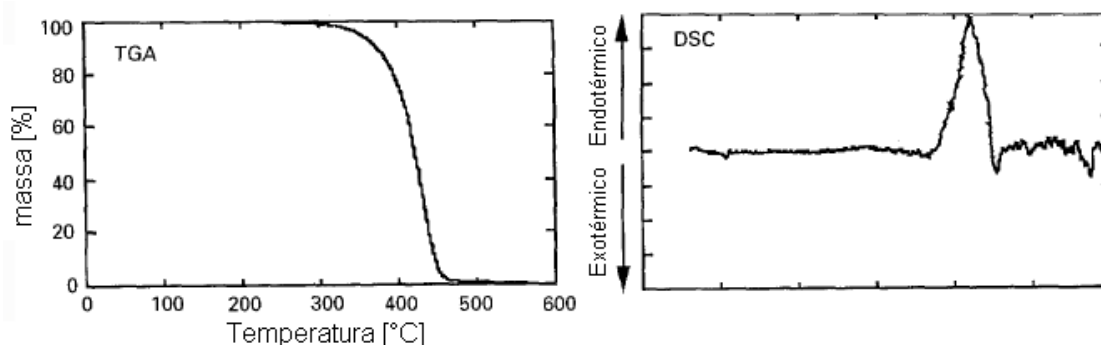
Fonte: Jiao et al. (2012)

Kannan et al. (2009) ainda verificaram que o EPS começa a degradar a uma temperatura muito menor no ar do que em qualquer ambiente não oxidante e que a taxa de degradação em ambientes não oxidantes depende da condutividade térmica do ambiente gasoso.

As esferas de poliestireno, quando submetidas à decomposição térmica, amolecem a cerca de 120° C, derretem a 160° C e volatilizam completamente entre 460 e 500 °C. Análises feitas por Termogravimetria (TGA) demonstraram que a massa específica do

material não tem interferência significativa na degradação por temperatura (MEHTA et al., 1995). Os autores ainda determinaram que o processo de degradação é endotérmico, por meio de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC), conforme ilustrado na figura 31.

Figura 31 – Perda de massa e comportamento térmico



Fonte: Mehta et. al. (1995)

Krundaeva et al. (2016) realizaram ensaios de compressão em amostras de EPS nas temperaturas de  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $18^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$  e concluíram que o EPS tem um comportamento mecânico de melhor qualidade a temperaturas baixas do que a temperaturas altas, pois em relação à temperatura padrão de  $18^{\circ}\text{C}$ , quando a  $-20^{\circ}\text{C}$ , houve um ganho de resistência de 8% e quando a  $50^{\circ}\text{C}$ , houve um decréscimo de 13%. Isso possibilitou observar que o aumento da temperatura é prejudicial ao comportamento físico-mecânico do material.

Westerhout et al. (1997) ressaltam que a taxa de diminuição de peso molecular é muito alta nos estágios iniciais e mais lenta nas fases finais de degradação, acompanhada pela evaporação de fragmentos de baixo peso molecular.

A estabilidade térmica do poliestireno depende de vários parâmetros incluindo a presença de aditivos e número de ligações fracas. Por exemplo, o poliestireno é mais estável termicamente quando preparado na presença de oxigênio do que na ausência (MADORSKY, 1964).

O EPS é inflamável se a fonte de ignição existir, porém, como característica desse material, ao se retirar a fonte de calor a chama se extingue. O fabricante pode incluir aditivos retardadores de fogo durante a produção, o que aumentará o custo em 5 a 10% se forem necessários procedimentos que gerem calor e chamas perto da geoespuma (SUN, 1996). O retardador de fogo é para diminuir o potencial de propagação do fogo de uma pequena fonte de chama.

Zhao et al. (2019) estudaram a degradação do EPS ( massa específica de 25 kg/m<sup>3</sup>) por meio de ensaios de TGA e DSC. O ensaio de TGA mostrou que com 106 °C o EPS passa de um estado duro para um estado borrachudo, enquanto que o ensaio de DSC, mostrou que aos 450 °C o material tem a sua degradação feita por completa.

Torres et al (2017) ao estudarem a degradação do EPS a uma temperatura de 120°C durante um período de sete horas, observaram uma perda em massa em torno de 0,23 % e uma considerável redução de volume das amostras.

Karaduman et al. (2002) utilizaram uma autoclave para fazer degradação de EPS, combinando temperatura (400 °C) e solventes aromáticos cíclicos alifáticos (n-pentano, ciclohexano e tolueno). Obtiveram uma perda em massa apenas com a temperatura de 68% e, com o efeito combinado, a perda mínima foi de 95%.

Como visto neste item, o estudo da degradação do EPS ao longo do tempo se deu apenas com um viés do ponto de vista da química, sem muito atentar-se aos efeitos da degradação sob seu comportamento como material geossintético (sem avaliar seu comportamento físico-mecânico e parâmetros de resistência). Diante deste fato, torna-se necessária a avaliação de seu comportamento do ponto de vista estrutural, quando este passa por algum tipo de degradação.

Pelo fato do EPS, enquanto material geossintético, ser aplicado invariavelmente abaixo de estruturas, ou seja, está sempre coberto por solo, a possibilidade de este ser afetado por temperaturas acima da temperatura ambiente é consideravelmente nula.

Quando utilizados como reforço de pavimento, pode passar por alguns danos, os quais diminuem sua resistência. Depois de aplicado, estará sujeito ao ataque de líquidos hidrocarbonetos provenientes de vazamentos dos veículos. Outra situação a ser observada, é sua exposição às intempéries desde a chegada ao canteiro de obras, até a sua acomodação e total cobertura pelo solo.

Diante disto esse trabalho procurou avaliar as propriedades mecânicas do EPS após exposição a hidrocarboneto e efeitos de intempérie.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Foram utilizadas amostras de EPS, aparatos para exposição às intempéries e para exposição ao vapor de gasolina (hidrocarboneto). Os materiais abordados aqui serão descritos com mais detalhes a seguir.

### **4.1 Materiais Empregados**

As amostras de EPS foram cedidas pela empresa Termotécnica, sediada em Joinville, Santa Catarina. As amostras possuíam massas específicas de: 10; 14,5; 18; 28 e 33,5 kg/m<sup>3</sup>.

### **4.2 Método de Pesquisa**

Após receber as amostras, estas foram devidamente acondicionadas conforme a prescreve a ASTM D1621 – 2016. Posteriormente, foram realizados ensaios de absorção de água, cisalhamento direto e compressão axial, de forma a estabelecer valores e parâmetros de resistência de controle para as amostras de diferentes massas específicas.

Parte das amostras foi exposta à intempérie e líquidos hidrocarbonetos por diferentes intervalos de tempo (7, 14 e 30 dias para vapor de gasolina) e (14, 30 e 45 dias, para intempérie). Para cada intervalo de tempo, os ensaios foram repetidos de forma a se avaliar a magnitude do efeito gerado pela exposição.

#### **4.2.1 Exposição à intempérie**

Os corpos de prova foram expostos à intempérie em um espaço aberto dentro de um câmpus da UNESP, na Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP), próximo ao laboratório de Geotecnia. Foram utilizadas estruturas existentes, que serviam de apoio para exposição de placas de geomembranas à intempérie. Os corpos de prova foram instalados em varais criados entre as estruturas, conforme ilustram as figuras 32 (a e b). Os painéis foram alinhados de forma a se evitar interferência na temperatura, por meio de sombra e

ventos direcionais. Os corpos de prova de EPS foram expostos em três períodos distintos: 14 dias, 30 dias e 45 dias.

Figura 32 - Exposição dos corpos de prova à intempérie



Os valores dos parâmetros referentes à intempérie foram obtidos a partir dos sensores presentes no Instituto de pesquisas meteorológicas (IPMET) localizado próximo à UNESP. Os parâmetros utilizados foram: temperatura média, temperatura máxima média, temperatura mínima média, pressão atmosférica média, umidade relativa média, radiação solar global média e precipitação acumulada. Estes foram organizados na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros referentes à intempérie

Tempo (dias)	Período	TM máx (°C)	TM mín (°C)	Patm M (kPa)	URM (%)	RSGM (W/m <sup>2</sup> )	PA (mm)
14	21/11/2017 à 05/12/2017	23,32	22,98	94,084	73,98	154,34	122,43
30	21/11/2017 à 21/12/2017	24,31	23,95	94,075	71,06	159,99	135,89
45	21/11/2017 à 07/01/2018	24,07	23,72	94,096	75,3	149,85	295,15

TM máx = temperatura máxima média; TM mín = temperatura mínima média; Patm M = pressão atmosférica média; URM = umidade relativa média; RSGM = radiação solar global média; PA = precipitação acumulada.



#### 4.2.2 Exposição ao vapor de gasolina

Para realizar a exposição dos corpos de prova foi utilizado um recipiente com medidas aproximadas de 100 cm de comprimento, 60 centímetros de largura e 60 cm de altura. Os corpos de prova ficaram a uma distância da lâmina de gasolina de 15 cm, lâmina essa que possuía 4 cm de altura. Estas condições de contorno foram escolhidas de maneira a se garantir que houvesse vapor de gasolina no ambiente (60 cm de altura). Os corpos de prova foram pendurados por arame de aço inoxidável em varais localizados na parte superior do recipiente, posteriormente o mesmo foi lacrado com plástico transparente e fita adesiva, de maneira a evitar ao máximo o escape de gases. O esquema descrito pode ser observado na figura 33.

Figura 33 – Corpos de prova em exposição ao vapor de gasolina



#### 4.3 Ensaios Laboratoriais

Após cada período de exposição, (7 dias, 14 dias e 30 dias para vapor de gasolina) e (14 dias, 30 dias e 45 dias para intempérie), foram realizados os ensaios de absorção de água, compressão axial e cisalhamento direto de interface (EPS/EPS). Os valores obtidos foram comparados com os valores de controle das amostras não expostas (intactas).

### 4.3.1 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM C 272 de 2001. As amostras cúbicas, com 100 mm de aresta, foram colocadas em estufa com temperatura aproximada de 95° C por um período de 24h, a fim de se obter sua massa seca, figura 34.

Posteriormente, de modo a se obter a massa saturada, as amostras foram imersas em água destilada (figura 35) por um período de tempo de 24 horas; após esse período estas foram retiradas do recipiente e enxugadas para remoção do excesso de água em sua superfície.

Para aferir as massas secas e saturadas, utilizou-se balança de alta precisão e para cada massa específica foram utilizados 3 corpos de prova.

Figura 34 - Estufa utilizada para secagem das amostras



Figura 35 – Recipiente com amostras em imersão na água



A umidade foi calculada por meio da expressão 1:  $w = (m_w / m_s) \times 100$ . Sendo:

$w$  = umidade (%)

$m_w$  = massa de água (g)

$m_s$  = massa seca do EPS (g)

#### 4.3.2 Ensaio de Compressão axial

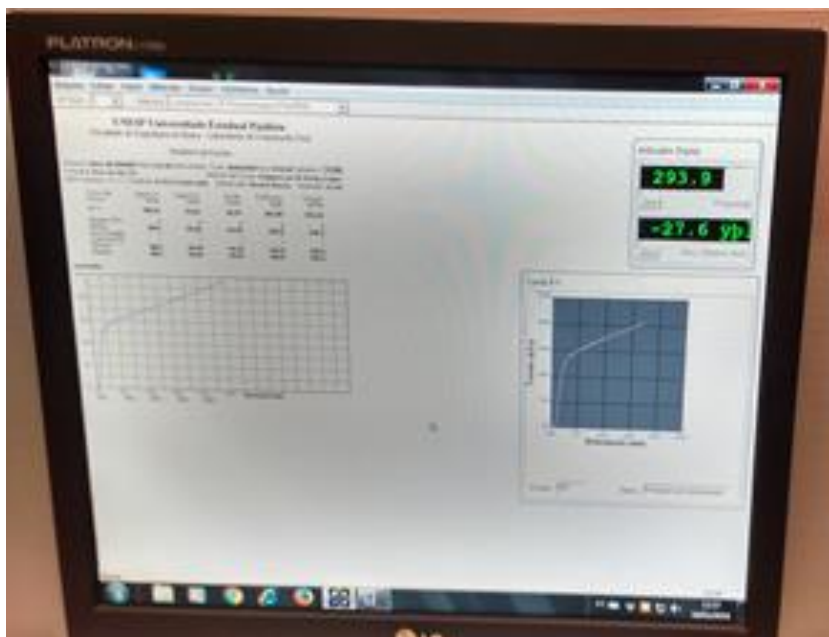
O ensaio, normatizado pela ASTM 1621 – 2016, foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade de 30 kN. Foi utilizada velocidade de execução do ensaio de 50 mm/min conforme especificado pela norma. A figura 36 ilustra como foram realizados os ensaios. Foram utilizadas amostras cúbicas com 100 mm de aresta.

Figura 36 – Realização de ensaio de compressão axial em amostra cúbica



O ensaio de compressão axial consiste em comprimir os corpos de prova, cujas dimensões e massas são previamente conhecidas. Com isso, são geradas curvas de tensão *versus* deformação que permitem obter os valores de tensão e deformação referentes a cada massa específica em diferentes momentos do ensaio, conforme a figura 37.

Figura 37 – Exemplo de resultados do ensaio de compressão axial compilados



Para cada massa específica em cada período de exposição realizaram-se os ensaios com três corpos de prova.

O equipamento foi ajustado de modo a conduzir os corpos de prova a uma deformação de 40%, deformação essa que permite caracterizar a curva de deformação do material e visualizar-se o ponto de escoamento, bem como o caminhamento de tensões. Esse valor foi adotado tendo-se em vista os artigos abordados na literatura (vide Horvath, 1994) e que a curva para deformações acima do ponto de escoamento passa a ter uma inclinação muito pequena, mostrando uma densificação do material e mudança de comportamento.

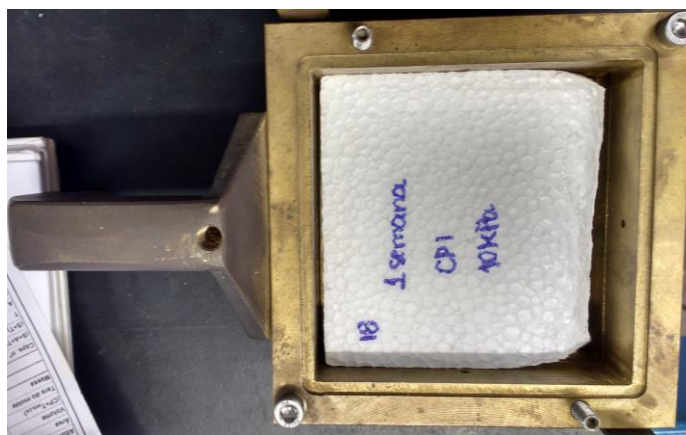
Após a realização dos ensaios, para cada valor de massa específica, os resultados foram analisados e organizados em gráficos de tensão normal por período de exposição de maneira a avaliar o efeito da exposição frente à resistência do material.

### 4.3.3 Ensaio de cisalhamento direto de interface

O ensaio de cisalhamento direto objetiva por meio de gráficos determinar os parâmetros de coesão aparente e ângulo de atrito entre placas de EPS. Os ensaios foram realizados utilizando-se a ASTM D3080 de 2011.

As amostras utilizadas possuem área de 10000 mm<sup>2</sup> (100x100 mm) e altura de 25 mm, medidas exatas para permitir que fossem encaixadas no suporte e permanecessem em contato durante o ensaio. A figura 38 ilustra uma amostra exposta a vapor de gasolina e o posicionamento da mesma dentro da caixa de cisalhamento.

Figura 38 – Amostra degradada dentro da caixa de cisalhamento direto



Para os corpos de prova de densidade 10 kg/m<sup>3</sup>, 14,5 kg/m<sup>3</sup> e 18 kg/m<sup>3</sup> foram aplicadas tensões confinantes de 20, 30 e 40 kPa. Já para as maiores densidades, 28 kg/m<sup>3</sup> e 33,5 kg/m<sup>3</sup>, foram aplicadas tensões confinantes de 30, 40 e 50 kPa. Estas tensões também foram escolhidas com base na pesquisa de Avesani Neto (2008) de modo a representar situações de campo, considerando que um aterro de geoespandido possui baixo peso.

