

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**COMPORTAMENTO FILTRANTE DE GEOTÊXTEIS NÃO
TECIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE APOIO**

JANAINA TATTO

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-186/10

BRASÍLIA / DF: ABRIL / 2010

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar forças para continuar a caminhada e vencer os obstáculos encontrados.

Ao professor Ennio Marques Palmeira, por ser um exemplo de líder, competente, ético e muito responsável em suas atividades profissionais. Agradeço por sempre estar disposto a me ajudar, orientando como verdadeiramente deve ser e pelos estímulos a continuar na vida acadêmica.

Aos professores do programa de Pós-Graduação pelas inúmeras dúvidas esclarecidas.

À minha mãe Rosa Tatto, meu tio David Tatto e Luiz Tatto pelas palavras de estímulo, me passando força, garra e admiração por eu ter voado mais longe do que eles.

Ao meu namorado Gregório Luis Silva Araújo, pelo acolhimento, prestatividade e segurança que sempre me passou. Pela paciência e palavras de apoio nos momentos conflitantes. Sou grata, juntamente a minha mãe, pelo apoio financeiro (risos....).

Aos meus grandes amigos e colegas do curso: Hellen e Alisson, Larissa e Fernando, Marianna e Rafaela e Francisco, pelas conversas agradáveis, momentos de descontração e desabafos. Sou grata pelas INÚMERAS caronas no período da noite da Geotecnia para casa. Agradeço também a companhia e amizade dos colegas colombianos: Alejandra e Ivan, Juan e Cristian.

Aos colegas do curso Larissa e Fernando, Hellen e Marianna pelas corridas ao pronto atendimento quando estive doente. Vocês foram minha UTI móvel! Ao professor Ennio e aos colegas Ivan e Alejandra, Juan e Cristian, pela preocupação que tiveram sempre comigo e por estarem sempre a postos para qualquer ajuda que eu precisasse.

À professora Isabel, sempre disposta a ajudar quando requisitada. Aos técnicos do laboratório Vanilson, Ricardo e Tiago, pelo auxílio nas atividades que envolviam maior força física (risos...). Agradeço pela alegria diária do Vanilson que me contagiava com suas cantorias.

Ao Sr. Arhur, chefe da oficina, pela prestatividade e boa vontade, por me ajudar na confecção de peças para a dissertação.

Aos professores Antônio Piratelli Filho (coordenador do Laboratório de Metrologia) e José Mauricio da Motta (coordenador do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos) ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Mecânica da UnB, pela disposição em me receberem e auxiliarem na tentativa de realizar as medições necessárias com mas precisão.

Ao colega Petrônio, por sua disposição em me apresentar o programa Photodeler na tentativa de me auxiliar no processo de medição do afundamento do geotêxtil.

À pedreira Brita Pinhal por ceder o agregado graúdo sem custo algum e por me disponibilizar os dados técnicos do material britado.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pela oportunidade de concluir o curso de Mestrado em Geotecnia, em uma instituição de grande renome e reconhecimento nacional e internacional.

Agradeço ao CNPQ pelo apoio financeiro.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO FILTRANTE DE GEOTÊXTEIS NÃO
TECIDOS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE APOIO**

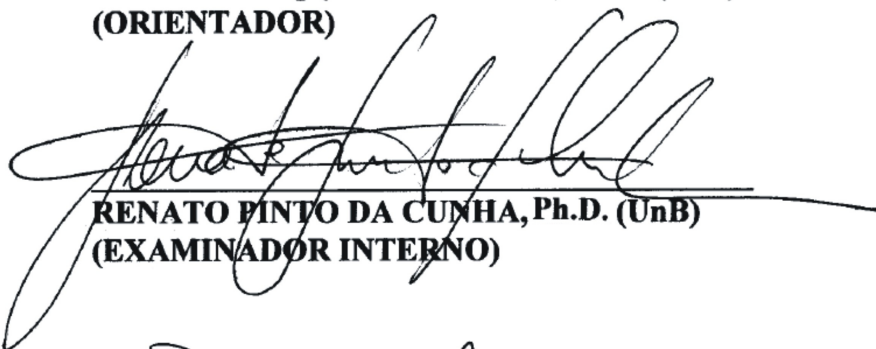
JANAINA TATTO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:



**ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)**



**RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**DENISE MARIA SOARES GERSCOVICH, D.Sc. (UERJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 8 DE ABRIL DE 2010.

FICHA CATALOGRÁFICA

TATTO, JANAINA	
Comportamento Filtrante de Geotêxteis não tecidos sob diferentes condições de apoio. [Distrito Federal] 2010	
xxviii, 172 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2010)	
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental	
1. Geotêxtil não tecido	2. Filtração
3. Material drenante	4. Esferas de aço
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TATTO, J. (2010). Comportamento Filtrante de Geotêxteis não tecidos sob diferentes condições de apoio. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-186/10, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172 p.

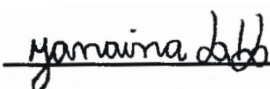
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Janaina Tatto

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Comportamento Filtrante de Geotêxteis não tecidos sob diferentes condições de apoio.

GRAU / ANO: Mestre / 2010

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Janaina Tatto

Rua Val Paraíso, 295, Bairro São José - Camobi
CEP.: 97095-670 – Santa Maria/RS - Brasil

“Quando os ventos de mudança sopram, umas pessoas levantam barreiras, outras constroem moinhos de vento.”

Érico Veríssimo

O mecanismo de funcionamento de um bom filtro, seja esse formado por materiais naturais ou geossintéticos, consiste em permitir o fluxo de água simultaneamente à retenção de partículas do solo de base, garantindo a sua estabilidade. Portanto, para assegurar o bom desempenho de um filtro, existem critérios que levam em consideração fatores como retenção, permeabilidade, colmatção e durabilidade. Tais critérios são baseados nas propriedades do material a ser filtrado e do elemento filtrante. O objetivo deste trabalho é apresentar e discutir resultados de ensaios laboratoriais que avaliaram o comportamento de sistemas filtrantes compostos por geotêxtil não tecido, em contato com diferentes materiais drenantes, sob tensão vertical. Foram utilizados geotêxteis não tecidos com gramaturas de 200 g/m², 400 g/m² e 600 g/m². Microesferas de vidro, esferas de aço e agregado graúdo foram empregados para simular o material subjacente ao geotêxtil. O principal equipamento utilizado nos ensaios foi o de ensaios de filtração tipo Razão entre Gradientes (GR), com aplicação de tensões verticais. Foram realizados ensaios do tipo razão entre gradientes e ensaios específicos para verificação da influência do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material subjacente no seu comportamento filtrante. Deformações médias no geotêxtil foram obtidas nesses ensaios. Também foram executados ensaios para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil para diferentes arranjos das esferas de aço (diâmetro e espaçamento) subjacentes ao filtro geotêxtil. Os resultados obtidos mostraram a influência do material subjacente ao geotêxtil no seu comportamento filtrante.

The satisfactory performance of a filter, be it a granular or a geotextile one, consists of allowing the passage of the fluid while retaining the base soil particles in order to guarantee its stability. Thus, for a good filter performance some requirements from filter criteria must be fulfilled, addressing issues such as particle retention, filter permeability, clogging and durability. These criteria are based on properties of the base soil and of the filter. This dissertation aims to present and discuss the results obtained in laboratory tests to evaluate the behaviour of filter systems consisting of nonwoven geotextiles overlying different granular materials, under confinement. Nonwoven geotextiles with mass per unit area of 200 g/m², 400 g/m² and 600 g/m² were used in the tests. Glass beads, stainless steel spheres and a coarse aggregate were employed as granular materials underlying the geotextile filter. A gradient ratio (GR) test equipment capable of applying vertical stresses on the soil-geotextile system was employed in the experiments. Gradient ratio tests were performed, as well as specific tests to evaluate the influence of sagging of the geotextile filter in the voids of the underlying material on its filter behaviour. Average strains in the geotextile were also obtained in the tests. The grain sizes of the particles that piped through the geotextile filter for different arrangements of spheres underlying the filter were also assessed. The results obtained showed the influence of the material underlying the geotextile on its filter performance.

Capítulo	Página
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 METODOLOGIA	2
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 CONSUMO DE GEOSSINTÉTICOS NO MUNDO	4
2.2 GEOSSINTÉTICOS	5
2.3 GEOTÊXTEIS EM SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO	7
2.3.1 Propriedades dos geotêxteis relevantes em sistemas de filtração e drenagem	8
2.3.1.1 Propriedades físicas	8
2.3.1.2 Propriedades hidráulicas	12
2.3.1.3 Propriedades mecânicas	14
2.4 CARACTERÍSTICAS DE FILTRAÇÃO DE GEOTÊXTEIS	14
2.5 INFLUÊNCIA DO MATERIAL EM CONTATO COM O GEOTÊXTIL NO SEU COMPORTAMENTO DRENO-FILTRANTE	20
3 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	22
3.1 EQUIPAMENTO DO ENSAIO DE FILTRAÇÃO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR)	22
3.2 GRANULÔMETRO A LASER	27
3.3 MICROSCÓPIOS DE ALTA RESOLUÇÃO	28
3.4 MATERIAIS UTILIZADOS	29
3.4.1 Geotêxteis	29
3.4.2 Materiais granulares	29
3.4.2.1 Microesferas de vidro	30
3.4.2.2 Esferas de aço	32
3.4.2.3 Agregado graúdo	32

3.4.3 Outros materiais utilizados	33
4 METODOLOGIA DA PESQUISA	35
4.1 PROCEDIMENTOS BÁSICOS DE ENSAIO	35
4.1.1 Preparação da amostra de geotêxtil	35
4.1.2 Preparação do arranjo de esferas de aço	39
4.1.3 Preparação da amostra de microesferas de vidro	42
4.1.4 Preparação da amostra de agregado graúdo	46
4.1.5 Procedimento para aplicação de tensão vertical	49
4.1.6 Grau de impregnação da amostra de geotêxtil	51
4.1.7 Deformação da amostra de geotêxtil	53
4.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL PASSANTE ATRAVÉS DO GEOTÊXTIL	55
4.2.1 Ensaio com fluxo d'água	58
4.2.2 Ensaio com impacto	62
4.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO AFUNDAMENTO DO FILTRO GEOTÊXTIL NOS VAZIOS DO MATERIAL DRENANTE E DA ÁREA DE CONTATO ENTRE ELES	63
4.4 GRANULOMETRIA A LASER	72
5 RESULTADOS E ANÁLISES	73
5.1 ENSAIO ESPECIAL PARA A OBTENÇÃO DO AFUNDAMENTO DO FILTRO GEOTÊXTIL NOS VAZIOS DO MATERIAL DRENANTE SUBJACENTE E DA ÁREA DE CONTATO ENTRE ELES	73
5.1.1 Ensaio com esferas de aço	75
5.1.1.1 Análise da influência da tensão vertical	79
5.1.1.2 Análise da influência do espaçamento	84
5.1.1.3 Análise da influência do diâmetro da esfera	88
5.1.1.4 Análise da influência da gramatura	91
5.1.2 Ensaio com agregado graúdo	95
5.1.3 Deformação do geotêxtil	97
5.2 ENSAIO PARA VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL PASSANTE ATRAVÉS DO GEOTÊXTIL	103

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	114
6.1 CONCLUSÕES	114
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
APÊNDICES	123
A - Detalhamento do diâmetro de contato e afundamento máximo	124
B - Repetibilidade dos ensaios.....	138
C - Características das amostras de microesferas de vidro: altura e índice de vazios antes e depois do processo de densificação.....	144
D - Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios com esfera de aço de 10 e 18 mm de diâmetro de acordo com o seu espaçamento e tensão vertical.....	150
E - Gráficos afundamento/diâmetro <i>versus</i> espaçamento/diâmetro.....	153
F - O resumo das deformações das amostras de geotêxtil.....	155
G - Curvas granulométricas das partículas da interface do geotêxtil, impregnadas e passantes nos ensaios para verificação do material passante através do geotêxtil.....	168

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 – Peso específico dos materiais poliméricos (modificado de Shukla, 2002).	9
Tabela 2.2 – Comparação entre os métodos para determinar distribuição de poros do geotêxtil (modificado de Shukla, 2002).....	12
Tabela 2.3 – Critérios de retenção dos geotêxteis (modificado de Palmeira & Gardoni, 2000).....	15
Tabela 2.4 – Critérios de permeabilidade dos geotêxteis (modificado de Christopher & Fischer, 1992).....	19
Tabela 3.1 – Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos ensaiados (dados do fabricante).....	30
Tabela 3.2 – Características granulométricas das microesferas de vidro.....	31
Tabela 3.3 – Propriedades físicas e químicas das microesferas de vidro.....	32
Tabela 3.4 – Principais propriedades da rocha de origem dos agregados graúdos (CIENTEC, 2008).....	33
Tabela 4.1 – Utilização das amostras de geotêxteis nos ensaios realizados.....	38
Tabela 4.2 – Número de esferas de aço, os valores de e , d e e/d utilizadas em cada arranjo.....	39
Tabela 4.3 – Ensaios onde foram utilizadas as esferas de aço e seus arranjos.....	41
Tabela 4.4 – Resumo das condições de preparo das microesferas de vidro em cada ensaio.....	46
Tabela 4.5 – Resumo das condições de contorno dos ensaios especiais para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e que utilizaram o agregado graúdo.....	49
Tabela 4.6 – Resumo das tensões verticais utilizadas em cada ensaio e o tempo de sua aplicação.....	51
Tabela 4.7 – Resumo dos ensaios para obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da área de contato entre eles.....	64
Tabela 4.8 – Número de medições realizadas para obter o afundamento máximo e a área de contato nos ensaios AAC.....	71

Tabela 4.9 – Resumo dos locais onde foram coletas as microesferas de vidro para a realização das análises granulométricas.....	72
Tabela 5.1 – Resumo dos ensaios para obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da área de contato entre eles.....	74
Tabela 5.2 – Afundamentos no molde de gesso.....	78
Tabela 5.3 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios que empregaram agregados...	97
Tabela 5.4 – Resumo dos ensaios para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil.....	104
Tabela 5.5 – Resumo das faixas granulométricas e dos valores de D_{95} obtidos nos ensaios de granulometria no material passante através do geotêxtil.....	109
Tabela 5.6 – Massa de microesferas de vidro passante através do geotêxtil.....	109
Tabela 5.7 – Grau de impregnação e razão de área aberta das amostras de geotêxteis nos ensaios para verificação das partículas passantes.....	111
Tabela A.1 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, $e/d= 0$ em todas as tensões verticais.....	124
Tabela A.2 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ em todas as tensões verticais.....	125
Tabela A.3 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ em todas as tensões verticais.....	126
Tabela A.4 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, $e/d= 0,67$ em todas as tensões verticais.....	127
Tabela A.5 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, $e/d= 1$ em todas as tensões verticais.....	128
Tabela A.6 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0$ em todas as tensões verticais.....	129
Tabela A.7 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ em todas as tensões verticais.....	130
Tabela A.8 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ em todas as tensões verticais.....	131
Tabela A.9 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,67$ em todas as tensões verticais.....	132

Tabela A.10 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 1$ em todas as tensões verticais.....	133
Tabela A.11 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio de repetibilidade que empregou geotêxtil G1, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ em todas as tensões verticais.....	135
Tabela A.12 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou geotêxtil G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, em todos os espaçamentos e tensão vertical de 1000 kPa.....	135
Tabela A.13 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio de repetibilidade que empregou geotêxtil G1, G2 e G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ e 1 na tensão vertical de 50 kPa.....	136
Tabela A.14 – Área fechada e afundamento máximo nos ensaios que empregaram agregado graúdo.....	137
Tabela B.1 – Resumo dos afundamentos obtidos nas repetições das medições.....	140
Tabela C.1 – Características das amostras nos ensaios que empregaram esferas de aço com 10 mm de diâmetro, em todos os espaçamentos e tensões verticais.....	144
Tabela C.2 – Características das amostras nos ensaios que empregaram esferas de aço com 18 mm de diâmetro, em todos os espaçamentos e tensões verticais.....	145
Tabela C.3 – Características das amostras nos ensaios de repetibilidade que empregaram geotêxtil G1, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ em todas as tensões verticais.....	146
Tabela C.4 – Características das amostras nos ensaios que empregaram geotêxtil G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, em todos os espaçamentos e tensão vertical de 1000 kPa.....	146
Tabela C.5 – Características das amostras nos ensaios que empregaram geotêxtil G1, G2 e G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ e 1 e tensão vertical de 50 kPa.....	146
Tabela C.6 – Características das amostras nos ensaios que empregaram agregado graúdo.....	147
Tabela C.7 – Características das amostras nos ensaios para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil.....	147
Tabela C.8 – Vazões e as cargas hidráulicas do ensaio de granulometria do material passante através do geotêxtil, realizado com fluxo.....	148
Tabela D.1 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios com esferas de aço com 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos e tensões verticais.....	150

Tabela D.2 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios com esferas de aço com 18 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos e tensões verticais.....	151
Tabela D.3 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios com o geotêxtil G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, nos diversos espaçamentos e tensão vertical de 1000 kPa.....	152
Tabela D.4 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios com os geotêxteis G1, G2 e G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, relação $e/d= 0,17$ e 1 e tensão vertical de 50 kPa.....	152
Tabela D.5 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios de repetibilidade empregando o geotêxtil G1, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, relação $e/d= 0,33$ em todas as tensões verticais.....	152
Tabela F.1 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 0$ nas diversas tensões verticais.....	155
Tabela F.2 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ nas diversas tensões verticais.....	156
Tabela F.3 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ nas diversas tensões verticais.....	157
Tabela F.4 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,67$ nas diversas tensões verticais.....	158
Tabela F.5 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 1$ nas diversas tensões verticais.....	159
Tabela F.6 – Resumo das deformações do geotêxtil G3 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 0; 0,17; 0,33; 0,67$ e 1 tensão vertical de 1000 kPa.....	160
Tabela F.7 – Resumo das deformações dos geotêxteis G1, G2 e G3 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ e 1 na tensão vertical de 50 kPa.....	161
Tabela F.8 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ e 1 nas diversas tensões verticais, no ensaio de repetibilidade.....	162
Tabela F.9 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d= 0$ nas diversas tensões verticais.....	163
Tabela F.10 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ nas diversas tensões verticais.....	164
Tabela F.11 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ nas diversas tensões verticais.....	165

Tabela F.12 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d= 0,67$ nas diversas tensões verticais.....	166
Tabela F.13 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d= 1$ nas diversas tensões verticais.....	167

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 – Estimativa da demanda mundial de geossintéticos em 2013 (modificado de Freedonia, 2009).....	4
Figura 2.2 – Símbolos gráficos que representam alguns geossintéticos destinados a drenagem e filtração (modificado de IGS, 2000).....	6
Figura 2.3 – Funções do geotêxtil (modificado de Bidim, 2009).....	8
Figura 2.4 – Variação da espessura do geotêxtil com a tensão vertical (modificado de Faure <i>et al.</i> , 1990).....	10
Figura 2.5 – Tamanho de constrição em arranjos de esferas (modificado de Kenney <i>et al.</i> , 1984).....	10
Figura 2.6 – Influência da tensão vertical e da impregnação do geotêxtil por partículas na sua abertura de filtração (Palmeira, 2005).....	10
Figura 2.7 – Variação da porosidade do geotêxtil agulhado com a tensão vertical (modificado de Giroud, 1996).....	11
Figura 2.8 – Permissividade e da transmissividade de um geotêxtil.....	13
Figura 2.9 – Variação da permissividade e da transmissividade do geotêxtil não tecido com a tensão vertical (modificado de Gardoni, 2000).....	14
Figura 2.10 - Mecanismos de colmatação: a) cegamento, b) bloqueamento e c) colmatação (modificado de Palmeira & Fannin, 2002).....	17
Figura 2.11 - Formação de arcos de partículas (modificado de John, 1987).....	18
Figura 2.12 - Esquema de erosão interna e sufusão no solo (modificado de John, 1987).....	18
Figura 2.13 – Aplicações de geotêxteis em sistemas dreno-filtrantes: a) barragem de terra, b) trincheiras drenantes, c) proteção contra erosão nos canais de drenagem (modificado de Wu <i>et al.</i> , 2002).....	20
Figura 2.14 – Seção transversal do sistema de drenagem solo- geotêxtil. a) simulação do contato geotêxtil/blocos de concreto por meio de placa perfurada, b) simulação do contato geotêxtil/ tela metálica (agregado) por meio da camada de esferas de aço (modificado de Wu <i>et al.</i> , 2006).....	21
Figura 3.1 - Esquema geral do equipamento de ensaio GR.....	23
Figura 3.2 - Equipamento de ensaio.....	23

Figura 3.3 - Esquema do permeâmetro (modificado de Bessa da Luz, 2004).....	24
Figura 3.4 – Localização dos anéis de borracha para vedação no permeâmetro.....	25
Figura 3.5 – Principal inovação no equipamento.....	25
Figura 3.6 – Dispositivo de impacto no ensaio de verificação da granulometria do material passante através da abertura de filtração do geotêxtil.....	27
Figura 3.7 - Granulômetro a laser.....	28
Figura 3.8 – Microscópios de alta resolução: a) microscópio com ampliação de até 200 vezes, b) microscópio com ampliação de até 400 vezes.....	29
Figura 3.9 – Detalhe do geotêxtil: a) agulha utilizada no processo de consolidação, b) processo de consolidação (Hsuan & Koerner, 2002), c) furo da agulha, d) aleatoriedade da disposição dos filamentos contínuos do geotêxtil não tecido G1, obtidos com o microscópio de alta resolução.....	30
Figura 3.10 – Detalhe das microesferas de vidro obtido com o microscópio de alta resolução.....	31
Figura 3.11 – Curva granulométrica das microesferas de vidro com e sem ultrasson..	31
Figura 3.12 – Esferas de aço inoxidável.....	32
Figura 3.13 – Áreas onde foram utilizadas selante elástico.....	34
Figura 4.1 – Amostragem do geotêxtil: a) manta sobre uma superfície plana e limpa, b) recorde das amostras sorteadas, c) amostras identificadas e d) recorde da amostra em círculo.....	36
Figura 4.2 – Saturação da amostra de geotêxtil.....	37
Figura 4.3 – Selante elástico na amostra de geotêxtil utilizada nos ensaios para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil.....	38
Figura 4.4 – Espaçamento (<i>e</i>) e diâmetro das esferas (<i>d</i>).....	39
Figura 4.5 – Arranjo de esferas de aço.....	40
Figura 4.6 – Formas de Etil Vinil Acetato para fixação do arranjo das esferas com espaçamento nulo.....	41
Figura 4.7– Dimensionamento das formas de Etil Vinil Acetato.....	42
Figura 4.8 – Técnica de pluviação submersa (modificado de Shi, 1993).....	43

Figura 4.9 – Preparação da amostra de microesferas de vidro por meio da técnica da pluviação submersa.....	43
Figura 4.10 – Peça de acrílico para medir a altura da amostra de microesferas de vidro	44
Figura 4.11 – Esquema do controle da altura da amostra.....	44
Figura 4.12 – Classificação dos grãos em relação a forma. (modificado de Powers, 1953, citado por Mitchell <i>et al.</i> , 2005).....	47
Figura 4.13 – Seleção da forma do pedrisco: a) agregados desconsiderados com baixa esfericidade (forma lamelar), b) agregados utilizados com alta esfericidade (forma cúbica e triangular).....	48
Figura 4.14 – Brita 1 utilizada com alta esfericidade (forma cúbica e triangular).....	48
Figura 4.15 – Esquema geral do sistema hidráulico de aplicação de tensão.....	50
Figura 4.16 – Arranjos do ensaio especiais de verificação da granulometria onde foi obtido o grau de impregnação do geotêxtil.....	52
Figura 4.17 – Área impregnada por microesferas de vidro nos ensaios especiais de verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil.....	53
Figura 4.18 – Esquema da medição da deformação do geotêxtil.....	54
Figura 4.19 – Ensaios para a verificação da granulometria do material passante através da abertura de filtração do geotêxtil: a) ensaio com fluxo, b) ensaio com impacto.....	56
Figura 4.20 – Detalhe da área aberta de fluxo na placa perfurada.....	57
Figura 4.21 – Selante elástico nas bordas do arranjo de esferas de aço.....	57
Figura 4.22 – Esquema geral das condições de contorno dos ensaios para a verificação da granulometria do material passante.....	58
Figura 4.23 – Procedimentos iniciais de montagem do permeâmetro.....	59
Figura 4.24 – Parte inferior do permeâmetro introduzido em um recipiente plástico...	60
Figura 4.25 – Dispositivo para o preenchimento de água destilada nos piezômetros...	61
Figura 4.26 – Esquema geral das condições de contorno da base drenante.....	64
Figura 4.27– Sequência de sobreposição dos materiais na base do equipamento.....	65
Figura 4.28 – Procedimento de medição do afundamento do geotêxtil.....	67

Figura 4. 29 – Esquema de medição do afundamento máximo do geotêxtil nos vazios das esferas de aço.....	67
Figura 4.30 – Esquema de sobreposição dos materiais na base do equipamento nos ensaios que empregaram gesso.....	68
Figura 4.31 – Interface do programa e <i>CorelDraw Graphics Suite 12</i> na obtenção das áreas de contato entre as esferas de aço e o geotêxtil.....	69
Figura 4.32 – Esquema dos arranjos de EA e o número de pontos onde o afundamento máximo e as áreas de contato foram obtidos.....	70
Figura 4.33 – Esquema das variáveis obtidas no ensaio especial para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente e da área de contato entre eles.....	71
Figura 5.1 – Registro do afundamento do geotêxtil nos vazios das esferas de aço e da área de contato entre eles em diversas condições de contorno: a) esferas com 10 mm de diâmetro e baixa tensão vertical, b) esferas com 18 mm de diâmetro e baixa tensão vertical, c) esferas com 10 mm de diâmetro e alta tensão vertical e d) esferas com 18 mm de diâmetro e alta tensão.....	76
Figura 5.2 – Detalhe do registro do afundamento do geotêxtil na forma de gesso: a) forma de gesso deformado e b) esquema da forma final do geotêxtil após a deformação.....	77
Figura 5.3 – Detalhe do registro do afundamento do geotêxtil nos ensaios realizados com esferas com 18 mm de diâmetro e com tensão vertical de 2000 kPa: a) máximo espaçamento, $e/d = 1$ e b) mínimo espaçamento, $e/d = 0$	78
Figura 5.4 – Registro do afundamento do geotêxtil nos vazios das esferas de aço e da área de contato entre eles em diversas condições de contorno.....	79
Figura 5.5 – Afundamento <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 10 mm de diâmetro em diversos afastamentos.....	81
Figura 5.6 – Afundamento <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 18 mm de diâmetro em diversos afastamentos.....	81
Figura 5.7 – Diâmetro de contato <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 10 mm de diâmetro em diversos afastamentos.....	82
Figura 5.8 – Diâmetro de contato <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 18 mm de diâmetro em diversos afastamentos.....	82
Figura 5.9 – Área aberta <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 10 mm de diâmetro em diversos afastamentos.....	83

Figura 5.10 – Área aberta <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 18 mm de diâmetro em diversos afastamentos.....	84
Figura 5.11 – Afundamento/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 50 kPa.....	85
Figura 5.12 – Afundamento/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 2000 kPa.....	85
Figura 5.13 – Afundamento/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para a esfera de aço com 10 mm de diâmetro em todas as tensões verticais.....	86
Figura 5.14 – Curva afundamento/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para a esfera de aço com 18 mm de diâmetro em todas as tensões verticais..	86
Figura 5.15 – Diâmetro de contato/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para as esferas de aço com diâmetro de 10 mm em todas as tensões verticais.....	87
Figura 5.16 – Diâmetro de contato/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para as esferas de aço com diâmetro de 18 mm em todas as tensões verticais.....	87
Figura 5.17 – Área aberta/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro em todas as tensões verticais.....	88
Figura 5.18 – Afundamento <i>versus</i> tensão vertical para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro em todos os espaçamentos.....	89
Figura 5.19 – Diâmetro de contato <i>versus</i> tensão vertical para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro em todos os espaçamentos.....	90
Figura 5.20 – Área aberta <i>versus</i> tensão vertical para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro com espaçamento mínimo.....	91
Figura 5.21 – Área aberta <i>versus</i> tensão vertical para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro com espaçamento máximo.....	91
Figura 5.22 – Influência da gramatura no afundamento do geotêxtil nos vazios entre as esferas de aço com 18 mm de diâmetro com diversos espaçamentos.....	92
Figura 5.23 – Influência da gramatura no afundamento do geotêxtil nos vazios das esferas de aço com 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 1000 kPa.....	93

Figura 5.24 – Influência da gramatura no diâmetro de contato entre o geotêxtil e as esferas de aço com 18 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 50 e 1000 kPa.....	93
Figura 5.25 – Influência da gramatura no diâmetro de contato entre o geotêxtil e as esferas de aço com 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 1000 kPa.....	94
Figura 5.26 – Influência da gramatura na área aberta de fluxo, empregando as esferas de aço com 18 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 50 e 1000 kPa.....	95
Figura 5.27 – Influência da gramatura na área aberta de fluxo, empregando as esferas de aço com 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 1000 kPa.....	95
Figura 5.28 – Pontos de afundamento e a área de contato nos ensaios que empregaram agregado graúdo.....	96
Figura 5.29 – Deformação média <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos.....	99
Figura 5.30 – Deformação média <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos.....	99
Figura 5.31 – Deformação média <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d= 0$ nas diversas tensões verticais.....	100
Figura 5.32 – Deformação média <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ nas diversas tensões verticais.....	100
Figura 5.33 – Deformação média <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ nas diversas tensões verticais.....	101
Figura 5.34 – Deformação média <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,67$ nas diversas tensões verticais.....	101
Figura 5.35 – Deformação média <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d= 1$ nas diversas tensões verticais.....	102
Figura 5.36 – Influência da gramatura na deformação média do geotêxtil nos vazios entre esferas de aço com 18 mm diâmetro para tensões verticais de 50 e 1000 kPa.....	102
Figura 5.37 – Influência da gramatura na deformação média do geotêxtil nos vazios entre esferas de aço com 10 mm diâmetro para a tensão vertical de 1000 kPa.....	103
Figura 5.38 – Curvas granulométricas das partículas da interface do geotêxtil nos ensaios com fluxo.....	104

Figura 5.39 - Diâmetro das partículas da interface com o geotêxtil correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}).....	105
Figura 5.40 – Curvas granulométricas das partículas impregnadas no geotêxtil nos ensaios com fluxo.....	106
Figura 5.41 - Diâmetro das partículas impregnadas no geotêxtil correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}).....	106
Figura 5.42 - Diâmetro das partículas passantes através do geotêxtil correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}).....	107
Figura 5.43 - Diâmetro das partículas da interface do geotêxtil correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}) <i>versus</i> deformação do geotêxtil.....	112
Figura 5.44 - Diâmetro das partículas impregnadas correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}) <i>versus</i> deformação do geotêxtil.....	112
Figura 5.45 - Diâmetro das partículas passantes correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}) <i>versus</i> deformação do geotêxtil.....	113
Figura 5.46 - Quebra das microesferas de vidro localizadas no topo da amostra ao término do ensaio realizado com fluxo sob tensão vertical de 2000 kPa.....	113
Figura B.1 – Distribuição dos valores de afundamento da medição 1, 2 e 3 do ensaio: $d = 10$ mm, $e = 1,7$ mm, 1000 kPa e G2.....	138
Figura B.2 – Distribuição dos valores de afundamento da medição 1, 2 e 3 do ensaio: $d = 10$ mm, $e = 3,3$ mm, 1000 kPa e G2.....	138
Figura B.3 – Distribuição dos valores de afundamento da medição 1, 2 e 3 do ensaio: $d = 18$ mm, $e = 3$ mm, 1000 kPa e G2.....	139
Figura B.4 – Afundamento <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro e 6 mm de espaçamento.....	141
Figura B.5 – Diâmetro de contato <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro e 6 mm de espaçamento.....	141
Figura B.6 – Diâmetro de contato <i>versus</i> afundamento do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro e 6 mm de espaçamento.....	142
Figura B.7 – Área aberta <i>versus</i> tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro e 6 mm de espaçamento.....	142
Figura B.8 – Influência da gramatura na deformação do geotêxtil nos vazios da esfera de aço no ensaio de repetibilidade.....	143

Figura C.1 – Vazão <i>versus</i> tempo no ensaio de granulometria do material passante através do geotêxtil realizado com fluxo.....	149
Figura E.1 – Curvas afundamento/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 100 kPa.....	153
Figura E.2 – Curvas afundamento/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 200 kPa.....	153
Figura E.3 – Curvas afundamento/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 500 kPa.....	153
Figura E.4 – Curvas afundamento/diâmetro da esfera <i>versus</i> espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 1000 kPa.....	154
Figura G.1 – Curva granulométrica das partículas da interface do geotêxtil nos ensaios com impacto, empregando a placa perfurada.....	168
Figura G.2 – Curva granulométrica das partículas da interface do geotêxtil nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 0$	168
Figura G.3 – Curva granulométrica das partículas da interface do geotêxtil nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 1$	169
Figura G.4 – Curva granulométrica das partículas impregnadas nos ensaios com impacto, empregando a placa perfurada.....	169
Figura G.5 – Curva granulométrica das partículas impregnadas nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 0$	170
Figura G.5 – Curva granulométrica das partículas impregnadas nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 0$	170
Figura G.7 – Curva granulométrica das partículas passantes nos ensaios com fluxo....	171
Figura G.8 – Curva granulométrica das partículas passantes nos ensaios com impacto, empregando a placa perfurada.....	171
Figura G.9 – Curva granulométrica das partículas passantes nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 0$	172
Figura G.10 – Curva granulométrica das partículas passantes nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 1$	172

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

- A: Área da seção transversal do permeâmetro
- A'B': Trecho curvo real do comprimento final do geotêxtil
- A'C': Trecho retilíneo fictício do comprimento final do geotêxtil
- A_a: Área aberta de fluxo no geotêxtil
- A_A: Área do geotêxtil com adesivo selante
- AAC: Ensaio especial para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente e da área de contato entre eles
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- A_f: Área fechada para o fluxo, área de contato entre a esfera de aço e o geotêxtil
- A_i: Área impregnada
- a_i: Área de contato de uma esfera de aço
- ALA: Abrasão Los Angeles
- ASTM: American Society of Testing and Materials
- A_t: Área total da amostra de geotêxtil
- C: Comprimento entre um dos vértice do triângulo equilátero formado a cada três esferas de aço e o baricentro.
- Cc: Coeficiente de Curvatura
- CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul
- cm: Centímetro
- cm²: Centímetro quadrado
- cm³: Centímetro cúbico
- CSPE: Polietileno cloro-sulfonado
- Cu: Coeficiente de Uniformidade
- d: Diâmetro da esfera de aço
- D: Diâmetro de contato entre a esfera de aço e o geotêxtil
- \bar{D} : Diâmetro de contato médio entre a esfera de aço e o geotêxtil
- Dc: Constrição, menor abertura de um canal de fluxo
- d_f: Diâmetro das fibras do geotêxtil
- D₉₅: Diâmetro das partículas correspondente a 95 % passante em peso
- D_n: n % das partículas do solo possuem diâmetro D inferiores a ele

- E: Altura do triângulo equilátero formado a cada três esferas de aço
- e: Espaçamento entre as esferas de aço
- e: Índice de vazios
- e_f : Índice de vazios depois da compactação
- e_{max} : Índice de vazios máximo
- e_{min} : Índice de vazios mínimo
- e_o : Índice de vazios antes da compactação
- EVA: Borracha composto de Etil Vinil Acetato
- EPDM: Elastômero de dieno-propileno-etileno
- FOS: Abertura de filtração pelo método de ensaio peneiramento hidrodinâmico
- g: Grama
- G1: Geotêxtil não tecido de filamentos contínuos, Bidim, gramatura de 200 g/m^2
- G2: Geotêxtil não tecido de filamentos contínuos, Bidim, gramatura de 400 g/m^2
- G3: Geotêxtil não tecido de filamentos contínuos, Bidim, gramatura de 600 g/m^2
- GMP: Ensaio para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil
- GR: Ensaio de filtração tipo Razão entre Gradientes
- GTX: Geotêxtil
- GNT: Georedes
- GGR: Geomalha
- GCD: Geocomposto
- GSP: Geoespaçadores
- G_s : Massa específica dos grãos
- γ_s : Peso específico real dos grãos
- H: Altura do permeâmetro
- H: Comprimento do pino de aço, desconsiderando as extremidades encaixantes
- h: Distância entre a placa perfurada e o geotêxtil
- h: Hora
- Hz: Hertz

- i: Gradiente hidráulico
- j: Joule
- $J_{50\%}$: Rigidez secante a 50% da tensão de ruptura
- k: Quilo (10^3)
- k_n : Permeabilidade normal ao plano do geotêxtil
- k_p : Permeabilidade ao longo do plano do geotêxtil
- kN: Quilonewton
- k_f : Permeabilidade do filtro
- k_s : Permeabilidade do solo
- l: Litro
- L: Altura da amostra de microesferas de vidro
- L_{fc} : Altura da amostra de microesferas de vidro depois da compactação
- L_{fe} : Altura da amostra de microesferas de vidro no final do ensaio
- l_i : Profundidade entre o topo do permeâmetro e a base da peça de acrílico em cada intervalo de controle da amostra de microesferas de vidro
- L_{oc} : Altura da amostra de microesferas de vidro antes da compactação
- Ltda.: Limitada
- M: Afundamento máximo considerando a espessura da lâmina de aço
- m: Metro
- m: Massa
- M: Mega
- m^2 : Metro quadrado
- m^3 : Metro cúbico
- m_3 : Massa do geotêxtil, adesivo selante e microesferas de vidro
- M_A : Gramatura do geotêxtil
- $ME_{A_{seca}}$: Massa específica aparente seca
- MEV: Microesferas de vidro
- m_f : Massa de filamentos
- min: Minuto
- ml: Mililitro
- mm: Milímetro
- m_{MEV_i} : Massa de microesferas de vidro impregnada

- \overline{m}_1 : Massa média do geotêxtil
- \overline{m}_2 : Massa média do geotêxtil e adesivo selante
- n: Porosidade do geotêxtil
- n_{aparente} : Porosidade aparente da rocha
- Nº: Número
- NS: Geotêxtil seco
- º: Grau
- O_F: Abertura de filtração
- OP-X: Nome comercial antigo do geotêxtil não tecido
- Pa: Pascal
- PET: Poliéster
- PE: Polietileno
- PT: Poliéster
- PVC: Policloreto de vinila
- PA: Poliamida
- PS: poliestireno
- PR: Parafuso de regulagem no tanque de nitrogênio
- Q: Vazão de saída
- RAA: Razão de área aberta, razão entre área a aberta e a área total do geotêxtil
- RT-Y: Nome comercial atual do geotêxtil não tecido
- s: Segundo
- S: Saída de gás no tanque de nitrogênio
- S: Geotêxtil saturado
- t: Espessura da base da peça de acrílico
- t: Espessura da lâmina de aço
- t_{GT}: Espessura nominal do geotêxtil
- UnB: Universidade de Brasília
- v: Volume de água
- V_v: Volume de vazios do geotêxtil
- V: Volume total do geotêxtil
- VC: Válvula do tanque de nitrogênio

- W_{wmf} : Massa restante do frasco de Ermenmeyer, água e microesferas de vidro depois da preparação da amostra
- W_{wm} : Massa do frasco de Ermenmeyer, água e microesferas de vidro antes da preparação da amostra
- W_{sd} : Massa seca de microesferas de vidro
- X: Ensaio realizado
- Δh : Diferença de nível d'água em dois piezômetros
- μ : Micro (10^{-6})
- ρ_s : Massa específica dos grãos
- σ : Tensão vertical
- Ψ : Permissividade do geotêxtil
- %: Porcentagem
- δ_{max} : Afundamento máximo do geotêxtil desconsiderando a espessura da lâmina de aço
- $\overline{\delta_{\text{max}}}$: Afundamento máximo médio do geotêxtil desconsiderando a espessura da lâmina de aço
- λ : Grau de impregnação do geotêxtil
- ε : Deformação aproximada do geotêxtil
- σ_c : Resistência a compressão uniaxial
- \sim : Aproximadamente
- ξ : Parâmetro adimensional da equação que obtem a abertura de filtração
- θ : Permissividade
- Ψ : Transmissibilidade

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A utilização de geossintéticos é cada vez mais freqüente em obras geotécnicas e de proteção ao meio ambiente, devido a fatores ambientais, econômicos e tecnológicos. Tais materiais têm sido utilizados em substituição ou em associação com soluções tradicionais de drenos e filtros. O uso de geossintéticos em sistemas filtro-drenantes pode oferecer uma execução mais fácil e rápida, mínima necessidade de manutenção e menores custos finais para obra, em comparação com as soluções convencionais.

