José Orlando Avesani Neto

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DO EPS ATRAVÉS DE ENSAIOS MECÂNICOS E HIDRÁULICOS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Orientado: Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno

São Carlos

2008

Aos meus pais por tudo que me propiciaram
Aos meus irmãos pelo companheirismo
Aos meus avós e tios pelo exemplo e apoio
Aos meus amigos pelas "horas extras"
À Paula pela dedicação e carinho

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno pela oportunidade, orientação e companheirismo.

À Escola de Engenharia de São Carlos, ao Departamento de Geotecnia e ao Laboratório de Geossintéticos pela oportunidade e infra-estrutura.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos.

À empresa Termotécnica pelo fornecimento de todas as amostras utilizadas nesta pesquisa.

Ao CAASO presente em momentos significantes por todo o meu capítulo de vida em São Carlos

Ao “seisteto” que se encontrou no mestrado de 2006 em São Carlos deixando muitos momentos e saudades.

Aos amigos de Sanca, sejam eles de republicas por onde morei, ou simplesmente “passei”, de graduação, de mestrado, do CAASO, de bares e butecos, de futebol, de academia, ou simplesmente de lugar nenhum que cruzaram minha vida.

Aos amigos de Sampa, com quem passei infância e adolescência de quem a amizade até hoje se cultiva.

Aos amigos de Parma, por onde deixei companheiros inestimáveis.

Aos amigos espalhados “por ai”, das viagens, festas, carnavais, jogos, torneios, baladas, passagens, etc.

Aos técnicos e estagiários do Geossintéticos: Clever, Silvio, Laciel, Richard, Daniel, Marcus, Walter; da Geotecnia: Zé Luis (*War*), Dito e Oscar; aos funcionários: Maristela, Álvaro, Neiva, Herivelto e Toninho.

Aos professores que auxiliaram no crescimento intelectual e acadêmico.

À minha família por todo apoio e incentivo.

“Lembre-se de que você mesmo é o melhor secretário de sua tarefa, o mais eficiente propagandista de seus ideais, a mais clara demonstração de seus princípios, o mais alto padrão do ensino superior que seu espírito abraça e a mensagem viva das elevadas noções que você transmite aos outros.

Não se esqueça, igualmente, de que o maior inimigo de suas realizações mais nobres, a completa ou incompleta negação do idealismo sublime que você apregoa, a nota discordante da sinfonia do bem que pretende executar, o arquiteto de suas aflições e o destruidor de suas oportunidades de elevação - é você mesmo."

Psicografada por Francisco Cândido Xavier

"Nada é mais sedutor para um homem que sua liberdade de consciência.

Entretanto, nada lhe causa mais sofrimento."

DOSTOIEVSKY

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ix

LISTA DE TABELAS xxiv

RESUMO xxvi

ABSTRACT xxviii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 30

1.1 Objetivos 32

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 33

2.1 Introdução 33

2.2 O Material EPS 34

2.2.1 Matéria Prima do EPS 35

2.2.2 Processo de Fabricação do EPS 36

2.2.2.1 Pré-Expansão 36

2.2.2.2 Armazenamento Intermediário 37

2.2.2.3 Moldagem 38

2.2.3 Massa Específica 39

2.2.4 Durabilidade 41

2.2.5 Compatibilidade com Outros Materiais 42

2.2.6 Impactos Ambientais 43

2.3 Geoexpandido 44

2.3.1 Motivos da Utilização do Geoexpandido 45

2.3.2 Aplicações do Geoexpandido 47

2.4 Compressão do Geoexpandido de EPS 51

2.4.1 Influência do Formato da Amostra 52

2.4.2 Influência da Dimensão da Amostra 53

2.4.3 Influência da Taxa de Aplicação de Carga 53

2.4.4 Influência da Absorção de Água 56

2.4.5 Influência da Massa Específica 57

2.4.6 Influência da Temperatura 61

2.5 Geoexpandido de EPS sobre Solicitação Cíclica 62

2.6 Solicitação Triaxial sobre o Geoexpandido de EPS 69

2.7 Cisalhamento do Geoexpandido de EPS 71

2.7.1 Cisalhamento Interno 71

2.7.2 Cisalhamento de Interface (junta) 71

2.8 Fluência do Geoexpandido de EPS 76

2.8.1 Fatores que Influenciam na Fluência 77

2.8.1.1 Tipo do Polímero 78

2.8.1.2 Nível de Carregamento 78

2.8.1.3 Tempo de Carregamento 81

2.8.1.4 Temperatura 82

2.8.1.5 Massa Específica 83

2.8.1.6 Confinamento 84

2.8.1.7 Formato e Dimensões das Amostras 84

2.9 Absorção de Água do Geoexpandido de EPS 85

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS 88

3.1 Introdução 88

3.2 Materiais Utilizados 89

3.3 Ensaio de Compressão Simples 91

3.4 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclica 94

3.5 Ensaio de Compressão Triaxial 96

3.6 Ensaio de Cisalhamento Direto 99

3.6.1 Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface (Junta) 100

3.6.2 Ensaio de Cisalhamento Direto Interno 103

3.7 Ensaio de Fluência por Compressão 105

3.8 Ensaio de Absorção de Água 108

3.9 Ensaio de Permeabilidade 111

3.10 Ensaio de Empuxo 114

3.11 Ensaio de Perda de Massa por Ataque de Roedores 116

CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 120

4.1 Introdução 120

4.2 Amostras de EPS 120

4.3 Ensaio de Compressão Simples 127

4.3.1 Influência da Velocidade de Execução 134

4.3.2 Influência das Dimensões da Amostra 135

4.3.3 Influência da Variação da Temperatura 136

4.4 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclica 139

4.5 Ensaio de Compressão Triaxial 145

4.6 Ensaio de Cisalhamento Direto 161

4.6.1 Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface (Junta) 162

4.6.2 Ensaio de Cisalhamento Direto Interno 178

4.7 Ensaio de Fluência por Compressão 187

4.8 Ensaio de Absorção de Água 193

4.8.1 Influência das Dimensões das Amostras 198

4.9 Ensaio de Permeabilidade **200**

4.10 Ensaio de Empuxo de Água **202**

4.11 Ensaio de Perda de massa por Ataque de Roedores **203**

4.12 Resumo das Relações com a Massa Específica **206**

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES ***211***

5.1 Sugestões para Pesquisas Futuras **216**

REFERÊNCIAS ***219***

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pré-expansão do PS (ABRAPEX 2006) 37

Figura 2.2 – PS antes e depois da pré-expansão. (ABRAPEX 2006)..... 38

Figura 2.3 – Moldagem de um bloco de EPS (ABRAPEX 2006) 39

Figura 2.4 – Correlações obtidas com a massa específica (BASF, 1991) . 40

Figura 2.5 – Exemplo de aplicação de EPS na construção de estradas. (ACEPE 2006)..... 48

Figura 2.6.a e Figura 2.6.b – Exemplos de obras com geoexpandido. Cabeceira de ponte e muro de contenção. (ABRAPEX 2006). 49

Figura 2.7 – Curva tensão x deformação do EPS 51

Figura 2.8 – Ensaios obtidos com amostras cilíndricas 3:1 de EPS (BUENO 2005) 53

Figura 2.9.a e Figura 2.9.b – Tensão x deformação do EPS para diferentes velocidades de aplicação de deformação (DUSKOV 1997)..... 55

Figura 2.10 – Tensão x deformação para amostras secas e molhadas para diferentes velocidades de aplicação de deformação (DUSKOV 1997)..... 56

Figura 2.11 – Curva Tensão x Deformação para diferentes valores de massa específica. (ABRAPEX 2006). 58

Figura 2.12 – Correlação entre módulo de elasticidade e massa específica (HORVATH 1994). 59

Figura 2.13 – Regressão do módulo de elasticidade em relação a massa específica do EPS (DUSKOV 1997) 60

Figura 2.14 – Variação da resistência à compressão com a temperatura (YEO & HSUAN, 2006) 62

Figura 2.15 – Histerese do EPS sobre carregamento cíclico axial (ATHANASAPOULOS *et al.,* 1999) 63

Figura 2.16 – Variação do módulo de elasticidade dinâmico com a amplitude da deformação axial cíclica (ATHANASAPOULOS *et al.,* 1999) 64

Figura 2.17 – Ensaio uniaxial cíclico para o EPS de 15 kg/m³ (DUSKOV, 1997) 65

Figura 2.18 - Ensaio uniaxial cíclico para o EPS de 20 kg/m³ (DUSKOV, 1997) 66

Figura 2.19 – Módulo de elasticidade dinâmico para o EPS de 15 kg/m³ (DUSKOV, 1997) 67

Figura 2.20 - Módulo de elasticidade dinâmico para o EPS de 20 kg/m³ (DUSKOV, 1997) 67

Figura 2.21 - Ensaio cíclico em amostra de EPS de 10 kg/m³ com limite de deformação de 1% (BUENO 2005) 68

Figura 2.22 – Ensaio cíclico em amostra de EPS de 13 kg/m³ (STARK *et al.*, 2004) 69

Figura 2.23 – Triaxial com amostras de EPS para diferentes tensões confinantes (WONG E LEO, 2006) 70

Figura 2.24 – Ensaio de cisalhamento do contato entre amostras de EPS e de geomembrana de PEAD (STARK *et al.,* 2004) 73

Figura 2.25 – Envoltória do ensaio de cisalhamento do contato entre amostras de EPS e de geomembrana de PEAD 74

Figura 2.26 – Prendedor metálico para blocos de geoexpandido de EPS . 75

Figura 2.27 – Envoltória e mecanismo de cisalhamento de interface de blocos de EPS (STARK *et al.* 2004) 75

Figura 2.28 – Envoltórias para as resistências ao cisalhamento de pico e residual do contato entre amostras de EPS e de geomembrana de PEAD (STARK *et al.* 2004) 76

Figura 2.29 – Curvas típicas de fluência do EPS. (a) linear. (b) log do tempo (DUSKOV, 1997) 77

Figura 2.30 – Resultados de ensaio de fluência por compressão em amostras de EPS com 10 kg/m³ (BUENO 2005) 79

Figura 2.31 – Deformação para diferentes níveis de carregamento (BEINBRECH & HILLMANN, 1997) 80

Figura 2.32 – Influência do tempo de carregamento no ensaio de fluência. (Adaptado de HORVATH, 1994) 81

Figura 2.33 – Acréscimo da resistência na fluência por compressão do EPS com o aumento da massa específica (ACEPE 2006). 83

Figura 2.34 – Comparação de fluência de diferentes tipos de corpos de prova (STARK *et. al.*, 2004) 85

Figura 2.35 - Absorção de água x tempo do EPS de 20 kg/m³ (DUSKOV, 1997) 86

Figura 2.36 – Absorção de água x tempo do EPS para diferentes valores de massa específica (ACEPE 2006). 87

Figura 3.1a e Figura 3.1b – Estruturas macro e microscópica das amostras de EPS 90

Figura 3.2 – Ensaio de compressão uniaxial 92

Figura 3.3 – Amostras utilizadas na compressão uniaxial 93

Figura 3.4a e 3.4b – Caixa para o controle de temperatura 93

Figura 3.5 – Prensa utilizada no ensaio de compressão cíclica 95

Figura 3.6 - Amostras utilizadas no ensaio de compressão cíclica 96

Figura 3.7 – Dimensões e forma das amostras de EPS utilizadas no ensaio triaxial 97

Figura 3.8 – Câmara triaxial utilizada 97

Figura 3.9 – Etapas de preparação das amostras para o ensaio triaxial .. 98

Figura 3.10 – Equipamento utilizado no ensaio triaxial 98

Figura 3.11 – Prensa de ensaio de cisalhamento direto 100

Figura 3.12a, b, c e d – Etapas de preparação para o ensaio de cisalhamento direto de interface 101

Figura 3.13 – Dimensões das amostras para o ensaio de cisalhamento direto de interface 102

Figura 3.14 – Etapas de preparação para o ensaio de cisalhamento direto interno 104

Figura 3.15 - – Dimensões das amostras para o ensaio de cisalhamento direto interno 105

Figura 3.16 – Bancada metálica utilizada no ensaio de fluência por compressão convencional 106

Figura 3.17 – Detalhe do relógio comparador para a determinação dos deslocamentos na fluência por compressão convencional 106

Figura 3.18 – Conjunto para a execução do ensaio de fluência por compressão convencional..... 107

Figura 3.19 - Amostra utilizada no ensaio de fluência por compressão convencional 108

Figura 3.20 – Ensaio de absorção de água..... 110

Figura 3.21 - Amostras utilizadas no ensaio de absorção de água 110

Figura 3.22 – Etapas de montagem da câmara de ensaio de permeabilidade 112

Figura 3.23 – Câmara do ensaio de permeabilidade pronta para a realização do ensaio 113

Figura 3.24 – Tubos para a medição da carga hidráulica 113

Figura 3.25 - Amostra utilizada no ensaio de permeabilidade..... 114

Figura 3.26 – Ensaio de empuxo na amostra de EPS de 30 kg/m³ 115

Figura 3.27 - Amostra utilizada no ensaio de empuxo 116

Figura 3.28 – Camundongo utilizado no ensaio de perda de massa..... 117

Figura 3.29a e Figura 3.29b – Indivíduo com privação total e com privação de palha, respectivamente 118

Figura 3.30 - Amostra utilizada no ensaio de perda de massa por roedores 119

Figura 4.1 – Resultado do ensaio DSC em alguns polímeros (QMC) 123

Figura 4.2 – Resultado do ensaio DSC em amostra de EPS reciclado.... 124

Figura 4.3 - Resultado do ensaio DSC em amostra de EPS virgem..... 124

Figura 4.4 – Resultado do ensaio DSC para ambas as amostras 125

Figura 4.5 - Resultado do ensaio de TGA em amostra de EPS recicado. 126

Figura 4.6 - Resultado do ensaio de TGA em amostra de EPS virgem... 126

Figura 4.7 - Resultado do ensaio de TGA em ambas amostras de EPS.. 127

Figura 4.8 - Resultado do ensaio de compressão uniaxial da amostra de EPS de 30 kg/m³ 129

Figura 4.9 - Relação entre resistência ao cisalhamento (correspondente a deformação de 10%) e massa específica para diversas amostras de EPS 131

Figura 4.10 - Relação entre resistência ao cisalhamento (correspondente a deformação de 1%) e massa específica para diversas amostras de EPS 132

Figura 4.11 - Relação entre o módulo de elasticidade na fase elástica do material e sua massa específica para diversas amostras de EPS..... 133

Figura 4.12 - Relação entre a tensão de transição da fase elástica para a fase plástica do material e sua massa específica para diversas amostras de EPS..... 133

Figura 4.13 - Relação entre o módulo tangente da fase de endurecimento do material e sua massa específica para diversas amostras de EPS 134

Figura 4.14 – Resistência para uma deformação de 10 % pela taca de aplicação de carga 135

Figura 4.15 – Resistência ao cisalhamento para uma deformação de 10 % pela dimensão das amostras cúbicas de EPS..... 136

Figura 4.16 – Resistência de amostras de EPS para diferentes valores de temperaturas 137

Figura 4.17 - Influência da temperatura nas amostras de 20 e 30 kg/m³ em relação a resistência de 23 ºC 138

Figura 4.18 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 30 kg/m³ 139

Figura 4.19 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 20 kg/m³ 140

Figura 4.20 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 17 kg/m³ 140

Figura 4.21 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 14,5 kg/m³ 140

Figura 4.22 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 10 kg/m³ 141

Figura 4.23 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 10 kg/m³ com material reciclado 141

Figura 4.24 – Deformação acumulada do EPS de 30 kg/m³ 142

Figura 4.25 – Deformação acumulada do EPS de 20 kg/m³ 142

Figura 4.26 – Deformação acumulada do EPS de 17 kg/m³ 143

Figura 4.27 – Deformação acumulada do EPS de 14,5 kg/m³ 143

Figura 4.28 – Deformação acumulada do EPS de 10 kg/m³ 143

Figura 4.29 – Deformação acumulada do EPS de 10 kg/m³ com material reciclado 144

Figura 4.30 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 40 kg/m³. 145

Figura 4.31 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 40 kg/m³ 146

Figura 4.32 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 40 kg/m³ 146

Figura 4.33 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 40 kg/m³..... 147

Figura 4.34 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 30 kg/m³. 147

Figura 4.35 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 30 kg/m³ 148

Figura 4.36 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 30 kg/m³ 148

Figura 4.37 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 30 kg/m³..... 149

Figura 4.38 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 20 kg/m³. 149

Figura 4.39 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 20 kg/m³ 150

Figura 4.40 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 20 kg/m³ 150

Figura 4.41 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 20 kg/m³..... 151

Figura 4.42 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 10 kg/m³. 151

Figura 4.43 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³ 152

Figura 4.44 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³ 152

Figura 4.45 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³..... 153

Figura 4.46 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 10 kg/m³ reciclado 153
Figura 4.47 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³ reciclado 154
Figura 4.48 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³ reciclado 154
Figura 4.49 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³ reciclado 155
Figura 4.50 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 40 kg/m³..... 157
Figura 4.51 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 30 kg/m³..... 157
Figura 4.52 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 20 kg/m³..... 158
Figura 4.53 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 10 kg/m³..... 158
Figura 4.54 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 10 kg/m³ contendo material reciclado 159
Figura 4.55 – Relação entre a coesão do material pela tensão confinante (envoltórias) 160
Figura 4.56 – Relação entre resistência triaxial do material para uma deformação de 10 % e a massa específica 161
Figura 4.57 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 10 kg/m³ com material reciclado 163

Figura 4.58 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 10 kg/m³ 163

Figura 4.59 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 20 kg/m³ 164

Figura 4.60 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 30 kg/m³ 164

Figura 4.61 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 40 kg/m³ 165

Figura 4.62 – Comparação entre amostras de baixa e alta massa específica ensaiadas no cisalhamento direto 166

Figura 4.63 – Envoltória do EPS de 10 kg/m³ (reciclado) no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 5 mm 167

Figura 4.64 - Envoltória do EPS de 10 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 5 mm..... 167

Figura 4.65 – Envoltória de pico do EPS de 20 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface 168

Figura 4.66 - Envoltória de pico do EPS de 30 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface 168

Figura 4.67 - Envoltória de pico do EPS de 40 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface 169

Figura 4.68 – Relação do ângulo de atrito de pico médio pela massa específica, e sua correlação 170

Figura 4.69 – Envoltórias de pico das amostras ensaiadas no cisalhamento direto da junta..... 171

Figura 4.70 - Envoltórias de pico das amostras ensaiadas no cisalhamento direto da junta gerada por aproximação linear 172
Figura 4.71 - Envoltória do EPS de 10 kg/m³ reciclado no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm..... 173
Figura 4.72 - Envoltória do EPS de 10 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm 173
Figura 4.73 - Envoltória do EPS de 20 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm 174
Figura 4.74 - Envoltória do EPS de 30 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm 174
Figura 4.75 - Envoltória do EPS de 40 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm 175
Figura 4.76 – Envoltórias das amostras ensaiadas no cisalhamento direto da junta para um deslocamento de 15 mm..... 176
Figura 4.77 - Envoltórias das amostras ensaiadas no cisalhamento direto da junta para um deslocamento de 15 mm, gerada por aproximação linear 177
Figura 4.78 - Relação do ângulo de atrito médio para deslocamento de 15 mm pela massa específica, e sua correlação 178
Figura 4.79 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto em amostras de EPS de 10 kg/m³ 179
Figura 4.80 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto em amostras de EPS de 20 kg/m³ 179

Figura 4.81 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto em amostras de EPS de 30 kg/m³ 180
Figura 4.82 – Envoltória de resistência da amostra de 10 kg/m³ para um deslocamento de 5 mm..... 181
Figura 4.83 – Envoltória de resistência da amostra de 20 kg/m³ para um deslocamento de 5 mm..... 181
Figura 4.84 – Envoltória de resistência da amostra de 30 kg/m³ para um deslocamento de 5 mm..... 182
Figura 4.85 – Envoltórias de resistência do ensaio de cisalhamento direto para um deslocamento de 5 mm 183
Figura 4.86 – Envoltória de resistência da amostra de 10 kg/m³ para um deslocamento de 15 mm 184
Figura 4.87 – Envoltória de resistência da amostra de 20 kg/m³ para um deslocamento de 15 mm 184
Figura 4.88 – Envoltória de resistência da amostra de 30 kg/m³ para um deslocamento de 15 mm 185
Figura 4.89 – Envoltórias de resistência do ensaio de cisalhamento direto para um deslocamento de 15 mm 185
Figura 4.90 – Relação entre as coesões obtida do ensaio de cisalhamento direto e a massa específica 187
Figura 4.91 – Resultado do ensaio de fluência na compressão da amostra de 10 kg/m³..... 188
Figura 4.92 – Resultado do ensaio de fluência na compressão da amostra de 17 kg/m³..... 188

Figura 4.93 – Resultado do ensaio de fluência na compressão da amostra de 20 kg/m³ 189
Figura 4.94 – Resultado do ensaio de fluência na compressão da amostra de 30 kg/m³ 189
Figura 4.95 – Relação entre deformação e massa específica para cada carga 190
Figura 4.96 – Curvas isócronas dos ensaios com a amostra de 10 kg/m³ 191
Figura 4.97 – Curvas isócronas dos ensaios com a amostra de 17 kg/m³ 191
Figura 4.98 – Curvas isócronas dos ensaios com a amostra de 20 kg/m³ 192
Figura 4.99 – Curvas isócronas dos ensaios com a amostra de3 kg/m³ 192
Figura 4.100 - Resultado do ensaio de absorção de água com amostras de EPS com massa específica de 30 kg/m³ e formato cúbico com 50 mm de lado 194
Figura 4.101 - Resultados dos ensaios de absorção de água por submersão com amostras de EPS em relação a massa e correlação destas com a massa específica 195
Figura 4.102 - Resultados dos ensaios de teor de umidade higroscópica com amostras de EPS em relação a massa e correlação destas com a massa específica 195

Figura 4.103 - Resultados dos ensaios de absorção de água por submersão com amostras de EPS em relação ao volume e correlação destas com a massa específica 198

Figura 4.104 – Comparação da absorção de água entre diferentes dimensões de amostras cúbicas 199

Figura 4.105 - Comparação do teor higroscópico de água entre diferentes dimensões de amostras cúbicas 199

Figura 4.106 – Resultado do ensaio de permeabilidade e correlação entre esta e a massa específica..... 201

Figura 4.107 – Resultado do ensaio de empuxo submerso em água..... 202

Figura 4.108 – Resultado do ensaio de perda de massa por ataque de roedores 204

Figura 4.109 – Corpos de prova utilizados no ensaio de perda de massa por ataque de roedores..... 205

Figura 4.110 - Relações de tensões do ensaio de compressão..... 207

Figura 4.111 - Relações de módulos do ensaio de compressão..... 207

Figura 4.112 - Relações de coesão dos ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto interno 208

Figura 4.113 - Relações de ângulos de atrito do ensaio de cisalhamento de interface 208

Figura 4.114 – Relações de deformação no ensaio de fluência na compressão..... 209

Figura 4.115 - Relações de absorção de água 209

Figura 4.116 – Relação de permeabilidade 210

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Compatibilidade do EPS com diferentes materiais. (BASF 1998) 43

Tabela 2.2 – Utilizações diversas de geoexpandido de EPS. (ACEPE 2006). 50

Tabela 3.1 – Nomenclatura dos materiais utilizados no trabalho..... 89

Tabela 3.2 – Massas específicas utilizadas no ensaio à compressão uniaxial 92

Tabela 3.3 – Massas específicas utilizadas no ensaio de compressão cíclica 96

Tabela 3.4 – Massas específicas utilizadas no ensaio triaxial 99

Tabela 3.5 – Massas específicas utilizadas no ensaio de cisalhamento direto de interface..... 102

Tabela 3.6 – Massas específicas utilizadas no ensaio de cisalhamento direto interno 105

Tabela 3.7 – Massas específicas e cargas utilizadas no ensaio de fluência por compressão 108

Tabela 3.8 – Massas específicas utilizadas no ensaio de absorção de água 110

Tabela 3.9 – Massas específicas utilizadas no ensaio de permeabilidade114

Tabela 3.10 – Massas específicas utilizadas no ensaio de empuxo 115

Tabela 3.11 – Massas específicas utilizadas no ensaio de perda de massa por ataque de roedores..... 118

Tabela 4.1 – Estatística das amostras de EPS 121

Tabela 4.2 – Temperaturas de transição vítrea e de fusão de polímeros122

Tabela 4.3 – Estatística do ensaio de compressão uniaxial da amostra de EPS de 30 kg/m³ 128

Tabela 4.4 – Estatística de todos os ensaios de compressão uniaxial realizados 130

Tabela 4.5 – Relação da coesão do EPS do ensaio triaxial com a tensão de confinamento 159

Tabela 4.6 – Comparação entre resultados obtidos para valores de pico e residual 175

Tabela 4.7 – Valores dos parâmetros de resistência obtidos do ensaio de cisalhamento direto..... 186

Tabela 4.8 – Estatísticas do ensaio de absorção de água com a amostra cúbica de 50 mm de lado com massa específica de 30 kg/m³ 193

Tabela 4.9 – Acréscimo da massa específica devido a absorção de água 196

Tabela 4.10 – Resultado do ensaio de permeabilidade 200

Tabela 4.11 – Resultado do ensaio de perda de massa por ataque de roedores 203

RESUMO

AVESANI NETO, J. O. (2008). *Caracterização do Comportamento Geotécnico do EPS através de Ensaios Mecânicos e Hidráulicos.* Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 250 p.

O poliestireno expandido (EPS), conhecido popularmente no Brasil como Isopor®, foi introduzido recentemente no país como material de baixa massa específica para construções de aterros, principalmente sobre solos moles, e encontro de pontes. Contudo, ainda não há experiência consolidada deste material em ensaios do ponto de vista da engenharia geotécnica entre nós. Este trabalho apresenta os resultados da primeira pesquisa com ensaios mecânicos e hidráulicos de laboratório específicos da caracterização do EPS para o uso geotécnico. Os ensaios mecânicos compreenderam compressão uniaxial simples e cíclica, compressão triaxial, cisalhamento direto e de interface (junta) e fluência em compressão. Os ensaios hidráulicos incluíram absorção de água por imersão e permeabilidade. Um ensaio de perda de massa por ataque de roedores foi realizado de forma simples, e ensaios químicos foram feitos para estudar o polímero. As amostras ensaiadas foram escolhidas de modo a se abranger ao máximo àquelas utilizadas em obras. Tentou-se, também, antecipar a utilização de amostras não convencionais, com massas específicas elevadas e de materiais reciclados. Os resultados mostram que o EPS possui uma grande resistência a solicitações de compressão simples, cíclica e triaxial, de cisalhamento, elevado

valor de ângulo de atrito da junta e absorção de água, permeabilidade variável com a massa específica e baixo coeficiente de Poisson. Estas propriedades chave, aliado ao baixo peso específico oferecem a este material um grande potencial de aplicação como geossintético na engenharia geotécnica.

Palavras chaves: Geossintéticos, geoexpandido, *geofoam*, poliestireno expandido (EPS), ensaios de laboratório, caracterização e propriedades.

ABSTRACT

AVESANI NETO, J. O. (2008). *Characterization of Geotechnical Behavior of EPS through Mechanical and Hydraulic Tests*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 250 p.

Expanded polystyrene (EPS), in Brazil, commonly know as Isopor®, has been recently introduced in this country as lightweight material for construction of embankments on soft soils, and bridge abutments. Despite this fact, there is no consolidated experience, in Brazil, in testing this product from a geotechnical point of view. This paper presents the first research data, obtained in Brazil, on mechanical and hydraulic laboratory tests, aiming the characterization of EPS samples specifically for geotechnical use. The mechanical tests comprised simple and cyclic unconfined compression, triaxial compression, joint and direct shear and creep in compression. The hydraulic tests included water absorption by immersion and water permeability. A simple loss weight test by mice attack was also conducted. And chemical tests were done to study the polymer. The results show that EPS has a great resistance to simple, cyclic and triaxial compression and joint shear solicitation, high friction angle and water absorption, varied permeability with the density and low Poisson coefficient. These key properties with its very low density give this material large potential application for geosynthetic use in geotechnical engineering.

Key words: Geosynthetics, geofoam, expanded polystyrene (EPS), laboratory tests, characterization and properties.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O uso de geossintéticos tem se mostrado eficientes nas mais diversas áreas da Engenharia Civil, com destaque especial na Engenharia Geotécnica. Contando com distintos geossintéticos, manufaturados a partir de variados tipos de matérias primas, hoje se podem elaborar diversas soluções em problemas de engenharia tais como instabilidades de taludes, impermeabilização de áreas e reforço e melhoria de solos, por exemplo.

O uso do poliestireno expandido (EPS) e do poliestireno extrudado (XPS) na construção civil já possui uma aplicação reconhecida devido a sua alta capacidade de atuar como isolante térmico e acústico, porém, o seu emprego como geossintético (único geossintético com três dimensões) tem uma utilização mais recente. Apesar disto, tem recebido grande atenção e vem ganhando espaço devido a sua versatilidade e

adequação em determinados tipos de obras geotécnicas. Atualmente, sua utilização em maior escala ocorre no cenário exterior, com destaque em aterros sobre solos moles e base de estradas. No âmbito nacional, o emprego do EPS ainda é restrito, conseqüência da falta de trabalhos técnicos nesta área, de estudos e caracterizações do material e de normas de projeto. A obra brasileira de maior destaque é o encontro de pontes do complexo viário da cidade de Várzea Paulista (interior do estado de São Paulo).

A proposta de se estudar experimentalmente um material reside na necessidade de se conhecer parâmetros de projeto. Além disto, podem-se obter dados que permitam sua classificação. Com uma classificação sólida e sustentável, pode-se criar uma expectativa de comportamento do produto, facilitando a sua recomendação nas fases iniciais de projetos.

Apesar de se ter alguns trabalhos publicados no exterior, em âmbito nacional, o estudo do poliestireno expandido se mostra pobre, com raríssimos artigos ou textos acadêmicos sobre ensaios, propriedades de engenharia. Em especial, para a engenharia geotécnica, na qual sua utilização é prevista em diversos tipos de obras (como será citado posteriormente), esta carência é evidenciada. O Laboratório de Geossintéticos já realizou alguns ensaios com este material (entre eles compressão, fluência por compressão e compressão cíclica) para as obras do Pan Americano no Rio de Janeiro.

O presente trabalho tem, portanto, o intuito de estudar com propriedades a viabilidade de emprego do EPS fabricado no Brasil para

atender as necessidades dos projetos geotécnicos. Este é um passo inicial neste vasto campo a ser explorado pelo Laboratório de Geossintéticos, em uma nova área de estudo.

1.1 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é o estudo experimental do EPS, voltado para a sua utilização em obras de engenharia geotécnica, através da realização de ensaios de laboratório, mecânicos e hidráulicos.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta os princípios gerais e os aspectos relacionados às características e propriedades mecânicas e hidráulicas do geoexpandido (*geofoam)* de EPS. Dentre as propriedades mecânicas, serão abordadas as compressões uniaxial e triaxial, a fluência na compressão, o cisalhamento interno e de interface e a solicitação cíclica por compressão. Englobam as características hidráulicas aqui estudadas a absorção de água e a permeabilidade.

2.1 Introdução

O poliestireno expandido (EPS) possui hoje uma larga aplicação na construção civil, em especial na construção de prédios, em que as características mecânicas das placas e chapas (materiais considerados bi-

dimensionais) utilizadas nos projetos são padronizadas. Porém, há uma diferença significativa das propriedades do material quando este se encontra com geometria tri-dimensional, que é seu caso de utilização na engenharia geotécnica. O geoexpandido de EPS, quando utilizado como aterro sobre solos moles, sub-base de pavimentos, encontro de pontes e outras aplicações subterrâneas, sofre, além das ações tradicionais de compressão e confinamento, solicitações dinâmicas causadas pelo tráfego de veículos e solicitações de cargas constantes ("pesos mortos"). Estas solicitações aliadas as correntes variações de temperaturas, umidade, os períodos de chuvas causadas pelas mudanças sazonais dos paises tropicais, moldam situações extremamente complexas de solicitações o que confere aspectos particulares dos parâmetros para projetos.

2.2 O Material EPS

O poliestireno expandido (EPS) é um plástico celular rígido que pode se apresentar sobre diversas formas geométricas e pode desempenhar uma infinidade de aplicações.

EPS é a sigla internacional do Poliestireno Expandido, de acordo com a Norma DIN ISO-1043/78. No Brasil, é mais conhecido como "Isopor", marca registrada da Knauf Isopor Ltda., e designa, comercialmente, os produtos de poliestireno expandido comercializados por esta empresa.

A descoberta do EPS data de 1949 e é atribuída aos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz, que trabalhavam nos laboratórios da Basf, na Alemanha.

A utilização do material EPS industrialmente hoje abrange uma grande gama de aplicações. Seu emprego vai da agricultura até a construção civil, passando pela indústria de embalagens de eletro-eletrônicos, alimentos e bebidas, fármacos, utilitários e decorativos. Porém, é na construção civil que hoje o EPS tem se destacando devido a adequação de suas propriedades às necessidades das obras, seja pela suas características de isolante térmico, como pelo seu reduzido peso específico aliado a alta resistência e sua facilidade de manuseio.

2.2.1 Matéria Prima do EPS

A matéria prima do EPS, o polímero de poliestireno (PS), é um polímero de estireno que contém um agente expansor. Ele é obtido, a partir do petróleo, por meio de diversas transformações químicas. Apresenta-se sob a forma de pequenos grânulos capazes de expandir cerca de 50 vezes o seu volume inicial.

Em seu processo produtivo não se utiliza e nunca se utilizou o gás CFC ou qualquer um de seus substitutos. Como agente expansor para a transformação do EPS, emprega-se o pentano, um hidrocarbureto que se

deteriora rapidamente pela reação fotoquímica gerada pelos raios solares, sem comprometer o meio ambiente.

2.2.2 Processo de Fabricação do EPS

Nas empresas de fabricação de EPS, ocorre apenas transformações físicas da matéria prima (o polímero de poliestireno), não alterando suas características e propriedades físicas. O EPS apenas pode ser feito antes de sua utilização. Para uso geotécnico, a forma predominante de utilização é a de blocos prismáticos (ou seja, formas de paralelepípedos retangulares).

As transformações para a fabricação dos blocos de EPS processam-se em três etapas:

2.2.2.1 Pré-Expansão

A primeira fase de expansão do polímero de poliestireno (PS) é efetuada em um pré-expansor por um aquecimento por contato com vapor de água. O agente expansor infla o PS para um volume cerca de 50 vezes maior do que original. Deste processo, resulta um granulado de partículas de EPS constituídas por pequenas células fechadas, que é armazenado para estabilização. A Figura 2.2 mostra o processo de pré-expansão do polímero de PS pelo contato térmico com o vapor de água.

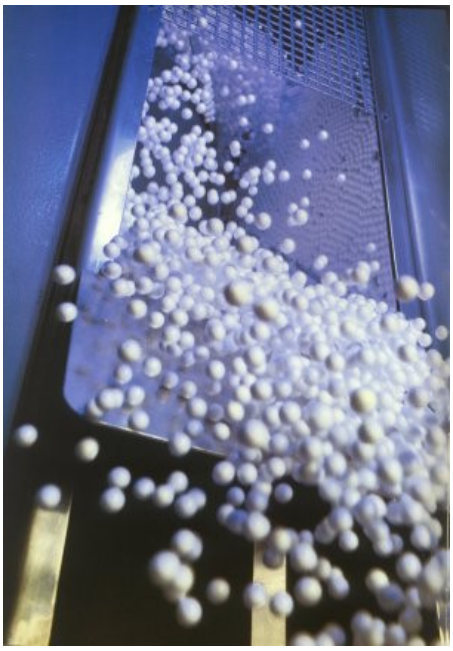


Figura 2.1 – Pré-expansão do PS (ABRAPEX 2006)

2.2.2.2 Armazenamento Intermediário

O granulado de partículas do polímero infladas no processo de pré-expansão é armazenado temporariamente para se estabilizar térmica e quimicamente.

Durante esta fase de estabilização, o material granulado resfria criando uma zona de depressão no interior das células. Ao longo deste processo, o espaço dentro das células é preenchido pelo ar circundante. Desta forma, a expansão do material se torna completa, e seu volume é aumentado ao estagio final. O armazenamento é necessário para permitir a posterior transformação do EPS de acordo com as formas necessária em

sua moldagem. Expandidas, as pérolas consistem em até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. O seu índice de vazios (e) pode chegar a valores entre 40 e 100. Em 1m³ de EPS, por exemplo, existem de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar.

A Figura 2.2 mostra a diferença de volume de um grão de PS antes e após a pré-expansão e o armazenamento intermediário.

Figura 2.2 – PS antes e depois da pré-expansão. (ABRAPEX 2006)

2.2.2.3 Moldagem

O material granulado, já estabilizado pelo armazenamento, é introduzido em moldes (com tamanhos e formas pré-definidos) e novamente aquecido por meio da exposição a vapor de água, provocando a soldagem dos grãos e obtendo desta forma um material monolítico e rígido, contendo uma grande quantidade de ar.

O tipo de regulagem do processo de fabricação (valor da expansão, geometria do molde, etc.) permite a obtenção de uma gama variada de tipos de EPS, se adaptando as mais diversas utilizações em engenharia e outras áreas.

A Figura 2.3 exemplifica o processo de moldagem de um bloco de EPS.

Figura 2.3 – Moldagem de um bloco de EPS (ABRAPEX 2006)

2.2.3 Massa Específica

Com um controle no processo de fabricação do EPS, pode se obter um produto com diferentes valores de massa específica. Os valores de massa específica podem variar aproximadamente entre 10 a 100 kg/m³ (STARK *et al.*, 2004). Contudo, na pratica é mais comum se encontrar

valores de massa específica para os blocos de EPS variando de 15 a 40 kg/m³, variando de 5 em 5 kg/m³ (HORVATH, 1994).

O rígido controle do valor da massa específica do EPS se deve a grande relevância que essa possui nas mais variadas propriedades do material, tanto mecânicas como hidráulicas. Devido esta característica, é possível obter as mais diversas correlações entre massa específica e propriedades mecânicas e térmicas, importantes para a utilização deste polímero não apenas na área geotécnica. Um exemplo das correlações que podem ser obtidas com a massa específica está exibido na Figura 2.4.

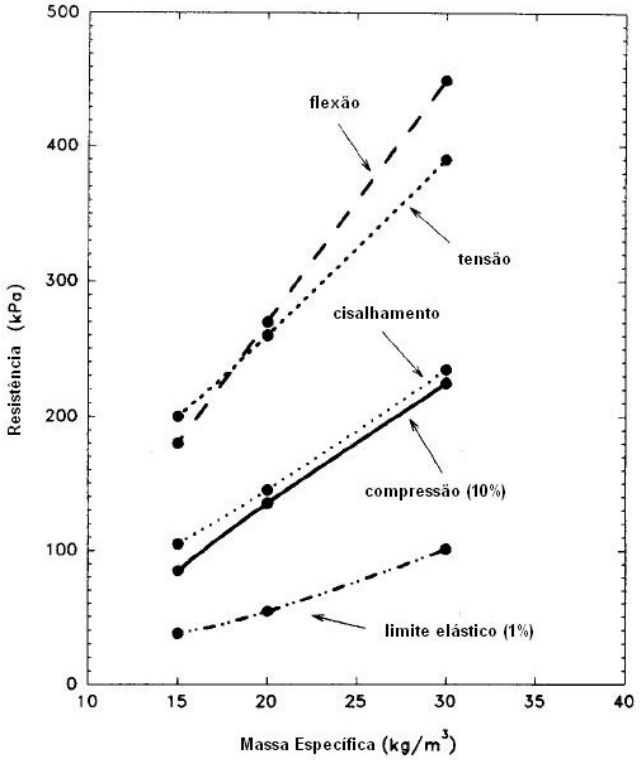


Figura 2.4 – Correlações obtidas com a massa específica (BASF, 1991)

2.2.4 Durabilidade

Por ser um polímero, não se conhece adequadamente o tempo de vida útil do EPS. No entanto, as propriedades do EPS sugerem que se corretamente aplicado, pode-se apresentar um desempenho adequado ao longo da vida útil da obra.

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. O EPS é um plástico inerte, não-biodegradável, não dissolvível, não possui valores nutritivos para abrigar microorganismos e outros animais e não é quimicamente afetado no contato com o solo e a água (BASF, 1990).

Há relativamente poucas condições nas quais o EPS necessita de proteção. Uma delas é na exposição a raios ultravioleta (UV). Em qualquer aplicação, deve ser evitada a radiação solar direta, bem como outros tipos de radiações ricas em energia que deterioram o EPS (sofre um amarelamento) por alterarem a sua estrutura química. Este processo é, porém, lento e dependente da intensidade de radiação e do tempo de exposição. Em conjunto com as intempéries o processo pode ser acelerado.

Há poucos líquidos que dissolvem o EPS. Os únicos encontrados nas aplicações mais correntes do plástico são os solventes orgânicos (derivados petrolíferos, tais como óleos, gasolina e diesel).

O poliestireno derreterá quando exposto à temperatura elevada, com valores de aproximadamente 150° C. Ele também é inflamável se uma fonte de ignição existir. Porém, como característica deste material, ao se retirar a fonte de calor, a chama se extingue (material auto-extinguível).

2.2.5 Compatibilidade com Outros Materiais

O EPS é compatível com a maioria dos materiais correntemente utilizados na construção de edifícios. No entanto, ele é sensível a alguns materiais que contenham solventes. Nestes casos terá deve se evitar o contacto ou exposição a vapores destes materiais. A estrutura celular é danificada pelos solventes sendo este processo acelerado com temperaturas elevadas.

A Tabela 2.1 exibe alguns materiais utilizados na construção civil e sua compatibilidade com o EPS. A indicação "+" é para materiais os quais o EPS possui alta resistência. Para os de baixa resistência, há a indicação "-". E a indicação "+/-" para materiais de pouca resistência.

Tabela 2.1 - Compatibilidade do EPS com diferentes materiais. (BASF 1998)

Água, água do mar, soluções de sais	+
Materiais de construção correntes (cal, cimento, gesso)	+
Soluções alcalinas	+
Ácido clorídrico 35%	+
Ácido nítrico 50%	+
Ácido sulfúrico 95%	-
Sais, adubos	+
Betumes, produtos betuminosos diluídos com água	+
Produtos betuminosos com solventes	-
Produtos asfálticos	-
Gasolina	-
Álcool	+/-
Solventes orgânicos	-
Hidratos de carbono alifáticos	-

2.2.6 Impactos Ambientais

O EPS é um material não inerente, não tóxico, não nocivo e, portanto, não perigoso. O EPS é utilizado como embalagens de produtos farmacêuticos e alimentícios, não oferecendo risco de qualquer contaminação ou dano aos materiais. No seu fabrico, os gases utilizados como agentes expansores não são prejudiciais a natureza e nem a camada de ozônio.

O EPS é um produto sintético do petróleo, assim como metais e vidro, ele deriva da natureza. Quimicamente, ele é composto por apenas dois elementos químicos (carbono e hidrogênio), portanto não possui nenhum produto tóxico ou perigoso ao ambiente ou à camada de ozônio.

A fonte de energia utilizada em seu processo de fabricação é o vapor de água, tornando sua tecnologia limpa. Além disso, o consumo de água em sua fabricação é mínimo, ou seja, o impacto é restrito. Devido ao fato de o consumo de água ser mínimo, e o produto ser limpo, esta água utilizada no processo pode ser reutilizada.

Durante o processo de manufatura, não se produz resíduos sólidos, pois os desperdícios gerados são reintroduziodos no processo. Há, praticamente, ausência também nas emissões contaminantes, pois essas são extremamente baixas e sem produção de resíduos sólidos ou líquidos.

Por fim, vale ressaltar que após sua vida útil, o EPS é totalmente reciclável, podendo ser inteiramente reutilizado.

2.3 Geoexpandido

A utilização de plásticos rígidos expandidos em obras geotécnicas se fixou de forma consistente a partir de 1960, apesar de seu estudo datar da década de 50. Posteriormente, propôs-se para estes materiais o termo *geofoam* (geoexpandido em português) dentro da classe dos geossintéticos (HORVATH, 1994).

Outros termos podem ser encontrados na literatura geotécnica para se referenciar a estes tipos de materiais, como por exemplo, *geoblock, geoboard, geoinclusion, e geosolid*.

Horvath (1994) cita algumas razões para se criar uma categoria de geossintéticos à parte para o *geofoam*:

- Nutrir reconhecimentos mais-difundidos e usos geotécnicos provados dos geossintéticos entre engenheiros civis;
- Melhorar a compreensão das propriedades de engenharia destes materiais usando o conhecimento e perspicácia ganho com o desenvolvimento de tecnologia de geossintéticos;
- Encorajar novas pesquisas em utilizações inusitadas de geossintéticos e aplicações dentro da engenharia geotécnica.

2.3.1 Motivos da Utilização do Geoexpandido

As obras de engenharia envolvem, entre outras, duas considerações: custos *versus* segurança e técnica empregada. Apesar de geoexpandido, como EPS, terem 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. Além disto, a utilização na forma

modular permite a agilização da obra pelo fato de se dispor de material nas dimensões e nas formas geométricas necessárias (HORVATH, 2004).