Na fase de cisalhamento, aplica-se uma tensão confinante constante e posteriormente, um deslocamento relativo entre as placas, medindo-se simultaneamente, a força necessária para o deslocamento e a magnitude dos deslocamentos verticais e horizontais.

A velocidade de execução dos ensaios foi de 0,50 mm/min e estes foram realizados em um equipamento comumente utilizado para ensaios em solo, como o mostrado na figura 39.

Figura 39 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de cisalhamento direto



Após a realização dos ensaios, para cada valor de massa específica e tensão confinante, os resultados foram analisados e organizados em gráficos de tensão de cisalhamento por período de exposição, de maneira a avaliar o efeito da exposição frente à resistência do material.

Posteriormente, gráficos de envoltórias de resistência foram obtidos de maneira a se determinar os parâmetros de coesão e ângulo de atrito para as amostras em seus diferentes tempos de exposição.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão expressos os resultados qualitativos e quantitativos dos ensaios de absorção de água, compressão uniaxial e cisalhamento direto de interface, para amostras intactas e expostas. Os resultados foram organizados em tópicos para amostras intactas e expostas.

### 5.1 Resultados para amostras intactas

Neste item serão apresentados os resultados de todos os ensaios para as amostras intactas.

#### 5.1.1 Ensaio de absorção de água

As tabelas 2 e 3 apresentam os valores das massas secas e das massas saturadas para os corpos de prova intactos de diferentes massas específicas, respectivamente. Com os valores das tabelas 2 e 3, foi possível calcular o teor de umidade para os valores médios das diferentes massas específicas de amostras intactas (Tabela 4).

Tabela 2 – Valores das massas secas para as amostras intactas

Massa Seca (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	11,52	11,25	11,25	11,34
14,5	15,14	14,64	14,81	14,86
18,0	18,97	18,84	19,05	18,95
28,0	26,12	25,91	25,74	25,92
33,5	29,45	29,36	29,53	29,45

Tabela 3 – Valores das massas saturadas para as amostras intactas

Massa Saturada (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	49,65	49,78	48,86	49,43
14,5	47,15	46,72	42,01	45,29
18,0	51,72	57,80	51,25	53,59
28,0	53,61	57,68	56,72	56,00
33,5	49,91	51,29	49,18	50,13

Tabela 4 – Valores das umidades das amostras intactas

Umidade (%)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa saturada (g)	Massa seca (g)	Massa de água (g)	Umidade (%)
10,0	49,43	11,34	38,09	336,00
14,5	45,29	14,86	30,43	204,78
18,0	53,59	18,95	34,63	182,72
28,0	56,00	25,92	30,08	116,03
33,5	50,13	29,45	20,68	70,22

Determinado o valor do teor de umidade volumétrico, nota-se que os valores situam-se entre 2% e 3,7%, o que dá a falsa impressão de que a absorção realmente é baixa.

Entretanto, os valores de teor de umidade obtidos na tabela 4 também indicam o aumento de massa em porcentagem para as amostras, deixando evidente que deve-se atentar a este fator na fase de projeto, pois se analisado da maneira incorreta, pode levar ao colapso da estrutura.



### 5.1.2 Ensaio de Compressão Uniaxial

Os resultados apresentados são referentes aos valores médios obtidos das amostras (seis amostras para cada valor de massa específica). Os corpos de prova foram conduzidos até uma deformação de aproximadamente 30% de maneira a se observar o comportamento também em regime plástico (figura 40). Após os processos de exposição (vapor de gasolina e intempérie), os ensaios foram conduzidos até a deformação de 40%, entretanto para fins de comparação, foram utilizados os resultados referentes às deformações de 30%. A Tabela 5 apresenta os valores relativos ao ensaio de compressão uniaxial para as amostras intactas.

Figura 40 - Resultado obtido de ensaio de compressão uniaxial (intacta -10 kg/m<sup>3</sup>)

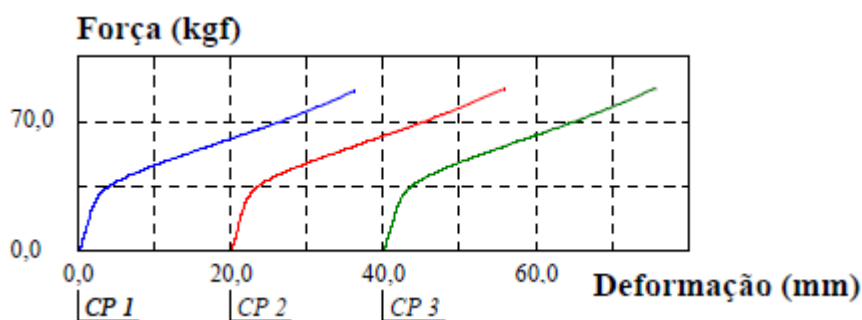


Tabela 5 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial para as amostras intactas

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_e$ (kPa)	$\epsilon_e$ (%)	$E_e$ (kPa)	$\sigma_p$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%)	$E_p$ (kPa)
10,0	23,76	2,50	950,40	75,03	30,00	150,00
14,5	40,11	3,30	1215,45	100,54	30,00	175,00
18,0	65,12	3,22	2022,36	137,25	30,00	210,00
28,0	107,38	3,54	3033,33	210,00	30,00	250,00
33,5	150,07	3,00	5002,33	280,00	30,00	350,00

$\sigma_e$  = tensão obtida no final da fase elástica;  $\epsilon_e$  = deformação obtida no final da fase elástica;  $E_e$  = módulo de elasticidade na fase elástica;  $\sigma_p$  = tensão obtida na fase plástica;  $\epsilon_p$  = deformação na fase plástica;  $E_p$  = módulo de elasticidade na fase plástica.

### 5.1.3 Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface

Os resultados de ensaio de cisalhamento direto para amostras intactas serão apresentados em conjunto aos ensaios de amostras expostas, de maneira a se comparar o valor máximo de resistência obtido em cada período de tempo. As tensões normais utilizadas foram de, 20, 30 e 40 kPa para as amostras de 10, 14,5 e 18 kg/m<sup>3</sup> e 30, 40 e 40 kPa para as amostras de 28 e 33,5 kg/m<sup>3</sup>.

## 5.2 Resultados para amostras expostas à intempérie

Neste item serão apresentados os resultados de todos os ensaios para as amostras expostas à intempérie.

### 5.2.1 Ensaio de absorção de água

Os resultados obtidos para a exposição à intempérie foram compilados de forma análoga aos obtidos para as amostras intactas. Os valores estão apresentados nas Tabelas 6 a 17 seguintes.

Tabela 6 – Valores das massas naturais (intempérie após 14 dias)

Massa Natural (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,53	9,57	9,73	9,61
14,5	14,30	13,74	14,89	14,31
18,0	16,98	16,08	18,96	17,34
28,0	30,49	29,81	28,84	29,72
33,5	31,98	33,37	32,78	32,71

Tabela 7 – Valores das massas secas (intempérie após 14 dias)

Massa Seca (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,42	9,46	9,63	9,51
14,5	14,19	13,63	14,79	14,20
18,0	16,88	15,98	18,85	17,24
28,0	30,38	29,70	28,73	29,60
33,5	31,87	33,25	32,68	32,60

Tabela 8 – Valores das massas saturadas (intempérie após 14 dias)

Massa Saturada (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	58,65	59,53	58,64	58,94
14,5	69,04	48,31	69,87	62,41
18,0	63,90	59,58	61,95	61,81
28,0	65,99	67,17	93,42	75,53
33,5	62,72	65,72	77,49	68,64

Tabela 9 – Valores das umidades (intempérie após 14 dias)

Umidades (%)					
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa saturada (g)	Massa natural (g)	Massa seca (g)	Umidade higroscópica (%)	Umidade após imersão (%)
10,0	58,94	9,61	9,51	1,08	520,02
14,5	62,41	14,31	14,20	0,73	339,35
18,0	61,81	17,34	17,24	0,61	258,62
28,0	75,53	29,72	29,60	0,39	155,15
33,5	68,64	32,71	32,60	0,34	110,59

Tabela 10 – Valores das massas naturais (intempérie após 30 dias)

Massa Natural (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,74	9,64	9,93	9,77
14,5	14,41	14,70	13,78	14,30
18,0	16,72	17,09	17,85	17,22
28,0	26,72	30,74	30,08	29,18
33,5	32,14	33,78	32,57	32,83

Tabela 11 – Valores das massas secas (intempérie após 30 dias)

Massa Seca (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,64	9,53	9,83	9,67
14,5	14,30	14,58	13,68	14,18
18,0	16,61	16,99	17,74	17,11
28,0	26,59	30,61	29,96	29,05
33,5	32,02	33,66	32,45	32,71

Tabela 12 – Valores das massas saturadas (intempérie após 30 dias)

Massa Saturada (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	69,53	65,35	66,53	67,14
14,5	64,65	51,86	51,65	56,05
18,0	54,07	52,87	52,86	53,26
28,0	53,51	52,28	71,86	59,22
33,5	68,13	85,38	74,04	75,85

Tabela 13 – Valores das umidades (intempérie após 30 dias)

Umidades (%)					
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa saturada (g)	Massa natural (g)	Massa seca (g)	Umidade higroscópica (%)	Umidade após imersão (%)
10,0	67,14	9,77	9,67	1,08	594,55
14,5	56,05	14,30	14,18	0,81	295,20
18,0	53,26	17,22	17,11	0,63	211,26
28,0	59,22	29,18	29,05	0,44	103,82
33,5	75,85	32,83	32,71	0,38	131,90

Tabela 14 – Valores das massas naturais (intempérie após 45 dias)

Massa Natural (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,20	9,42	9,37	9,33
14,5	13,73	14,03	13,92	13,89
18,0	17,02	16,15	17,09	16,75
28,0	30,13	31,23	30,22	30,52
33,5	32,11	31,78	33,95	32,61

Tabela 15 – Valores das massas secas (intempérie após 45 dias)

Massa Seca (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,10	9,33	9,28	9,24
14,5	13,61	13,92	13,81	13,78
18,0	16,91	16,04	16,98	16,65
28,0	29,99	31,08	30,09	30,39
33,5	31,99	31,65	33,82	32,49

Tabela 16 – Valores das massas saturadas (intempérie após 45 dias)

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Saturada (g)			Valor Médio (g)
	CP			
	1	2	3	
10,0	68,14	64,22	60,61	64,32
14,5	47,66	50,71	47,57	48,64
18,0	67,01	52,09	67,31	62,14
28,0	91,33	97,97	71,42	86,91
33,5	87,91	68,96	96,32	84,40

Tabela 17 – Valores das umidades (intempérie após 45 dias)

Umidades (%)					
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa saturada (g)	Massa natural (g)	Massa seca (g)	Umidade higroscópica (%)	Umidade após imersão (%)
10,0	64,32	9,33	9,24	1,05	596,43
14,5	48,64	13,89	13,78	0,82	253,04
18,0	62,14	16,75	16,65	0,65	273,27
28,0	86,91	30,52	30,39	0,45	186,01
33,5	84,40	32,61	32,49	0,40	159,80

As Figuras 41 e 42 apresentam a relação entre as umidades e massas específicas.

Figura 41 - Relação entre umidade após saturação e massas específicas

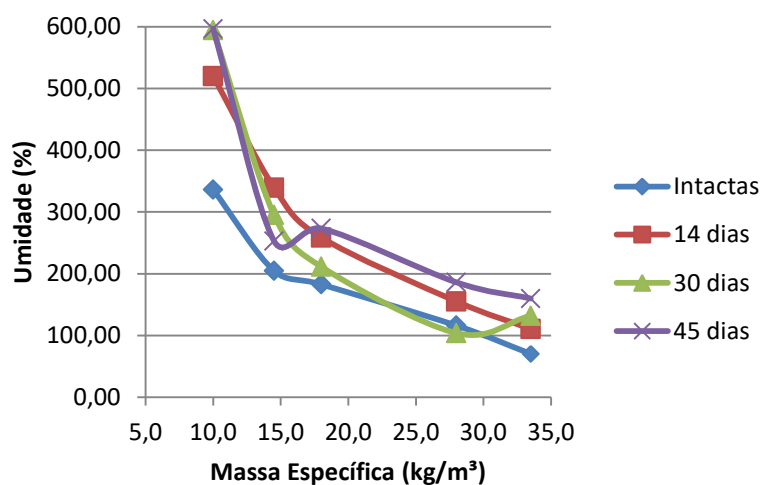
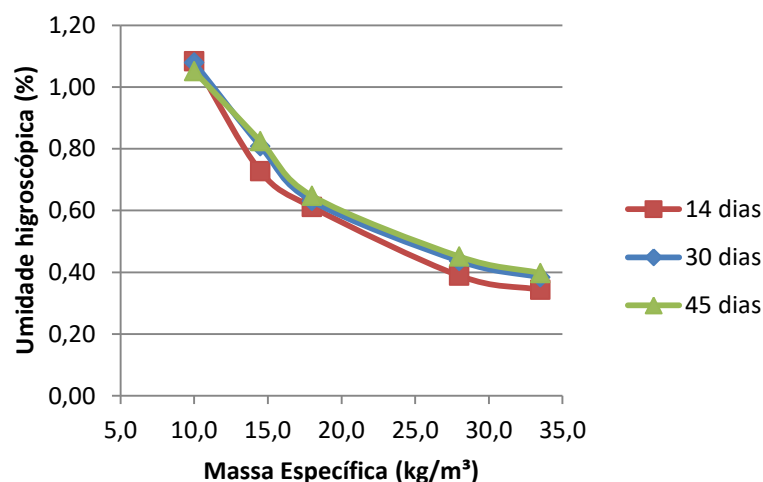


Figura 42 – Relação entre umidades higroscópicas e massas específicas



A figura 41 ilustra que a absorção de água é inversamente proporcional à massa específica e diretamente proporcional ao tempo de exposição à intempérie. Entretanto, no gráfico da figura 42 notou-se que o tempo de exposição pouco afeta a capacidade do EPS de absorver a umidade do ambiente, embora tenha seguido-se a tendência de a absorção ser inversamente proporcional à massa específica.

Para melhorar o entendimento dos resultados foram elaborados os gráficos das figuras 43 e 44 que relacionam, respectivamente, a umidade após saturação x tempo de degradação e a umidade higroscópica x tempo de degradação para uma mesma massa específica.

Figura 43 - Relação entre umidade após saturação e tempo de exposição

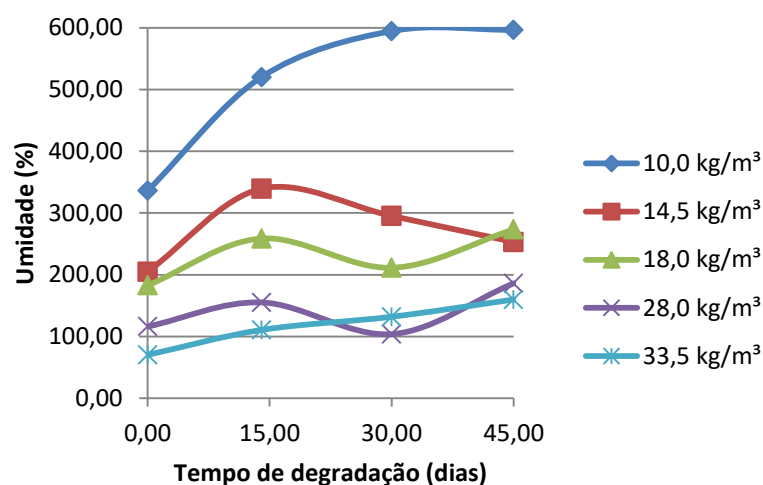
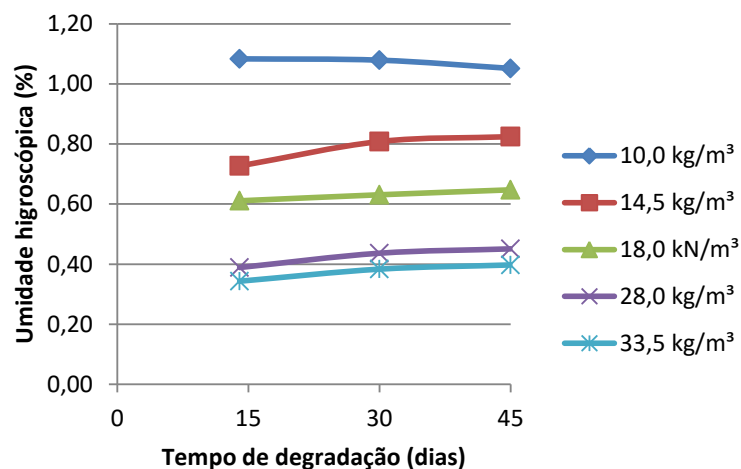


Figura 44 - Relação entre umidade higroscópica após saturação e tempo de exposição



A Figura 43 ilustra o que já fora notado anteriormente na figura 41: que a absorção é inversamente proporcional à massa específica e que, na maioria dos casos, a exposição ao longo do tempo aumentou a capacidade de absorção do EPS. Contudo, apesar de as amostras de 10 e 33,5 kg/m<sup>3</sup> apresentarem uma tendência de aumento da absorção com o tempo, observou-se uma variação dos valores nas massas específicas de 14,5, 18 e 28 kg/m<sup>3</sup>, esta variação pode ser explicada pela dificuldade de padronização do ensaio no momento de secagem da superfície das amostras previamente às pesagens, o fato de as amostras perderem massa durante o processo de exposição pode contribuir para esta variação, pois altera o valor de massa seca em proporções diferentes e aleatórias para as amostras, além disto expõe as células, facilitando a troca de gases e vapor d'água.