Os sistemas filtro-drenantes podem apresentar redução de seus desempenhos devido à não retenção dos grãos do solo (*piping*) ou colmatagem. Para reduzir esses problemas e aumentar a eficiência e vida útil dos filtros, inúmeros trabalhos têm sido publicados no país e no exterior sobre o tema (Healy & Long, 1969; Christopher & Fischer, 1992; Fannin *et al.*, 1994; Giroud, 1996; Lafleur, 1999, por exemplo), de modo a aprimorar o conhecimento e o entendimento do comportamento de filtros, particularmente os de geotêxtil.

Em relação à função filtrante do geotêxtil, vários são os critérios disponíveis e todos possuem como característica básica a comparação entre o tamanho dos grãos do solo a ser filtrado e a abertura de filtração do geotêxtil. Entretanto, cabem dois questionamentos ainda não abordados nestes critérios: (1) *As características do material subjacente ao geotêxtil interferem no seu comportamento filtrante?* e (2) *O afundamento do geotêxtil, causado pela sua intrusão nos vazios de material drenante subjacente, influencia a sua capacidade de retenção?*

Desta forma, a motivação desta pesquisa foi o estudo do comportamento filtrante de geotêxteis não tecidos sob a ação de tensão vertical e em contato com diferentes materiais subjacentes, visando contribuir para o entendimento da influência, ou não, desse material no comportamento do filtro.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar o comportamento do sistema filtrante composto pelo geotêxtil não tecido em contato com diferentes materiais subjacentes, sob confinamento, com a medição de deformações no geotêxtil e avaliação da sua capacidade de retenção sob diferentes condições de apoio. Para tal, foram utilizados, ou adaptados, equipamentos disponíveis no Laboratório de Geotecnia da UnB.

1.3 METODOLOGIA

Para o entendimento do comportamento do sistema filtrante, composto pelo geotêxtil não tecido em contato com diferentes materiais drenantes subjacentes, sob confinamento, foi utilizado o mesmo equipamento empregado para o ensaio de filtração tipo Razão entre Gradientes (GR). Foram realizados ensaios especiais para a obtenção da área de contato e o afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material subjacente. Nestes ensaios as amostras de geotêxteis não tecido tiveram seus afundamentos e deformações determinados por técnica especial. Nos ensaios, variaram-se os diâmetros e espaçamento entre grãos do material subjacente, tensão vertical e a gramatura do geotêxtil, permitindo a verificação da influência dessas variáveis no afundamento e na capacidade de retenção do geotêxtil, totalizando 88 ensaios. Ensaio para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil também foram realizados, totalizando 12 ensaios.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação é dividida em seis capítulos. Uma breve descrição do conteúdo apresentado em cada capítulo é feita a seguir.

O presente *Capítulo* apresenta a **introdução** ao tema e a motivação da pesquisa, seus objetivos, um resumo da metodologia utilizada e a estrutura da dissertação em capítulos.

No *Capítulo 2* é apresentada uma **revisão bibliográfica** sobre o assunto, onde se aborda o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

O *Capítulo 3* descreve os **equipamentos** e os **materiais** utilizados nos ensaios, apresentando as mudanças realizadas no equipamento do ensaio GR, descrição do granulômetro a laser e do microscópio de alta resolução, bem como apresentação das características relevantes dos materiais empregados.

No *Capítulo 4* é apresentada a **metodologia** da pesquisa, descrevendo-se os procedimentos básicos de preparação da amostra de geotêxtil, dos arranjos das esferas de aço inox, da amostra de microesferas de vidro e do agregado graúdo. É apresentado também o procedimento de ensaio de granulometria do material passante através do geotêxtil (GMP), ensaio para obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da área de contato entre eles (AAC) e o procedimento para obtenção da granulometria do material passante por meio do granulômetro a laser.

O *Capítulo 5* versa sobre os resultados obtidos e análises realizadas, abordando-se a influência da tensão vertical, arranjos dos materiais subjacentes ao filtro geotêxtil e gramatura do geotêxtil nos resultados obtidos.

No *Capítulo 6* são apresentadas as **conclusões** e **sugestões** para as pesquisas futuras.

Os **Apêndices**, com dados sobre todos os ensaios realizados, completam o volume da dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSUMO DE GEOSSINTÉTICOS NO MUNDO

O uso de geossintéticos é cada vez mais frequente em obras geotécnicas e ambientais, contribuindo para o reforço do solo, separação de materiais, proteção, confinamento de resíduos, drenagem e filtração. Seu uso, em geral, oferece uma maior eficiência aliada ao alto controle tecnológico aplicado, com uma fácil execução e menores custos para obra.

Pesquisas de mercado recentes mostram que a produção e o consumo de geossintéticos no mundo vem crescendo cada vez mais a cada ano. Freedonia (2009) prevê um aumento de 5,3 % ao ano, totalizando um consumo de 4,7 bilhões de m² em 2013, destacando o mercado da Ásia e do Pacífico com uma estimativa de demanda de 44 % em termos mundiais, como mostra a Figura 2.1.

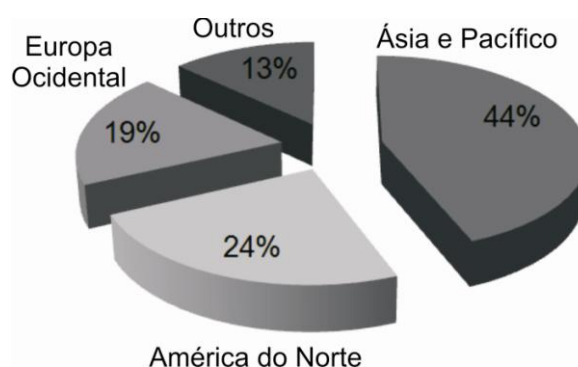


Figura 2.1 – Estimativa da demanda mundial de geossintéticos em 2013 (modificado de Freedonia, 2009).

Existem grandes consumidores de geossintéticos no mundo, destacando-se a China, América do Norte e Índia. De acordo com Freedonia (2009), a China foi responsável por $\frac{3}{4}$ das vendas de geossintético em 2008, a América do Norte foi o segundo maior consumidor, representando quase $\frac{1}{4}$ das vendas globais. A Índia foi responsável por 36 % da demanda de geossintéticos no setor de transportes, devido ao aumento das estradas pavimentadas em todo o país, que ligam as áreas rurais aos centros urbanos. Estima-se ainda que a Índia consuma ainda mais estes materiais para reduzir a erosão nas épocas de monções e para empregar na

construção de ferrovias, novos aeroportos e pavimentos. No entanto, em muitos dos demais países menos desenvolvidos do mundo, o crescimento será mais limitado, devido à falta de financiamento adequado, a falta de regulamentação que exijam a utilização de geossintéticos e a presença de alternativas de menor custo.

Em 2008, os geotêxteis representaram a maior demanda dentre os geossintéticos, responsável por 69 % da utilização. Esta força é atribuída ao seu baixo custo e bom desempenho em obras de controle de erosão, estabilização do solo, drenagem e filtração. Contudo, a taxa de aprovação dos geossintéticos, em alguns países, ainda é relativamente baixa, pois os custos iniciais podem ser altos e há ausência de conhecimento ou regulamentação apropriada para os seus usos (Freedonia, 2009).

2.2 GEOSSINTÉTICOS

Geossintéticos são definidos como produtos manufaturados de material polimérico, planares, que são utilizados com solos e rochas ou outros materiais selecionados pela Engenharia Geotécnica como parte integrante de um projeto, estrutura ou sistema (ASTM, 1995). Os polímeros mais comumente utilizados na confecção destes materiais são o polietileno (PE), poliéster (PT), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), poliamida (Nylon- PA), poliestireno (PS), elastômero de dieno-propileno-etileno (EPDM) e polietileno cloro-sulfonado (CSPE).

Os geossintéticos podem ser classificados em diferentes tipos, dependendo do processo de fabricação e aplicações. Uma descrição resumida das denominações usuais dos principais geossintéticos empregados com a função de drenagem e filtração é apresentada a seguir:

Geotêxteis: são mantas contínuas de fibras ou filamentos (sintético ou natural), podendo ser tecidos, não tecido, tricotado ou costurado. As mantas são flexíveis e permeáveis e são utilizados em contato com o solo / rocha e / ou qualquer outro material geotécnico.

Geotêxteis tecidos: geotêxtil produzido por entrelaçamento de fios, fibras ou outros elementos, geralmente em ângulos retos.

década de 70, com sua aplicação em obras rodoviárias. Nos dias atuais, seu campo de aplicação é bem maior, abrangendo não só as áreas geotécnica e geoambiental, mas também no setor hospitalar, automotivo, agrícola, entre outros. Na área geotécnica, os geotêxteis são os produtos que desempenham mais funções dentre os geossintéticos, como por exemplo:

Filtração e drenagem: Desempenha papel similar a um filtro de areia, permitindo a livre passagem de água através do solo, enquanto retém as partículas sólidas.

Reforço: Atua como elemento de reforço inserido no solo, ou em associação com o solo, para a melhoria das propriedades de resistência e de deformação do maciço.

Separação: Atua na separação de duas camadas de solos.

Controle de Processos Erosivos: Trabalha para reduzir os efeitos da erosão do solo causados pelo impacto da chuva e/ou pelo escoamento superficial da água.

Proteção e barreira: Quando impregnado com material asfáltico.

A Figura 2.3 mostra as principais funções do geotêxtil em obras geotécnicas.

Os geotêxteis podem também ser utilizados em estabilização de subleito, redistribuindo tensões sobre o solo de fundação e aumentando sua capacidade de suporte; recapeamento asfáltico, retardando a propagação de trincas para a nova capa; muros e taludes reforçados, permitindo a execução de taludes estáveis, com inclinações elevadas; aterro sobre solo mole, garantindo a estabilidade de aterros altos; filtração em transição de barragens, canais, obras viárias, aterros sanitários, substituindo filtros granulométricos e proteção de geomembranas, em canais de irrigação, lagos, obras de mineração, lajes de edifícios, evitando ou minimizando danos à geomembrana.

2.3 GEOTÊXTEIS EM SISTEMAS DE DRENAGEM E FILTRAÇÃO

Os primeiros estudos e publicações relacionados à função dreno-filtrante dos geotêxteis datam dos anos 70. Os estudos realizados até o presente momento tentaram analisar o

comportamento dreno-filtrante de geotêxteis, levando em conta as suas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas (Calhoun, 1972, Healy & Long, 1972, Gerry & Raymond, 1983, Christopher & Holtz, 1985, Fannin *et al.*, 1994, Wu *et al.*, 2006). Estas propriedades devem ser consideradas no projeto de obras de drenagem e filtração para que os filtros tenham um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da obra.

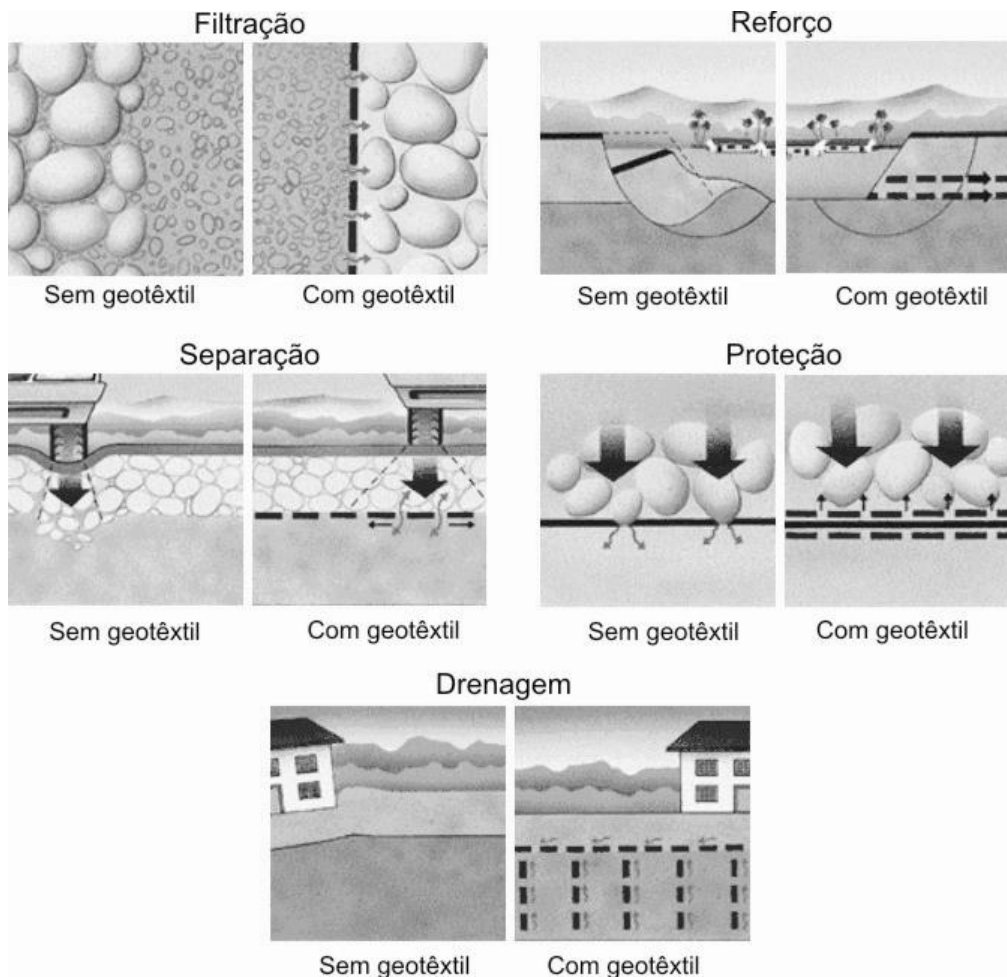


Figura 2.3 – Funções do geotêxtil (modificado de Bidim, 2009).

2.3.1 PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS RELEVANTES EM SISTEMAS DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM

2.3.1.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

As principais propriedades físicas dos geotêxteis são a gramatura, espessura, rigidez, porosidade e arranjo estrutural dos filamentos. Segundo Shukla (2002) essas propriedades são mais dependentes da temperatura e umidade, destacando-se a necessidade de controle destas

variáveis ambientais durante os ensaios em campo ou em laboratório, a fim de se alcançar resultados consistentes.

Os *pesos específicos* dos polímeros comumente usados na fabricação de geossintéticos são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Peso específico dos materiais poliméricos (modificado de Shukla, 2002).

Polímeros	Peso específico
Polipropileno	0,91
Poliéster	1,22 – 1,38
Poliamida	1,05 – 1,14
Polietileno	0,91 – 0,95

A *gramatura* (M_A) é definida como a massa do geotêxtil por unidade de área e é normalmente expressa em gramas por metro quadrado (g/m^2), podendo ser um bom indicativo de custo, resistência à tração, ao rasgo e a perfuração. Usualmente, os geotêxteis não tecidos comercializados no Brasil possuem gramatura variando tipicamente de 150 a 600 g/m^2 , podendo ultrapassar 1000 g/m^2 em casos de projetos ou aplicações especiais.

A *espessura nominal* do geotêxtil (t_{GT}) é a medida da distância entre a sua superfície superior e inferior a uma tensão vertical de 2 kPa. Esta propriedade é influenciada diretamente pela tensão vertical aplicada, como mostra a Figura 2.4.

A *rigidez* ou flexibilidade do geotêxtil está relacionada à sua flexão sob seu peso próprio e indica a viabilidade do mesmo se acomodar bem à superfície de trabalho.

O arranjo estrutural dos filamentos influencia o tamanho de canais de fluxo dentro do filtro e, conseqüentemente, o fluxo através do geotêxtil. A menor abertura em um canal de fluxo é denominada de *constricção* (*constriction* - D_C), que para o caso de partículas esféricas é esquematizada na Figura 2.5. Os estudos analíticos e experimentais realizados por Kenney *et al.* (1984), mostram que D_C é, na maioria dos casos, independente do forma da curva granulométrica do filtro e pode estar relacionada ao tamanho das partículas na fração fina. Desta forma, o conhecimento da D_C é útil para o projeto de filtros. As partículas de solo podem ficar retidas nos canais de fluxo quando D_C for menor que o diâmetro da partícula.

Particularmente no caso de geotêxteis não tecidos, esta capacidade de retenção é influenciada pela tensão vertical, como mostra a Figura 2.6.

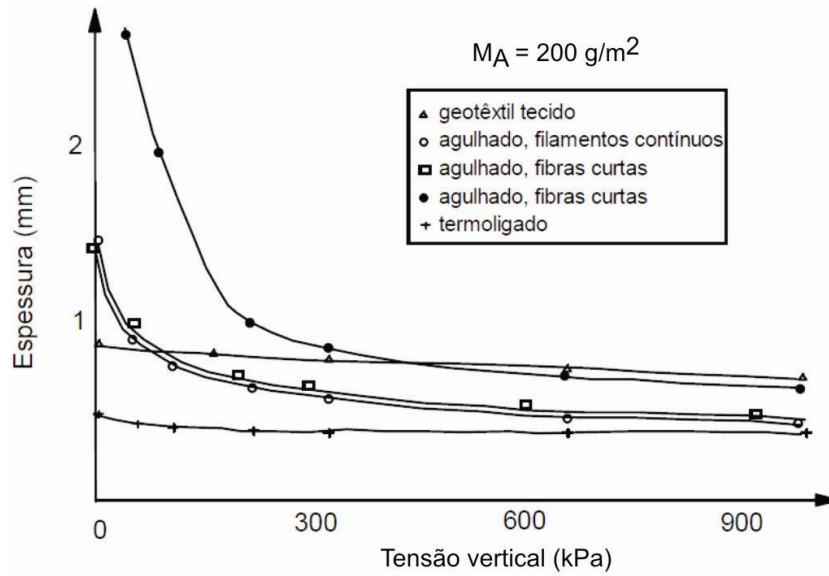


Figura 2.4 – Variação da espessura do geotêxtil com a tensão vertical (modificado de Faure *et al.*, 1990).

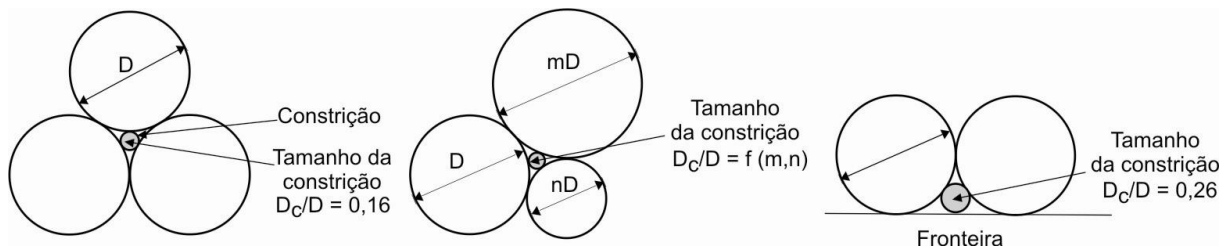


Figura 2.5 – Tamanho de constrição em arranjos de esferas (modificado de Kenney *et al.*, 1984).

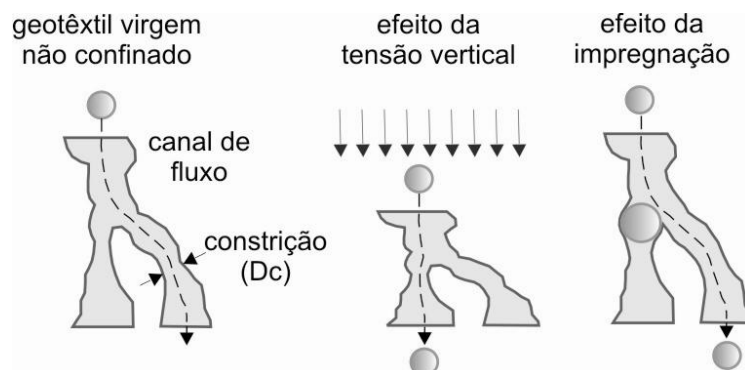


Figura 2.6 – Influência da tensão vertical e da impregnação do geotêxtil por partículas na sua abertura de filtração (Palmeira, 2005).

A *porosidade*, simbolizada por (n) é definida como a razão entre o volume de vazios sobre o volume total. Pode ser calculada indiretamente por meio da Equação 2.1, segundo Koerner (1990):

$$n = \frac{V_V}{V} = 1 - \frac{M_A}{t_{GT} \cdot \rho} \quad (2.1)$$

Onde: n = porosidade;

V_V = volume de vazios do geotêxtil;

V = volume total do geotêxtil;

M_A = gramatura do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil; e

ρ = massa específica das fibras do geotêxtil.

Os valores de porosidade são diferentes conforme o processo de fabricação do geotêxtil. Segundo Giroud (1996), os valores de porosidade para os geotêxteis não tecidos são de 0,9 para os geotêxteis agulhados (*needlepunched*) e de 0,7 para os geotêxteis termoligados (*heatbonded*). Esta propriedade também é influenciada pela tensão vertical, como mostra a Figura 2.7.

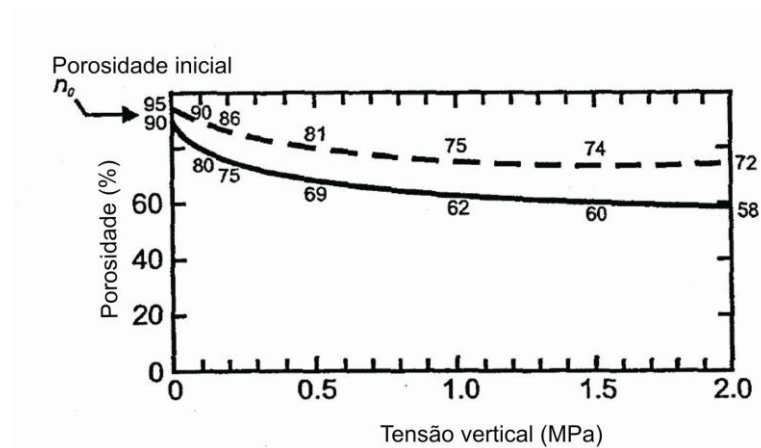


Figura 2.7 – Variação da porosidade do geotêxtil agulhado com a tensão vertical (modificado de Giroud, 1996)

2.3.1.2 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

A permissividade, a transmissibilidade e a abertura de filtração são as principais propriedades hidráulicas dos geotêxteis.

A *abertura de filtração* do geotêxtil é o tamanho do maior grão de solo capaz de atravessar o geotêxtil. As principais técnicas experimentais para a obtenção da abertura de filtração de um geotêxtil são listadas na Tabela 2.2. Os métodos de ensaios envolvendo vibração, realizados a seco, podem gerar forças eletrostáticas que tendem a fixar as partículas de solo às fibras do geotêxteis.

Tabela 2.2 – Comparação entre os métodos para determinar distribuição de poros do geotêxtil (modificado de Shukla, 2002).

Método	Mecanismo	Material	Tamanho da amostra (cm ²)	Duração do teste
Peneiramento a seco	Peneiramento a seco	Solo ou micro-esferas de vidro	434	2 h
Peneiramento hidrodinâmico	Alternação do fluxo d'água	Solo ou micro-esferas de vidro	257	24 h
Peneiramento úmido	Peneiramento úmido	Solo ou micro-esferas de vidro	434	2 h
Intrusão de mercúrio	Intrusão de líquido nos poros	Mercúrio	1,77	35 min
Análise de imagens	Medida direta dos poros por meio da seção transversal do geotêxtil	Nenhum	1,5	2 - 3 dias

Cabe também destacar os métodos semi-empíricos para a obtenção da abertura de filtração, como por exemplo, o método proposto por Giroud (1996), conforme Equação 2.2:

$$\frac{O_f}{d_f} = \left[\frac{t_{GT}/d_f}{M_A/(\rho_f d_f)} \right]^{1/2} - 1 + \frac{\xi \left[1 - \frac{M_A/(\rho_f d_f)}{t_{GT}/d_f} \right]}{M_A/(\rho_f d_f)} \quad (2.2)$$

Onde: O_F = abertura de filtração;

d_f = diâmetro das fibras do geotêxtil;

M_A = gramatura do geotêxtil;

ξ = parâmetro adimensional (obtido por calibração com dados de ensaio);

t_{GT} = espessura do geotêxtil; e

ρ = massa específica das fibras do geotêxtil.

A tensão vertical influencia a abertura de filtração, por provocar o rearranjo de seus filamentos devido a compressão do geotêxtil e, conseqüentemente, influencia no diâmetro das partículas passantes e retidas no filtro.

A *permissividade* (Figura 2.8) é definida como a relação entre o coeficiente de permeabilidade normal e a espessura do geotêxtil, conforme a Equação 2.3:

$$\theta = \frac{k_n}{t_{GT}} \quad (2.3)$$

Onde: θ = permissividade;

k_n = permeabilidade normal ao plano; e

t_{GT} = espessura do geotêxtil.

A *transmissibilidade* (Figura 2.8) é definida como o produto entre a permeabilidade ao longo do plano e a espessura do geossintético, conforme a Equação 2.4:

$$\Psi = k_p * t_{GT} \quad (2.4)$$

Onde: Ψ = transmissibilidade;

k_p = permeabilidade ao longo do plano; e

t_{GT} = espessura do geotêxtil.

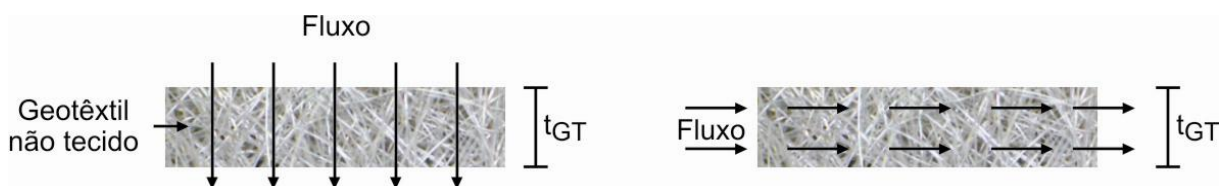


Figura 2.8 – Permissividade e da transmissibilidade de um geotêxtil.

Observa-se que a permissividade e a transmissibilidade também são influenciadas pela tensão vertical, como mostra a Figura 2.9.

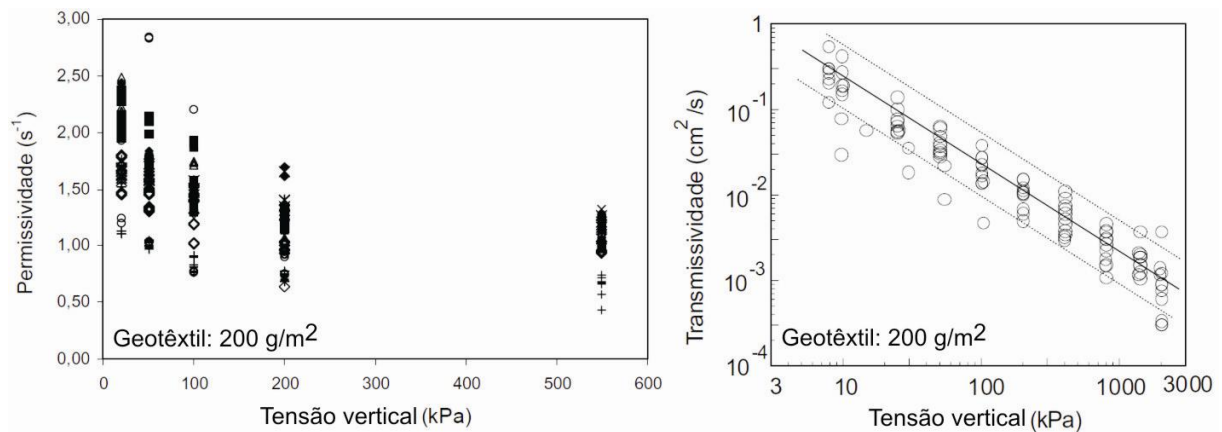


Figura 2.9 – Variação da permissividade e da transmissibilidade do geotêxtil não tecido com a tensão vertical (modificado de Gardoni, 2000).

2.3.1.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são importantes em diversas aplicações de geotêxteis. As principais propriedades mecânicas são a compressibilidade e resistência à tração.

A *compressibilidade* é a medida do decréscimo da espessura com a variação da tensão vertical, sendo muito importante para os geotêxteis não tecidos, pois tem influência direta nas suas propriedades hidráulicas.

A *resistência a tração* de um geotêxtil é expressa em termos de carga máxima de tração suportada pelo geotêxtil por unidade de comprimento carregado. A rigidez à tração do geotêxtil é a relação entre a carga de tração aplicada e a deformação provocada.

2.4 CARACTERÍSTICAS DE FILTRAÇÃO DE GEOTÊXTEIS

De uma forma geral, o mecanismo de funcionamento de um bom filtro consiste em permitir o fluxo de água, simultaneamente à retenção das partículas do solo base. Devido à sua complexidade, o mecanismo de filtração tem sido objeto de muitos estudos, visando o estabelecimento de critérios de filtro realistas.

Existem vários critérios de filtro e a grande maioria compara determinados valores de diâmetro dos grãos de solo (geralmente o diâmetro correspondente a 85% passando) com a

abertura de filtração do geotêxtil. Os critérios de filtro envolvem a análise da capacidade de *retenção* (antipiping), *permeabilidade*, *colmatação* e *durabilidade* do filtro.

A capacidade de retenção é uma característica do filtro em impedir que as partículas o atravessem, em decorrência da ação das forças de percolação. No entanto, é aceitável a migração de uma pequena percentagem de partículas através do material a ser drenado e do filtro, assim como a retenção de algumas partículas no interior do geotêxtil (John, 1987).

Os critérios de retenção se baseiam na comparação entre a abertura de filtração do geotêxtil (O_f) e o diâmetro característico da partícula de solo. A Tabela 2.3 apresenta os principais critérios de retenção encontrados na literatura.

Tabela 2.3 – Critérios de retenção dos geotêxteis (modificado de Palmeira & Gardoni, 2000).

Fonte	Critério	Observações
U.S. Corps of Engineers (1977)	$0,149 \text{ mm} \leq O_{95} \leq 0,211 \text{ mm}$ $0,149 \text{ mm} \leq O_{95} \leq D_{85}$	$D_{50} > 0,074 \text{ mm}$ $D_{50} \leq 0,074 \text{ mm}$ Geotêxteis não devem ser usados se $D_{85} < 0,074 \text{ mm}$.
AASHTO Task Force #25 (1986)	$O_{95} < 0,59 \text{ mm}$ $O_{95} < 0,30 \text{ mm}$	Se $50\% \leq 0,074 \text{ mm}$ Se $50\% > 0,074 \text{ mm}$ Sem limitações de geotêxtil e solo.
Calhoun (1972)	$O_{95}/D_{85} \leq 1$ $O_{95} \leq 0,2 \text{ mm}$	Tecidos, solos com $\leq 50\%$ passante na peneira 200. Tecidos e solos coesivos.
Zitscher, 1974	$O_{50}/D_{50} \leq 1,7-2,7$ $O_{50}/D_{50} \leq 2,5-3,7$	Tecidos, solos com $C_u \leq 2$, $D_{50} = 0,1$ a $0,2 \text{ mm}$. Não tecidos e solos coesivos.
Ogink (1975)	$O_{90}/D_{90} \leq 1$ $O_{95}/D_{85} \leq 1,8$	Tecidos. Não tecidos.
Sweetland (1977)	$O_{15}/D_{85} \leq 1$ $O_{15}/D_{15} \leq 1$	Não tecidos, solos com $C_u = 1,5$. Não tecidos, solos com $C_u = 4$.
Schober & Teindl (1979) (com nenhum fator de segurança)	$O_{90}/D_{50} \leq 2,5-4,5$ $O_{90}/D_{50} \leq 4,5-7,5$	Tecidos e não tecidos finos, dependendo de C_u . Não tecidos espessos, dependendo de C_u , solos siltosos e arenosos.
Millar, Ho & Turnbull (1980)	$O_{50}/D_{85} \leq 1$	Tecidos e não tecidos.
Rankilor (1981)	$O_{50}/D_{85} \leq 1$ $O_{15}/D_{15} \leq 1$	Não tecidos, solos com $0,02 \leq D_{85} \leq 0,25 \text{ mm}$. Não tecidos, solos com $D_{85} > 0,25 \text{ mm}$.
Giroud (1982)	$O_{95}/D_{50} < C'u$ $O_{95}/D_{50} < 9/C'u$ $O_{95}/D_{50} < 1.5C'u$ $O_{95}/D_{50} < 13.5/C'u$ $O_{95}/D_{50} < 2C'u$ $O_{95}/D_{50} < 18/C'u$	$I_D < 35\%$, $1 < C'u < 3$ $I_D < 35\%$, $C'u > 3$ $35\% < I_D < 65\%$, $1 < C'u < 3$ $35\% < I_D < 65\%$, $C'u > 3$ $I_D > 65\%$, $1 < C'u < 3$ $I_D > 65\%$, $C'u > 3$ Migração de finos para altos C_u .
Carroll (1983)	$O_{95}/D_{85} \leq 2 - 3$	Tecidos e não tecidos.

Continuação da Tabela 2.3.

Mlynarek (1985), Mlynarek <i>et al.</i> (1990)	$2 D_{15} < O_{95} < 2 D_{85}$	Não tecidos.
Lawson (1986)	$O_{90}/D_n = C$	Desenvolvido para solos residuais de Hong Kong. Valores de n e C são obtidos em gráficos que define regiões de desempenho aceitável de filtro.
John (1987)	$O_{95}/D_{50} \leq (C'u)^a$	a é dependente do tamanho da partícula a ser retida (a = 0,7 para D_{85}).
FHWA - Christopher & Holtz (1985)	$O_{95}/D_{85} \leq 1-2$ $O_{95}/D_{15} \leq 1$ ou $O_{50}/D_{85} \leq 0,5$	Depende do tipo de solo e Cu. Fluxo dinâmico, pulsante e cíclico pode provocar migração do solo.
CFGG (1986)-French Committee on Geotextiles and Geomembranes	$O_f/D_{85} \leq 0,38-1,25$	Depende do tipo de solo, compactação, hidráulica e condição de aplicação.
Fischer, Christopher & Holtz (1990)	$O_{50}/D_{85} \leq 0,8$ $O_{95}/D_{15} \leq 1,8-7,0$ $O_{50}/D_{50} \leq 0,8-2,0$	Baseado na distribuição de poros do geotêxtil, depende do Cu do solo.
Luetlich <i>et al.</i> (1992)	Gráficos	Baseado nos vazios do geotêxtil, tipo e tamanho dos grãos de solo, condições hidráulicas e outros fatores.
Canadian Geotechnical Society (1992)	$O_f/D_{85} < 1,5$ $O_f/D_{85} < 3,0$	Solos uniformes. Solos amplamente graduados.
Ontario Ministry of Transportation (1992)	$O_f/D_{85} < 1.0$ e $O_f > 0.5 D_{85}$ ou 40 μm	Preferencialmente geotêxteis não tecidos, $t_{GT} > 1$ mm, evitar os geotêxteis termoligados.
UK DTp – Murray and McGown (1992), <i>apud</i> Corbet (1993)	$O_{90}/D_{90} = 1$ a 3 $O_{90}/D_{90} < 1$ a 3 $O_{90}/D_{50} < 1,8$ a 6	Solos com $1 \leq C_u \leq 5$, tecidos e não tecidos. Solos com $5 < C_u < 10$, tecidos e não tecidos finos ($t_{GT} \leq 2$ mm) – critério alternativo Solos com $5 < C_u < 10$, não tecidos espessos ($t_{GT} > 2$ mm) – critério alternataivo.
Fannin <i>et al.</i> (1994)	$O_f/D_{85} < 1,5$ e $O_f/D_{50} < 1,8$ $O_f/D_{85} < 0,2$, $O_f/D_{50} < 2,0$, $O_f/D_{50} < 2,5$ e $O_f/D_{15} < 4,0$	Geotêxteis não tecido, $1 < C_u < 2$ Geotêxteis não tecido, $3 < C_u < 7$
Bhatia & Huang (1995)	$O_{95}/D_{85} < 0,65-0,05Cc$ $O_{95}/D_{85} < 2,71-0,36Cc$ $O_{95} < D_{85}$	$n < 60\%$ e $Cc > 7$ $n < 60\%$ e $Cc < 7$ $n < 60\%$
Lafleur (1999)	$O_f/D_1 < 1$ $1 < O_f/D_1 < 5$	Solos estáveis ($C_u \leq 6$ e $D_1 = D_{85}$ neste caso), solos com $C_u > 6$ mas linearmente graduados ($D_1 = D_{50}$ neste caso), mal graduado ($C_u > 6$) solos internamente instáveis ($D_1 = D_G$) e solos com $C_u > 6$ com curva granulométrica côncava para cima e internamente instáveis ($D_1 = D_{30}$) Solos instáveis com: $D_1 = D_{30}$ para solo mal graduado, internamente instáveis com curva granulométrica côncava para cima (risco de migração de finos) Critérios desenvolvidos para solos sem coesão.