Dentre os inúmeros fatores que fazem do geoexpandido uma ferramenta de grande poder de utilização nas obras, citam-se:

- Valor de massa específica igual à cerca de 1% da do solo (entre 10 e 30 kg/m³);
- Elevada resistência mecânica apesar da baixa massa específica;
- Baixa absorção de água;
- Simplicidade de manuseio e de movimentação;
- Resistente quimicamente a maioria dos compostos e materiais usados correntemente na construção civil;
- Apresenta elevada vida útil;
- Não utiliza CFC ou qualquer outro gás nocivo a camada de ozônio;
- Versatilidade, podendo ser moldado em diferentes formas e dimensões;
- Não constitui substrato para fungos e outros microorganismos, nem serve de fonte de alimento para roedores;
- Não é solúvel em água.

2.3.2 Aplicações do Geoexpandido

O emprego de placas e blocos de EPS na engenharia civil possui já certo tempo de experiência, seja na sua utilização como impermeabilizante, seja como isolante térmico ou até na compensação de recalques ou deslocamentos estruturais. Contudo, sua utilização na área geotécnica não está, ainda, consolidada, embora possa atender a inúmeras aplicações com vantagens tecnológicas e econômicas.

Atualmente o maior emprego do EPS na geotecnia é em aterros sobre solo mole, principalmente na construção de estradas e rodovias, devido às suas características técnicas e à sua capacidade de permitir a agilização da obra, reduzindo prazos e custos. A sua utilização também se mostra vantajosa em outros tipos de aplicações, como encontros de pontes, aterros em encostas, flutuadores, como elemento de alivio de empuxos em muros de arrimos e taludes, fundações e proteção de infra-estrutura (galerias, tubulações).

O processo de construção de aterro com EPS é relativamente simples. Sobre o solo limpo coloca-se uma camada de areia para nivelar o perfil e receber os blocos de EPS. Os blocos são colocados em juntas de amarração, semelhante a uma parede de tijolos. Coloca-se outra camada sobre a primeira e assim sucessivamente, formando um tronco de pirâmide. Os blocos são finalmente cobertos com uma geomembrana a fim de protegê-los contra eventuais derramamentos de solventes que possam atacá-los. A base da pavimentação já pode ser preparada e nos

espaldares coloca-se terra para plantio de vegetação. Em locais alagadiços, devem-se fazer drenos no pé do aterro para evitar a ação do empuxo nos blocos. A Figura 2.5 ilustra um exemplo de um corte transversal de um aterro para uma estrada sobre solos moles.

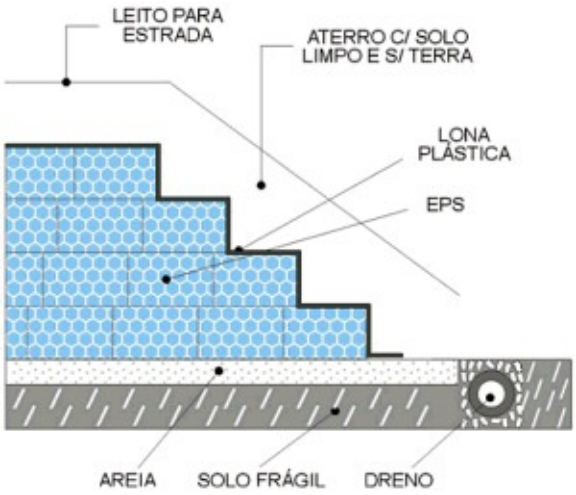


Figura 2.5 – Exemplo de aplicação de EPS na construção de estradas. (ACEPE 2006).

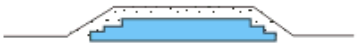
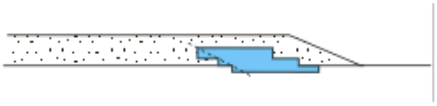
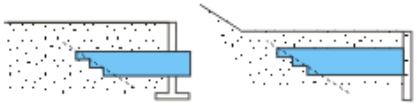
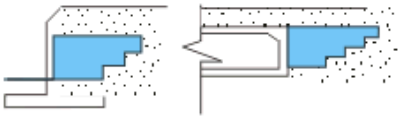
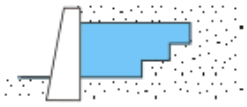
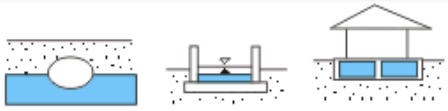
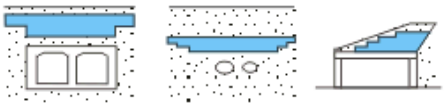
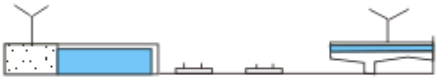
Nas cabeceiras de pontes, assim como em taludes e encostas, o uso de geoexpandido de EPS substitui com inúmeras vantagens os aterros convencionais de solo. Primeiro porque não cria esforços horizontais no tabuleiro da ponte ou na face do muro de contenção de um talude, facilitando o cálculo e reduzindo o dimensionamento da estrutura para empuxos laterais. Segundo porque não cede com o tempo, mantendo sempre o nível do aterro, evitando degraus, tão freqüentes em estradas, e recalques inoportunos em faces de muros de arrimo. A Figura 2.6.a e Figura 2.6.b exemplificam a utilização de geoexpandido em cabeceiras de

pontes e em taludes, de modo a se obter um menor empuxo lateral e se facilitar a construção da obra.

Figura 2.6.a e Figura 2.6.b – Exemplos de obras com geoexpandido. Cabeceira de ponte e muro de contenção. (ABRAPEX 2006).

Alguns outros usos de geoexpandido em obras geotécnicas podem ser visualizados na Tabela 2.2, na qual além da utilização, é mostrado um esquema ilustrativo de aplicação.

Tabela 2.2 – Utilizações diversas de geoexpandido de EPS. (ACEPE 2006).

APLICAÇÃO	ILUSTRAÇÃO
Embasamento	
Alargamento	
Encostas	
Alívio de Pressões	
Muro de Arrimo	
Fundações	
Proteção de Infra-Estrutura	
Caixão Perdido e Cabeceiras de Ponte	
Alargamento e Elevação de Pavimento	
Pistas Provisórias e Recuperação	

2.4 Compressão do Geoexpandido de EPS

O comportamento do EPS em 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 23º C e 50% de umidade relativa (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 permanente, porém, sem ruptura. A Figura 2.7 exemplifica este comportamento.

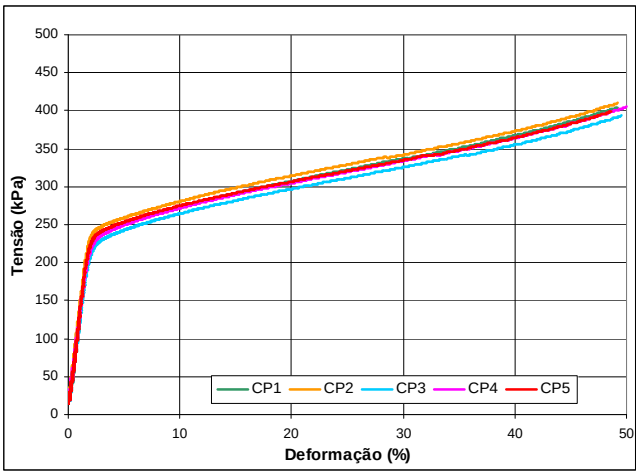


Figura 2.7 – Curva tensão x deformação do EPS

2.4.1 Influência do Formato da Amostra

Há basicamente dois tipos de corpos de provas de EPS ensaiados com mais freqüência, 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 D 1621 – 00 (que prevê amostras com área mínima de 25,8 cm², ou seja, 4 in.²).

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 a facilidade de obtenção dos corpos de prova (STARK *et al.,* 2004).

Ensaios realizados 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). A Figura 2.8 exibe os resultados obtidos com as amostras cilíndricas na proporção 3:1.

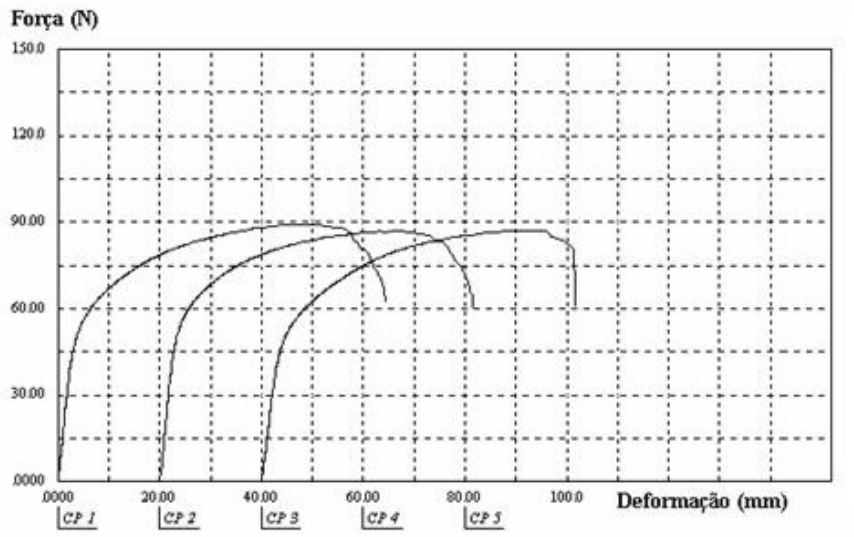


Figura 2.8 – Ensaios obtidos com amostras cilíndricas 3:1 de EPS (BUENO 2005)

2.4.2 Influência da Dimensão da Amostra

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 são conclusivos, necessitando de um estudo mais detalhado (STARK *et al.,* 2004).

2.4.3 Influência da Taxa de Aplicação de Carga

Estudos realizados mostram 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 (STARK *et al.,* 2004).

Duskov (1997) 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% (considerado o valor da deformação relativo a resistência à compressão do EPS), 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 100mm/s, que correspondem a valores de taxa de deformação de 4, 20, 200 e 2000%/min, respectivamente.

Os resultados dos ensaios efetuados com amostras secas de EPS com massa específica de 15 Kg/m³ para as quatro diferentes velocidades de ensaios estão mostrados na Figura 2.9.a. A Figura 2.9.b, exibe apenas o trecho elástico do ensaio, com deformação de até 1,0%. Cada curva apresenta a média de três corpos de prova por ensaio.

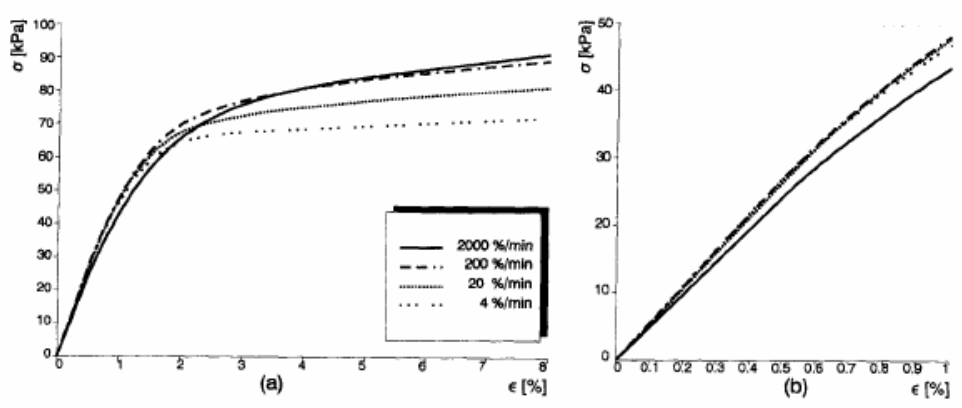


Figura 2.9.a e Figura 2.9.b – Tensão x deformação do EPS para diferentes velocidades de aplicação de deformação (DUSKOV 1997)

A comparação das curvas mostra que a velocidade de ensaio exerce uma pequena influência no comportamento do material seco para o trecho elástico (com perda de resistência para velocidades mais elevadas de deformação), e uma influência mais significativa para os valores da resistência à compressão, na deformação de 10% (com ganho de resistência com o aumento da taxa de deformação).

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, começa a escapar pelas fendas geradas na plastificação, oferecendo uma menor resistência (DUSKOV, 1997).

2.4.4 Influência da Absorção de Água

A influência da absorção de água na resistência à compressão do EPS foi estudada por Duskov (1997) por meio de ensaios em amostras cilíndricas de 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro. Foram empregados materiais em três condições distintas:

- Seco;
- Molhado;
- Por meio de tratamento de ciclos de congelamento e desgelo.

A Figura 2.10 sumariza os resultados obtidos com os ensaios de amostras secas e molhadas, para as quatro diferentes velocidades de aplicação de deformação (4, 20, 200 e 2000%/min).

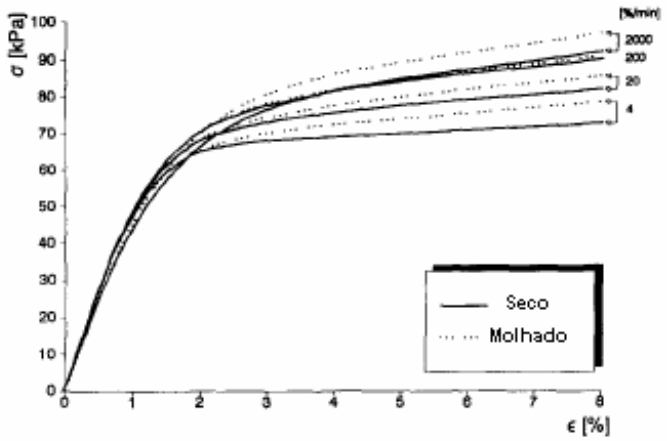


Figura 2.10 – Tensão x deformação para amostras secas e molhadas para diferentes velocidades de aplicação de deformação (DUSKOV 1997)

De acordo com a Figura 2.10, pode-se concluir que a absorção de água não imprime um comportamento deletério ao material. Pelo contrário, o material apresentou um acréscimo de resistência para todas as velocidades de ensaio realizadas. Uma explicação para este fenômeno foi dada pelo próprio autor, 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.

2.4.5 Influência da Massa Específica

É intuitivo que uma amostra de um material com uma massa específica superior apresente propriedades mecânicas também maiores se comparado às de materiais com massa específica inferior. Verificou-se que a resistência à compressão do EPS pode ser relacionada à massa específica de maneira diretamente proporcional, isto é, há uma relação linear entre a massa específica e a resistência do material.

A Figura 2.11 apresenta um gráfico de tensão *versus* deformação de ensaios de compressão uniaxial em amostras de EPS com as variações da massa específica. Nota-se que para acréscimos de mais cerca de 100% na massa específica, há um aumento significante também da resistência de mais de 100%.

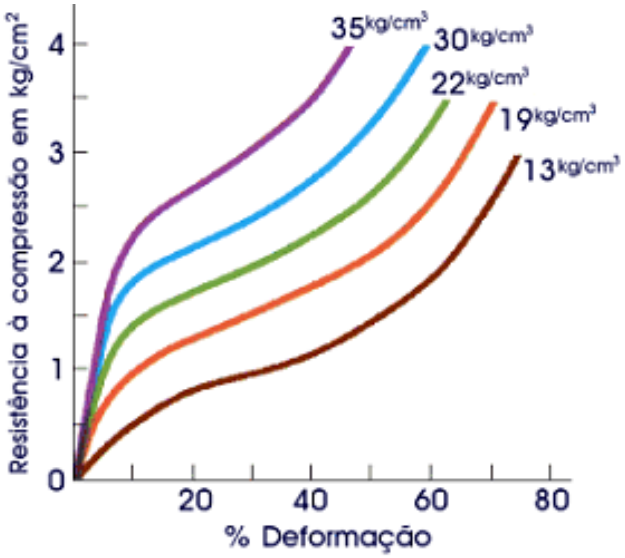


Figura 2.11 – Curva Tensão x Deformação para diferentes valores de massa específica. (ABRAPEX 2006).

O módulo de elasticidade inicial da curva (E_{ti}) apresenta uma boa correlação com a massa específica do material. Algumas expressões empíricas podem ser encontradas na literatura, como a de Eriksson e Tränk (1991), na qual a máxima variação do módulo de elasticidade é de aproximadamente 0,5 MPa para baixas massas específicas e 1,0 MPa para massas específicas mais elevadas (HORVATH, 1994):

$$E_{ti} = 0{,}0097.\rho^{2} - 0{,}014.\rho + 1.8 \qquad (1)$$

Onde E_{ti} é o módulo de elasticidade, em MPa, e ρ é a massa específica (kg/m³).

Outra expressão usual, ilustrada por Koerner (1994), é a de Magnan e Serratrice (1989), com variação de aproximadamente 1,5 MPa para qualquer valor de massa específica:

$$E_{ti} = 0{,}479.\rho\, 2 - 2{,}875 \qquad (2)$$

A Figura 2.12 exibe um gráfico de correlação entre o módulo de elasticidade do trecho inicial da curva tensão *versus* deformação e a massa específica, proposto por Horvath (1994).

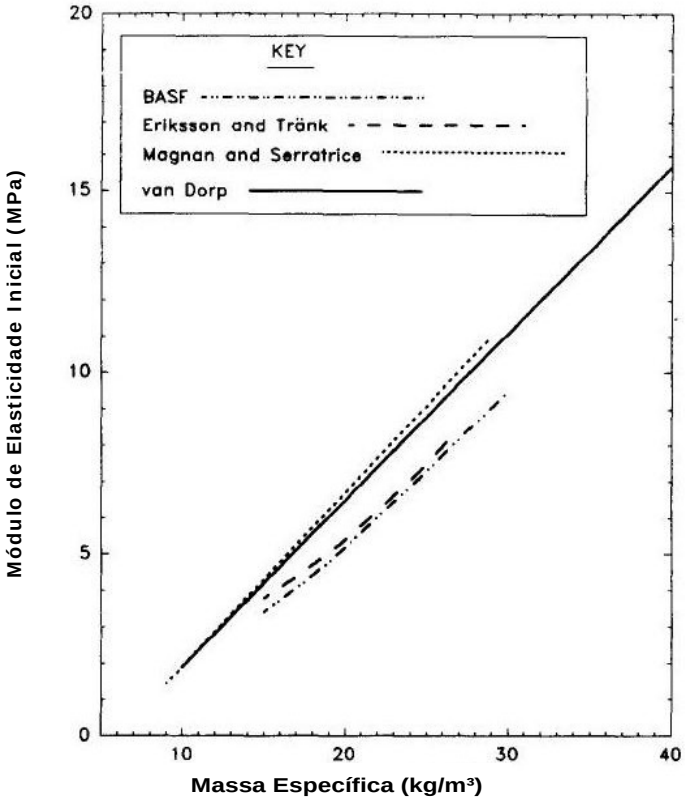


Figura 2.12 – Correlação entre módulo de elasticidade e massa específica (HORVATH 1994).

Duskov (1997) propõe outra relação empírica entre a massa específica do EPS e seu módulo de elasticidade por meio de uma correlação parabólica utilizando-se uma regressão que é fruto de análises das curvas obtidas em ensaios.

A Figura 2.13 exibe resultados experimentais de módulo de elasticidade do EPS *versus* a massa específica, para amostras secas e molhadas, e a curva obtida de uma regressão. As amostras ensaiadas eram cilíndricas com 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro, e os ensaios foram realizados com três diferentes velocidades de deformação (4, 20 e 200%/min).

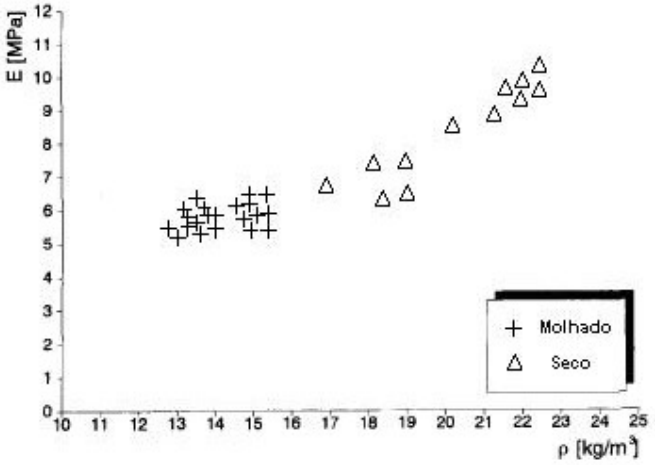


Figura 2.13 – Regressão do módulo de elasticidade em relação a massa específica do EPS (DUSKOV 1997)

2.4.6 Influência da Temperatura

O estudo da variação da resistência do EPS com a variação térmica do ambiente se mostra extremamente importante para a utilização deste polímero em obras. A maior parte dos ensaios realizados em laboratórios conta com um severo controle das condições climáticas (cerca de 23º C de temperatura e 50% de umidade relativa do ar). Contudo, em sua utilização prática, o EPS esta sujeito a grandes amplitudes térmicas e de condições climáticas, o que justifica o estudo da influência destas nas propriedades do material.

Estudos mostram que com variações de temperatura gera-se uma variação no comportamento da resistência de forma inversamente proporcional. Na pratica geotécnica, é usual se obter uma variação de temperatura entre 0 a 45º C, que corresponde a uma variação de aproximadamente 20% na resistência obtida em laboratório.

Yeo e Hsuan (2006) realizaram ensaios de compressão uniaxial não confinado com variação da temperatura. Foram utilizadas seis temperaturas variando de 23º C a 58º C com 7º C de incremento. Os efeitos da variação da resistência com a temperatura podem ser vistos na Figura 2.14. Por meio desta, observa-se um comportamento bi-linear (de 23º C a 44º C e de 44º C a 58º C) e inversamente proporcional.

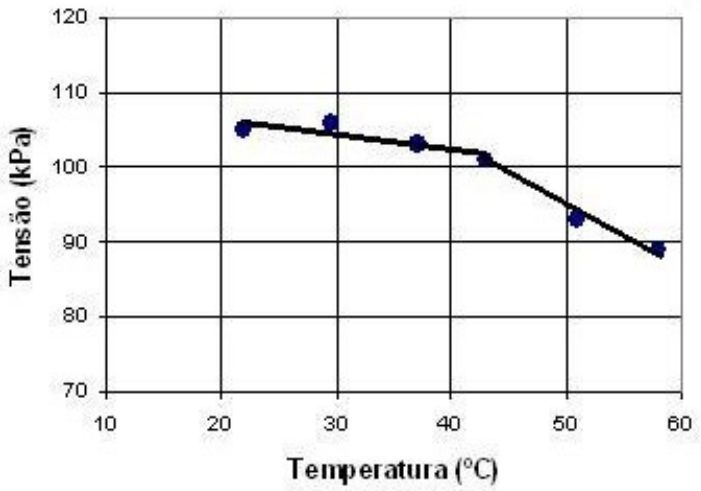


Figura 2.14 – Variação da resistência à compressão com a temperatura (YEO & HSUAN, 2006)

2.5 Geoexpandido de EPS sobre Solicitação Cíclica

Para sua utilização como sub-base de aterros de rodovias, o geoexpandido de EPS sofre, basicamente, influência de dois tipos de solicitações. Uma solicitação estática causada pela camada de solo e pavimento da estrada (base) e solicitações dinâmicas fruto do transito de veículos sobre a rodovia. Conseqüentemente, uma idealização mais próxima da realidade de modo a se simular esta condição real de utilização do EPS em uma sub-base de estrada seria um carregamento de duas componentes de carga, a estática (peso morto) e a dinâmica (cíclica).

Stark *et al.* (2004) classifica um carregamento cíclico como aquele em que uma carga é aplicada e retirada, para ser reaplicada de forma

repetitiva e em uma freqüência conhecida e compatível com o objetivo do ensaio.

Athanasopoulos *et al.* (1999) realizou ensaios de carregamento uniaxial cíclico com amostras de EPS cilíndricas com altura de 80 mm e diâmetro de 36 mm. A amplitude de deformações axial impostas nas amostras foi limitada entre 0,15 e 3,0 mm e a freqüência de aplicação da carga se situou entre 0,01 a 2,0 Hz. A Figura 2.15 exibe os resultados obtidos do ensaio cíclico na amostra de EPS de 17,1 kg/m³ de massa específica.

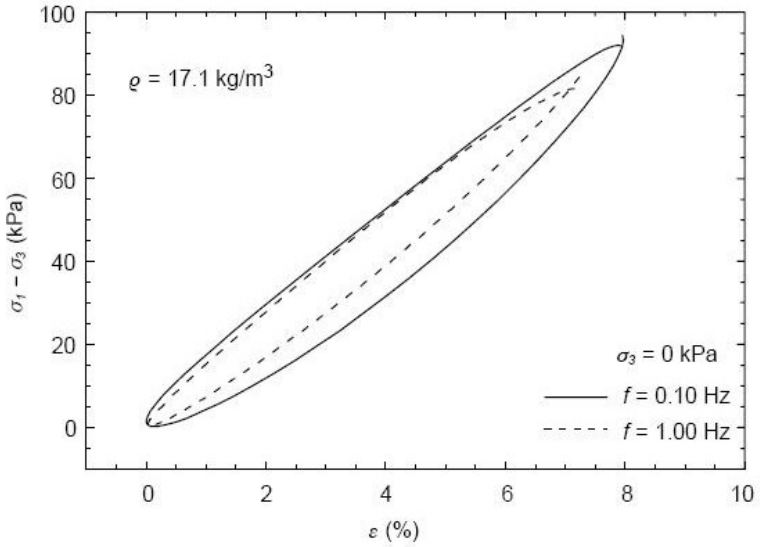


Figura 2.15 – Histerese do EPS sobre carregamento cíclico axial (ATHANASAPOULOS *et al.*, 1999)

Na Figura 2.16 esta exposto a variação do módulo de elasticidade dinâmico variando com a amplitude da deformação cíclica para dois tipos

de EPS, o EPS 1 (12,4 kg/m³) e EPS 2 (17,1 kg/m³), e uma faixa de 3 valores de freqüência de aplicação de carga.

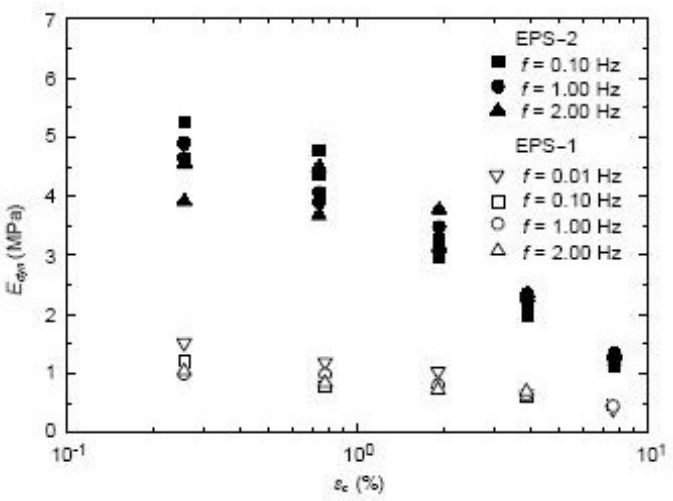


Figura 2.16 – Variação do módulo de elasticidade dinâmico com a amplitude da deformação axial cíclica (ATHANASAPOULOS *et al.,* 1999)

O número de ciclos utilizado pelos autores neste trabalho foi de 5 a 8 solicitações.

Duskov (1997) também realizou experimentos cíclicos com amostras de EPS de 15 kg/m³ e de 20 kg/m³ de formato cilíndrico com dimensões de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro. O carregamento utilizado pelo autor é composto por dois componentes: uma carga estática simulando a sobrecarga do pavimento acima do geoexpandido de EPS com magnitude de 15 kPa, e uma carga cíclica variando de 10 a 50 kPa para o EPS de 15 kg/m³ e variando de 15 a 75 kPa para o EPS de 20 kg/m³. Estes valores foram obtidos dos resultados de ensaios de compressão e

tem por objetivo estudar a resposta do material a uma solicitação cíclica nas regiões elástica e plástica.

O número de aplicação de cargas adotado pelo autor foi suficientemente grande para abranger o tempo de vida útil de uma obra rodoviária. Desta maneira, 100.000 ciclos foram aplicados em cada ensaio realizado. A freqüência de aplicação de carga foi de 4 Hz, valor este intermediário entre 3 e 6 Hz, que segundo o autor, foi calculado para simular veículos passando sobre o EPS.

As Figura 2.17 e Figura 2.18 exibem as curvas obtidas no ensaio de compressão cíclica para o EPS de 15 kg/m³ e 20 kg/m³, respectivamente.

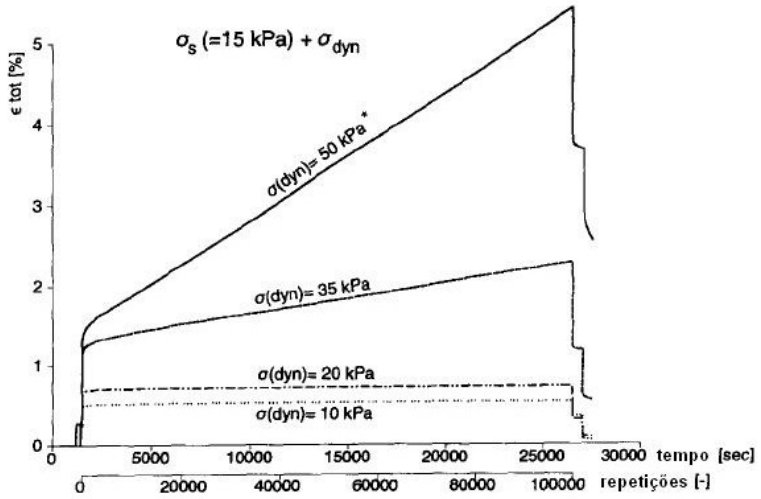


Figura 2.17 – Ensaio uniaxial cíclico para o EPS de 15 kg/m³ (DUSKOV, 1997)

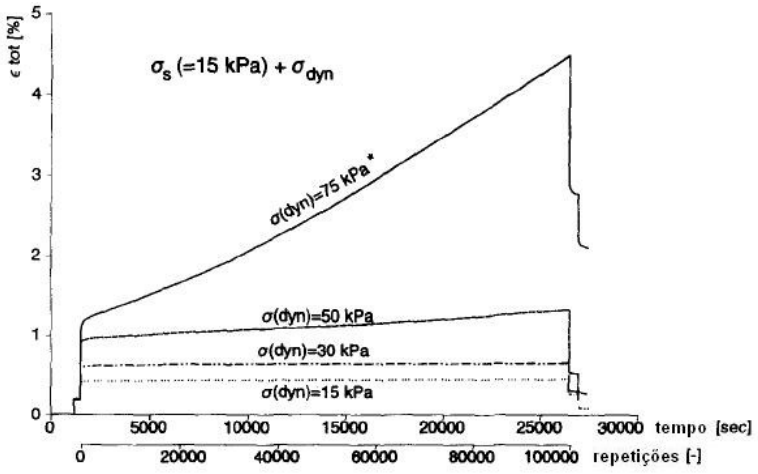


Figura 2.18 - Ensaio uniaxial cíclico para o EPS de 20 kg/m³ (DUSKOV, 1997)

De acordo com Duskov (1997), para o EPS de 15 kg/m³, a carga cíclica de 35 kPa resultou em uma deformação permanente significante para a amostra (mais de 0,5%), e a carga de 50 kPa gerou uma grande deformação plástica (cerca de 2,5%). Contudo, para as cargas cíclicas de 10 e 20 kPa a deformação plástica obtida foi insignificante. Para o EPS de 20 kg/m³, após 100.000 ciclos de repetição das cargas, os valores de 15 e 30 kPa aplicados causaram também deformações insignificantes. Uma pequena parcela de deformação permanente foi obtida com a carga de 50 kPa, e para o valor de 75 kPa aplicado, a deformação plástica resultante foi extremamente alta.

O autor obteve também o módulo de elasticidade dinâmico para ambos os materiais. Para as pequenas solicitações o módulo de elasticidade dinâmico se alterou pouco nas repetições de cargas, porém, para as solicitações dinâmicas mais elevadas (35 kPa para o EPS de 15

kg/m³ e 50 kPa para o de 20kg/m³) os valores dos módulos sofreram decréscimos significativos.

A Figura 2.19 e a Figura 2.20 exibem os valores do módulo de elasticidade dinâmico para os EPS de 15 e 20 kg/m³ respectivamente.

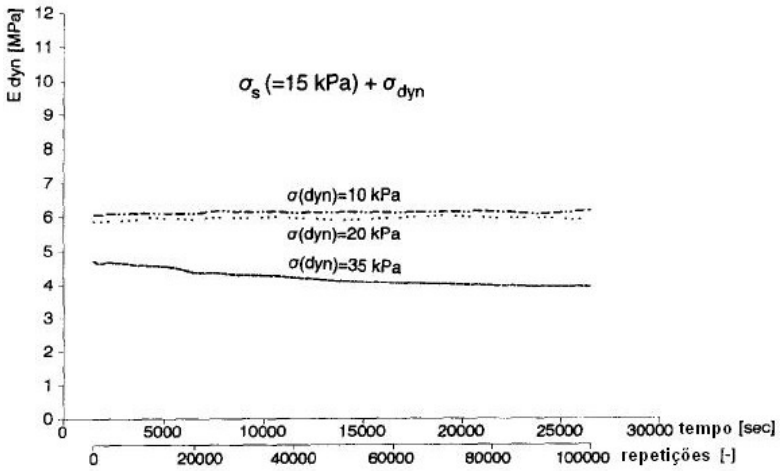


Figura 2.19 – Módulo de elasticidade dinâmico para o EPS de 15 kg/m³ (DUSKOV, 1997)

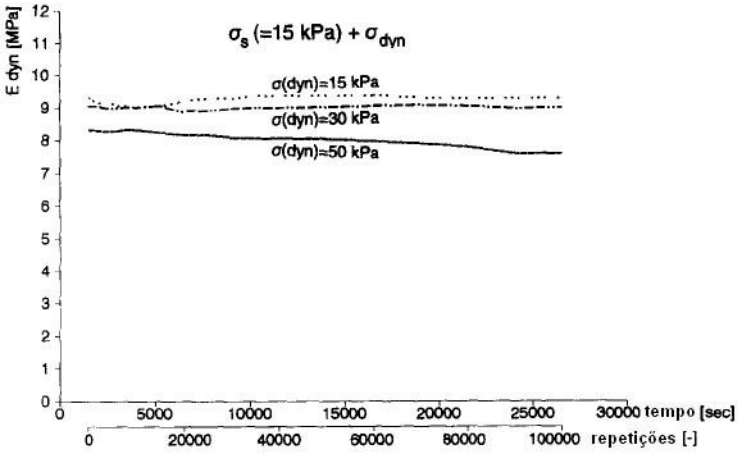


Figura 2.20 - Módulo de elasticidade dinâmico para o EPS de 20 kg/m³ (DUSKOV, 1997)

Bueno (2005) realizou ensaios de compressão uniaxial cíclica com amostras cilíndricas de EPS de relação H:D de 3:1 (H = 150 mm e D = 50 mm), com massa específica de 10 e 20 kg/m³ aplicando deformações acima do limite elástico (1, 5 e 10 %) obtendo a deformação plástica do material.

A Figura 2.21 mostra resultados obtidos com ensaios de carga e descarga para uma amostra de EPS de 10 kg/m³ ensaiado com um limite de deformação de 1%. Nota-se pela figura a plastificação do material, principalmente no primeiro ciclo de carregamento.

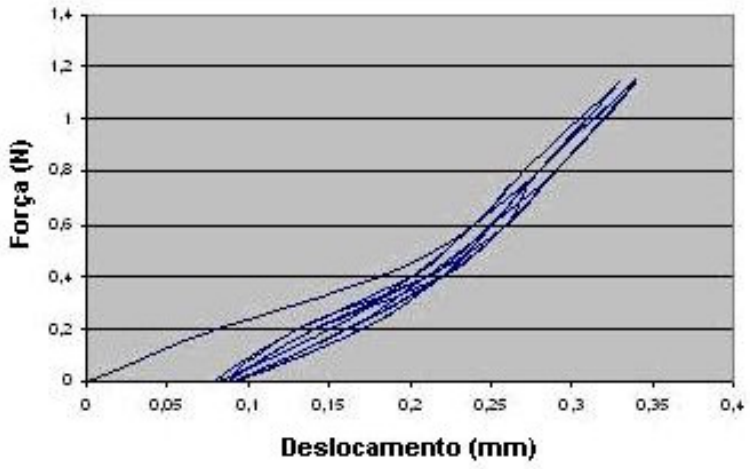


Figura 2.21 - Ensaio cíclico em amostra de EPS de 10 kg/m³ com limite de deformação de 1% (BUENO 2005)

Stark *et al*. (2004) também realizaram ensaios cíclicos de carga e descarga na compressão com corpos de prova cúbicos de 50 mm de lado de EPS com massa específica de 13 kg/m³, obtendo além da deformação

plástica a redução do módulo de elasticidade do material para cada recarga.

A Figura 2.22 exibe o gráfico obtido do ensaio cíclico. Nota-se a redução do valor do módulo de elasticidade com o aumento da deformação plástica acumulada.

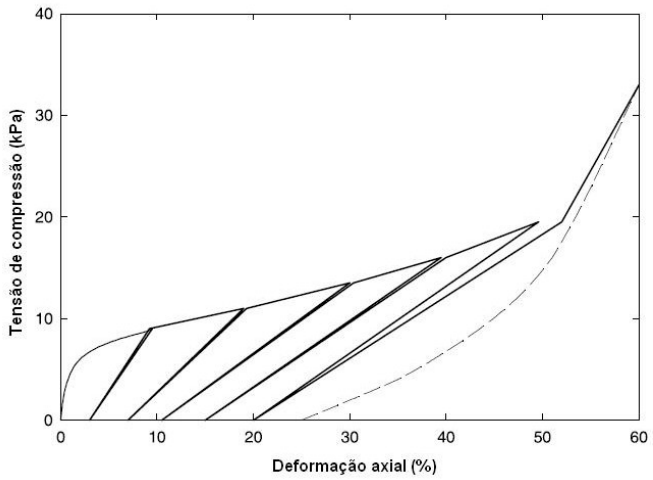


Figura 2.22 – Ensaio cíclico em amostra de EPS de 13 kg/m³ (STARK *et al.*, 2004)

2.6 Solicitação Triaxial sobre o Geoexpandido de EPS

Apesar de ao longo da vida útil os blocos de EPS serem solicitados por uma tensão de confinamento de pequena magnitude, um modelo de comportamento levando em conta o confinamento, bem como a correlação de sua resistência triaxial com a massa específica, se mostra necessário para uma melhor interpretação de suas propriedades.

Wong e Leo (2006) realizaram ensaios triaxiais com amostras cilíndricas de EPS (de massa específica de 20 kg/m³) com 50 mm de diâmetro e altura. Os ensaios foram realizados com tensões de confinamento variando-se de 0 a 60 kPa. A Figura 2.23 exibe os resultados deste ensaio, no qual as linhas cheias correspondem aos valores determinados no ensaio e a tracejada uma aproximação bi-linear da curva de tensão *versus* deformação para os trechos elástico e plástico.

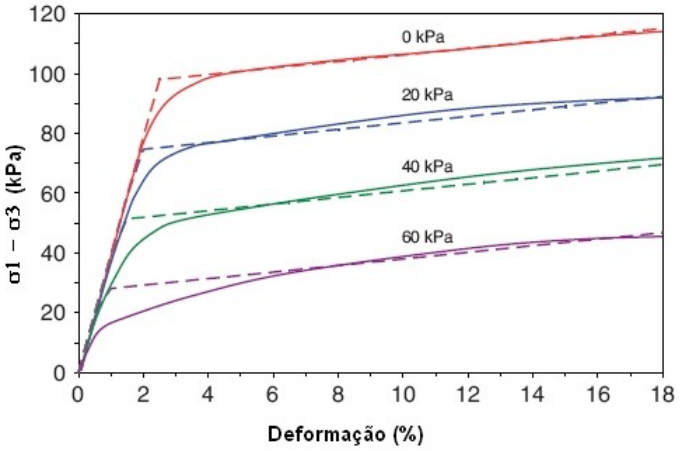


Figura 2.23 – Triaxial com amostras de EPS para diferentes tensões confinantes (WONG E LEO, 2006)

Chun *et al.* (2004) também realizaram ensaios triaxiais com diferentes valores de tensão confinante e densidades. Seus resultados permitiram concluir que a resistência à compressão triaxial do EPS cresce com o aumento da massa específica e da tensão confinante, contudo, o efeito desta última é menos significativo.

2.7 Cisalhamento do Geoexpandido de EPS

Os blocos de EPS podem estar sujeitos a (HORVATH, 2001):

- Resistência ao cisalhamento interna;
- Resistência ao cisalhamento de interface do contato entre blocos (junta) ou entre eles e outro material (solo, outros geossintéticos, etc.).

2.7.1 Cisalhamento Interno

A norma ASTM C 273 rege as condições deste ensaio. De acordo com STARK *et al.* (2004), ensaios de cisalhamento interno da amostra não são freqüentes, pois são largamente substituídos por ensaios de compressão simples.

2.7.2 Cisalhamento de Interface (junta)

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, taxa de carregamento, etc.) 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, 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 da resistência pode ser definida das condições clássicas de Mohr – Coulomb:

$$\tau = \sigma.\mu = \sigma.tg(\phi) \qquad 2.1$$

onde:

t: resistência ao cisalhamento da interface;

s: tensão normal na interface;

μ: coeficiente de atrito;

F: ângulo de atrito da interface EPS/EPS.

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 freqüentes, 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 freqüente, obtido de estudos mais extensivos e detalhados. Para o ângulo de atrito, valores entre 27 e 32 º 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).

A Figura 2.24 exibe o resultado de ensaios de cisalhamento direto do contato EPS / geomembrana para três diferentes tensões normais, e a Figura 2.25 exibe a envoltória destes ensaios.

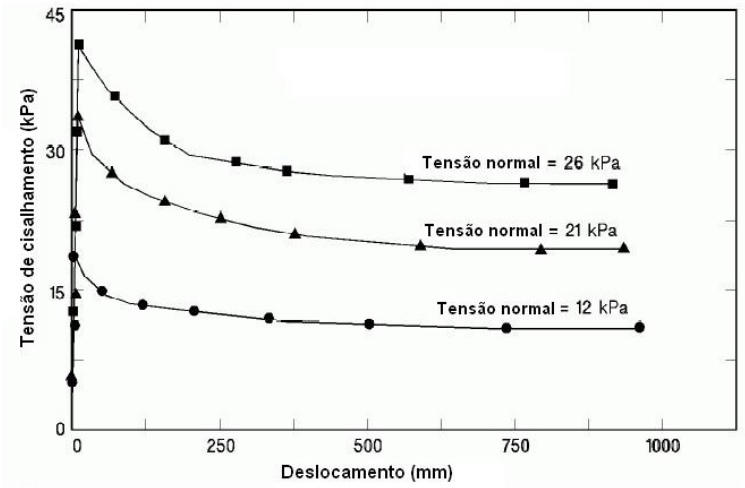


Figura 2.24 – Ensaio de cisalhamento do contato entre amostras de EPS e de geomembrana de PEAD (STARK *et al.,* 2004)

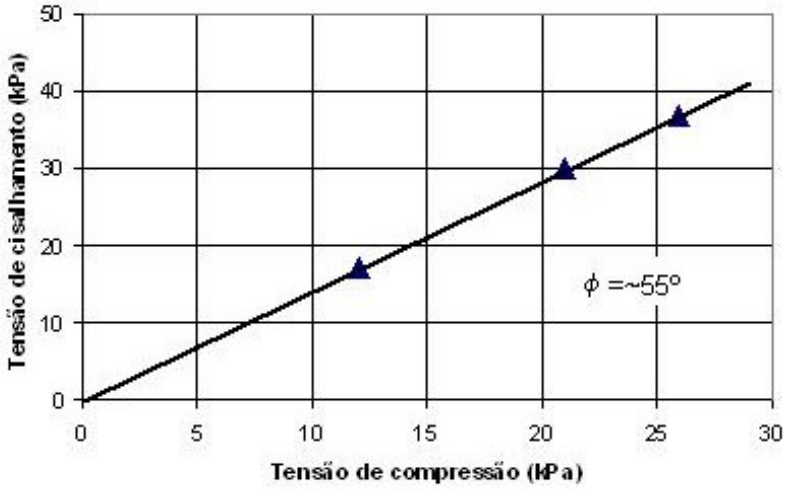


Figura 2.25 – Envoltória do ensaio de cisalhamento do contato entre amostras de EPS e de geomembrana de PEAD

Nota-se pela Figura 2.25 que o material possui um elevado ângulo de atrito se comparado com solos, porem não apresenta coesão. Porém, a adição de elementos que unam os blocos de EPS, como barras, grampos e prendedores (Figura 2.26) metálicos gera um acréscimo da coesão aparente na envoltória de resistência do geoexpandido, como indicado na Figura 2.27.