No gráfico da figura 44 a exposição à intempérie mostrou que o tempo de exposição pouco influencia na capacidade de absorção de água do ambiente, entretanto manteve-se a tendência das amostras de menores massas específicas apresentarem maior capacidade de absorção. Algo já observado no gráfico da figura 42.

A análise qualitativa realizada mostrou que os corpos de prova ao final do processo de exposição apresentavam uma tonalidade amarelada e desprendimento de material superficial em forma de pó, conforme observa-se nas figuras 45 e 46. Isto gera evidências que mostram que o aumento de absorção de água ao longo do tempo pode ser justificado pela deterioração da superfície, expondo as células, facilitando assim a entrada de água.

Figura 45 – Amarelamento de amostras expostas à intempérie

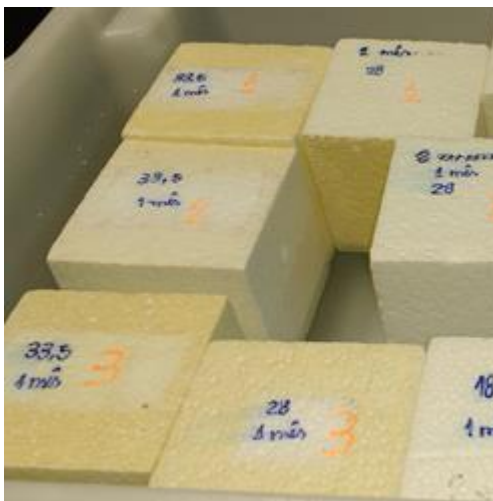


Figura 46 – Desprendimento de material de amostras expostas à intempérie





## 5.2.2 Ensaio de Compressão Uniaxial

As Tabelas 18, 19 e 20 apresentam, respectivamente, os valores referentes aos ensaios realizados após 14, 30 e 45 dias de exposição dos corpos de prova à intempérie.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (14 dias após intempérie)

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_e$ (kPa)	$\epsilon_e$ (%)	$E_e$ (kPa)	$\sigma_p$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%)	$E_p$ (kPa)
10,0	19,95	2,31	863,64	75,10	30,00	150,00
14,5	35,93	2,82	1274,11	103,29	30,00	190,00
18,0	65,00	3,04	2138,16	140,12	30,00	225,00
28,0	130,54	3,55	3677,18	227,58	30,00	285,00
33,5	140,00	2,50	5600,00	250,18	30,00	287,50

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (30 dias após intempérie)

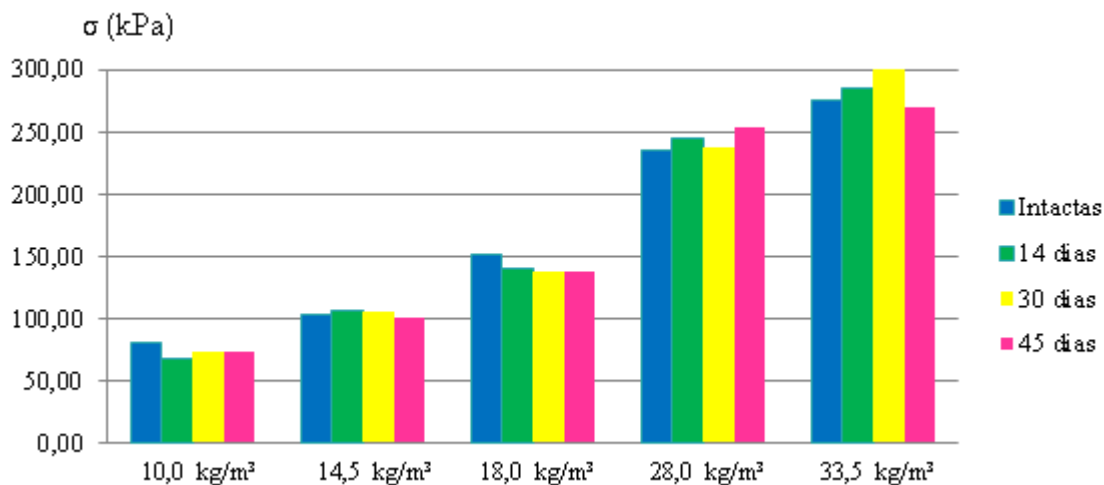
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_e$ (kPa)	$\epsilon_e$ (%)	$E_e$ (kPa)	$\sigma_p$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%)	$E_p$ (kPa)
10,0	23,76	2,50	950,40	75,03	30,00	150,00
14,5	40,11	3,30	1215,45	100,54	30,00	175,00
18,0	65,12	3,22	2022,36	137,25	30,00	210,00
28,0	107,38	3,54	3033,33	210,00	30,00	250,00
33,5	150,07	3,00	5002,33	280,00	30,00	350,00

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (45 dias após intempérie)

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_e$ (kPa)	$\epsilon_e$ (%)	$E_e$ (kPa)	$\sigma_p$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%)	$E_p$ (kPa)
10,0	26,67	2,76	966,30	76,33	30,00	145,00
14,5	35,22	2,50	1408,80	97,34	30,00	195,00
18,0	64,93	2,76	2352,54	140,72	30,00	225,00
28,0	125,00	3,21	3894,08	227,75	30,00	260,00
33,5	130,00	3,04	4276,32	229,38	30,00	275,00

Os valores de resistência uniaxial das amostras intactas e amostras expostas (considerando-se a tensão  $\sigma_p$ ) à intempérie aos 14, 30 e 45 dias foram organizados no gráfico da figura 47, conforme as tabelas acima de maneira a observar-se a relação entre tempo de exposição, massa específica e resistência.

Figura 47 – Valores de resistência uniaxial - amostras intactas x expostas à intempérie



Notou-se que de maneira geral, as únicas amostras que apresentaram incremento de resistência foram as de massa específica de 28 kg/m³, as demais amostras tiveram redução de sua resistência, sendo que para as de massa específica de 10 kg/m³ e 18 kg/m³ esta redução se deu de maneira mais pronunciada. Indica-se aqui exposição com maior período de exposição para que valores mais conclusivos possam ser obtidos.

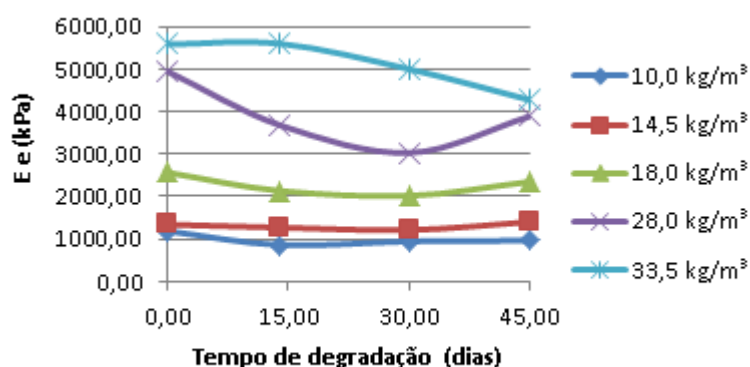
De maneira a compreender melhor o comportamento do material frente à compressão, a tabela 21 foi criada para se observar a evolução dos módulos de elasticidade na fase elástica ( $E_e$ ) e plástica ( $E_p$ ).

Tabela 21 - Evolução dos Módulos de Elasticidade para amostras expostas às intempéries

Massa específica (kg/m³)	E e (kPa)				E p (kPa)			
	Intactas	14 dias	30 dias	45 dias	Intactas	14 dias	30 dias	45 dias
10,0	1191,30	863,64	950,40	966,30	140,00	150,00	150,00	145,00
14,5	1344,52	1274,11	1215,45	1408,80	145,00	190,00	175,00	195,00
18,0	2565,82	2138,16	2022,36	2352,54	225,00	225,00	210,00	225,00
28,0	4945,72	3677,18	3033,33	3894,08	275,00	285,00	250,00	260,00
33,5	5585,26	5600,00	5002,33	4276,32	340,00	287,50	350,00	275,00

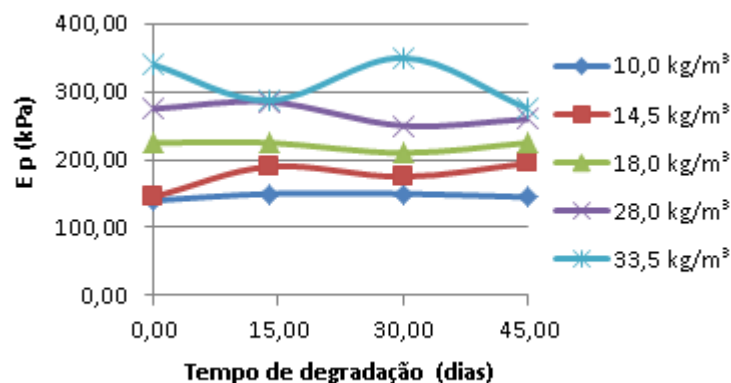
Com os dados da tabela acima, obteve-se os gráficos das figuras 48 e 49, deixando evidente que tanto na fase elástica, quanto na fase plástica, o devido à exposição, o material ao longo do tempo se degradou de uma maneira que o tornou menos rijo.

Figura 48 - Evolução do Módulo de Elasticidade na fase elástica no período de exposição à intempérie



Observou-se que na fase elástica, as amostras de maiores massas específicas, 28 e 33,5 kg/m<sup>3</sup> tiveram uma redução mais significativa do módulo de elasticidade, demonstrando que às intempéries tem um efeito mais agressivo para valores de massa específica desta ordem. Isto pode estar relacionado ao fato de que, por o material ter uma maior quantidade de massa, e um menor índice de vazios, ele irá receber uma quantidade maior de raios UV, causando assim uma maior degradação. Entretanto notou-se que com exceção das amostras de 33,5 kg/m<sup>3</sup>, as amostras mostram uma tendência a ter um acréscimo valor no módulo de elasticidade ao final dos 45 dias, isto gera margem para uma pesquisa que analise o material para um maior período de exposição, de maneira a se entender melhor este comportamento.

Figura 49 - Evolução do Módulo de Elasticidade na fase plástica no período de exposição à intempérie



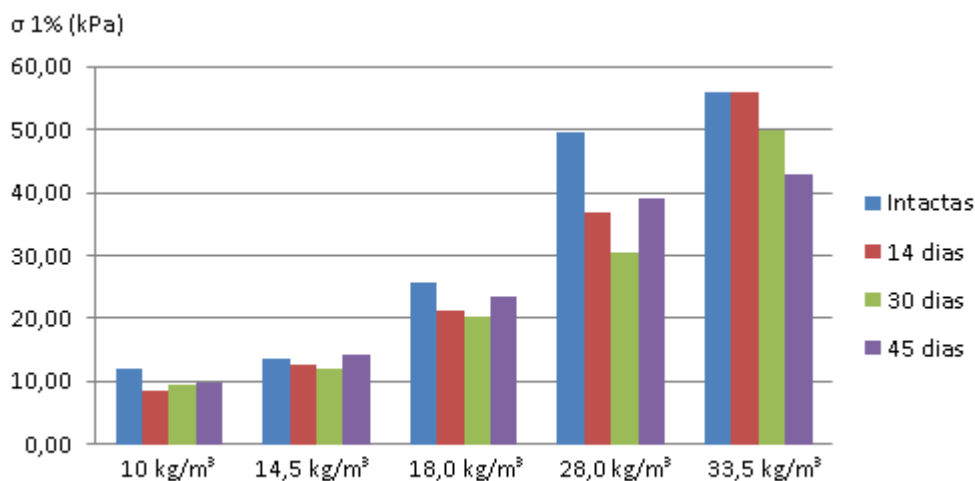
Já na fase plástica, observou-se uma variação dos valores, principalmente de maneira mais acentuada para as amostras de 33,5 kg/m<sup>3</sup>. Uma hipótese para o comportamento aleatório do valor do módulo de elasticidade na fase plástica é a de que, nesta etapa ocorre expulsão do ar e a estrutura celular do EPS se transforma em uma pilha de membranas, pelo fato de não se ter uma padronização de posicionamento das células no processo de produção do material, os corpos de prova podem ter a formação dessas membranas de maneira diferente, fazendo com que uns fiquem mais rígidos do que os outros. Todavia, esses valores tornaram-se inconclusivos, deixando uma abertura para pesquisas mais aprofundadas neste quesito.

Ressalta-se que o material apresentou um comportamento linear na fase elástica, portanto para determinar parâmetros de projeto (geralmente utiliza-se deformação de 1%), cabe aqui a utilização da Lei de Hooke, desta maneira, pode-se obter a resistência relativa à esta deformação (chamada aqui de  $\sigma_{1\%}$ ). Os valores estão apresentados na tabela 22 e ilustrados no gráfico da figura 50 mostra a evolução desta resistência ao longo do período de exposição à intempérie.

Tabela 22 - Resistência para deformação de 1% em amostras expostas à intempérie

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ 1%			
	(kPa)			
10,00	11,91	8,64	9,50	9,66
14,50	13,45	12,74	12,15	14,09
18,00	25,66	21,38	20,22	23,53
28,00	49,46	36,77	30,33	38,94
33,50	55,85	56,00	50,02	42,76

Figura 50 - Evolução da Resistência para deformação de 1% em amostras expostas à intempérie



Analisados os dados acima, fica clara a necessidade de se levar em consideração durante a fase de projeto, o mal acondicionamento dos blocos de EPS em canteiro de obras, visto que se esses ficarem expostos ao meio, podem sofrer decréscimos significativos de resistência. Vale ainda salientar que estes valores não devem ser utilizados como base para dimensionamento de uma obra, neste caso, deve-se procurar por manuais técnicos do fabricante ou realizar ensaios com amostras do material que será utilizado na obra.

### 5.2.3 Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface

Após obtenção dos resultados das amostras intactas, foram ensaiadas as amostras que ficaram expostas por 14, 30 e 45 dias. Os resultados foram organizados em forma de gráficos e ilustram a tensão de cisalhamento máxima e o respectivo período de exposição. Para tanto, foram tomados os valores para amostras intactas e expostas por 14, 30 e 45 dias. As figuras 51 a 55 ilustram os valores das máximas tensões cisalhantes para cada tensão confinante a qual foram submetidas cada uma das massas específicas em cada período de exposição.