Quando a retenção de partículas no filtro for alta, pode causar a sua *colmatação (clogging)*, impedindo a passagem do líquido, com redução de vazão. De acordo com

Williams & Abouzakhm (1989), as partículas podem ser atraídas eletrostaticamente para as fibras do geotêxtil, reduzindo os canais de fluxo, influenciando, ainda mais, na capacidade drenante do filtro. Cabe lembrar também a existência dos mecanismos de colmatção química e biológica que não serão abordadas nessa dissertação. As partículas transportadas pelo fluxo podem também se localizar imediatamente acima do filtro, causando o fenômeno denominado de *cegamento* (*blinding*). Segundo Palmeira & Fannin (2002), o cegamento pode ocorrer quando o geotêxtil está em contato com solos internamente instáveis, submetidos a migração de finos (sufusão). Poderá ocorrer também o *bloqueamento* (*blocking*) do filtro por partículas que obstruam de forma significativa as aberturas do geotêxtil (mais factível nos do tipo tecido). A Figura 2.10 mostra os mecanismos de colmatção física de um geotêxtil não tecido.

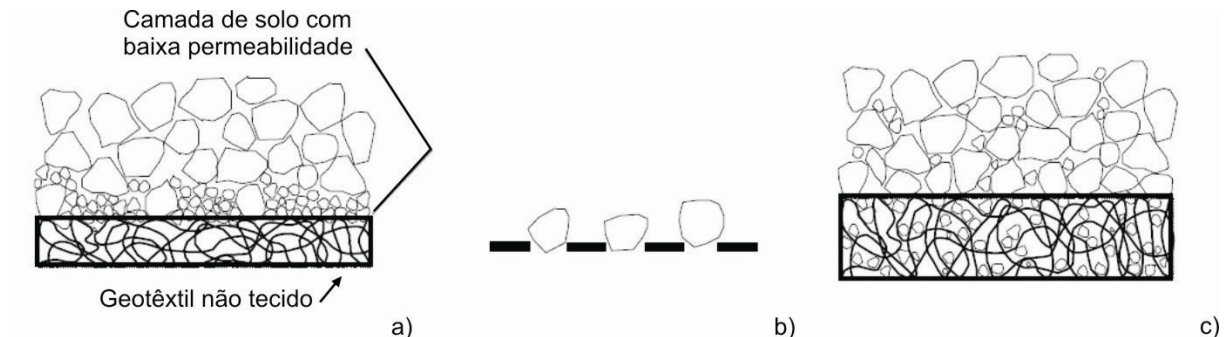


Figura 2.10 - Mecanismos de colmatção: a) cegamento, b) bloqueamento e c) colmatção (modificado de Palmeira & Fannin, 2002).

Autores como Giroud (2005) afirmam que a retenção de partículas não consiste em apenas impedir a passagem de todas as partículas, mas sim garantir que o solo presente atrás do filtro permaneça estável, ou seja, as partículas poderão passar ou ficarem retidas no interior do filtro, desde que a migração não afete a estrutura e a estabilidade do solo. Ainda segundo este autor, para que um solo não-coesivo apresente uma estrutura interna estável, não basta seguir critérios simples que comparam tamanho dos grãos do solo à abertura de filtração do geotêxtil. Segundo Giroud, esta é uma condição necessária, mas não suficiente para assegurar a estabilidade interna do solo. As partículas de uma determinada dimensão devem também ficar oclusas em uma matriz formada por partículas de maiores dimensões, ou seja, deve-se levar em conta também o valor do coeficiente de uniformidade do solo. John (1987) afirma que as partículas de solo em contato com o geotêxtil devem formar arcos nas condições ideais de filtração, como mostra a Figura 2.11.

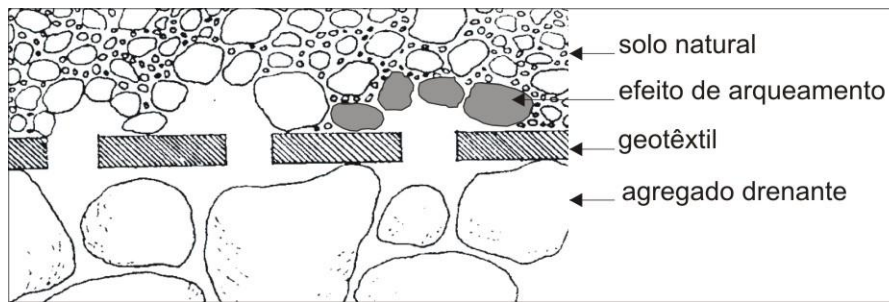


Figura 2.11 - Formação de arcos de partículas (modificado de John, 1987).

A força de percolação pode provocar a instabilidade da estrutura do solo de base, dependendo da sua distribuição granulométrica, originando o fenômeno de *sufusão*. De acordo com Giroud (1996), o *piping* é o carreamento de partículas a partir do contato do solo com o geotêxtil sob ação da percolação de um líquido, enquanto *sufusão* é a migração de partículas menores de um solo internamente instável (curva granulométrica com concavidade para cima ou com patamares) através dos vazios entre partículas maiores do próprio solo (Figura 2.12).

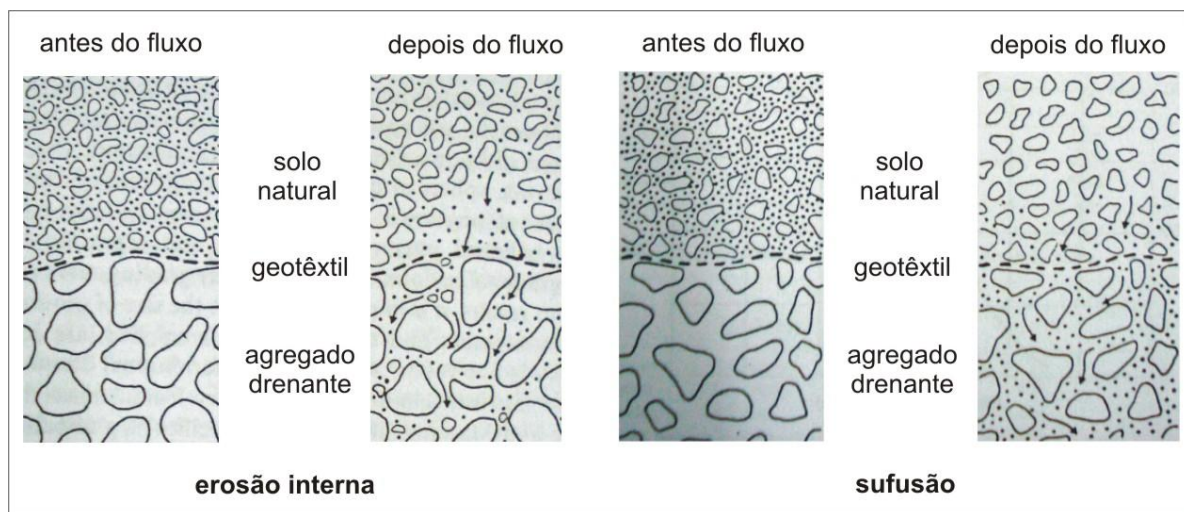


Figura 2.12 - Esquema de erosão interna e sufusão no solo (modificado de John, 1987).

Os filtros devem ter permeabilidade suficiente para permitir a passagem livre do fluido. De acordo com Giroud (1996), este critério deve seguir os seguintes preceitos: (i) a pressão da água nos poros do solo não deve ser maior com a presença do filtro do que seria sem ele; e (ii) a vazão do fluxo não deve ser reduzida com a presença do filtro.

Alguns critérios de permeabilidade para filtros geotêxteis são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Critérios de permeabilidade dos geotêxteis (modificado de Christopher & Fischer, 1992).

Fonte	Critério	Observações
Calhoun (1972); Schober & Teindl (1979) ¹ ; Wates (1980) ² ; Carroll (1983) ³ ; Haliburton <i>et al.</i> (1982); Christopher & Holtz (1985) e outros inúmeros autores.	$k_f \geq k_s$	Fluxo estacionário, aplicações não críticas e condições de solo não severas.
Carroll (1983); Christopher & Holtz (1985) ⁴ .	$k_f \geq 10 k_s$	Aplicações críticas e condições hidráulicas e de solo severas.
Giroud (1982)	$k_f \geq 0,1 k_s$	Sem fator de segurança.
French Committee of Geotextiles and Geomembranes (1986)	Baseado na permissividade (Ψ), com $\Psi \geq 10^{3-5} k_s$	Condição crítica $10^5 k_s$; Menos crítica $10^4 k_s$; Areia limpa $10^3 k_s$.
Koerner (1990)	$\Psi_{\text{permitida}} \geq \text{FS} \cdot \Psi_{\text{requerida}}$	Fator de segurança baseado em aplicações e condições de solo.
Corbet (1993)	$k_f \geq 10 k_s$ $k_f \geq 100 k_s$	Tecidos e não tecidos finos ($t_{GT} \leq 2 \text{ mm}$); Não tecidos espessos ($t_{GT} > 2 \text{ mm}$).
Lafleur (1999)	$k_f > 20 k_s$	Solos não coesivos.

Notas: k_f = permeabilidade do filtro, k_s = permeabilidade do solo.

De acordo com Christopher & Fischer (1992), algumas desses critérios são baseados no argumento de que os geotêxteis precisam ser mais permeáveis que o solo a ser retido. Este pressuposto é simples e racional, e espera-se que o fluxo não seja prejudicado pela interface solo/geotêxtil se a permeabilidade do geotêxtil for, pelo menos, igual à do solo.

Os filtros são submetidos a tensões na obra. Apesar dos geotêxteis serem muito utilizados em obras de engenharia, o conhecimento do comportamento dos geossintéticos sob efeito da tensão vertical ainda é limitado. Além disso, a influência das características do material drenante subjacente ao geotêxtil no seu comportamento filtrante não são levadas em consideração nos projetos.

2.5 INFLUÊNCIA DO MATERIAL EM CONTATO COM O GEOTÊXTIL NO SEU COMPORTAMENTO DRENO-FILTRANTE

Os geotêxteis comumente envolvem materiais granulares graúdos em trincheiras drenantes. Alguns exemplos disso são mostrados na Figura 2.13.

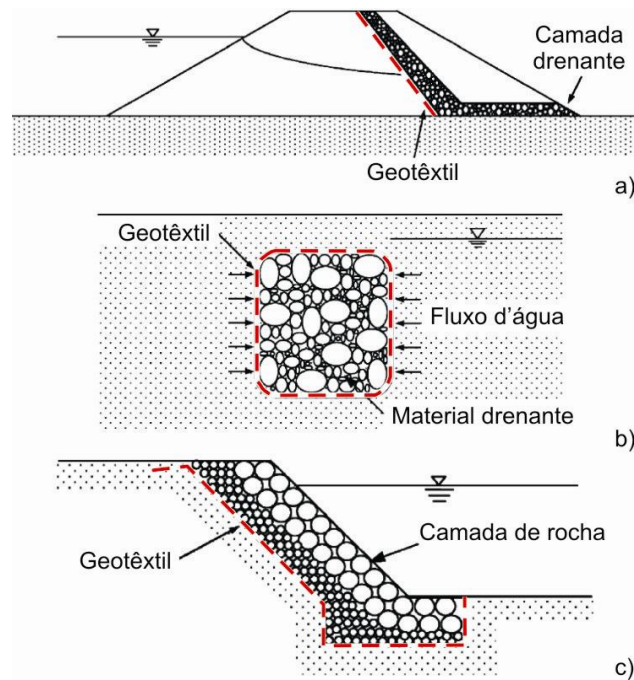


Figura 2.13 – Aplicações de geotêxteis em sistemas drenos-filtrantes: a) barragem de terra, b) trincheiras drenantes, c) proteção contra erosão nos canais de drenagem (modificado de Wu *et al.*, 2002).

São raros os estudos encontrados na literatura que abordam à influência do material em contato com o geotêxtil no seu comportamento filtrante.

O trabalho que mais se aproxima ao proposto por esta pesquisa é o de Wu *et al.* (2002) e Wu *et al.* (2006), que estudaram o comportamento filtrante dos geotêxteis não tecidos em contato com materiais drenantes, sem o efeito da tensão vertical. Foram utilizados dois tipos de solo (3 e 13 % de finos) e três tipos de geotêxteis não tecidos agulhados (dois de poliéster e um de polipropileno), com gramaturas de 250 g/m², 450 g/m² e 320 g/m², respectivamente. Foi empregado o equipamento de filtração tipo Razão entre Gradientes (GR) sem aplicação de tensão vertical. Os materiais posicionados abaixo do geotêxtil consistiam em camadas de esferas de aço de tamanhos uniformes e uma placa de aço perfurada, simulando, respectivamente, o contato entre o geotêxtil/tela metálica (agregado) e entre o geotêxtil/blocos de concreto, como mostra a Figura 2.14.

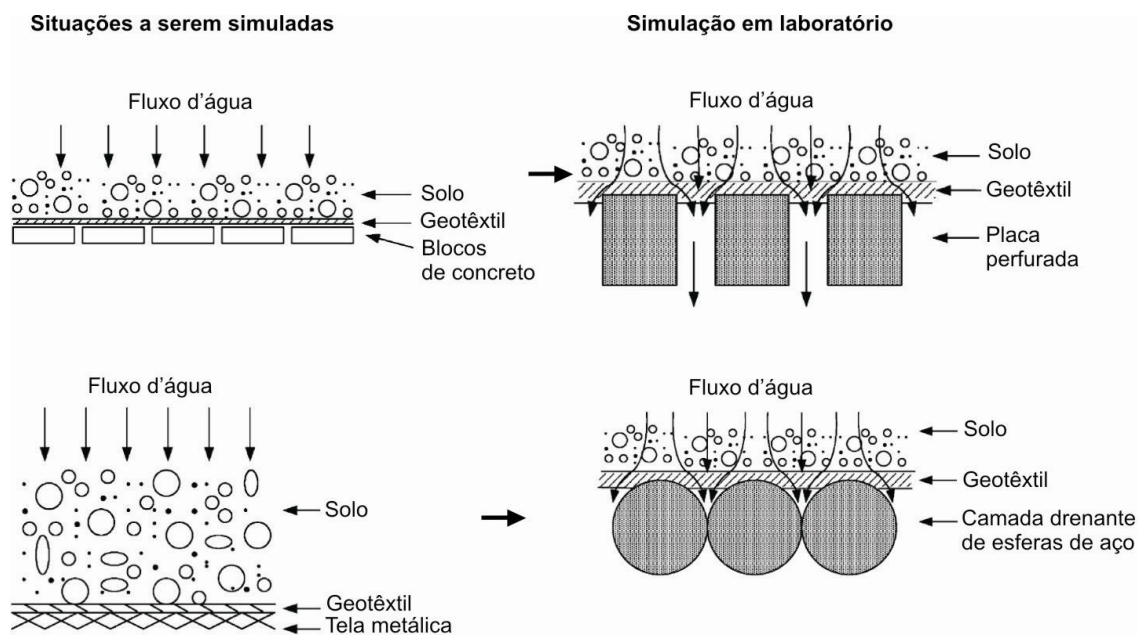


Figura 2.14 – Seção transversal do sistema de drenagem solo- geotêxtil. a) simulação do contato geotêxtil/blocos de concreto por meio de placa perfurada, b) simulação do contato geotêxtil/ tela metálica (agregado) por meio da camada de esferas de aço (modificado de Wu *et al.*, 2006).

Para este estudo, os diâmetros das esferas de aço foram de 7; 11; 14,2; 15,85; 19; 25,4 e 31,8 mm, resultando em razões de área aberta no geotêxtil $\left(\frac{\text{área aberta}}{\text{área total}}\right)$ iguais a 30, 50, 68, 68, 64, 82 e 68 %, respectivamente, sendo a área aberta no geotêxtil definida como a área que não está em contato direto com os grãos de solo e, por isso, passível de ser atravessada pelo líquido. Os diâmetros dos 61 furos da placa perfurada foram de 4, 7, 9 e 11 mm, equivalendo-se a razões de área aberta de 11, 32, 54 e 80 %.

Como esperado, os autores concluíram que quanto menor a razão de área aberta, menor é a vazão através do geotêxtil. O potencial de colmatção aumentou com a redução da porcentagem de área aberta e a área aberta no geotêxtil se mostrou uma importante referência na avaliação do potencial de colmatção e na taxa de escoamento. Entretanto, estes autores se preocuparam somente com os valores de GR e como eles eram influenciados pelo material subjacente ao geotêxtil.

A presente dissertação visa realizar estudo semelhante ao conduzido por Wu *et al.* (2006), entretanto com ênfase na capacidade de retenção e características de filtração de geotêxteis sobrejacentes a diferentes materiais granulares e sob a ação de diferentes níveis de tensões verticais.

3 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Neste capítulo é descrito o equipamento utilizado nos dois tipos de ensaios realizados nesta pesquisa:

- Ensaio especial para a obtenção do *afundamento* do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente e da *área de contato* entre eles (AAC) e
- Ensaio para verificação da *granulometria do material passante* através do geotêxtil (GMP).

Também são descritos o equipamento utilizado para a obtenção da granulometria das microesferas de vidros e o equipamento utilizado para visualizar as microesferas de vidros coletadas em locais previamente definidos. Além disso, são descritos os materiais utilizados nestes ensaios: geotêxteis não tecidos, materiais granulares (microesferas de vidro, esferas de aço inoxidável e agregado graúdo), e outros materiais secundários.

3.1 EQUIPAMENTO DO ENSAIO DE FILTRAÇÃO TIPO RAZÃO ENTRE GRADIENTES (GR)

O equipamento utilizado nos ensaios AAC e GMP foi o mesmo equipamento do ensaio de filtração tipo Razão entre Gradientes (GR) e foi projetado e construído na Universidade de Brasília (UnB). Permite a aplicação de elevados carregamentos e fez parte da tese de doutorado de Gardoni (2000), que estudou o comportamento dos geossintéticos em filtração e drenagem sob tensão normal, dando ênfase à investigação da influência de tensões normais nas características físicas, hidráulicas e de filtro dos geotêxteis não tecidos virgens e impregnados. Bessa da Luz (2004) testou sistemas compostos pelas combinações de geotêxteis não tecidos e quatro materiais granulares, analisando os seus comportamentos filtrantes e avaliando suas propriedades físicas e hidráulicas antes e após ensaios GR, sob diferentes níveis de tensão. Beirigo (2005) estudou o comportamento filtro-drenante de geotêxteis em barragens de rejeito de mineração em campo e em laboratório. Ferreira (2009) investigou a drenagem e redução de umidade do minério de ferro da mina de Carajás com a

utilização de geossintéticos, realizando ensaios GR e ensaios especiais no mesmo equipamento, onde diferentes valores de sucção foram aplicados. A Figura 3.1 mostra um esquema do equipamento utilizado, sendo formado por quatro partes principais: permeâmetro, quadro de piezômetros, sistema de abastecimento de água destilada e o sistema hidráulico de aplicação de tensão normal (Figura 3.2).

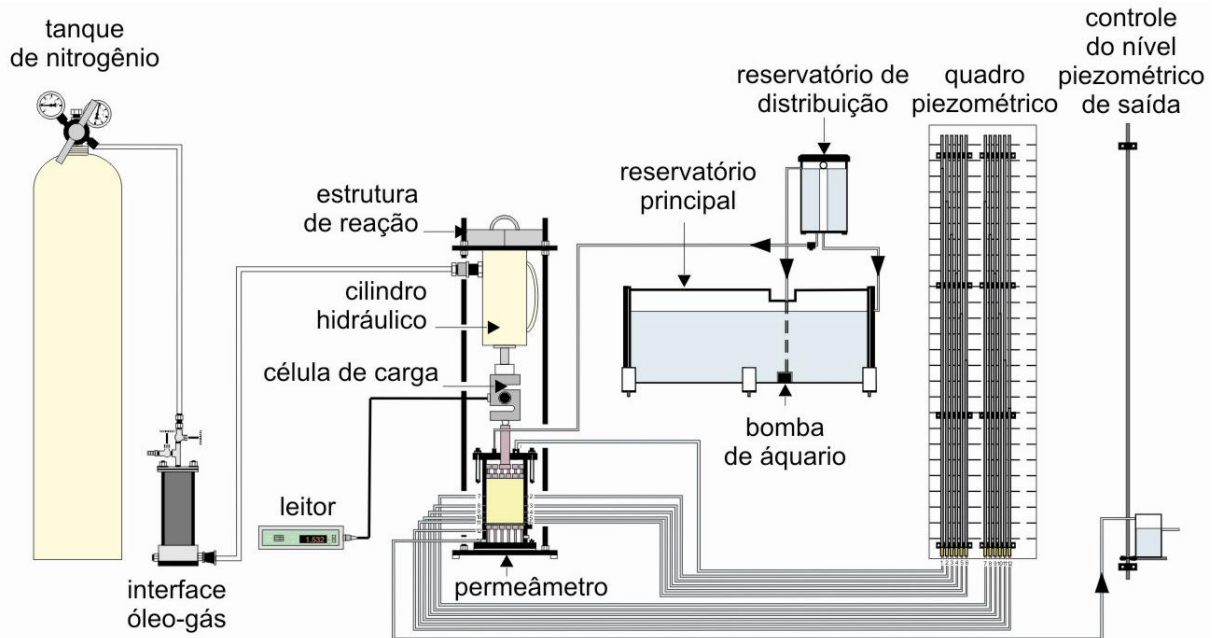


Figura 3.1 - Esquema geral do equipamento.

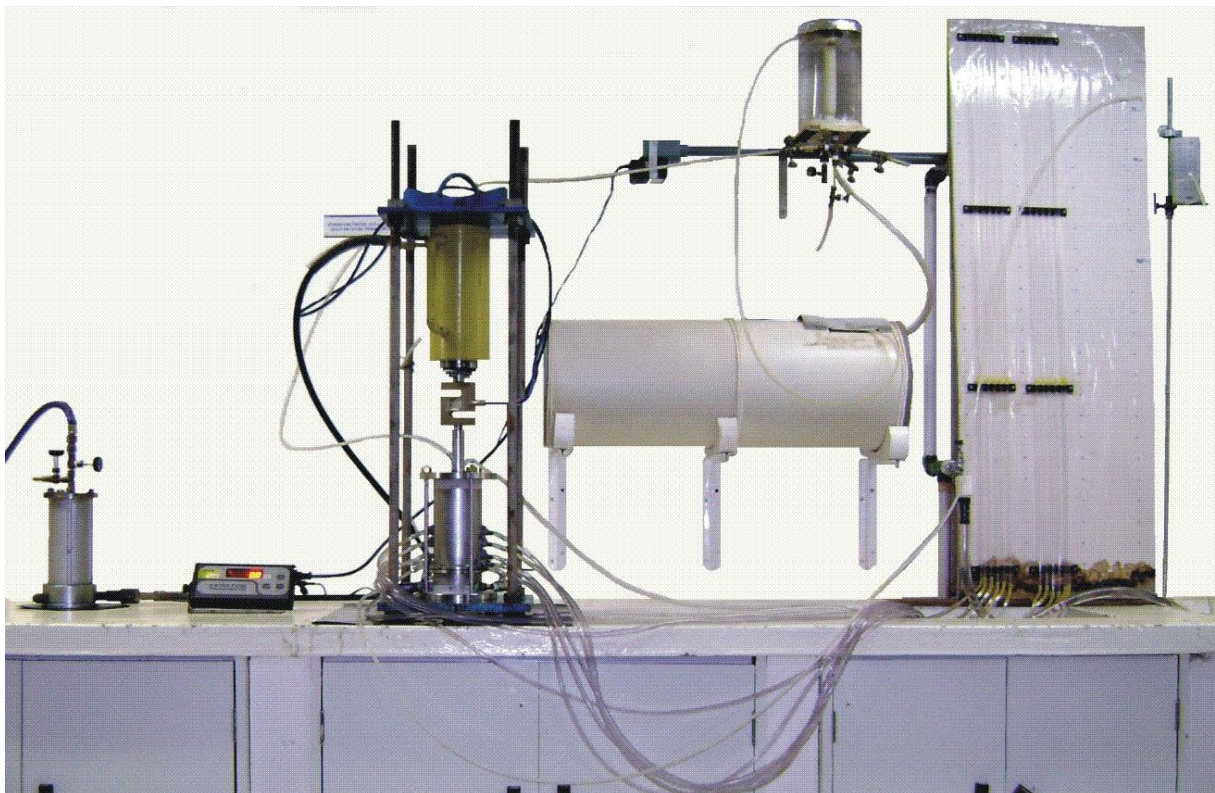


Figura 3.2 - Equipamento de ensaio.

O permeâmetro de aço inoxidável é formado por duas placas perfuradas, uma na parte superior que transmite a carga para o sistema geotêxtil-material, ao mesmo tempo em que permite o fluxo de água para dentro do permeâmetro, e por uma placa inferior que sustenta o geotêxtil e permite a passagem das partículas de solo que venham a ser transportadas pelo fluxo de água destilada.

Estas partículas são armazenadas no fundo do permeâmetro por meio de um compartimento em forma de cunha que facilita a descida do material carregado até a saída lateral, com o auxílio de injeção de água lateralmente. O permeâmetro possui doze piezômetros, cinco em cada lateral do equipamento, um na parte superior e um na parte inferior. Estes piezômetros permitem a obtenção das cargas hidráulicas e, a partir dessas, o coeficiente de permeabilidade a diferentes alturas da amostra de solo, como mostra a Figura 3.3.

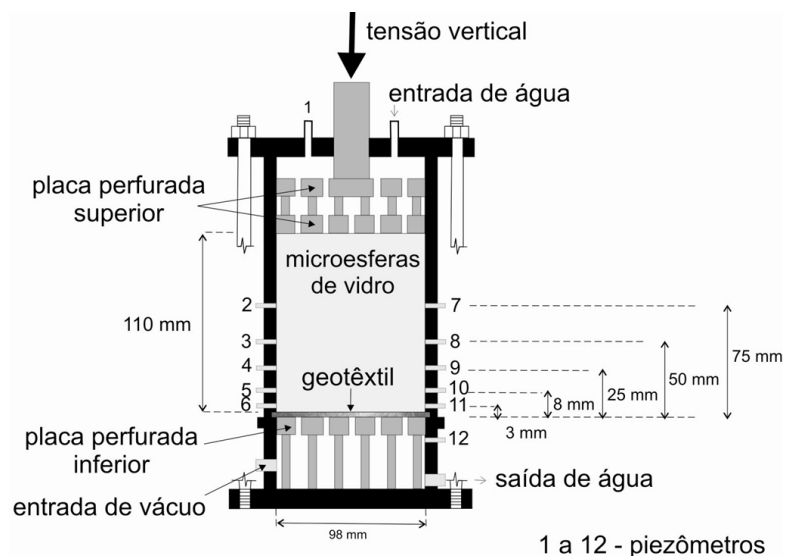


Figura 3.3 - Esquema do permeâmetro (modificado de Bessa da Luz, 2004).

A Figura 3.4 apresenta o sistema de vedação do permeâmetro composto por três anéis de borracha para vedação (*o' rings*) localizados na parte inferior, intermediária e superior do equipamento.

A principal inovação que o equipamento atual apresenta com relação ao anterior está localizada na parte inferior do permeâmetro, consistindo na mudança da distância (h) entre a placa perfurada e o geotêxtil, com valores de 10, 15 e 18 mm, como mostra a Figura 3.5a. Foram confeccionados 16 novos pinos de aço para a sustentação desta placa, 8 pinos com

comprimento (H) 26 mm e 8 pinos com H = 18 mm, sendo possível a introdução de esferas de aço de 10 e 18 mm de altura e agregado graúdo sobre a placa e sob o geotêxtil, como mostra a Figura 3.5b.

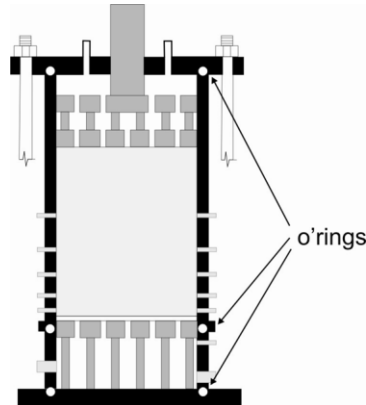


Figura 3.4 – Localização dos anéis de borracha para vedação no permeâmetro.

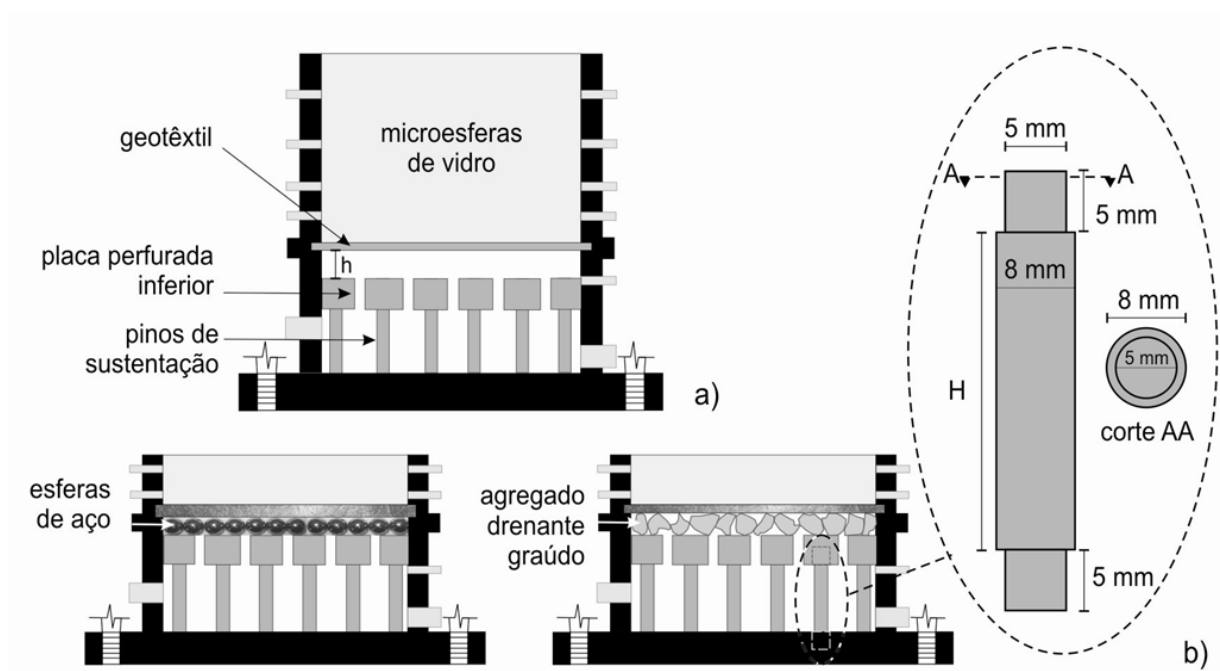


Figura 3.5 – Principal inovação no equipamento.

No equipamento antigo não era possível a mudança de altura da placa que permanecia em contato direto com o geotêxtil (Figura 3.3). De acordo com Wu *et al.* (2002) e Wu *et al.* (2006) o material drenante subjacente ao geotêxtil influencia nas propriedades de colmatação e no escoamento. Desta forma, houve a possibilidade de introduzir um material

drenante entre a placa inferior perfurada e o geotêxtil, contribuindo assim, com o estudo da interferência ou não deste material nas condições de filtração do geotêxtil.

O quadro piezométrico é composto por doze piezômetros formados por tubos de acrílico de 4,4 mm de diâmetro interno, que são interligados por tubos de *nylon* com diâmetro interno de 6,4 mm por meio de luvas de borracha de 50 mm de comprimento. Esses tubos são conectados em cada saída do permeâmetro. O quadro de piezômetros está localizado no mesmo nível da base do permeâmetro.

O sistema de abastecimento de água destilada é formado por um reservatório principal em forma cilíndrica, com capacidade de armazenamento de 50 l e um reservatório de distribuição de água para o permeâmetro, com capacidade de 2 l. O reservatório principal possui uma moto bomba (bomba de aquário), modelo SB 1000, da *Sarlo Better*, em seu interior que tem a função de abastecer o reservatório de distribuição com uma vazão de 67 l/h aproximadamente. Este reservatório, por sua vez, mantém o nível de água constante a 205 mm de altura em relação à base do permeâmetro, por meio de um extravasor que reabastece o reservatório principal com o excesso de d'água acima deste nível.

O sistema hidráulico de aplicação de tensão normal é composto por um tanque de nitrogênio sob alta pressão, da fabricante White Martins Gases Industriais S.A. Este gás é caracterizado por não ser inflamável nem poluente. O cilindro de gás é conectado a uma interface óleo-gás que transmite a tensão para o cilindro hidráulico de 500 kN, modelo RCY-506, da marca *Yellow Power*, fixo à estrutura de reação acima do permeâmetro. O pistão do cilindro está conectado a uma célula de carga da marca Kratos Equipamentos Industriais Ltda., com capacidade máxima de 20 kN e que transfere a carga para o pistão do permeâmetro.

Nos ensaios de verificação da *granulometria do material passante* através do geotêxtil (GMP) foram utilizadas a própria ação do fluxo d'água e a ação de impactos controlados no permeâmetro. Para obter-se o impacto na parede externa do permeâmetro, houve a necessidade de desenvolver um dispositivo especial, formado por uma haste metálica que atravessava a extremidade do cabo de um martelo de borracha, possibilitando o seu giro e que era fixo na própria estrutura de reação do equipamento, como mostra a Figura 3.6. O martelo de borracha possui uma massa de 0,5423 kg e um braço de alavanca de 310 mm.

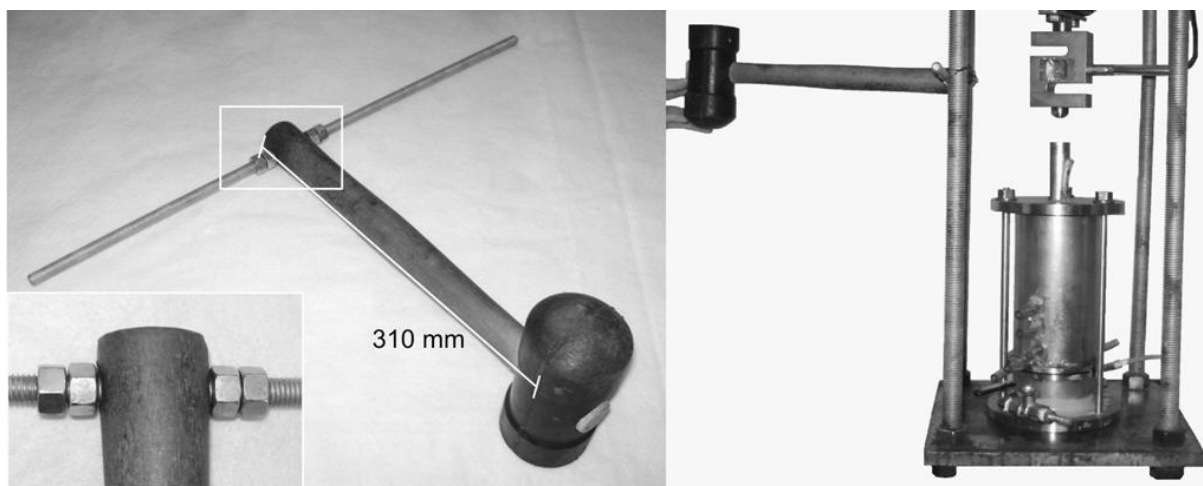


Figura 3.6 – Dispositivo de impacto no ensaio de verificação da granulometria do material passante através da abertura de filtração do geotêxtil.

A utilização do mecanismo de impacto impõe condições mais severas para a capacidade de retenção do geotêxtil do que àquelas esperadas devido à ação de forças de percolação, no caso de fluxo d'água através do sistema. Assim sendo, os resultados de diâmetro de partículas passantes obtidos naquelas condições são mais conservadores.

3.2 GRANULÔMETRO A LASER

O granulômetro a laser, modelo *Mastersizer S. Standard Bench*, utilizado nesta pesquisa está disponível no Laboratório de Geotecnia da UnB e foi produzido pela *Malvern Instruments LTD*, com sede em *Worcestershire*, na Inglaterra.

O granulômetro é composto por três peças fundamentais: unidade ótica, unidade de preparação de amostra e unidade computacional. A unidade ótica é usada para coletar os dados obtidos pelo espalhamento do feixe de laser que passa pela amostra durante o processo de medida do tamanho das partículas. A unidade de preparação é composta por um tanque com capacidade máxima de 1000 cm³ e possui uma saída interna onde o excesso de água é eliminado. Nesta unidade há também um painel de controles onde se regulam o movimento da hélice, o ensaio com ou sem ultrassom e a percolação de água para a unidade ótica. A unidade computacional é formada por um computador que opera o *Malvern Software*, comandando as operações do sistema de medições (Figura 3.7). Maiores detalhes sobre esse equipamento podem ser encontrados em Manso (1999).