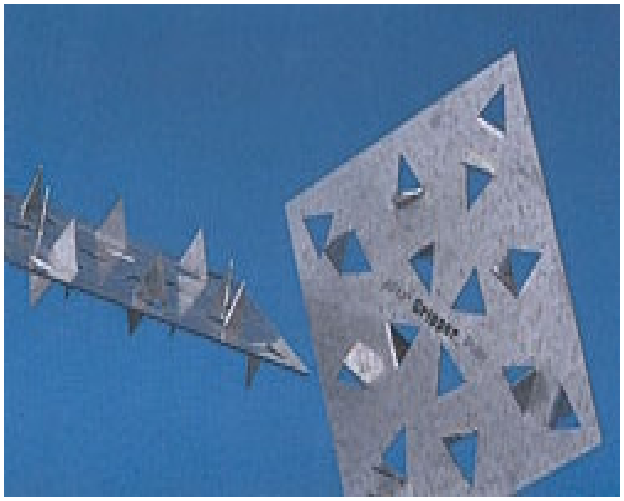


Figura 2.26 – Prendedor metálico para blocos de geoexpandido de EPS

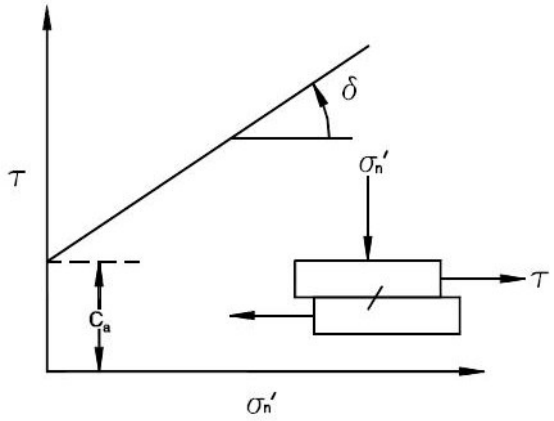


Figura 2.27 – Envoltória e mecanismo de cisalhamento de interface de blocos de EPS

(STARK *et al.* 2004)

Ainda sobre o ensaio de cisalhamento, a Figura 2.28 exibe as envoltórias obtidas com as resistências ao cisalhamento de pico e residual.

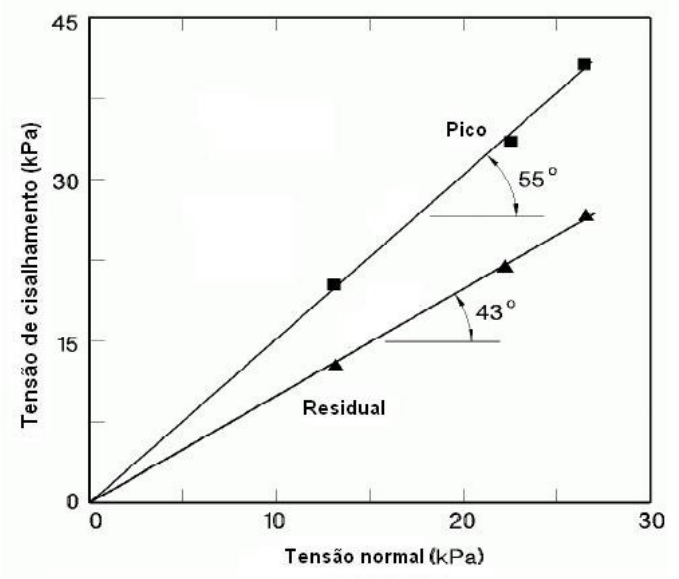


Figura 2.28 – Envoltórias para as resistências ao cisalhamento de pico e residual do contato entre amostras de EPS e de geomembrana de PEAD (STARK *et al.* 2004)

2.8 Fluência do Geoexpandido de EPS

Grande parte dos materiais utilizados em engenharia, e em especial os polímeros, apresentam como característica mecânica o comportamento visco elástico quando submetidos a carregamentos de longa duração, apresentando fenômenos descritos como fluência e relaxação.

Na engenharia, o termo fluência refere-se às deformações viscosas de um corpo qualquer, causadas pela ação de um carregamento constante e de longa duração. No caso dos geossintéticos, de acordo com Abramento (1995), fluência pode ser definida como a aptidão do material em se deformar sob um carregamento estático de longa duração.

A Figura 2.29 exibe o formato de uma curva típica de fluência em compressão de amostras de EPS. O ensaio foi realizado com amostras de 20 kg/m³ de densidade e a carga utilizada foi de 20 kPa.

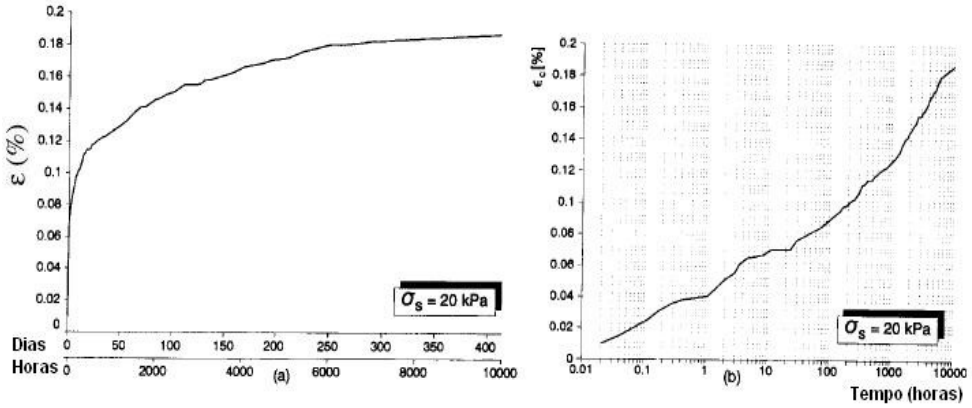


Figura 2.29 – Curvas típicas de fluência do EPS. (a) linear. (b) log do tempo (DUSKOV, 1997)

2.8.1 Fatores que Influenciam na Fluência

Os fatores mais importantes que interferem na fluência dos geossintéticos e do geoexpandido de EPS são:

- Tipo do polímero;
- Nível de carregamento;
- Tempo de carregamento;
- Temperatura;
- Massa específica;

- Confinamento;
- Formato e dimensões das amostras;

2.8.1.1 Tipo do Polímero

Os geossintéticos são constituídos por cadeias moleculares longas, chamadas de polímeros, compostas por unidades repetidas denominadas monômeros. Os polímeros são materiais que possuem comportamento visco elástico característico para cada tipo de monômero que formam a cadeia. Este comportamento distinto é devido à natureza dos elementos químicos constituintes e de sua resposta frente as diferentes ações aplicadas.

2.8.1.2 Nível de Carregamento

É intuitivo que para qualquer tipo de material, em especial para os polímeros e para o EPS, que as deformações por fluência sofridas por uma amostra são diretamente proporcionais ao nível de carregamento imposto as mesmas.

Bueno (2005) realizou ensaios de fluência por compressão não confinada com amostras cilíndricas com altura e diâmetro de 50 mm (relação 1:1) de EPS com massas específicas de 10 e 20 kg/m³.

A Figura 2.30 mostra os resultados obtidos para um material com 10 kg/m³ de massa especifica para três diferentes níveis de carregamento (25, 50 e 75 % da resistência à compressão uniaxial). Do gráfico nota-se o sensível aumento da deformação dos corpos de prova para uma elevação do nível do carregamento.

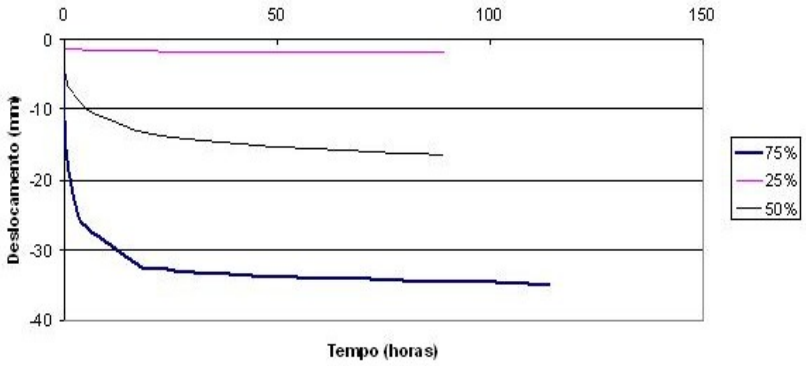


Figura 2.30 – Resultados de ensaio de fluência por compressão em amostras de EPS com 10 kg/m³ (BUENO 2005)

Beinbrech e Hillmann (1997) também realizaram estudos em escala real do comportamento do geoexpandido de EPS com sub-base de rodovias na Alemanha. Ensaios de fluência foram feitos com os materiais utilizados nas obras das estradas e o seu valor de deformação foi extrapolado por 50 anos. A Figura 2.31 exibe os resultados obtidos pelos autores com os ensaios para diferentes densidades de EPS e níveis de carregamento.

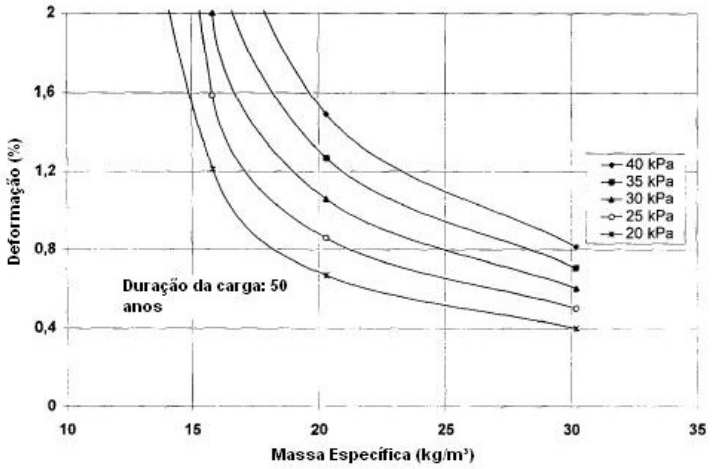


Figura 2.31 – Deformação para diferentes níveis de carregamento (BEINBRECH & HILLMANN, 1997)

Da Figura 2.31, apesar dos baixos valores de deformação obtidos, pode-se notar o aumento significativo do valor da deformação para um nível de carregamento superior. Este acréscimo de deformação pode chegar a mais de 100% ao se dobrar a carga aplicada, mostrando a sensibilidade deste fator . É o que ocorre para as cargas de 20 kPa (deformação de aproximadamente 0,7 %) e de 40 kPa (deformação de 1,5 %) para uma massa específica de 20 kg/m³.

A ASTM D 2990 – 01, prevê a utilização de um mínimo de 3 a 5 (dependendo do tipo de material) diferentes cargas para a realização do ensaio de fluência.

2.8.1.3 Tempo de Carregamento

O tempo no qual o material é exposto ao carregamento constante é outro fator de extrema importância que influencia na determinação e na análise da fluência. A deformação do material depende do tempo de exposição do mesmo a um dado carregamento.

A Figura 2.32 exibe os resultados obtidos por Horvath (1994) em ensaios de carregamento de até 10.000 horas.

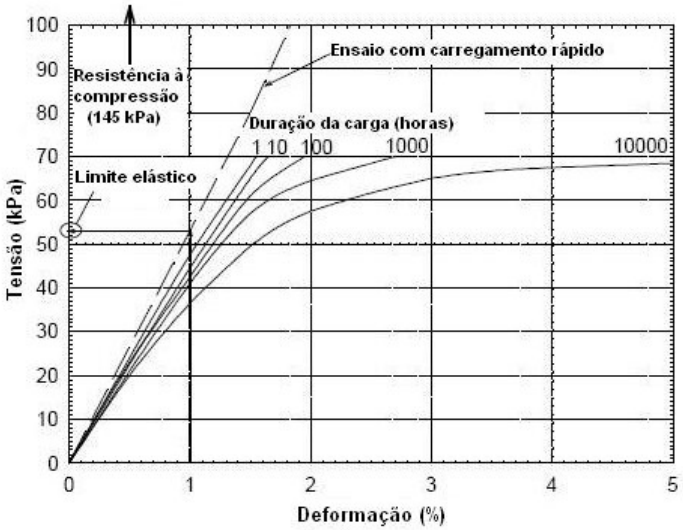


Figura 2.32 – Influência do tempo de carregamento no ensaio de fluência. (Adaptado de HORVATH, 1994)

Pela figura nota-se o quanto o material é influenciado pelo tempo do carregamento. Na figura, para uma tensão de 70 kPa, um carregamento de 1h de duração gera uma deformação do material de cerca de 1,0 %, e para a mesma tensão, um carregamento com 10.000h de duração, gera uma deformação expressivamente superior, tendendo a uma assíntota.

Portanto, em projeto, é necessário a correta análise das cargas impostas ao material prevendo-se sempre a vida útil da obra.

2.8.1.4 Temperatura

As cadeias poliméricas estão em constante movimento devido a energia cinética presente no corpo molecular. A temperatura tem a capacidade de influenciar diretamente a extensão deste movimento, com o aumento desta energia cinética das moléculas, tornando desta forma, o material “menos viscoso”. Desta forma, o aumento da temperatura influi significativamente nas deformações experimentadas pelos polímeros, tornando-os menos resistentes a carregamentos estáticos.

Alguns autores admitem que os movimentos moleculares segue uma lei de viscosidade linear, resultando em uma proporcionalidade entre as deformações viscosas e o aumento da temperatura.

Considerando-se que estes aumentos de temperatura provoquem aumentos nas deformações, é plausível considerar, associando-se esta característica à métodos de superposição de temperaturas (STT), uma aceleração do tempo de ensaio, base física e conceitual de ensaios de fluência acelerados, tais como o ensaio acelerado de fluência convencional e o *Stepped Isothermal Method* (SIM).

2.8.1.5 Massa Específica

A massa específica é uma característica de extrema importância, não só para a fluência do geoexpandido, mas em todas as propriedades mecânicas e hidráulicas. O aumento da massa específica é acompanhado, na maioria dos casos, por uma melhoria das propriedades mecânicas. A Figura 2.33 ilustra esta melhora das propriedades do EPS na fluência por compressão para diferentes níveis de carregamentos impostos nas amostras. Na Figura 2.33.a a massa específica da amostra é de 14,5 kg/m³ e a máxima deformação registrada foi de cerca de 13% nos 450 dias de ensaio para um carregamento de 35 kPa. Enquanto na Figura 2.33.b, a massa específica utilizada no corpo de prova foi de 35,2 Kg/m³ e a máxima deformação registrada nos 450 dias foi apenas de 4% para um carregamento muito superior de 100 kPa.

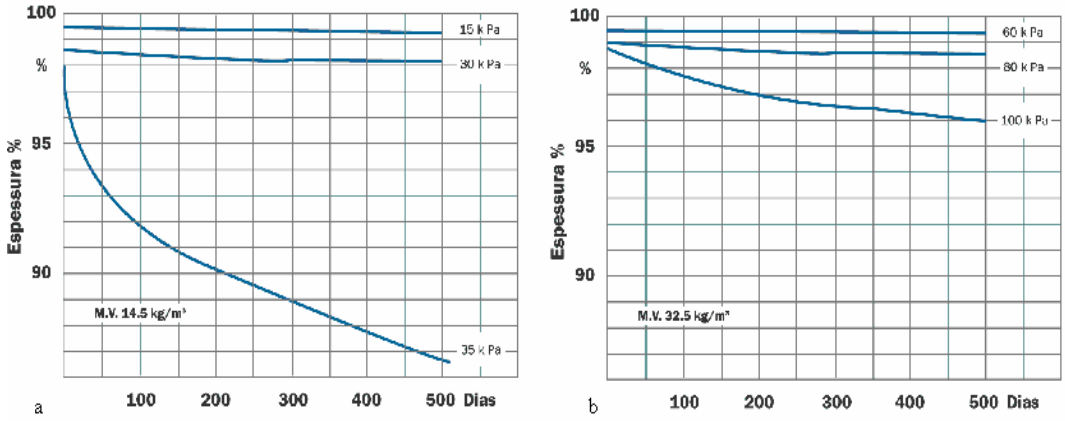


Figura 2.33 – Acréscimo da resistência na fluência por compressão do EPS com o aumento da massa específica (ACEPE 2006).

2.8.1.6 Confinamento

A importância de se considerar o efeito do confinamento nas solicitações mecânicas sobre os geossintéticos reside no fato de a maior parte deles trabalhar em condições de confinamento, estando inseridos no subsolo (no caso de geotêxteis e geogrelhas) e ou confinado entre elementos do mesmo tipo (como ocorre com os blocos do geoexpandido).

O confinamento pode reduzir a liberdade de deslocamentos laterais dos blocos de geoexpandido, e em certos casos pode até imprimir um carregamento lateral confinante nos elementos. Esta redução da liberdade de deformação lateral (ou até mesmo esta tensão confinante) pode diminuir a fluência do material, aumentando-se sua resistência. Porém, é discutível este acréscimo de resistência, para certos níveis de carregamento axial e confinamento, pois os blocos de EPS possuem um valor extremamente reduzido de Coeficiente de Poisson (inferior à 0,10), limitando o valor do efeito confinamento em alguns casos.

2.8.1.7 Formato e Dimensões das Amostras

É usual a utilização de diversos tipos de geometria e diversas dimensões para a realização de ensaios de fluência por compressão em amostras de EPS. As formas e dimensões afetam o resultado dos ensaios, pois respondem de forma diferente na absorção das cargas.

Stark *et al.,* (2004) reuniu resultados de ensaios de fluência de diferentes autores em um mesmo gráfico. Na Figura 2.34 está exibido o resultado compilado pelos autores. Os corpos de prova eram cilíndricos e em formato de disco (semelhante ao do ensaio de consolidação). A massa específica das amostras são de 20 kg/m³ e a carga aplicada de 20 kPa.

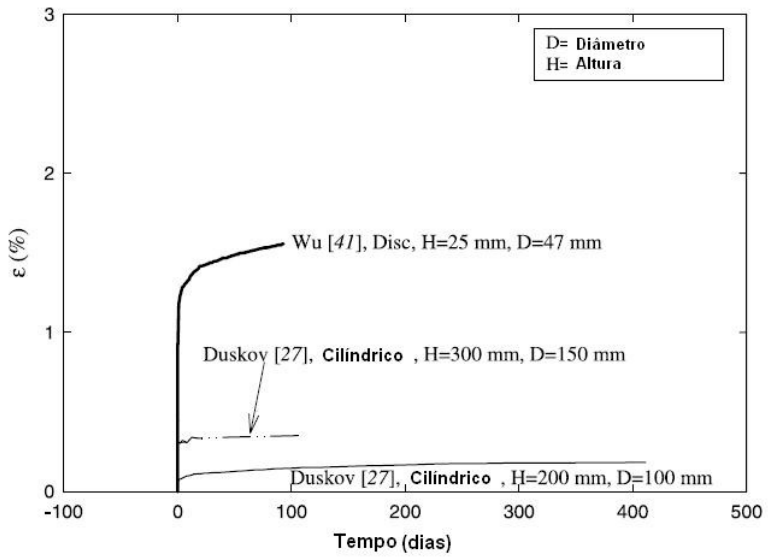


Figura 2.34 – Comparação de fluência de diferentes tipos de corpos de prova (STARK *et. al.*, 2004)

2.9 Absorção de Água do Geoexpandido de EPS

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 (cerca de 50 vezes maior). Absorvendo uma quantidade expressiva de água, os benefícios existentes no uso de um material extremamente leve desaparecem.

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

O mecanismo predominante de transporte, responsável pela rápida absorção de água, parece ser a difusão combinada com a capilaridade (DUSKOV, 1997).

A Figura 2.35 mostra a absorção de água por imersão do material, com diferentes valores de massa específica *versus* tempo de exposição. Notar que a partir de um determinado tempo (no caso cerca de 30 dias) o teor de umidade permanece constante.

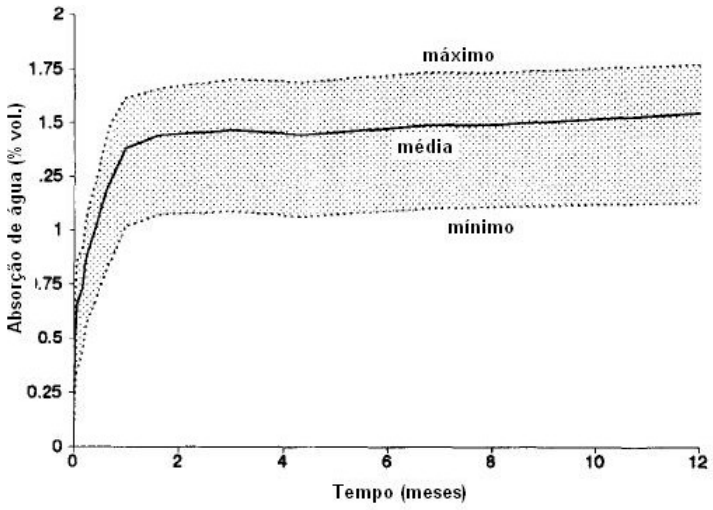


Figura 2.35 - Absorção de água x tempo do EPS de 20 kg/m³ (DUSKOV, 1997)

Dos resultados da Figura 2.36 é possível inferir que a absorção de água do EPS é inversamente proporcional a sua massa específica. Este

fato é citado também por Duskov (1997) que realizou ensaios com EPS de 15 e 20 kg/m³, obtendo valores médios de 1,56 e 1,54 % do volume, respectivamente.

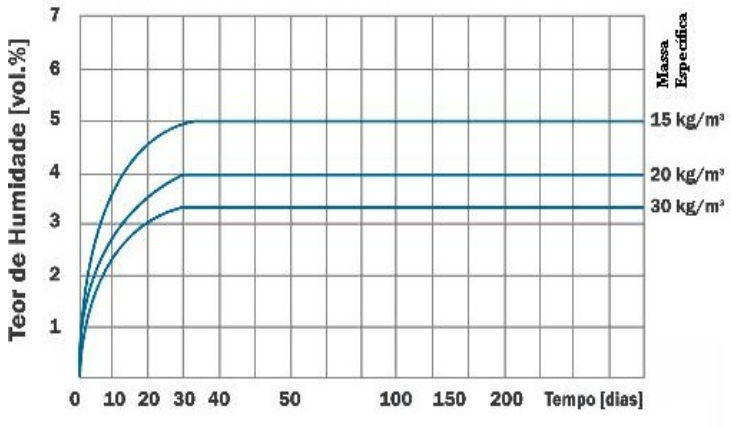


Figura 2.36 – Absorção de água x tempo do EPS para diferentes valores de massa específica (ACEPE 2006).

O EPS, depois de ensaiado a uma deformação superior a 10%, fica mais propenso 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 (DUSKOV, 1997).

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

O presente capítulo apresenta a descrição dos materiais utilizados nos mais diversos ensaios executados. O capítulo também descreve instrumentalmente os ensaios mecânicos e hidráulicos realizados bem como apresenta os procedimentos e precauções para cada um deles.

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Geossintéticos e no Departamento de Geotecnia da EESC – USP, sendo os ensaios com perda de massa com roedores realizados no Laboratório de Psicologia da Universidade Federal de São Carlos. Todo o material utilizado nesta pesquisa foi cedido pela empresa Termotécnica.

Os ensaios foram realizados de modo a se determinar a resposta do EPS frente às solicitações mais comuns a que estará submetido durante a vida útil das obras.

3.2 Materiais Utilizados

Os blocos de EPS utilizados nesta pesquisa foram classificados de acordo com sua massa específica. Foram tomados valores destas de forma a se abranger a maior parte dos valores utilizados nas práticas de projeto. Foram escolhidos também blocos de EPS de materiais reciclados e de massa específica elevada tentando antecipar materiais com propriedades que possam ter utilidade futura.

A Tabela 3.1 exibe as massas específicas dos materiais utilizados nos ensaios, sua classificação segundo a NBR 11752 e a nomenclatura da empresa que forneceu o material.

Tabela 3.1 – Nomenclatura dos materiais utilizados no trabalho

Tipo	Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)
-	T1AF	10
I	T3AF	14,5
II	T4AF	17
III	T5AF	20
-	T6AF	30
-	T7AF	40
-	T1D (30% de reciclado)	10

Para se comparar as diferenças estruturais (macro e microscopicamente) entre as massas específicas, foram tiradas fotos com o auxílio de uma lupa e um microscópio eletrônico. As Figura 3.1a e Figura 3.1b exibem as estruturas macroscópica com uma aproximação de 10x e microscópica com uma aproximação de 100x, respectivamente. Nota-se das figuras que à medida que se aumenta a massa específica do material, menor são os vazios, tanto na visão macroscópica, quanto na microscópica.

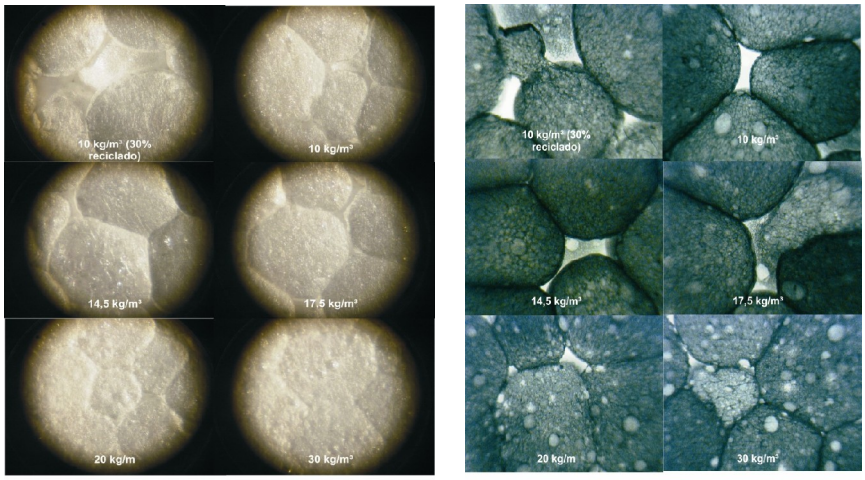


Figura 3.1a e Figura 3.1b – Estruturas macro e microscópica das amostras de EPS

Antes da realização de todos os ensaios cada amostra foi colocada em uma sala climatizada com temperatura de 23 (°C e umidade relativa do ar de 50 % por um período não inferior a 24 horas). Após esta climatização, todas as amostras foram pesadas em uma balança de precisão de milésimo de grama e devidamente medidas para a

determinação dos volumes e massas específicas de acordo com a norma ASTM C 303 de 1996.

3.3 Ensaio de Compressão Simples

O ensaio de compressão uniaxial em materiais plásticos celulares é normalizado pela ASTM 1621 de 2000. Consiste em comprimir corpos de prova com dimensões e massas previamente determinadas. Deste ensaio determina-se a curva tensão *versus* deformação do material.

Foram realizados diversos ensaios de compressão uniaxial tentando-se alterar as possíveis variáveis que afetam direta e indiretamente os resultados do ensaio. Segue abaixo as variáveis estudadas neste trabalho:

- Massa específica da amostra (Tabela 3.2);
- Dimensão dos corpos de prova (Figura 3.3);
- Velocidade de execução do ensaio (5, 10, 15, 50 e 200 mm/min);
- Temperatura (de 23 a 72 °C variando de 7 em 7 °C).

Os ensaios de compressão uniaxial foram feitos em uma maquina universal de ensaios com controle da taxa de deformação. A Figura 3.2 mostra um ensaio de compressão uniaxial em um bloco de EPS na em andamento.

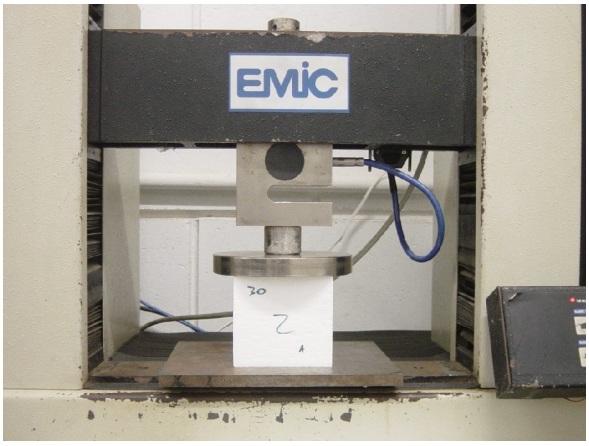


Figura 3.2 – Ensaio de compressão uniaxial

Para cada variável fixada (tamanho da amostra, velocidade de execução e massa específica) e variando-se as outras duas, realizou-se o ensaio com cinco corpos de prova.

Tabela 3.2 – Massas específicas utilizadas no ensaio à compressão uniaxial

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)
T1AF	10
T3AF	14,5
T4AF	17
T5AF	20
T6AF	30
T1D (30% de reciclado)	10

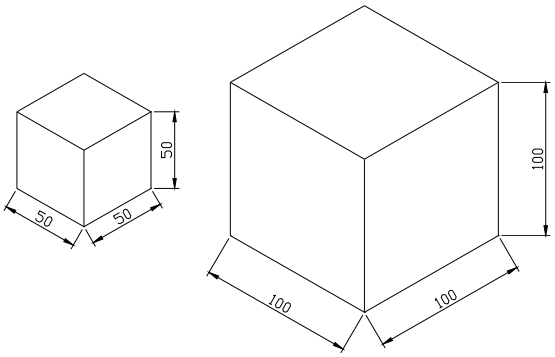


Figura 3.3 – Amostras utilizadas na compressão uniaxial

Para se realizar o ensaio com a temperatura variável, utilizou-se uma caixa de madeira com um soprador de ar quente, um termostato para a regularização das temperaturas e um controlador lógico programável (CLP) para se automatizar o controle das temperaturas. A Figura 3.4a e Figura **3.4**b exibem a caixa para o controle de temperatura, fechada e aberta, respectivamente.

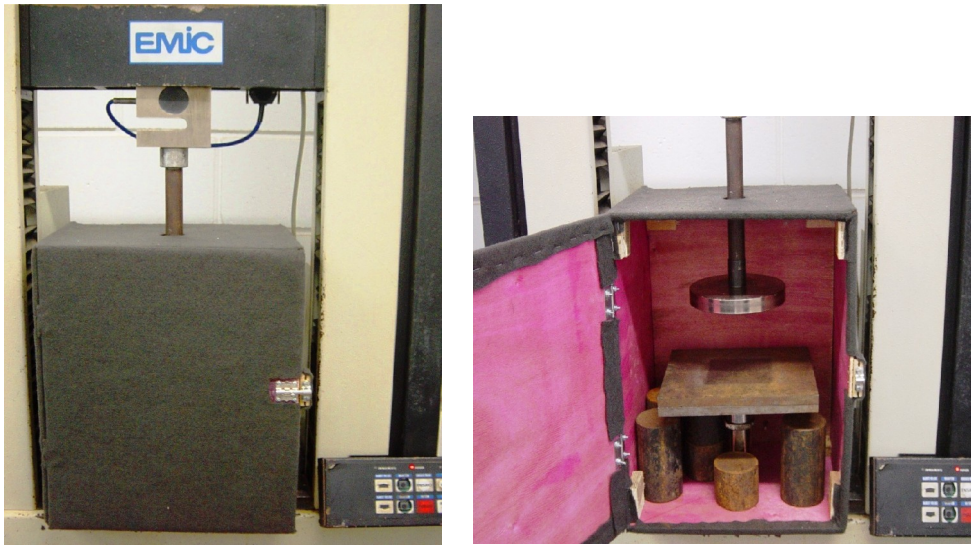


Figura 3.4a e Figura 3.4b – Caixa para o controle de temperatura

As amostras a serem ensaiadas eram climatizadas com a temperatura do ensaio em estufa por um período não inferior à 12 horas.

3.4 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclica

O ensaio de compressão cíclica se assemelha ao ensaio de compressão simples, porém, no cíclico não há elevação da carga além de um limite extremo suportado pela amostra, nem abaixo de um valor limite inferior pré-estabelecido e de forma repetitiva (sucessivas compressões e descompressões).

No ensaio de compressão cíclica tentou-se reproduzir as condições de carga cíclica sofridas por um material que compõe a sub-base de uma estrada. Utilizou-se uma sobrecarga de 20 kPa correspondente a aproximadamente uma camada de 1 m de solo acima da camada de geoexpandido de EPS.

Para a freqüência de repetição da carga, utilizou-se 1 Hz, ou seja, cada aplicação e remoção da carga durou apenas 1 s, sendo 0,50 s de aplicação e 0,50 s de remoção da mesma (gráfico dente de serra). Para tal, utilizou-se uma máquina universal servo controlada, marca MTS, do Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos. A Figura 3.5 exibe o instrumento utilizado na realização deste ensaio.

Figura 3.5 – Prensa utilizada no ensaio de compressão cíclica

Para a realização deste ensaio, definiram-se duas deformações limites para se aplicar às amostras. Uma aplicada em um corpo de prova do material, superior ao limite de elasticidade do material (cerca de 2 %) com valores superiores a 5 %, de forma a se plastificar o corpo de prova, e outra, aplicada em outro corpo de prova do mesmo tipo de material, no patamar elástico com valores inferiores a 1 % (cerca de 0,8%).

Foi adotado um total de dez mil ciclos para cada ensaio, e foi registrado durante o ensaio as tensões e as deformações em uma taxa de 5 registros para cada ciclo (5 registros por segundo), de forma a se obter uma melhor resposta de cada do ensaio.

As massas específicas utilizadas neste ensaio foram semelhantes àquelas usadas na compressão simples, e estão expostas na Tabela 3.3. A forma e dimensão dos corpos de prova utilizados estão exibidos na Figura 3.6.

Tabela 3.3 – Massas específicas utilizadas no ensaio de compressão cíclica

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)
T1AF	10
T3AF	14,5
T4AF	17
T5AF	20
T6AF	30
T1D (30% de reciclado)	10

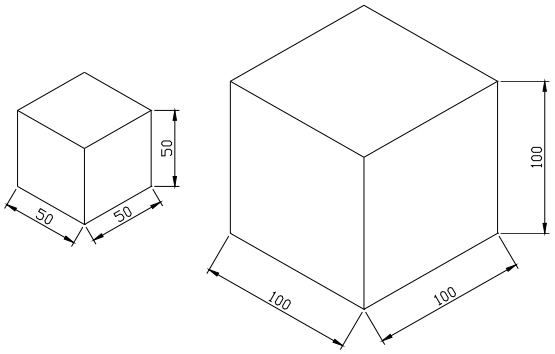


Figura 3.6 - Amostras utilizadas no ensaio de compressão cíclica

3.5 Ensaio de Compressão Triaxial

Os ensaios triaxiais são nortmatizados pela ASTM D 4757 de 2002, e foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos. Nestes ensaios utilizaram-se amostras cilíndricas com proporções semelhante a ensaios realizados com amostras de solos (2 : 1) com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. A Figura 3.7 exibe o formato e as dimensões das amostras utilizadas e a Figura 3.8 a câmara de triaxial utilizada.

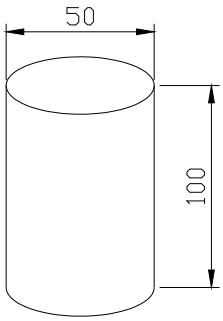


Figura 3.7 – Dimensões e forma das amostras de EPS utilizadas no ensaio triaxial

Figura 3.8 – Câmara triaxial utilizada

Para a preparação do ensaio, as amostras foram revestidas com uma membrana e posicionou o conjunto de forma adequada na câmara triaxial. Utilizaram-se pedras porosas para drenar o ar contido nos vazios dos corpos de provas na fase de adensamento ruptura. A Figura 3.9a, Figura 3.9b e Figura 3.10 exibem estas etapas de preparação da amostra.

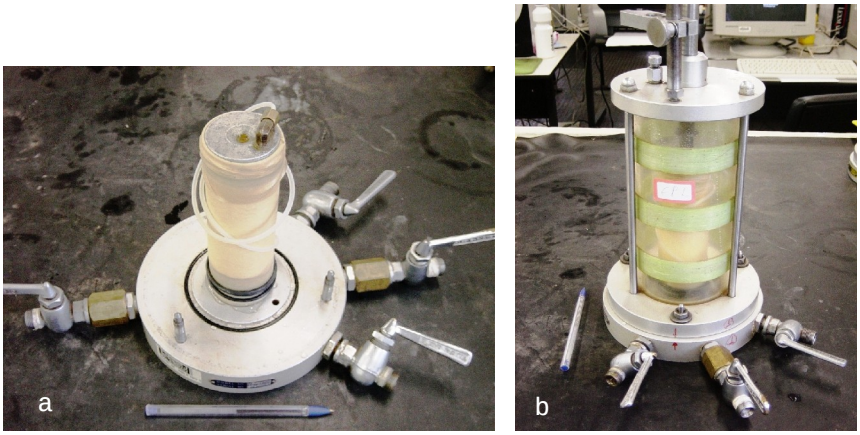


Figura 3.9 – Etapas de preparação das amostras para o ensaio triaxial

Figura 3.10 – Equipamento utilizado no ensaio triaxial

O ensaio triaxial realizado foi do tipo consolidado não drenado (CU) com as amostras não saturadas (umidade natural), situação esta esperada na prática. Na primeira fase (fase de consolidação), foi registrada a variação do volume do corpo de prova pelo tempo até a sua estabilização. Na segunda fase (fase de ruptura), registrou-se o valor da tensão, além da variação do volume e da deformação axial. Estes valores foram corrigidos para as novas dimensões da amostra após sua mudança

de volume ocorrida na fase de consolidação. A velocidade adotada para a realização do ensaio foi de 1,14 mm/s.

Assim como no ensaio de cisalhamento direto, optou-se por utilizar valores reduzidos de tensão confinante (20, 30 e 40 kPa) para representar a situação de campo. As massas específicas utilizadas também foram as mesmas, representadas na Tabela 3.4

Tabela 3.4 – Massas específicas utilizadas no ensaio triaxial

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)
T1AF	10
T5AF	20
T6AF	30
T7AF	40
T1D (30% de reciclado)	10

3.6 Ensaio de Cisalhamento Direto

Para uma caracterização mais completa do EPS, o ensaio de cisalhamento direto foi realizado em duas modalidades:

- Da interface entre corpos de prova (junta), com o objetivo de se obter os parâmetros do contato entre blocos de EPS;
- De um bloco como corpo de prova (interno), com o objetivo de se obter as propriedades do material EPS frente a este tipo de solicitação.

A montagem, dimensões e variações das amostras, realização e etc., de ambos os tipos de ensaio de cisalhamento serão descritas separadamente neste trabalho.

3.6.1 Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface (Junta)

O ensaio de cisalhamento direto em solos é normalizado pela ASTM D 3080 de 1998, porém, foram feitas algumas alterações no ensaio com EPS, em vista de tratar-se de um cisalhamento de interface.

Para a realização do ensaio de cisalhamento direto de interface colocaram-se em contato duas placas do material com uma determinada força de confinamento. Na fase de cisalhamento, aplica-se um deslocamento relativo entre as placas medindo-se simultaneamente a força necessária para o deslocamento e a magnitude do deslocamento. Este ensaio foi realizado em um equipamento típico para ensaios em solos. A Figura 3.11 exibe o equipamento utilizada no ensaio.

Figura 3.11 – Prensa de ensaio de cisalhamento direto

As Figura 3.12a, Figura 3.12b, Figura 3.12c e Figura 3.12d, exibem a seqüência de montagem dos ensaios. Tem-se a base para o ensaio na Figura 3.12a, a base com a amostra inferior de EPS na Figura 3.12b, a colocação da amostra superior de EPS com o molde para a aplicação do deslocamento na Figura 3.12c, e a haste para a aplicação do confinamento na Figura 3.12d, com o ensaio pronto para se iniciar.

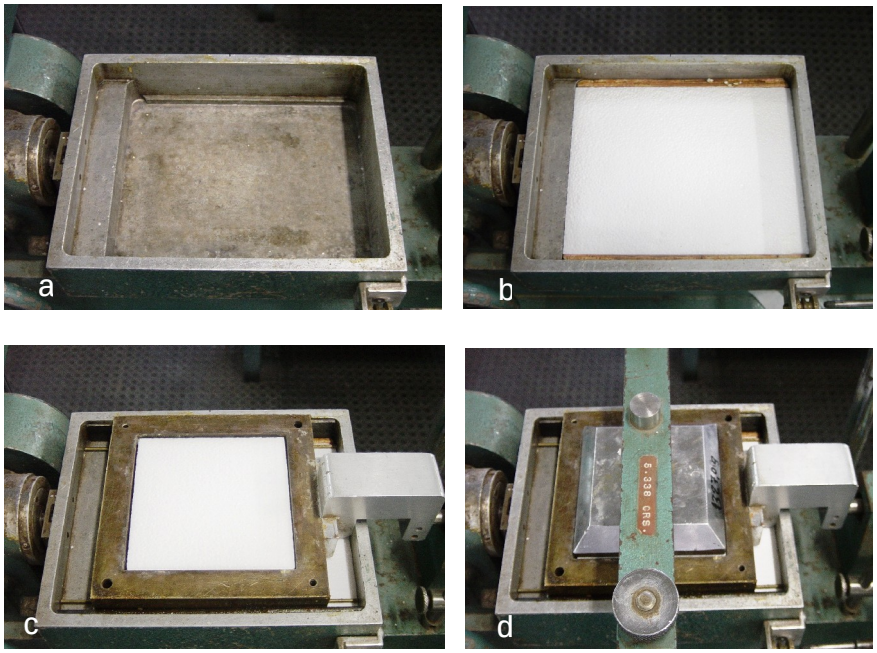


Figura 3.12a, b, c e d – Etapas de preparação para o ensaio de cisalhamento direto de interface

As tensões de confinamento utilizadas foram de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 kPa, escolhidas de modo a tentar representar situações de campo, considerando que um aterro de geoexpandido possui baixo peso. A velocidade de execução de ensaio adotada foi de 0,50 mm/min.

As amostras utilizadas no ensaio de cisalhamento direto de interface e as cargas de confinamento estão representadas na Tabela 3.5, e na Figura 3.13 estão as dimensões das mesmas, definidas de acordo com as dimensões apropriadas para a caixa de cisalhamento.

Tabela 3.5 – Massas específicas utilizadas no ensaio de cisalhamento direto de interface

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)	Confinamentos (kPa)
T1AF	10	10, 20, 30 e 40
T5AF	20	10, 20, 30 e 40
T6AF	30	10, 20, 30, 40, 50 e 60
T7AF	40	10, 20, 30, 40, 50 e 60
T1D (30% de reciclado)	10	10, 20, 30 e 40

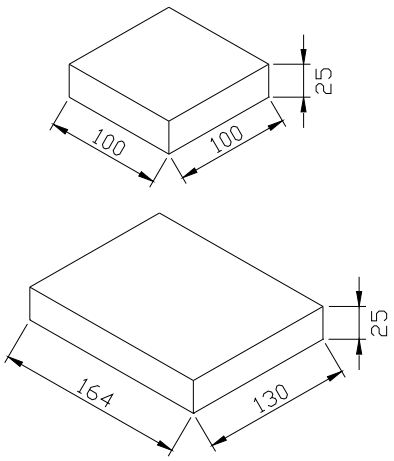


Figura 3.13 – Dimensões das amostras para o ensaio de cisalhamento direto de interface

3.6.2 Ensaio de Cisalhamento Direto Interno

Como mencionado, o ensaio de cisalhamento direto em solos é normalizado pela ASTM D 3080 de 1998. Utilizou-se o mesmo equipamento do ensaio de interface (Figura 3.11), contudo, a montagem da caixa de ensaio se procedeu de maneira distinta devido a presença de apenas um corpo de prova de dimensão diferente.

Na montagem, o corpo de prova em formato prismático com 100 x 100 x 50 mm de dimensão foi colocado no molde na base da caixa, encaixando-se perfeitamente. O molde da parte superior (atuador da carga) foi colocado em volta da metade superior do corpo de prova de maneira a deixar livre apenas a sua superfície superior. Após estas etapas, colocou-se o espaçador com a haste de aplicação do confinamento sobre a amostra, deixando-a pronta para se iniciar o ensaio.

A Figura 3.14 exibe as etapas de preparação da caixa de ensaio.

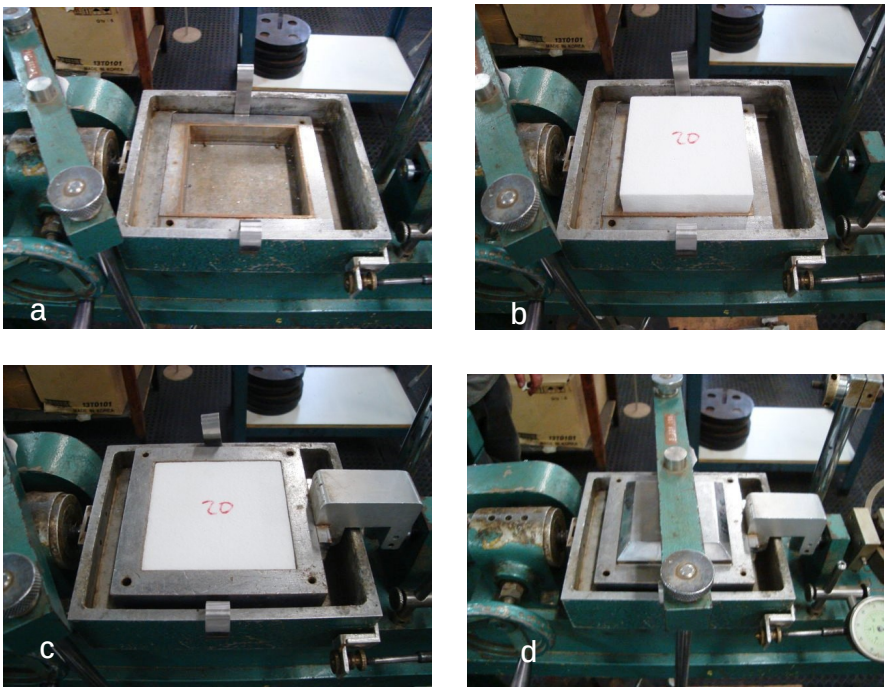


Figura 3.14 – Etapas de preparação para o ensaio de cisalhamento direto interno

Tal como no caso do cisalhamento de interface, as tensões de confinamento utilizadas foram reduzidas (10, 20, e 40 kPa), escolhidas de modo a tentar representar situações de campo, na qual um aterro de geoexpandido possui baixo peso. A velocidade de execução de ensaio adotada foi de 1,14 mm/min.