Figura 51 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 10 kg/m<sup>3</sup>

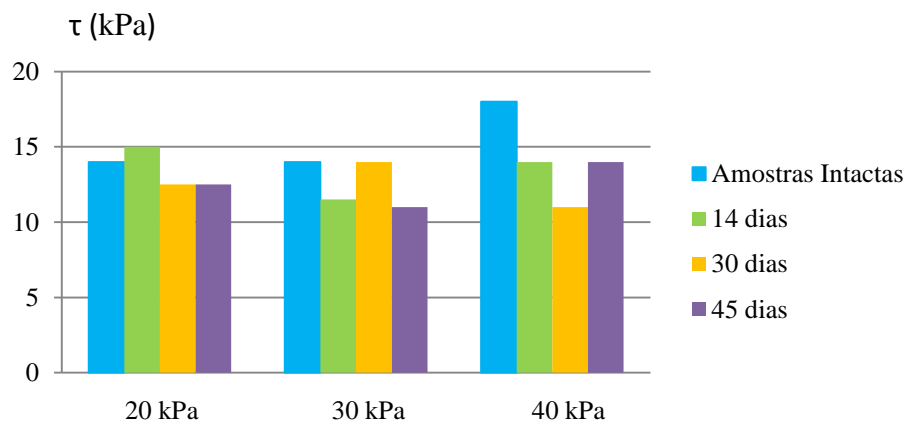


Figura 52 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 14,5 kg/m<sup>3</sup>

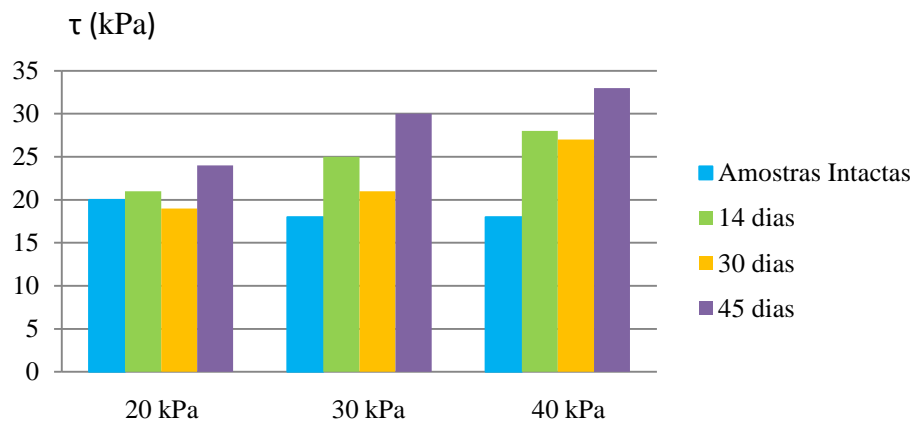


Figura 53 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 18,0 kg/m<sup>3</sup>

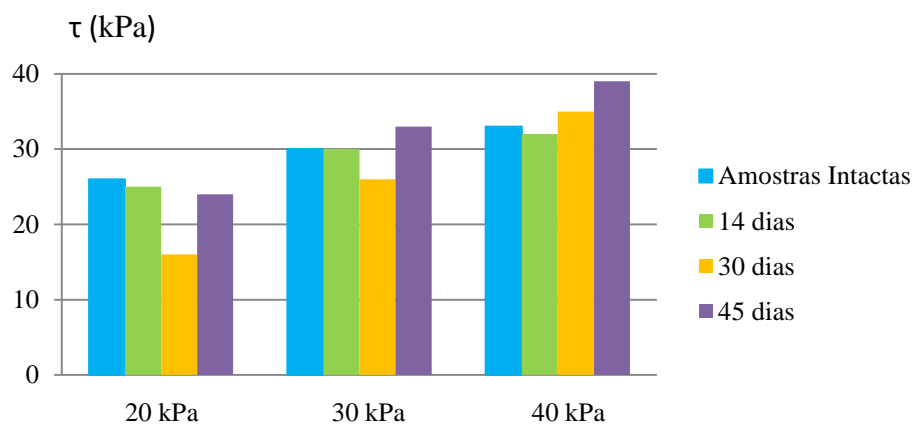
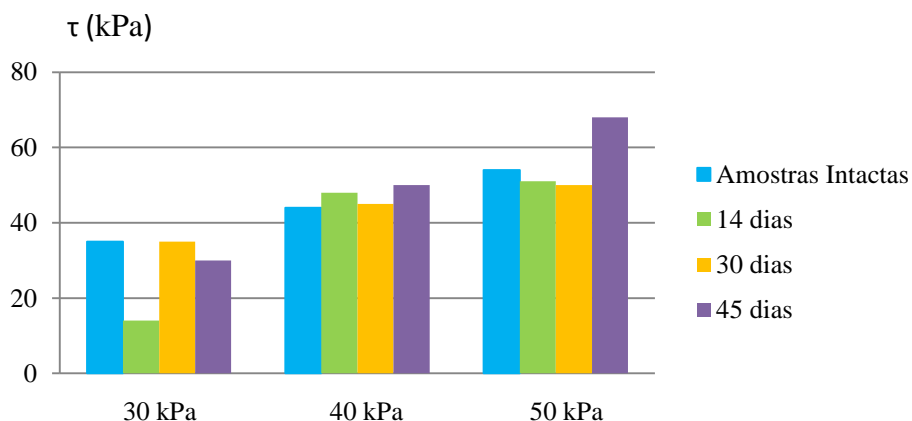
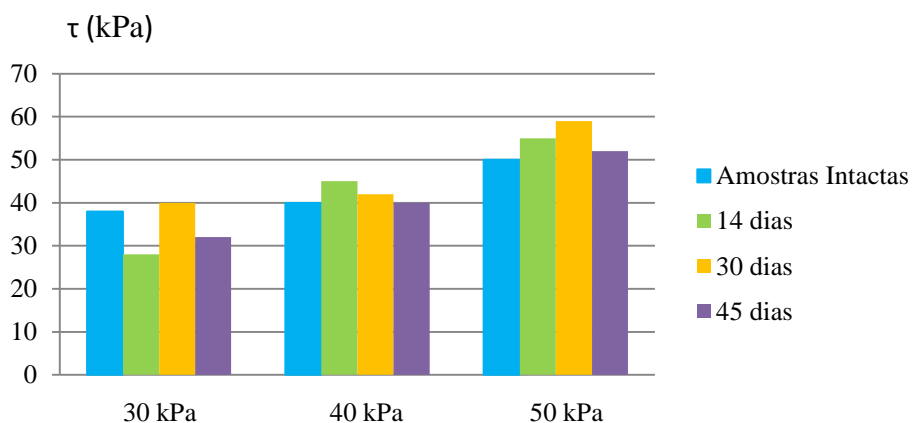
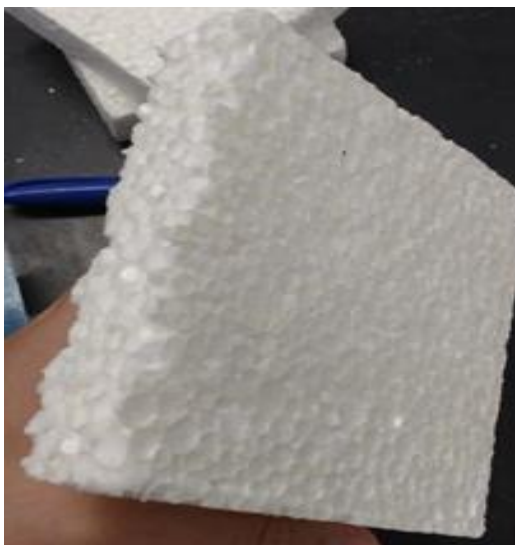


Figura 54 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 28,0 kg/m<sup>3</sup>Figura 55 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos – 33,5 kg/m<sup>3</sup>

Para os corpos de prova expostos à intempérie, o decaimento da máxima tensão alcançada é mais claro na densidade de 10 kg/m<sup>3</sup>. Já para as amostras de 14,5 kg/m<sup>3</sup> notou-se um aumento da tensão ao final do período de exposição. Para as demais massas específicas, os valores de tensão obtidos após o período de exposição apresentaram grande oscilação, sendo algumas vezes superiores ou inferiores em relação aos valores de amostras intactas.

Qualitativamente, após o período total de exposição, notou-se que as amostras de massa específica 10 kg/m<sup>3</sup> apresentavam degradação das arestas, conforme a figura 56.

Figura 56 - Amostra com degradação das arestas após 45 dias de exposição à intempérie



Notou-se também que, pelo fato de as superfícies do material soltarem algumas partículas, isto aumenta a rugosidade do material, podendo ser a provável causa de ser ter um aumento da resistência ao cisalhamento ao final do período de exposição, em 8, dos 15 resultados apresentados.

Outra maneira de se evidenciar este fato, é quando analisa-se os valores das tabelas de 23 a 27, que expressam o valor da resistência ao cisalhamento para uma deformação de 1%, chamada aqui de  $\tau_{1\%}$ . Para melhor interpretação dos resultados, foram feitos os gráficos das imagens 57 a 61.

Tabela 23 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 10,0 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	$\tau_{1\%}$ (kPa)			
	Intactas	14 dias	30 dias	45 dias
20,0	2,00	6,00	5,00	5,50
30,0	3,50	5,00	5,00	6,00
40,0	3,50	6,00	6,00	5,50

Tabela 24 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 14,5 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	$\tau_{1\%}$ (kPa)			
	Intactas	14 dias	30 dias	45 dias
20,0	7,00	5,00	5,00	10,00
30,0	5,00	5,00	4,00	11,00
40,0	7,00	5,00	5,00	12,00



Tabela 25 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 18,0 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	$\tau$ 1% (kPa)			
	Intactas	14 dias	30 dias	45 dias
20,0	1,00	6,00	4,50	11,00
30,0	4,00	6,00	7,00	10,00
40,0	4,00	6,00	7,00	11,00

Tabela 26 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 28,0 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	$\tau$ 1% (kPa)			
	Intactas	14 dias	30 dias	45 dias
30,0	7,50	8,00	10,00	10,00
40,0	7,50	8,00	20,00	18,00
50,0	7,50	8,00	10,00	27,00

Tabela 27 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 33,5 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	$\tau$ 1% (kPa)			
	Intactas	14 dias	30 dias	45 dias
30,0	8,50	10,00	3,00	20,00
40,0	8,50	20,00	20,00	20,00
50,0	8,50	28,00	20,00	20,00

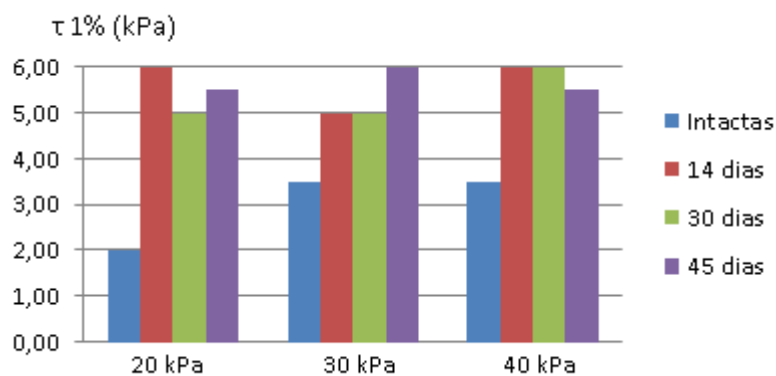
Figura 57 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 10,0 kg/m<sup>3</sup>

Figura 58 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 14,5 kg/m<sup>3</sup>

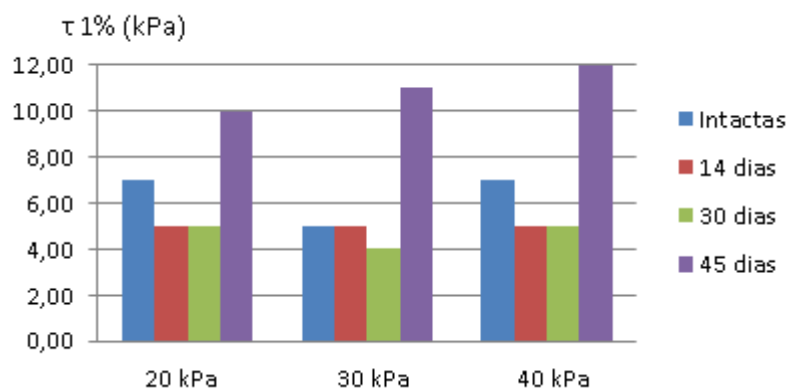


Figura 59 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 18,0 kg/m<sup>3</sup>

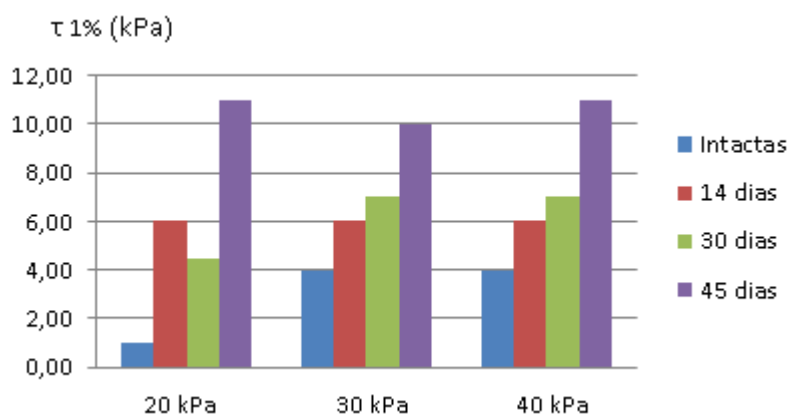


Figura 60 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 28,0 kg/m<sup>3</sup>

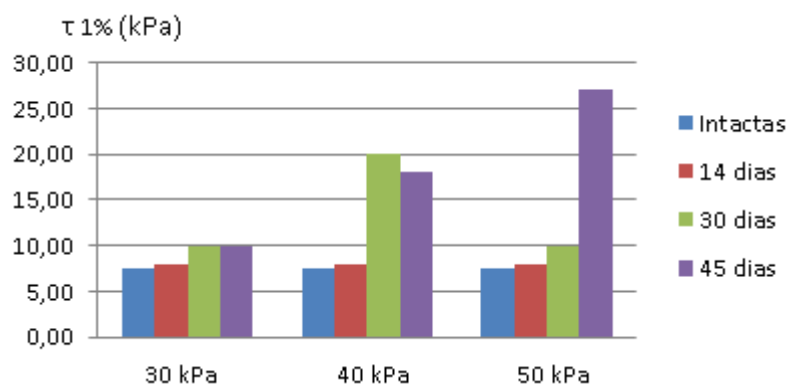
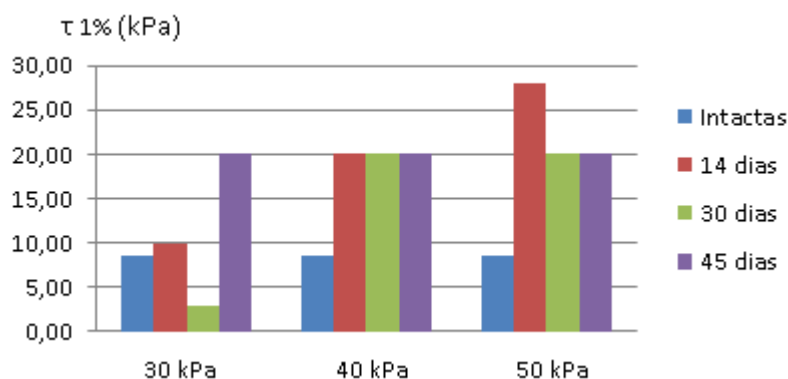


Figura 61 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 33,5 kg/m<sup>3</sup>



Como dito anteriormente, nota-se em todos resultados acima, que em relação às amostras intactas, a resistência ao final do período de exposição, no regime elástico (deformação de 1%) aumentou. O que corrobora a hipótese de que a exposição às intempéries aumenta a rugosidade da superfície do material.

### 5.3 Resultados para amostras expostas ao vapor de gasolina

Neste item serão apresentados os resultados de todos os ensaios para as amostras expostas ao vapor de gasolina.

#### 5.3.1 Ensaio de absorção de água

Após 7 dias de exposição as amostras foram pesadas de modo a se obter sua massa natural. Os resultados estão apresentados na Tabela 28. Posteriormente as amostras foram secas em estufa e pesadas obtendo-se assim os valores conforme a Tabela 29. Após o ensaio de saturação, os resultados obtidos foram organizados na Tabela 30. Com os valores das tabelas 28, 29 e 30 foi possível calcular a umidade higroscópica e umidade após a absorção por imersão (Tabela 31).