Figura 3.7 - Granulômetro a laser.

Foi escolhido o granulômetro a laser, ao invés da metodologia convencional (ensaio de peneiramento ou sedimentação), para a obtenção de curvas granulométricas relevantes, pelas seguintes razões:

- Permite a utilização de pequenas quantidades de solo. Manso (1999) utilizou apenas 0,5 g do solo poroso do Distrito Federal em suas pesquisas;
- É de rápida execução (o ensaio pode ser repetido até vinte vezes em apenas trinta segundos);
- Permite ensaiar amostras secas ou em solução;
- Confiabilidade nos resultados.

3.3 MICROSCÓPIOS DE ALTA RESOLUÇÃO

Foram utilizados dois microscópios de alta resolução para observar os filamentos do geotêxtil e as microesferas coletadas em locais previamente definidos. Estes equipamentos foram fabricados pela empresa *Avantgarde* e possuem distintas capacidades de ampliação. Ambos os equipamentos possuem um dispositivo manual de foco, um sensor de imagem de 1,3 mega pixels e um cabo USB que se conecta ao computador. O primeiro microscópio é da marca *Avantscope Maxx* e possibilita uma ampliação de até 200 vezes (Figura 3.8a), enquanto o segundo é da marca *ProScope HR* e possui uma ampliação máxima de até 400 vezes (Figura 3.8b).

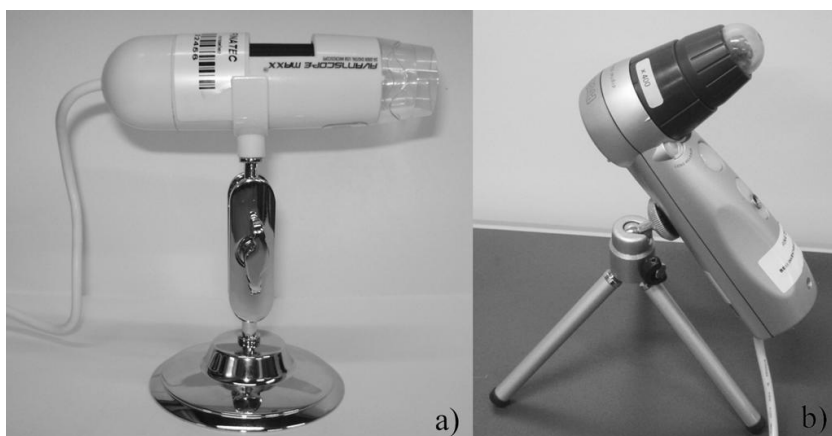


Figura 3.8 – Microscópios de alta resolução: a) microscópio com ampliação de até 200 vezes, b) microscópio com ampliação de até 400 vezes.

3.4 MATERIAIS UTILIZADOS

3.4.1 GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis utilizados nos ensaios de filtração consistiram em amostras virgens do tipo não tecido, agulhados, com a disposição aleatória dos filamentos contínuos 100% poliéster (PET) da marca Bidim Mexichem. A Figura 3.9 apresenta o detalhamento da agulha utilizada no processo de consolidação da manta de geotêxtil por meio da técnica de agulhagem (*needlepunched*) e o detalhe da aleatoriedade dos filamentos. Três tipos de geotêxteis foram utilizados (OP-20, OP-40 e OP-60), com gramaturas de 200, 400 e 600 g/m², denominados, respectivamente, G1, G2 e G3. A Tabela 3.1 apresenta as principais propriedades dos geotêxteis ensaiados obtidas em catálogos do fabricante.

Há alguns anos atrás, o fabricante modificou o nome comercial dos geotêxtil, antes denominados de OP-X, onde X baseava-se na gramatura do geotêxtil, para RT-Y, onde Y refere-se ao valor de ruptura na direção longitudinal à fabricação no ensaio de resistência à tração faixa larga. No entanto, optou-se em utilizar a nomenclatura antiga por três motivos: evitar alguma correlação equivocada entre a nova e a antiga nomenclatura, facilitar a comparação dos resultados desta pesquisa com os resultados de pesquisas já realizadas utilizando versões anteriores do geotêxtil (disponíveis no laboratório) e facilitar a associação dos resultados obtidos com a gramatura dos geotêxteis utilizados, quando apropriado, já que esta característica do geotêxtil não está presente nos atuais catálogos do fabricante.

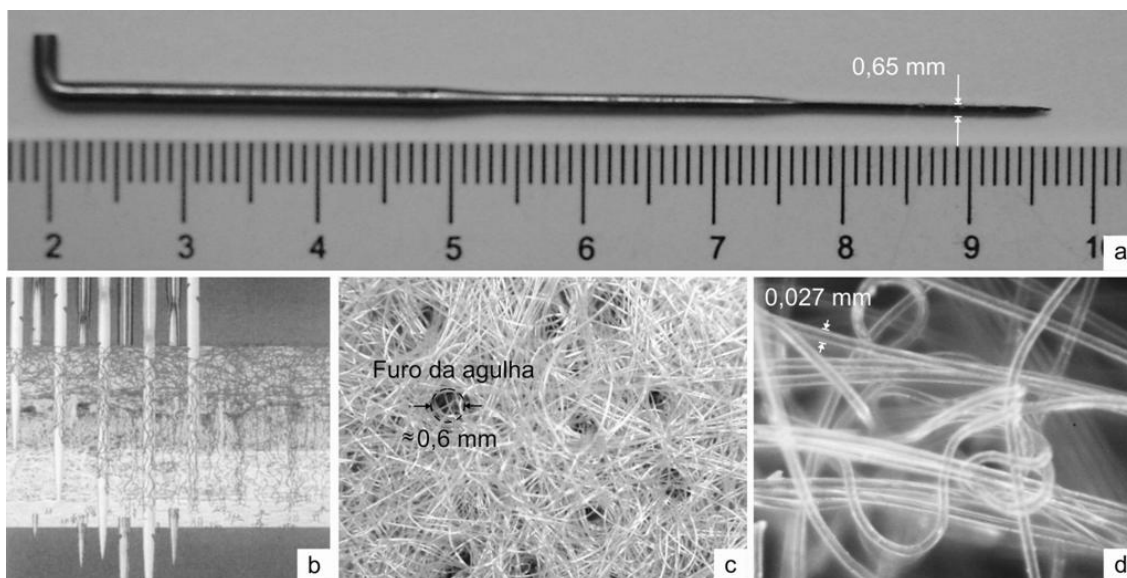


Figura 3.9 – Detalhe do geotêxtil: a) agulha utilizada no processo de consolidação, b) processo de consolidação (Hsuan & Koerner, 2002), c) furo da agulha, d) aleatoriedade da disposição dos filamentos contínuos do geotêxtil não tecido G1, obtidos com o microscópio de alta resolução.

Tabela 3.1 – Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos ensaiados (dados do fabricante)

Nomenclatura	Geotêxtil	M_A (g/m ²)	t_{GT} (mm)	FOS (mm)	K_n (cm/s)	Ψ (s ⁻¹)	n (%)	$J_{sec\ 2\%}$ (kN/m)	ϵ (%)
G1	OP-20	200	2,9	0,130	$2,2 \cdot 10^{-1}$	0,76	93	35*	70-80
G2	OP-40	400	3,8	0,090	$2,2 \cdot 10^{-1}$	0,57	92	51*	70-80
G3	OP-60	600	5,9	0,059	$2,2 \cdot 10^{-1}$	0,37	91	69*	70-80

Notas: M_A = gramatura (densidade superficial), t_{GT} = espessura nominal, FOS = abertura de filtração (método de ensaio peneiramento hidrodinâmico), ϵ = alongamento (método Grab-Test), K_n = permeabilidade normal ao plano, Ψ = permissividade, n = porosidade, * = Valores determinados por meio de ensaios de tração em faixa larga. Mendes (2006 *apud* NASCIMENTO, 2006).

3.4.2 MATERIAIS GRANULARES

3.4.2.1 MICROESFERAS DE VIDRO

No programa de ensaios foram utilizadas microesferas de vidros com diâmetros variando entre 150 – 75 μm para simular o solo subjacente ao geotêxtil, como mostra a Figura 3.10. Segundo Palmeira *et al.* (1996) as microesferas de vidro são utilizadas neste caso, pois nos critérios de filtro, as partículas de solo são assumidas como esféricas. As principais

características granulométricas obtidas por meio da curva granulométrica (Figura 3.11) são apresentadas na Tabela 3.2.

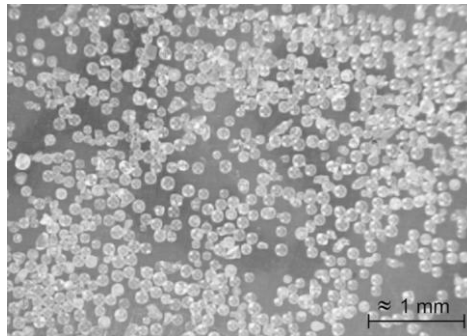


Figura 3.10 – Detalhe das microesferas de vidro obtido com o microscópio de alta resolução.

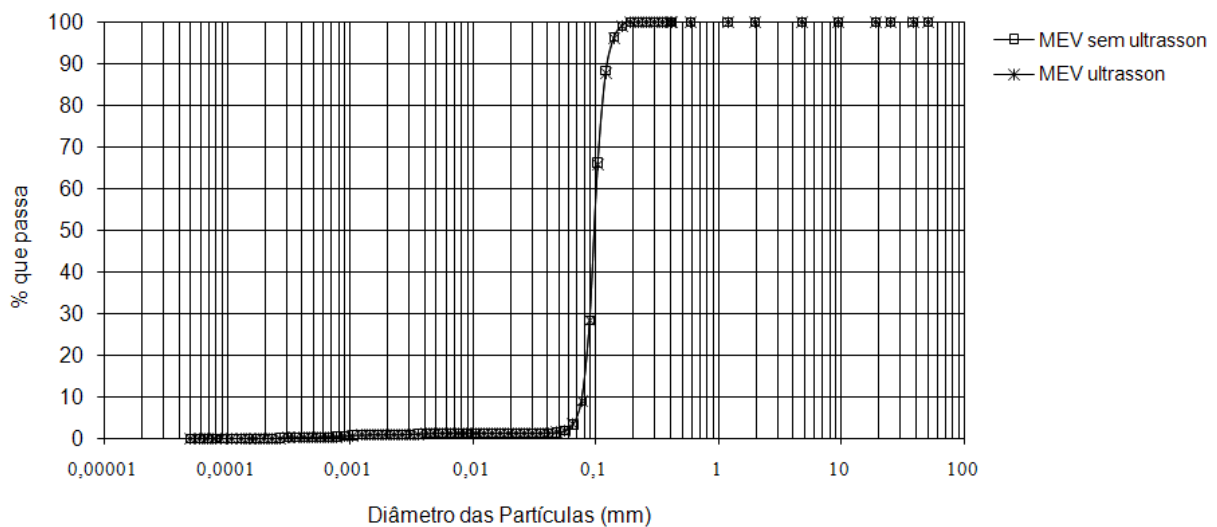


Figura 3.11 – Curva granulométrica das microesferas de vidro com e sem ultrasson.

Nota: A curva granulométrica foi obtida por meio do equipamento granulômetro a laser, com e sem utilização de ultrasson como forma de desagregação de possíveis grumos de partículas.

A Tabela 3.3 apresenta algumas propriedades físicas e químicas das microesferas de vidro fornecidas pela empresa Potters Industrial Ltda.

Tabela 3.2 - Características granulométricas das microesferas de vidro.

D₁₀(mm)	D₃₀ (mm)	D₅₀ (mm)	D₆₀ (mm)	D₉₅ (mm)	Cu	Cc
0,075	0,090	0,096	0,100	0,137	1,33	1,08

Notas: $D_n = n\%$ das partículas do solo possuem diâmetro D inferiores a ele, D_{50} = diâmetro médios dos grãos, $Cu = \frac{D_{60}}{D_{30}}$ = coeficiente de uniformidade, $Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$ coeficiente de curvatura.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas e químicas das microesferas de vidro.

Propriedades físicas	Tipo	AF
	Peneira ASTM	100 – 200
	Faixa de diâmetros (μm)	150 – 75
	Fração ABNT	argila
	Esfericidade mínima (%)	80
	G_s	2,5
	Resistência a compressão (MPa)	97-248
Propriedades químicas	Composição	Vidro tipo soda-cal*
	Sílica livre (SiO_2)	Nenhuma

Notas: G_s = massa específica dos grãos, * = vidro comum composto por: SiO_2 (72,5 %), Na_2O (13,7 %), CaO (9,8%), MgO (3,3%), Al_2O_3 (0,4), $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$ (0,2) e K_2O (0,1 %).

3.4.2.2 ESFERAS DE AÇO

Para simular o material drenante subjacente ao geotêxtil foram utilizadas esferas de aço inoxidável com diâmetros de 10 e 18 mm, como mostra a Figura 3.12.

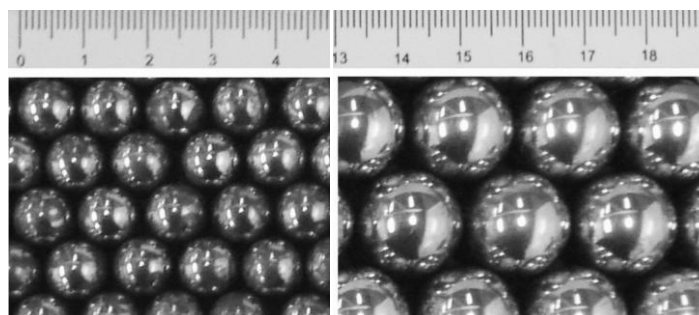


Figura 3.12 – Esferas de aço inoxidável.

3.4.2.3 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado foi o proveniente da região central do estado do Rio Grande Sul, no distrito de Itaara, a 9 km da cidade de Santa Maria, fornecidos pela pedreira Brita Pinhal. A parte do relevo onde foram extraídos estes materiais é chamado de Planalto Meridional (rebordo da Serra Geral), onde há o predomínio de rochas de origem ígnea vulcânica. Foram utilizadas duas granulometrias distintas 19 e 9,5 mm, classificadas, respectivamente, como brita 1 e pedrisco.

O principal motivo para a utilização desse material ao invés do material tradicionalmente utilizado no DF, de origem calcária e cujo processo de britagem provoca excessivo fissuramento dos grãos, foi a sua maior resistência a compressão uniaxial (σ_c). Segundo Junqueira (1994) as rochas calcárias da região do Distrito Federal apresentam uma $\sigma_{c\ med} = 86$ MPa, enquanto que a rocha da pedreira Brita Pinhal apresenta uma $\sigma_{c\ med} = 167$ MPa (CIENTEC, 2008). Essa maior resistência é explicada pela presença de minerais de quartzo e sanidina, o que caracteriza uma rocha de origem ácida (dacito ou riolito). A Tabela 3.4 apresenta as principais propriedades da rocha de origem da brita 1 e do pedrisco.

Tabela 3.4 – Principais propriedades da rocha de origem dos agregados graúdos (CIENTEC, 2008).

	MEA _{seca} (Kg/m ³)	Absorção de água aparente (%)	n _{aparente} (%)	Absorção de água (%)	Densidade aparente	ALA (%)	σ_c (MPa)
	2514	0,7	1,7	2,2	2,51	16	166,78
Norma	ABNT NBR 12766/1992			DNER ME 081/1998		ABNT NBR NM 51/2001	ISRM 1979

Notas: MEA_{seca} = massa específica aparente seca, n_{aparente} = porosidade aparente, ALA = abrasão Los Angeles (Graduação A), σ_c = resistência a compressão uniaxial.

Conforme a classificação da IAEG (1979), a rocha é caracterizada por possuir uma porosidade (n) baixa (1-5 %) e uma resistência alta (120-230 MPa).

3.4.3 OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS

Foi utilizado o material *Etil Vinil Acetato* (borracha EVA) para a confecção de anéis vazados que fixavam o arranjo de esferas no centro da placa inferior do permeâmetro.

A *folha de alumínio* da marca *WydaPratic* (de uso doméstico) foi empregada nos ensaios específicos para obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do solo subjacente e era colocada entre o geotêxtil e o material drenante, para que fossem registrados esse afundamento e as áreas de contato entre eles. A folha possui uma espessura de 0,01 mm e foi fornecida em rolos de 7,5 m de comprimento por 450 mm de largura.

Vaselina sólida foi utilizada para lubrificar as paredes internas da parte superior do permeâmetro, sob um *filme plástico* de revestimento para reduzir o efeito do atrito lateral entre material granular e parede interna, bem como possíveis atritos entre a placa perfurada superior do permeâmetro e a parede do equipamento.

Foi utilizada uma *cola epóxi* da marca Araldite-Brascola para fixar as esferas entre si e/ou fixar as esferas na placa perfurada inferior do permeâmetro. Esta cola era composta por uma resina epóxi e um endurecedor de poliamida, que eram misturadas e sua secagem dava-se por volta de 10 min. Inicialmente, esta cola foi utilizada também para vedar a placa e a base do permeâmetro. No entanto, houve a ocorrência de trincas nesta cola durante o fechamento do equipamento devido à deformação no *o'ring* de vedação. Desta forma, um *selante elástico* à base de poliuretano com alta deformabilidade, da marca Sika-Sikaflex, foi utilizado para vedar tal região, bem como as bordas do arranjo de esferas de aço, como mostra a Figura 3.13.

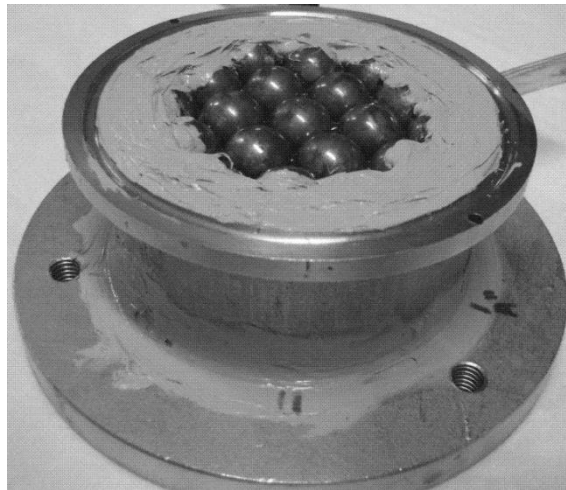


Figura 3.13 – Áreas onde foram utilizadas selante elástico.

Para a confecção dos moldes que registrassem a afundamento do geotêxtil nos vazios das esferas de aço inoxidáveis, foi também utilizado *gesso em pó* (gipsita) da marca Imar colafix que era misturado com água na relação 1:1. Esta mistura substituía as microesferas de vidro sobrejacentes ao geotêxtil no ensaio especial para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente. Foi empregada uma *esponja sintética* no mesmo ensaio realizado com gesso, com 1 cm de altura, aproximadamente e instalada na metade inferior do arranjo de esferas de aço.

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo é apresentada a metodologia desta pesquisa, que consiste em procedimentos básicos de ensaio que são: preparação da amostra de geotêxtil, do arranjo das esferas de aço inox, da amostra de microesferas de vidro e do agregado graúdo. É apresentado também o procedimento de aplicação de tensão vertical, obtenção do grau de impregnação da amostra de geotêxtil, obtenção da deformação média da amostra de geotêxtil nos vazios do material drenante. Descrevem-se também o procedimento de ensaio de granulometria do material passante através do geotêxtil (GMP), ensaio para obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da área de contato entre eles (AAC) e o procedimento para obtenção da granulometria por meio do granulômetro a laser.

4.1 PROCEDIMENTOS BÁSICOS DE ENSAIO

Os procedimentos básicos referem-se aos procedimentos que podem ser comuns ou não aos dois tipos de ensaios realizados nesta pesquisa, quais sejam:

- Ensaio especial para a obtenção do *afundamento* do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente e da *área de contato* entre eles (AAC) e
- Ensaio para verificação da *granulometria do material passante* através do geotêxtil (GMP).

4.1.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE GEOTÊXTIL

O geotêxtil não tecido utilizado nesta pesquisa é caracterizado principalmente pela disposição aleatória de seus filamentos devido ao processo de fabricação, o que influencia algumas de suas propriedades, como a espessura nominal t_{GT} (mm), gramatura M_A (g/m^2), abertura de filtração FOS (μm), entre outras. Fatores como as condições de recebimento, estocagem e a amostragem também podem influenciar na heterogeneidade das amostras do geotêxtil. A fim de reduzir a variabilidade natural da amostra e a sua influência nos resultados dos ensaios, foi realizada uma seleção aleatória de amostras conforme os seguintes procedimentos:

- a) As amostras de geotêxtil foram selecionadas somente após serem obtidas as informações relativas ao número de amostras, formato e demais características;
- b) O geotêxtil fornecido em mantas de 200 m de comprimento por 2,3 m de largura foi acomodado em uma superfície plana e limpa e permaneceu neste local por 24 h (ABNT,1992), como mostra a Figura 4.1a;
- c) Foram desprezadas as duas primeiras voltas da manta, os 10 mm externos da borda, áreas amassadas e rasgadas (ABNT,1992). Após essa seleção das áreas, foram marcados quadrados de 15 cm de lado ao longo do seu comprimento e numerados. Para cada geotêxtil foram marcados 196 quadrados.
- d) Esses números foram escritos em pequenos papéis e colocados em um recipiente para que pudessem ser misturados, sorteados 30 números para cada geotêxtil e posteriormente recortados da manta, como mostra a Figura 4.1b e c;
- e) As amostras quadradas foram pesadas para simples conferência de suas gramaturas e novamente recortadas em círculos de 102 mm de diâmetro, ignorando-se as áreas de menor gramatura nas amostras, como mostra a Figura 4.1d;



Figura 4.1 – Amostragem do geotêxtil: a) manta sobre uma superfície plana e limpa, b) recorde das amostras sorteadas, c) amostras identificadas e d) recorde da amostra em círculo.

f) As amostras circulares foram pesadas para nova conferência de suas gramaturas, adotando-se como critério de aceitação diferenças máximas de $\pm 10\%$ em relação à gramatura especificada pelo fabricante.

g) Depois de selecionadas, as amostras foram armazenadas em uma caixa de papelão para que fossem o menos manuseadas possível, evitando alterações em suas propriedades.

A amostra de geotêxtil era colocada em um recipiente com água destilada levada ao fogo por 1 h para assegurar a completa saturação da amostra e a eliminação das bolhas de ar presentes entre os filamentos do geotêxtil. Cabe destacar que a influência da temperatura no encolhimento do geotêxtil é pequena para este tipo de geotêxtil. Isto ocorre porque o poliéster é um polímero termoplástico e pode sofrer repetidos estágios de aquecimento e resfriamento sem perder as suas características básicas. Uma malha metálica foi utilizada para evitar a flutuação total da amostra nos minutos iniciais da saturação e entrar em contato com o ar atmosférico. Conforme a saturação da amostra era completada, a mesma deslocava-se para o fundo do recipiente por ter uma densidade superior ao da água ($1,32 \text{ g/m}^3$), como mostra a Figura 4.2.



Figura 4.2 – Saturação da amostra de geotêxtil.

Após o processo de saturação, a amostra era colocada na base do permeâmetro, que se encontrava dentro de um recipiente plástico totalmente preenchido com água destilada. Durante todo o processo de acondicionamento do geotêxtil, o mesmo permaneceu saturado.

Antes da saturação, um selante elástico era passado nas bordas das amostras de geotêxtil nos ensaios para verificação da granulometria do material passante, assegurando que o fluxo

ocorresse apenas nos vazios das esferas e não pelas margens de seu arranjo, com mostra a Figura 4.3. Nos ensaios onde não foram utilizadas esferas (apenas a placa perfurada inferior), não foi necessário passar o selante elástico.

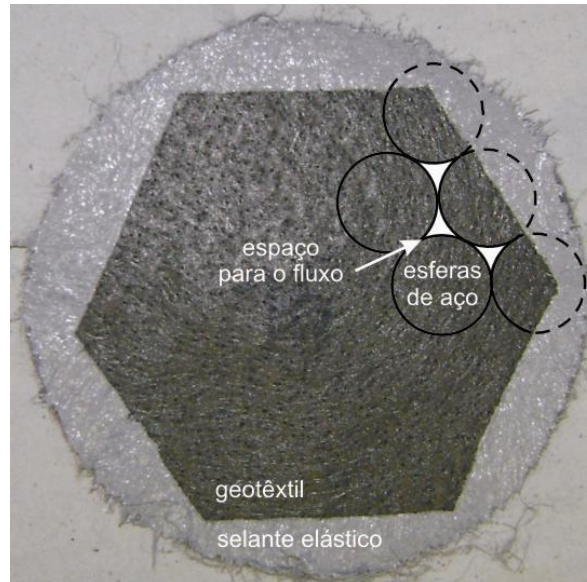


Figura 4.3 – Selante elástico na amostra de geotêxtil utilizada nos ensaios para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil.

Nesta pesquisa foram utilizados três tipos de amostras de geotêxtil não tecido, entretanto, alguns ensaios utilizaram apenas um deles, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Utilização das amostras de geotêxteis nos ensaios realizados.

Ensaio		Geotêxteis		
		G1	G2	G3
GMP	Ensaio com fluxo	X, S		
	Ensaio com impacto	X, S		
ACA		X, NS	X, NS	X, NS

Notas: G1 = geotêxtil com gramatura de 200 g/m², G2 = geotêxtil com gramatura de 400 g/m², G3 = geotêxtil com gramatura de 600 g/m², GMP = ensaio para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil, ACA = ensaio especial para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente, X = ensaio realizado, S = geotêxtil saturado e NS = geotêxtil seco.

4.1.2 PREPARAÇÃO DO ARRANJO DE ESFERAS DE AÇO

As esferas de aço foram arranjadas para assegurar o número máximo das mesmas dentro da base do permeâmetro. Seus espaçamentos (e) foram tais para que a relação afastamento entre esferas/diâmetro da esfera (e/d) fosse de: 0; 0,17; 0,33; 0,67 e 1 (Figura 4.4). A Tabela 4.2 apresenta o número de esferas de aço, os valores de e , d e e/d utilizadas em cada arranjo.

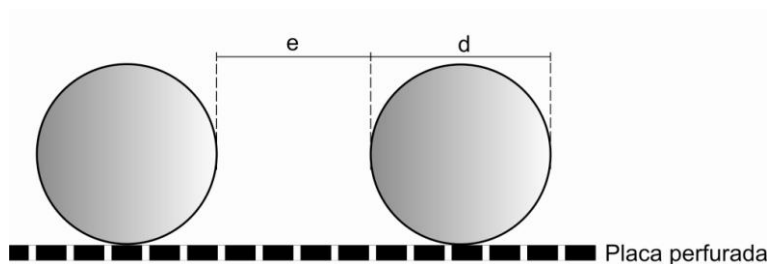


Figura 4.4 – Espaçamento (e) e diâmetro das esferas (d).

Tabela 4.2 – Número de esferas de aço, os valores de e , d e e/d utilizadas em cada arranjo.

d (mm)	e (mm)	e/d	Nº esferas
10	0	0	61
	1,7	0,17	55
	3,3	0,33	37
	6,7	0,67	26
	10,0	1,00	19
18	0	0	19
	3	0,17	14
	6	0,33	10
	12	0,67	7
	18	1	7

Notas: d = diâmetro da esfera de aço, e = espaçamento entre as esferas de aço.

A Figura 4.5 apresenta os arranjos de esferas de aço utilizados nos ensaios especiais para a obtenção da área de contato e o afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante. Nos ensaios para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil foram utilizados somente os arranjos de número 6 e 10.

A Tabela 4.3 mostra os ensaios onde foram utilizadas as esferas de aço e seus arranjos.

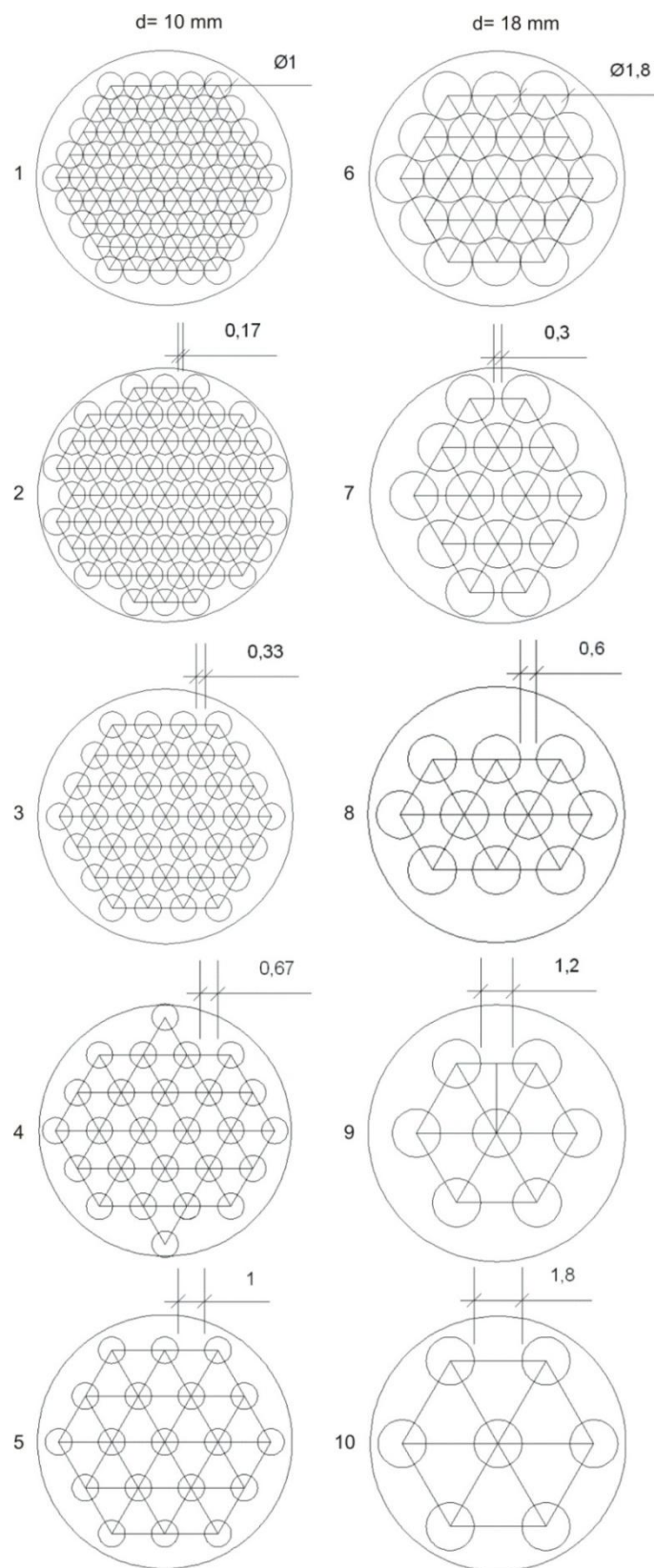


Figura 4.5 – Arranjo de esferas de aço.

Tabela 4.3 – Ensaio onde foram utilizadas as esferas de aço e seus arranjos.

Ensaio		e/d				
		0	0,17	0,33	0,67	1,00
GMP	Ensaio com fluxo	X				X
	Ensaio com impacto	X				X
ACA		X	X	X	X	X

Notas: GMP = ensaio para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil, ACA = ensaio especial para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente, e = espaçamento entre esferas, d = diâmetro das esferas, X = ensaio realizado.

Para assegurar o contato esfera-esfera e/ou esfera-placa perfurada inferior (Figura 3.5) foi utilizada a cola epóxi. Foram executados anéis vazados no material Etil Vinil Acetato (borracha EVA), com a função de fixar o arranjo de esferas no centro da placa inferior, como mostra a Figura 4.6. A altura das formas era igual ao diâmetro das esferas, evitando dessa maneira o afundamento do geotêxtil nas laterais do arranjo, mas apenas nos vazios das esferas. O dimensionamento das formas usadas no arranjo com $e = 0$ mm é mostrado na Figura 4.7.

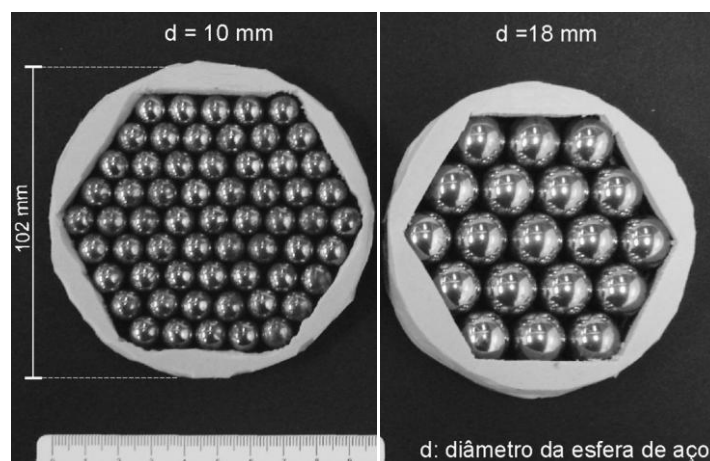


Figura 4.6 – Fôrmas de Etil Vinil Acetato para fixação do arranjo das esferas com espaçamento nulo.

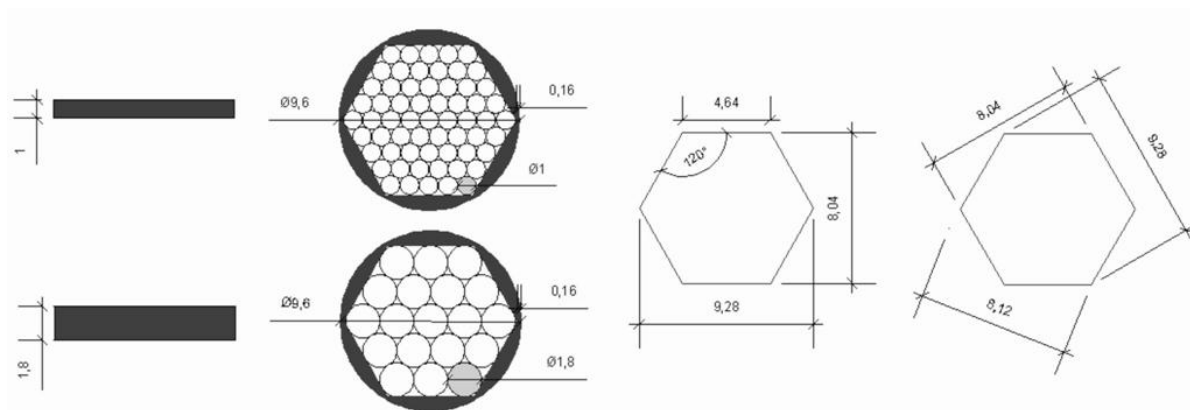


Figura 4.7– Dimensionamento das formas de Etil Vinil Acetato.

4.1.3 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE MICROESFERAS DE VIDRO

A preparação das amostras de microesferas de vidro teve como base a metodologia proposta por Shi (1993), também adotada por Gardoni (2000), Bessa da Luz (2004), Beirigo (2005) e Ferreira (2009). Esta metodologia tem como principal característica o controle da densidade em amostras homogêneas e saturadas de solo, conhecendo o peso específico real dos grãos (γ_s), o índice de vazios máximo e mínimo (e_{max} e e_{min}), o volume de microesferas de vidro dentro do permeâmetro e a massa seca das mesmas. Uma massa de microesferas era colocada em um Erlenmeyer de vidro com capacidade de 2000 cm³ e fervida com a água destilada por 1 h, garantindo, assim, a completa saturação. Após esse período o sistema era resfriado a temperatura ambiente e o Erlenmeyer era completado com água destilada até seu nível máximo e pesado, obtendo-se a massa do frasco+água+microesferas de vidro antes da preparação da amostra (W_{fwm}).

De acordo com Shi (1993), as amostras uniformes (coeficiente de uniformidade $C_u < 2$) devem ser preparadas pela técnica chamada *pluviação submersa*, que visa a obtenção de amostras homogêneas, como mostra a Figura 4.8.

O procedimento de preparação das amostras de microesferas de vidro teve pequenas modificações, de acordo com o tipo de ensaio.

Nos *ensaios especiais de verificação da granulometria do material passante (GMP)*, o procedimento de preparação das amostras de microesferas de vidro consistiu nas seguintes etapas:

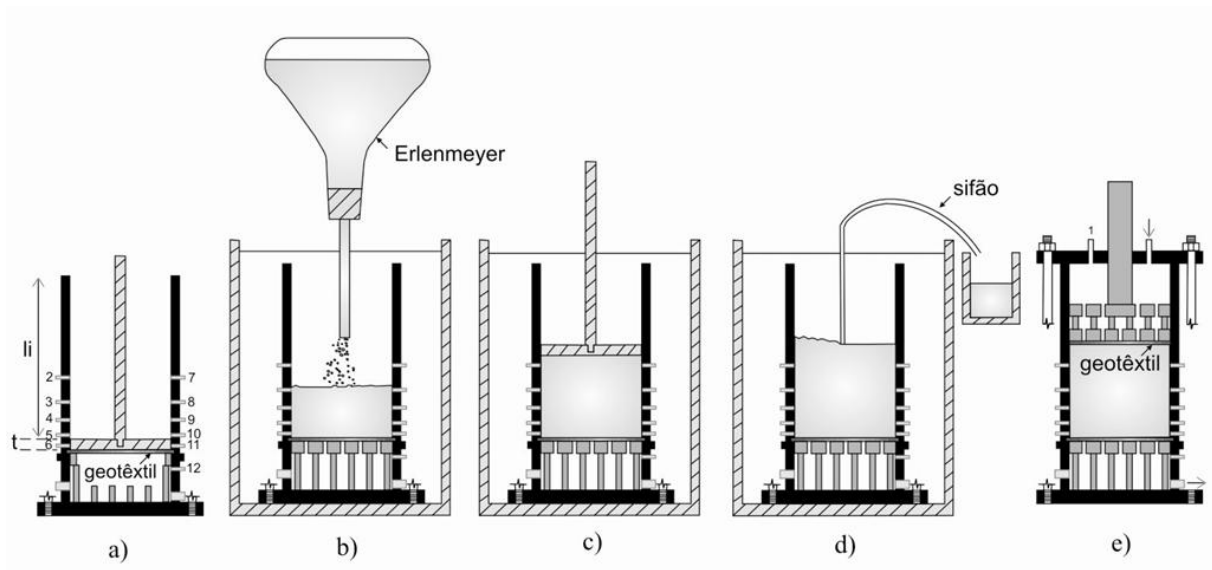


Figura 4.8 – Técnica de pluviação submersa (modificado de Shi, 1993).

a) Uma massa com 500 g de microesferas era colocada no frasco de Erlenmeyer e levado ao fogo para a completa saturação.

b) As microesferas eram então introduzidas no permeâmetro por meio de um frasco de Erlenmeyer, fechado por uma rolha de borracha e um tubo de descarga flexível (Figura 4.9). Este procedimento levava aproximadamente 30 min.