As amostras utilizadas no ensaio de cisalhamento direto de interface e as cargas de confinamento estão representadas na Tabela 3.6, e na Figura 3.15 estão as dimensões das mesmas, definidas de acordo com as dimensões apropriadas para a caixa da máquina de ensaios.

Tabela 3.6 – Massas específicas utilizadas no ensaio de cisalhamento direto interno

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)	Confinamentos (kPa)
T1AF	10	10, 20 e 40
T5AF	20	10, 20 e 40
T6AF	30	10, 20 e 40

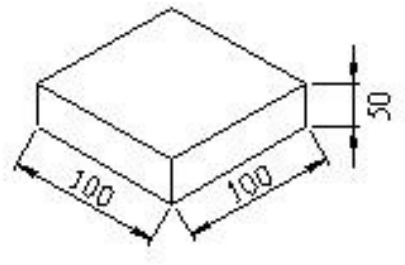


Figura 3.15 - – Dimensões das amostras para o ensaio de cisalhamento direto interno

3.7 Ensaio de Fluência por Compressão

O ensaio de fluência por compressão convencional em geossintéticos é normatizado pelas normas ASTM D 2990 de 2001 e ASTM D 5262 de 1995. Ele é realizado submetendo-se uma amostra de EPS á um carregamento constante (peso morto), com uma carga pré-determinada, por um longo período de tempo. Para tal, utilizou-se uma bancada metálica para a realização de 8 ensaios simultâneos. A Figura 3.16 exibe a bancada metálica utilizada.

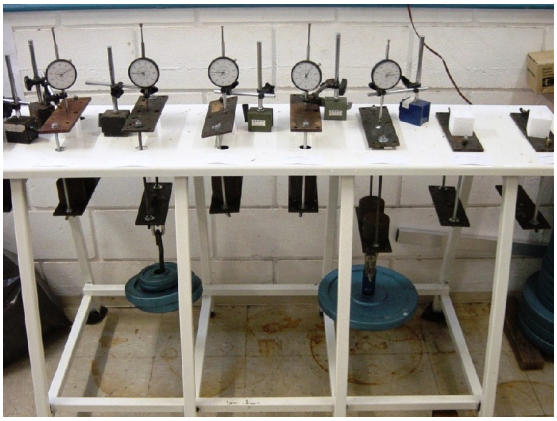


Figura 3.16 – Bancada metálica utilizada no ensaio de fluência por compressão convencional

A medida da deformação foi registrada com o auxílio de relógios comparadores presos na bancada e referenciados na amostra antes da realização do ensaio. A Figura 3.17 exibe o detalhe do relógio comparador em um corpo de prova em ensaio.

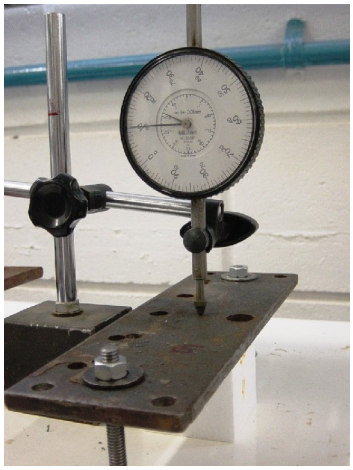


Figura 3.17 – Detalhe do relógio comparador para a determinação dos deslocamentos na fluência por compressão convencional

Para a aplicação da carga, utilizaram-se anilhas metálicas em hastes presas em chapas que transferiram a carga para os corpos de prova. A Figura 3.18 exibe todo o conjunto (sistema de aplicação de carga e de leitura) para a realização do ensaio de fluência por compressão.

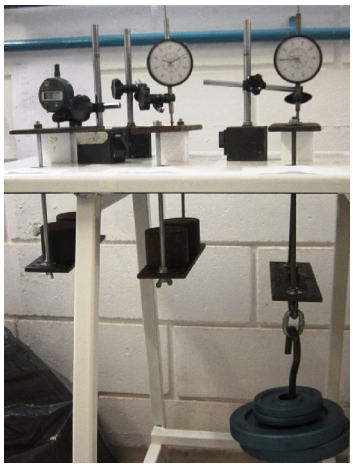


Figura 3.18 – Conjunto para a execução do ensaio de fluência por compressão convencional

Para a realização deste ensaio variou-se tanto a massa especifica das amostras como a carga de compressão. A Tabela 3.7 exibe as massas específicas utilizadas no ensaio bem como as cargas aplicadas para cada amostra e sua porcentagem em relação à tensão equivalente da resistência à compressão simples (correspondente a uma deformação de 10 %).

Tabela 3.7 – Massas específicas e cargas utilizadas no ensaio de fluência por compressão

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)	Cargas (kPa)
T1AF	10	10, 20, 40 e 60
T4AF	17	20, 40, 60 e 80
T5AF	20	20, 40, 60 e 80
T6AF	30	20, 40, 60 e 80

Utilizou-se, na realização deste ensaio, amostras cúbicas de 100 x 100 x 100 mm, que pode ser observada na Figura 3.19.

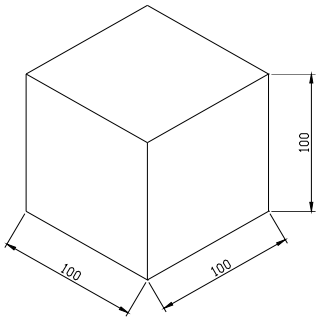


Figura 3.19 - Amostra utilizada no ensaio de fluência por compressão convencional

O tempo mínimo de ensaio utilizado neste trabalho foi de 1000 horas, equivalente a quase 42 dias, e os registros dos deslocamentos foi diário.

3.8 Ensaio de Absorção de Água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM C 272 de 2001. O procedimento do ensaio consiste na total imersão

dos corpos de prova em água destilada por um período de 24 horas. Após este tempo, a amostra é retirada, enxugada, secando-se a água excedente na superfície e pesada. Obtém-se o valor da massa de água absorvida pelo material subtraindo-se o valor da massa saturada pela massa seca obtida anteriormente por secagem em estufa com temperatura de 95 °C por um tempo não inferior a 24 horas. Da relação da massa de água absorvida pela massa seca do material determina a absorção de água do material em percentagem.

Para se obter um maior volume de resultados, foi também medido a massa natural do material obtida após a climatização. Subtraindo-se desta massa natural o valor da massa seca, obtém-se o valor de água absorvida sob condições normalizadas e após divisão pela massa seca obtém-se o valor do teor de umidade higroscópico do material.

Relacionando-se os valores de massa de água absorvida com a massa específica da mesma de forma a se obter o volume de água absorvida, e dividindo-se este valor pelo volume da amostra de EPS, obtém-se a percentagem de água absorvida pelo material, tanto para o caso saturado como o teor higroscópico. A Figura 3.20 esquematiza o ensaio de absorção de água por imersão.

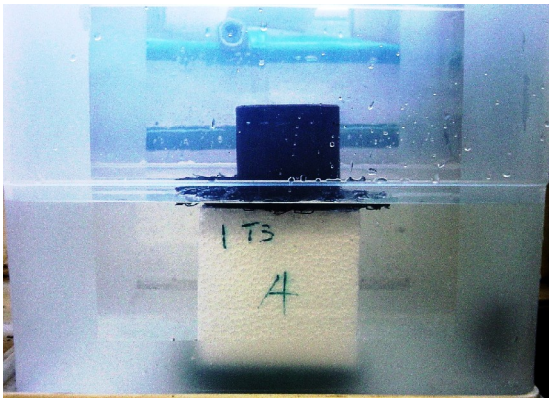


Figura 3.20 – Ensaio de absorção de água

As variáveis consideradas neste ensaio foram:

- Massa específica da amostra (Tabela 3.8);
- Dimensão dos corpos de prova (Figura 3.21).

Tabela 3.8 – Massas específicas utilizadas no ensaio de absorção de água

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)
T1AF	10
T3AF	14,5
T4AF	17
T5AF	20
T6AF	30
T1D (30% de reciclado)	10

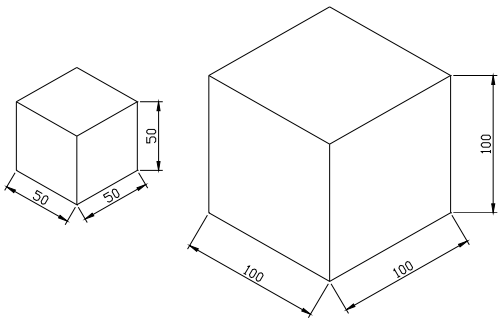


Figura 3.21 - Amostras utilizadas no ensaio de absorção de água

3.9 Ensaio de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado de maneira análoga àqueles realizados com amostras de solo. A montagem da câmara é exibida na seqüência da Figura 3.22. Na Figura 3.22a, o fundo da câmara de ensaio foi preenchido de brita, com um valor de condutividade hidráulica elevada, para se drenar facilmente a água que percola pelo corpo de prova. Acima desta camada de brita com cerca de 1/3 da altura da câmara foi colocado uma camada de parafina para auxiliar a impermeabilização da lateral e para servir de “berço” para a camada de bentonita. Na Figura 3.22b o corpo de prova, com altura de cerca de 1/3 da altura da câmara, já foi posicionado de modo a se encaixar entre o “berço” de parafina e em contato direto com a camada de brita para permitir o fluxo de água. A Figura 3.22c exibe a camada de bentonita cuidadosamente colocada de modo a se evitar um fluxo de água indesejável por fora da amostra e fluxos preferenciais nos contatos bentonita / amostra e bentonita / parede da câmara. Após a camada de bentonita, colocou-se mais uma camada de parafina, de acordo com a Figura 3.22d para se aumentar a eficiência da impermeabilização das laterais e se evitar contato da argila com a camada superior de brita (Figura 3.22e). Esta camada de brita, que tem cerca de 1/3 da altura da câmara, possui a função de promover uma regularização do fluxo pela câmara. Por fim, colocou-se a tampa da câmara com a entrada de água para se aplicar o fluxo (Figura 3.22f).

Figura 3.22 – Etapas de montagem da câmara de ensaio de permeabilidade

Com a câmara de ensaio pronta, aplica-se um gradiente hidráulico que desenvolve o fluxo e a saturação. A Figura 3.23 exibe a câmara posicionada no aparato, saturada e pronta para a realização do ensaio, e a Figura 3.24 o painel de leitura das cargas de água aplicadas ao corpo de prova.

Em todas as amostras, foi realizada a medição da permeabilidade pelos métodos de carga constante e variável.

Figura 3.23 – Câmara do ensaio de permeabilidade pronta para a realização do ensaio

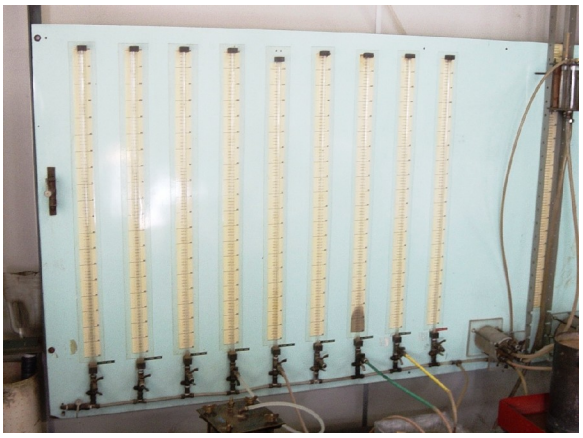


Figura 3.24 – Tubos para a medição da carga hidráulica

Para a realização deste ensaio, variou-se apenas a massa específica das amostras. A Tabela 3.9 exibe as massas específicas, e a Figura 3.25 exibe as amostras utilizadas no ensaio de permeabilidade.

Tabela 3.9 – Massas específicas utilizadas no ensaio de permeabilidade

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)
T1AF	10
T5AF	20
T6AF	30
T1D (30% de reciclado)	10

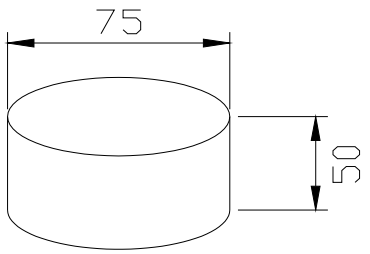


Figura 3.25 - Amostra utilizada no ensaio de permeabilidade

3.10 Ensaio de Empuxo

O ensaio de empuxo consistiu na imersão gradativa dos corpos de prova em um recipiente contendo água. Para cada volume pré-determinado imerso no líquido foi registrada a força de suspensão da amostra (empuxo) com o auxílio de uma célula de carga. A Figura 3.26 ilustra a imersão total da amostra de EPS de 30 kg/m³ no ensaio de empuxo.

Figura 3.26 – Ensaio de empuxo na amostra de EPS de 30 kg/m³

Utilizou-se uma faixa grande de massas específicas ensaiadas, exibidas na Tabela 3.10. Os corpos de prova utilizados foram cúbicos com vértice de 100 cm, mostrados da Figura 3.27.

Tabela 3.10 – Massas específicas utilizadas no ensaio de empuxo

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)
T1AF	10
T3AF	14,5
T4AF	17
T5AF	20
T6AF	30
T1D (30% de reciclado)	10

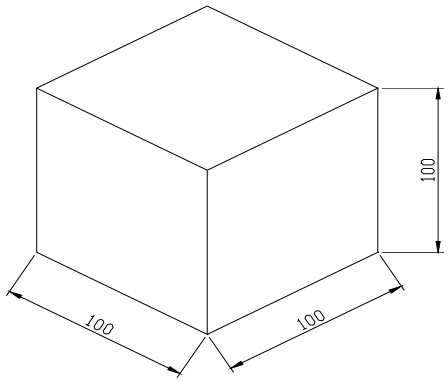


Figura 3.27 - Amostra utilizada no ensaio de empuxo

3.11 Ensaio de Perda de Massa por Ataque de Roedores

Devido ao fato de o material EPS ser utilizado em obras com contato com animais e agentes biológicos diversos, não apenas em sua construção mas também em sua vida útil, propôs-se aqui a realização de ensaios de perda de massa de amostras por contato com roedores para se qualificar e se quantificar esta perda de material em laboratório. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Psicologia da Universidade Federal de São Carlos.

Neste trabalho, foram utilizados apenas camundongos como agentes de dano, que podem ser vistos na Figura 3.28.

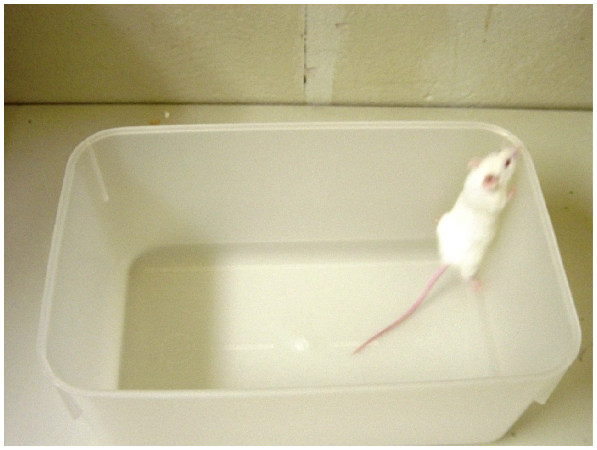


Figura 3.28 – Camundongo utilizado no ensaio de perda de massa

Estes indivíduos possuem duas variáveis de controle que influenciam em suas ações: A presença de alimento (comida e água) e a presença de palha para a formação do ninho. Portanto, o individuo pode roer a amostra tanto para alimentação como para extrair material para a formação de ninho. Desta forma, realizaram-se três grupos de ensaios para se determinar a situação mais desfavorável, na qual o individuo roí o máximo possível das amostras: a primeira com a retirada apenas do alimento (água e comida) do individuo (privação de alimento) forçando-o a roer o EPS. A segunda, com a retirada apenas da palha (privação da palha) forçando-o a roer para formar o ninho. A terceira com a retirada tanto da palha como do alimento (privação total). A Figura 3.29a e Figura 3.29b exibem, respectivamente, um individuo com privação total e com privação apenas de palha.

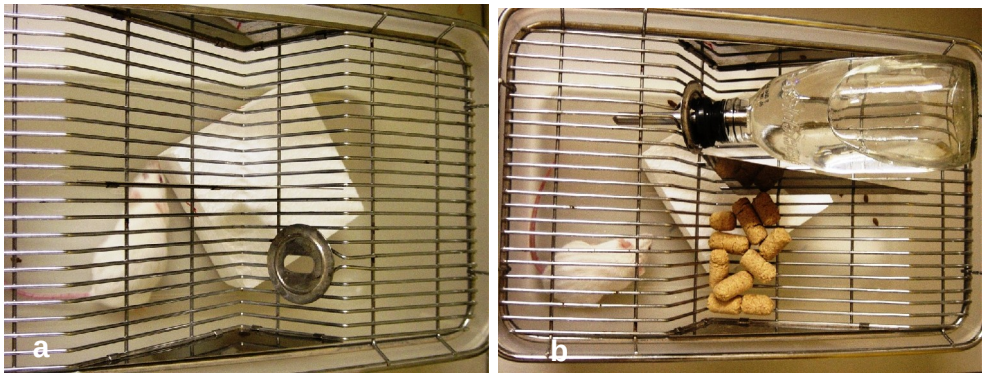


Figura 3.29a e Figura 3.29b – Indivíduo com privação total e com privação de palha, respectivamente

Utilizou-se toda a variedade de massa específica possível neste ensaio. Elas estão expostas na Tabela 3.11. A forma e dimensão dos corpos de prova utilizados podem ser vistos na Figura 3.30.

Tabela 3.11 – Massas específicas utilizadas no ensaio de perda de massa por ataque de roedores

Nomenclatura Termotécnica	Massa Específica Nominal (kg/m³)
T1AF	10
T3AF	14,5
T4AF	17
T5AF	20
T6AF	30
T1D (30% de reciclado)	10

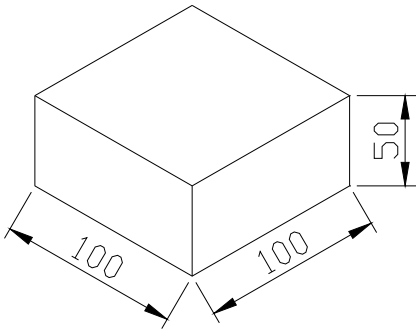


Figura 3.30 - Amostra utilizada no ensaio de perda de massa por roedores

CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados e faz as análises e discussões destes resultados.

4.2 Amostras de EPS

Como dito anteriormente no Capítulo 3, todos os corpos de prova de EPS utilizados em todos os ensaios foram preparados antes da realização dos mesmos. Nesta etapa de preparação, as amostras foram devidamente medidas e pesadas de acordo com a ASTM C 303 de 1996. A Tabela 4.1

exibe todas as estatísticas das medições feitas em todos os corpos de prova ensaiados. Nota-se por ela que os valores de massa específica possuem uma pequena variação entre as amostras.

Tabela 4.1 – Estatística das amostras de EPS

Massa específica nominal (kg/m³)	Massa Específica (kg/m³)			Desvio Padrão	C. V. (%)
	Máximo	Mínimo	Média		
10 (reciclado)	15,40	12,00	13,03	0,58	4,42
10	13,10	10,30	11,69	0,65	5,58
14,5	15,50	14,00	14,68	0,37	2,49
17	20,00	16,60	18,79	0,61	3,26
20	25,50	20,70	22,18	1,18	5,34
30	38,60	30,30	33,19	1,95	5,88
40	43,70	38,60	41,03	2,03	4,95

Para uma caracterização das amostras, determinou-se também a temperatura de transição vítrea (T_g) do EPS e sua composição e pureza com o auxílio de ensaios de análise polimérica.

A temperatura de transição vítrea é um importante efeito térmico que pode ser utilizado para a caracterização de plásticos e outros materiais amorfos ou semicristalinos (ex.: vidros inorgânicos ou alimentos, onde os componentes nos materiais alimentícios apresentam efeitos similares aos dos polímeros). A T_g é a propriedade do material onde se pode obter a temperatura da passagem do estado vítreo para um estado “maleável”, sem ocorrência de uma mudança estrutural. A parte amorfa do material (parte onde as cadeias moleculares estão desordenadas) é a responsável

pela caracterização da Temperatura de Transição Vítrea. Abaixo da T_g, o material não tem energia interna suficiente para permitir deslocamento de uma cadeia com relação a outra por mudanças conformacionais. Portanto, quanto mais cristalino for o material, menor será a representatividade da Transição Vítrea. A Tabela 4.2 exibe valores de temperaturas de transição vítrea e de fusão de alguns polímeros empregados como matéria prima básica de produtos utilizados na Engenharia Civil.

Tabela 4.2 – Temperaturas de transição vítrea e de fusão de polímeros

Polímero	Tg (°C)	Tm (°C)
HDPE	-36	135
LDPE	-70	115
LLDPE	-60	125
PP	-3	165
PS	100	*
PVC	81	*
PMMA	105	*
PVA	31	*
PET	80	250
NYLON6	40	235
NYLON66	50	265
PTFE (teflon)	-73	325

* não apresenta Tm por ser polímero amorfo

Para a determinação da T_g do EPS, utilizou-se o ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). A técnica de DSC é uma grande ferramenta para a obtenção da T_g. O ensaio é caracterizado pelo crescente aumento da temperatura e medição do potencial térmico da amostra. O resultado do ensaio é uma curva de fluxo de energia desprendido da amostra pela temperatura. Na curva de DSC, a T_g é

caracterizada pela mudança de C_p (Calor específico: mudança da linha base, dado em J/g°C).

A Figura 4.1 exibe curvas típicas de ensaios DSC em alguns polímeros largamente utilizados.

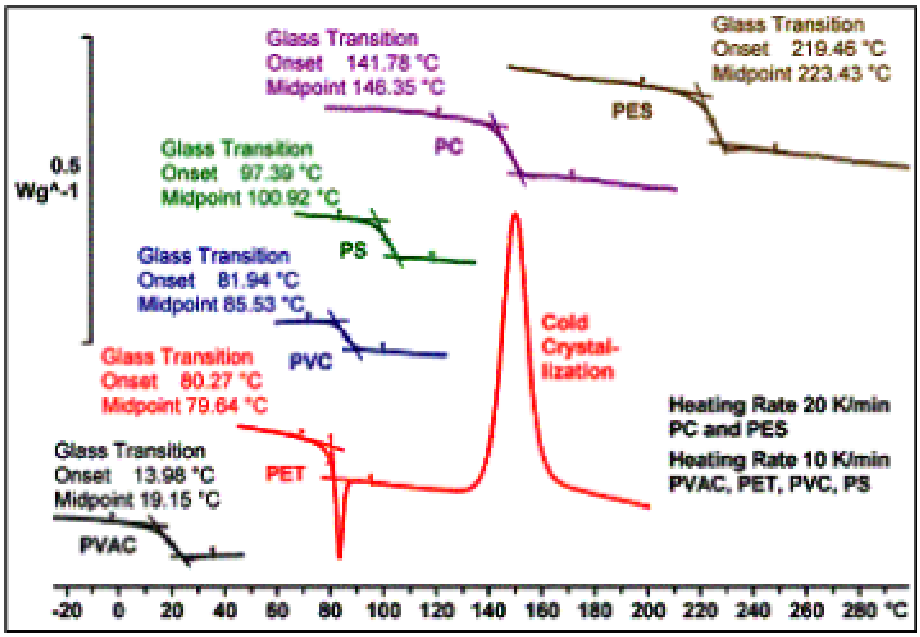


Figura 4.1 – Resultado do ensaio DSC em alguns polímeros (QMC)

Da análise da Figura 4.1 pode-se observar, além da curva típica, o valor da temperatura de transição vítrea encontrados em literatura de alguns polímeros.

A Figura 4.2 e a Figura 4.3 exibem o resultado do ensaio DSC em amostras de EPS de material reciclado e virgem.

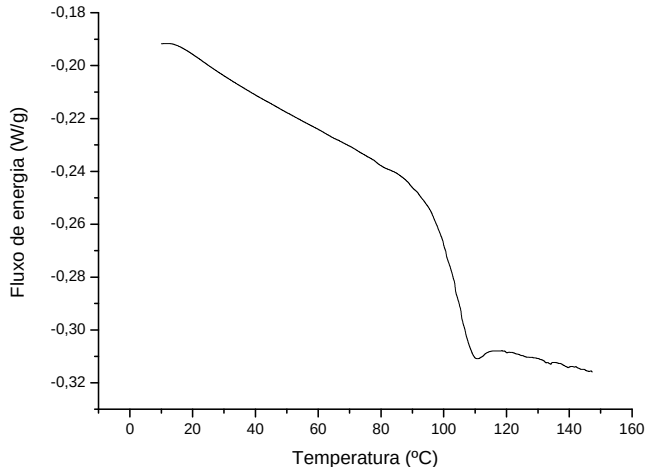


Figura 4.2 – Resultado do ensaio DSC em amostra de EPS reciclado

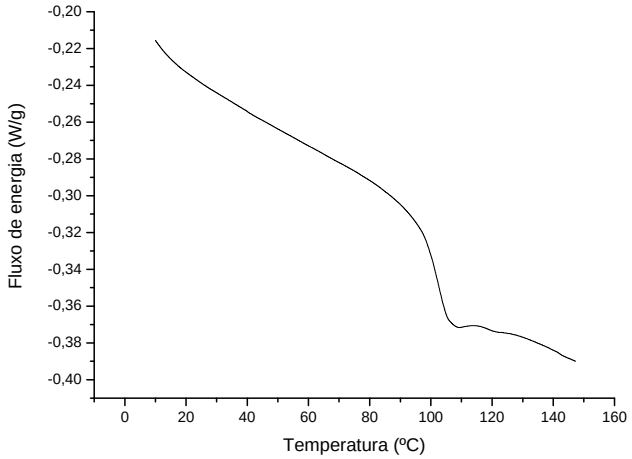


Figura 4.3 - Resultado do ensaio DSC em amostra de EPS virgem

Das Figura 4.2 e Figura 4.3 pode-se observar que a temperatura de transição vítrea dos materiais virgem e reciclado situa-se em torno de 100 °C, valor este encontrado em literatura, de acordo com a Tabela 4.2. Observa-se também que não há uma diferença significativa entre a transição vítrea do material virgem e o material reciclado.

Para se comparar as diferenças entre o material virgem e reciclado, Figura 4.4 exibe um gráfico reunindo as duas.

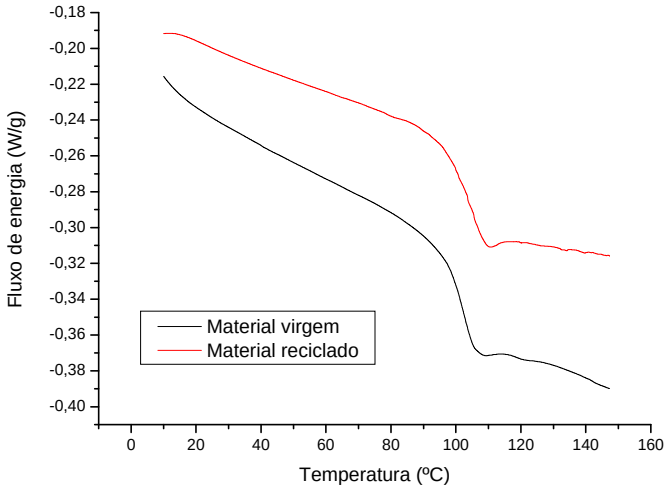


Figura 4.4 – Resultado do ensaio DSC para ambas as amostras

Percebe-se da Figura 4.4, que ambas as amostras possuem o mesmo valor de temperatura de transição vítrea, porém, possuem uma energia de liberação diferente. O material virgem possui um maior fluxo de energia, já esperado antes da realização do ensaio, visto que a pureza deste é maior em relação ao reciclado.

Para a determinação de sua composição polimérica e sua pureza, realizaram-se ensaios de Análise Termogravimétrica (TGA) em amostras virgens e recicladas do EPS. O ensaio de TGA consiste no aumento gradativo da temperatura e medição da perda de massa do corpo de prova, em uma atmosfera inerte ou oxidada. Para cada perda de massa da amostra em uma determinada temperatura pode-se determinar um elemento que compõe a amostra por curvas calibradas.

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 exibem o resultado do ensaio TGA em amostras de EPS reciclado e virgem.

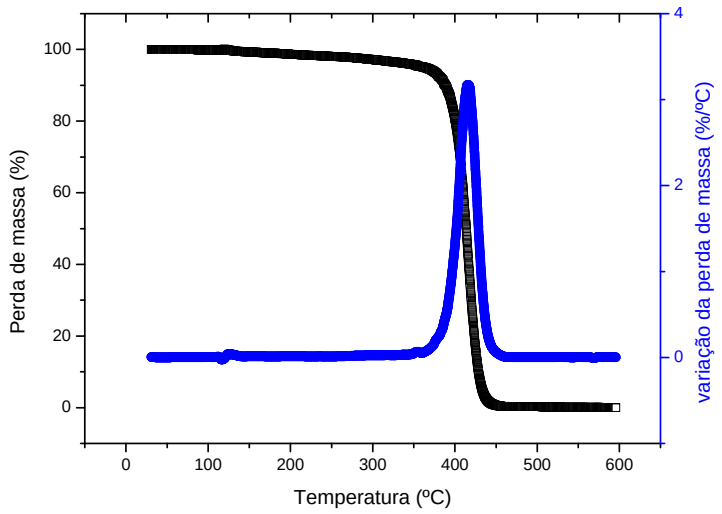


Figura 4.5 - Resultado do ensaio de TGA em amostra de EPS recicado

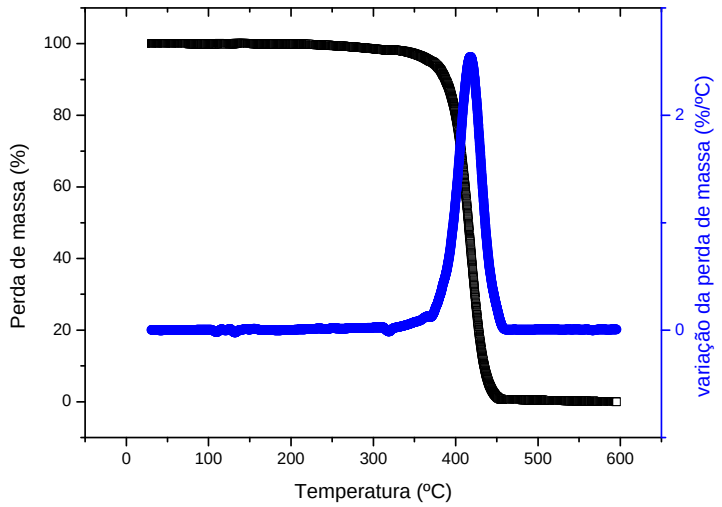


Figura 4.6 - Resultado do ensaio de TGA em amostra de EPS virgem

Analisando-se a Figura 4.5 e a Figura 4.6 nota-se que as amostras são constituídas apenas de um polímero, o poliestireno (PS). Para a

temperatura de cerca de 400 °C há total perda de massa dos corpos de prova. A pureza das amostras também é verificada por estes gráficos.

Para se comparar as amostras virgem e reciclada, os resultados do TGA foram colocados em um único gráfico, exibido na Figura 4.7.

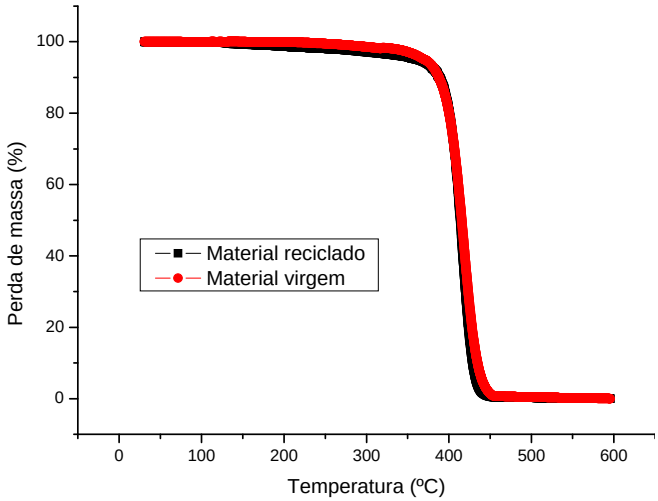


Figura 4.7 - Resultado do ensaio de TGA em ambas amostras de EPS

Observa-se desta Figura 4.7 que não há diferença polimérica entre as amostras de EPS reciclado e virgem. Ambos possuem apenas o polímero PS e mesma pureza.

4.3 Ensaio de Compressão Simples

Nesta etapa foram realizados diversos ensaios de compressão uniaxial. Em cada bateria de ensaio, para uma determinada massa específica, velocidade de execução, dimensão da amostra e temperatura,

foram escolhidos cinco corpos de prova. Para exemplificar, a Tabela 4.3 exibe as estatísticas dos resultados e a Figura 4.8 os gráficos do ensaio de compressão uniaxial realizado com amostras de EPS de 30 kg/m³ de formato cúbico (100 x 100 x 100 mm) em uma velocidade de execução de 50 mm/min à temperatura de 23 °C.

Tabela 4.3 – Estatística do ensaio de compressão uniaxial da amostra de EPS de 30 kg/m³

Parâmetro	Dens.	Força	Força	Tensão	Tensão	Mód. Elast.	Tensão	Mód. Elast.
Evento	Dens.	Força Max.	10%	Tensão Max.	10%	10%	1%	1%
Unidade	(kg/m³)	(kN)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
CP 1	31,79	4,16	2,73	407,69	267,65	2.676,50	117,75	11.774,75
CP 2	31,22	4,08	2,63	401,52	259,07	2.590,74	117,99	11.799,01
CP 3	32,77	4,01	2,64	374,34	258,81	2.588,11	94,44	9.443,74
CP 4	31,37	4,00	2,62	393,21	258,05	2.580,49	100,52	10.051,96
CP 5	31,95	4,20	2,76	414,92	273,01	2.730,11	108,05	10.805,07
Média	31,82	4,09	2,68	398,34	263,32	2.633,19	107,75	10.774,91
C. V. (%)	1,92	2,15	2,41	3,92	2,54	2,54	9,67	9,67

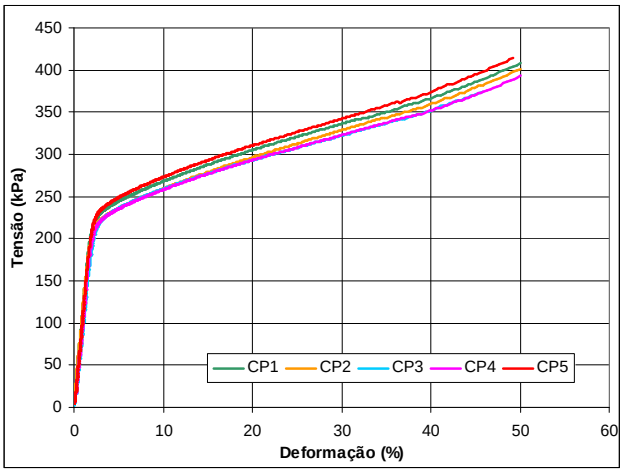


Figura 4.8 - Resultado do ensaio de compressão uniaxial da amostra de EPS de 30 kg/m³

A Figura 4.8 exibe uma curva típica tensão x deformação do material, na qual há uma região elástica até o valor próximo de 2 % de deformação, e uma parcela plástica (após cerca de 2 % de deformação). Nesta fase o material sofre um endurecimento. Portanto, a curva de compressão do EPS pode ser caracterizada por apenas três pontos característicos: o módulo tangente da fase elástica inicial, adotando o valor limite de 1 % de deformação; a tensão de transição da fase elástica para a fase de endurecimento do material, adotada para uma deformação de 2 %, ponto esse em que há uma mudança na inclinação da curva e módulo tangente da fase de endurecimento, adotado para uma deformação entre 2 e 10 %.

Foi realizado um total de 350 ensaios com as variações acima descritas. Destes ensaios foi possível montar uma estatística das resistências de cada massa específica ensaiada, exibida na Tabela 4.4. Desta Tabela nota-se a relação direta da massa específica e a resistência

do material EPS. O comportamento do EPS é largamente influenciado por essa propriedade possuindo uma grande amplitude de resistência (50 a 300 kPa) para uma pequena faixa de variação de massa específica (10 à 40 kPa).

Tabela 4.4 – Estatística de todos os ensaios de compressão uniaxial realizados

Massa Específica Nominal (kg/m³)	Resistência (kPa)			Desvio Padrão	C. V.. (%)
	Máxima	Mínima	Média		
30	300,21	222,96	264,05	17,21	6,52
20	199,02	139,32	157,62	13,92	8,83
17	127,35	103,38	115,02	7,42	6,45
14,5	87,05	72,31	79,46	5,04	6,35
10	61,98	50,10	55,25	3,05	5,52
10 (reciclado)	59,88	47,57	53,52	2,89	5,40

A literatura internacional sugere que a resistência ao cisalhamento dos plásticos celulares rígidos possa ser dada pelo valor da tensão correspondente a uma deformação de 10%. Com os dados dos ensaios, também foi possível determinar uma relação linear entre a resistência do EPS e sua massa específica. A Figura 4.9 exibe o resultado de todos os ensaios feitos com o material e a correlação linear proposta.

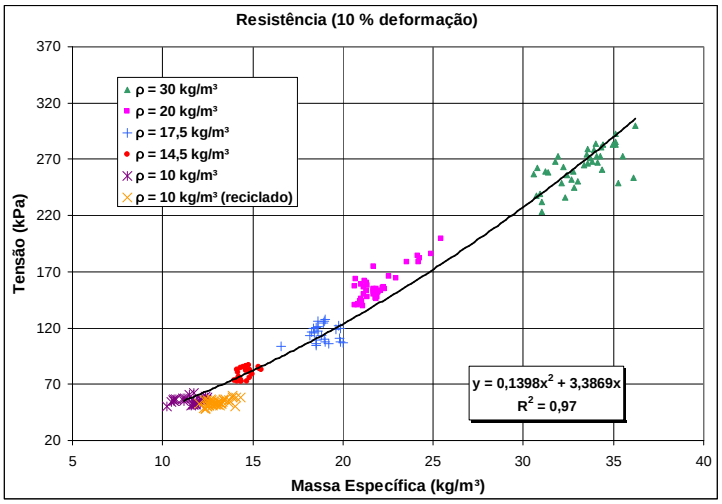


Figura 4.9 - Relação entre resistência ao cisalhamento (correspondente a deformação de 10%) e massa específica para diversas amostras de EPS

A relação entre resistência o cisalhamento e a massa específica proposta possui um excelente coeficiente de correlação como mostra a Figura 4.9. Os valores esperados para a massa específica do material se situam em uma faixa acima de 10 kg/m³, que é o valor mínimo usual em projetos de caráter geotécnicos. Valores de massa específica inferiores a este não são recomendados para o uso geotécnico devido a pobreza de características mecânicas requeridas para esta utilização.

Por motivo de comparação, o projeto com a utilização do geoexpandido fora da zona de endurecimento e para um maior volume de dados, foi feito também um gráfico com todos os valores de resistência, para um valor de deformação correspondente a 1 %, de todos os EPS ensaiados e dele obtido uma relação entre a resistência (deformação igual a 1 %) e massa específica, exibidos na Figura 4.10.

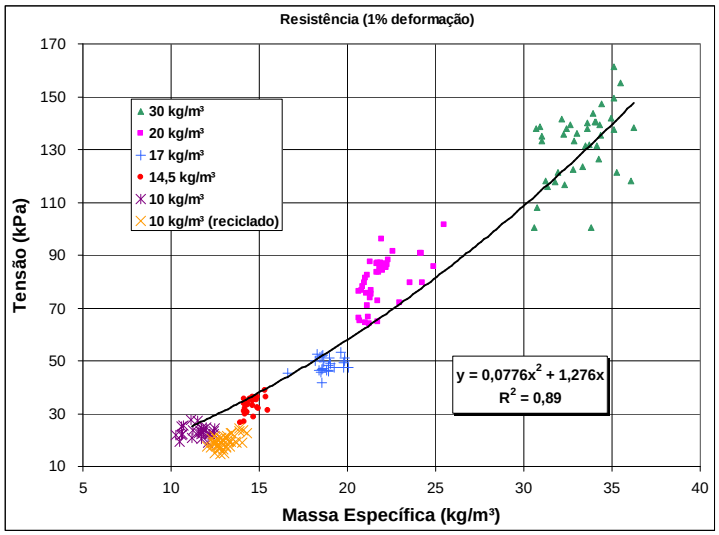


Figura 4.10 - Relação entre resistência ao cisalhamento (correspondente a deformação de 1%) e massa específica para diversas amostras de EPS

Nota-se por ela que mais uma vez a correlação possui uma grande aproximação com os valores obtidos.

Para a caracterização completa da curva tensão versus deformação do material, foram determinados os três pontos característicos desta curva (o módulo de elasticidade na fase elástica, o módulo tangente da fase de endurecimento e a tensão de transição entre fases e a taxa de ganho de resistência na fase de endurecimento). Destes valores foi possível gerar relações entre eles e a massa específica. Essas curvas podem ser observadas nas Figuras 4.11, **Figura 4.12** e Figura **4.13**.

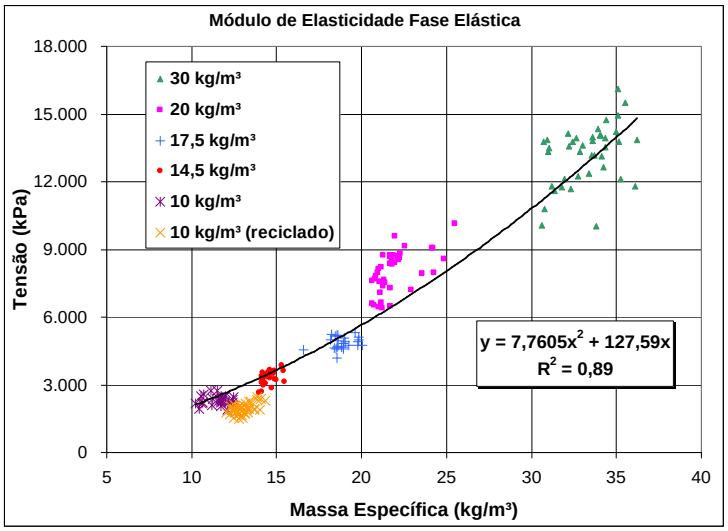


Figura 4.11 - Relação entre o módulo de elasticidade na fase elástica do material e sua massa específica para diversas amostras de EPS

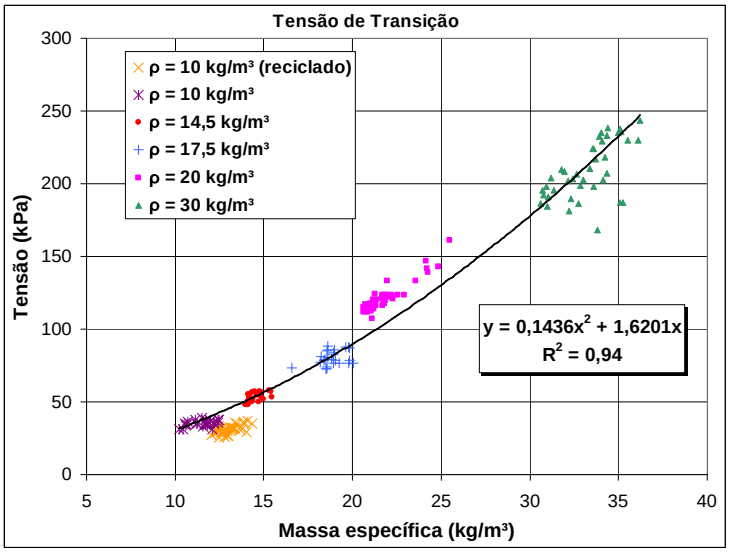


Figura 4.12 - Relação entre a tensão de transição da fase elástica para a fase plástica do material e sua massa específica para diversas amostras de EPS

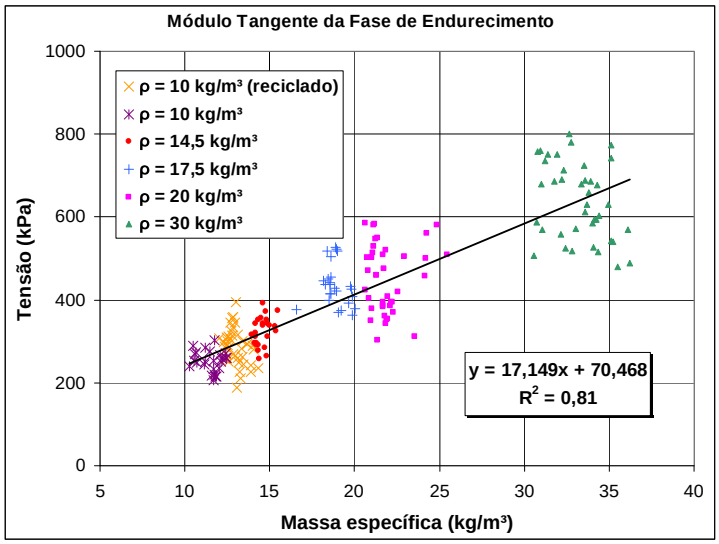


Figura 4.13 - Relação entre o módulo tangente da fase de endurecimento do material e sua massa específica para diversas amostras de EPS

Percebe-se destas Figuras, novamente, a relação existente entre a massa específica e os módulos e a tensão. Percebe-se também a redução do módulo de elasticidade na fase de endurecimento em relação à fase elástica. Essa característica se deve também a redução da inclinação da curva de compressão do material após a tensão de transição.