De maneira análoga, as tabelas 32 a 39 apresentam os resultados para os períodos de 14 e 30 dias de exposição.

Tabela 28 – Valores das massas naturais (vapor de gasolina após 7 dias)

Massa Natural (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,83	9,71	9,70	9,75
14,5	14,21	14,58	13,86	14,22
18,0	16,07	17,06	17,87	17,00
28,0	28,94	28,98	31,25	29,73
33,5	32,33	32,20	33,35	32,63

Tabela 29 – Valores das massas secas (vapor de gasolina após 7 dias)

Massa Seca (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,62	9,51	9,50	9,54
14,5	13,98	14,34	13,66	13,99
18,0	15,82	16,84	17,60	16,75
28,0	28,62	28,69	30,97	29,42
33,5	32,05	33,05	31,93	32,34

Tabela 30 – Valores das massas saturadas (vapor de gasolina após 7 dias)

Massa Saturada (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	53,24	51,47	47,30	50,67
14,5	58,61	51,85	55,88	55,45
18,0	54,24	52,23	59,56	55,34
28,0	57,31	58,64	93,37	69,77
33,5	81,37	96,57	83,69	87,21

Tabela 31 – Valores das umidades (vapor de gasolina após 7 dias)

Umidades (%)					
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa saturada (g)	Massa natural (g)	Massa seca (g)	Umidade higroscópica (%)	Umidade após imersão (%)
10,0	50,67	9,75	9,54	2,14	430,87
14,5	55,45	14,22	13,99	1,61	296,22
18,0	55,34	17,00	16,75	1,46	230,32
28,0	69,77	29,73	29,42	1,03	137,13
33,5	87,21	32,63	32,34	0,88	169,65

Tabela 32 – Valores das massas naturais (vapor de gasolina após 14 dias)

Massa Natural (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,88	9,82	9,83	9,84
14,5	14,38	13,52	14,45	14,12
18,0	17,81	17,45	16,40	17,22
28,0	29,91	28,05	29,23	29,06
33,5	32,62	34,28	33,51	33,47

Tabela 33 – Valores das massas secas (vapor de gasolina após 14 dias)

Massa Seca (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	9,68	9,60	9,63	9,64
14,5	14,03	13,13	14,22	13,79
18,0	17,52	17,11	16,05	16,89
28,0	29,45	27,50	28,85	28,60
33,5	31,97	33,68	33,00	32,88

Tabela 34 – Valores das massas saturadas (vapor de gasolina após 14 dias)

Massa Saturada (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	51,18	51,10	52,53	51,60
14,5	46,77	44,23	62,20	51,06
18,0	45,48	62,65	63,15	57,09
28,0	70,95	54,80	64,54	63,43
33,5	67,87	88,65	68,67	75,06

Tabela 35 – Valores das umidades (vapor de gasolina após 14 dias)

Umidades (%)					
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa saturada (g)	Massa natural (g)	Massa seca (g)	Umidade higroscópica (%)	Umidade após imersão (%)
10,0	51,60	9,84	9,64	2,16	435,48
14,5	51,06	14,12	13,79	2,34	270,23
18,0	57,09	17,22	16,89	1,93	237,98
28,0	63,43	29,06	28,60	1,63	121,81
33,5	75,06	33,47	32,88	1,77	128,27

Tabela 36 – Valores das massas naturais (vapor de gasolina após 30 dias)

Massa Natural (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	10,81	11,55	10,67	11,01
14,5	14,38	13,32	14,54	14,08
18,0	17,41	16,50	18,20	17,37
28,0	33,02	28,02	30,31	30,45
33,5	36,06	33,00	34,74	34,60

Tabela 37 – Valores das massas secas (vapor de gasolina após 30 dias)

Massa Seca (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	10,42	11,11	10,32	10,62
14,5	13,94	12,88	14,09	13,64
18,0	16,89	15,99	17,53	16,80
28,0	32,20	27,26	29,71	29,72
33,5	35,18	32,31	34,12	33,87

Tabela 38 – Valores das massas saturadas (vapor de gasolina após 30 dias)

Massa Saturada (g)				
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	CP			Valor Médio (g)
	1	2	3	
10,0	47,16	43,56	40,77	43,83
14,5	50,02	35,80	48,56	44,79
18,0	52,13	42,57	55,62	50,11
28,0	85,42	50,71	62,84	66,32
33,5	78,19	82,64	94,06	84,97

Tabela 39 – Valores das umidades (vapor de gasolina após 30 dias)

Umidades (%)					
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa saturada (g)	Massa natural (g)	Massa seca (g)	Umidade higroscópica (%)	Umidade após imersão (%)
10,0	43,83	11,01	10,62	3,71	312,90
14,5	44,79	14,08	13,64	3,26	228,53
18,0	50,11	17,37	16,80	3,37	198,23
28,0	66,32	30,45	29,72	2,44	123,13
33,5	84,97	34,60	33,87	2,17	150,89

As Figuras 62 e 63 apresentam a relação entre as umidades e massas específicas.

Figura 62 – Relação entre umidade após saturação e massas específicas

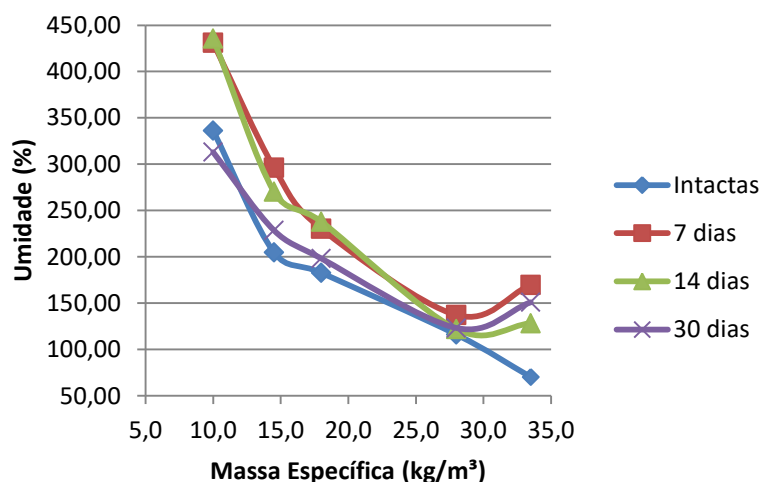
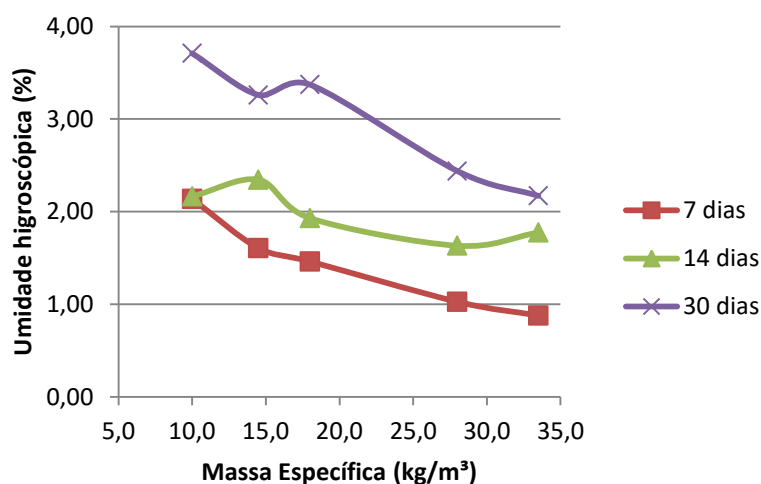


Figura 63 – Relação entre umidades higroscópicas e massas específicas



A figura 62 ilustra que quanto maior a massa específica, menor será a absorção por imersão, visto que o material mais densificado apresenta uma menor quantidade de vazios em sua estrutura. Outra observação a ser feita é que a absorção de água foi mais afetada para menores massas específicas, ao longo do tempo de exposição. Entretanto, observa-se a tendência de aumento dos valores de absorção com o efeito da exposição. Estes mesmos fenômenos também foram observados na figura 41. Avaliando-se a figura 63 observou-se a mesma tendência observada na figura 62 para a massa específica e absorção de água. Notou-se que quanto maior o tempo de degradação, maior é a capacidade do material em absorver umidade do ambiente.

Para melhorar a visualização dos resultados, elaborou-se o gráfico da figura 64 que relaciona a umidade após saturação com o tempo de degradação para uma mesma massa

específica. Além disso, o gráfico da figura 65 apresenta a relação entre a umidade higroscópica com o tempo de degradação para uma mesma massa específica.

Figura 64 - Relação entre umidade após saturação e tempo de exposição

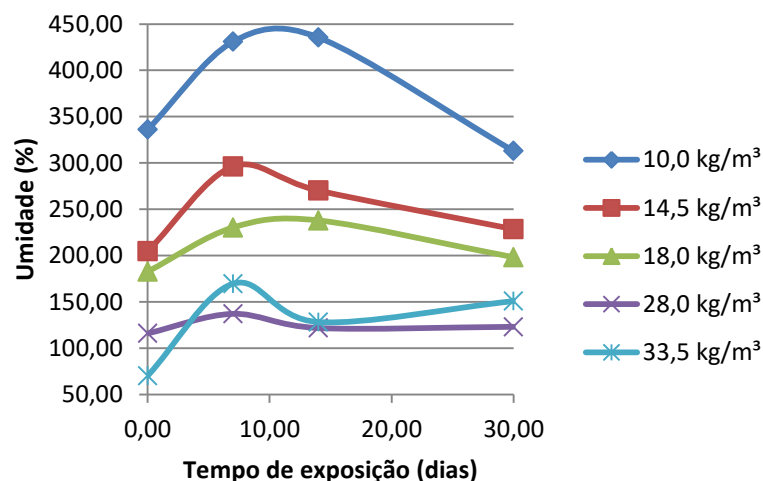
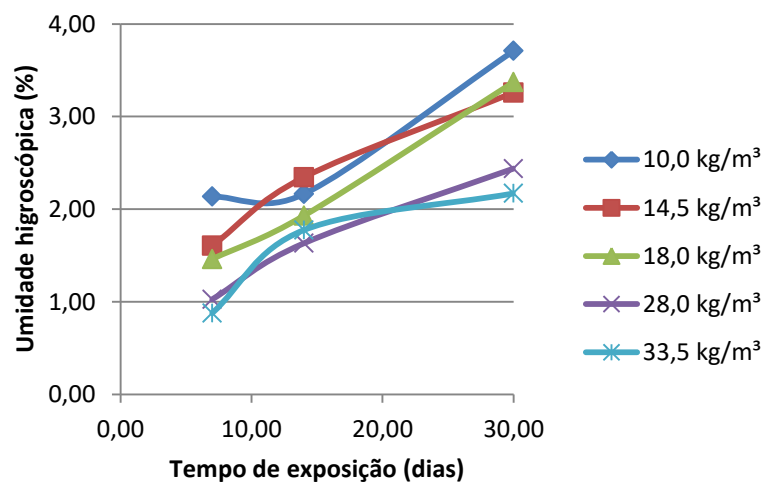


Figura 65 - Relação entre umidade higroscópica após saturação e tempo de exposição



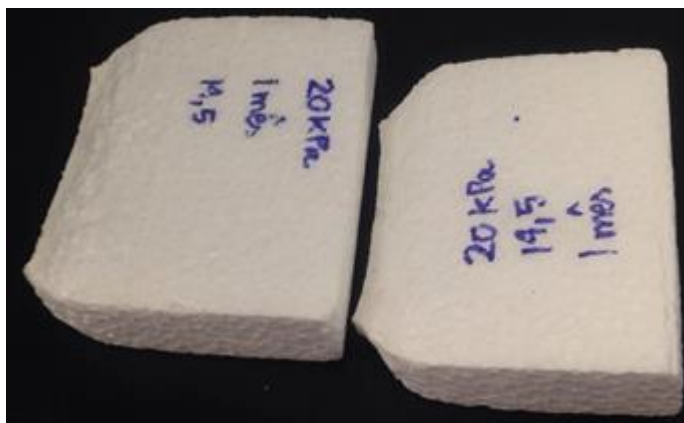
O gráfico da figura 64 mostra que a maioria das massas específicas seguem uma tendência de comportamento, onde a absorção aumenta nos primeiros dias de degradação e diminui ao final do período de observação. Isto poderia ser aliado ao fato de que o vapor de gasolina degrada a superfície do EPS de maneira a fechar as células superficiais, diminuindo a absorção ao longo do tempo. Entretanto, quando analisada a figura 65, observou-se que todas as amostras aumentaram sua capacidade de absorção da umidade do



ambiente com o aumento do período de exposição, o vai de encontro à hipótese levantada neste parágrafo.

Qualitativamente, observou-se que o vapor de gasolina causou deformação e diminuição do volume das amostras. Algo que impossibilitou a execução de alguns ensaios. Este fenômeno pode ser visualizado na figura 66.

Figura 66 – Efeito da exposição de corpos de prova ao de vapor de gasolina



### 5.3.2 Ensaio de Compressão Axial

As Tabelas 40, 41 e 42 apresentam, respectivamente, aos ensaios realizados após 7, 14 e 30 dias de exposição dos corpos de prova ao vapor de gasolina.

Tabela 40 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (7 dias – vapor de gasolina)

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_e$ (kPa)	$\epsilon_e$ (%)	$E_e$ (kPa)	$\sigma_p$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%)	$E_p$ (kPa)
10,0	25,00	5,50	454,55	60,00	30,00	125,00
14,5	35,00	3,04	1151,32	84,21	30,00	145,00
18,0	50,43	2,84	1775,70	118,65	30,00	165,00
28,0	105,37	2,58	4084,11	185,03	30,00	225,00
33,5	140,00	3,07	4560,26	240,83	30,00	300,00

Tabela 41 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (14 dias – vapor de gasolina)

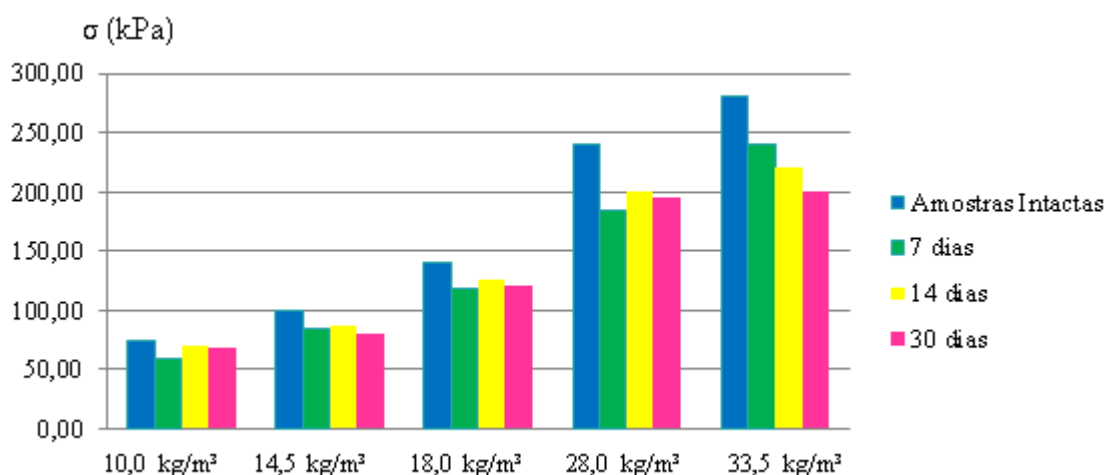
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_e$ (kPa)	$\epsilon_e$ (%)	$E_e$ (kPa)	$\sigma_p$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%)	$E_p$ (kPa)
10,0	25,00	3,58	698,32	70,00	30,00	135,00
14,5	40,00	4,45	898,88	87,50	30,00	162,50
18,0	60,00	5,03	1192,84	125,48	30,00	200,00
28,0	125,00	4,50	2777,78	200,93	30,00	250,00
33,5	135,93	3,73	3644,24	220,71	30,00	250,00

Tabela 42 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (30 dias – vapor de gasolina)

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_e$ (kPa)	$\epsilon_e$ (%)	$E_e$ (kPa)	$\sigma_p$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%)	$E_p$ (kPa)
10,0	25,92	3,73	694,91	69,12	30,00	130,00
14,5	35,00	4,95	707,07	80,43	30,00	200,00
18,0	60,00	6,32	949,37	120,73	30,00	200,00
28,0	105,00	3,48	3017,24	195,26	30,00	250,00
33,5	110,00	7,58	1451,19	200,16	30,00	300,00

Os dados de resistência das amostras intactas e amostras expostas (considerando-se a resistência  $\sigma_p$ ) em vapor de gasolina, aos 7, 14 e 30 dias, foram organizados no gráfico da figura 67, de maneira a se observar a relação entre tempo de exposição, massa específica e resistência.