Figura 4.9 – Preparação da amostra de microesferas de vidro por meio da técnica da pluviação submersa.

c) A altura da amostra de microesferas era estipulada em 50 mm e era conhecida com o auxílio de uma peça deacrílico formada por uma haste central de 220 mm de comprimento e uma base circular de 95 mm de diâmetro perfurada com furos de 5 mm de diâmetro, como mostra a Figura 4.10. Quando a altura da amostra era ultrapassada, era necessário o uso de um sifão para retirar as microesferas excedentes que eram levadas a estufa para ser secadas, para obtenção de sua massa seca.

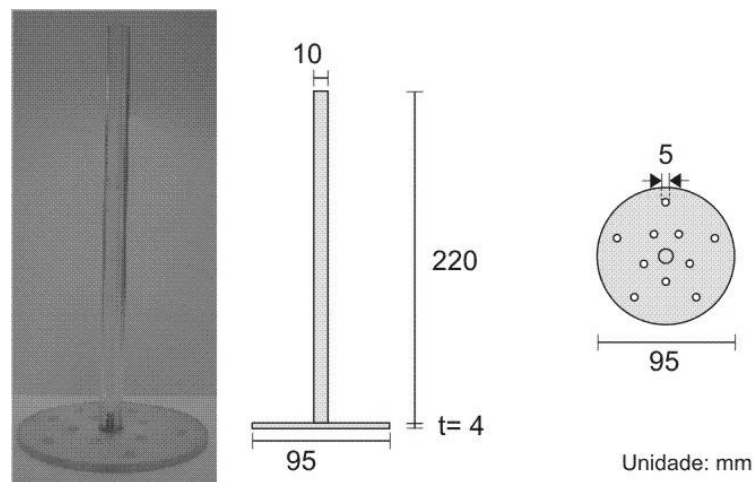


Figura 4.10 – Peça deacrílico para medir a altura da amostra de microesferas de vidro.

d) A peça deacrílico era introduzida dentro do permeômetro até o contato de sua base perfurada com a amostra de microesferas, como mostra a Figura 4.11. Em seguida, a altura li era obtida por meio de um paquímetro apoiado na borda superior do equipamento.

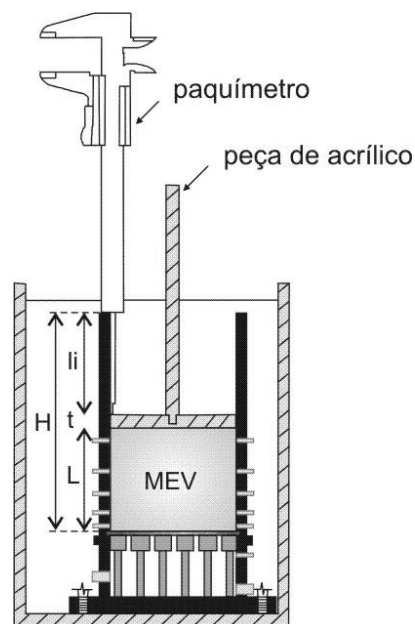


Figura 4.11 – Esquema do controle da altura da amostra.

e) A altura (L) da amostra era obtida pela Equação 4.1.

$$L = H - li - t \quad (4.1)$$

Onde: L = altura da amostra;

H = altura da parte superior do permeâmetro;

li = altura medida com o paquímetro; e

t = espessura da placa de acrílico perfurada.

f) O Erlenmeyer contendo as microesferas de vidro restantes era novamente preenchido com água destilada até sua borda superior e pesado, obtendo-se a massa do frasco+água+microesferas de vidro depois da preparação da amostra (W_{fwmf}).

A massa seca de MEV era calculada por meio da Equação 4.2.

$$W_{sd} = \frac{\rho_s}{(\rho_s - 1)} * (W_{fwm} - W_{fwmf}) \quad (4.2)$$

Onde: W_{sd} = massa seca de MEV;

ρ_s = massa específica dos grãos;

W_{fwm} = massa do frasco+água+microesferas antes da preparação da amostra; e

W_{fwmf} = massa do frasco+água+microesferas depois da preparação da amostra.

g) O índice de vazios da amostra era calculado por meio da Equação 4.3.

$$e = \frac{\rho_s * A * L}{W_{sd}} - 1 \quad (4.3)$$

Onde: e = índice de vazios;

ρ_s = massa específica dos grãos;

A = área da seção transversal do permeâmetro;

L = altura da amostra; e

W_{sd} = massa seca de microesferas de vidro.

No ensaio GMP não foi realizada a densificação da amostra batendo-se com o martelo na parede do permeâmetro. O índice de vazios da amostra de microesferas de vidro no término do preenchimento do permeâmetro por meio da técnica de pluviação era de 0,8 aproximadamente.

Os *ensaios especiais para a obtenção do afundamento do geotêxtil* nos vazios do material drenante foram realizados a seco, e por isso o preparo da amostra de microesferas de vidro seguiu parcialmente a metodologia proposta por Shi (1993). Uma massa seca de 564 g (W_{sd}) de microesferas era colocada no permeâmetro por meio de uma cápsula de alumínio que lançava as partículas do topo do permeâmetro até a amostra alcançar uma altura de aproximadamente 50 mm. Nestes ensaios foi realizada a densificação da amostra batendo-se levemente nas paredes do permeâmetro com um martelo de borracha até a amostra atingir um índice de vazios de aproximadamente 0,6, que era determinado conforme descrito nas etapas *d, e e g*.

A Tabela 4.4 apresenta um resumo das condições de preparo das microesferas de vidro em cada ensaio.

Tabela 4.4 – Resumo das condições de preparo das microesferas de vidro em cada ensaio.

Ensaio		Saturação	Densificação da amostra	Índice de vazios (<i>e</i>) desejado
GMP	Ensaio com fluxo	X		0,8
	Ensaio com impacto	X		0,8
ACA			X	0,6

Notas: GMP = ensaio para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil, ACA = ensaio especial para a obtenção da área de contato e o afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante, X = ensaio realizado.

4.1.4 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa teve duas granulometrias distintas: pedrisco, com diâmetro médio de 9,5 mm, e a brita 1, com diâmetro médio de 19 mm. Estes agregados foram utilizados nos ensaios especiais para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da área de contato entre eles (ACA). Inicialmente, os agregados

foram selecionados por meio do processo de peneiramento grosso, utilizando a série padrão de peneiras da ABNT. Para isso, o pedrisco passante na peneira #3/8” (9,5 mm) e retida na peneira #1/4” (6,4 mm) foi selecionado, assim como a brita 1 passante na peneira #3/4” (19,1 mm) e retida na peneira #3/8”. Devido ainda à grande variedade de forma dos grãos depois do processo de peneiramento grosso, houve a necessidade de classificá-los para assegurar uma maior uniformidade. Para isso, os agregados tiveram suas formas classificadas de acordo com Powers (1953), como mostra a Figura 4.12.

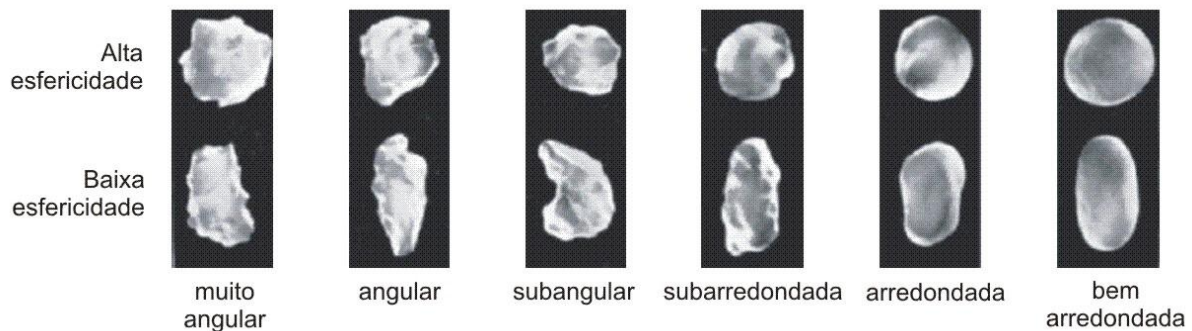


Figura 4.12 – Classificação dos grãos em relação a forma. (modificado de Powers, 1953, citado por Mitchell & Soga, 2005).

Os grãos selecionados para serem ensaios caracterizavam-se por terem uma esfericidade a mais próxima da alta, de acordo com a classificação de Powers, tendo formas cúbicas e triangulares. A alta esfericidade dos grãos foi escolhida para aproximarem-se a forma da esfera de aço.

Além disso, a altura dos agregados foi levada em consideração para que coubessem dentro do permeâmetro. No pedrisco, os agregados selecionados tiveram suas alturas médias de 10 mm (Figura 4.13), enquanto na brita 1, foram de 18 mm (Figura 4.14). Também houve a preocupação de colocar um agregado ao lado do outro, de tal forma que coubesse o máximo deles sobre a placa perfurada.

Foram realizados três ensaios utilizando o agregado selecionado por meio do peneiramento e/ou a classificação de suas formas. O primeiro ensaio utilizou pedrisco selecionado apenas pelo processo de peneiramento. Os segundo e o terceiro ensaios utilizaram pedrisco e brita 1 selecionados pelo peneiramento e pela forma de seus grãos. A Tabela 4.5 apresenta um resumo das condições de contorno dos ensaios ACA que utilizaram o agregado graúdo.

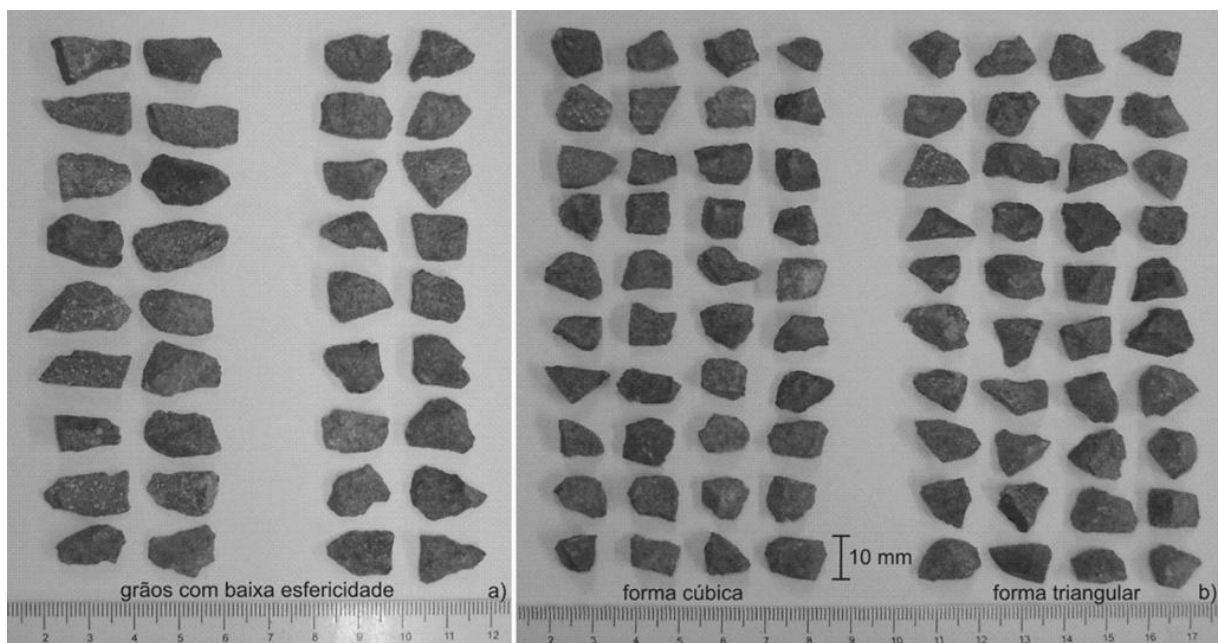


Figura 4.13 – Seleção da forma do pedrisco: a) agregados desconsiderados com baixa esfericidade (forma lamelar), b) agregados utilizados com alta esfericidade (forma cúbica e triangular).

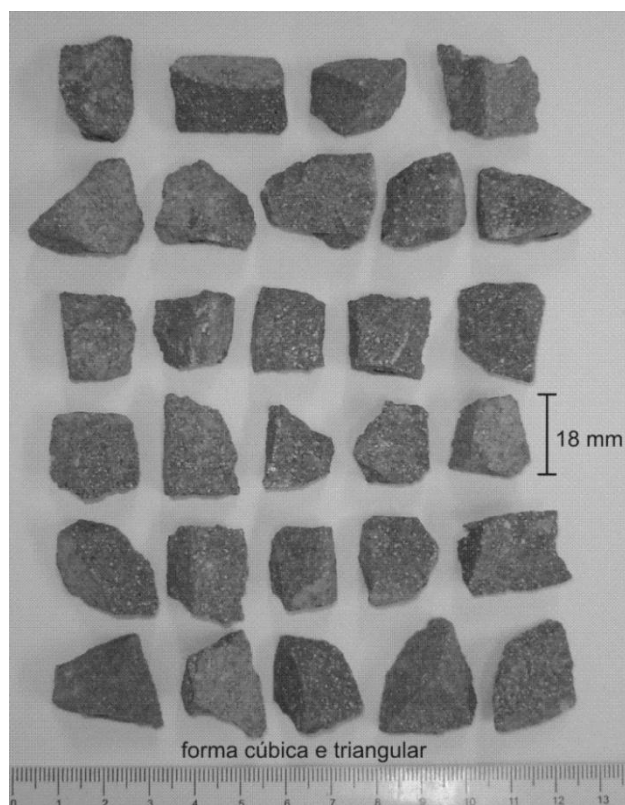


Figura 4.14 – Brita 1 utilizada com alta esfericidade (forma cúbica e triangular).

Tabela 4.5 – Resumo das condições de contorno dos ensaios especiais para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e que utilizaram o agregado graúdo.

	AG	Peneiramento grosso	Classificação da forma de grãos	Seleção da altura
Ensaio 1	pedrisco	X		X
Ensaio 2	pedrisco	X	X	X
Ensaio 3	brita 1	X	X	X

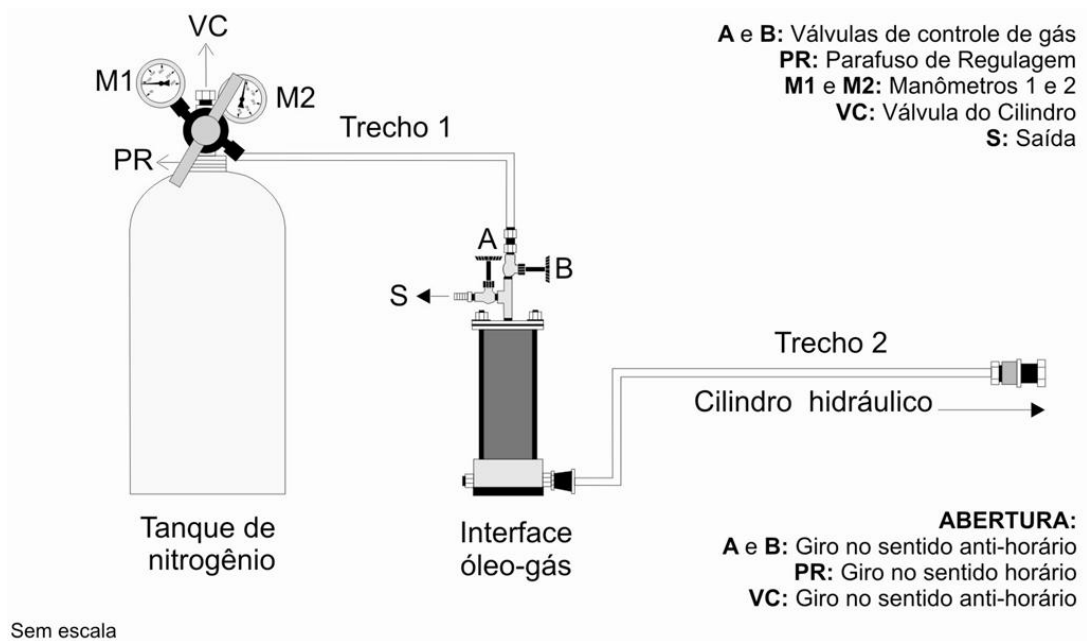
Notas: AG = agregado graúdo, X = ensaio realizado.

4.1.5 PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO DE TENSÃO VERTICAL

O procedimento para a aplicação da tensão vertical consistiu na abertura e fechamento de válvulas localizadas no tanque de nitrogênio e na interface óleo-gás. Além disso, exigiu o monitoramento do valor da força na leitora ligada à célula de carga. Quando o fluxo de nitrogênio era liberado, o pistão do cilindro se movia de acordo com a abertura e fechamento das válvulas da interface óleo-gás e carregava o pistão do permeâmetro. Um esquema geral do sistema hidráulico de aplicação de tensão é apresentado na Figura 4.15.

O procedimento completo para a aplicação de tensão consistiu em:

- a) Aferir se o Parafuso de Regulagem (PR, Figura. 4.15), a válvula B e VC estavam fechados antes de iniciar o fluxo de nitrogênio, impedindo que o gás fosse transferido para o trecho 1 e movimentasse o pistão do cilindro hidráulico;
- b) Abrir parcialmente VC e o Parafuso de Regulagem (PR), permitindo o fluxo de gás no trecho 1. Neste momento o manômetro M2 indicava a pressão no trecho 1;
- c) Abrir a válvula B, permitindo o fluxo de óleo da interface óleo-gás no trecho 2 e observar a movimentação do pistão do cilindro hidráulico e os valores da acusados na célula de carga. Se a carga ultrapassasse o valor desejado, abria-se a válvula A, permitindo a saída do gás em S;



d)

Figura 4.15 – Esquema geral do sistema hidráulico de aplicação de tensão.

d) Fechar a válvula A quando a célula de carga acusava o valor desejado. Neste momento o pistão do cilindro hidráulico cessava seu movimento vertical;

Para cada incremento de carga, a válvula B era novamente aberta até a célula de carga acusar o novo valor desejado. Ao término do ensaio, os seguintes procedimentos eram executados:

- a) Fechar a válvula B, interrompendo o abastecimento de gás para a interface óleo-gás;
- b) Abrir a válvula A, permitindo a saída em S do gás de dentro da interface;
- c) Fechar a VC e abrir o PR;
- d) Abrir a válvula B, permitindo que o gás restante no trecho 1 saísse em S e a pressão em M1 e M2 retornasse a zero.
- e) Fechar A, B e PR.

A Tabela 4.6 apresenta o resumo das tensões verticais utilizadas em cada ensaio. O tempo de aplicação da tensão em cada ensaio dependia das características do ensaio. No ensaio GMP com o fluxo, o tempo de aplicação foi de 24 h porque a vazão monitorada durante a execução

do ensaio era estabilizada após este intervalo tempo. No caso do ensaio GMP com impacto, o intervalo de tempo de 10 min foi relacionado ao tempo de execução do procedimento de impacto realizado na parede externa do permeâmetro. No ensaio ACA, atribuiu-se o intervalo de tempo de 1 h, permitindo ao geotêxtil período suficiente para deformar-se nos vazios do material subjacente.

Tabela 4.6 – Resumo das tensões verticais utilizadas em cada ensaio e o tempo de sua aplicação.

Ensaio		Tensão vertical (kPa)							Tempo de aplicação aproximado	
		0	20	50	100	200	500	1000		2000
GMP	Ensaio com fluxo			X						24 h
	Ensaio com impacto		X	X					X	10 min
ACA		X	X	X	X	X	X	X	X	1 h

Notas: GMP = ensaio para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil, ACA = ensaio especial para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente, X = ensaio realizado.

4.1.6 GRAU DE IMPREGNAÇÃO DA AMOSTRA DE GEOTÊXTEL

O grau de impregnação (λ) da amostra de geotêxtil é definido como a razão entre a massa de material impregnado e a massa de filamentos que compõe o geotêxtil por unidade de área, como mostra a Equação 4.4.

$$\lambda = \frac{m_{MEVi}}{m_f} \quad (4.4)$$

Onde: λ = grau de impregnação;

m_{MEVi} = massa de microesferas de vidro impregnada; e

m_f = massa de filamentos da amostra de geotêxtil.

O grau de impregnação foi obtido nos ensaios especiais de verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil G1 (GMP), utilizando três arranjos distintos de base para o geotêxtil. No primeiro arranjo foi utilizada uma placa perfurada subjacente ao geotêxtil, no segundo foram utilizadas esferas de aço com diâmetro de

18 mm e afastamento nulo e no terceiro, esferas de aço com afastamento de 18 mm, subjacentes ao geotêxtil, como mostra a Figura 4.16.

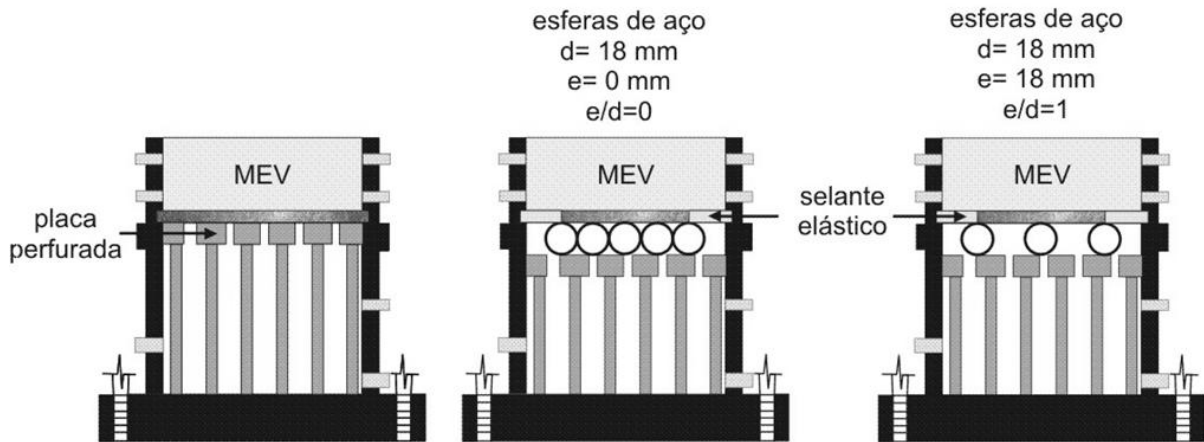


Figura 4.16 – Arranjos do ensaio especiais de verificação da granulometria onde foi obtido o grau de impregnação do geotêxtil.

A m_{MEVi} era obtida por meio da Equação 4.5.

$$m_{MEVi} = m_3 - \overline{m_2} \quad (4.5)$$

Onde: m_{MEVi} = massa de microesferas de vidro impregnada;

m_3 = massa do geotêxtil + adesivo selante + MEV; e

$\overline{m_2}$ = massa média do geotêxtil + adesivo selante

A *massa média do geotêxtil + adesivo selante* era obtida antes da saturação da amostra do geotêxtil, realizando-se três medidas de massa e obtendo-se a sua média aritmética, enquanto a *massa do geotêxtil + adesivo selante + microesferas de vidro* era obtida no término do ensaio, após a amostra impregnada ter permanecido em estufa por 24 h.

Para o cálculo da massa de filamentos do geotêxtil (m_f) é necessário a obtenção de sua área impregnada (A_i), como mostra a Equação 4.6 (Figura 4.17).

$$A_i = A_t - A_A \quad (4.6)$$

Onde: A_i = área impregnada da amostra geotêxtil;

A_t = área total da amostra de geotêxtil (72,38 cm²) e

A_A = área do geotêxtil com adesivo selante.

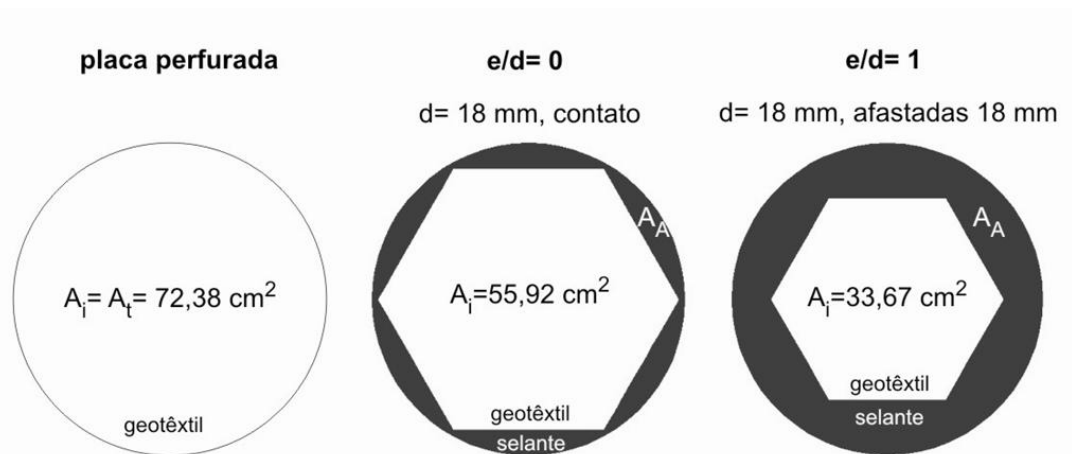


Figura 4.17 – Área impregnada por microesferas de vidro nos ensaios especiais de verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil.

Nos ensaios onde foi utilizado a placa perfurada (GMP), a área impregnada (A_i) foi igual a área total da amostra (A_t) pois não foi necessário o uso do selante elástico.

A massa de filamentos da amostra de geotêxtil, necessária para a obtenção do λ , foi obtida pela Equação 4.7.

$$m_f = M_A - A_i \quad (4.7)$$

Onde: m_f = massa de filamentos da amostra de geotêxtil;

M_A = gramatura da amostra do geotêxtil; e

A_i = área impregnada da amostra geotêxtil.

4.1.7 DEFORMAÇÃO DA AMOSTRA DE GEOTÊXTEL

A deformação da amostra de geotêxtil nos vazios do material drenante foi obtida nos ensaios tipo AAC. Para a sua obtenção eram utilizados os valores do diâmetro da esfera (d), e os valores do afundamento do geotêxtil δ_{max} (obtido com o paquímetro digital) e do diâmetro da área de contato entre o geotêxtil e o material drenante (obtido por meio de fotografias digitais) como mostra a Figura 4.18. O procedimento matemático seguiu as seguintes etapas:

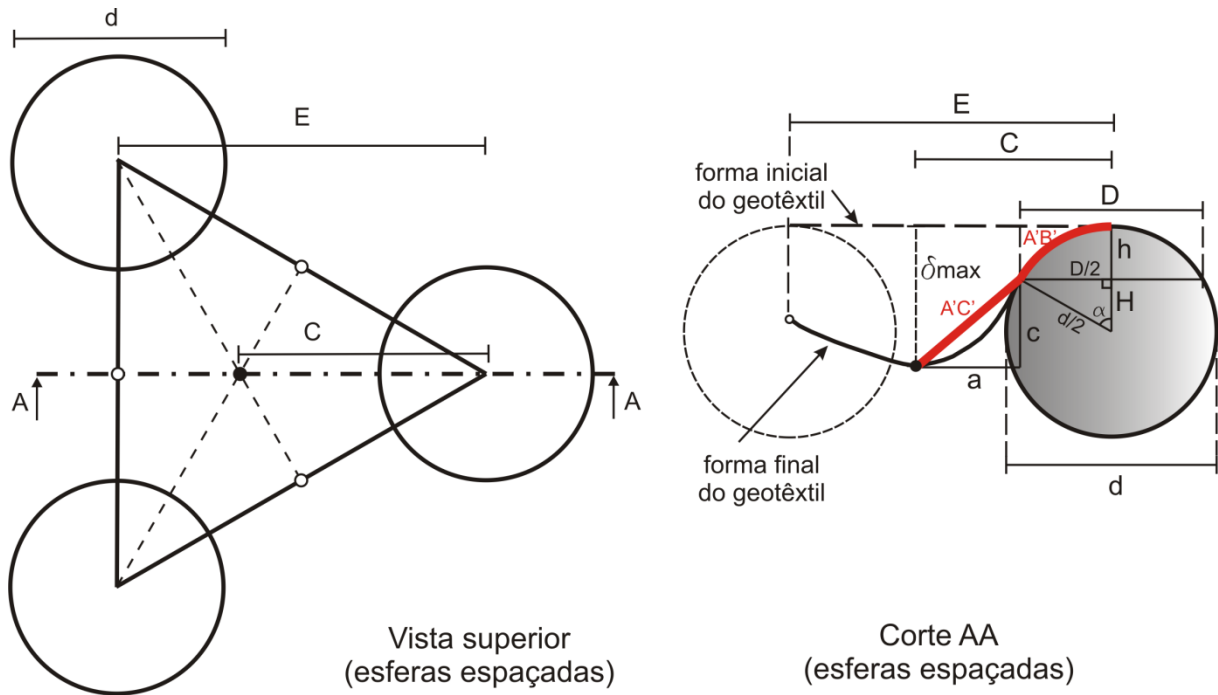


Figura 4.18 – Esquema da medição da deformação do geotêxtil.

a) Inicialmente, foi obtido o valor do ângulo α e da distância H , por meio das Equações 4.8 e 4.9.

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{(D/2)}{(d/2)} \rightarrow \alpha = \operatorname{arcsen} \frac{(D/2)}{(d/2)} \quad (4.8)$$

$$\operatorname{cos} \alpha = \frac{H}{(d/2)} \rightarrow H = \operatorname{cos} \alpha \cdot \frac{d}{2} \quad (4.9)$$

b) Por meio do raio da esfera ($d/2$), obteve-se a distância h , que é a distância vertical do topo da esfera até a linha horizontal que define o diâmetro da área de contato (D), como mostra a Equação 4.10.

$$H + h = \frac{d}{2} \rightarrow h = \frac{d}{2} - H \quad (4.10)$$

c) O comprimento final do geotêxtil, resultante do afundamento do mesmo nos vazios do material drenante, foi obtido de forma aproximada por meio de dois trechos: um trecho real, curvo, formado pelo comprimento de arco $A'B'$ e um trecho retilíneo fictício $A'C'$.

d) O arco de circunferência $A'B'$ foi obtido por meio da Equação 4.11.

$$A'B' = \frac{2\pi^d}{360} \cdot \alpha \quad (4.11)$$

e) Para o comprimento $A'C'$ ser conhecido, precisou-se obter as distâncias c e a . A distância c foi conhecida por meio do afundamento δ_{max} (paquímetro digital), como mostra a Equação 4.12. Já a distância a , era obtida conforme a Equação 4.13.

$$c + h = \delta_{max} \rightarrow c = \delta_{max} - h \quad (4.12)$$

$$a = C - \frac{D}{2} \quad (4.13)$$

Conhecendo-se a e c , pela relação de Pitágoras, encontra-se o trecho retilíneo fictício $A'C'$, como mostra a Equação 4.14.

$$A'C'^2 = a^2 + c^2 \rightarrow A'C' = \sqrt{a^2 + c^2} \quad (4.14)$$

Desta forma, a deformação aproximada é obtida pela Equação 4.15.

$$\varepsilon = \frac{(A'B' + A'C') - c}{c} \quad (4.15)$$

4.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL PASSANTE ATRAVÉS DO GEOTÊXTIL

Foram realizados dois tipos de ensaios para a verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil (GMP). O primeiro tipo de ensaio investigou a passagem de partículas pelo geotêxtil por meio de um *fluxo contínuo de água* destilada (Figura 4.19a). O segundo tipo investigou a passagem de partículas por meio do *impacto de um martelo* de borracha na parede externa do permeâmetro. Para isso, uma haste metálica foi atravessada na extremidade do cabo do martelo, possibilitando o seu giro e foi fixada na estrutura de reação de equipamento. O impacto do martelo era realizado por uma queda única, em 90° de inclinação em relação a direção vertical do permeâmetro, atingindo a altura equivalente ao centro da amostra de microesferas de vidro. Foram realizadas cinco repetições, localizando o martelo nas posições ortogonais (A, B e C) do permeâmetro, como mostra a vista superior apresentada na Figura 4.19b. Na posição oposta a B não foi possível assegurar o impacto do

martelo, pois nesta posição o impacto era amortecido pelos piezômetros laterais, registro de saída e pelas hastes de aço do permeâmetro. Um esquema geral deste ensaio é apresentado na Figura 4.19.

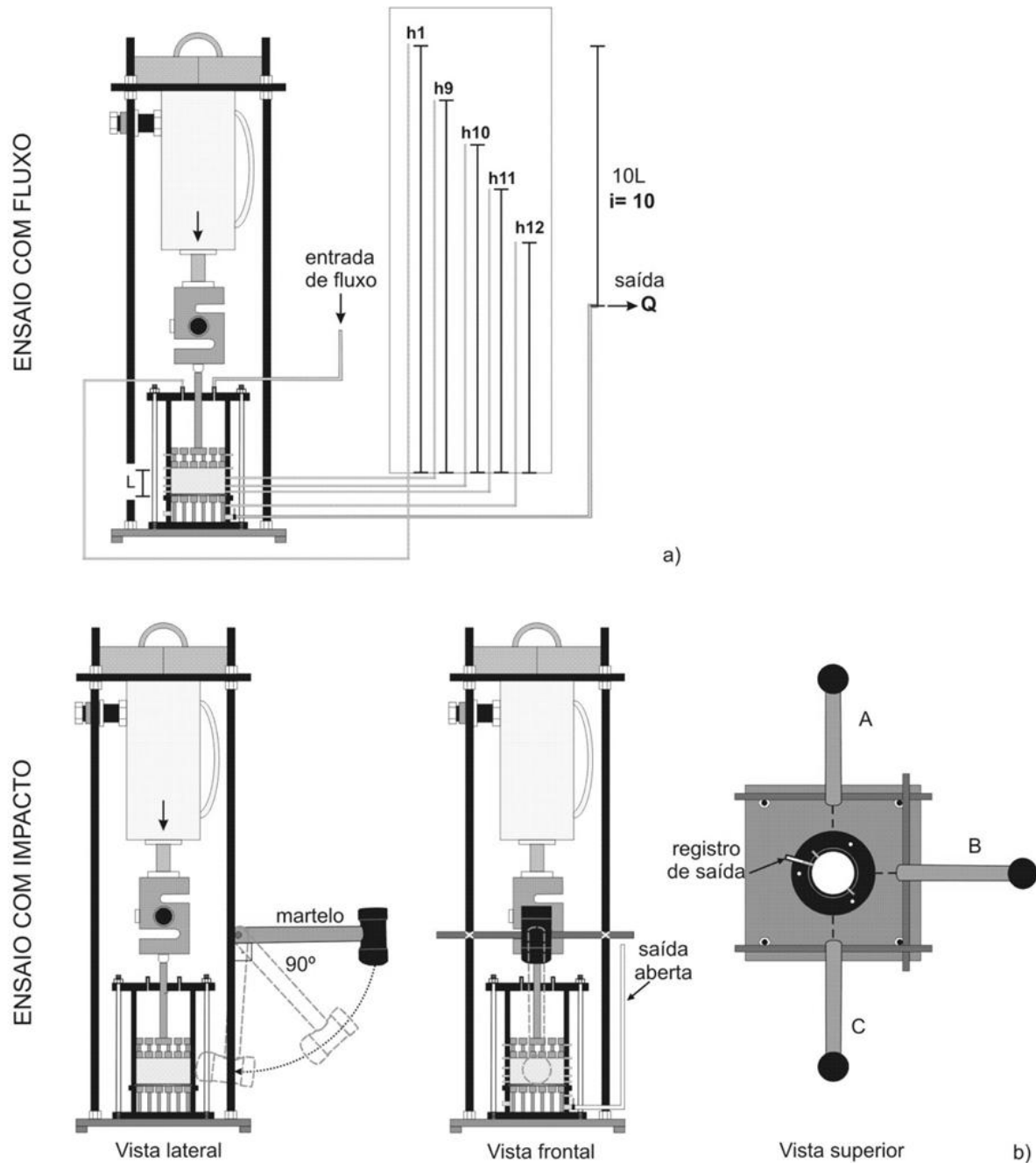


Figura 4.19 – Ensaios para a verificação da granulometria do material passante através da abertura de filtração do geotêxtil: a) ensaio com fluxo, b) ensaio com impacto.

Os ensaios GMP foram realizados em três condições de contorno distintos. Inicialmente foi utilizada uma placa metálica perfurada subjacente ao filtro geotêxtil, a mesma utilizada no

ensaio GR, possuindo uma percentagem de área aberta para fluxo de 7 % aproximadamente ($7,10 \text{ cm}^2$), como mostra Figura 4.20.

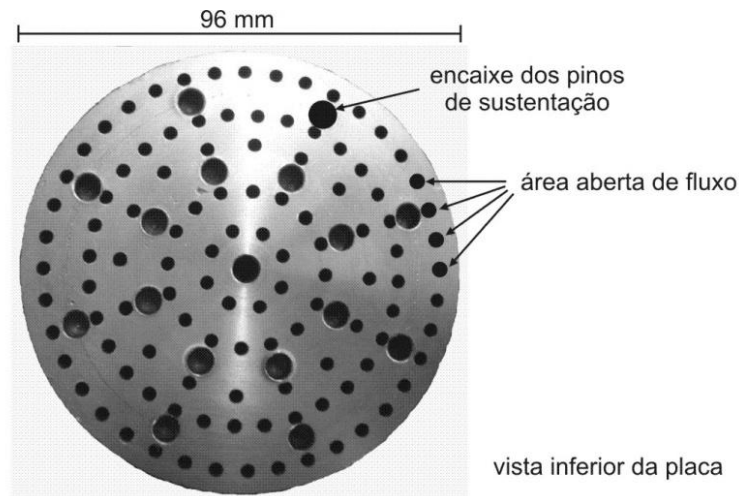


Figura 4.20 – Detalhe da área aberta de fluxo na placa perfurada.