4.3.1 Influência da Velocidade de Execução

Foi verificada a influência da velocidade de execução na resistência ao cisalhamento para os ensaios de compressão uniaxial. Para isso realizaram-se ensaios, além das velocidades previstas pela ASTM 1621 de 2000 (10 %/min), em outras velocidades. A Figura 4.14 exibe os

resultados das resistências à compressão uniaxial simples das amostras ensaiadas nas mais diversas velocidades.

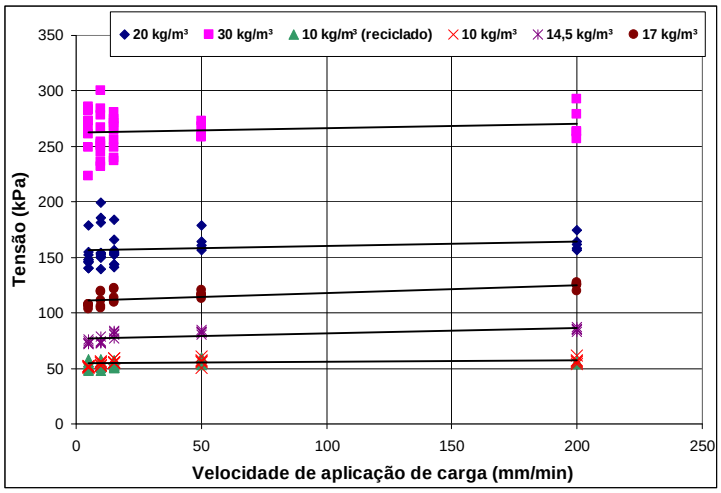


Figura 4.14 – Resistência para uma deformação de 10 % pela taca de aplicação de carga

Nota-se da Figura 4.14 que há uma certa tendência de aumento da resistência ao cisalhamento do material para uma maior velocidade de aplicação de carga. Este fato é evidenciado para a maioria dos materiais. Porém, este acréscimo é pequeno, cerca de 15 % no caso em que ocorreu a maior diferença (EPS de 17 kg/m³).

4.3.2 Influência das Dimensões da Amostra

Usualmente são utilizadas amostras de em formato cúbico de 50 x 50 x 50 mm. Bueno (2005) realizou ensaios com amostras cilíndricas com relações h : D de 2 : 1 e 3 : 1. Seus resultados permitiram verificar que os corpos de prova rompiam por instabilidade lateral.

Neste trabalho foi realizado apenas ensaios com amostras cúbicas, variando-se as dimensões (50 e 100 mm de lado). A Figura 4.15 exibe os resultados de obtidos.

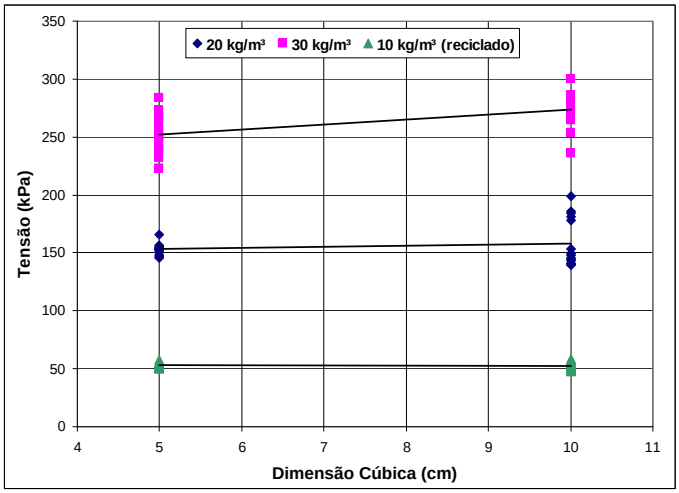


Figura 4.15 – Resistência ao cisalhamento para uma deformação de 10 % pela dimensão das amostras cúbicas de EPS

Da Figura 4.15 pode-se notar que não há variação significativa da resistência do material com o aumento da dimensão das amostras para valores reduzidos de massa específica. Porém, para massas específicas maiores, há um pequeno aumento da resistência ao cisalhamento, chegando a cerca de 10 % para o caso das amostras de 30 kg/m³.

4.3.3 Influência da Variação da Temperatura

A influência da temperatura na resistência ao cisalhamento do poliestireno expandido pode ser verificada na Figura 4.16. As

temperaturas utilizadas variaram de 23 a 72 °C com incrementos de 7 °C. O valor da resistência é a média de três ensaios realizados para cada temperatura.

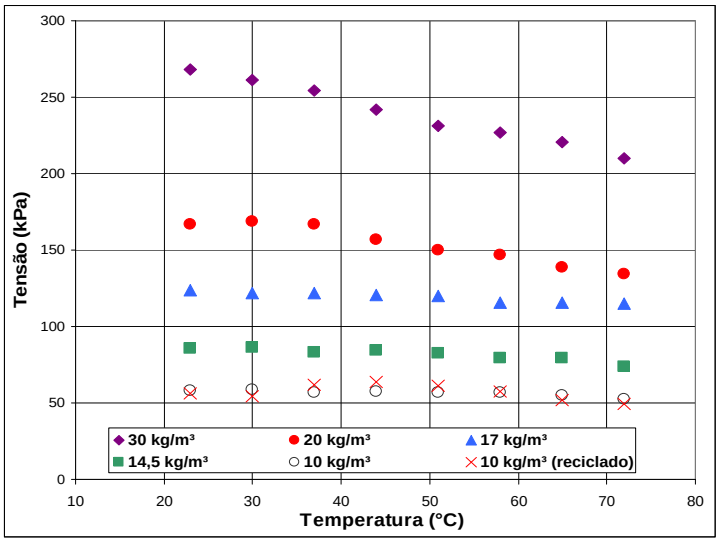


Figura 4.16 – Resistência de amostras de EPS para diferentes valores de temperaturas

Da análise da Figura 4.16, nota-se uma grande influência da temperatura na resistência ao cisalhamento para amostras de EPS com valores de massa específica superiores (30 e 20 kg/m³), atingindo reduções de resistência ao cisalhamento de até 20 % para variações da temperatura em cerca de 50 °C. Todavia, o material com menor massa específica não é significativamente afetado pela temperatura. Esta disfunção no resultado por ser explicada pela própria massa específica. Amostras com maiores valores de massa específica possuem um menor valor de vazios (preenchidos com ar) interno, e consequentemente uma maior parcela do polímero, que é mais significativamente afetado pela

variação da temperatura do que o ar dos vazios. Por outro lado, uma menor massa específica possui um maior valor de vazios e uma menor parcela do polímero, sendo menos influenciada no todo pela temperatura.

Para uma melhor análise destes resultados, foi gerado um gráfico, apresentado na Figura 4.17, da relação entre as resistências obtidas para cada temperatura por uma temperatura de controle (adotada para 23 °C) apenas para aqueles materiais que sofreram uma perda de resistência ao cisalhamento significante (20 e 30 kg/m³).

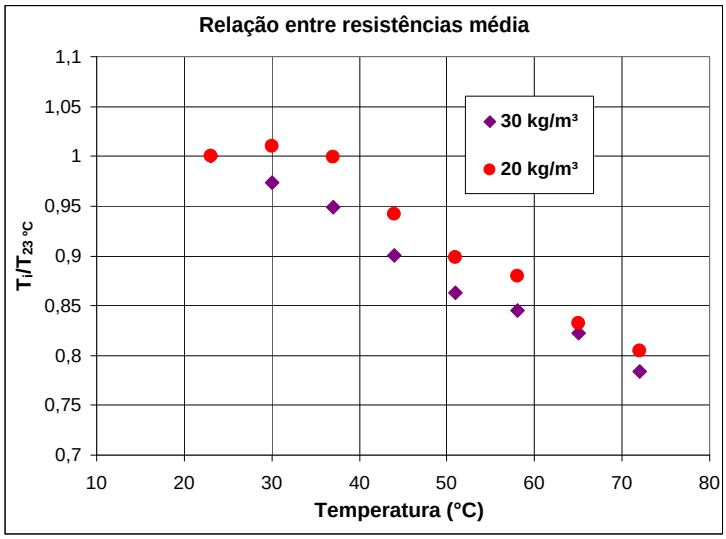


Figura 4.17 - Influência da temperatura nas amostras de 20 e 30 kg/m³ em relação a resistência de 23 ºC

Desta figura observa-se a grande interferência da variável temperatura na resistência mecânica do EPS. A redução da tensão ultrapassa 20 % para temperaturas de 72 °C. Obteve-se, também, uma

relação do decréscimo da resistência ao cisalhamento do material com o aumento da temperatura.

4.4 Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclica

As FigurasFigura **4.18** a Figura **4.23** exibem resultados dos ensaios de compressão cíclica realizados com as amostras de EPS com formato cúbico de 100 mm de lado e de massa específica de 30, 20, 17, 14,5, 10 e 10 (reciclada) kg/m³, respectivamente. Cada curva corresponde a um ensaio realizado com um corpo de prova (um corpo de prova solicitado apenas na parte elástica e outro solicitado até a fase de endurecimento – fase plástica, agrupados em um mesmo gráfico para facilitar a análise).

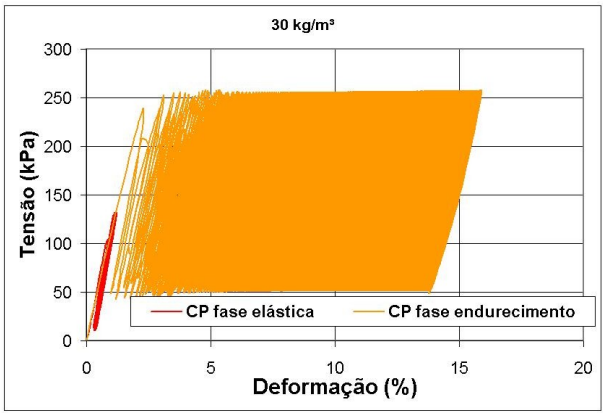


Figura 4.18 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 30 kg/m³

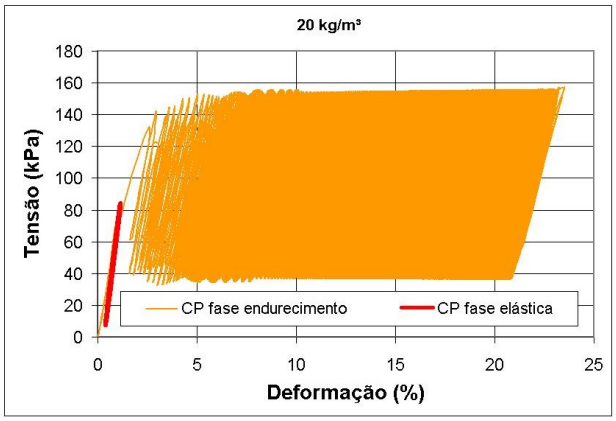


Figura 4.19 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 20 kg/m³

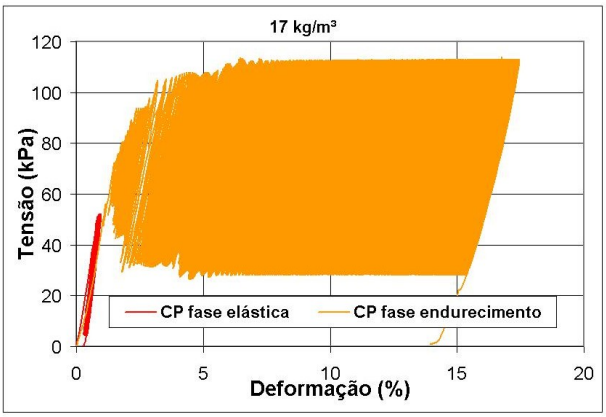


Figura 4.20 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 17 kg/m³

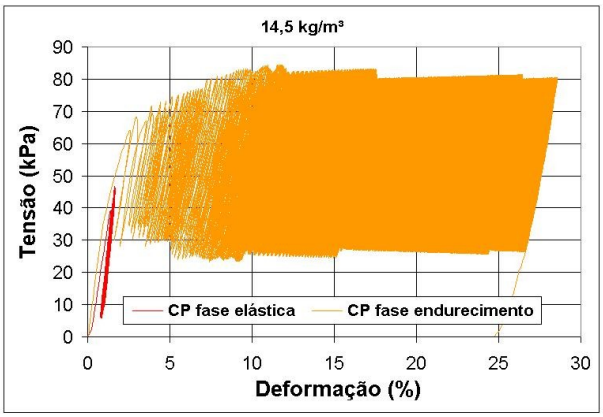


Figura 4.21 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 14,5 kg/m³

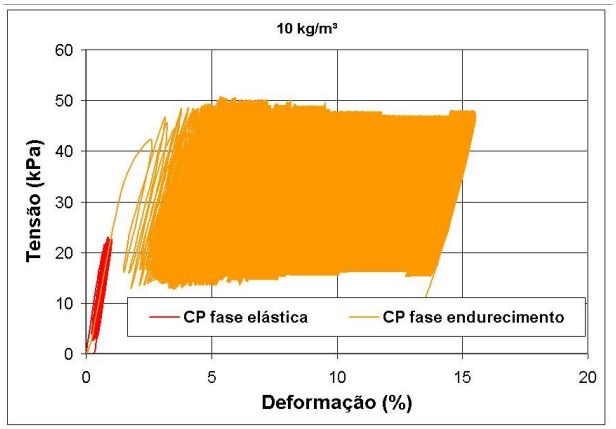


Figura 4.22 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 10 kg/m³

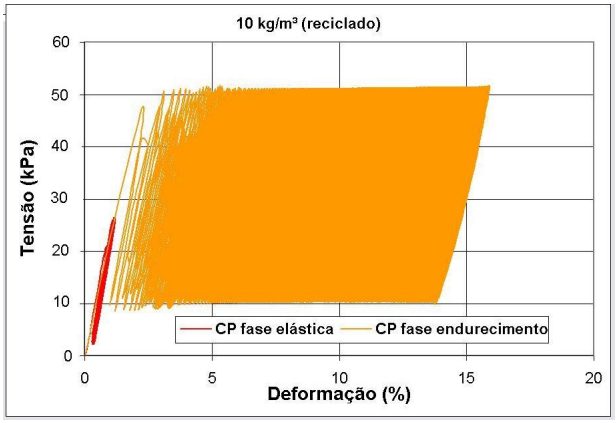


Figura 4.23 – Ensaio de compressão cíclica com amostra de EPS de 10 kg/m³ com material reciclado

Observando estas Figuras, verifica-se como o corpo de prova que foi submetido a uma tensão na fase elástica do material (inferior a 2 % de deformação) praticamente não sofreu uma deformação acumulada ao longo da variação de carga em que a amostra foi submetida. Por outro lado, pode-se notar que a amostra que foi submetida a uma tensão superior à tensão elástica (na fase plástica) sofreu uma grande deformação acumulada. Porém, nota-se pelas mesmas curvas que o

material não sofre uma redução significativa do módulo de elasticidade, tendo a curva tensão x deformação a mesma inclinação nos ciclos de recarga.

Para observar melhor o comportamento do material, foi feito um gráfico da deformação acumulada pelo ciclo de carregamento para cada amostra. O resultado pode ser visto pelas Figuras Figura **4.24** a Figura **4.29**.

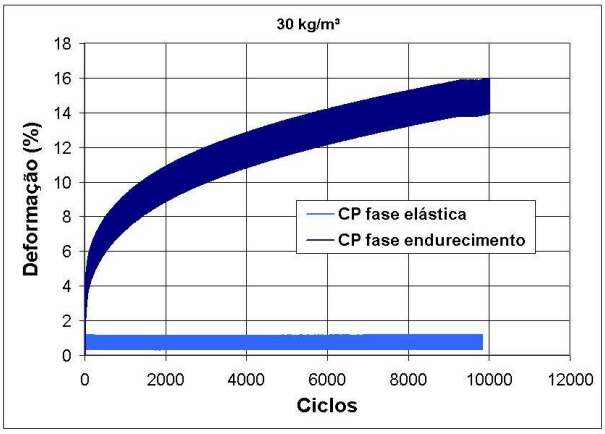


Figura 4.24 – Deformação acumulada do EPS de 30 kg/m³

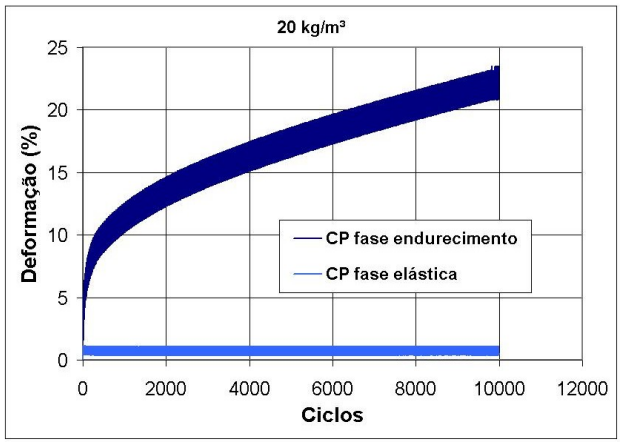


Figura 4.25 – Deformação acumulada do EPS de 20 kg/m³

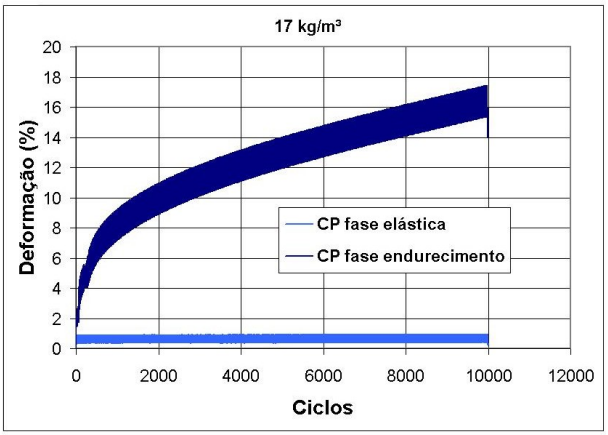


Figura 4.26 – Deformação acumulada do EPS de 17 kg/m³

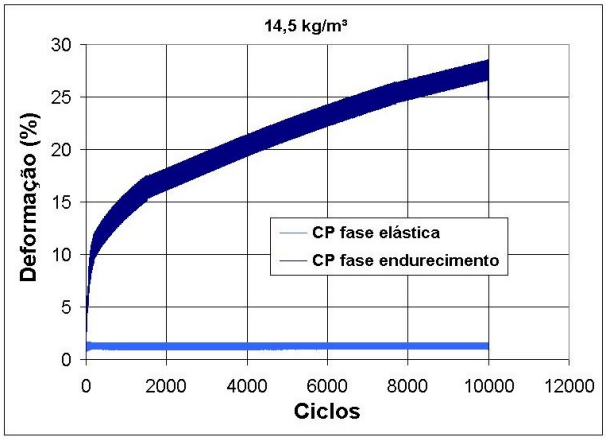


Figura 4.27 – Deformação acumulada do EPS de 14,5 kg/m³

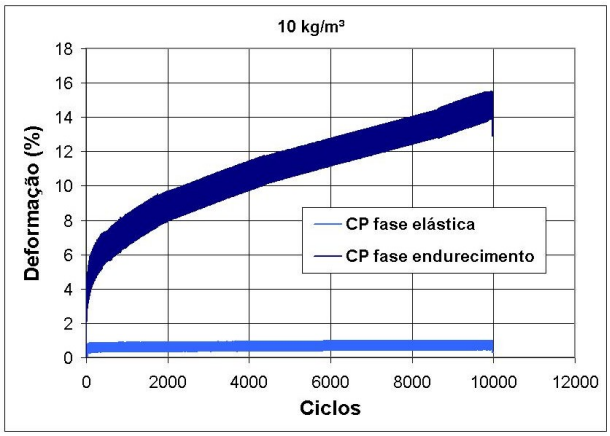


Figura 4.28 – Deformação acumulada do EPS de 10 kg/m³

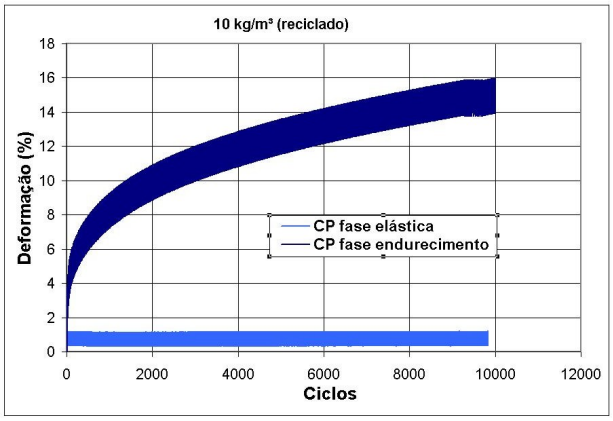


Figura 4.29 – Deformação acumulada do EPS de 10 kg/m³ com material reciclado

Observa-se nos gráficos a deformação acumulada pelos ciclos de compressão nos dois casos. A amostra solicitada a uma carga da zona de endurecimento tem uma grande deformação acumulada (acima de 20 % em alguns casos) ao longo dos 10.000 ciclos. Por outro lado, a amostra solicitada na faixa elástica não exibe plastificação considerável (inferior a 1 %).

Estes resultados indicaram que o material EPS não é indicado para uma utilização que o solicite dinamicamente acima do seu limite de elasticidade. Porém, quando solicitado na fase elástica, ele se mostrou muito eficiente, suportando os ciclos de carga sem exibir perda das propriedades mecânicas, deformação acumulada e fadiga estrutural.

Diante deste tipo de solicitação, não se notou uma influência da massa específica na deformação acumulada. Ambas as amostras sofreram a mesma deformação, sendo apenas as cargas aplicadas em cada uma de magnitudes diferentes.

4.5 Ensaio de Compressão Triaxial

Neste estudo realizou-se ensaios triaxiais consolidado não drenado (CU), com uma velocidade de execução de 1,14 mm/min. As amostras estavam secas (teor de umidade higroscópico extremamente baixo, com valores inferiores a 1,40 % em relação as massas da amostra e de água), situação comum em uma utilização prática. Portanto, não há pressão neutra envolvida no ensaio.

Os resultados das fases de "adensamento", e ruptura em gráfico tensão *versus* deformação, as variações da deformação volumétrica e a variação do Coeficiente de Poisson pela deformação axial das amostras de EPS de 40, 30, 20 e 10 (virgem e reciclado) kg/m³ para as tensões de confinamento de 20, 30 e 40 kPa pode ser observadas nas Figura 4.30 a Figura **4.49**.

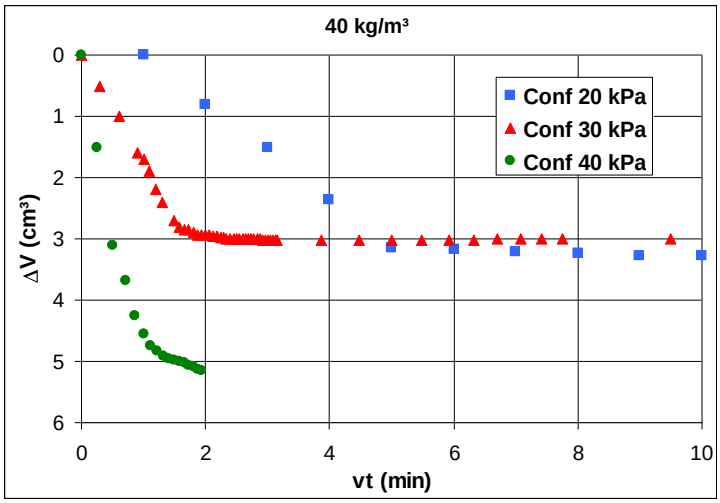


Figura 4.30 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 40 kg/m³

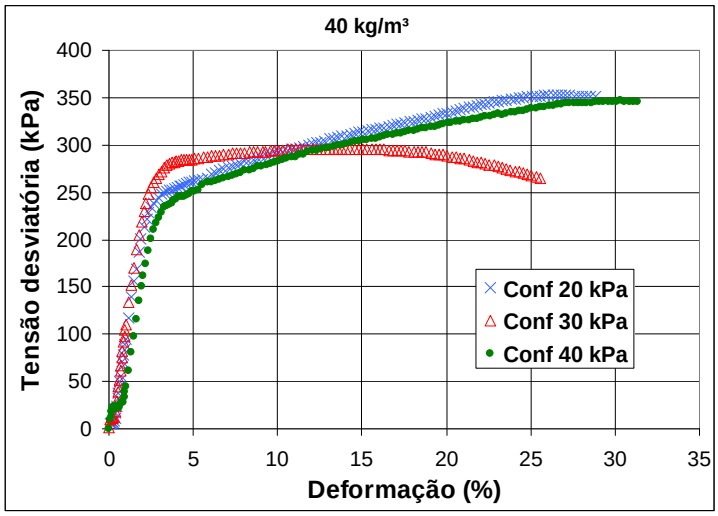


Figura 4.31 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 40 kg/m³

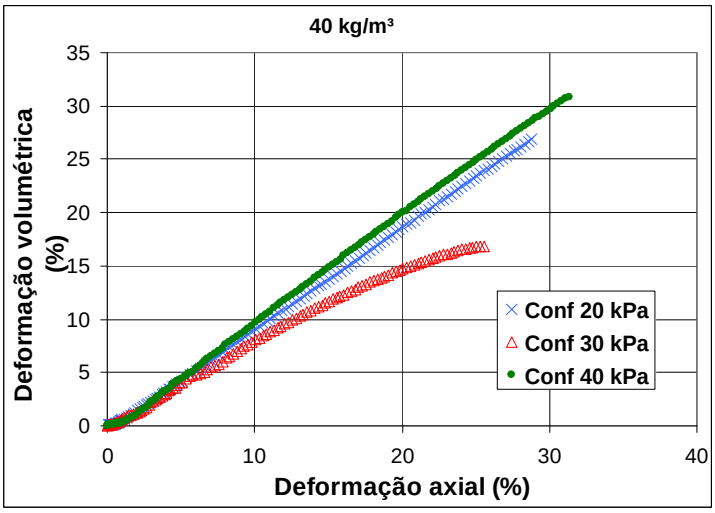


Figura 4.32 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 40 kg/m³

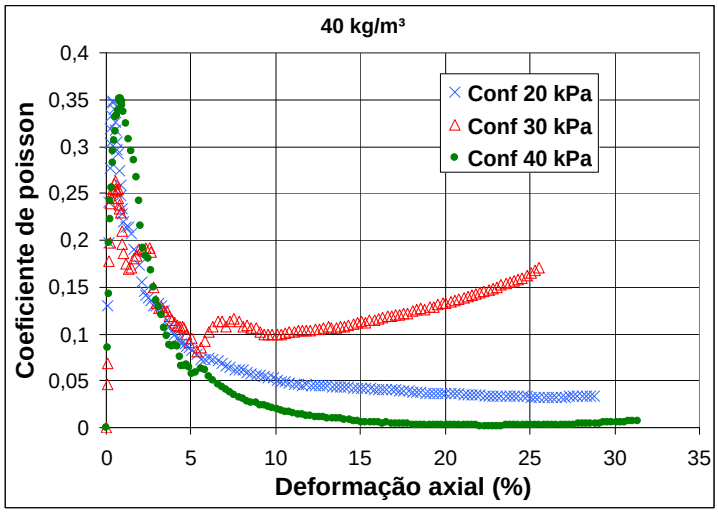


Figura 4.33 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 40 kg/m³

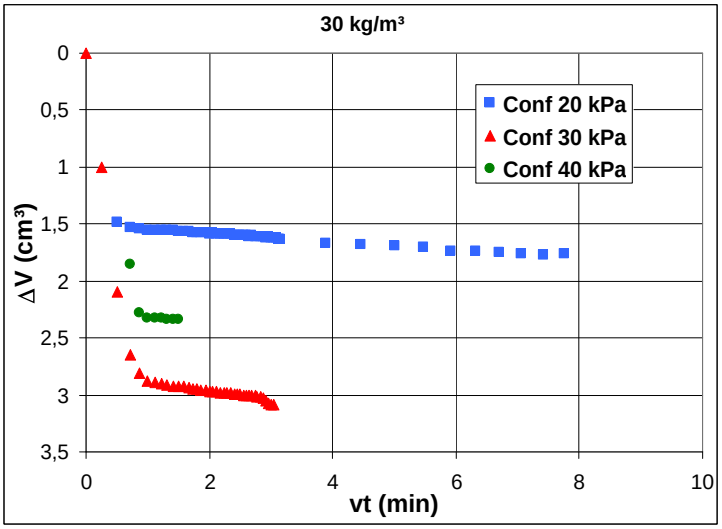


Figura 4.34 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 30 kg/m³

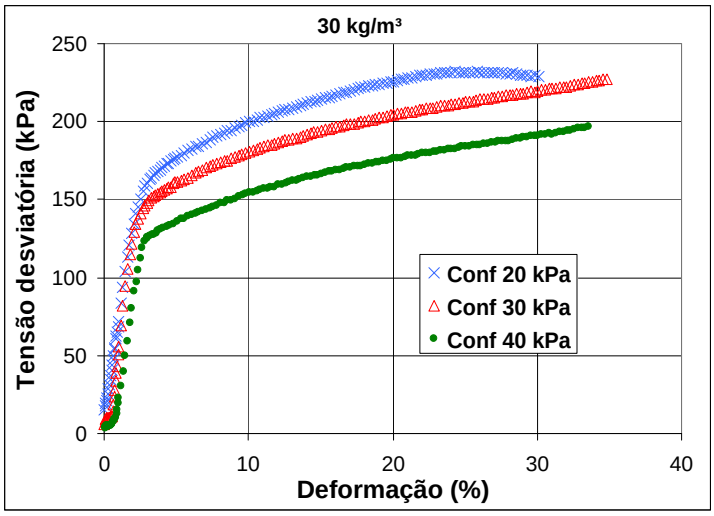


Figura 4.35 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 30 kg/m³

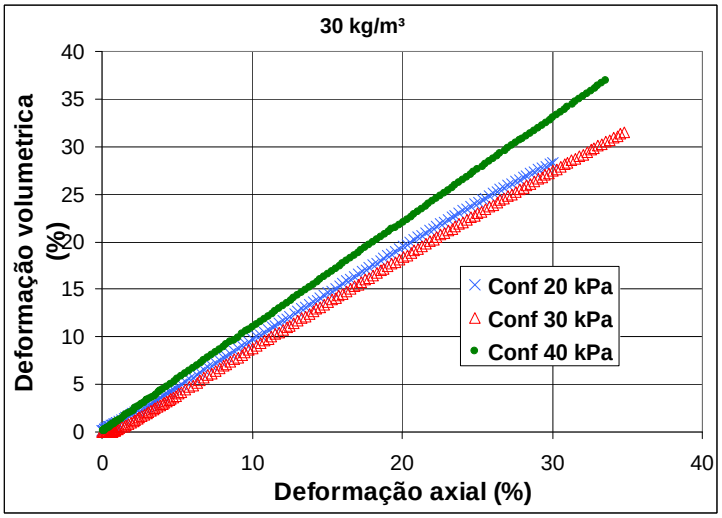


Figura 4.36 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 30 kg/m³

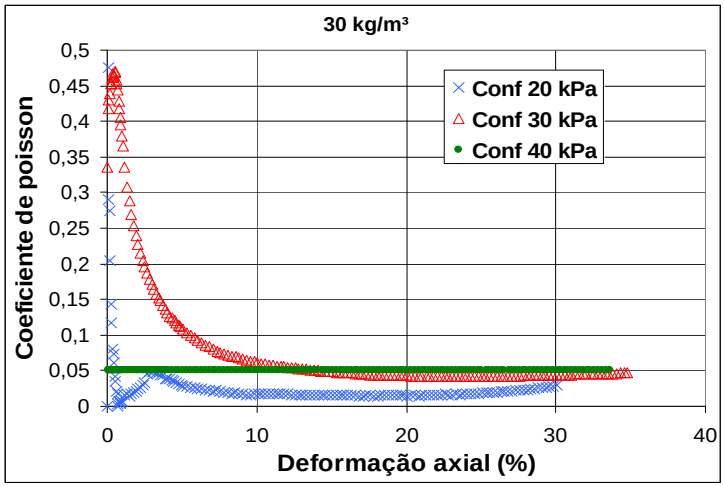


Figura 4.37 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 30 kg/m³

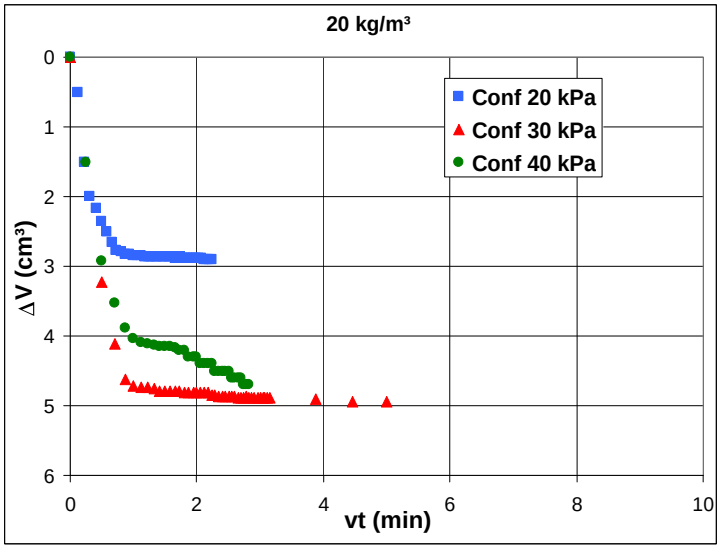


Figura 4.38 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 20 kg/m³

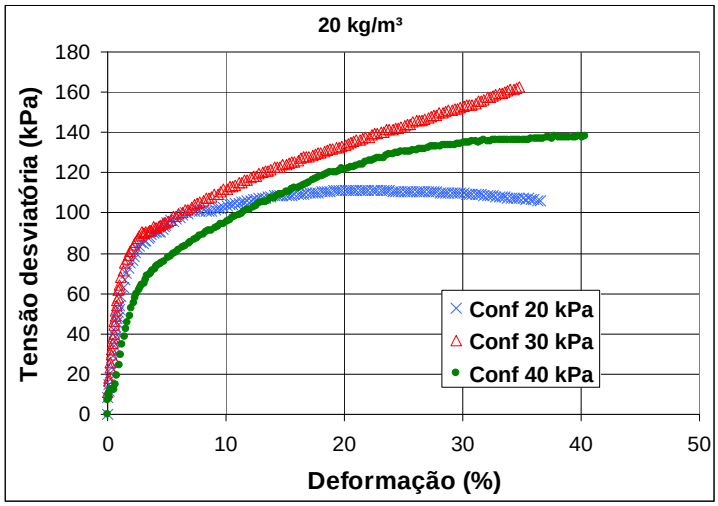


Figura 4.39 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 20 kg/m³

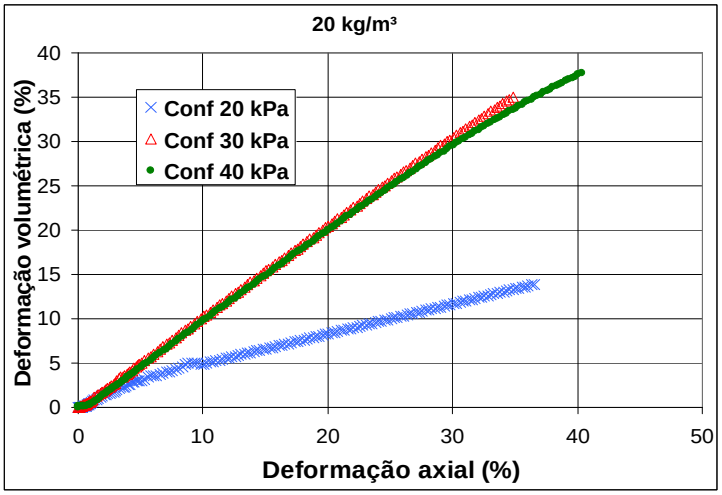


Figura 4.40 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 20 kg/m³

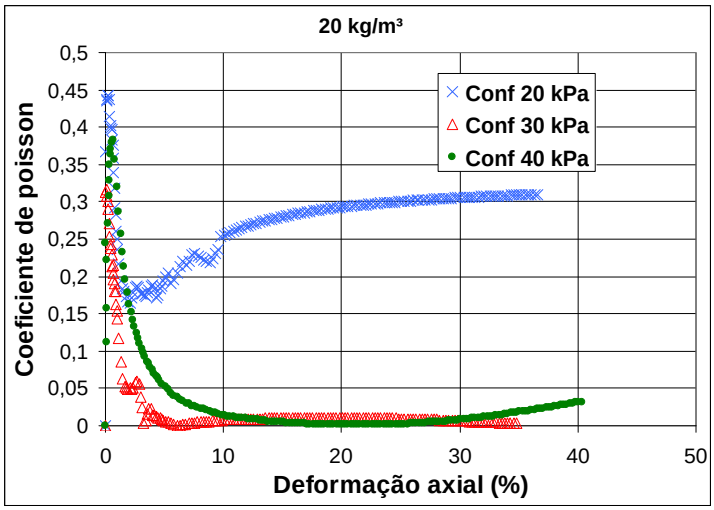


Figura 4.41 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 20 kg/m³

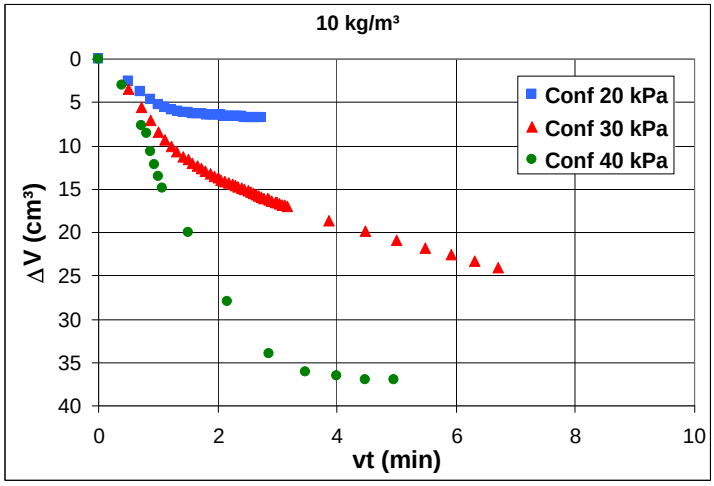


Figura 4.42 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 10 kg/m³

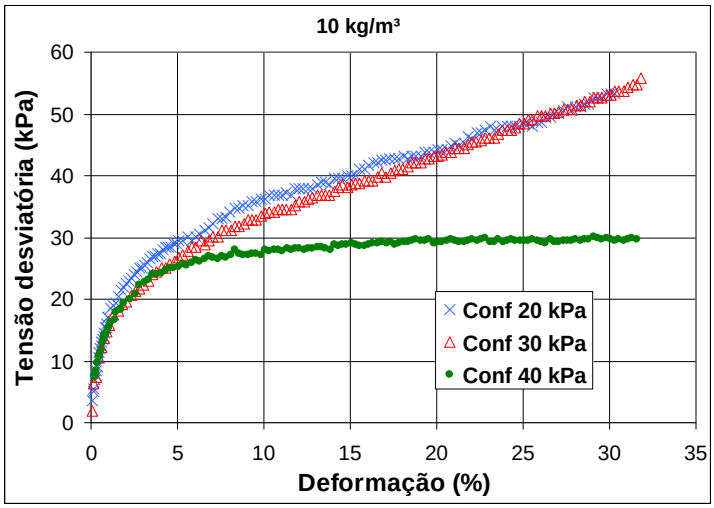


Figura 4.43 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³

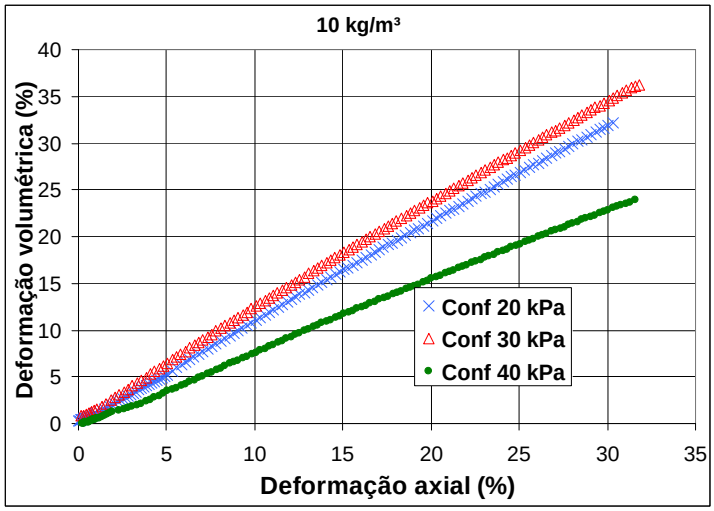


Figura 4.44 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³

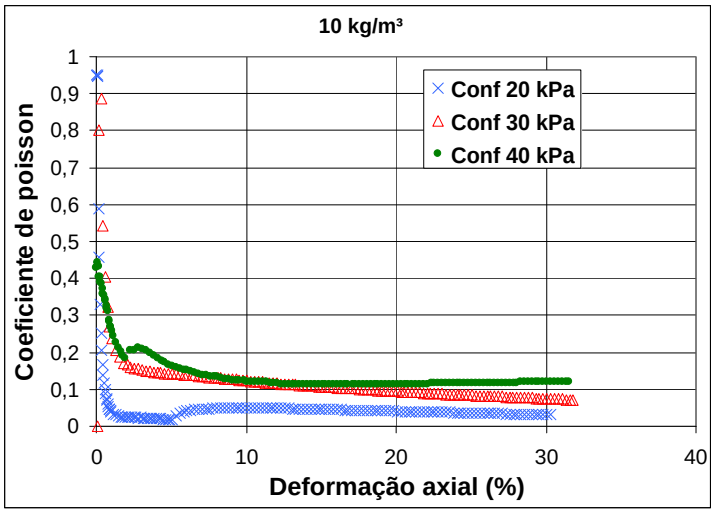


Figura 4.45 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³

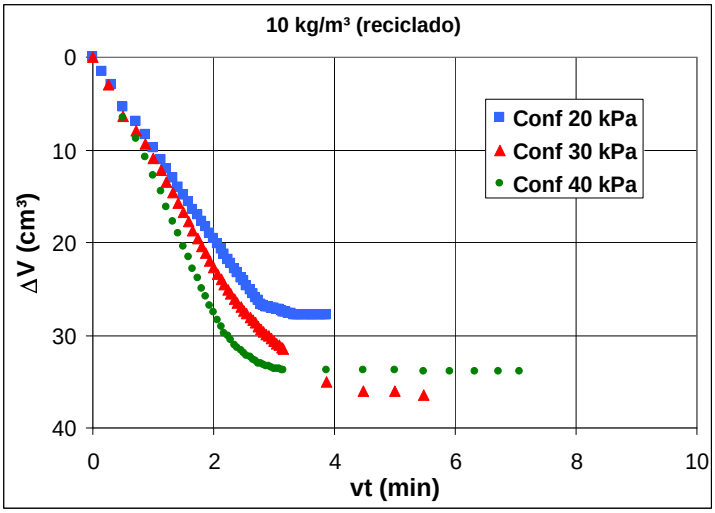


Figura 4.46 - Resultado da fase de adensamento do EPS de 10 kg/m³ reciclado

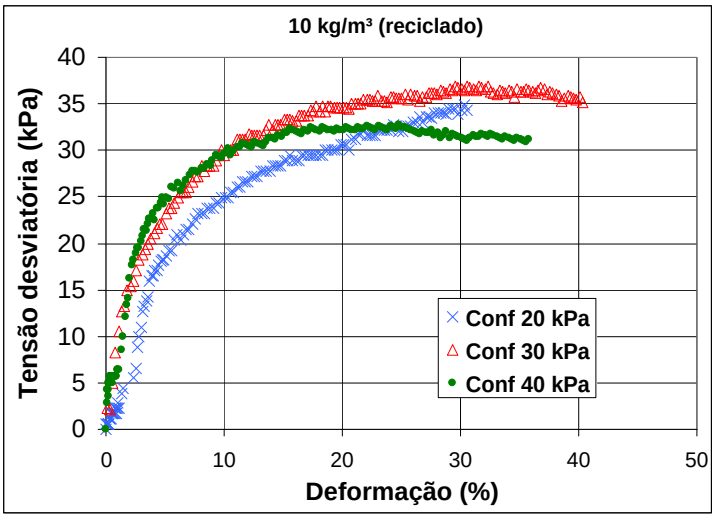


Figura 4.47 - Resultado da fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³ reciclado

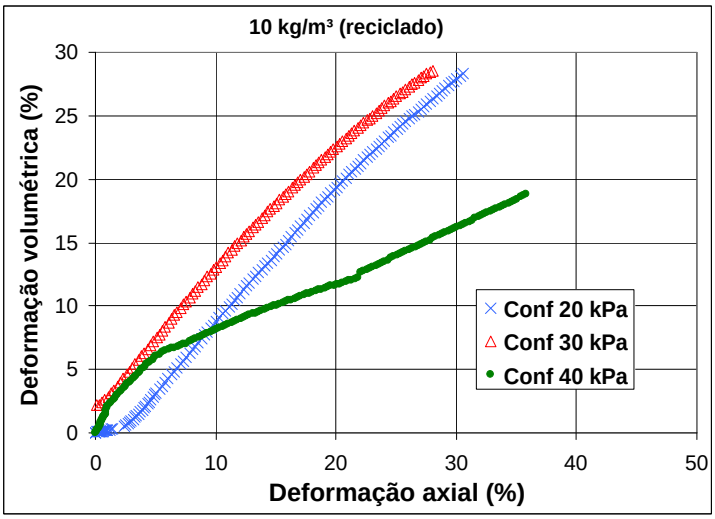


Figura 4.48 - Variação dos volumes na fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³ reciclado

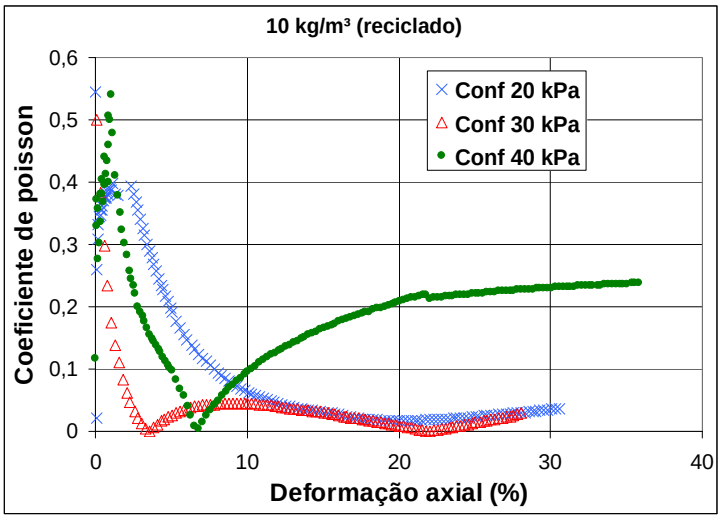


Figura 4.49 - Variação do coeficiente de Poisson na fase de ruptura do EPS de 10 kg/m³ reciclado

Destas Figuras, nota-se a semelhança das curvas com as de compressão uniaxial. O material possui o mesmo trecho elástico até uma deformação próxima de 2 %. Após, há uma plastificação e um ganho de resistência por endurecimento. Alguns corpos de prova apresentaram instabilidade lateral e perderam resistência, caso ocorrido com o corpo de prova de 40 kg/m³ ensaiado com um confinamento de 30 kPa. Esta característica de perda de instabilidade lateral em amostras cilíndricas em proporção 2 : 1 foi descrita anteriormente em ensaios realizados por Bueno (2005). Observa-se também, dos gráficos de variação volumétrica pela deformação axial esse fenômeno. Para amostras que não sofreram a perda de estabilidade, a curva de variação volumétrica pela lateral resulta em uma inclinação aproximada de 45 °. Porém, para corpos de prova em que a estabilidade foi comprometida, a inclinação é inferior, com um valor de deformação axial superior.