Figura 67 - Valores de resistência uniaxial - amostras intactas x vapor de gasolina



Notou-se que a exposição do material ao vapor de gasolina gerou redução da resistência das amostras de todas as massas específicas, para as massas específicas de 28 e

33,5 kg/m<sup>3</sup> essa redução foi mais expressiva. Este resultado era algo já esperado visto que o material foi exposto a um ambiente hostil do ponto de vista da vida útil.

No entanto, nesse caso, é importante ter-se cuidado na avaliação desses parâmetros. Os valores mostrados na figura 67 servem apenas para comparação do efeito degradativo considerando-se uma deformação na ordem de 30%.

Deve ficar claro, portanto, que esses valores obtidos servem apenas para essa pesquisa não podendo ser de utilização para projetos e/ou algo semelhante. Além disso, seria interessante reproduzir o experimento para aprofundar-se o estudo do efeito do vapor de gasolina no EPS.

De maneira análoga ao item 5.2.2, também foi estudada a evolução do módulo de elasticidade do material, quando exposto ao vapor de gasolina, conforme mostra a tabela 43. Com os valores da tabela, foi possível obter os gráficos das figuras 68 e 69, para os módulos de elasticidade nas fases elástica ( $E_e$ ) e plástica ( $E_p$ ).

Tabela 43 - Evolução do módulo de elasticidade no regime elástico para amostras expostas ao vapor de gasolina

Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	$E_e$ (kPa)				$E_p$ (kPa)			
	Intactas	7 dias	14 dias	30 dias	Intactas	7 dias	14 dias	30 dias
10,0	1191,30	454,55	698,32	65,09	140,00	125,00	135,00	130,00
14,5	1344,52	1151,32	898,88	128,08	145,00	145,00	162,50	200,00
18,0	2565,82	1775,70	1192,84	148,86	225,00	165,00	200,00	200,00
28,0	4945,72	4084,11	2777,78	147,03	275,00	225,00	250,00	250,00
33,5	5585,26	4560,26	3644,24	125,14	340,00	300,00	250,00	300,00

Figura 68- Evolução do Módulo de Elasticidade na fase elástica no período de exposição ao vapor de gasolina

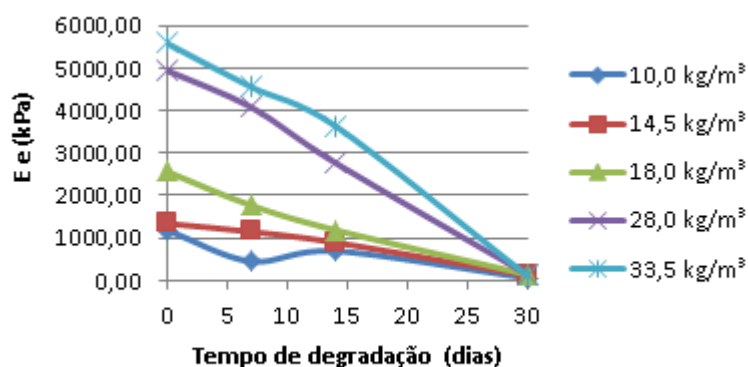
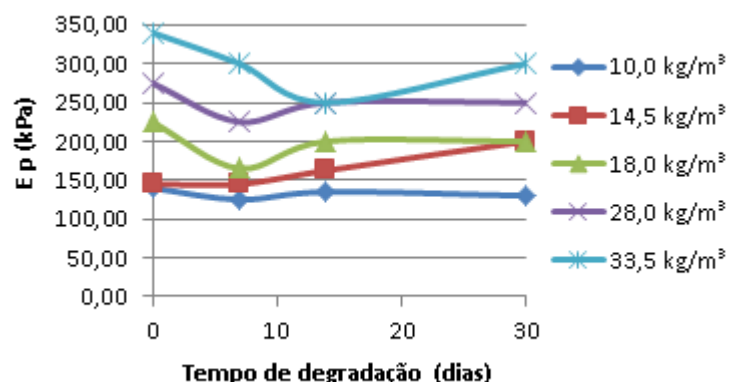


Figura 69 - Evolução do Módulo de Elasticidade na fase plástica no período de exposição ao vapor de gasolina

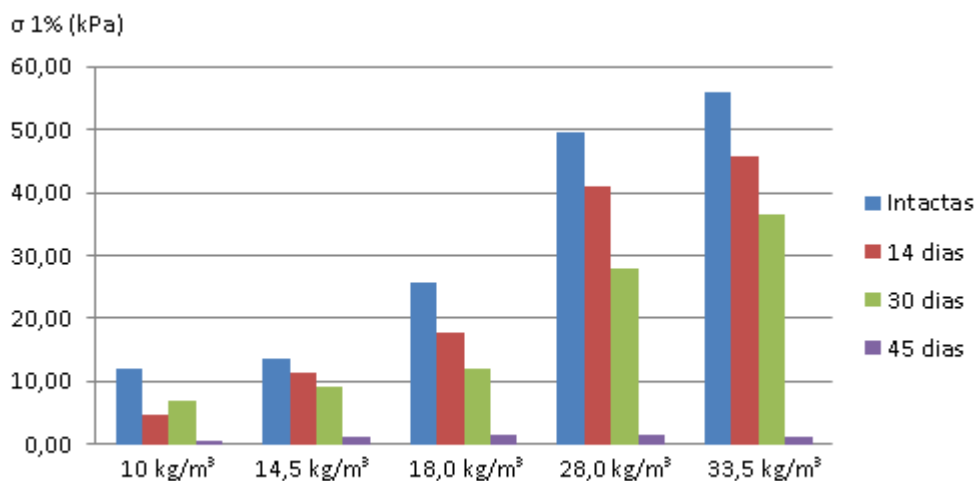


Diferentemente das amostras degradadas por intempéries, a figura 68 evidenciou que o vapor de gasolina causa uma grande redução do módulo de elasticidade do material, o tornando menos rígido podendo inclusive agravar eventuais problemas de recalque quando o material estiver trabalhando na fase elástica. Novamente observou-se que as amostras de 28 e 33,5 kg/m<sup>3</sup> foram as mais afetadas neste aspecto.

Todavia, na fase plástica, (figura 69) observou-se uma variação do módulo de elasticidade. De maneira a não ser possível estabelecer um padrão de comportamento, algo que também foi evidenciado na figura 49. Ainda assim, notou-se que as amostras de massa específica 33,5 kg/m<sup>3</sup> foram as que sofreram maior redução de seus valores.

De maneira análoga ao item 5.2.2, também foi estudada aqui a evolução da resistência a compressão uniaxial para uma deformação de 1% ( $\sigma_1$ ), os resultados foram apresentados no gráfico da figura 70.

Figura 70 - Evolução da Resistência para deformação de 1% em amostras expostas ao vapor de gasolina



O gráfico acima evidencia de maneira mais contundente, a severidade do problema, deixando explícita a importância de se ter uma boa impermeabilização do material EPS em obras onde por ventura ele possa vir a ter contato com vapores de gasolina ou outros líquidos hidrocarbonetos. Enfatiza-se novamente que os valores apresentados aqui não tem qualquer serventia para dimensionamento de projetos.

Do ponto de vista qualitativo, a figura 71 apresenta dois corpos de prova, antes do ensaio (direita) e após o ensaio (esquerda). Nota-se que a face que ficou mais próxima da lâmina de gasolina sofreu uma variação dimensional, variação esta, que é percebida com maior evidência na amostra que passou por ensaio. Outro fato a ser relatado, é que devido à deformação aplicada atingir a fase plástica, a amostra sofreu uma alteração volumétrica permanente, com redução dos vazios e densificação do material.

Figura 71 - Corpos de prova expostos ao vapor de gasolina, antes e após ensaio de compressão



### 5.3.3 Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface

De maneira análoga ao item 5.2.3, foram feitos os gráficos comparativos entre amostras intactas e expostas para uma mesma massa específica. Os períodos de degradação foram de 7, 14 e 30 dias. Entretanto, não foi possível a realização de ensaios com amostras após 30 dias em função da degradação ocorrida. Várias tentativas de ajuste das peças do equipamento foram feitas, porém todas as tentativas não tiveram sucesso. A figura 72 exemplifica uma amostra degradada após 30 dias com excesso de variação dimensional.

Figura 72 - Corpos de prova degradados após 30 dias após exposição ao vapor de gasolina



As figuras 73 a 77 ilustram os valores das máximas tensões cisalhantes para cada tensão confinante a qual foram submetidas cada uma das massas específicas em cada período de exposição.

Figura 73 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 10,0 kg/m<sup>3</sup>

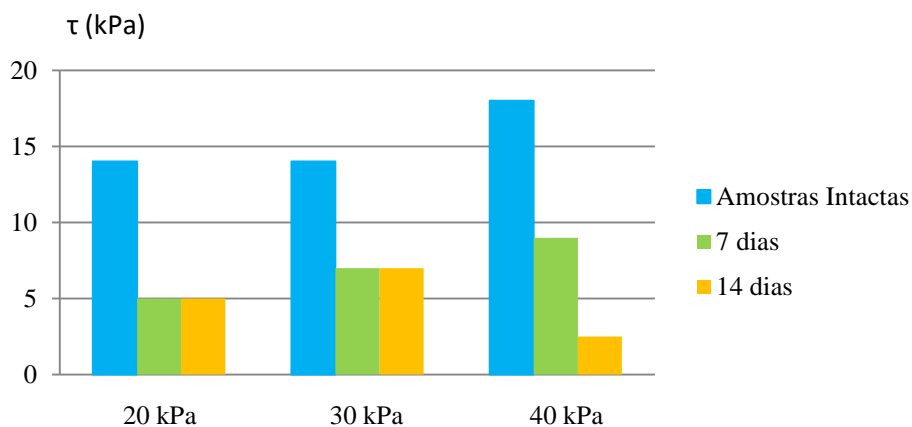


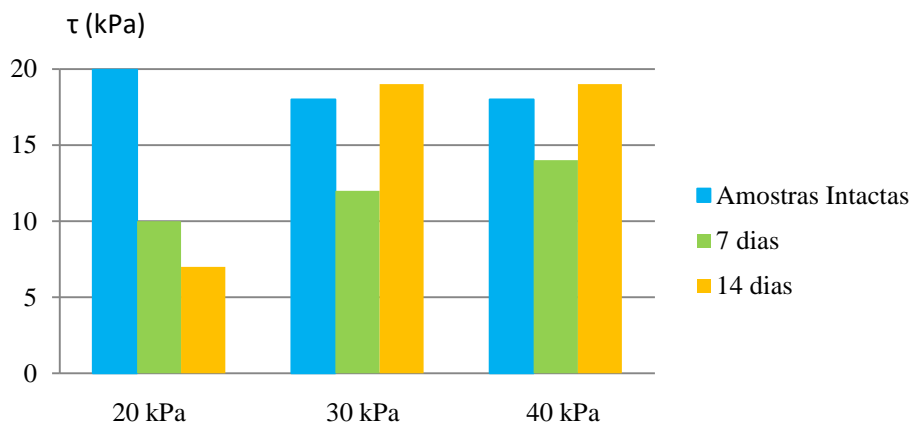
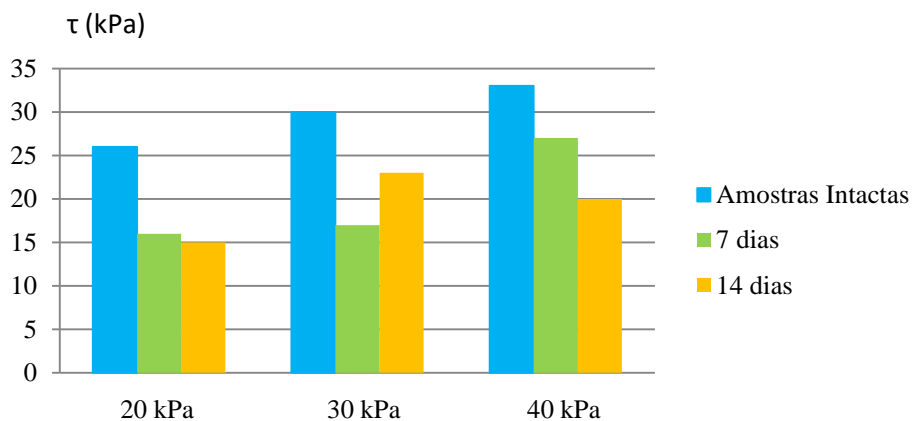
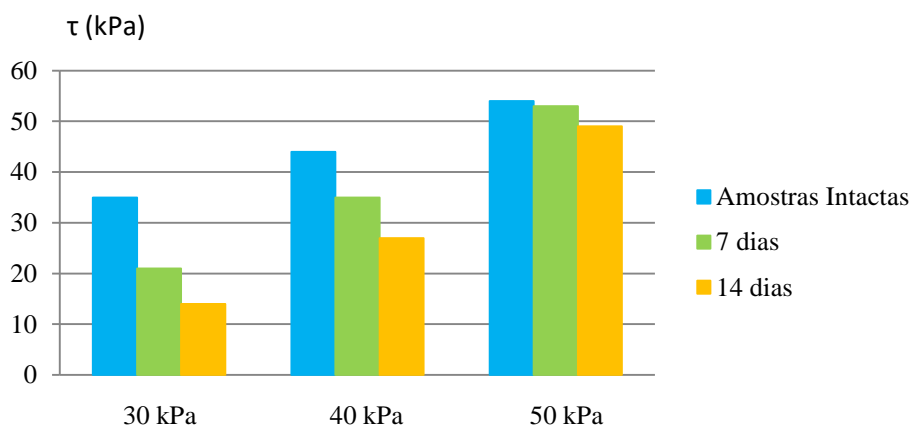
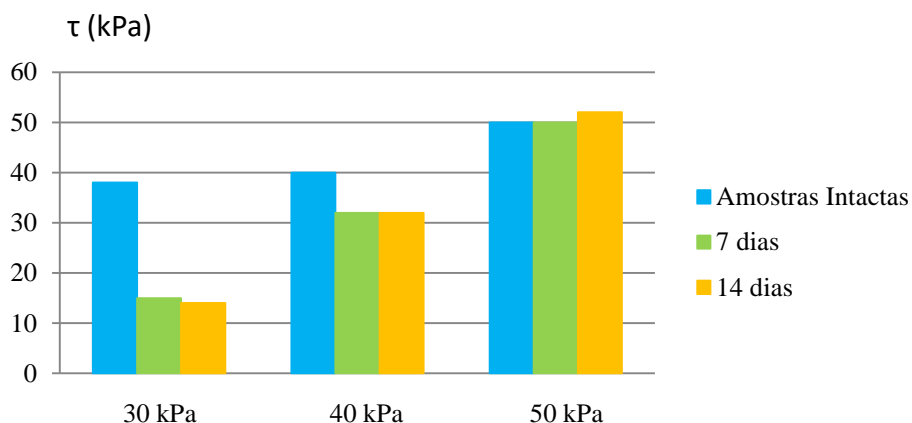
Figura 74 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 14,5 kg/m<sup>3</sup>Figura 75 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 18,0 kg/m<sup>3</sup>Figura 76 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 28,0 kg/m<sup>3</sup>

Figura 77 – Tensões cisalhantes máximas em diferentes períodos - 33,5 kg/m<sup>3</sup>

Com exceção de algumas amostras de massas específicas de 14,5 e 33,5 kg/m<sup>3</sup>, os ensaios demonstraram em sua maioria, que a exposição ao vapor de gasolina causa uma redução da resistência ao cisalhamento do EPS. Algo que não ficou tão evidente nas amostras expostas à intempérie que passaram pelo mesmo ensaio.