Em seguida, foram utilizadas esferas de aço subjacentes ao geotêxtil e sobrepostas a placa perfurada que amparava, junto com os pinos de sustentação, o arranjo das esferas de aço. Foram dois os espaçamentos entre as esferas: 0 e 18 mm, com relações espaçamento/diâmetro da esfera (e/d) iguais a 0 e 1, respectivamente. Entretanto, foi necessário passar uma camada de selante elástico sobre a forma de Etil Vinil Acetato (EVA) localizada nas bordas do arranjo de EA. Isso foi feito para garantir que o fluxo ocorresse apenas nos vazios das esferas, como mostra o arranjo de esferas em um dos ensaios realizados Figura 4.21.

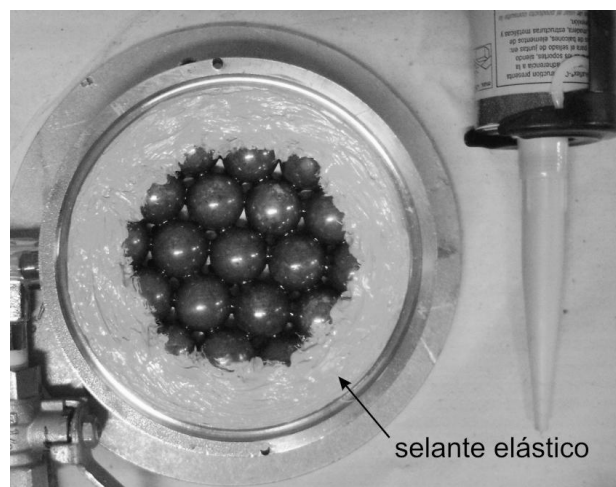


Figura 4.21 – Selante elástico nas bordas do arranjo de esferas de aço.

Um esquema geral das condições de contorno destes ensaios é apresentado na Figura 4.22.

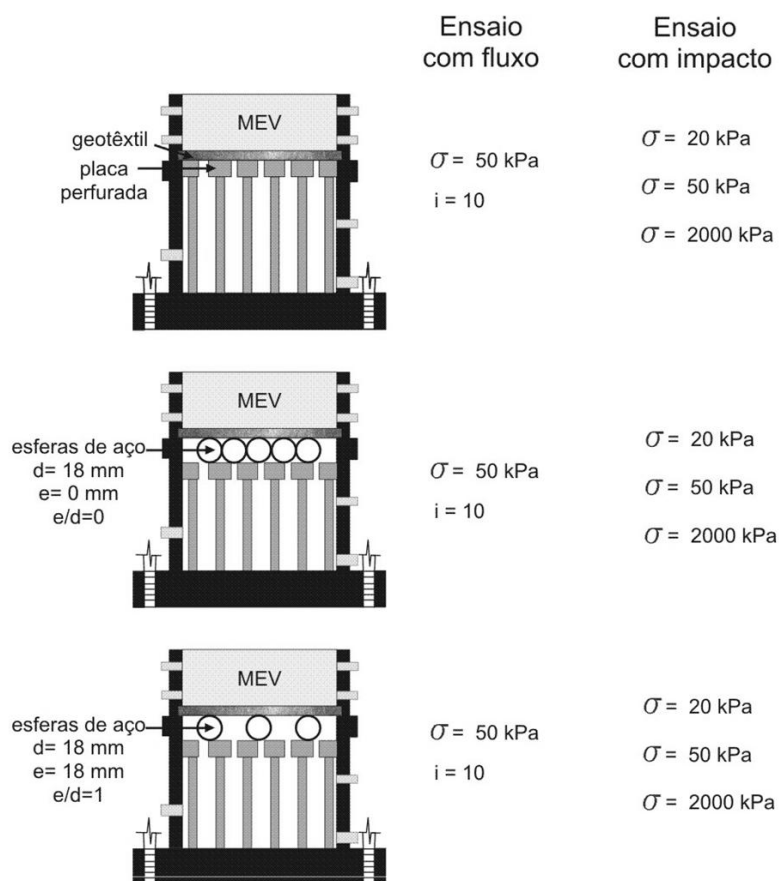


Figura 4.22 – Esquema geral das condições de contorno dos ensaios para a verificação da granulometria do material passante.

Nestes ensaios não foi realizado a densificação da amostra de microesferas de vidro batendo-se levemente nas paredes do permeâmetro com um martelo de borracha até a amostra atingir um índice de vazios desejado, pois as batidas com o martelo ocasionariam a passagem das partículas através do geotêxtil. Desta forma, as partículas que viessem a passar por meio dos impactos padronizados do martelo sobre a parede do permeâmetro se misturariam àquelas que passassem por meio das batidas do processo de densificação.

4.2.1 ENSAIO COM FLUXO D'ÁGUA

Nos ensaios GMP por meio do fluxo d'água, foram monitoradas as vazões e as cargas hidráulicas nos piezômetros 1, 9, 10, 11 e 12, em intervalos de tempos conhecidos, com a aplicação de uma tensão vertical de 50 kPa e um gradiente de saída de dez. Este valor de gradiente foi empregado na tentativa de uma equivalência com o impacto do martelo na parede do permeâmetro. Foram realizados três ensaios de fluxo, demorando cerca de 24 h aproximadamente, cada ensaio.

Não houve a variação da tensão vertical e do gradiente hidráulico em um mesmo ensaio para assegurar a mínima oxidação das esferas de aço devido ao aumento do intervalo de tempo na execução do ensaio.

Os procedimentos para execução do ensaio com fluxo d'água seguiram as seguintes etapas:

a) Inicialmente, eram colocados filamentos de geotêxtil nas entradas dos piezômetros no lado externo da parte superior e inferior do permeâmetro, para evitar o carreamento das microesferas de vidro pelos piezômetros (Figura 4.23a).

b) Em seguida, era colocada fita adesiva na entrada dos piezômetros no lado interno da parte superior do equipamento, que era lubrificada com uma camada de vaselina (Figura 4.23b). O filme plástico era enrolado em uma das hastes do equipamento e desenrolado sobre a vaselina, assegurando uma maior facilidade na sua colocação no interior da célula. (Figura 4.23c e d).

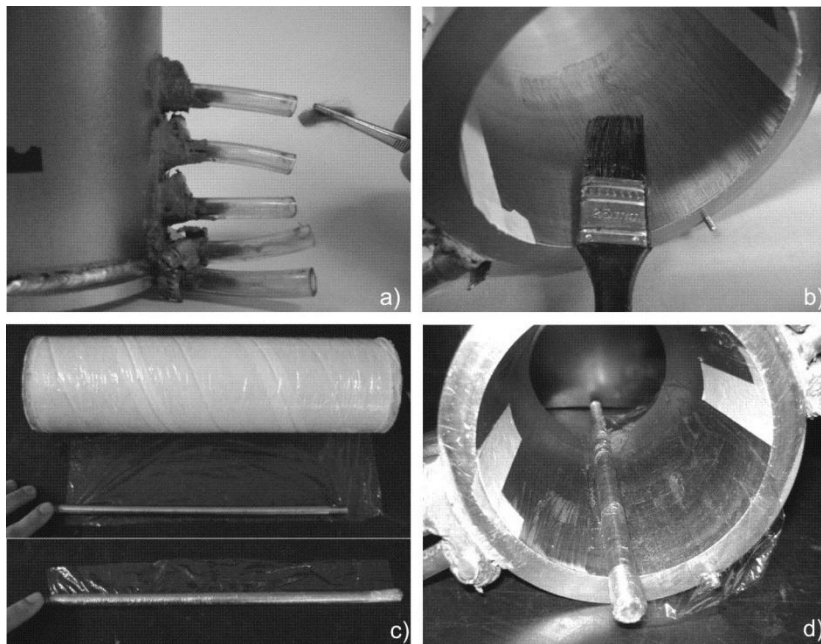


Figura 4.23 – Procedimentos iniciais de montagem do permeâmetro.

c) O filme plástico era cortado nas margens da fita adesiva, removendo-a e deixando visível a entrada dos piezômetros de número 9, 10, 11 e 12. O uso da vaselina e do filme plástico reduziu o efeito do atrito lateral.

d) A parte inferior do permeâmetro era introduzida em um recipiente plástico com água destilada e o geotêxtil, saturado previamente pela fervura, era colocado sobre a placa perfurada inferior ou sobre o arranjo de esferas de aço. O nível de água destilada devia estar 5 cm acima do topo do permeâmetro (Figura 4.24).



Figura 4.24 – Parte inferior do permeâmetro introduzido em um recipiente plástico.

e) Foram utilizados grampos tipo C (“sargento”) para fixar a parte superior e inferior do permeâmetro. O registro de saída era fechado e as entradas dos piezômetros eram vedadas após a retirada das bolhas de ar. Com a amostra de microesferas de vidro previamente saturada no Erlenmeyer, está era colocada dentro do permeâmetro e obtida a sua altura, conforme os procedimentos descritos no item 4.1.3.

f) Um filtro geotêxtil saturado era colocado na parte superior da amostra. Eram colocadas as três hastes metálicas, o pistão de aplicação de carga, a tampa superior no equipamento, terminando o fechamento da célula.

g) O permeâmetro era retirado do recipiente com água destilada, secando-o e observando algum possível vazamento.

h) Conectava-se o tubo de entrada d’água na parte superior do permeâmetro, os cinco piezômetros eram preenchidos previamente com água destilada, assim como o tubo de saída de água posicionado na altura adequada ao gradiente hidráulico de dez. Para facilitar o preenchimento de água destilada dos piezômetros, foi desenvolvido um dispositivo formado

por uma seringa de 25 ml de capacidade e um tubo de 3 mm de diâmetro externo e 1,50 m de comprimento, como mostra a Figura 4.25.

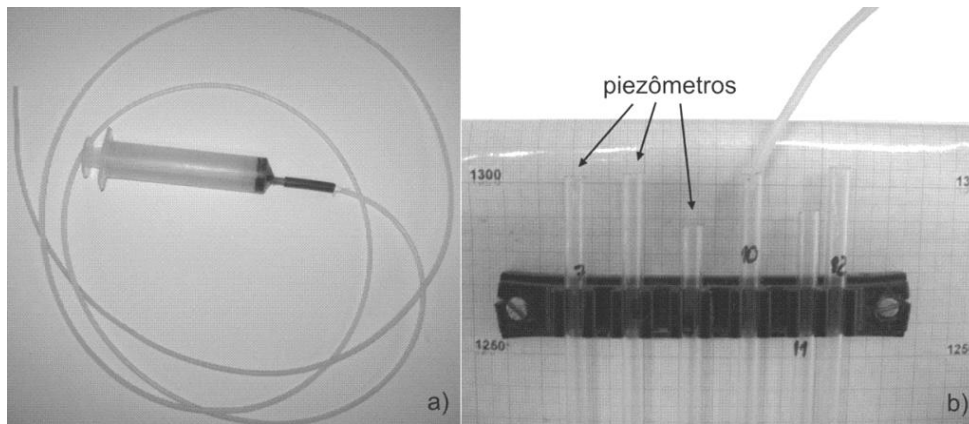


Figura 4.25 – Dispositivo para o preenchimento de água destilada nos piezômetros.

i) O fluxo de água era estabelecido, observando-se antes a existência ou não de bolhas de ar nos piezômetros, no tubo de entrada e saída de água. Quando não foram encontradas bolhas, realizou-se o monitoramento das cargas hidráulicas nos piezômetros e da vazão de saída nos intervalos de tempo conhecidos.

j) Após a estabilização da vazão e das cargas hidráulicas, o registro de entrada era fechado, retirava-se a tensão vertical, o registro de saída era fechado e o tubo de saída era desconectado do equipamento.

k) O equipamento era desmontado e os grampo C instalados para fixar as partes superior e inferior do permeâmetro. Retirava-se a tampa, o pistão e o geotêxtil superior. Media-se a altura final da amostra conforme o procedimento *d* do item 4.1.3. Retirava-se o excesso de água no topo da amostra usando-se um sifão, facilitando a retirada da amostra de microesferas de vidro do permeâmetro.

l) Foram coletadas partículas de microesferas de vidro na interface da amostra com o geotêxtil e o material passante através do geotêxtil depositados no fundo do equipamento.

m) O geotêxtil era levado para a estufa por 24 h, obtendo-se a *massa do geotêxtil + adesivo selante + microesferas de vidro* (m_3). Além disso, o grau de impregnação e a

granulometria das partículas retidas na amostra de geotêxtil eram obtidas, assim como a massa e a granulometria do material passante.

4.2.2 ENSAIO COM IMPACTO

Foram realizados nove ensaios de impacto nas tensões verticais de 20, 50 e 2000 kPa, demorando cerca de 10 min cada ensaio. O tubo de saída d'água foi fixado na vertical na própria estrutura de reação do equipamento, como já mostrado na Figura 4.19b e seu registro de saída aberto, garantindo a atuação da pressão atmosférica no interior do tubo. A energia transferida pelo martelo para a parede do permeâmetro foi de 1,64 j (desprezando a resistência do ar) e frequência de impacto de 0,33 Hz.

Os procedimentos para execução do ensaio com impacto seguiu, basicamente, os mesmos procedimentos do ensaio com fluxo. Entretanto, algumas modificações foram realizadas nas etapas *c*, *h*, *i*, *j*, *k*, *l* e *m* apresentadas no item 4.2:

c) Etapa desconsiderada.

h) e i) Etapas desconsideradas.

j) Aplicava-se a tensão vertical de 20, 50 ou 2000 kPa. Fixa-se o dispositivo formado pela haste metálica e o martelo na posição A, em B e em seguida em C, como já mostrado na Figura 4.19b, realizando-se ao total cinco repetições. Retirava-se o carregamento e fechava-se o registro de saída.

k) Colocavam-se os grampos tipo C, fixando a parte superior e inferior do permeâmetro, desmontava-se o equipamento e retirava-se a tampa, o pistão e o geotêxtil superior. Media-se a altura final da amostra conforme o procedimento *d* do item 4.1.3. Retirava-se o excesso de água no topo da amostra usando-se um sifão, facilitando a retirada da amostra de microesferas de vidro do permeâmetro.

l) Eram coletadas partículas de microesferas de vidro na interface da amostra com o geotêxtil e o material passante através do geotêxtil depositados no fundo do equipamento.

m) O geotêxtil era levado para a estufa por 24 horas, obtendo-se a *massa do geotêxtil + adesivo selante + microesferas de vidro* (m_3). Além disso, o grau de impregnação e a granulometria das partículas retidas na amostra de geotêxtil foram obtidas, assim como a massa e a granulometria do material passante.

4.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO AFUNDAMENTO DO FILTRO GEOTÊXTIL NOS VAZIOS DO MATERIAL DRENANTE E DA ÁREA DE CONTATO ENTRE ELES

Nos ensaios para obtenção do *afundamento* do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da *área de contato* entre eles (AAC) foram utilizados dois tipos de materiais drenantes: esferas de aço e agregado graúdo. Foram realizados 85 ensaios utilizando esferas de aço, obtendo o afundamento máximo (δ_{max}) do filtro geotêxtil nos vazios das esferas de aço e a área de contato entre eles por meio do diâmetro de contato (D), como mostra o esquema da Figura 4.26.

Utilizaram-se três tipos de geotêxtil G1, G2 e G3 e dois tipos de esferas de aço com diâmetros (d) de 10 e 18 mm. Os afastamentos (e) foram tais para que a relação afastamento/diâmetro da esfera (e/d) fosse de: 0,17; 0,33; 0,67 e 1. Além disso, três ensaios foram realizados utilizando-se pedrisco e brita 1.

A Tabela 4.7 apresenta o resumo dos ensaios AAC realizados nesta pesquisa.

Ao contrário do ensaio GMP, os ensaios AAC foram realizados em condição seca, montando o permeâmetro fora do recipiente plástico e não saturando a amostra de geotêxtil.

Inicialmente, preparava-se a base do permeâmetro de acordo com o arranjo de esferas de aço ou o agregado graúdo, conforme descrito nos itens 4.1.2 e 4.1.4 respectivamente. Passava-se uma reduzida quantidade de cola branca sobre o topo das esferas de aço ou do agregado graúdo, garantindo a fixação da folha de papel alumínio com 102 mm de diâmetro sobreposta aos mesmos. Em seguida, era colocado uma amostra de geotêxtil sobre a folha de alumínio. A Figura 4.27 apresenta a sequência de sobreposição dos materiais na base do equipamento.

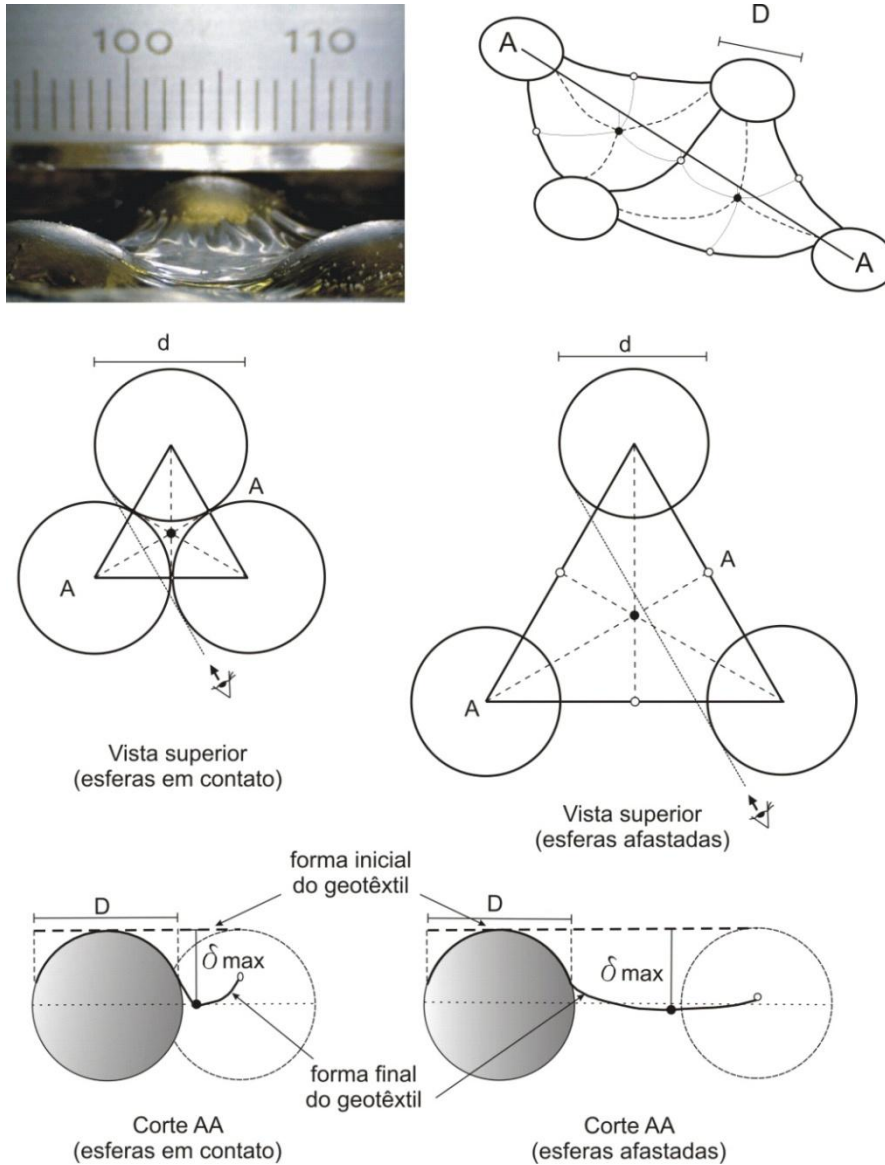


Figura 4.26 – Esquema geral das condições de contorno da base drenante.

Tabela 4.7 – Resumo dos ensaios para obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da área de contato entre eles.

Ensaio AAC													
G1										G2	G3	G2	G3
Tensão vertical (kPa)													
d (mm)	e (mm)	e/d	50	100	200	500	1000	2000	1000	1000	50	50	
EA	10	0	0	X	X	X	X	X	X				
		1,7	0,17	X	X	X	X	X	X				
		3,3	0,33	X	X	X	X	X	X				
		6,7	0,67	X	X	X	X	X	X				
		10	1,00	X	X	X	X	X	X				

Continuação da Tabela 4.7.

	G1									G2	G3	G2	G3	
	d (mm)	e (mm)	e/d	50	100	200	500	1000	2000	1000	1000	50	50	
EA	18	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X			
		3	0,17	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
		6	0,33	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	X	X		
		12	0,67	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
		18	1,00	X	X	XG	X	X	X	X	X	XG	X	X
AG	Pedrisco (10mm)	Selecionado (peneiramento)				X								
		Selecionado (peneiramento e forma de grãos)				X								
	Brita 1 (19mm)	Selecionado (peneiramento e forma de grãos)				X								

Notas: AAC = ensaio especial para a obtenção *do afundamento* do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da *área de contato* entre eles, G1 = geotêxtil com gramatura de 200 g/m², G2 = geotêxtil com gramatura de 400 g/m², G3 = geotêxtil com gramatura de 600 g/m², EA = esferas de aço, AG = agregado graúdo, d = diâmetro da esfera, e = espaçamento entre esferas, X = ensaio realizado.

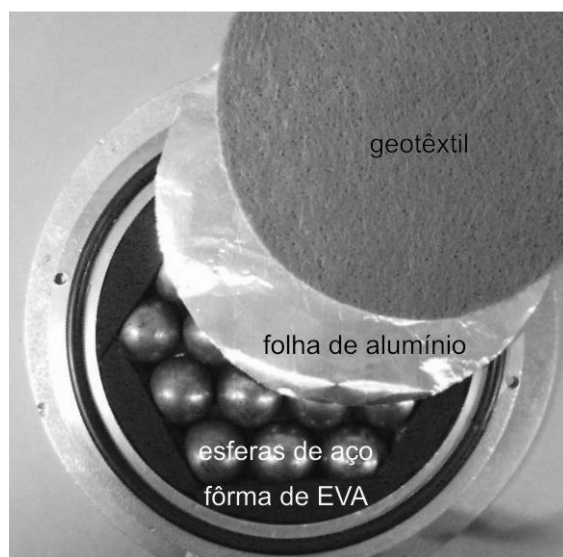


Figura 4.27– Sequência de sobreposição dos materiais na base do equipamento.

Os procedimentos para execução do ensaio AAC seguiram, basicamente, os mesmos procedimentos do GMP com fluxo. Entretanto, algumas modificações foram realizadas nas etapas *c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m* e *n* apresentadas no item 4.2:

c) A fita adesiva não era removida.

d) Etapa desconsiderada.

e) Foram utilizados grampos tipo C para fixar a parte superior e inferior do permeâmetro. Em seguida, a amostra seca de microesferas de vidro (564 g) era colocada no permeâmetro por meio de uma cápsula de alumínio, que lançava as partículas do topo do permeâmetro até a amostra alcançar uma altura de aproximadamente 50 mm. Executava-se a densificação da amostra batendo-se levemente nas paredes do permeâmetro com um martelo de borracha até a amostra atingir um índice de vazios de aproximadamente 0,6.

f) Um filtro geotêxtil não saturado era colocado na parte superior da amostra.

g), h), i) Etapas desconsideradas.

j) Aplicava-se a tensão vertical desejada durante o intervalo de tempo de 1 h.

k) A tensão vertical era retirada e colocavam-se os grampos tipo C, fixando-se a parte superior e inferior do equipamento, retirando-se a tampa, o pistão e o geotêxtil superior. Media-se a altura final da amostra conforme o procedimento *d* do item 4.1.3.

l) e m) Etapas desconsideradas.

Os grampos tipo C e a parte intermediária do permeâmetro eram removidos, possibilitando a retirada da amostra de microesferas de vidro e do filtro geotêxtil. Por meio de um pincel com cerdas macias, as microesferas passantes pelo geotêxtil que ficavam depositadas sobre a folha de alumínio, eram removidas e iniciava-se o procedimento de medição do afundamento do geotêxtil nos vazios das esferas de aço ou do agregado graúdo por meio de um paquímetro digital. Foi escolhido este instrumento de medição por ser de fácil utilização e, principalmente, pela rapidez na obtenção dos valores de afundamento obtidos. Além disso, houve a necessidade de desenvolver um dispositivo rígido que permitisse o apoio do paquímetro sobre as esferas de aço ou agregado graúdo. Este dispositivo era formado pela união de quatro lâminas de aço, utilizadas em estiletas, dispostas ortogonalmente entre si. A Figura 4.28 apresenta o processo de medição do afundamento do geotêxtil.

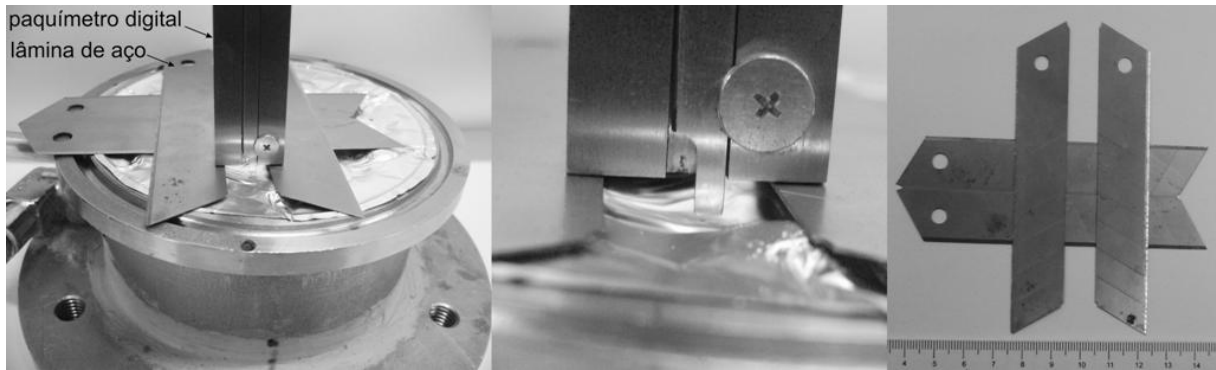


Figura 4.28 – Procedimento de medição do afundamento do geotêxtil.

O afundamento máximo (δ_{max}) era conhecido por meio da medida M obtida pelo paquímetro digital, sendo necessária a subtração da espessura (t) da lâmina de aço que era de 0,45 mm, como mostra a Equação 4.16 (Figura 4.29).

$$\delta_{max} = M - t \quad (4.16)$$

Onde: δ_{max} = afundamento máximo do geotêxtil;

M = afundamento obtido pelo paquímetro; e

t = espessura da lâmina de aço (0,45 mm).

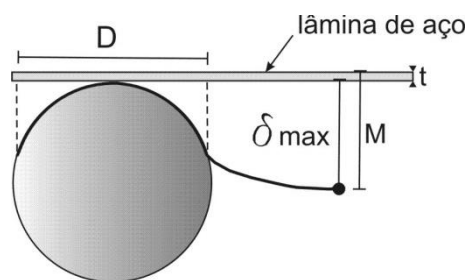


Figura 4. 29 – Esquema de medição do afundamento máximo do geotêxtil nos vazios das esferas de aço.

Nos ensaios em que foram utilizadas EA como material drenante, o δ_{max} do geotêxtil era obtido em pontos fixos, localizados no encontro das medianas do triângulo equilátero formado a cada três esferas, como já mostrado na Figura 4.26. Entretanto, nos ensaios em que foram utilizados os agregados graúdos, estes pontos foram escolhidos aleatoriamente. Nos arranjos de esferas de 10 mm de diâmetro com a relação de $e/d = 0; 0,17$ e $0,33$, os valores de δ_{max} foram obtidos apenas nos pontos centrais, devido à quantidade superior de pontos de

afundamento em relação ao caso das esferas de aço de 18 mm. Nos demais arranjos, todos os valores σ_{max} foram obtidos.

A confecção do molde de gesso para registrar o afundamento máximo do geotêxtil foi necessária para comparar a forma do afundamento do geotêxtil e os valores encontrados com aqueles obtidos nos ensaios onde se empregou a folha de alumínio. Foram realizados dois ensaios para obtenção da forma de afundamento. O primeiro ensaio teve seu arranjo de base formado por esferas de aço de 18 mm de diâmetro, espaçamento entre esferas de 18 mm, tensão vertical de 200 kPa, e empregou o geotêxtil de 200 g/m² (G1). O segundo ensaio teve a mesmo arranjo de base, tensão vertical de 1000 kPa, e utilizou o geotêxtil de 600 g/m² (G3). A Figura 4.30 mostra um esquema da sobreposição dos materiais na base do permeâmetro nos ensaios que se empregou o gesso.

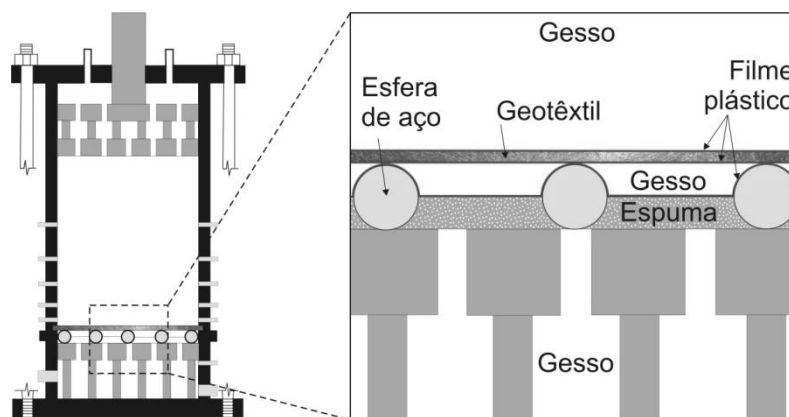


Figura 4.30 – Esquema de sobreposição dos materiais na base do equipamento nos ensaios que empregaram gesso.

As áreas de contato entre o agregado graúdo/esferas de aço e o filtro geotêxtil foram obtidas por meio de fotografias digitais tiradas da base do equipamento ao término do ensaio e analisadas em programas computacionais apropriados (*Auto Cad 2007* e *CorelDraw Graphics Suite 12*), como mostra a Figura 4.31.

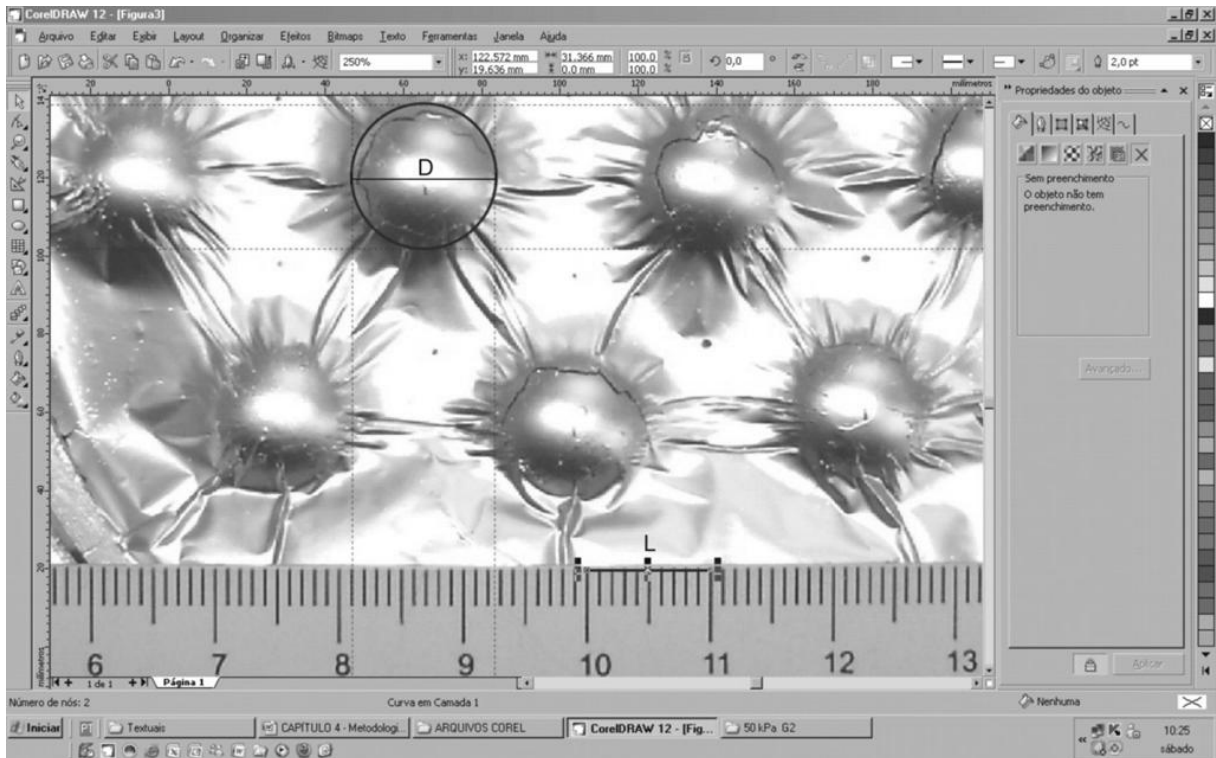


Figura 4.31 – Interface do programa e *CorelDraw Graphics Suite 12* na obtenção das áreas de contato entre as esferas de aço e o geotêxtil.

A Figura 4.32 mostra um esquema dos arranjos de EA e o número de afundamentos (δ_{max}) e áreas de contato calculados.

A Tabela 4.8 apresenta a quantidade de medições realizadas para obter o δ_{max} e as áreas de contato nos ensaios AAC.

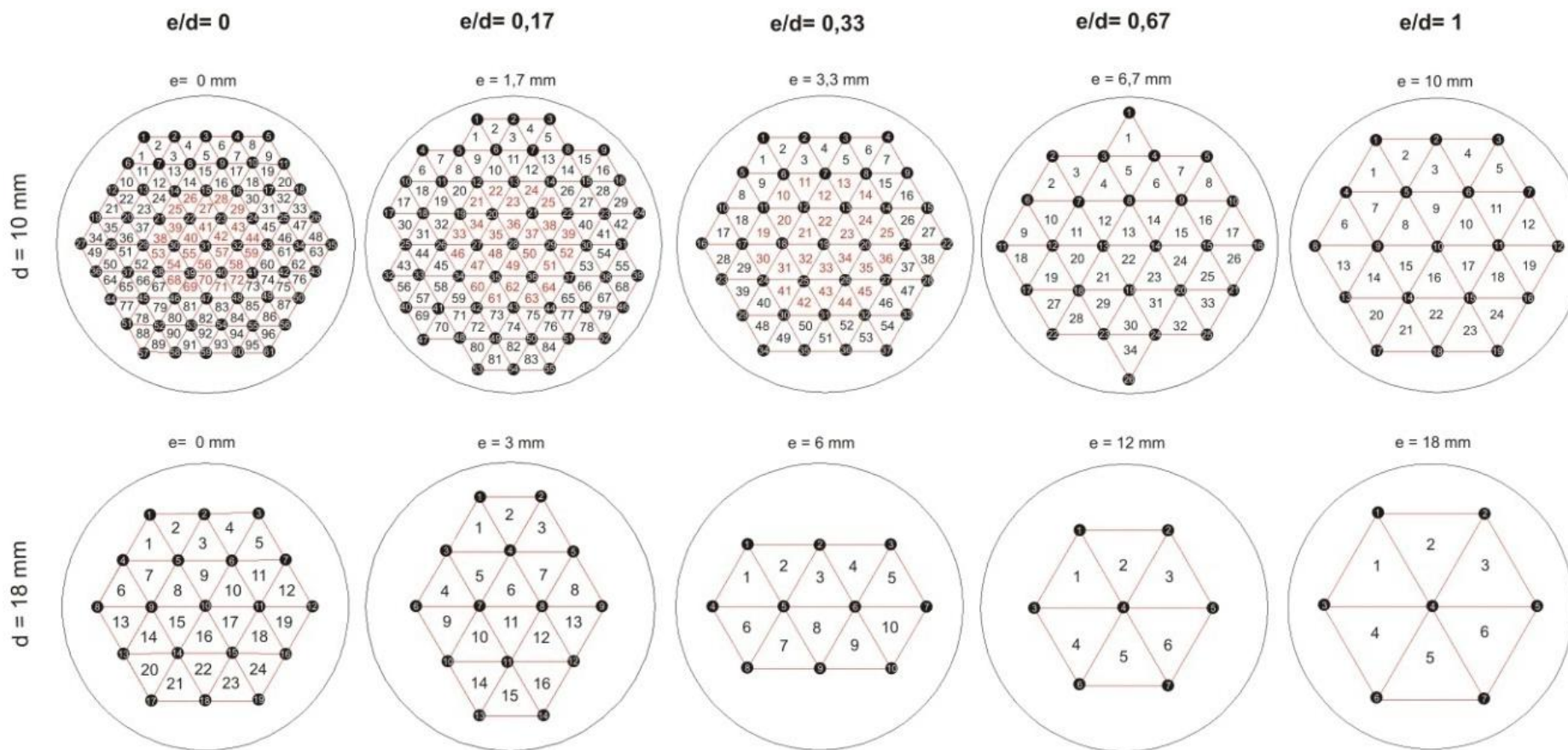


Figura 4.32 – Esquema dos arranjos de esferas de aço e o número de pontos onde o afundamento máximo e as áreas de contato foram obtidos.

Tabela 4.8 – Número de medições realizadas para obter o afundamento máximo e a área de contato nos ensaios AAC.

d (mm)		e/d				
		0	0,17	0,33	0,67	1
10	δ_{max} / AC	24/61	24/55	24/37	34/26	24/19
18		24/19	26/14	10/10	6/7	6/7
Pedrisco (peneiramento) (9,5 mm)		13/49				
Pedrisco selecionado (peneiramento e forma de grãos) (9,5 mm)		13/56				
Brita selecionada (peneiramento e forma de grãos) (19 mm)		10/30				

Notas: d = diâmetro da esfera de aço, δ_{max} = afundamento máximo, AC = área de contato, e = espaçamento entre esferas.