Dos ensaios realizados, relacionando-se a variação volumétrica pela axial, foi possível também se estimar o coeficiente de Poisson do material. Em uma análise visual, pela curva apresentar inclinação de aproximadamente 45 °, conclui-se que praticamente toda a deformação volumétrica é fruto da deformação axial, indicando uma deformação axial (embarrigamento) quase nula, e, portanto, um coeficiente de Poisson reduzido. Em ambos os casos, no inicio do ensaio, seu valor é mais elevado, em torno de 0,4, decrescendo a valores inferiores a 0,1 após deformações mais elevadas. Esta característica foi anteriormente descrita por Stark *et al*. (2004).

Analisando-se as curvas de variação volumétrica por tempo na fase de adensamento e as tensões *versus* deformações na fase de ruptura pode-se concluir que o material não recebe benefícios significativos pelo efeito do confinamento. Observa-se em alguns casos, como a amostra de 30 kg/m³, que mesmo aumentando-se o valor da tensão confinante não há um acréscimo da resistência do material, nem do volume adensado na fase de consolidação.

Para uma melhor compreensão destes resultados, determinou-se a trajetória de tensões (TTT = TTE, pois não há desenvolvimento de pressão neutra) até o valor da tensão de transição (2 % de deformação) para as amostras ensaiadas, e destas, extraiu-se as envoltórias para cada grupo de corpos de prova ensaiados. Os resultados podem ser observados pelas Figuras a seguir.

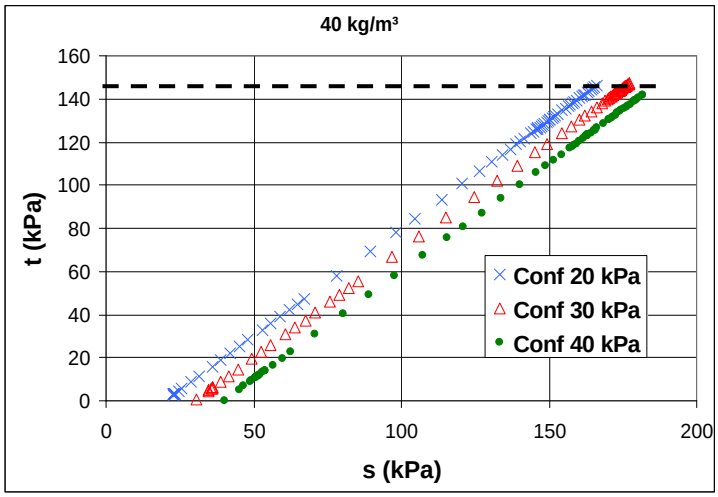


Figura 4.50 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 40 kg/m³

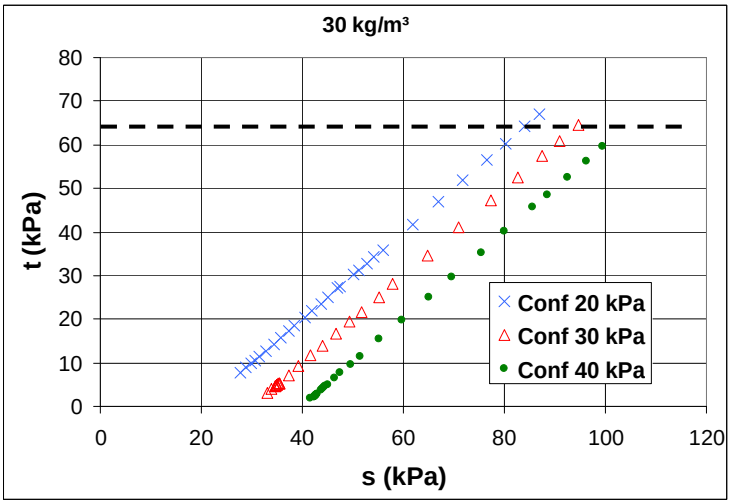


Figura 4.51 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 30 kg/m³

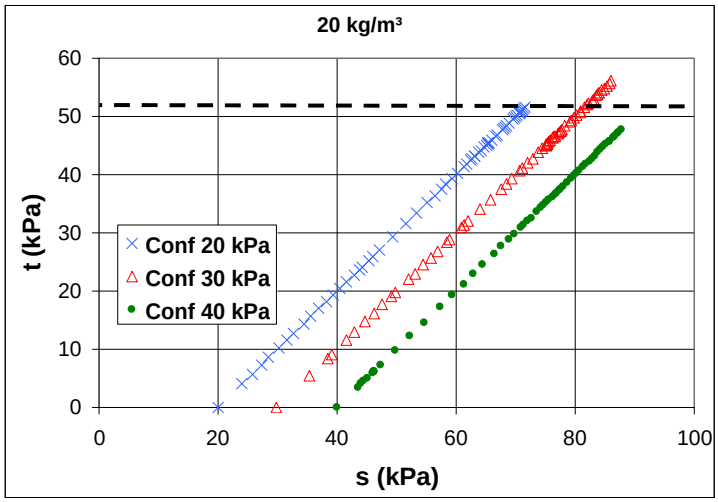


Figura 4.52 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 20 kg/m³

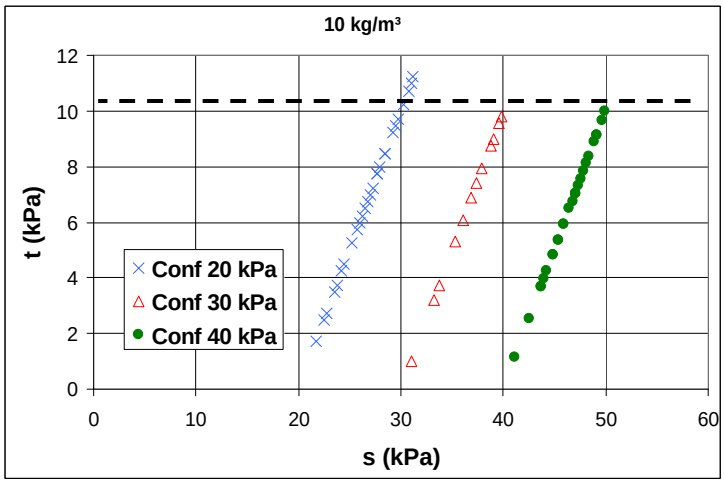


Figura 4.53 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 10 kg/m³

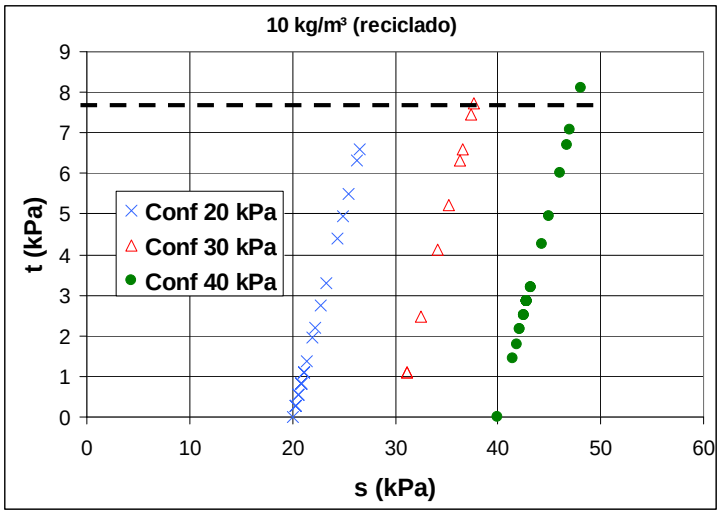


Figura 4.54 – Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais realizados com a amostra de EPS de 10 kg/m³ contendo material reciclado

Nota-se nestas figuras que o material é puramente coesivo. As envoltórias foram determinadas, em termos de trajetória de tensões, dos materiais. Porém, como o material é puramente coesivo e sua envoltória pode ser aproximado para uma reta horizontal, o valor da coesão em termos de trajetória de tensões é igual ao da envoltória de Mohr – Coulomb. Desta forma, a Tabela 4.5 exibe os valores de coesão obtidos do ensaio de compressão triaxial para cada massa específica do material e tensão confinante.

Tabela 4.5 – Relação da coesão do EPS do ensaio triaxial com a tensão de confinamento

Massa específica nominal (kg/m³)	Massa específica medida (kg/m³)	Tensão de confinamento (kPa)	Coesão (kPa)
10 kg/m³ (reciclado)	12,7	20	12,5
	15,4	30	14,7
	13,6	40	14,8
10 kg/m³	12,7	20	18,0

	13,1	30	17,0
	12,6	40	14,0
	23,2	20	51,5
20 kg/m³	24,1	30	56,0
	24,0	40	48,0
	33,8	20	100,0
30 kg/m³	32,3	30	90,5
	31,5	40	77,0
	43,7	20	146,0
40 kg/m³	43,6	30	147,0
	43,6	40	141,5

Para se analisar melhor estes dados, um gráfico da tensão de cisalhamento (coesão) do material pela tensão confinante foi feito para cada massa específica. O resultado pode ser observado na Figura 4.55.

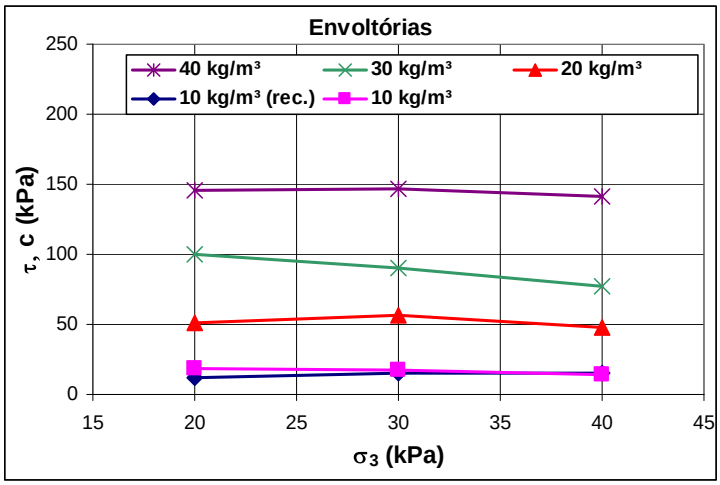


Figura 4.55 – Relação entre a coesão do material pela tensão confinante (envoltórias)

Observa-se, mais uma vez (Figura 4.55), que as envoltórias do EPS no ensaio de compressão triaxial são horizontais e diretamente influenciadas pela massa específica. Valores relativamente altos de coesão (cerca de 150 kPa), considerando-se o baixo peso do material, foram

determinados. Para se relacionar o acréscimo da coesão do EPS com o aumento da massa específica, foi feito um gráfico agrupando-se todas as amostras. A Figura 4.56 exibe este gráfico e sua relação obtida.

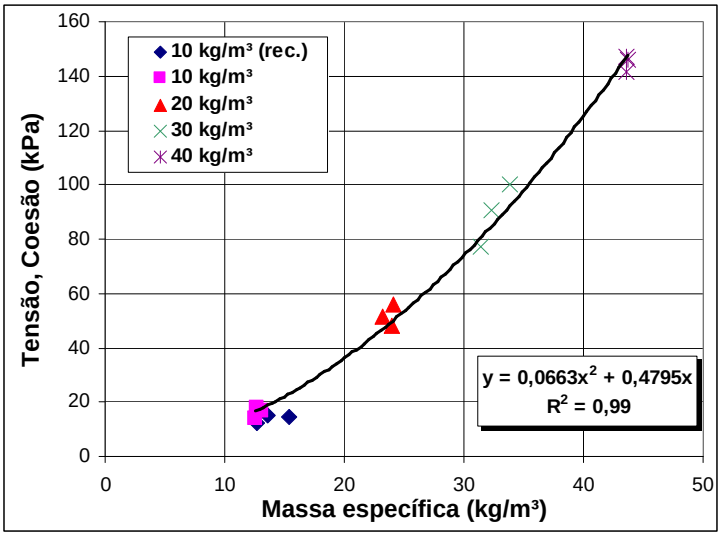


Figura 4.56 – Relação entre resistência triaxial do material para uma deformação de 10 % e a massa específica

Analisando-se as Figura 4.55 e a Figura 4.56 verifica-se que a massa específica do material influi diretamente e significativamente na coesão obtida pelo ensaio de compressão triaxial. A equação de aproximação da relação obtida para este ensaio possui um excelente ajuste.

4.6 Ensaio de Cisalhamento Direto

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto interno de blocos de amostras do material e da interface (junta) entre blocos. Os resultados estão apresentados e analisados separadamente.

4.6.1 Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface (Junta)

Para o estudo do comportamento de blocos de geoexpandido frente a um carregamento horizontal, e para a determinação do ângulo de atrito da junta entre estes blocos de EPS, realizaram-se ensaios de cisalhamento direto de interface.

Os resultados obtidos com os ensaios de cisalhamento direto com amostras de EPS de 10 (com material reciclado), 20, 30 e 40 kg/m³ podem ser observados nas Figura 4.57 a Figura **4.61**. Para as massas específicas de 30 e 40 kg/m³, realizaram-se também ensaios com valores de cargas mais elevadas (50 e 60 kPa) devido a maior resistência do material nestas massas específicas.

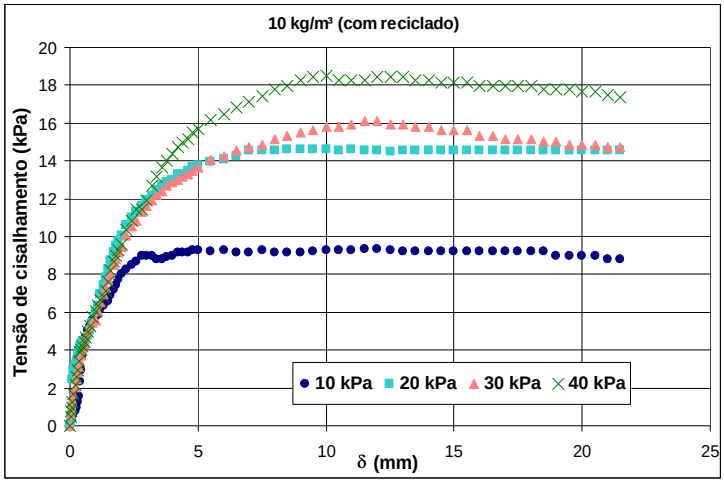


Figura 4.57 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 10 kg/m³ com material reciclado

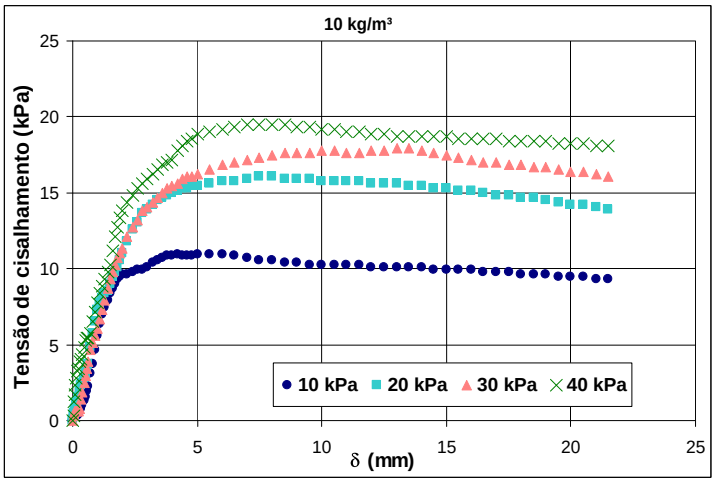


Figura 4.58 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 10 kg/m³

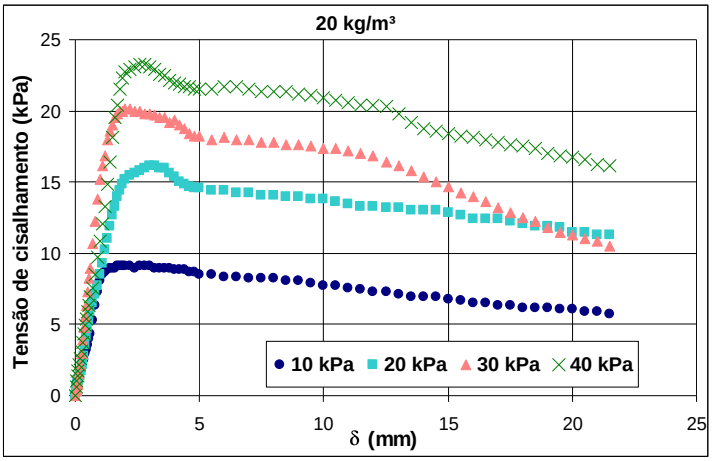


Figura 4.59 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 20 kg/m³

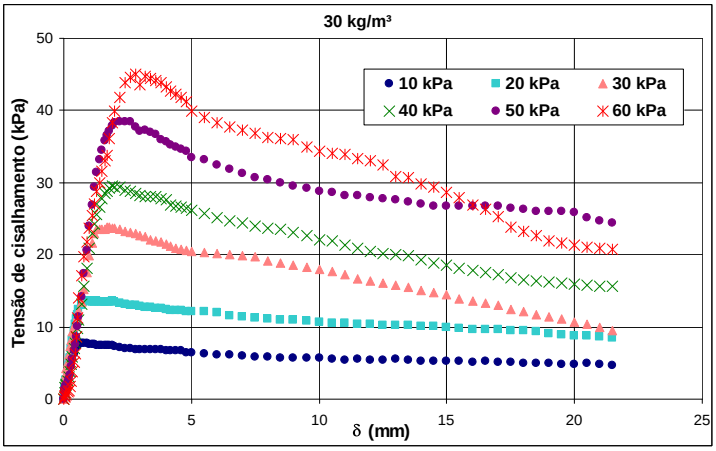


Figura 4.60 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 30 kg/m³

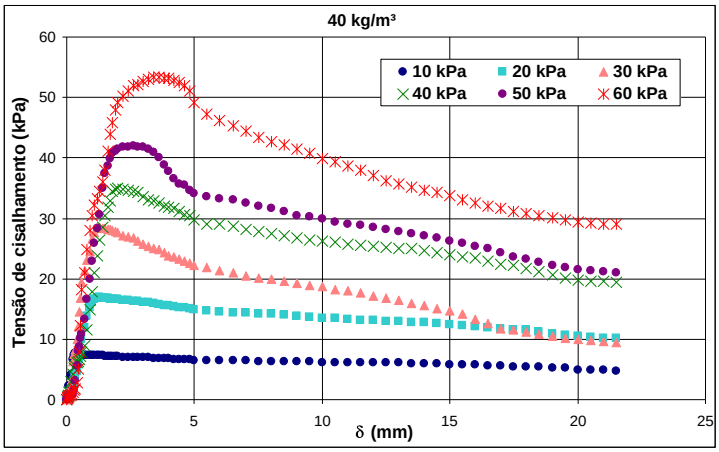


Figura 4.61 – Ensaio de cisalhamento realizado na amostra de EPS de 40 kg/m³

Nota-se destas Figuras que a resposta do material frente a este tipo de solicitação não é constante com a massa específica. Valores inferiores desta geram uma curva de cisalhamento direto da junta sem um pico da tensão bem definido (amostras de 10 kg/m³). Porém, para valores mais elevados de massa específica, o material tem uma resposta diferente, com um valor de tensão de cisalhamento de pico, e uma queda pós-pico sem uma estabilização aparente (Figura 4.59, Figura 4.60 e Figura 4.61).

Durante a realização dos ensaios, notou-se que para as massas específicas mais baixas (10 kg/m³ virgem e com reciclados) as tensões de confinamento mais elevadas plastificavam excessivamente os corpos de prova durante o ensaio. A Figura 4.62 exibe corpo de prova superior da caixa de cisalhamento de massa específica de 10 kg/m³ ensaiado com um confinamento de 40 kPa e um corpo de prova de 40 kg/m³ ensaiado na mesma tensão confinante.

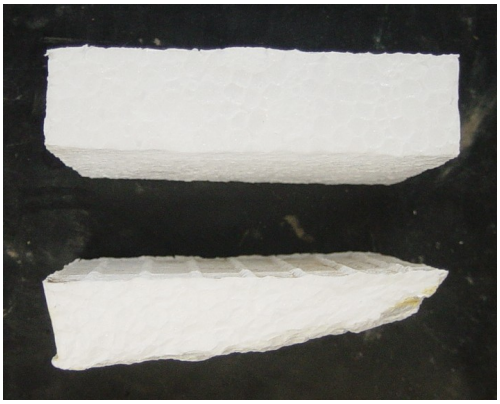


Figura 4.62 – Comparação entre amostras de baixa e alta massa específica ensaiadas no cisalhamento direto

Percebe-se facilmente a plastificação excessiva do material de baixa massa específica durante ensaio. Esta deformação de grande valor se deve a grande carga aplicada na amostra. Valor este que corresponde a quase 100 % da resistência à compressão uniaxial (relativa à deformação de 10 %) para esta massa específica.

Com os dados do ensaio, traçaram-se as envoltórias do de resistência dos valores de pico para cada massa específica ensaiada (nos casos do EPS de 10 kg/m³ virgem reciclado, por não possuir um valor de visível, adotou-se a tensão de cisalhamento para um deslocamento de 5 mm) e desta envoltória determinou-se o ângulo de atrito para cada material (valor este médio entre os determinados para cada tensão normal). As Figura 4.63 a Figura **4.67** exibem as envoltórias e os ângulos de atritos de pico obtidos.

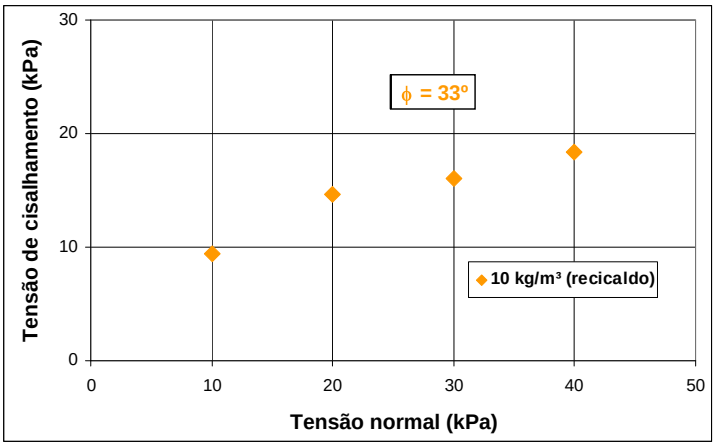


Figura 4.63 – Envoltória do EPS de 10 kg/m³ (reciclado) no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 5 mm

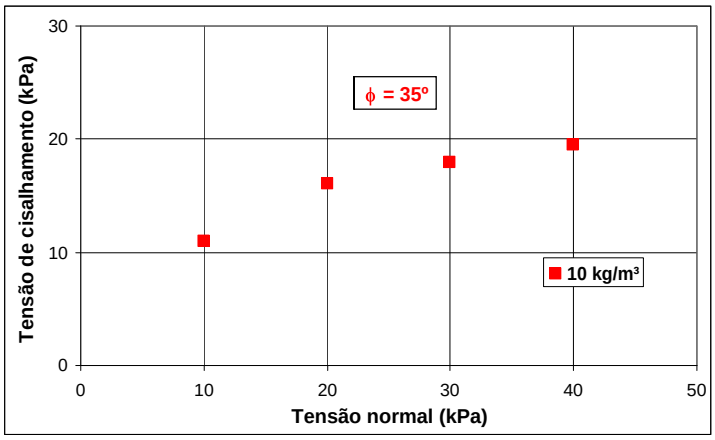


Figura 4.64 - Envoltória do EPS de 10 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 5 mm

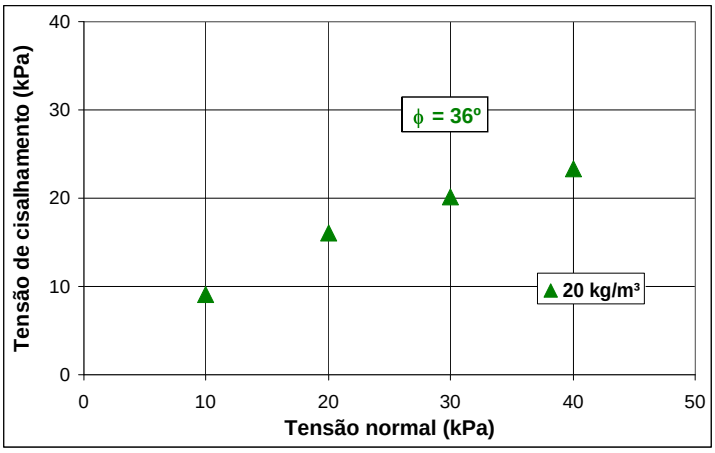


Figura 4.65 – Envoltória de pico do EPS de 20 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface

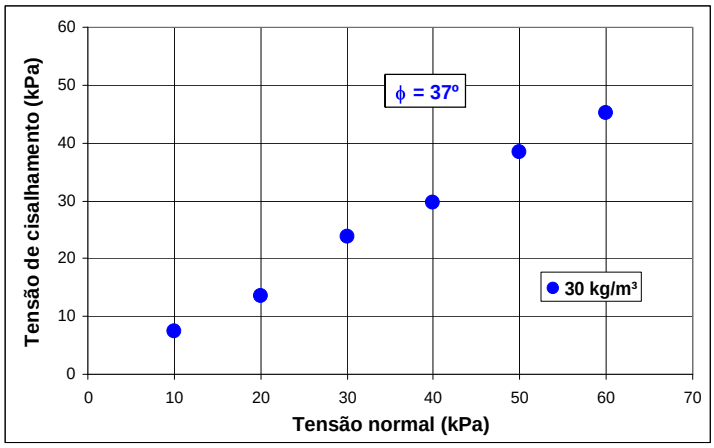


Figura 4.66 - Envoltória de pico do EPS de 30 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface

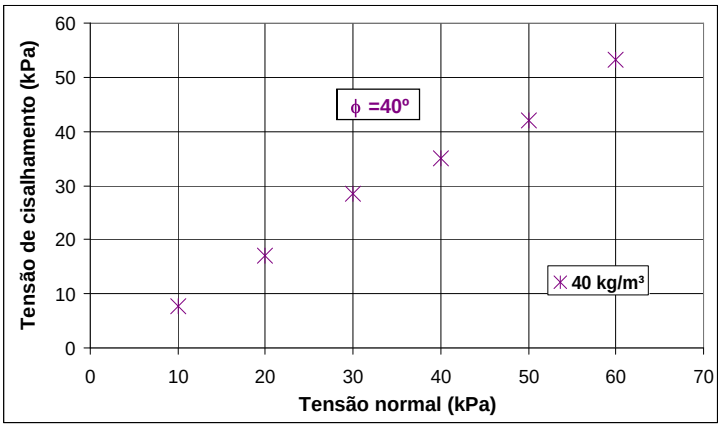


Figura 4.67 - Envoltória de pico do EPS de 40 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface

Nota-se destas Figuras que o material possui uma envoltória típica para valores de massas específicas mais elevados (20, 30 e 40 kg/m³), porém, para as massas específicas de 10 kg/³ (virgem e reciclada) a envoltória é ligeiramente curva para baixos valores de tensão confinante. Nota-se, também, que o material não possui coesão na interface entre blocos, sendo a resposta da interface dependente apenas do ângulo de atrito.

Observa-se que o ângulo de atrito é proporcional à massa específica do EPS. Para valores superiores da massa específica, tem-se um aumento do ângulo de atrito. Desta forma, foi possível determinar uma relação entre o ângulo de atrito de pico médio dos ensaios com cada amostra pela média das massas específicas dos corpos de prova. Desta relação, obteve-se também uma correlação linear entre estas duas grandezas. A Figura 4.68 exibe a curva obtida bem como esta correlação.

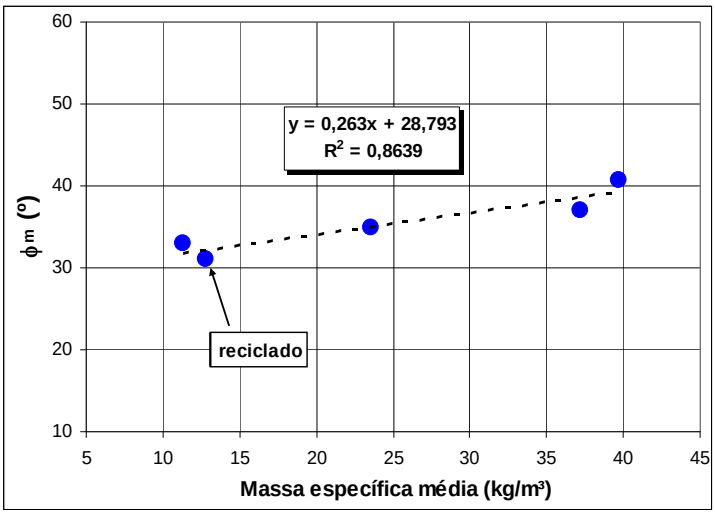


Figura 4.68 – Relação do ângulo de atrito de pico médio pela massa específica, e sua correlação

Nota-se da Figura 4.68 a proporcionalidade entre o ângulo de atrito e a massa específica. O material reciclado, apesar de possuir uma massa especifica maior, possui características mecânicas inferiores do material virgem. Observa-se também o valor considerável do ângulo de atrito para o EPS, quase atinge um valor superior a 40 ° no caso do material de 40 kg/m³.

Para uma analise mais detalhada do comportamento frente a esta solicitação, foram colocadas no mesmo gráfico todas as envoltórias das 5 amostras ensaiadas, exibido na Figura 4.69.

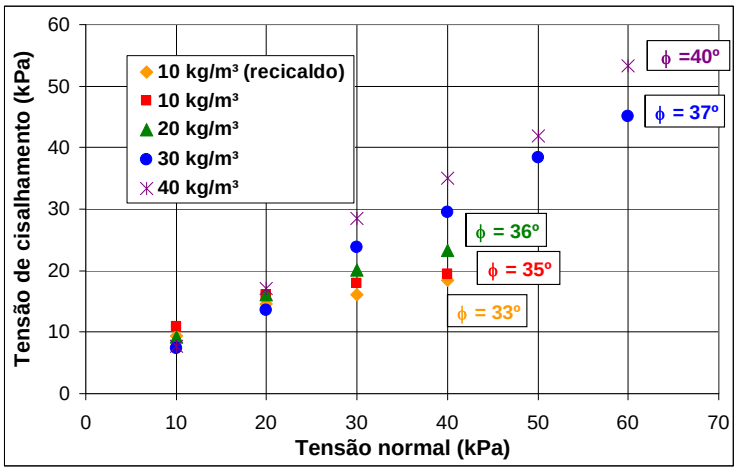


Figura 4.69 – Envoltórias de pico das amostras ensaiadas no cisalhamento direto da junta

Analisando a Figura 4.69, nota-se que para maiores valores de tensão normal as amostras de EPS com maiores massas específicas possuem maior resistência, enquanto para menores valores de confinamento as amostras de menor massas específicas possuem maior resistência. Este fenômeno se deve a maior plastificação sofrida pelas amostras de menor massa específica (menor resistência à compressão) para altas cargas de confinamento. Para valores de confinamento reduzido (sem plastificação excessiva) a sua superfície com maior rugosidade incrementa o atrito entre os blocos, porém, para confinamentos mais elevados a plastificação é excessiva em ambos os blocos, tornando a transferência de carga menos eficiente e, consequentemente, reduzindo o atrito de interface.

Para facilitar a visualização das envoltórias obtidas, da Figura 4.69, gerou-se envoltória de resistência, por meio de uma aproximação linear

entre os valores obtidos nos ensaios, de cada amostra. A Figura 4.70 exibe este resultado.

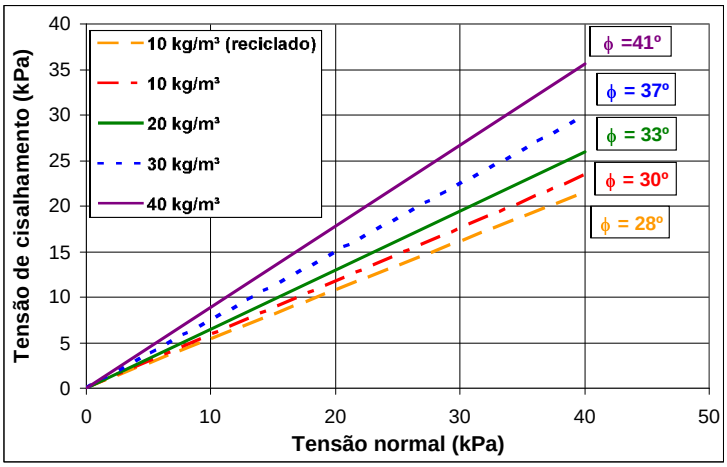


Figura 4.70 - Envoltórias de pico das amostras ensaiadas no cisalhamento direto da junta gerada por aproximação linear

Nota-se desta figura que os valores de ângulos de atrito obtidos por uma aproximação linear dos resultados dos ensaios diferem dos médios determinados anteriormente. Esta diferença é fruto da diferença de processos ente a aproximação linear e a simples média aritmética, e é mais significativa para valores de massa específica inferiores. Observa-se também mais claramente desta figura o acréscimo de inclinação das envoltórias (aumento do ângulo de atrito) com a elevação da massa específica.

Para uma melhor análise dos resultados obtidos com o cisalhamento da junta, foi feito um estudo considerando-se uma tensão adotada para um valor de deslocamento de 15 mm. Do mesmo modo feito para o valor

de pico, as Figura 4.71 a Figura **4.75** exibem as envoltórias e os ângulos de atrito para este valor de deslocamento, para todas as amostras ensaiadas.

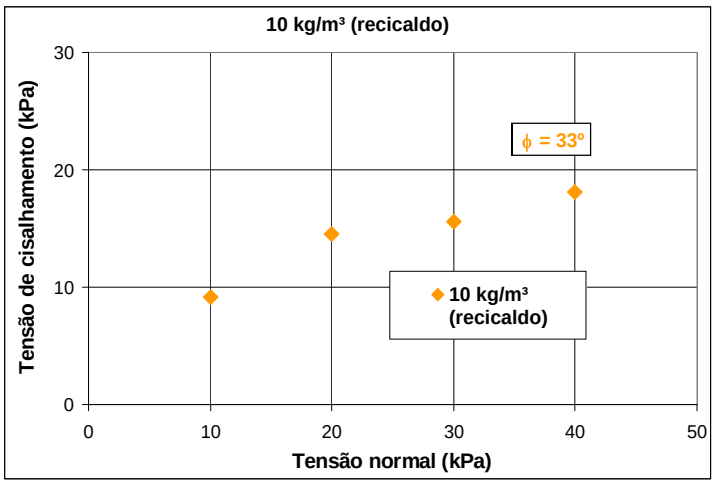


Figura 4.71 - Envoltória do EPS de 10 kg/m³ reciclado no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm

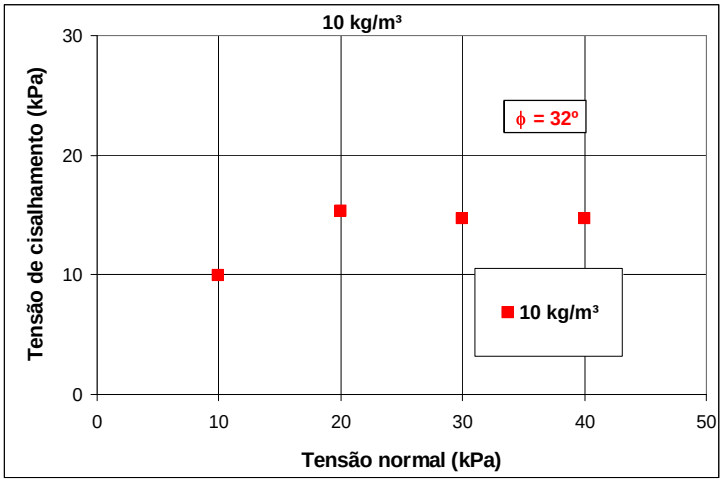


Figura 4.72 - Envoltória do EPS de 10 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm

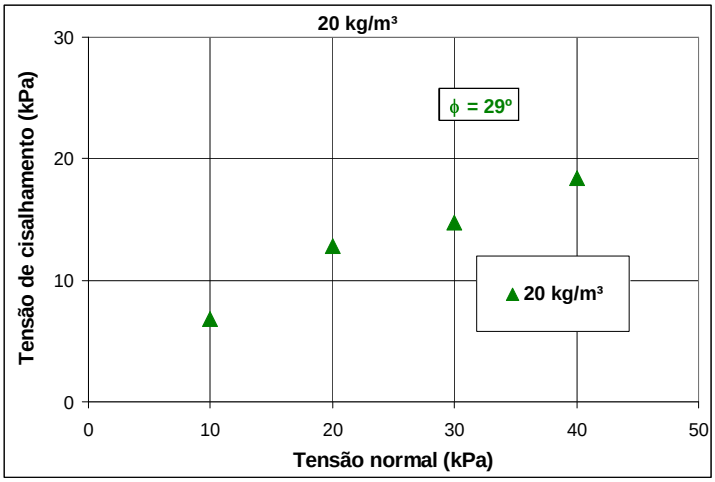


Figura 4.73 - Envoltória do EPS de 20 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm

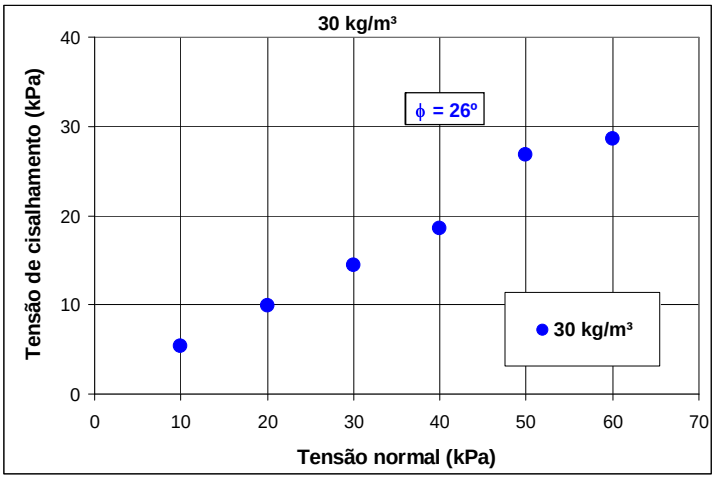


Figura 4.74 - Envoltória do EPS de 30 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm

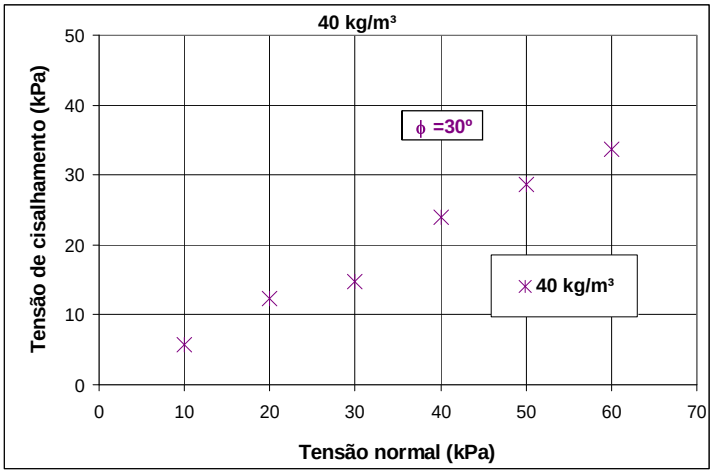


Figura 4.75 - Envoltória do EPS de 40 kg/m³ no ensaio de cisalhamento direto de interface para deslocamento de 15 mm

Comparando-se os resultados obtidos para os ângulos de atrito de pico e para uma deformação de 15 mm, notou-se uma queda considerável destes para as amostras de massa específica mais elevada. A Tabela 4.6 exibe a redução do ângulo de atrito.

Tabela 4.6 – Comparação entre resultados obtidos para valores de pico e residual

Massa específica nominal (kg/m³)	Ângulo de atrito de pico	Ângulo de atrito para deslocamento de 15 mm	Redução (%)
10 (reciclado)	33	33	0,0
10	35	32	8,6
20	36	29	19,4
30	37	26	29,7
40	40	30	25,0

Desta tabela, observa-se a maior redução para a amostra de 30 kg/m³, a baixa redução para a amostra de 10 kg/m³ de material virgem e

a conservação do valor de ângulo de atrito para a amostra contendo material reciclado. A explicação se deve a superfície de contato do material contendo EPS reciclado (e da amostra de 10 kg/m³ virgem) que possui uma rugosidade mais acentuada, evitando a formação de uma região de menor eficiência de atrito entre os contatos dos blocos, e mantendo o valor da tensão de cisalhamento elevada para deslocamentos maiores.

Para uma análise conjunta das envoltórias e dos valores dos ângulos de atrito (para deslocamento de 15 m) obtidos para todas as amostras, a Figura 4.76 exibe um agrupamento, dos resultados obtidos.