De maneira análoga às amostras expostas às intempéries, foram analisadas as amostras expostas ao vapor de gasolina para deformação de 1%. Os resultados estão expressos nas tabelas de 44 a 48 e ilustrados nos gráficos das figuras 78 a 82.

Tabela 44 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 10,0 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	τ 1% (kPa)			
	Intactas	7 dias	14 dias	30 dias
20,0	2,00	1,50	1,80	-
30,0	3,50	0,10	0,40	-
40,0	3,50	1,50	1,00	-

Tabela 45 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 14,5 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	τ 1% (kPa)			
	Intactas	7 dias	14 dias	30 dias
20,0	7,00	3,50	1,00	-
30,0	5,00	4,50	5,50	-
40,0	7,00	2,00	3,50	-



Tabela 46 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 18,0 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	$\tau$ 1% (kPa)			
	Intactas	7 dias	14 dias	30 dias
20,0	1,00	2,50	8,00	-
30,0	4,00	5,50	8,00	-
40,0	4,00	2,75	1,00	-

Tabela 47 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 28,0 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	$\tau$ 1% (kPa)			
	Intactas	7 dias	14 dias	30 dias
30,0	7,50	10,00	2,00	-
40,0	7,50	10,00	0,50	-
50,0	7,50	10,00	13,00	-

Tabela 48 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 33,5 kg/m<sup>3</sup>

Tensão Confinante (kPa)	$\tau$ 1% (kPa)			
	Intactas	7 dias	14 dias	30 dias
30,0	8,50	5,00	6,50	-
40,0	8,50	10,00	2,50	-
50,0	8,50	15,00	14,00	-

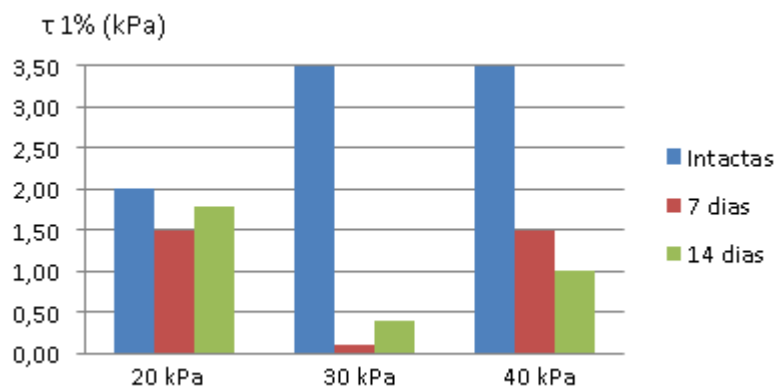
Figura 78 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 10,0 kg/m<sup>3</sup>

Figura 79 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 14,5 kg/m<sup>3</sup>

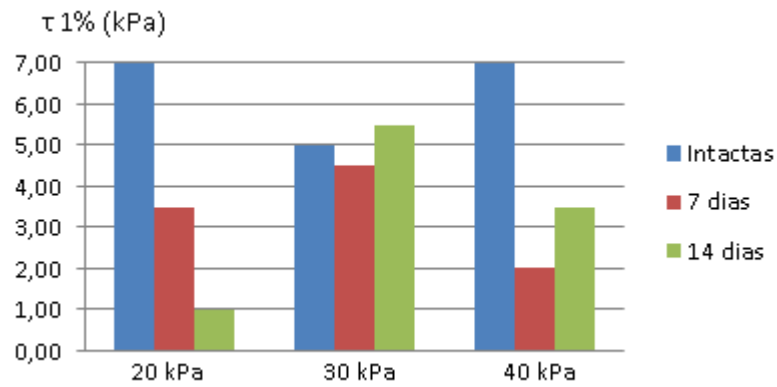


Figura 80 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 18,0 kg/m<sup>3</sup>

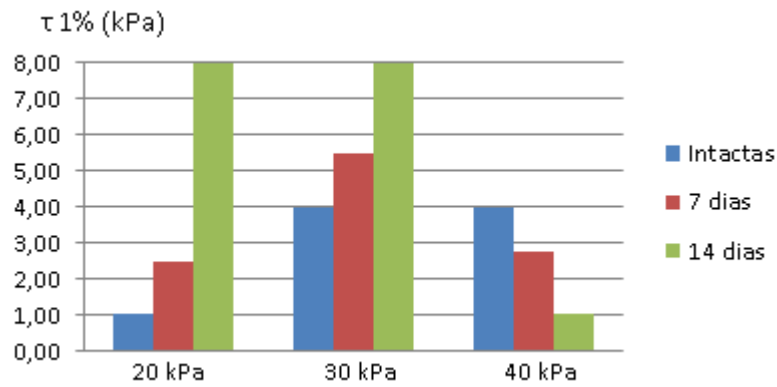


Figura 81 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 28,0 kg/m<sup>3</sup>

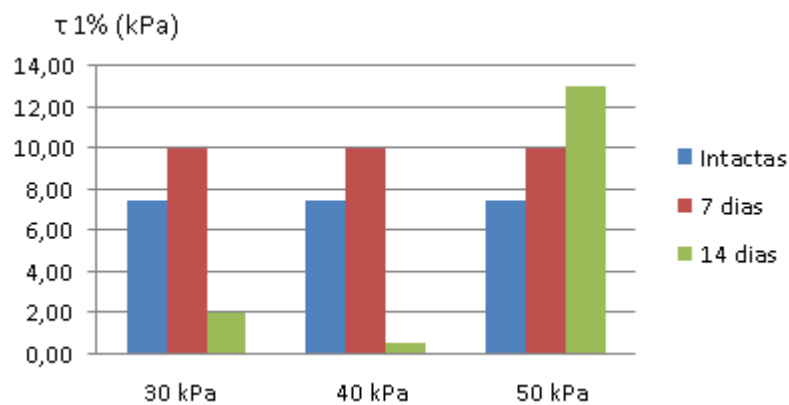
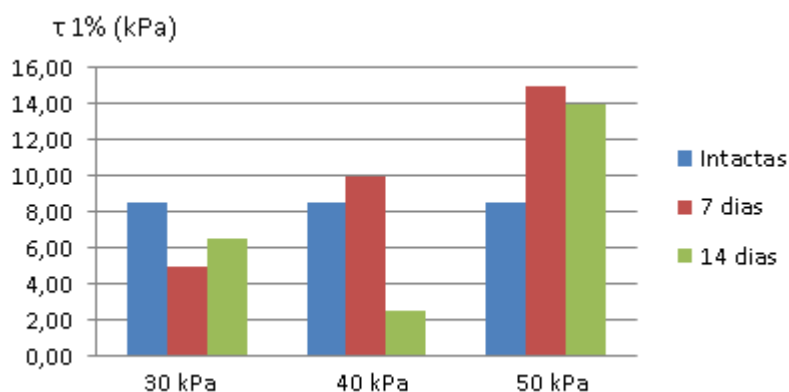


Figura 82 - Tensões cisalhantes à deformação de 1% em diferentes períodos – 33,5 kg/m<sup>3</sup>

Conforme os resultados apresentados acima, observa-se que no regime elástico (deformação de 1%), não se pode estabelecer um padrão para a exposição das amostras ao vapor de gasolina, isto pode ser atrelado ao fato de que as amostras sofreram grande deformação das seções transversais durante o período de exposição. Fazendo com que algumas amostras ora tivessem resistência maior, ora menor em relação às amostras intactas.

## 5.4 Envoltórias de Resistência

Fazendo uma analogia com a Mecânica dos Solos, com os pares de tensão (normal e cisalhante), foi obtida a envoltória de tensões de maneira a possibilitar a obtenção dos parâmetros de resistência (ângulo de atrito e coesão) por meio de uma equação obtida por linha de tendência. Foram utilizados os valores das máximas tensões de cisalhamento de cada ensaio. Os gráficos das figuras de 83 a 88 são referentes às amostras intactas e expostas.

Figura 83 – Envoltórias de resistência para amostras intactas

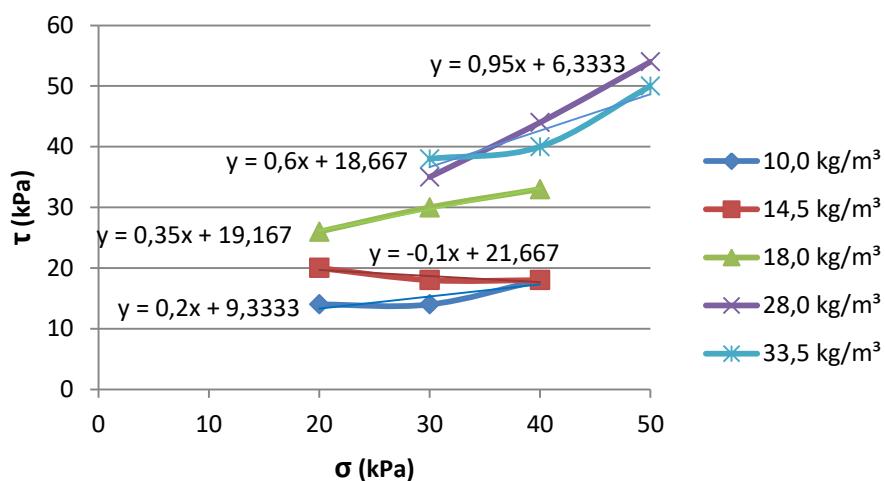


Figura 84 – Envoltórias de resistência para amostras expostas à intempérie após 14 dias

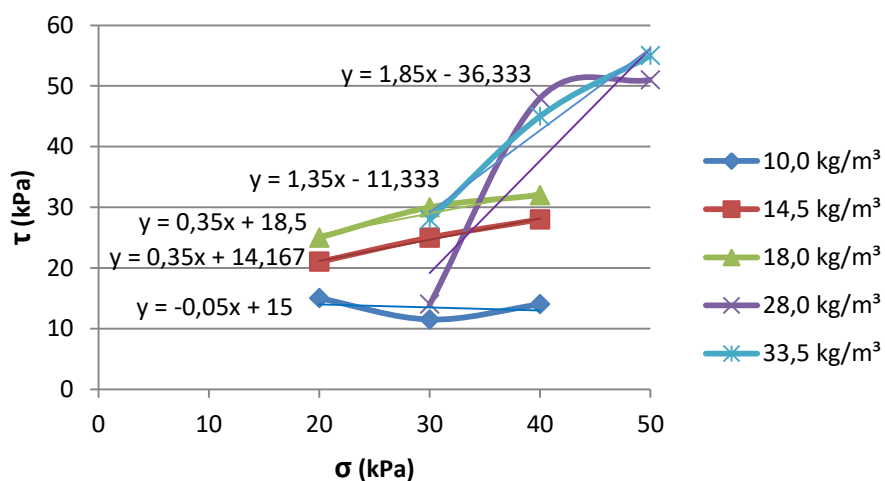


Figura 85 – Envoltórias de resistência para amostras expostas à intempérie após 30 dias

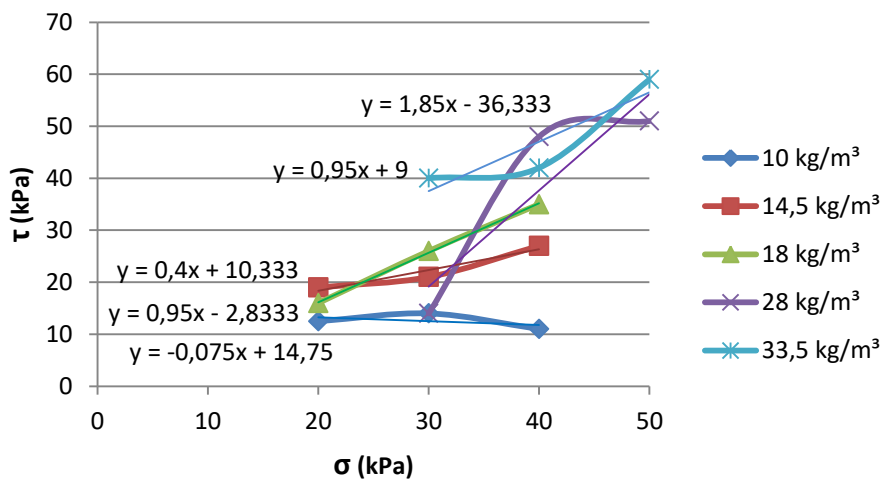


Figura 86 – Envoltórias de resistência para amostras expostas à intempérie após 45 dias

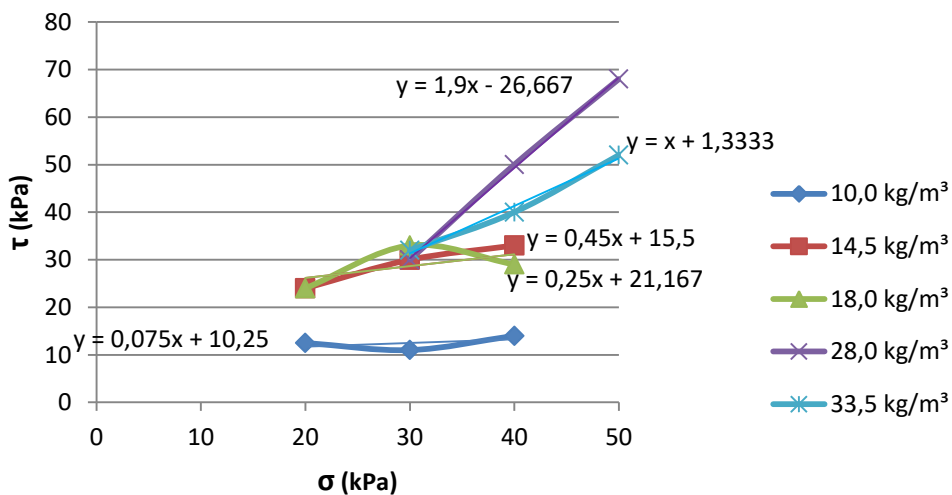


Figura 87 – Envoltórias de resistência para amostras expostas ao vapor de gasolina após 7 dias

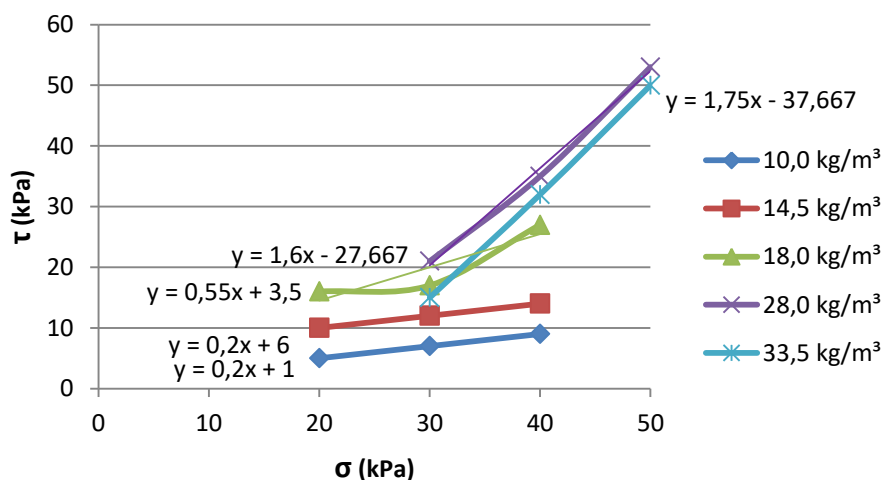
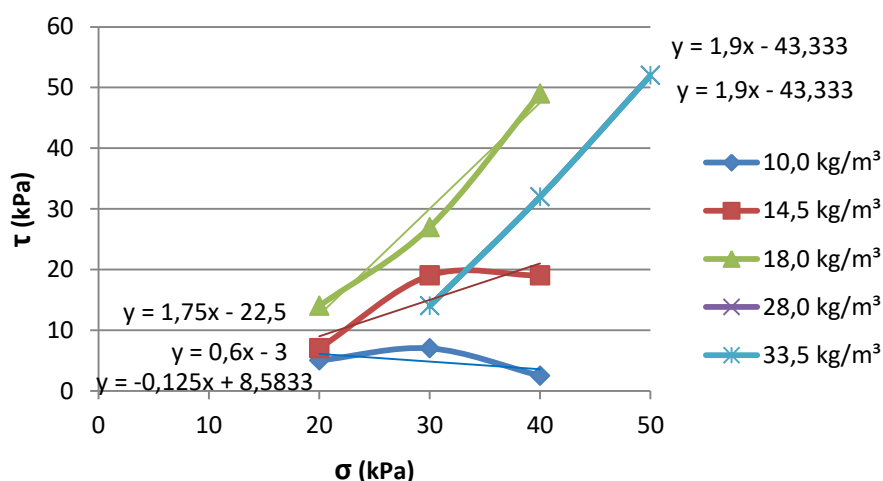


Figura 88 – Envoltórias de resistência para amostras expostas ao vapor de gasolina após 14 dias



De maneira geral, percebe-se que os parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno sofreram alteração pelos dois tipos de exposição. Entretanto, a coesão foi mais afetada após as exposições, principalmente para as amostras expostas ao vapor de gasolina.