De posse das variáveis principais, δ_{max} e D , outras variáveis foram obtidas. A área de contato entre o geotêxtil e o material drenante foi denominada como *área fechada de fluxo* (A_f), sendo o somatório das áreas de contato individuais das esferas (a_i). A *área aberta de fluxo* (A_a) foi definida como a área do geotêxtil que não está em contato direto com o material drenante e passível de fluxo, sendo a diferença entre a área total (A_t) (área interna passível de ser atravessada pelo fluxo) e a área fechada, como mostra a Figura 4.33. A *razão de área aberta* (RAA) foi definida como a razão entre A_a/A_t , dada em porcentagem (%).

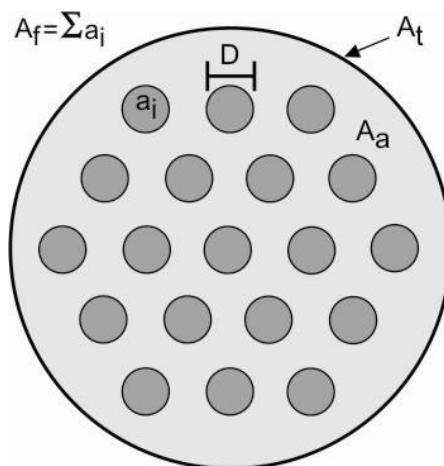


Figura 4.33 – Esquema das variáveis obtidas no ensaio especial para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente e da área de contato entre eles.

4.4 GRANULOMETRIA A LASER

O granulômetro a laser é uma ferramenta de fácil operação e possui uma rápida execução, na escala dos segundos. Este equipamento foi estudado por Manso (1999) e está disponível no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

Este equipamento permite que seja avaliada a qualidade de seus resultados por meio de duas maneiras distintas: o grau de obscuração provocado pelas partículas na luz laser detectada; e o resíduo do ajuste está relacionado as funções estatísticas a serem utilizadas nas análises das medições feitas pelo equipamento. O modelo do equipamento, MASTERSIZER, recomenda uma faixa de obscuração aceitável para o ensaio entre 10 % a 30 %. (Manso, 1999). Valores elevados na faixa de obscuração podem representar a sobreposição do sombreamento, provocado por duas ou mais partículas no detector. Já, valores pequenos podem prejudicar as condições de espalhamento da luz refletida pelas partículas. O resíduo do ajuste deve ser mantido abaixo de 1 % e deve-se optar pela função estatística que resulte em valores mais próximos a este.

O granulômetro a laser foi utilizado nesta pesquisa para analisar o material (microesferas de vidro) passante através do filtro geotêxtil, do material impregnado no filtro e o coletado em pontos estratégicos da amostra de microesferas. A Tabela 4.9 apresenta um resumo dos locais onde foram coletas as microesferas para a realização das análises granulométricas.

Tabela 4.9 – Resumo dos locais onde foram coletas as microesferas de vidro para a realização das análises granulométricas.

Ensaio		Microesferas de vidro			
		passantes através do geotêxtil	impregnadas no geotêxtil	interface do geotêxtil	topo da amostra (quebra dos grãos)
GMP	Ensaio com fluxo	X	X	X	X
	Ensaio com impacto	X	X	X	
ACA					

Notas: GMP = ensaio para verificação da granulometria do material passante através da abertura de filtração do geotêxtil, ACA = ensaio especial para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente, X = ensaio realizado.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 ENSAIO ESPECIAL PARA A OBTENÇÃO DO AFUNDAMENTO DO FILTRO GEOTÊXTIL NOS VAZIOS DO MATERIAL DRENANTE SUBJACENTE E DA ÁREA DE CONTATO ENTRE ELES

Os ensaios especiais para a obtenção do *afundamento* do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente e da *área de contato* entre eles (AAC), realizados no equipamento de Ensaio GR, permitiram o estudo do comportamento filtrante do geotêxtil não tecido sob diferentes condições de apoio. A aplicação de tensão vertical no sistema formado pelo solo/filtro/material drenante, visou, em laboratório, uma simulação mais próxima das condições de contorno que os filtros se encontram no campo.

Foram realizados ensaios com geotêxteis não tecidos, agulhados de poliéster, variando-se a gramatura, tensão vertical e o arranjo do material drenante formado por esferas de aço ou agregado graúdo. Tal variação nos arranjos do material drenante é caracterizada pela modificação do diâmetro (d) das esferas de aço, seu espaçamento (e) e da forma e condições de superfície do material. Estas condições de contorno permitiram analisar a influência da gramatura do geotêxtil, do diâmetro da esfera, espaçamento e da tensão vertical no afundamento máximo (δ_{max}) do geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente, na área de contato entre eles (obtida por meio do diâmetro da área de contato, D) e na sua deformação aproximada (ε).

Os geotêxteis utilizados foram G1, G2 e G3, com gramaturas de 200, 400 e 600 g/m² respectivamente. As tensões verticais aplicadas no sistema foram de 50, 100, 200, 500, 1000 e 2000 kPa. As esferas de aço empregadas tiveram 10 e 18 mm diâmetro e seus espaçamentos foram tais que a relação espaçamento entre esferas/diâmetro da esfera (e/d) fosse de: 0; 0,17; 0,33; 0,67 e 1. Os agregados utilizados foram o pedrisco e a brita 1, com diâmetros médios de 10 e 19 mm, e foram selecionados de duas maneiras: por meio de peneiramento e por meio de peneiramento com a posterior seleção da forma dos grãos, conforme explicado no Capítulo 4.

O registro do afundamento máximo (δ_{max}) e do diâmetro de contato (D) foi feito sobre uma folha de papel alumínio colocada subjacente ao geotêxtil e sobreposta ao material drenante. O afundamento foi obtido por meio de um paquímetro digital e o diâmetro de contato por meio de fotografias digitais que eram analisadas em programas computacionais apropriados.

A Tabela 5.1 apresenta o resumo do programa de ensaios realizados nesta pesquisa. O Apêndice A (Tabela A.1 a A.14) apresenta, detalhadamente, os diâmetros de contato e os afundamentos máximos destes ensaios.

Tabela 5.1 – Resumo dos ensaios para obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da área de contato entre eles.

Ensaio AAC													
	G1									G2	G3	G2	G3
	Tensão vertical (kPa)												
	d (mm)	e (mm)	e/d	50	100	200	500	1000	2000	1000	1000	50	50
EA	10	0	0	X	X	X	X	X	X	X			
		1,7	0,17	X	X	X	X	X	X	X			
		3,3	0,33	X	X	X	X	X	X	X			
		6,7	0,67	X	X	X	X	X	X	X			
		10	1,00	X	X	X	X	X	X	X			
	18	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X		
		3	0,17	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		6	0,33	XX	XX	XX	XX	XX	XX	X	X		
		12	0,67	X	X	X	X	X	X	X	X		
		18	1,00	X	X	XG	X	X	X	X	XG	X	X
AG	Pedrisco (10mm)	Selecioneado (peneiramento)				X							
		Selecioneado (peneiramento e forma de grãos)				X							
	Brita 1 (19mm)	Selecioneado (peneiramento e forma de grãos)				X							

Notas: AAC = ensaio especial para a obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante e da área de contato entre eles, G1 = geotêxtil com gramatura de 200 g/m², G2 = geotêxtil com gramatura de 400 g/m², G3 = geotêxtil com gramatura de 600 g/m², EA = esferas de aço, AG = agregado graúdo, d = diâmetro da esfera, e = espaçamento entre esferas, X = ensaio realizado com a folha de alumínio, G = ensaio realizado com molde de gesso.

Diante da obtenção do afundamento máximo do geotêxtil por meio do paquímetro digital, em pontos pré-determinados, procurou-se repetir três vezes, em alguns ensaios, a medição desta variável, verificando a precisão das leituras. Maiores detalhes são apresentados no Apêndice B.

Nestes ensaios foi realizada a densificação da amostra de microesferas de vidro, até a amostra atingir um índice de vazios de aproximadamente 0,6. O Apêndice C (Tabelas C.1 a C.6) apresenta, para todos os ensaios realizados, a altura inicial e final das amostras de microesferas de vidro, antes e depois do processo de densificação (L_{oc} e L_{fc}), altura das amostras no final do ensaio (L_{fe}), e o índice de vazios antes e depois do processo de densificação (e_o e e_f).

5.1.1 ENSAIO COM ESFERAS DE AÇO

Os diâmetros de contato (D) foram mais dificilmente obtidos nos ensaios realizados com baixas tensões verticais (50 e 100 kPa) e na tensão vertical máxima (2000 kPa), quando comparados aos obtidos nas tensões intermediárias (200, 500, 1000 kPa). As baixas tensões verticais, os diâmetros de contato foram registrados com menos definição no papel alumínio, principalmente quando foram utilizadas as esferas de aço com 10 mm de diâmetro, independente do espaçamento entre elas. Na máxima tensão vertical, a obtenção de D foi prejudicada pelo dano causado pela alta tensão vertical aplicada no papel alumínio, como mostra a Figura 5.1.

Os ensaios realizados com as esferas de aço e a folha de alumínio/molde de gesso possibilitaram observar o ponto de δ_{max} entre as esferas que está localizado no encontro das medianas do triangulo equilátero (baricentro) formado a cada três esferas. A Figura 5.2a apresenta o molde de gesso com o registro do afundamento do geotêxtil nos vazios das esferas de aço. Um esquema da forma final do geotêxtil após a deformação é apresentada na Figura 5.2b. Os valores dos afundamentos (em relação ao plano que passa pelos pontos de número 1 ao 7) nos pontos indicados na Figura 5.2a, são mostrados na Tabela 5.2. Os afundamentos denominados δ_x estão localizados entre as esferas externas do arranjo e os afundamentos δ_y estão localizados entre as esferas externas e centrais.

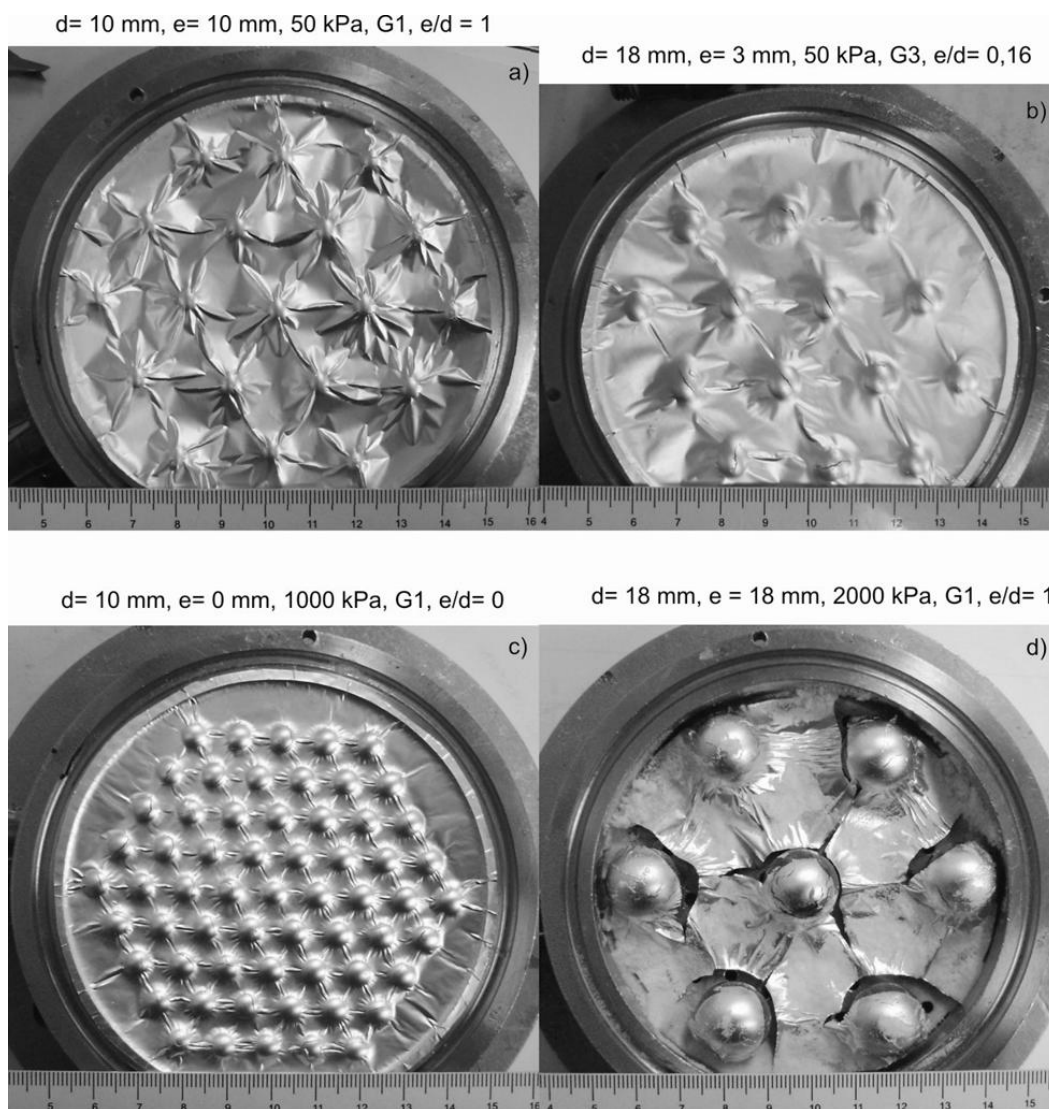


Figura 5.1 – Registro do afundamento do geotêxtil nos vazios das esferas de aço e da área de contato entre eles em diversas condições de contorno registrados na folha de alumínio: a) esferas com 10 mm de diâmetro e baixa tensão vertical, b) esferas com 18 mm de diâmetro e baixa tensão vertical, c) esferas com 10 mm de diâmetro e alta tensão vertical e d) esferas com 18 mm de diâmetro e alta tensão.

Os valores dos afundamentos máximos encontrados por meio da forma gesso foram próximo aos encontrados com a folha de alumínio para ambos os ensaios. Esta diferença pode ser atribuída à mudança na granulometria do material ensaio (microesferas de vidro e gesso) e à influência da rigidez à tração do alumínio. De acordo com Gomes *et al.* (1994) a rigidez secante a 50 % da tensão de ruptura ($J_{50\%}$) da folha de alumínio com 0,03 mm de espessura é de 30,63 kN/m. Lembrando que a espessura da folha de alumínio empregada na presente pesquisa foi de 0,01 mm, estima-se então uma rigidez à tração da folha de alumínio da ordem de 10,2 kN/m, ou cerca de 1/3 da rigidez à tração do geotêxtil de 200 g/m² ensaiado. Assim, a rigidez à tração do alumínio teria pouca influência no afundamento do geotêxtil. Outra

abordagem possível seria considerar que o afundamento obtido seria àquele que seria medido para um geotêxtil equivalente, com rigidez ligeiramente maior, devido à influência da folha de alumínio (rigidez real do geotêxtil somada à rigidez da folha de alumínio). Note-se também que a influência relativa da rigidez da folha de alumínio deverá ser menor ainda, uma vez que o confinamento do geotêxtil provoca um aumento na sua rigidez à tração em relação ao valor de catálogo, obtido em ensaios de tração sem confinamento.

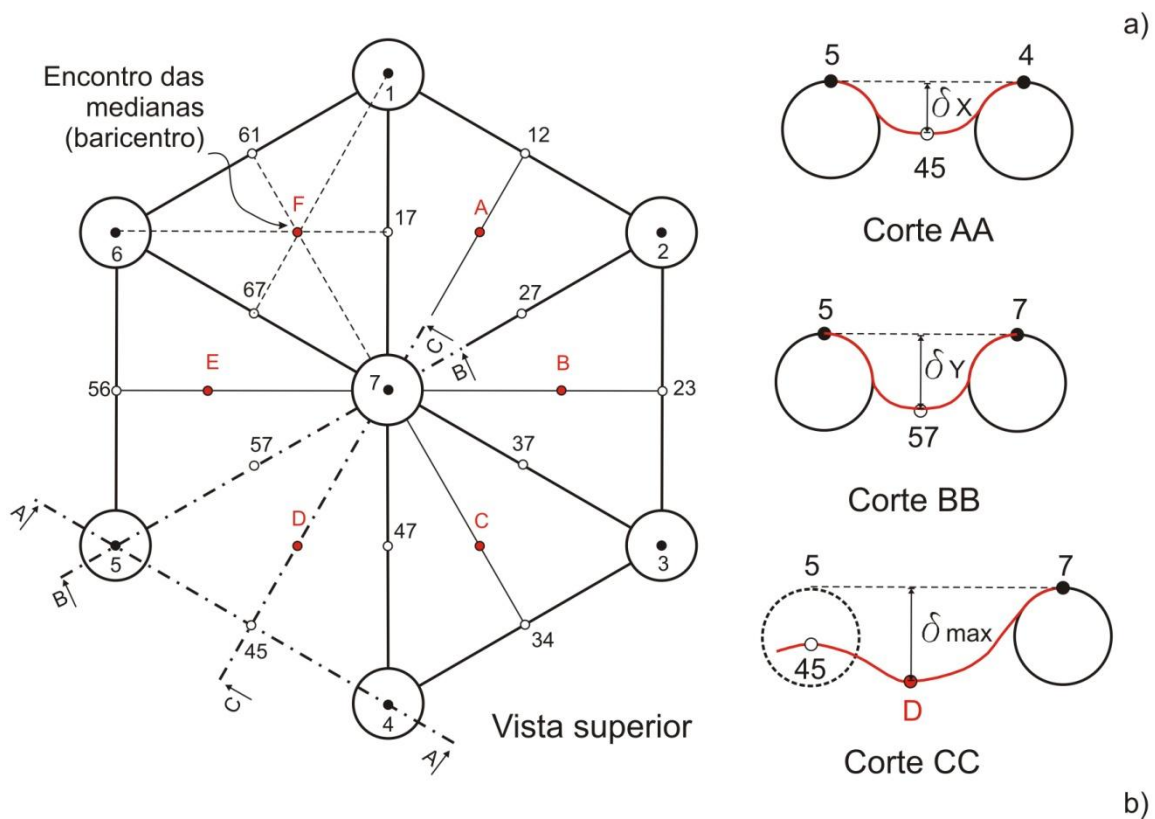
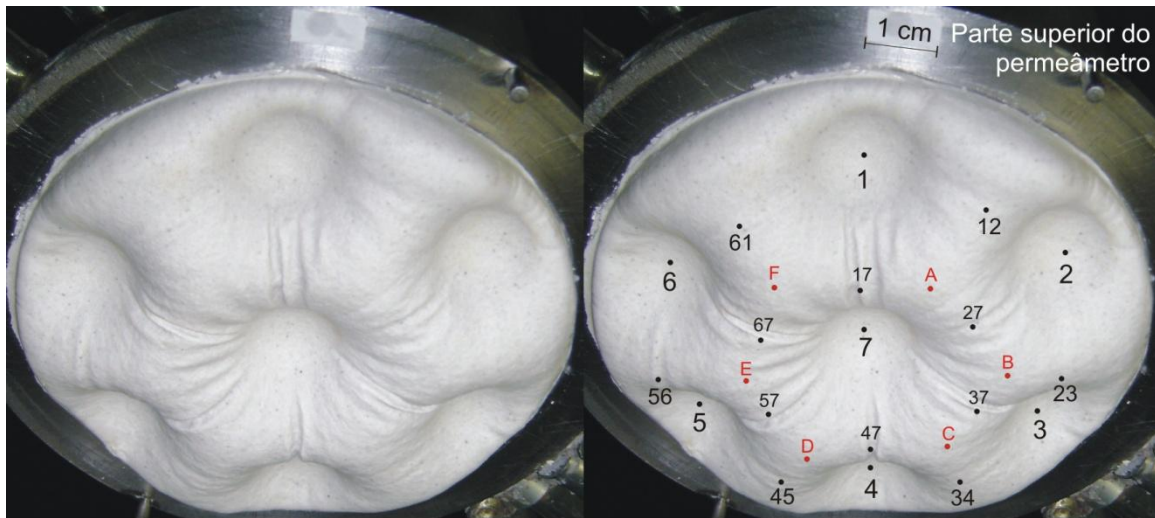


Figura 5.2 – Detalhe do registro do afundamento do geotêxtil no molde de gesso: a) forma de gesso deformado e b) esquema da forma final do geotêxtil após a deformação.

Tabela 5.2 – Afundamentos no molde de gesso.

d=18 mm, e/d= 1						
Geotêxtil, tensão vertical	Ponto	δ_x	Ponto	δ_y	Ponto	δ_{max}
G1, 200 kPa	12	6,66	17	8,65	A	9,21
	23	6,68	27	9,00	B	8,66
	34	7,58	37	7,76	C	8,79
	45	7,39	47	8,09	D	9,16
	56	7,25	57	8,53	E	9,06
	61	6,88	67	8,58	F	9,85
	Média:	7,07	–	8,44	–	9,12
Alumínio:	–	–	–	–	7,43	
G3, 1000 kPa	12	6,12	17	6,64	A	6,91
	23	5,76	27	5,75	B	6,2
	34	4,92	37	6,21	C	6,38
	45	5,5	47	5,49	D	6,24
	56	6,53	57	6,1	E	7,06
	61	6,86	67	5,87	F	7,28
	Média:	5,95	–	6,01	–	6,68
Alumínio:	–	–	–	–	7,68	

A obtenção dos afundamentos foi prejudicada também nos ensaios que empregaram as esferas de 18 mm de diâmetro, nas relações e/d de 0,33; 0,66 e 1 com a tensão vertical de 2000 kPa. Nesses ensaios, o alto carregamento e espaçamento entre esferas resultaram no dano do alumínio, não sendo possível, em alguns casos, a obtenção do afundamento, como mostra a Figura 5.3.

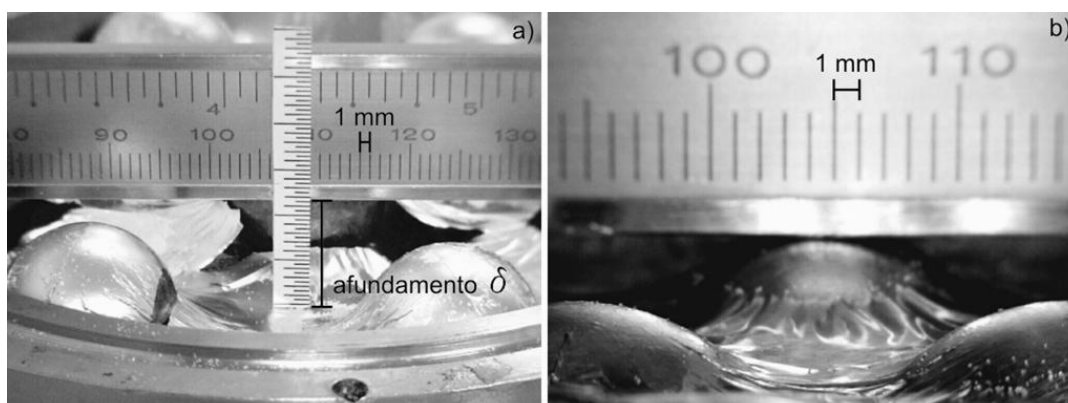


Figura 5.3 – Detalhe do registro do afundamento do geotêxtil nos ensaios realizados com esferas com 18 mm de diâmetro e com tensão vertical de 2000 kPa: a) máximo espaçamento, $e/d = 1$ e b) mínimo espaçamento, $e/d = 0$.

No ensaio realizado na condição mais crítica, máximos diâmetro de esfera, espaçamento e tensão vertical ($d = 18 \text{ mm}$, $e = 18 \text{ mm}$ e 2000 kPa), observou-se o dano no geotêxtil localizado nas áreas de contato entre as esferas de aço e o geotêxtil. Este dano foi mais significativo no centro da amostra, devido à concentração de tensões verticais neste ponto, conforme mostra a Figura 5.4.

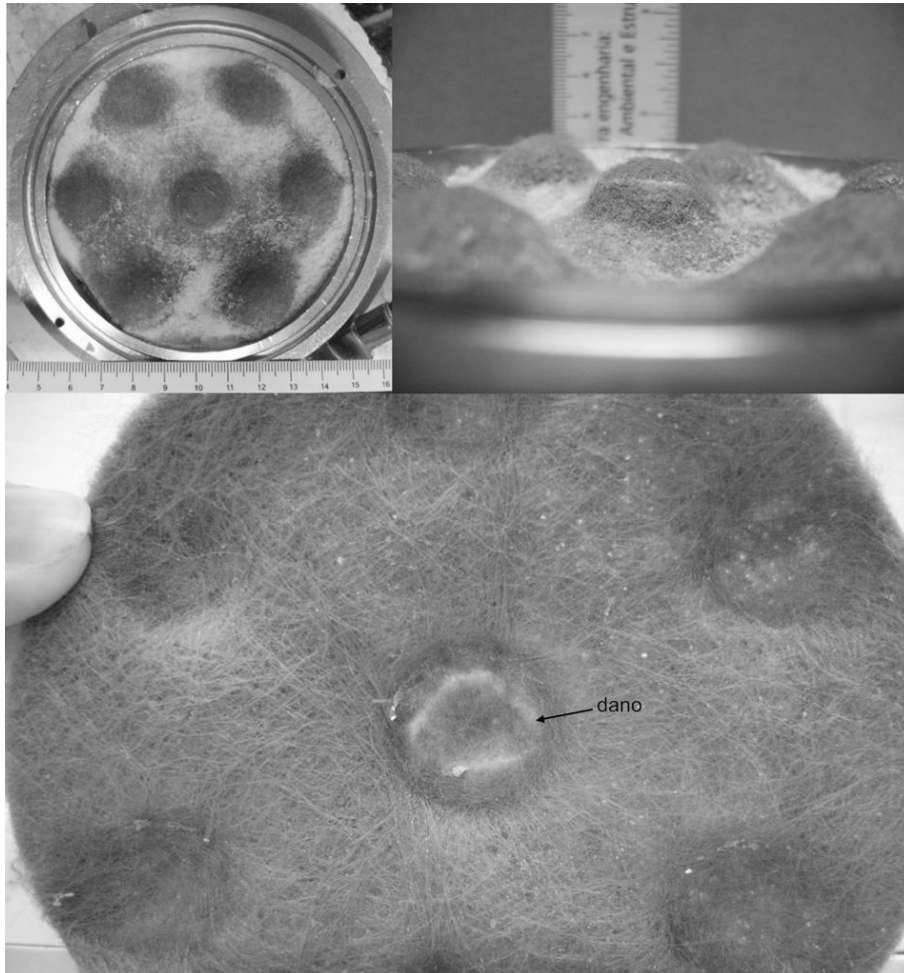


Figura 5.4 – Registro do afundamento do geotêxtil nos vazios das esferas de aço e da área de contato entre eles em diversas condições de contorno.

5.1.1.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO VERTICAL

Os ensaios realizados com o geotêxtil G1, esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro (d), espaçamentos entre esferas (e), tais que a relação (e/d) fosse de 0; 0,17; 0,33; 0,67 e 1 sob efeito das tensões verticais de 50, 100, 200, 500 1000 e 2000 kPa, permitiram observar o comportamento do afundamento máximo (δ_{max}), do diâmetro de contato (D), da área aberta de fluxo (A_a), área fechada de fluxo (A_f) e a Razão de Área Aberta (RAA) em relação as tensão verticais, como mostram as Figuras 5.5 a 5.8. Os valores do afundamento máximo e do

diâmetro de contato utilizados para a confecção dos gráficos apresentados neste capítulo são valores *médios*. O Apêndice D (Tabelas D.1 e D.5) apresenta o resumo das variáveis obtidas nos ensaios realizados.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os gráficos de afundamento *versus* tensão vertical. Pode-se observar, em geral, que os resultados obtidos nos ensaios que utilizaram o geotêxtil G1 e esferas de 10 e 18 mm de diâmetro, apresentaram uma relação direta entre o *afundamento* do geotêxtil nos vazios das esferas de aço e a *tensão vertical* aplicada. O afundamento foi maior com o aumento da tensão vertical, como era de se esperar. Os incrementos do afundamento entre as tensões verticais de 50 e 2000 kPa variaram de 72 a 84 % (dependendo do espaçamento) nos ensaios realizados com esferas de aço com $d = 10$ mm. No entanto, esta variação de incremento foi maior (50 a 153 %) nos ensaios com esferas com $d = 18$ mm. Este aumento do incremento do afundamento nas esferas com $d = 18$ mm pode ser explicado pelo aumento do diâmetro da esfera e seu afastamento, que originam maiores vazios entre as esferas e, conseqüentemente, maiores afundamentos.

Pode-se notar, também, que as maiores taxas de aumento do afundamento com a tensão vertical ocorrem para valores de tensões inferiores a 100 kPa, particularmente para valores de e menores ou iguais a 6 mm. Para tensões maiores (com exceção dos ensaios com grandes espaçamentos) a taxa de aumento do afundamento com a tensão é menor. Isso pode ser devido ao arqueamento da massa de micro-esferas de vidro, em decorrência do afundamento do geotêxtil no vazio entre partículas do material subjacente. Tal arqueamento é de menor intensidade, ou inviabilizado, para maiores espaçamentos entre esferas, o que fica particularmente evidenciado na Figura 5.6, para valores de e maiores que 6 mm.

Observa-se, preliminarmente, a influência do *espaçamento* no *afundamento*, apresentando uma relação direta entre eles. O afundamento do geotêxtil é maior com o aumento do espaçamento. O incremento do afundamento tende a ser menor, a cada tensão vertical, com a redução do espaçamento entre as esferas de aço.

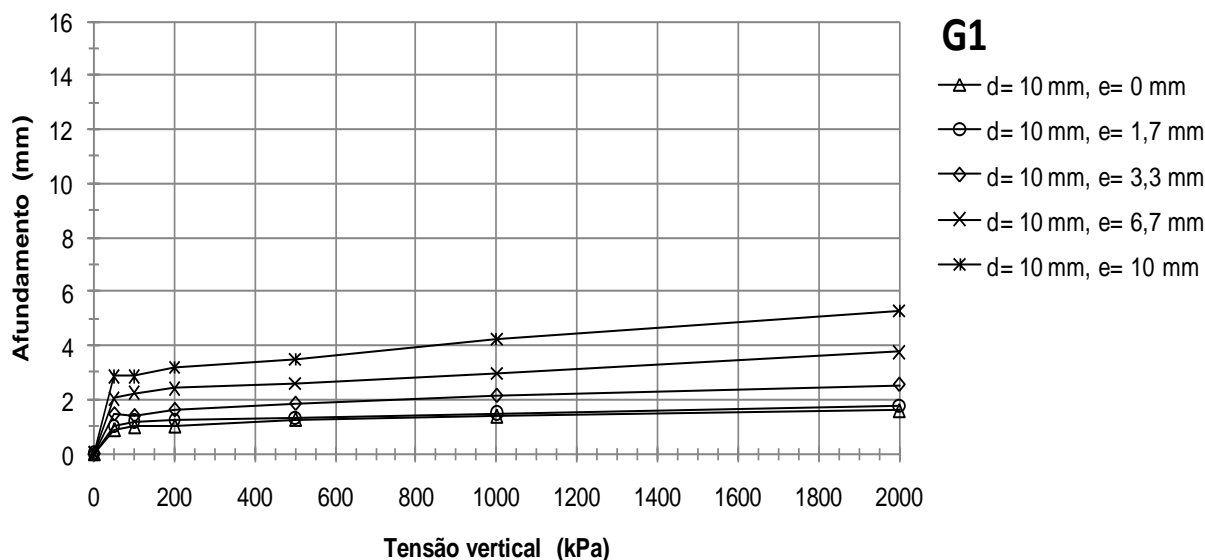


Figura 5.5 – Afundamento *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 10 mm de diâmetro em diversos afastamentos.

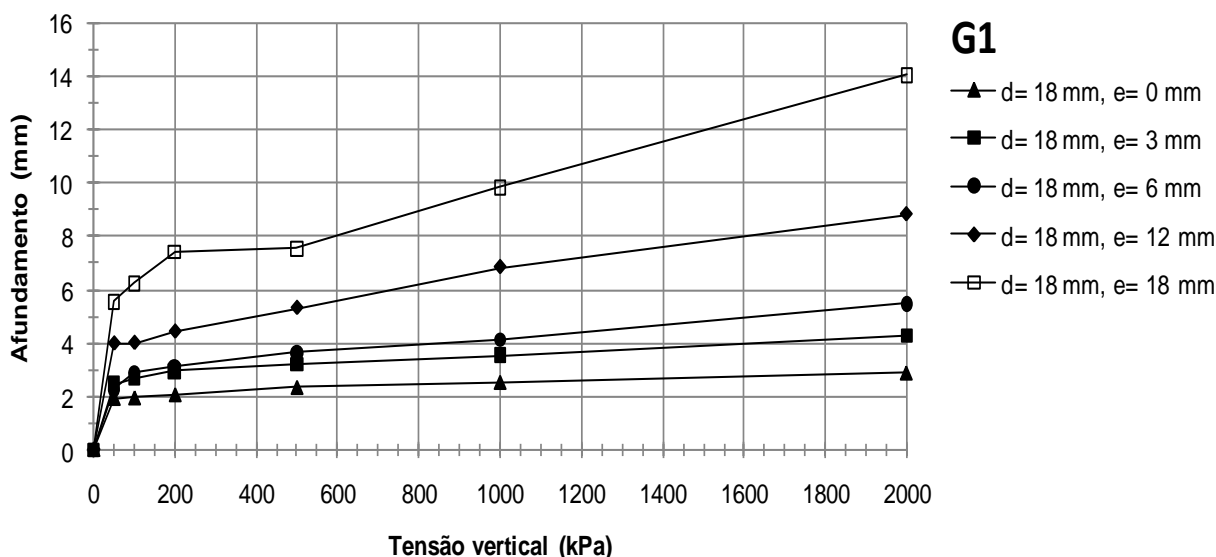


Figura 5.6 – Afundamento *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 18 mm de diâmetro em diversos afastamentos.

Em relação ao *diâmetro de contato* (D) entre o geotêxtil e as esferas de aço, os resultados dos ensaios realizados com o geotêxtil G1 e esferas de 10 e 18 mm de diâmetro mostraram o mesmo comportamento do afundamento com a tensão vertical aplicada (Figuras 5.7 e 5.8). O diâmetro de contato foi maior com o aumento da tensão vertical, como era de se esperar. Os incrementos de D entre as tensões verticais de 50 e 2000 kPa variaram de 84 a 108 % (dependendo do espaçamento) nos ensaios realizados com esferas com $d = 10$ mm. Nos ensaios que empregaram as esferas de $d = 18$ mm, esta variação foi de 78 a 104 %.

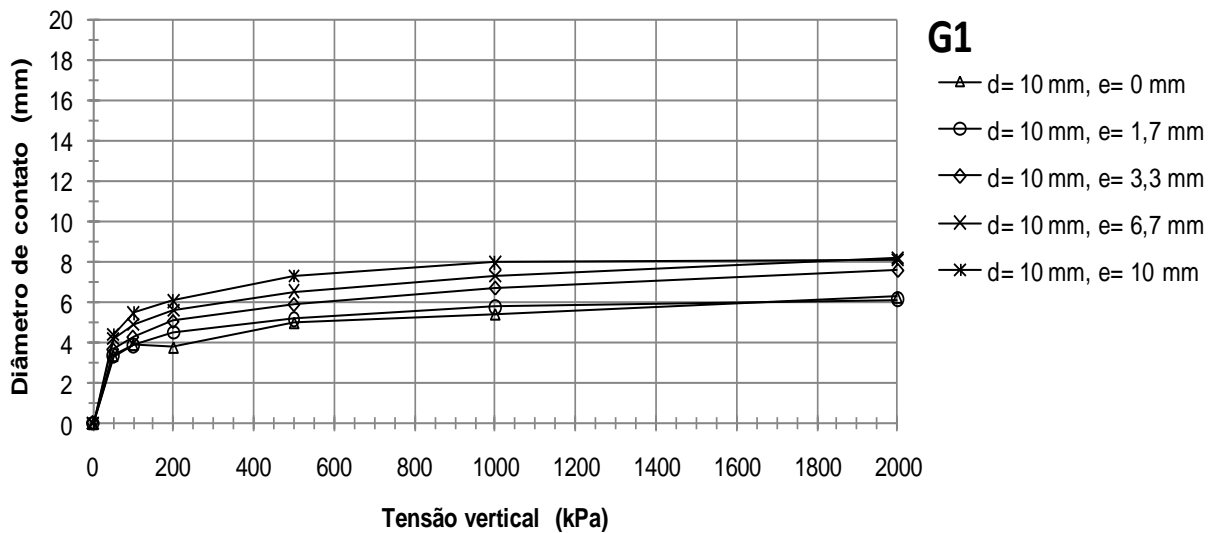


Figura 5.7 – Diâmetro de contato *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 10 mm de diâmetro em diversos afastamentos.

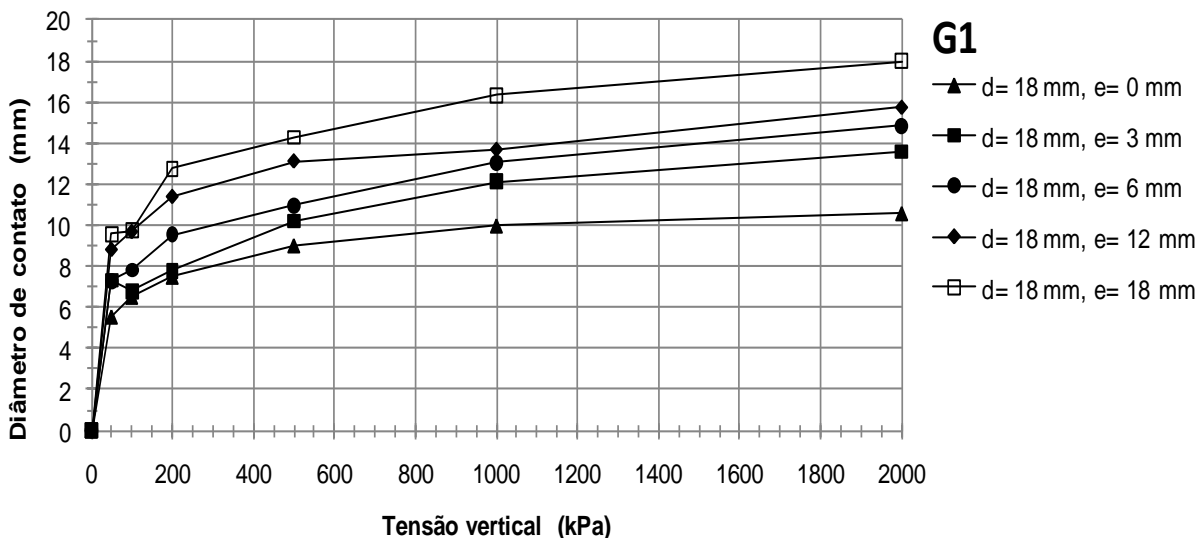


Figura 5.8 – Diâmetro de contato *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 18 mm de diâmetro em diversos afastamentos.