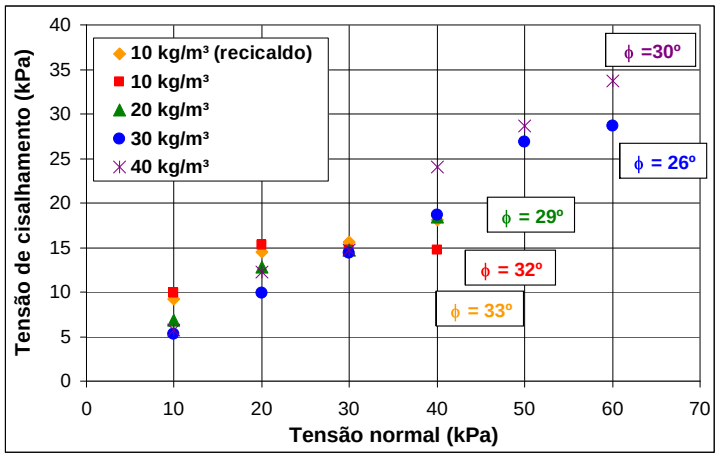


Figura 4.76 – Envoltórias das amostras ensaiadas no cisalhamento direto da junta para um deslocamento de 15 mm

Da Figura 4.76 nota-se, mais uma vez, a redução do valor da tensão de cisalhamento para as amostras de massa específica inferiores solicitadas com uma tensão de confinamento mais elevada. A explicação para este fato é a mesma para o caso das envoltórias de pico.

Mais uma vez, para facilitar a visualização das envoltórias obtidas, criou-se um gráfico com as envoltórias de resistência por meio de uma aproximação linear entre os valores obtidos nos ensaios, de cada amostra. A Figura 4.70 exibe este resultado.

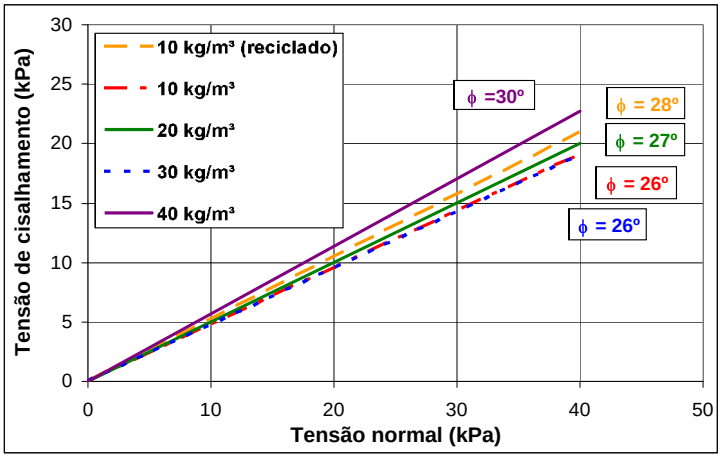


Figura 4.77 - Envoltórias das amostras ensaiadas no cisalhamento direto da junta para um deslocamento de 15 mm, gerada por aproximação linear

Observa-se desta figura que, de forma diferente do que ocorre com o ângulo de atrito de pico, este parâmetro decresce com o aumento da massa específica. Nota-se mais uma vez uma pequena discrepância (mais expressiva para amostras de menor massa específica) entre os valores de ângulo de atrito obtidos anteriormente por média aritmética e estes obtidos por uma aproximação linear dos resultados.

Da mesma forma que para os valores de ângulo de atrito de pico, obteve-se uma relação entre o ângulo de atrito médio para deslocamento de 15 mm e a massa específica média dos corpos de prova ensaiados,

para cada amostra. O resultado e uma relação linear podem ser vistos na Figura 4.78.

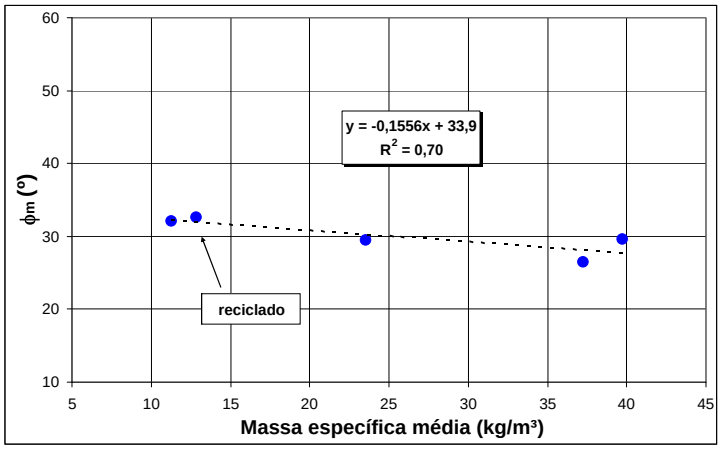


Figura 4.78 - Relação do ângulo de atrito médio para deslocamento de 15 mm pela massa específica, e sua correlação

Desta figura, diferentemente do de pico, nota-se um decréscimo do valor do ângulo de atrito para um aumento da massa específica, obtendo-se valores inferiores a 30 °. Porém, percebe-se uma redução menos acentuada para o aumento da massa específica no caso de residual do que o acréscimo no caso de pico.

4.6.2 Ensaio de Cisalhamento Direto Interno

O ensaio de cisalhamento direto com amostras de EPS foi realizado para se determinar a envoltória de resistência interna das amostras. Os resultados destes ensaios com as amostras de 10 (apenas material

virgem), 20 e 30 kg/m³ podem ser observados nas Figura 4.79, Figura **4.80** e Figura **4.81**, respectivamente.

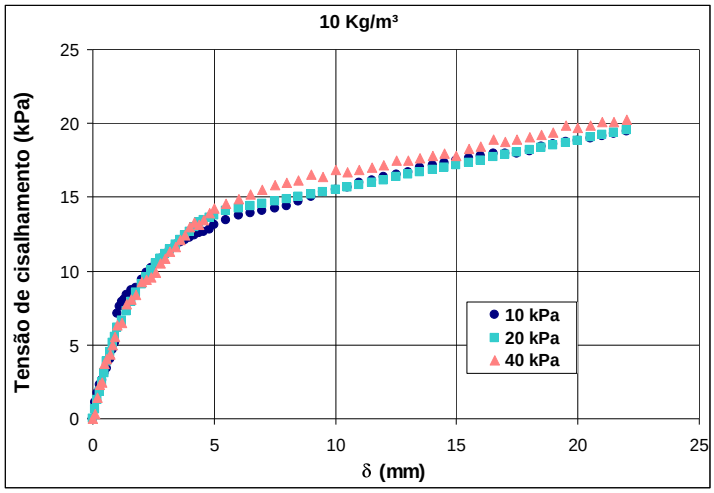


Figura 4.79 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto em amostras de EPS de 10 kg/m³

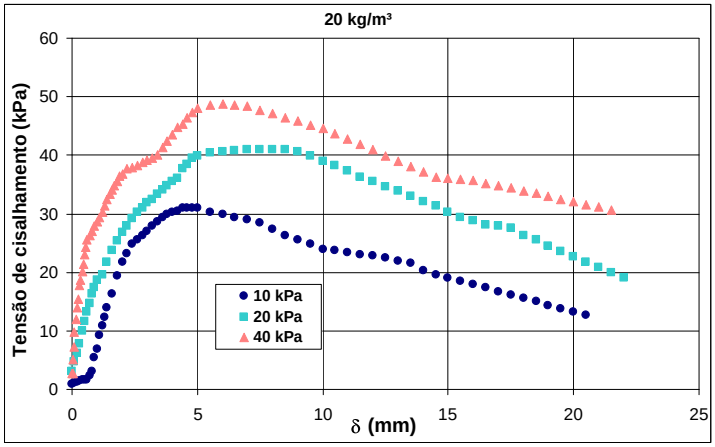


Figura 4.80 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto em amostras de EPS de 20 kg/m³

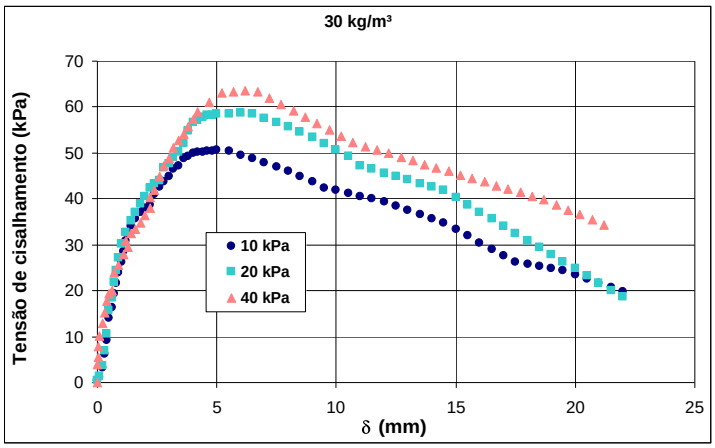


Figura 4.81 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto em amostras de EPS de 30 kg/m³

Observa-se, assim como nos resultados do cisalhamento da junta, que a amostra de 10 kg/m³ não possui um valor de pico definido, sendo crescente o ganho de resistência com a deformação. Porém, para as amostras de 20 e 30 kg/m³, o material apresentou um valor de pico para um deslocamento próximo a 5 mm.

De posse destes resultados, foi possível desenvolver as envoltórias de resistência ao ensaio de cisalhamento direto para um valor de deslocamento de 5 mm (que corresponde à ruptura para as amostras de 20 e 30 kg/m³). As Figura 4.82, Figura **4.83** e Figura **4.84** exibem as envoltórias para as amostras ensaiadas.

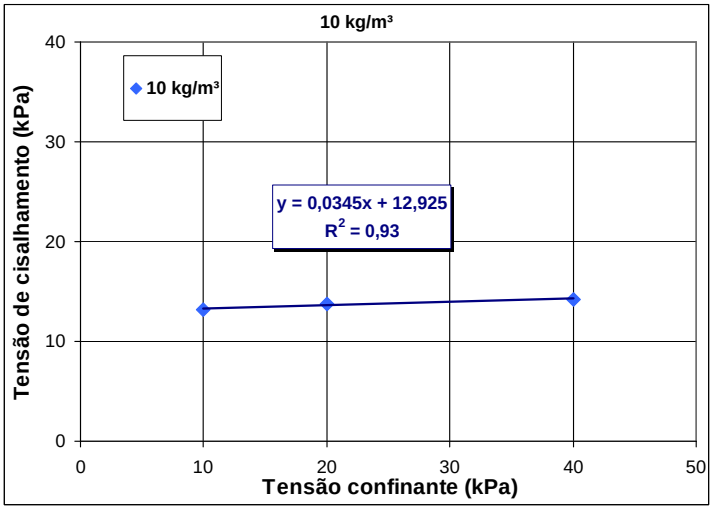


Figura 4.82 – Envoltória de resistência da amostra de 10 kg/m³ para um deslocamento de 5 mm

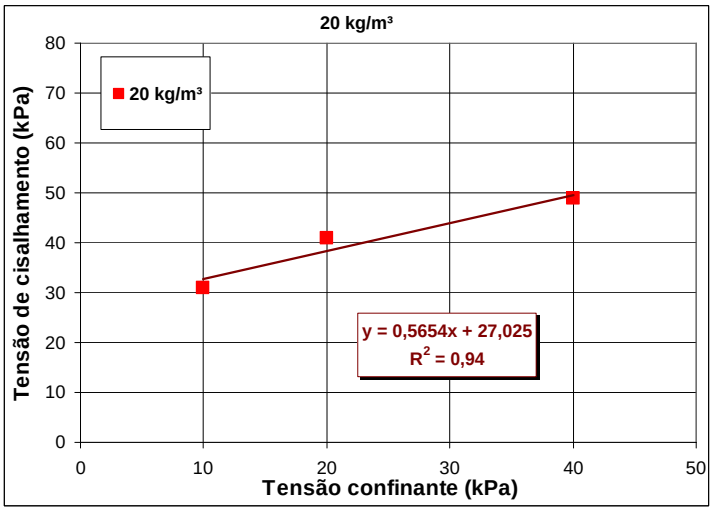


Figura 4.83 – Envoltória de resistência da amostra de 20 kg/m³ para um deslocamento de 5 mm

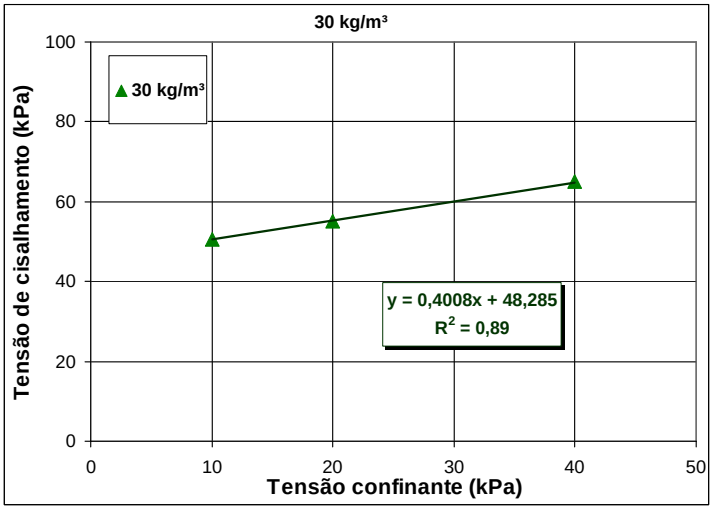


Figura 4.84 – Envoltória de resistência da amostra de 30 kg/m³ para um deslocamento de 5 mm

Percebe-se uma diferença de comportamento das amostras de 20 e 30 kg/m³ para a de 10 kg/m³ em relação ao tipo de envoltória. Para a de 10 kg/m³, a envoltória é puramente coesiva, enquanto para as outras amostras há uma parcela significativa do ângulo de atrito. Para uma melhor visualização dos resultados, todas as envoltórias foram reunidas em um único gráfico, exibido na Figura 4.85.

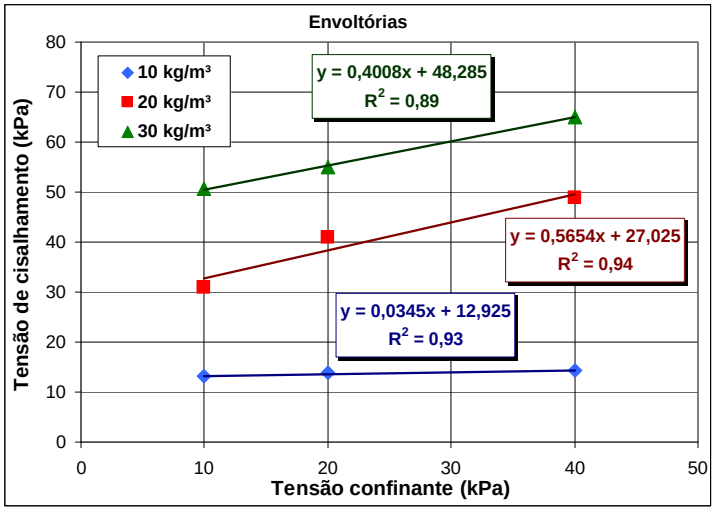


Figura 4.85 – Envoltórias de resistência do ensaio de cisalhamento direto para um deslocamento de 5 mm

Da Figura 4.85, destaca-se a semelhança entre os ângulos de atrito e a proporcionalidade entre as coesões para as amostras de 20 e 30 kg/m³, e a envoltória puramente coesiva para a amostra de 10 kg/m³. É intuitivo imaginar que com o aumento da massa específica há uma redução dos vazios da amostra, propiciando uma maior resistência aos corpos de prova. Contudo, para a amostra de 10 kg/m³, os vazios internos são mais elevados, portanto, após romper a coesão do contato entre os grânulos, há pouco destes para imprimir resistência por atrito entre eles, conferindo uma propriedade apenas coesiva aos corpos de prova.

Assim como para o cisalhamento de interface, obtidos com o cisalhamento da junta, foi feito um estudo da resistência ao cisalhamento considerando-se um valor de deslocamento de 15 mm. Do mesmo modo feito para o valor de pico, as Figura 4.86, Figura **4.87** e Figura **4.88**

exibem as envoltórias para cada uma das amostras ensaiadas e a Figura 4.89 exibe estas envoltórias agrupadas em um único gráfico.

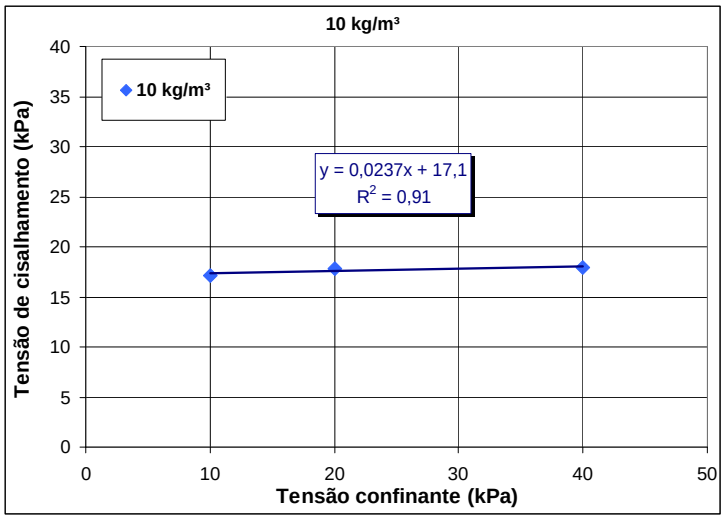


Figura 4.86 – Envoltória de resistência da amostra de 10 kg/m³ para um deslocamento de 15 mm

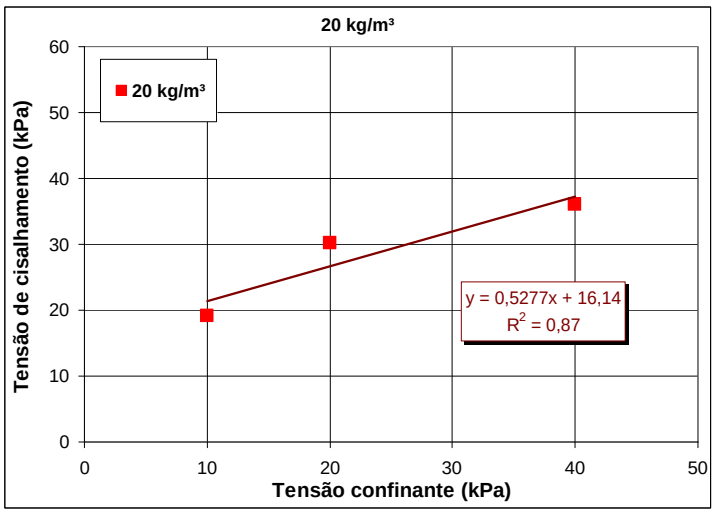


Figura 4.87 – Envoltória de resistência da amostra de 20 kg/m³ para um deslocamento de 15 mm

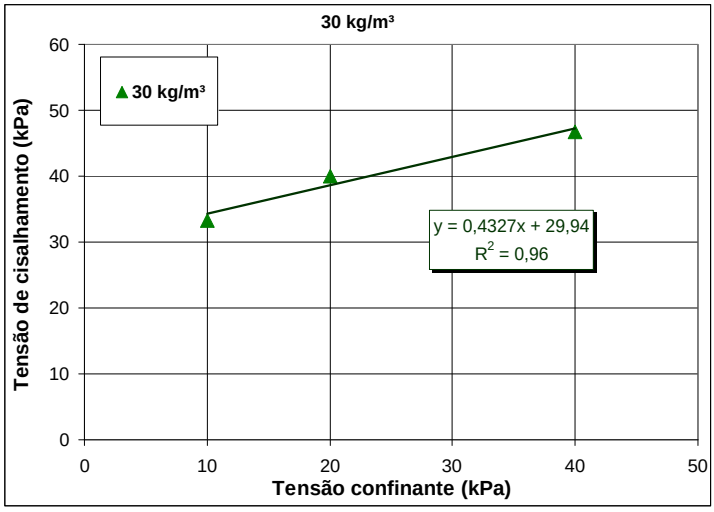


Figura 4.88 – Envoltória de resistência da amostra de 30 kg/m³ para um deslocamento de 15 mm

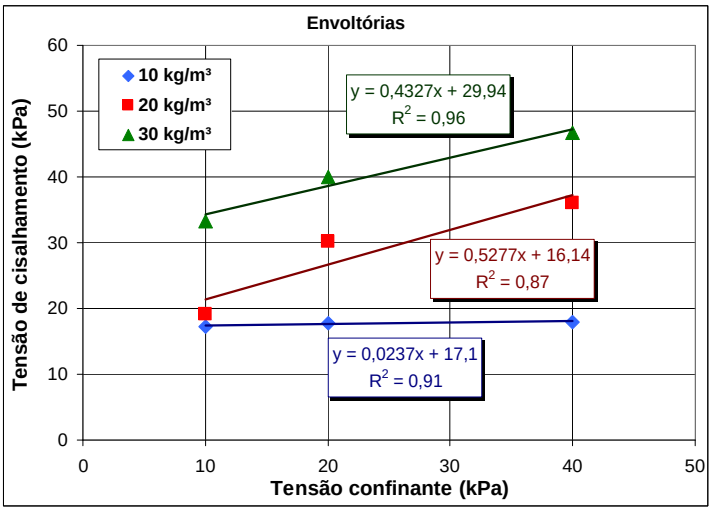


Figura 4.89 – Envoltórias de resistência do ensaio de cisalhamento direto para um deslocamento de 15 mm

Por meio destas figuras, conclui-se que o comportamento geral do material não é afetado para deslocamentos mais elevados (as amostras continuaram com o mesmo tipo de envoltória), alterando-se apenas os parâmetros (coesão e ângulo de atrito) das envoltórias. Notou-se uma

pequena diminuição da coesão e do ângulo de atrito para as amostras de 20 e 30 kg/m³. Contudo, para a amostra de 10 kg/m³, houve um aumento significativo da coesão de 13 para 17 kPa (cerca de 30 %).

Para facilitar a comparação entre os parâmetros de resistência obtidos nos resultados para deslocamentos de 5 e 15 mm, a Tabela 4.7 exibe um resumo destes resultados.

Tabela 4.7 – Valores dos parâmetros de resistência obtidos do ensaio de cisalhamento direto

Massa específica nominal (kg/m³)	Coesão (5 mm) (kPa)	Coesão (15 mm) (kPa)	Ângulo de atrito (5 mm) (°)	Ângulo de atrito (15 mm) (°)
10	12,9	17,1	2,0	1,4
20	27,0	16,4	29,5	27,9
30	48,3	29,9	21,8	23,4

Da Tabela 4.7, verifica-se a expressiva redução da coesão para as amostras de 20 e 30 kg/m³ (da ordem de 35 %), mas a manutenção dos valores de ângulo de atrito.

Com estes dados, determinou-se uma relação entre as coesões (para deslocamentos de 5 e 15 mm) obtidas nos ensaios de cisalhamento direto e a massa específica das amostras, plotadas em um gráfico que pode ser visto na Figura 4.90.

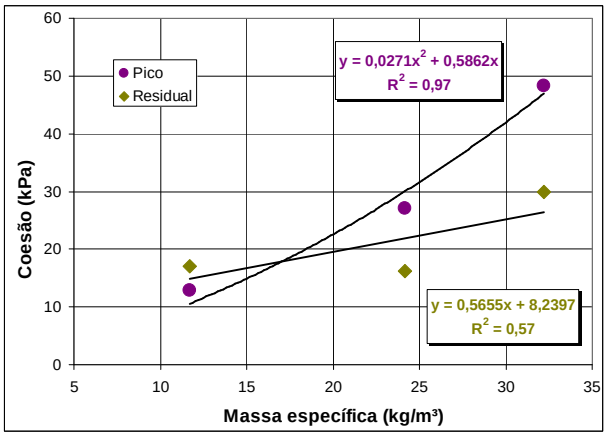


Figura 4.90 – Relação entre as coesões obtida do ensaio de cisalhamento direto e a massa específica

Desta figura, pode-se observa a queda do valor da coesão para as amostras de 20 e 30 kg/m³, e o aumento para a amostra de 10 kg/m³. Nota-se dela, também, inversão dos valores das coesões (para deslocamentos de 5 e 15 mm) para um valor de massa específica de aproximadamente 17 kg/m³.

4.7 Ensaio de Fluência por Compressão

Os ensaios de fluência por compressão foram realizados para um tempo total de aproximadamente 1.000 horas (cerca de 42 dias). Os resultados dos ensaios com as amostras de 10 (apenas com material virgem), 17, 20 e 30 kg/m³ podem ser observados nas Figura 4.91 a Figura **4.94**.

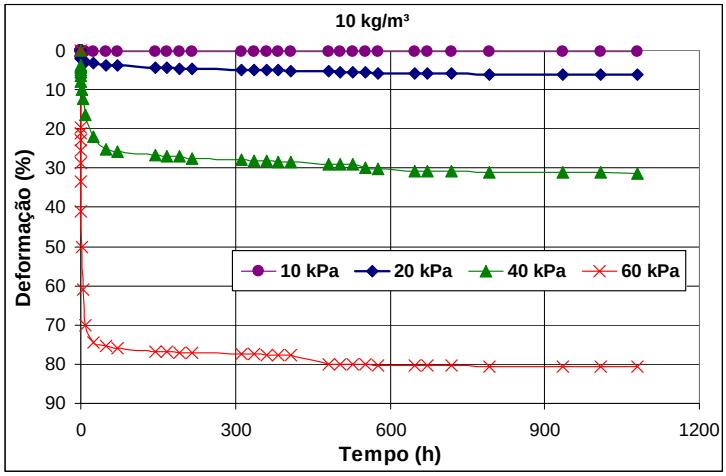


Figura 4.91 – Resultado do ensaio de fluência na compressão da amostra de 10 kg/m³

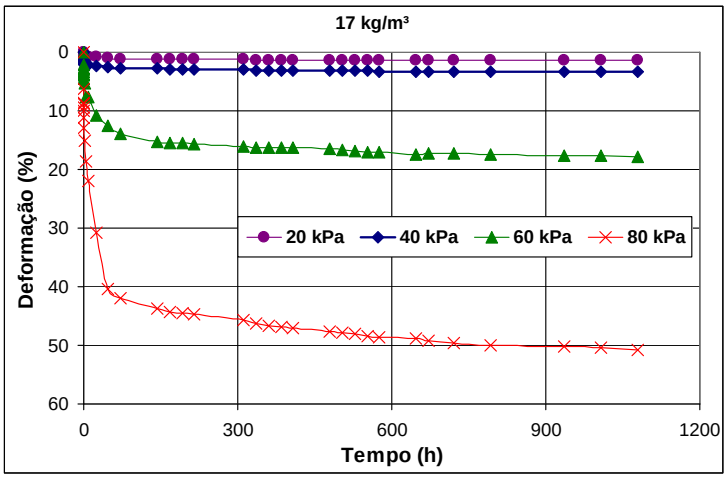


Figura 4.92 – Resultado do ensaio de fluência na compressão da amostra de 17 kg/m³

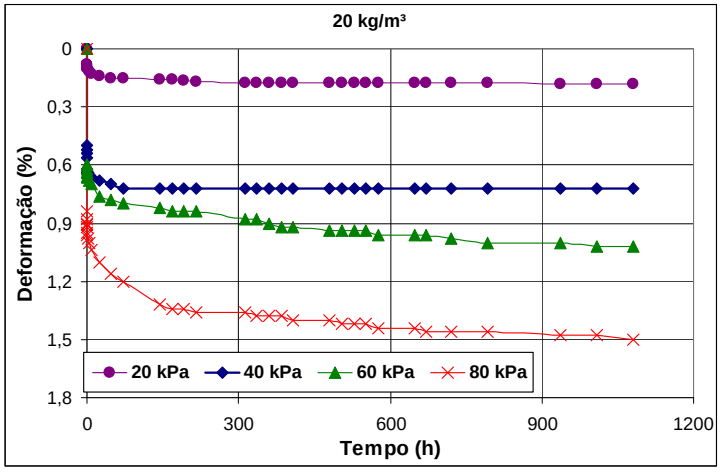


Figura 4.93 – Resultado do ensaio de fluência na compressão da amostra de 20 kg/m³

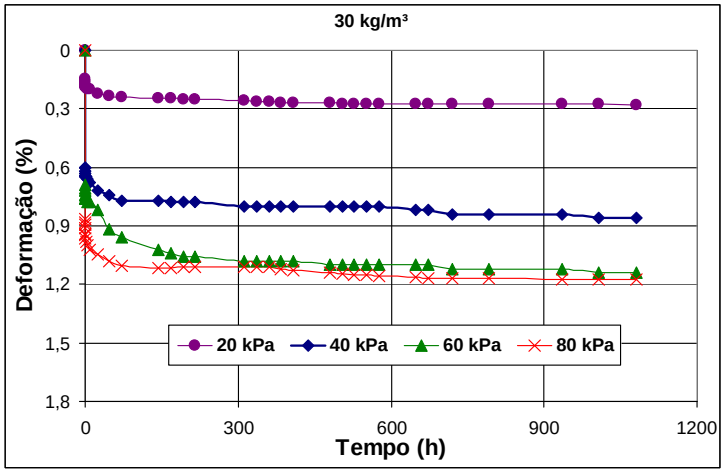


Figura 4.94 – Resultado do ensaio de fluência na compressão da amostra de 30 kg/m³

Observando-se estas Figuras, conclui-se que o material EPS possui a parcela de deformação inicial significativa (com mais de 80 % do valor da fluência total em todos os casos) e uma parcela de fluência restrita. Após um valor de deformação inicial, os vazios das amostras diminuem, fazendo com que os grânulos que compõe o material fiquem mais próximos uns dos outros, e desta forma atribuindo uma maior resistência

à carga de um "peso morto" e reduzindo o valor da deformação dos corpos de prova.

Nota-se, também, destas figuras que as amostras de massa específica de valor inferior (10 e 17 kg/m³) possuem uma fluência mais elevada, atingindo valores de até 80 % de deformação. Por outro lado, as amostras de 20 e 30 kg/m³ possuem uma resistência mais elevada a esta solicitação.

A Figura 4.95 exibe a relação entre as deformações registradas em cada amostra de massa específica para cada valor de carga aplicada, em um mesmo tempo de exposição ao carregamento.

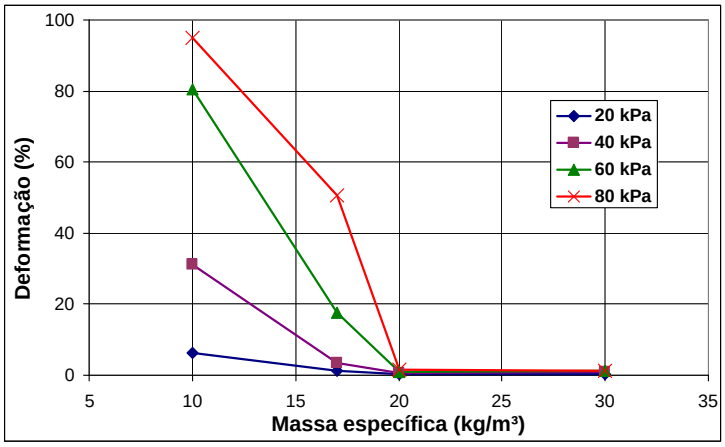


Figura 4.95 – Relação entre deformação e massa específica para cada carga

Observa-se que a amostra de 10 kg/m³ começa a sofrer deformações mais elevadas para um carregamento de 40 kPa. Já a amostra de 17 kg/m³ exibe deformações maiores para um carregamento superior a 60 kPa. Porém, mesmo para carregamentos mais elevados

(como 80 kPa) as amostras de 20 e 30 kg/m³ não sofreram uma deformação significante.

De posse das curvas do ensaio de fluência, para um estudo mais aprofundado do material, as curvas isócronas foram criadas e podem ser observadas nas Figura 4.96 a Figura **4.99**.

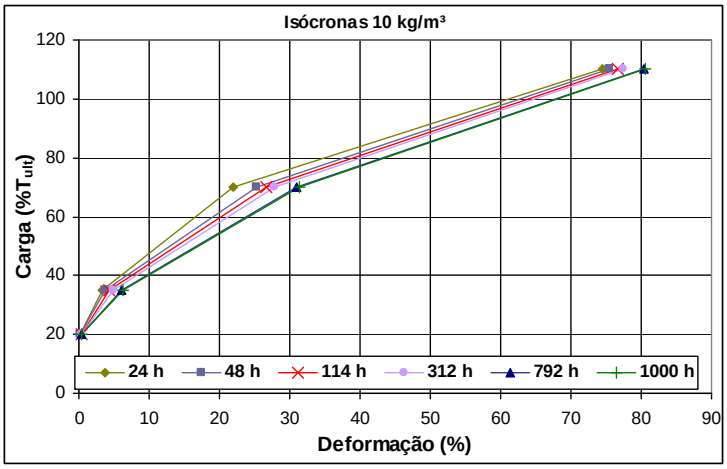


Figura 4.96 – Curvas isócronas dos ensaios com a amostra de 10 kg/m³

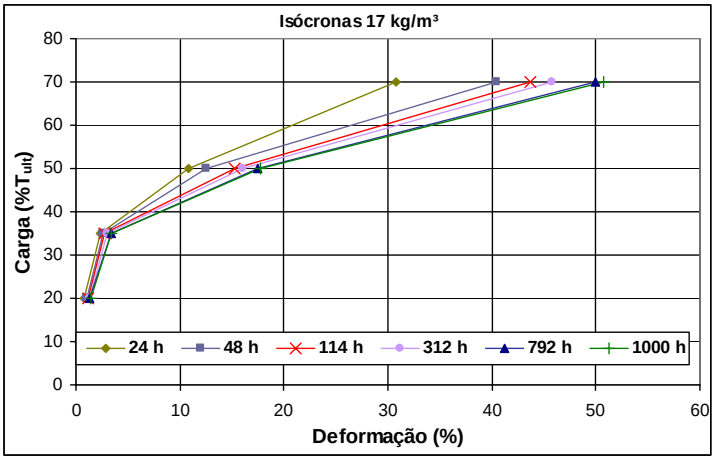


Figura 4.97 – Curvas isócronas dos ensaios com a amostra de 17 kg/m³

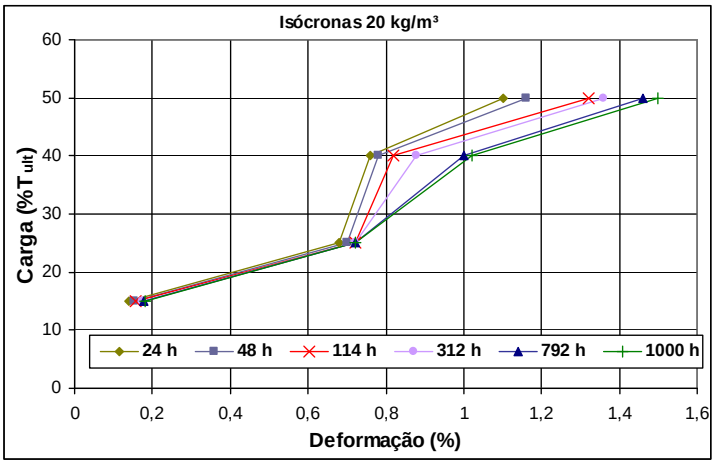


Figura 4.98 – Curvas isócronas dos ensaios com a amostra de 20 kg/m³

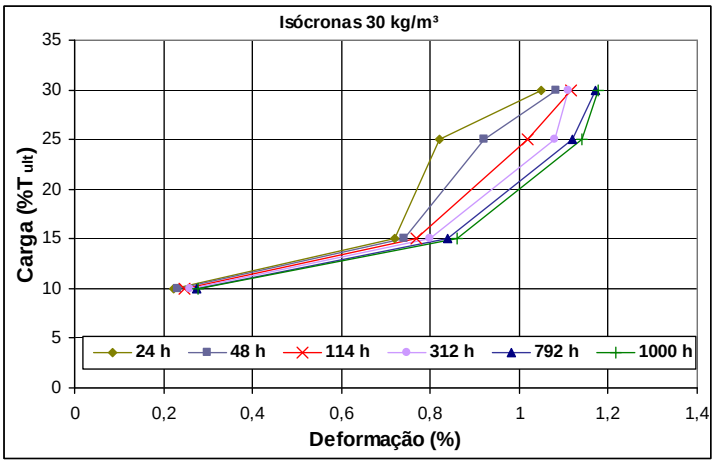


Figura 4.99 – Curvas isócronas dos ensaios com a amostra de3 kg/m³

Destas figuras, nota-se mais uma vez, a baixa resistência à fluência das amostras de 10 e 17 kg/m³ para valores de carregamento mais elevados, e o acréscimo de resistência das amostras de 20 e 30 kg/m³ após uma deformação de cerca de 0,7 %.

4.8 Ensaio de Absorção de Água

Nesta etapa do trabalho foram realizados diversos ensaios de absorção de água com as diferentes massas específicas e dimensões das amostras. A Tabela 4.8 exibe as estatísticas de um ensaio realizado com cinco amostras de EPS com massa específica de 30 kg/m³ e formato cúbico com dimensões de 50 mm de lado. A Figura 4.100 exibe os resultados dos ensaios de absorção de água (tanto com 24 horas de submersão como para o valor higroscópico de umidade) para a mesma amostra de EPS.

Tabela 4.8 – Estatísticas do ensaio de absorção de água com a amostra cúbica de 50 mm de lado com massa específica de 30 kg/m³

Parâmetro	Dens.	Massa	Massa	Massa	Absorção	Teor
Evento	Dens.	Natural	Seca	Saturada	Máx.	Higrosc.
Unidade	(kg/m³)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)
CP 1	30,74	4,22	4,19	9,86	125,55	0,69
CP 2	31,68	4,31	4,23	9,08	104,71	0,92
CP 3	32,22	4,41	4,38	8,92	93,70	0,59
CP 4	31,97	4,35	4,32	9,24	104,04	0,65
CP 5	31,60	4,32	4,29	9,10	102,02	0,65
Média	31,64	4,32	4,28	9,24	116,00	0,90
C. V. (%)	1,77	1,59	1,76	3,95	10,15	63,11

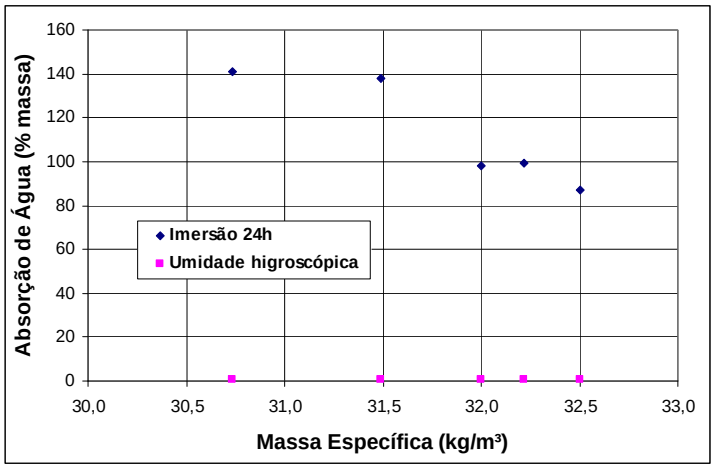


Figura 4.100 - Resultado do ensaio de absorção de água com amostras de EPS com massa específica de 30 kg/m³ e formato cúbico com 50 mm de lado

Analisando-se a Figura 4.100, nota-se nitidamente que com o aumento da massa específica há um decréscimo da massa de água absorvida pelo material. Este fenômeno pode ser explicado pela redução de vazios das amostras de maior densidade. Com um menor valor de vazios, há menos espaço para água se alojar e se infiltrar no corpo de prova, reduzindo a absorção de água.

Cerca de 50 ensaios de absorção de água foram realizados com os mais variados valores de massa específica do material. Deste conjunto de dados, gerou-se um gráfico com os resultados de absorção da submersão de 24 horas em água pela massa específica apresentado na Figura 4.101, e um gráfico de teor de umidade higroscópico pela massa específica, apresentado na Figura 4.102. É apresentada também nas mesmas figuras uma relação entre a massa específica e a absorção de água, tanto para o caso da submersão como para o teor higroscópico.

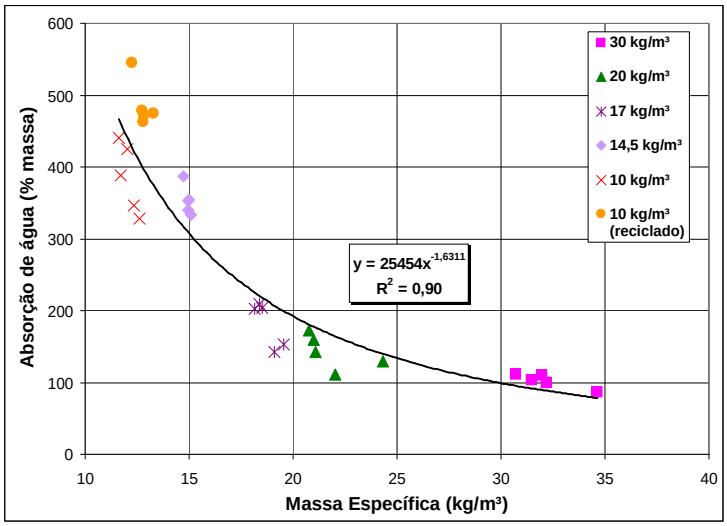


Figura 4.101 - Resultados dos ensaios de absorção de água por submersão com amostras de EPS em relação a massa e correlação destas com a massa específica

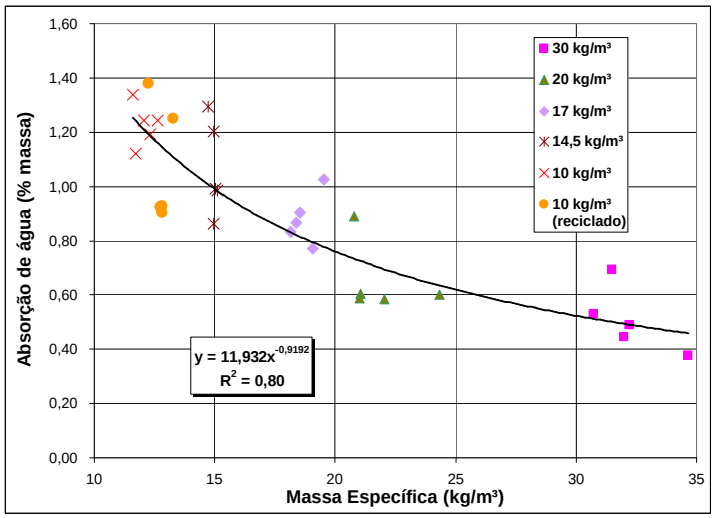


Figura 4.102 - Resultados dos ensaios de teor de umidade higroscópica com amostras de EPS em relação a massa e correlação destas com a massa específica

Observa-se pela Figura 4.101 que a absorção de água das amostras, em um período de 24 horas, constituiu um valor elevado, alcançando valores de até 500 % da massa dos corpos de prova. Se a análise for

realizada em função da massa específica do conjunto (EPS mais água), essa absorção de água gera uma massa específica do conjunto alta, conforme pode ser observados pela Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Acréscimo da massa específica devido a absorção de água

Massa específica nominal (kg/m³)	Massa específica medida (kg/m³)	Absorção de água (%massa)	Massa específica conjunto EPS/água (kg/m³)
30	32	101	64
20	22	140	53
17	17,5	190	51
14,5	15	360	69
10	12	390	59
10 (30 % de reciclado)	13	480	75

Pela Tabela 4.9 observa-se o considerável aumento da massa específica do geoexpandido em contato com a água. Para amostras com cerca de 13 kg/m³, o valor após a absorção passou a cerca de 75 kg/m³ (os 500 % acima descrito).

Desta forma, fica visível a perda das características benéficas da utilização de um material de baixo peso para aterros. É necessário, portanto, na prática a previsão de um sistema de impermeabilização funcional para se evitar o contato direto do geoexpandido de EPS com a água, e um sistema de drenagem adequado de forma a se evitar contato e se promover uma eficiente drenagem da água nas obras, evitando tanto a absorção da mesma como empuxos nas estruturas. A relação entre a absorção de água e a massa específica gerada possui uma boa

aproximação com os resultados obtidos nos ensaios, podendo ser utilizada para se estimar um acréscimo de carga na fundação e outras influências em um caso prático.

Nota-se que o teor de umidade higroscópico das amostras de EPS é praticamente insignificante (Figura 4.102) se comparado com a absorção por submersão. O valor encontrado para aquele (condições de temperatura e umidade normais – 23 °C e 50 %) é o valor da unidade residual do ar contido nos vazios das amostras. Mais uma vez pode-se notar a influência da massa específica na absorção. Pela figura observa-se uma queda do valor de absorção de água para uma massa específica mais elevada. A correlação obtida para o teor de umidade higroscópico se apresenta compatível com os resultados dos ensaios.

Expressar o valor da absorção de água em relação às massas não é usual na literatura, que costuma exibir esta característica em termos da relação do volume de massa de água absorvida pelo volume da amostra. Deste modo, a Figura 4.103 exibe o resultado do ensaio de absorção máxima de água em relação aos volumes.

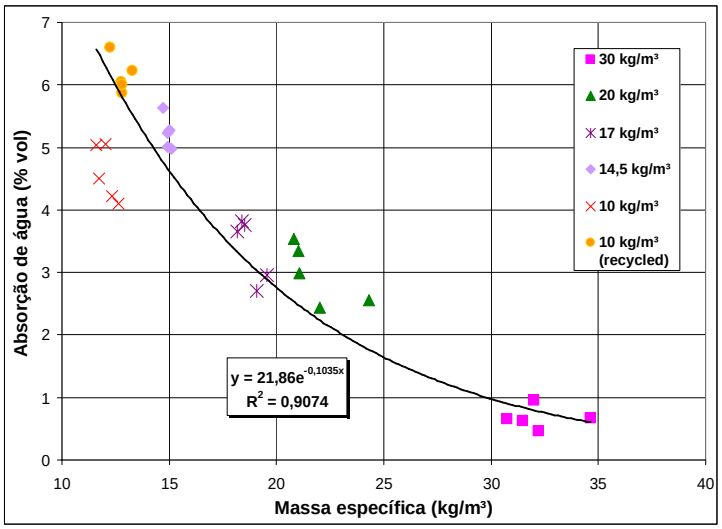


Figura 4.103 - Resultados dos ensaios de absorção de água por submersão com amostras de EPS em relação ao volume e correlação destas com a massa específica

Observa-se pela Figura 4.103 que a absorção de água em função dos volumes constitui valores bem inferiores.