Os valores de ângulo de atrito das massas específicas de 28 e 33,5 kg/m³ mantiveram-se sempre os maiores valores em relação às demais densidades mesmo após os processos de exposição. Observou-se que a coesão é um parâmetro mais significativo para amostras de 10, 14,5 e 18 kg/m³ e o ângulo de atrito, para amostras de 28 e 33,5 kg/m³.

Algo importante a ser mencionado é que, a analogia feita entre o critério de Mohr-Coulomb utilizado na Mecânica dos Solos e os valores aqui obtidos para o EPS fizeram

sentido apenas quando foram analisadas às amostras intactas. Pois para as amostras que sofreram exposição, notou-se que não foi possível obter todos os parâmetros de resistência.

A tabela 49 apresenta um resumo comparativo dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) relativo às figuras de 83 à 88 e evidencia o que foi mencionado no parágrafo anterior.

Tabela 49 – Valores dos parâmetros de resistência para os ensaios de cisalhamento direto

Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Intactas		Intempérie						Vapor de gasolina			
			14 dias		30 dias		45 dias		7 dias		14 dias	
	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)
10,0	9,33	11,30	15,00	2,86	14,75	4,29	10,25	4,29	1,00	11,30	8,58	7,12
14,5	21,67	5,70	14,16	19,29	10,33	21,8	15,5	24,22	6,00	11,30	-	30,96
18,0	19,17	19,29	18,50	19,29	-	43,53	21,26	14,03	3,50	28,81	-	60,25
28,0	6,33	43,53	-	61,60	-	61,6	-	62,24	-	57,99	-	62,24
33,5	18,67	30,96	-	53,47	9,00	43,53	1,33	45,00	-	60,25	-	62,24

c = coesão; φ = ângulo de atrito

## 6 CONCLUSÃO

Diante dos ensaios realizados com amostras intactas e expostas, algumas conclusões foram elencadas como as principais e de maior importância:

- Em relação à absorção de água, para ambos os tipos de exposição, o EPS apresenta comportamento similar, de forma que a absorção é inversamente proporcional à massa específica. A umidade higroscópica aumentou ao longo do tempo para as amostras expostas ao vapor de gasolina, entretanto, pouco variou após exposição à intempérie;
- No que tange à resistência uniaxial, esta é diretamente proporcional à massa específica considerando-se as amostras intactas. Em relação aos processos de exposição, notou-se que para as amostras expostas às intempéries, tanto as resistências obtidas com deformação de 30%, como às com deformação de 1%, apresentaram valores hora acima e hora abaixo em relação às amostras intactas. Já as amostras expostas ao vapor de gasolina, mesmo com uma certa variação de seus valores ao longo do tempo, tanto as resistências obtidas com deformação de 30%, como às com deformação de 1%, apresentaram sempre valores abaixo da resistência das amostras intactas. Sendo que para os valores obtidos na deformação a 1%, esta queda na resistência ficou claramente evidente.
- Quanto aos ensaios de cisalhamento direto, considerando-se as amostras intactas, nota-se que o ângulo de atrito exerce maior influência para as maiores massas específicas (28 e 33,5 kg/m<sup>3</sup>) enquanto que a coesão é predominante para as demais. Para as amostras expostas às intempéries, notou-se que, baseando-se na resistência máxima obtida nos ensaios, hora esta era maior e hora menor, que as resistências das amostras intactas, gerando dificuldade de interpretação deste resultado. Entretanto, quando analisadas as resistências para deformação de 1%, notou-se uma tendência ao aumento da resistência em relação às resistências de amostras intactas. Para as amostras expostas ao vapor de gasolina, os resultados foram inversos, analisando as resistências no momento da ruptura, notou-se uma tendência de diminuição da mesma ao longo do tempo, quando comparada com a resistência da amostra intacta. Já para amostras analisadas com deformação de 1%, os valores sofreram grande variação em relação às resistências das amostras intactas. Algo em comum nos dois casos é que a exposição do EPS causou degradação de sua superfície, isto fez que em alguns casos esta degradação aumenta-se a rugosidade, causando um incremento de resistência, entretanto, em outros casos, não apenas a superfície, mas



também a sessão transversal foi degradada, comprometendo a resistência do material e a confiabilidade do ensaio.

- De forma geral, avaliando-se qualitativamente e fazendo-se uma análise global dos resultados quantitativos, notou-se que os efeitos da exposição ao vapor de gasolina foram mais danosos ao material.
- Para estudos futuros, recomenda-se que o material seja exposto a estas situações (intempérie e vapor de gasolina) por um maior período de tempo, e que ao menos cinco amostras sejam utilizadas para cada ensaio realizado, de maneira a se ter uma confiabilidade maior dos resultados. Sobretudo, deve-se tomar uma atenção especial aos ensaios de cisalhamento direto, descartando às amostras que tenham tido as dimensões de sessão transversal comprometidas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AABOE, Roald. Evidence of EPS long term performance and durability as a light weight fill. Vegteknisk avdeling, 2000.
- 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.
- ABINT. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Comitê Técnico Geotêxtil – CTG. Ed. Blucher. São Paulo. 430 p, 2004.
- ABRAPEX (Associação Brasileira do Poliestireno Expandido). Características. Disponível em <<http://www.abrapex.com.br>>. Acesso em 28 fev, 2019.
- ABU-HEJLEH, N.M., ZORNBERG, J.G., ELIAS, V., WATCHARAMONTHEIN, J. Design assessment of the founders/meadows GRS abutment structure. In: Proceedings of TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM, 2003.
- ACEPE (Associação Industrial de Poliestireno Expandido). Disponível em <<http://www.acepe.pt>>. Acesso em 13 mar, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C 272 – 2001 Standard Test Method for Water Absorption of Core Materials for Structural Sandwich Constructions. *West Conshohocken*, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D3080 – 2011 *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions*. *West Conshohocken*, 2011.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1621 – 2016 *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics*. West Conshohocken, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D5321 – 2017 *Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear*. West Conshohocken, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 10318-1: Geossintéticos — Termos e Definições, Rio de Janeiro, 2018. 9 p.
- 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 retaining walls by EPS geofoam buffers – numerical parametric study. In: CD Proceedings of 2007 Geosynthetics Conference, Washington DC, USA, p. 15., 2007.
- ATHANASOPOULOS, G. A.; XENAKI, V. C. Experimental investigation of the mechanical behavior of EPS Geofoam under static and dynamic/cyclic loading. In: 4th international conferences on geofoam blocks in construction application (EPS 2011 Norway). 2011.
- 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, José Orlando. Caracterização do comportamento geotécnico do EPS através de ensaios mecânicos e hidráulicos. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- BARTLETT, S.F., BRET N. LINGWALL, B.N., VASLESTAD, J. Methods of protecting buried pipelines and culverts in transportation infrastructure using EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 43, p. 450-461, 2015.
- 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.
- BEJU, Y. Z.; MANDAL, J. N. Expanded polystyrene (EPS) geofoam: preliminary characteristic evaluation. *Procedia engineering*, v. 189, p. 239-246, 2017.
- CHAUHAN, R. S. et al. Thermal decomposition of expanded polystyrene in a pebble bed reactor to get higher liquid fraction yield at low temperatures. *Waste management*, v. 28, n. 11, p. 2140-2145, 2008.

- CHUMBHALE, Vilas Ramdas et al. Catalytic degradation of expandable polystyrene waste (EPSW) over mordenite and modified mordenites. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, v. 222, n. 1-2, p. 133-141, 2004.
- CHUN, Byung Sik et al. Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geof foam under triaxial compression tests. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 22, n. 4, p. 223-237, 2004.
- 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, 1998.
- ELRAGI, A. Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geof foam. Ph.D. thesis, State University of New York, Syracuse, NY, 2006.
- FRYDENLUND, T.E. Expanded Polystyrene-a Lighter Way Across Soft Ground. Internal Report No. 1502. Norwegian Road Research Laboratory, Solo, 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. J.; KERSULIS, V. I.; VAITKUS, S. I. Predicting the deformability of expanded polystyrene in long-term compression. *Mechanics of Composite materials*, v. 41, n. 5, p. 407-414, 2005.
- GNIP, I. Y. et al. Water absorption of expanded polystyrene boards. *Polymer testing*, v. 25, n. 5, p. 635-641, 2006.
- GNIP, Ivan et al. Confidence intervals of prediction and synthesis of prediction estimates for deformability of expanded polystyrene in long-term compression. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 7, p. 1390-1398, 2007.
- HORVATH J. S. Expanded Polystyrene (EPS) Geof foam: An Introduction to Material Behavior. *Geotextiles and Geomembranes*. n. 13, p. 263 – 280, 1994.
- HORVATH, J. S. The compressible inclusion function of EPS geof foam. *Geotextiles and Geomembranes* 15, 77–120, 1997.
- HORVATH J. S. Concepts for Cellular Geosynthetics Standards with an Example for EPS-Block Geof foam as Lightweight Fill for Roads. Manhattan College Research Report No. CGT-2001-4. Manhattan College, New York – USA. 92 p. 2001
- HORVATH, J. S. Extended Veletsos-Younan model for geof foam compressible inclusions behind rigid, non-yielding earth-retaining structures. In: *Proceedings of the 4th*

Decennial Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, Sacramento, California, May 18–22, 2008.

- HUANG K, Tang L, Zhu Z, Ying W (2006) Continuous distribution kinetics for degradation of polystyrene in sub- and supercritical toluene. *J Anal Appl Pyrolysis* 76:186–190.
- INSTITUTO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS. Disponível em: (<http://www.ipmet.unesp.br/>). Acesso em 22 set, 2018.
- JAFARI, H. Mechanical and Hydraulic Behavior of Geosynthetic Aggregate Drainage Systems and the Effectiveness of Geofom 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.
- JIAO, Lingling et al. Kinetics and volatile products of thermal degradation of building insulation materials. *Thermochimica acta*, v. 547, p. 120-125, 2012.
- JUTKOFISKY, W.S., THE, S.J., NEGUSSEY, D. Stabilization of embankment slope with geofom. *Transportation Research Record* 1736, 94–102, 2000.
- KANNAN, Pravin et al. Kinetics of thermal decomposition of expandable polystyrene in different gaseous environments. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, v. 84, n. 2, p. 139-144, 2009.
- KARADUMAN, Ali et al. Thermal degradation of polystyrene wastes in various solvents. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, v. 62, n. 2, p. 273-280, 2002.
- KOERNER, R. M., *Design com Geossintéticos - 6ª Edição Vol. 1* (p. 77). Bloomington: Xlibris, 2012.
- KRUNDAEVA, Anastasiia et al. Dynamic compressive strength and crushing properties of expanded polystyrene foam for different strain rates and different temperatures. *Polymer Testing*, v. 55, p. 61-68, 2016.
- LINGWALL, Bret; BARTLETT, Steven. Full-scale testing of an EPS geofom cover system to protect pipelines at locations of lateral soil displacement. In: *Pipelines 2014* American Society of Civil Engineers. 2014.
- MAGNAN, J. P. & SERRATRICE, J. F. Propriétés mécaniques du polystyrene expansé pour ses applications en remblai routier. *Bull. liaison Lab. Ponts. Chaussées*, No. 164, 25-31, 1989.
- MADORSKY, Samuel Leo. *Thermal degradation of organic polymers*. Interscience Publishers, 1964.
- MARRADI, Alessandro; PINORI, U.; BETTI, G. The use of lightweight materials in road embankment construction. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 53, p. 1000-1009, 2012.

- 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, Benjamin L.; VALSANGKAR, Arun J. Centrifuge testing and numerical analysis of box culverts installed in induced trenches. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 47, n. 2, p. 147-163, 2010.
- 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.
- NEGUSSEY, D., SUN, M. Reducing lateral pressure by geofoam (EPS) substitution. In: International Symposium on EPS Construction Method, Tokyo, October, 1996.
- OSSA, A.; ROMO, M. P. Dynamic characterization of EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 29, n. 1, p. 40-50, 2011.
- OSSA, A.; ROMO, M. P. Confining stress influence on EPS water absorption capability. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 35, p. 132-137, 2012.
- PANDA, Achyut K.; SINGH, Raghubansh K.; MISHRA, D. K. Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 1, p. 233-248, 2010.
- PET ENG. CIVIL - UFSC. Método utiliza blocos de EPS em aterro. Disponível em: <http://pet.ecv.ufsc.br/2013/09/metodo-utiliza-blocos-de-eps-em-aterro/>. Acesso em: 17 set. 2019
- 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.
- SHIRAZI, Ali Nezhad; HAYDARIAN, Houman; NASEHI, Sayed Alireza. Shear and Compression Behaviors of Sandy and Clayey Soils Mixed with Different Sizes of Expanded Polystyrene Beads. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 36, n. 6, p. 3823-3830, 2018.

- 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.
- 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, 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.
- SUN, Liecheng; HOPKINS, Tommy; BECKHAM, Tony. Stress reduction by ultra-lightweight geofoam for high fill culvert: numerical analysis. In: 13th Great Lakes Geotechnical and Geoenvironmental Conference University of Wisconsin, Milwaukee Wisconsin Department of Transportation. 2006.
- 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 p., 2009.
- TESSARI J. Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, SC. 102p.,2006.
- TRANDAFIR, Aurelian C.; BARTLETT, Steven F.; LINGWALL, Bret N. Behavior of EPS geofoam in stress-controlled cyclic uniaxial tests. Geotextiles and Geomembranes, v. 28, n. 6, p. 514-524, 2010. TORRES, Indira S. Mejía et al. Carbonization, hydrogenation and oxidation in the thermal degradation of expanded polystyrene. Journal of materials science, v. 53, n. 3, p. 2268-2276, 2018.
- VAN DORP, T., (1988) “Expanded Polystyrene Foam as Light Fill and Foundation Material in Road Structures” International Congress on Expanded Polystyrene, Milan, Italy.
- VAN DORP, 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.
- VEYALIS, S. et al. Deformability of an expanded polystyrene EPS 200 under long-term compression. Mechanics of Composite Materials, v. 46, n. 5, p. 505-512, 2010.

- WILLIAMS, D., SNOWDON, R.A. A47 Great Yarmouth Western Bypass: Performance During the First Three Years. Contactor Report 211. Transport and Road Research Laboratory, 1990.
- XENAKI, V. C.; ATHANASOPOULOS, G. A. Experimental investigation of the interaction mechanism at the EPS geofoam-sand interface by direct shear testing. *Geosynthetics International*, v. 8, n. 6, p. 471-499, 2001.
- YANG, X., YONGXING, Z. Load reduction method and experimental study for culverts with thick backfills on roadways in mountainous regions. *China Civ. Eng. J.* vol. 38 (7), 116-121., 2005.
- ZHANG, W., LIU, B., XIE, Y. Field test and numerical simulation study on the load reducing effect of EPS on the highly filled culvert. *J. Highw. Transp. Res. Dev. China.* vol. 23 (12), 54- 57., 2006.
- ZHAO, Hongfang et al. Thermal decomposition studies of EPS foam, polyurethane foam, and epoxy resin (SLA) as patterns for investment casting; analysis of hydrogen cyanide (HCN) from thermal degradation of polyurethane foam. *International Journal of Metalcasting*, v. 13, n. 1, p. 18-25, 2019.
- 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.; LEO, C. J.; SMALL, J. C. Behaviour of EPS Geofoam as Flexible Pavement Subgrade Material in Model Tests. *Geosynthetics International*, v. 7, n. 1, p. 1-22, 2000.