4.8.1 Influência das Dimensões das Amostras

Neste estudo foi realizado apenas ensaios com amostras cúbicas, variando-se as dimensões (50 e 100 mm de lado). A Figura 4.104 exibe os resultados de ensaios realizados com amostras cúbicas de dimensões diferenciadas para o caso de absorção de água por imersão, com valores em relação aos volumes, e a Figura 4.105 exibe os resultados teor higroscópico de água em relação as massas.

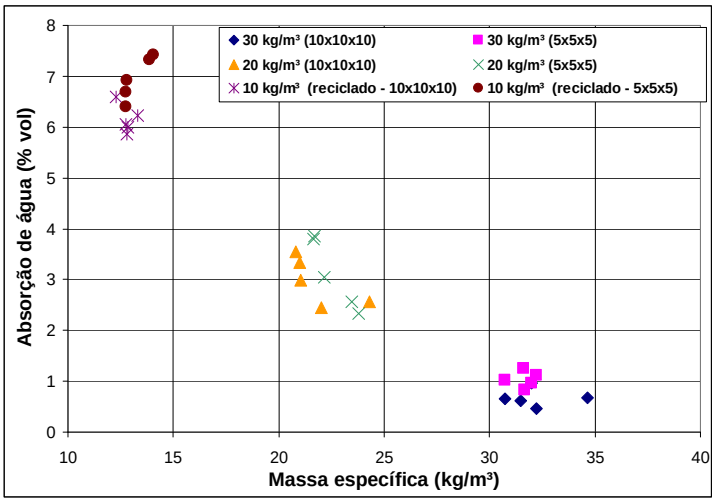


Figura 4.104 – Comparação da absorção de água entre diferentes dimensões de amostras cúbicas

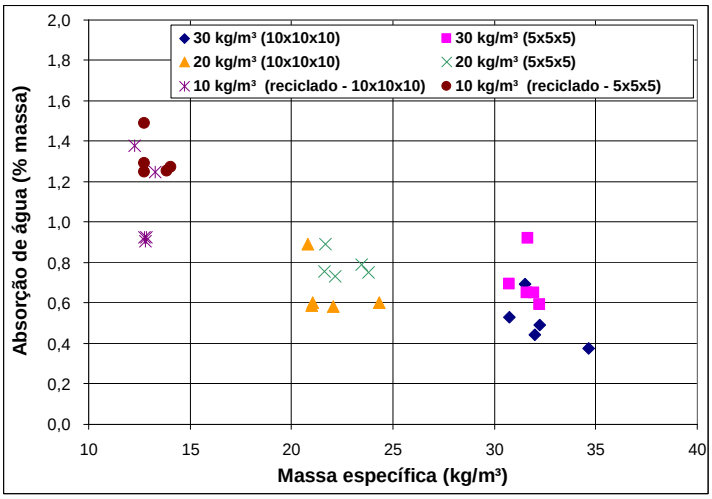


Figura 4.105 - Comparação do teor higroscópico de água entre diferentes dimensões de amostras cúbicas

Destas Figuras, nota-se que não há uma significativa variação dos resultados de absorção de água e do teor de umidade higroscópico com a variação das dimensões dos corpos de prova utilizados.

4.9 Ensaio de Permeabilidade

Tabela 4.10 exibe os resultados dos ensaios de permeabilidade com quatro amostras de massa específica diferentes de EPS. Para cada amostra deixou-se um tempo mínimo de 48 horas para se deixar saturar o corpo de prova e se obter uma estabilização do fluxo. Na determinação da permeabilidade, realizou-se um total de 3 ensaios por amostra na obtenção deste parâmetro.

Tabela 4.10 – Resultado do ensaio de permeabilidade

Massa específica nominal (kg/m³)	Massa Específica (kg/m³)	k (cm/s)
30	33,2	1,3E-06
20	22,2	2,2E-03
10	11,7	3,7E-03
10 (reciclado)	13	1,4E-02

Observa-se pela

Tabela 4.10, mais uma vez, a influência da massa específica nas propriedades do material. O valor da permeabilidade é inversamente proporcional à massa específica. Nota-se também a grande faixa deste parâmetro em relação ao valor da massa específica. Com variação desta de 10 para 30 kg/m³ (3 vezes), há uma variação de 3,66 x 10^{-3} para 1,32 x 10^{-6} (cerca de 1.000 vezes).

Para uma melhor análise dos resultados, gerou-se um gráfico com estes valores, e por meio dele, tentou-se obter uma relação entre a

permeabilidade e a massa específica. Este gráfico com a correlação pode ser observado na Figura 4.106.

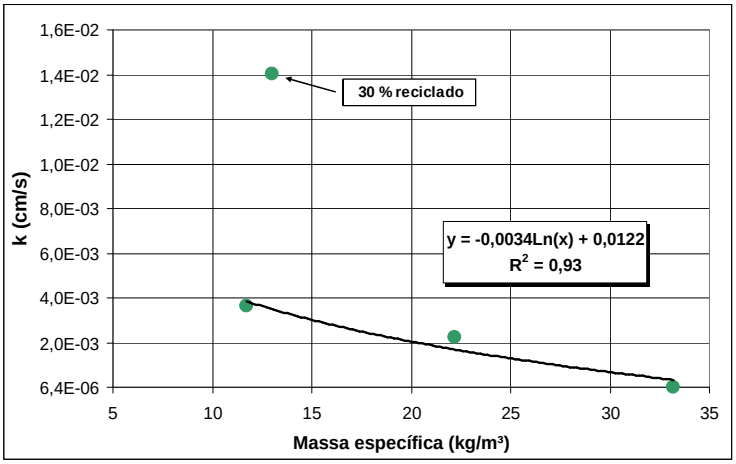


Figura 4.106 – Resultado do ensaio de permeabilidade e correlação entre esta e a massa específica

Nota-se da Figura 4.106 que a amostra com material reciclado, apesar de possuir uma massa específica superior, tem um valor de permeabilidade maior. Isso se deve a composição do material com uma porosidade maior. Porém, se considerarmos apenas a permeabilidade dos materiais virgem, há uma relação bem estabelecida com esta propriedade e a massa específica.

Destes resultados, podem-se obter utilizações com diferentes funções com o material. Desta grande variedade de permeabilidades obtidas para as diferentes massas específicas possíveis, podem-se prever utilizações desde barreiras impermeabilizantes até drenos.

4.10 Ensaio de Empuxo de Água

Para se quantificar o valor da força de empuxo quando o EPS se encontra submerso em água, foi realizado este ensaio com amostras cúbicas do material. A Figura 4.107 exibe o resultado do ensaio com cada massa específica e uma reta com o valor obtido de forma teórica da teoria de Arquimedes.

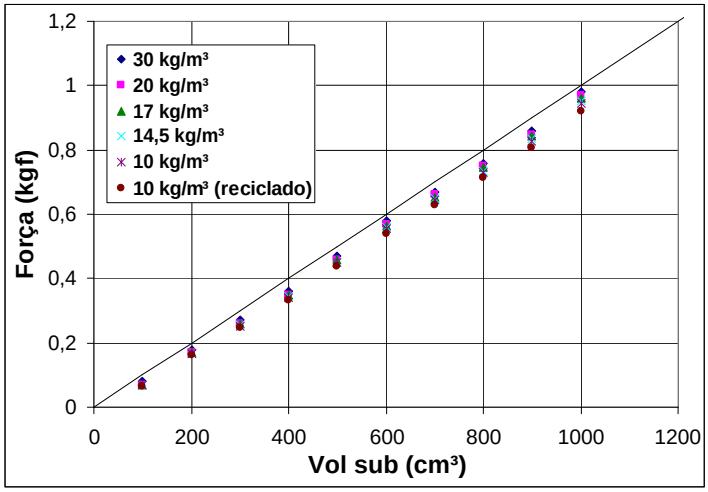


Figura 4.107 – Resultado do ensaio de empuxo submerso em água

Pela análise da Figura 4.107 observa-se que, o material possui um comportamento que se assemelha ao esperado da teoria de Arquimedes. Porém, nota-se uma inclinação menor do empuxo para o material. E o valor do empuxo diminui também para valores de massa específica inferiores, atingindo um mínimo para o EPS que possui material reciclado. Este fato se deve a maior quantidade de água que é absorvida pelos

corpos de prova de menor massa específica (um maior vazio), e que conseqüentemente diminui o valor da força de empuxo.

4.11 Ensaio de Perda de massa por Ataque de Roedores

O resultado do ensaio de perda de massa de amostras de EPS por ataque de roedores pode ser observado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultado do ensaio de perda de massa por ataque de roedores

Massa específica nominal (kg/m³)	Privação Total			Privação de Palha			Privação de Comida		
	Massa inicial	Massa Final	Perda (%)	Massa inicial	Massa Final	Perda (%)	Massa inicial	Massa Final	Perda (%)
30 kg/m³	16,4	14,9	9,4	15,9	9,5	40,1	16,9	16,0	5,2
20 kg/m³	12,4	11,9	4,1	12,5	7,0	44,2	12,0	11,8	1,3
17 kg/m³	9,4	8,9	5,6	9,4	7,6	19,4	9,5	9,4	1,3
14,5 kg/m³	8,1	7,9	3,2	8,3	5,1	38,1	8,0	7,9	1,2
10 kg/m³	6,0	5,7	4,5	6,1	4,7	24,1	5,7	5,6	1,1
10 kg/m³ (recilcado)	7,0	6,6	5,2	7,2	4,9	31,6	6,8	6,7	1,9

Pela Tabela 4.11, nota-se valores relativamente altos de perda de massa para o caso da privação apenas da palha. Para uma melhor visualização e análise dos resultados, um gráfico com estes valores foi construído e visualizado na Figura 4.108.

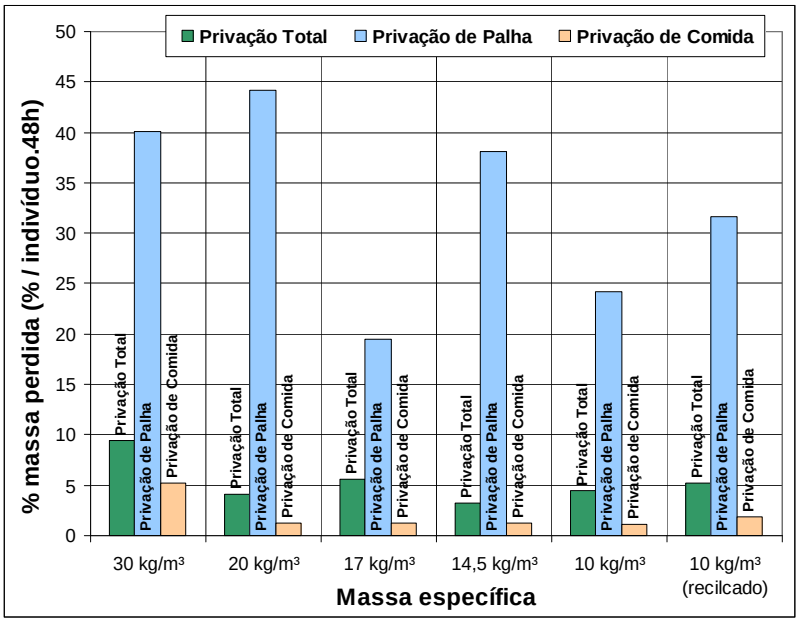


Figura 4.108 – Resultado do ensaio de perda de massa por ataque de roedores

Analisando-se a Figura 4.108, percebe-se que, apesar de a massa roída pelos camundongos ser pequena para dois dos casos analisados, para o caso específico de privação apenas de palha o valor resultante da massa perdida de material foi extremamente alto. Este fato ocorreu porque com a privação de comida os indivíduos entram em estado de baixa atividade para economizar energia. Quando a comida não é privada, o animal fica em seu estado de atividade normal. No caso da falta de palha para o ninho, o camundongo ataca consideravelmente as amostras, como visto na Figura 4.108. Ainda desta figura, observa-se uma não linearidade entre a massa específica das amostras e o ataque dos indivíduos. Portanto, o ataque é indiferente à massa específica do material.

Deve-se considerar que neste estudo, por motivos da infra-estrutura de realização do ensaio, os indivíduos ficaram confinados com o material, o que pode ter agravado a ação. Porém, vale ressaltar também que, o valor obtido foi para apenas um roedor de laboratório em apenas 48 horas. Para uma colônia, com roedores selvagens, maiores e mais agressivos e em um prazo de tempo maior, o ataque no material provavelmente seria mais elevado. A abordagem deste ensaio, portanto, se destaca pela análise qualitativa do ataque, e não um estudo quantitativo preciso do valor de perda de massa perdida.

Para se quantificar visualmente o ataque destes animais nos corpos de prova, a Figura 4.109 exibe as amostras ensaiadas em cada um dos casos. Da esquerda para a direita pode-se ver um corpo de prova antes do ensaio, ensaiado com privação de comida, com privação total e com privação de palha, respectivamente.

Figura 4.109 – Corpos de prova utilizados no ensaio de perda de massa por ataque de roedores

Nota-se pela Figura 4.109 o considerável ataque à amostra de privação apenas de palha (extrema direita), em relação as outras amostras.

Para a realização do ensaio utilizaram-se amostras de pequenas dimensões. Há relatos de que em grandes blocos, como em casos práticos, os roedores se instalam no interior dos mesmos para formar ninhos. Porém, efetuando-se uma cobertura correta do material com solo, sem deixar partes do EPS expostas, evita-se o risco do ataque destes animais.

4.12 Resumo das Relações com a Massa Específica

Para facilitar tanto um estudo inicial da utilização de um material como fazer uma pré-análise do mesmo em uma utilização, o uso de gráficos e ábacos que resumem suas propriedades é de grande valia. Para tal, foi feito um resumo das características e propriedades do EPS, em relação à massa específica, na tentativa de sintetizar de forma simplificada todas as análises desta pesquisa sobre este material. Optou-se pela massa específica como variável de controle por ela resumir de forma segura e com uma aproximação razoável as propriedades e por ser o meio de classificação mais usual do material.

As Figuras a seguir exibem estas relações.

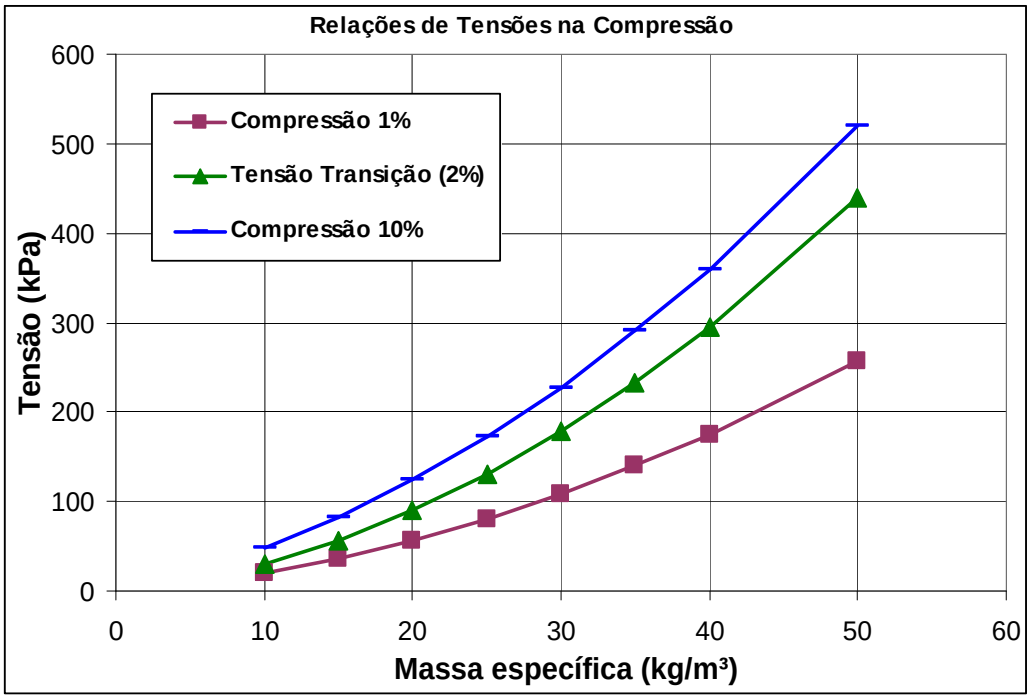


Figura 4.110 - Relações de tensões do ensaio de compressão

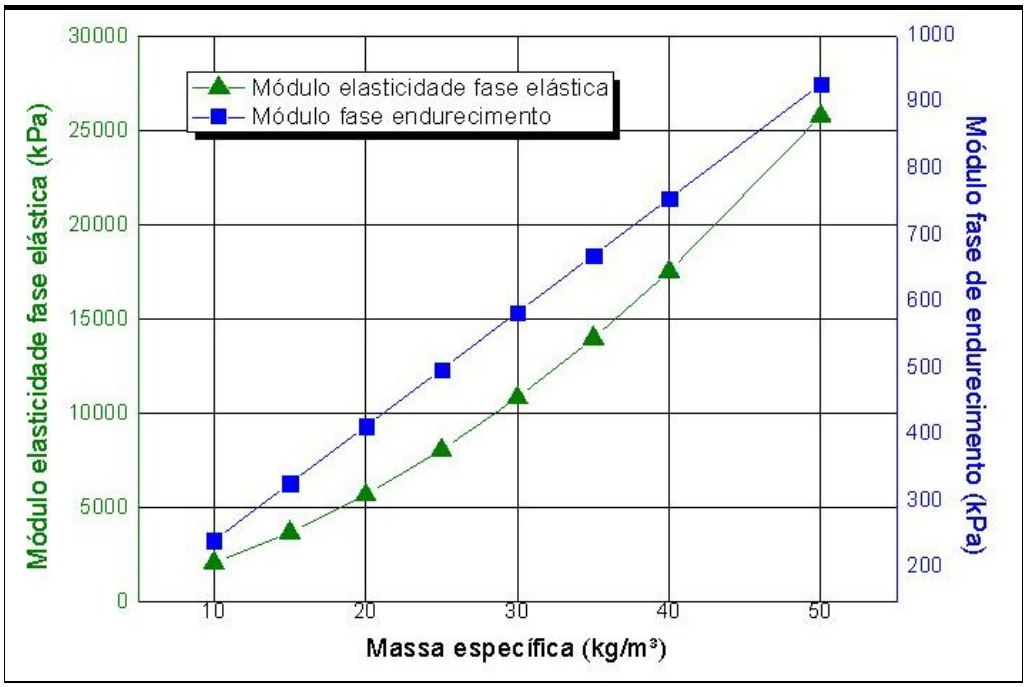


Figura 4.111 - Relações de módulos do ensaio de compressão

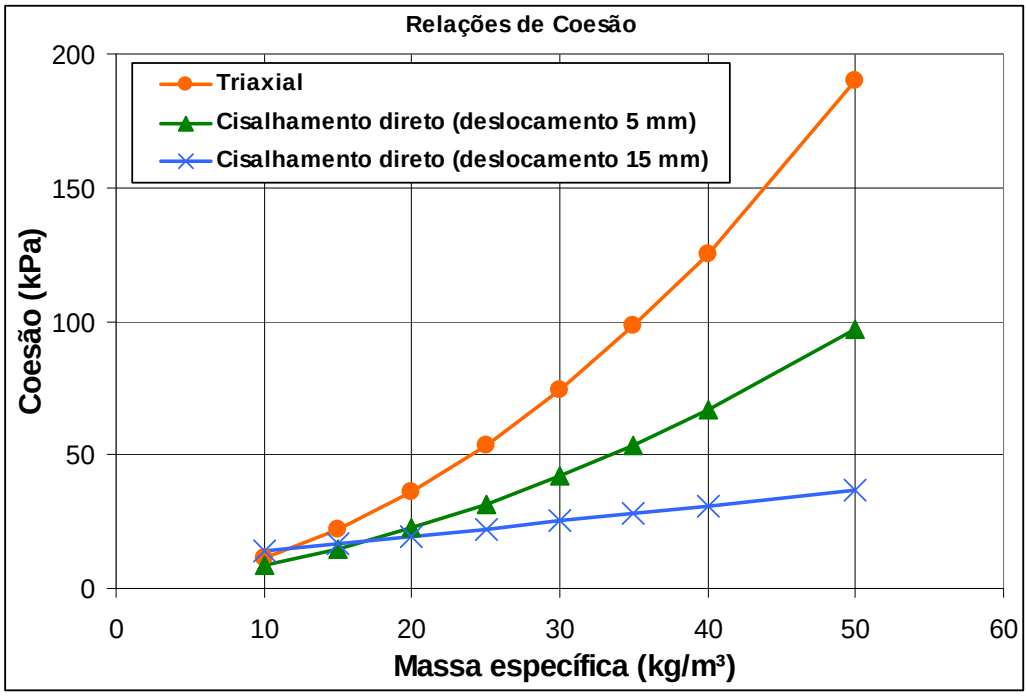


Figura 4.112 - Relações de coesão dos ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto interno

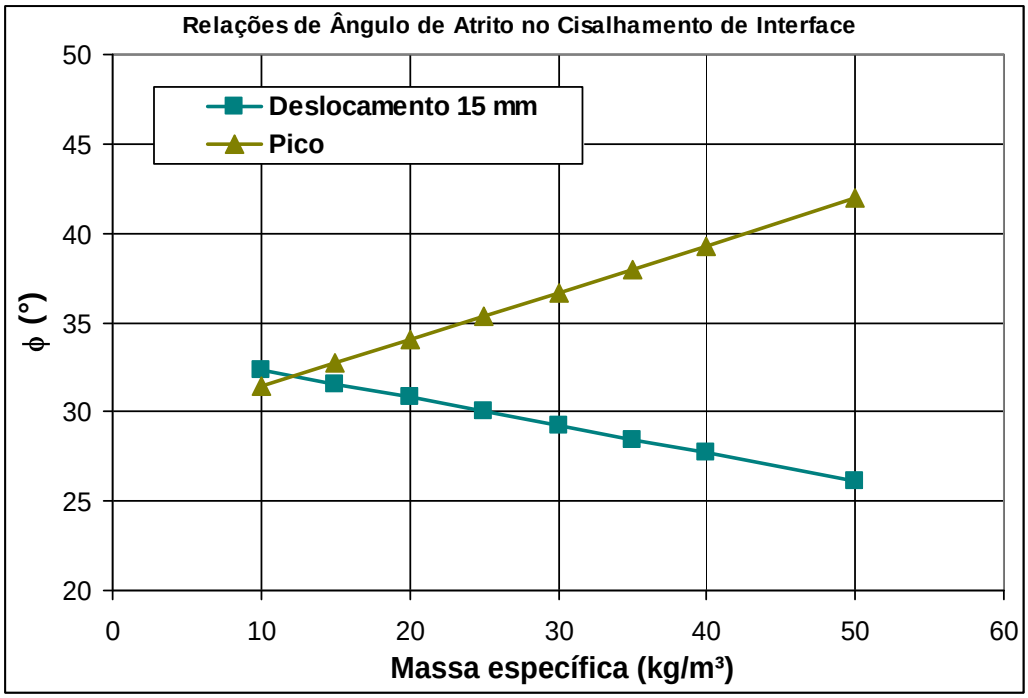


Figura 4.113 - Relações de ângulos de atrito do ensaio de cisalhamento de interface

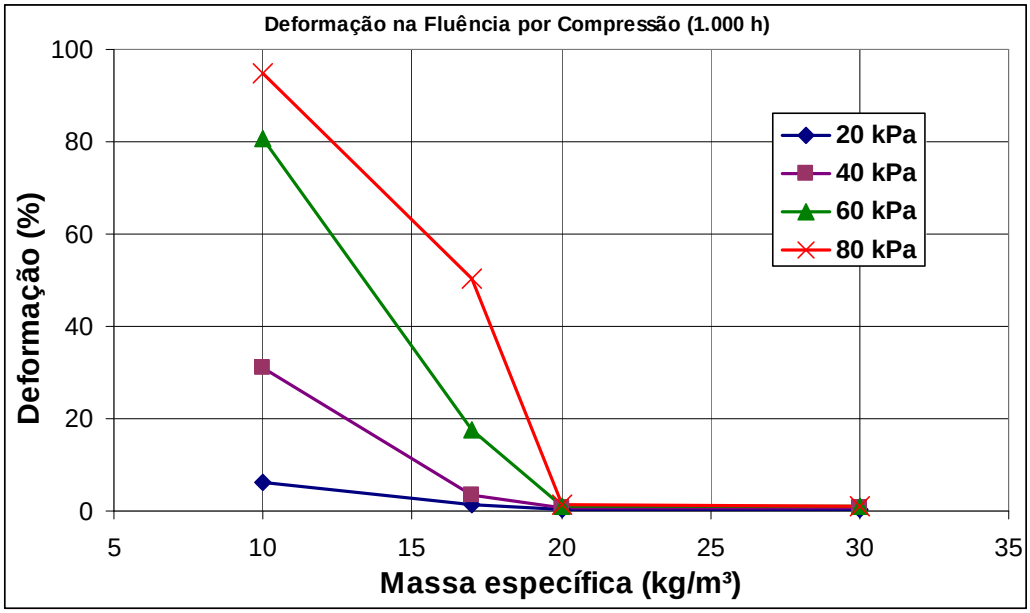


Figura 4.114 – Relações de deformação no ensaio de fluência na compressão

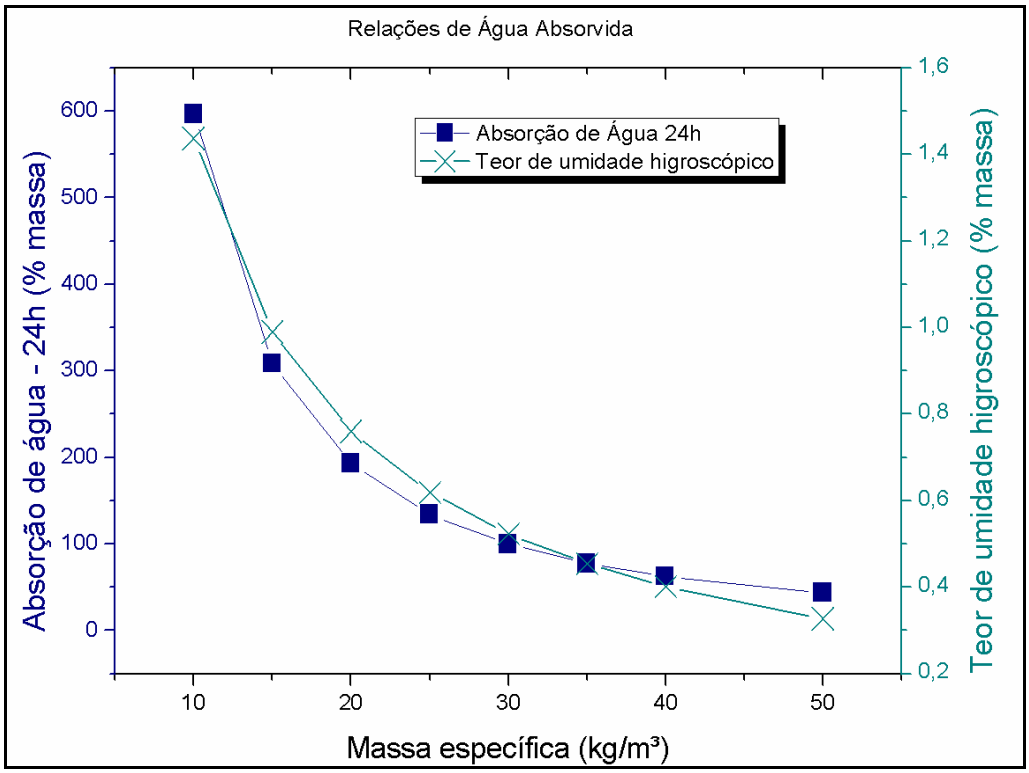


Figura 4.115 - Relações de absorção de água

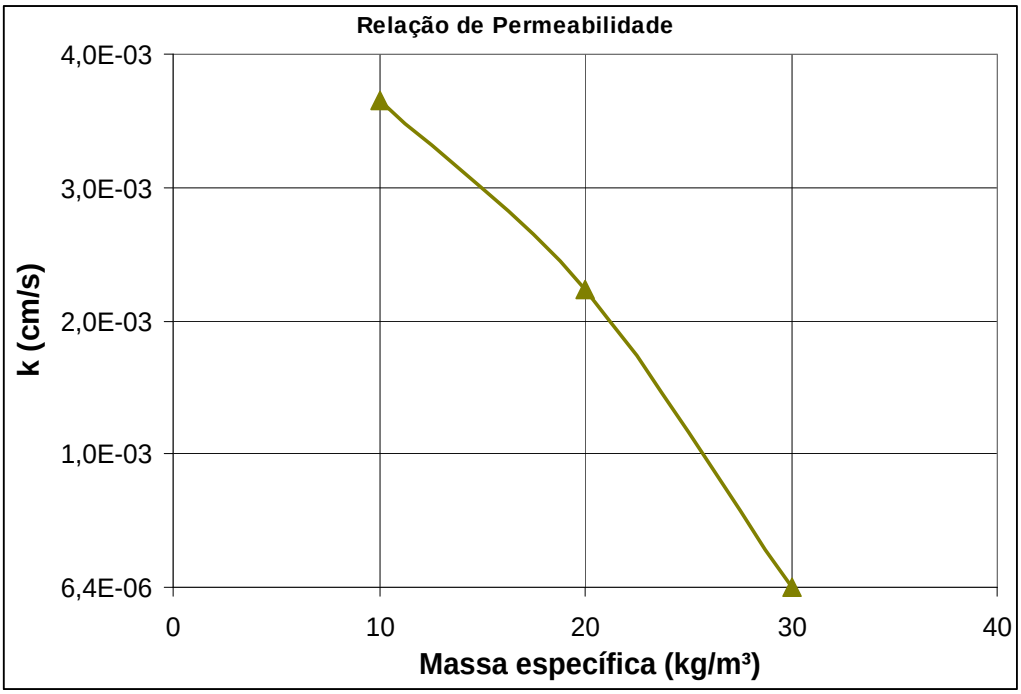


Figura 4.116 – Relação de permeabilidade

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma investigação sobre o comportamento do Poliestireno Expandido (EPS) conhecido comercialmente no Brasil como Isopor®, permitindo uma caracterização sobre as propriedades do material para seu uso na Engenharia Geotécnica por meio de um programa experimental, baseado em ensaios de natureza mecânica (compressão uniaxial simples, com variação da temperatura e cíclica, compressão triaxial, cisalhamento de interface - junta e fluência por compressão), hidráulica (absorção de água por imersão, teor higroscópico de umidade e permeabilidade), biológica (ataque de roedores) e química (análises de DSC e TGA). Os materiais aqui estudados foram amostras de 10 (contendo material virgem e reciclado), 20, 14,5, 17, 20, 30 e 40 kg/m³.

Com base nos resultados obtidos, as principais conclusões deste trabalho são:

- A variação dimensional, de massa e, consequentemente, de massa específica das amostras foram pequenas, com valores inferiores a 6 % de coeficiente de variação;
- Os ensaios de DSC e TGA mostraram que as amostras de EPS contendo material virgem e reciclado são semelhantes quimicamente, com semelhanças também nas características poliméricas;
- Dos ensaios de compressão uniaxial simples concluiu-se que o material possui um patamar elástico bem definido para uma deformação inferior a cerca de 2 %. A resistência (para uma deformação de 10 %) é alta, apesar da baixa massa específica do material. Obteve-se uma relação entre a massa específica e as resistências para 1 e 10 %;
- A proposição de se caracterizar o material por 3 parâmetros chaves na solicitação à compressão (módulo tangente na fase elástica adotado para uma deformação de 1 %, tensão de transição entre fase elástica e de endurecimento adotada para uma deformação de 2 % e taxa de ganho de resistência na fase de endurecimento, adotado entre as deformações de 2 e 10 %) se mostrou simples e eficaz, podendo ser atribuída nos ensaios posteriores;
- A variação das dimensões das amostras e da velocidade de execução do ensaio não interferem significativamente nas

propriedades mecânicas do material frente a solicitação à compressão;

- Com os ensaios de compressão uniaxial com variação da temperatura, verificou-se uma influência mais sensível da temperatura na resistência do EPS de 20 e 30 kg/m³, com decréscimos de cerca de 15 e 25 %, respectivamente;
- A análise dos resultados de compressão uniaxial cíclica permitiu verificar a plastificação excessiva (deformação acumulada) sofrida pelo EPS ao longo dos ciclos quando solicitado por uma tensão acima do limite elástico, e uma boa resposta do material, praticamente sem deformações acumuladas, quando a mesma solicitação não ultrapassou este limite;
- O ensaio de compressão triaxial demonstrou que o material é puramente coesivo. Desta forma foi verificado a não influencia significativa do confinamento na resistência das amostras de EPS. Corroborando esta análise, cita-se também a semelhança entre as curvas dos ensaios de compressão simples e triaxial, com relações entre a resistência e a massa específica extremamente próximas;
- O coeficiente de Poisson estimado pelos ensaios de compressão triaxial possuem valores dentro da faixa indicada por ouros autores (cerca de 0,3 para a fase elástica e próximo a 0 na fase de endurecimento);

- O ensaio de cisalhamento direto de interface mostrou que algumas amostras (de massa específica elevada) do EPS possuem valores de pico bem definido, enquanto outras não exibem este comportamento. Os valores de ângulos de atrito de pico obtidos foram altos, superiores a 40 °. Notou-se a influência diretamente proporcional da massa específica nas envoltórias de resistência e no valor dos ângulos de atrito, obtendo-se uma relação entre eles;
- Verificou-se no ensaio de cisalhamento direto de interface a redução dos valores dos ângulos de atrito para uma situação de deslocamento de 15 mm, obtendo decréscimos de até 30 %. Esta redução se mostrou mais expressiva para valores de massa específica mais elevados;
- Do ensaio de cisalhamento direto interno concluiu-se que amostras de massa específica distintas respondem de maneira também distinta a este tipo de solicitação. A amostra de 10 kg/m³ possui uma envoltória praticamente composta apenas por coesão, enquanto as amostras de 20 e 30 kg/m³ possuem envoltórias com coesão e ângulo de atrito. Mais uma vez, notou-se a redução dos parâmetros das envoltórias para o valor de 15 mm de deslocamento, porém, apenas para as amostras de 20 e 30 kg/m³;

- Os ensaios de fluência por compressão mostraram que a parcela de deformação inicial prevalece no comportamento do material, não atingindo valores inferiores a 80 % do total da fluência;
- Dos resultados dos ensaios de absorção de água, observou-se o baixo valor de teor de umidade higroscópico do material. O valor da absorção de água após imersão de 24 horas se mostrou elevado, e deste resultou em um grande acréscimo da massa específica do conjunto, com aumentos de ate 500 %;
- Com o ensaio de permeabilidade verificou-se a grande amplitude desta propriedade do material com a massa específica, obtendo-se permeabilidades compatíveis tanto com materiais drenantes como materiais de barreiras impermeáveis. A relação entre a permeabilidade e a massa específica obtida dos resultados mostrou uma sensibilidade extremamente alta;
- O resultado do ensaio de perda de massa por ataque de roedores mostrou, apesar de uma pequena massa de material perdida no ataque, um grande valor relativo de perda de massa do corpo de prova. O caso mais critico registrado foi na privação apenas da palha, onde o animal, com a presença do alimento, mantém o estado de metabolismo alto e ataca as amostras para a montagem do ninho e buscar um conforto físico;
- Os valores de perda de massa obtidas neste ensaio são apenas uma análise qualitativa do fenômeno, comprovando a afirmação de alguns casos práticos, não constituindo uma análise

quantitativa concreta devido as variáveis não abordadas e as condições de execução dos ensaios;

- Como observado por todos os ensaios realizados neste estudo, a propriedade mais importante do EPS é a massa específica, com significante interferência em todas as outras características mecânicas e hidráulicas do material. Nota-se, em diversos ensaios como a compressão simples, absorção de água e permeabilidade, que parece haver um comportamento descontínuo entre amostras de massa específica inferiores a 20 kg/m³ e superiores a este valor. Nestes três casos, as relações poderiam ser facilmente substituídas por uma correlação bi-linear, na qual a massa específica de 20 kg/m³ seria um valor de transição (um ponto onde ocorre um “salto” nos resultados) entre as amostras de massa específica “baixa” e “alta”.

5.1 Sugestões para Pesquisas Futuras

Tendo em vista o que foi realizado nesta pesquisa e apresentado nesta dissertação, e a necessidade da continuidade de estudo do material EPS para a sua utilização na engenharia geotécnica, é sugerido aqui alguns aspectos de interesse para futuras pesquisas:

- Dar continuidade à caracterização mecânica do material em solicitações não abordadas nesta pesquisa como tração e flexão (tração indireta) com ensaios como compressão diametral, flexão a três pontos e tração direta, a fim de se abranger o estudo do EPS frente diferentes tipos de solicitações de campo;
- Realizar um ensaio de compressão cíclica dentro da fase elástica, de modo semelhante ao realizado neste estudo, porém acrescentando apenas um ou dois ciclos na fase de plastificação para simular o comportamento do material frente a apenas uma ou duas solicitações acima da prevista como um caminhão *off road*;
- Complementar o estudo do cisalhamento com a quantificação do ângulo de atrito da interface do EPS com outros materiais como geotêxteis, geomembranas, concreto, solo e etc;
- Complementar o estudo de absorção de água com ensaios de longa duração;
- Complementar o estudo das relações com a massa específica para valores intermediários entre 20 e 30 kg/m³ 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;

- Promover simulações computacionais de utilizações do geoexpandido como aterros, base de pavimentos, proteção de infra-estruturas, inclusões de alívio de pressão, etc;
- Realizar a instrumentação de obras, ou projetar e construir protótipos com utilizações diversas do geoexpandido e fazer o acompanhamento, com instrumentações variadas para avaliar as variáveis de projeto e as condições de operação do material.

REFERÊNCIAS

1. ABINT (2001). Curso Básico de Geotêxteis. Comitê Técnico Geotêxtil - CTG. São Paulo.

2. ABINT (2004). Manual Brasileiro de Geossintéticos. Comitê Técnico Geotêxtil – CTG. Ed. Blucher. São Paulo. 430 p.

3. ABNT (1993) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11752 - Materiais Celulares de Poliestireno para Isolamento Térmico na Construção Civil e em Câmaras Frigoríficas. Rio de Janeiro.

4. ABRAMENTO, M. (1995). Durabilidade e comportamento de Longo Prazo de Geossintéticos – Parte I: Propriedades Mecânicas e Hidráulicas. In: Geossintéticos'95. Anais. São Paulo, p. 217 – 226.

5. ABRAPEX (Associação Brasileira do Poliestireno Expandido). São Paulo, 1993. Disponível em <http://www.abrapex.com.br>. Acesso em 11 jul. 2006.

6. ACEPE (Associação Industrial de Poliestireno Expandido). Lisboa Portugal, 1981. Disponível em <http://www.acepe.pt>. Acesso em 11 jul. 2006.

7. AIPE (*Associazione Italiana Polistirene Espanso* - Associação Italiana de Poliestireno Expandido). Milão, Italia. Disponível em < http://www.maxo.it/aipe>. Acesso em 11 jul. 2007.

8. ALFREY T.;GURNEE E. F.;BUSCHINE J. Polímeros orgânicos. São Paulo: Edgard Blucher, 1967. 134 p.

9. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). ASTM D 5262 – Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep Behavior of Geosinthetics. In: Annual Book of ASTM Standards. New York.

10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). ASTM C 272 – Standard Test Method for Water Absorption of Core Materials for Structural Sandwich Constructions. In: Annual Book of ASTM Standards. New York.

11. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). ASTM C 303 – Standard Test Method for Dimensions and Density of Performed Block – Type Thermal Insulation. In: Annual Book of ASTM Standards. New York.

12. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1998). ASTM D 3080 – Standard Test Method for Direct Shear Tests of Soils Under Consolidate Drained Conditions. In: Annual Book of ASTM Standards. New York.

13. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2000). ASTM D 1621 – Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. In: Annual Book of ASTM Standards. New York.

14. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2001). ASTM D 2990 – Standard Test Method for Tensile, Compressive and Flexural Creep and Creep - Rupture Plastics. In: Annual Book of ASTM Standards. New York.

15. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2002). ASTM D 4767 – Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. In: Annual Book of ASTM Standards. New York.

16. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2004). ASTM WK 3821 - New Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. In: Annual Book of ASTM Standards. New York.

17. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2003). ASTM D 6992 – Standard Test Method for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosinthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method. In: Annual Book of ASTM Standards. New York.

18. ANTHANASOPOULOS, G. A.; PELEKIS, P. C.; XENAKI, V. C. (1999). Dynamic Properties of EPS Geofoam: An Experimental Investigation. Geosyntetics International, v. 6, n. 3, p. 171 – 194.

19. BARAS, L. C. S. (2001). Estudo da Fluência em Geotêxteis Através de Ensaios Não Confinados Convencionais e Acelerados. São Carlos. 116 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

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

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

22. BASF (1998). Styropor: Rigid Styropor foam as a lightweight construction BASF material for highway foundations: GEOFOAM. Ludwigshafen, Germany. Catálogo técnico. 4 p.

23. BEINBRECH G.; HILLMANN R. (1997). EPS in Road Construction - Current Situation in Germany. Geotextiles and Geomembranes. n. 15, p. 39 – 57.

24. BUENO B. S. (2005). Avaliação Experimental do Comportamento Mecânico de Amostras de EPS. Relatório Técnico. Laboratório de Geossintéticos, Departamento de Geotecnia EESC – USP. 13p.

25. CANEVALORO, S. V. (2002). Ciência de Polímeros. 1ª Edição. Editora Artibler, São Paulo, Brasil. 184 p.

26. CHUN B. S.; LIM H.; SAGONG M.; KIM K. (2004). Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests. Geotextiles and Geomembranes. n. 22, p. 223 - 237.

27. COSTA C. M. L. (1999). Fluência de Geotêxteis. São Carlos. 99 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

28. COSTA C. M. L. (2004). Deformações Dependentes do Tempo em Muros de Solo Reforçado com Geotêxteis. São Carlos. 330 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

29. COSTANZI, M. A. (2003). Emprego do método SIM para obtenção das curvas isócronas e de ruptura por fluência. São Carlos. 82 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

30. DUSKOV, M. (1997). Materials Research on EPS20 and EPS15 Under Representative Conditions in Pavement Structures. Geotextiles and Geomembranes. n. 15, p. 147 – 181.

31. GNIP I. J.; KERSULIS V. I.; VAITKUS S. I. (2005). Predicting The Deformability Of Expanded Polystyrene In Long-Term Compression. Mechanics of Composite Materials. v. 41, n. 5, p. 407 – 414

32. HORVATH J. S. (1994). Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: An Introduction to Material Behavior. Geotextiles and Geomembranes. n. 13, p. 263 – 280.

33. HORVATH J. S. (1998). Mathematical Modeling of the Stress-Strain-Time Behavior of Geosynthetics Using the Findley Equation: General Theory and Application to EPS-Block Geofoam. Manhattan College Research Report No. CE/GE-98-3. Manhattan College, New York – USA. 35 p.

34. HORVATH J. S. (2001). Concepts for Cellular Geosynthetics Standards with an Example for EPS-Block Geofoam as Lightweight Fill for Roads . Manhattan College Research Report No. CGT-2001-4. Manhattan College, New York – USA. 92 p.

35. HORVATH J. S. (2004). Lighten Your Load…Using Geofoams to Reduce Structural Design Loads from the Ground. Structure Magazine, p. 8-10.

36. KAMIJI, T. S. M. M. (2006). Fluência de geotêxteis não tecidos através de ensaios confinados. São Carlos. 133 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

37. KOERNER, R. M. (1994). Designing with Geosynthetics, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 3rd Ed. 761p.

38. MARTINS L. Geofoam. Apresentação em data show da BASF.

39. MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2005). Mecânica dos Pavimentos. 2ª Edição. Rio de Janeiro. 570p.

40. REDDY, D. V.; BUTUL, B. (1999). A Comprehensive Literature Review of Liner Failures and Longevity. In: Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management University of Florida.

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

42. WONG. H.; LEO C. J. (2006). A Simple Elastoplastic Hardening Constitutive Model For EPS Geofoam. Geotextiles and Geomembranes. n. 24, p. 299 - 310.

43. YEO, S. S.; HSUAN, Y. G. (2006). The Compressive Creep Behavior of an Expanded Polystyrene Geofoam. 8º Congresso Internacional de Geossintéticos. Yokohama, Japão. p. 1639 – 1642.

44. ZORNBERG, J. B.; BYLER, B. R.; KNUDSEN, J. W. (2004). Creep of Geotextiles Using Time–Temperature Superposition Methods. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p. 1158 – 1168. Novembro 2004.

This document was created with Win2PDF available at http://www.win2pdf.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.