Observa-se, preliminarmente, a influência do *espaçamento* no *diâmetro de contato*, apresentando uma relação direta entre eles. O diâmetro de contato é maior com o aumento do espaçamento. Nos ensaios com esferas de aço com $d = 10$ mm, o incremento de D tende a ser maior para tensões verticais inferiores a 1000 kPa. Para tensões superiores a 1000 kPa, o valor de D tende a estabilizar-se. O mesmo comportamento não foi verificado com as esferas com $d = 18$ mm (Figura 5.8).

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam os gráficos da área aberta *versus* tensão vertical dos ensaios que empregaram esferas com 10 e 18 mm de diâmetro, respectivamente. Pode-se observar, em

geral, que os resultados obtidos apresentaram uma redução da *área aberta de fluxo* no geotêxtil com a *tensão vertical* aplicada, como era de se esperar. Isto é justificado pelo aumento da área de contato (*área fechada de fluxo* – A_f) entre o geotêxtil e as esferas de aço, com o aumento da tensão vertical. Os decréscimos da área aberta entre as tensões verticais de 50 e 2000 kPa variaram de 10 a 20 % (dependendo do espaçamento) nos ensaios realizados com esferas com $d = 10$ mm. Nos ensaios que empregaram as esferas de $d = 18$ mm, estes decréscimos foram de 14 a 22 %.

Observa-se, preliminarmente, a influência do *espaçamento* entre esferas na *área aberta* nos ensaios com $d = 10$ e 18 mm. Em geral, com esferas de aço com $d = 10$ mm, a área aberta aumenta com o aumento do espaçamento entre as esferas em todos os carregamentos. No caso das esferas com $d = 18$ mm, a mesma relação não pode ser observada. Isso é consequência do menor peso relativo da área obstruída pelo contato geotêxtil-esfera em comparação à área aberta total, que aumenta com o espaçamento entre esferas. Note-se que, mesmo a tensões de 2000 kPa, a área aberta variou entre 56 cm^2 e 62 cm^2 ($\sim 10,7\%$), para valores de e entre 0 e 10 mm, e para esferas com $d = 10$ mm. No caso das esferas com diâmetro (d) igual 18 mm, a 2000 kPa a área aberta variou entre 52 cm^2 e 58 cm^2 ($\sim 11,5\%$), para valores de e entre 0 e 18 mm. Para toda a faixa de variação de tensão vertical e diâmetro e espaçamento entre esferas, a área aberta variou entre 52 cm^2 e 72 cm^2 (esfera com $d = 18$ mm), ou seja, uma redução máxima de aproximadamente 28% em relação à área aberta inicial (72 cm^2).

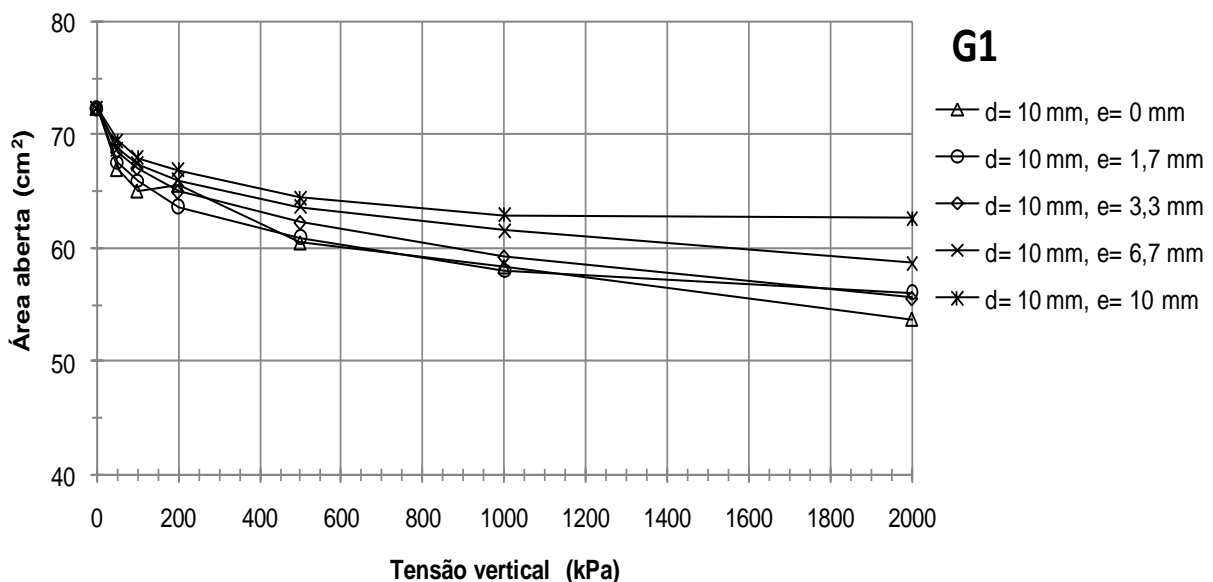


Figura 5.9 – Área aberta *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 10 mm de diâmetro em diversos afastamentos.

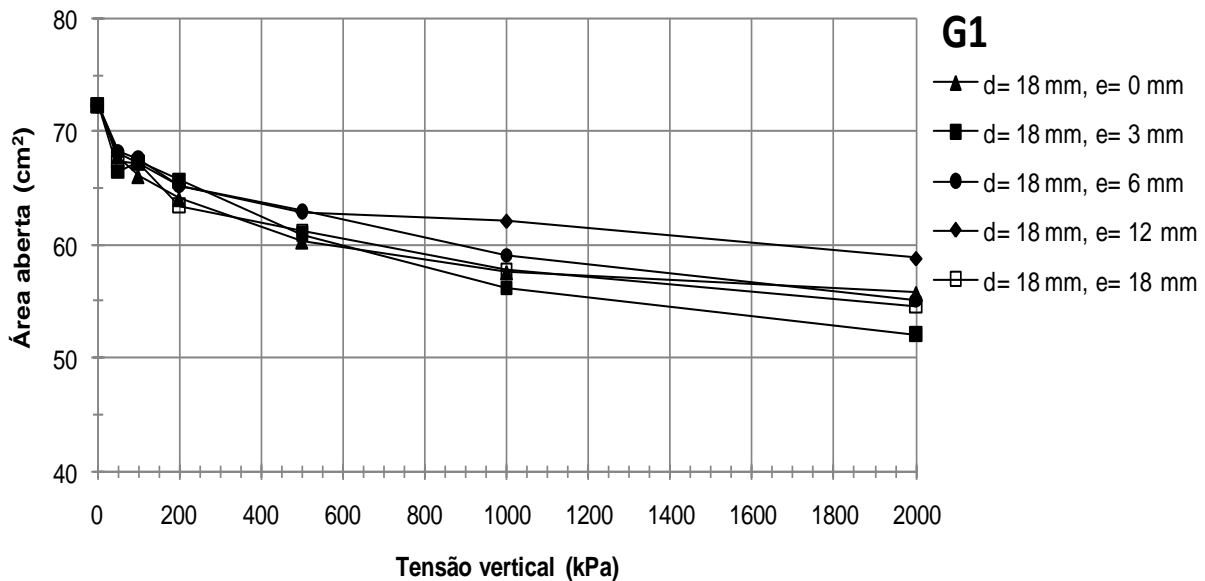


Figura 5.10 – Área aberta *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 sobre esferas de aço de 18 mm de diâmetro em diversos afastamentos.

5.1.1.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam os valores de δ_{max} , normalizados pelo diâmetro das esferas, *versus* e/d para tensões normais iguais a 50 kPa e a 2000 kPa. Em todos os carregamentos, o *afundamento* foi maior com o aumento do espaçamento, como anteriormente indicaram as Figuras 5.5 e 5.6. Este comportamento também é verificado nas Figuras 5.11 e 5.12. As curvas obtidas para as demais tensões verticais (100, 200, 500 e 1000 kPa) estão apresentadas no Apêndice E (Figuras E.1 a E.4). Os resultados nas Figuras 5.11 e 5.12 mostram que o diâmetro das esferas teve maior influência no valor de δ_{max}/d para valores elevados de tensões verticais.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam as curvas *afundamento/diâmetro da esfera versus* *espaçamento/diâmetro da esfera* para as esferas de aço com $d = 10$ e 18 mm, respectivamente, e para todas as tensões verticais. Estas curvas confirmam a relação direta entre o *afundamento* e o *espaçamento* entre as esferas.

Os incrementos de δ_{max}/d entre o *espaçamento* nulo entre as esferas ($e/d = 0$) e o *espaçamento* máximo ($e/d = 1$), nos ensaios com esferas de aço com $d = 10$ mm, variaram de 173 a 232 % (dependendo da tensão vertical), enquanto que nos ensaios com esferas com $d = 18$ mm, estes incrementos variaram de 186 a 384 %.

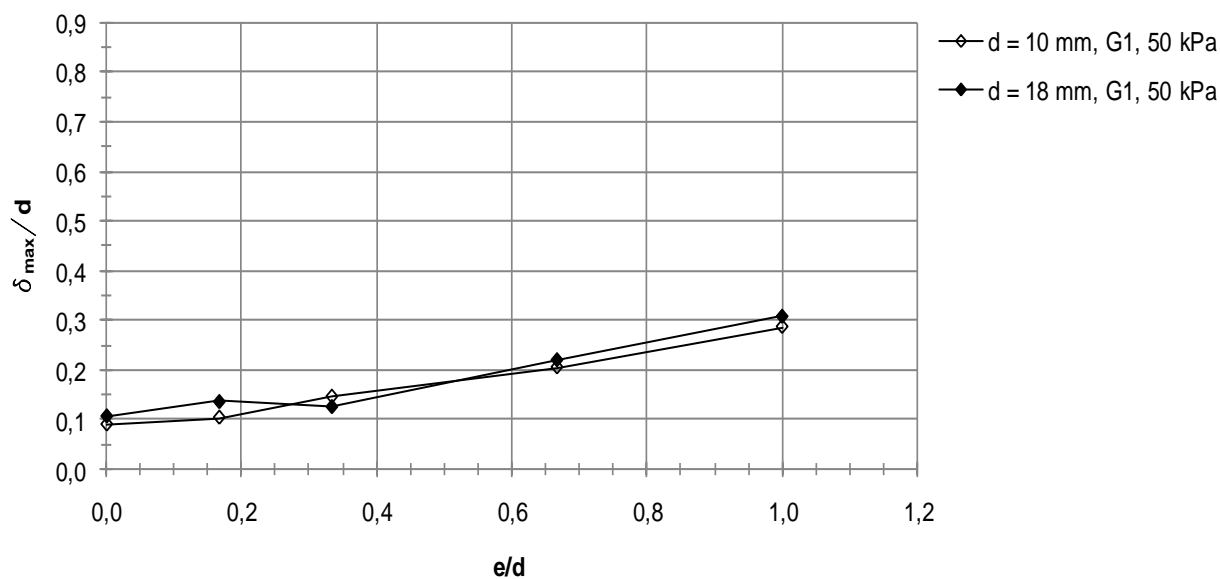


Figura 5.11 – Afundamento/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 50 kPa.

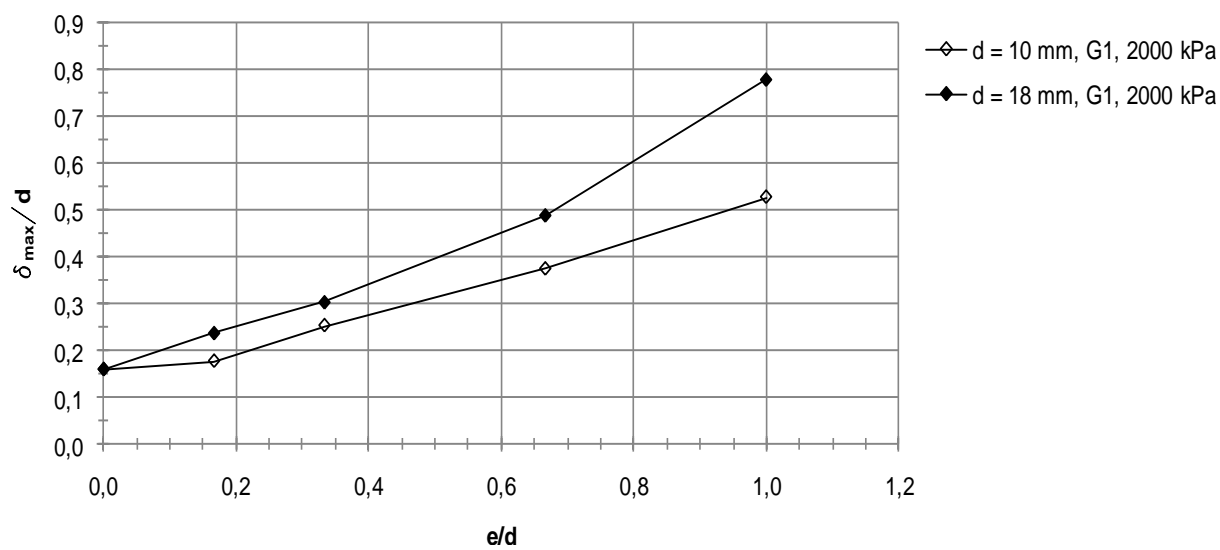


Figura 5.12 – Afundamento/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 2000 kPa.

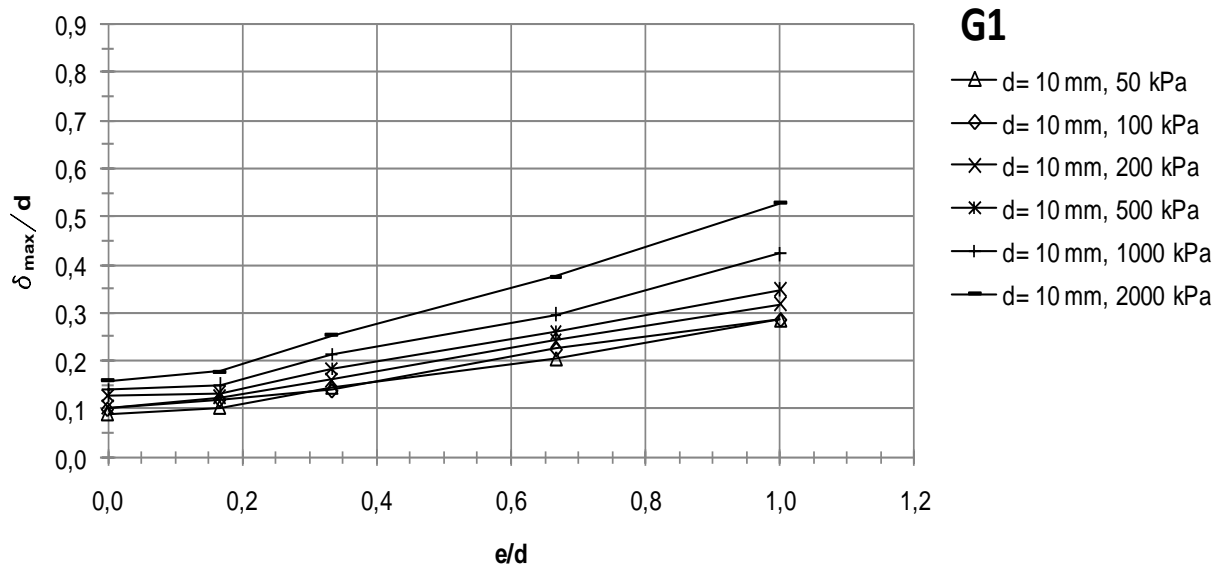


Figura 5.13 – Afundamento/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para a esfera de aço com 10 mm de diâmetro em todas as tensões verticais.

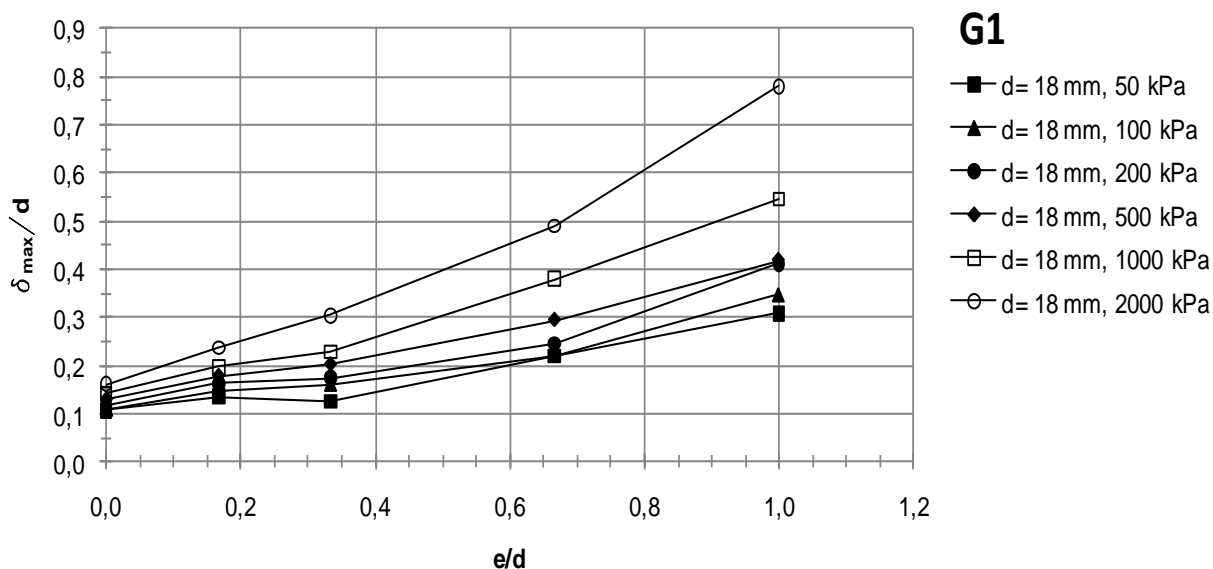


Figura 5.14 – Curva afundamento/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para a esfera de aço com 18 mm de diâmetro em todas as tensões verticais.

Em geral, o *diâmetro de contato* entre o geotêxtil e as esferas de aço aumentou com o aumento do espaçamento entre as esferas, para todos os valores de tensões verticais, como mostrado previamente nas Figuras 5.7 e 5.8 e comprovado nas Figuras 5.15 e 5.16. Estas figuras mostram as curvas diâmetro de contato/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para as tensões verticais variando entre 50 e 2000 kPa. Os incrementos de D/d entre o espaçamento nulo entre as esferas ($e/d = 0$) e o espaçamento máximo ($e/d = 1$), nos ensaios com esferas de aço com $d = 10$ mm, variaram de 30 a 60 % (dependendo da tensão vertical), enquanto nos ensaios com esferas com $d = 18$ mm, variaram

de 50 a 73 %. Observa-se, preliminarmente, a influência do *diâmetro da esfera* no *diâmetro de contato* nos ensaios com $d = 10$ e 18 mm. Em geral, o diâmetro de contato é maior com o aumento do diâmetro da esfera.

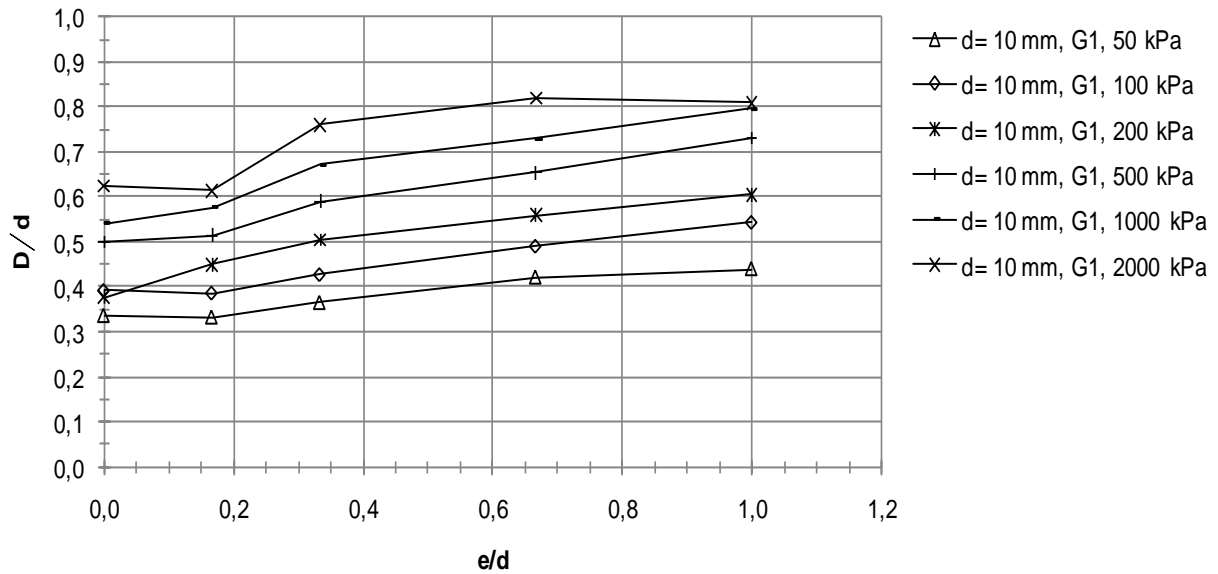


Figura 5.15 – Diâmetro de contato/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para as esferas de aço com diâmetro de 10 mm em todas as tensões verticais.

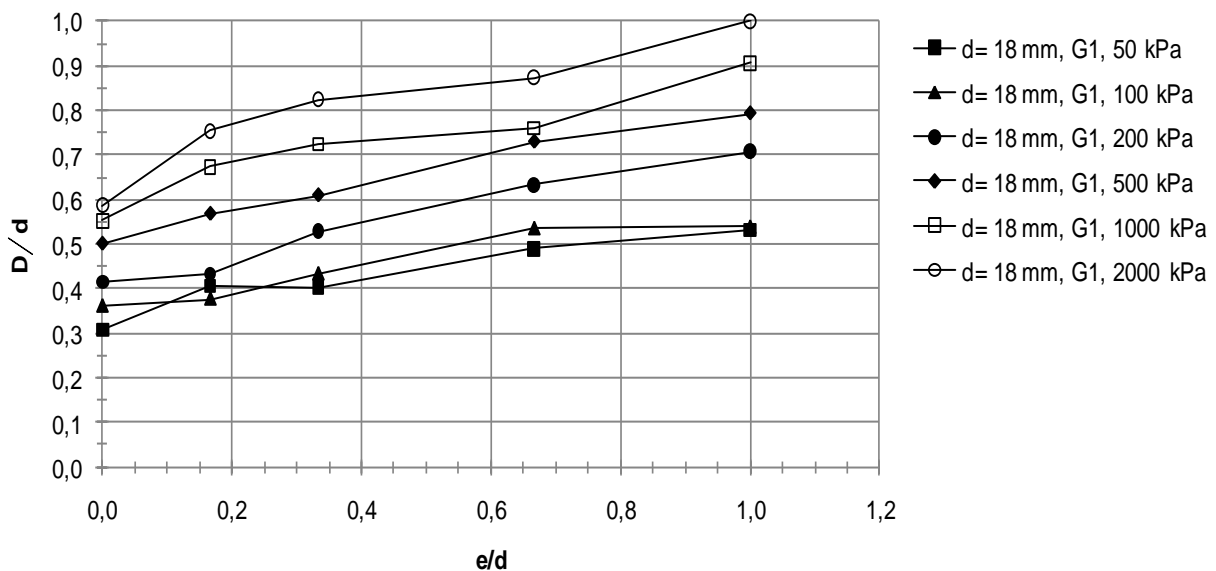


Figura 5.16 – Diâmetro de contato/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para as esferas de aço com diâmetro de 18 mm em todas as tensões verticais.

A Figura 5.17 mostra as relações área aberta/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro em todas as tensões verticais. Os resultados sugerem que a influência do espaçamento (e) entre as esferas é menos relevante

para a área aberta de fluxo, quando comparado ao afundamento e ao diâmetro de contato, principalmente para as baixas tensões verticais. Estas curvas comprovam a influência do espaçamento na área aberta nos ensaios com $d = 10$ e 18 mm, como mostrado, preliminarmente, nas Figuras 5.9 e 5.10.

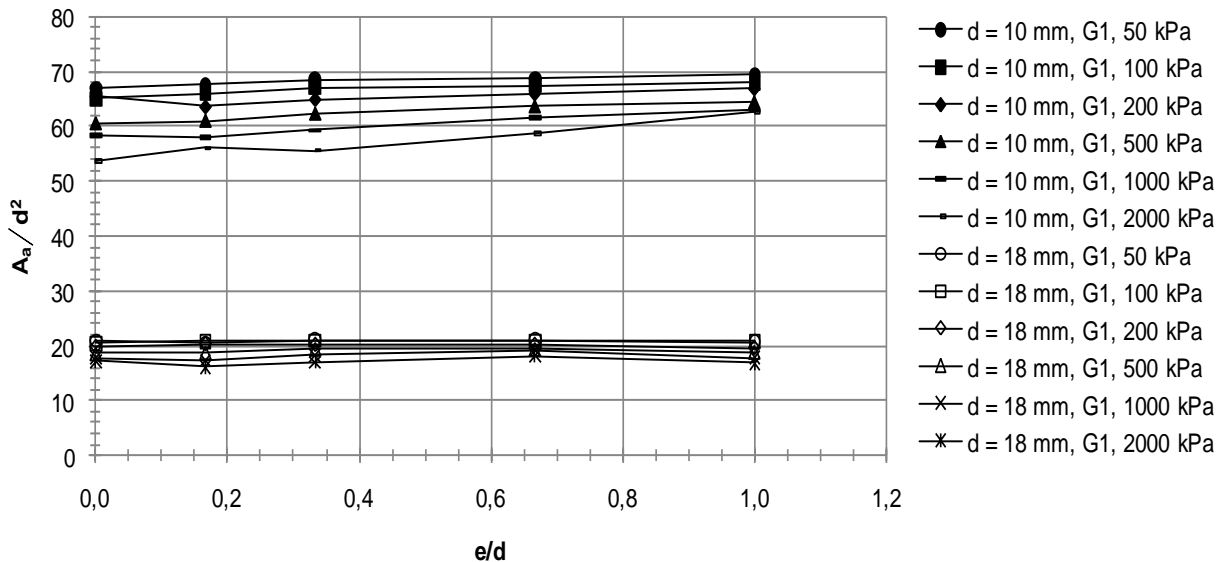


Figura 5.17 – Área aberta/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro em todas as tensões verticais.

Em geral, a *área aberta* aumenta levemente com o aumento do *espaçamento* entre as esferas de aço com $d = 10$ mm, sendo esse aumento mais significativo para as tensões verticais de 1000 e 2000 kPa. Para as esferas com $d = 18$ mm, a área aberta pode ser praticamente considerada como constante com o espaçamento para as tensões verticais de 50, 100, 200 e 500 kPa. Para as tensões de 1000 e 2000 kPa, as variações observadas podem ser creditadas a dispersões nos resultados de ensaios.

Os incrementos de A_a/d^2 entre o espaçamento nulo entre as esferas ($e/d = 0$) e o espaçamento máximo ($e/d = 1$), nos ensaios com esferas de aço com $d = 10$ mm, variaram de 2 a 17 % (dependendo da tensão vertical), enquanto nos ensaios com esferas com $d = 18$ mm, para os tensões verticais de 50, 100, 500 e 1000 kPa, os incrementos foram de 0,3 e 1,6 %.

5.1.1.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DA ESFERA

A influência do diâmetro (d) da esfera de aço no afundamento máximo (δ_{max}), no diâmetro de contato (D) e na área aberta (A_a), foi observada nos ensaios realizados com o geotêxtil G1,

esferas de aço (EA) de 10 e 18 mm de diâmetro (d), espaçamentos entre esferas (e) e tensões verticais de 50, 100, 200, 500 1000 e 2000 kPa.

O *afundamento* do geotêxtil nos vazios entre esferas de aço apresentou uma relação direta com o diâmetro da esfera de aço, para uma mesma tensão vertical e relação espaçamento/diâmetro da esfera (e/d). O afundamento foi maior com o aumento do diâmetro da esfera de aço, como mostra a Figura 5.18.

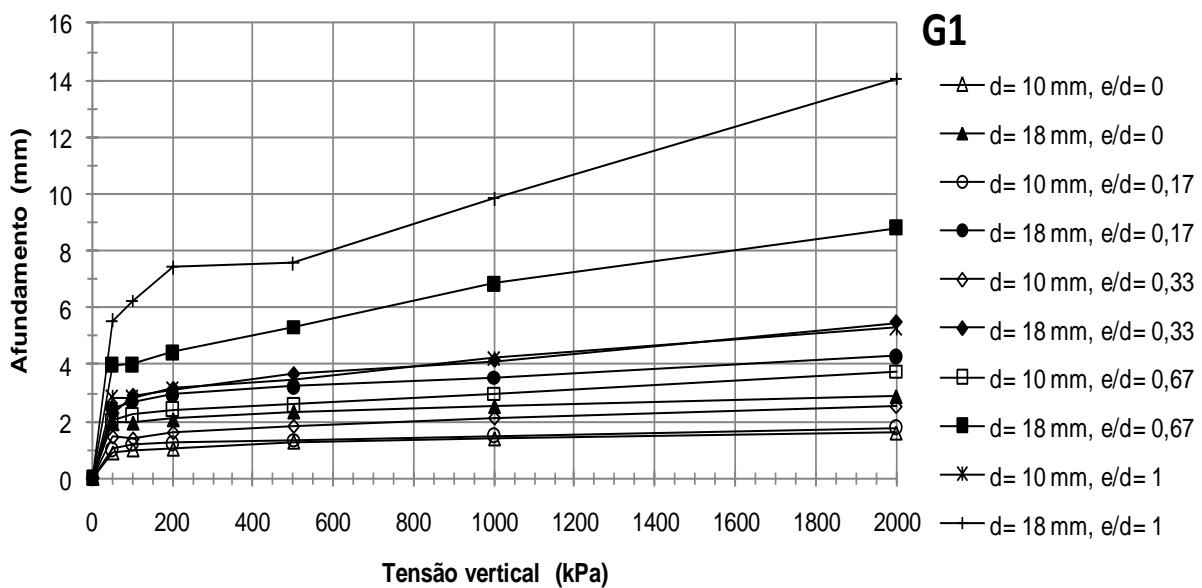


Figura 5.18 – Afundamento *versus* tensão vertical para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro em todos os espaçamentos.

Os incrementos de afundamento, entre as tensões verticais de 50 e 2000 kPa, para as esferas com $d = 10$ mm variaram de 72 a 85 % (dependendo do espaçamento), e para as esferas com $d = 18$ mm, estes incrementos variaram de 33 a 60 %. Para cada espaçamento, os incrementos de afundamento foram maiores nas esferas de aço com $d = 18$ mm, quando comparadas às EA com $d = 10$ mm, exceto para $e/d = 0$, onde as esferas com $d = 10$ mm apresentaram um incremento de 79 % e as esferas com $d = 18$ mm, 50 %.

O *diâmetro de contato* (D) entre o geotêxtil e as esferas de aço apresentou uma relação direta com o diâmetro da esfera, para uma mesma tensão vertical e relação espaçamento/diâmetro da esfera (e/d). O diâmetro de contato foi maior com o aumento do diâmetro da esfera, como mostra a Figura 5.19.

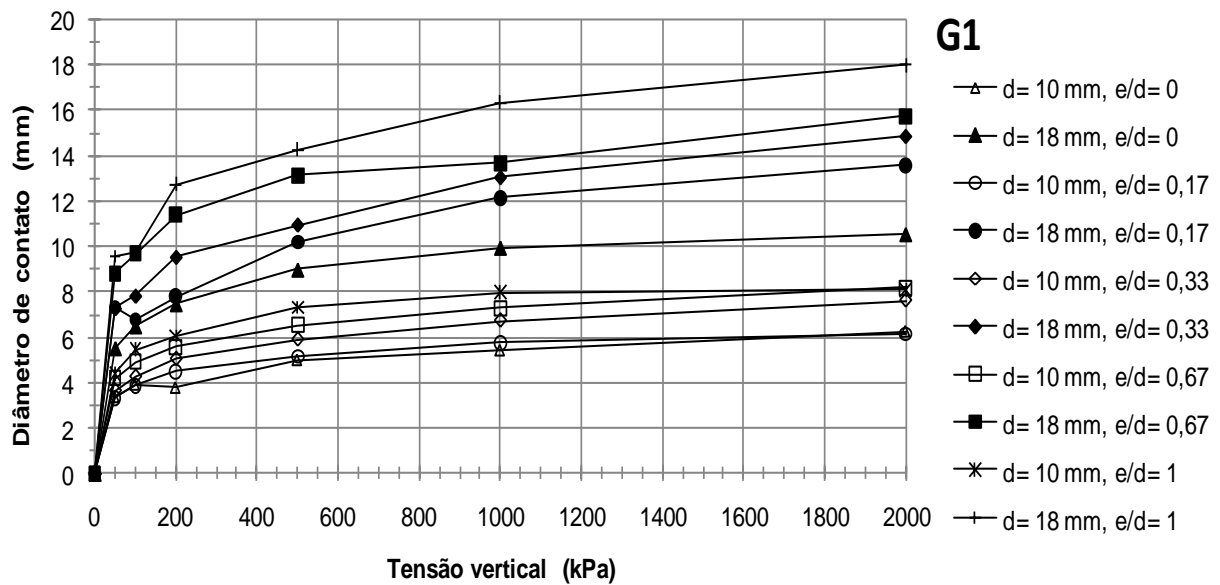


Figura 5.19 – Diâmetro de contato *versus* tensão vertical para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro em todos os espaçamentos.

Os incrementos de diâmetro de contato, entre as tensões verticais de 50 e 2000 kPa, para as esferas com $d = 10$ mm variaram de 84 a 108 % (dependendo do espaçamento), e para as esferas com $d = 18$ mm, estes incrementos variaram de 78 a 104 %. Os incrementos de afundamento, para cada espaçamento, nas esferas de aço com $d = 10$ e 18 mm foram próximos um dos outros, apresentando, nas esferas com $d = 10$ e 18 mm, uma média de incrementos de 91 e 89 %, respectivamente.

As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam as curvas área aberta *versus* tensão vertical para as esferas de 10 e 18 mm e para relações espaçamento/diâmetro da esfera $e/d = 0$ e 1, respectivamente. Os resultados obtidos mostraram que a *área aberta* não variou com d quando o espaçamento das esferas foi mínimo ($e/d = 0$). No entanto, para o espaçamento máximo ($e/d = 1$), a área aberta foi maior para as esferas com $d = 10$ mm, em todas as tensões verticais, como mostra a Figura 5.21. O diâmetro de contato é menor nas esferas de aço com $d = 10$ mm e, conseqüentemente, a área aberta de fluxo tende a ser maior que a obtida para $d = 18$ mm para maiores valores de tensão normal.

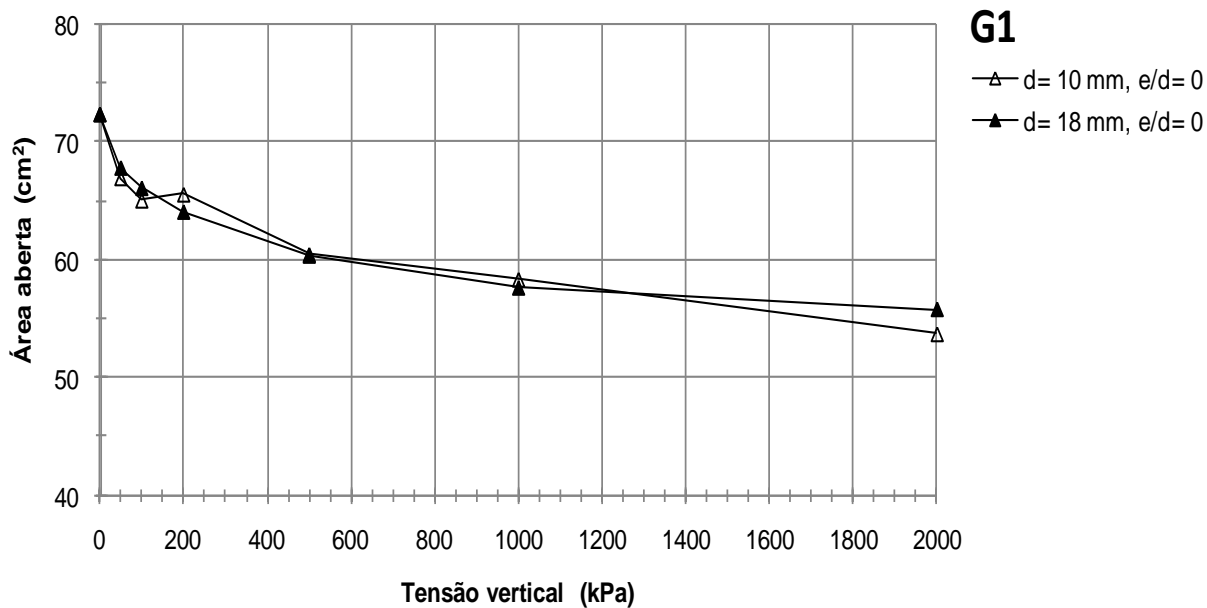


Figura 5.20 – Área aberta *versus* tensão vertical para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro com espaçamento mínimo.

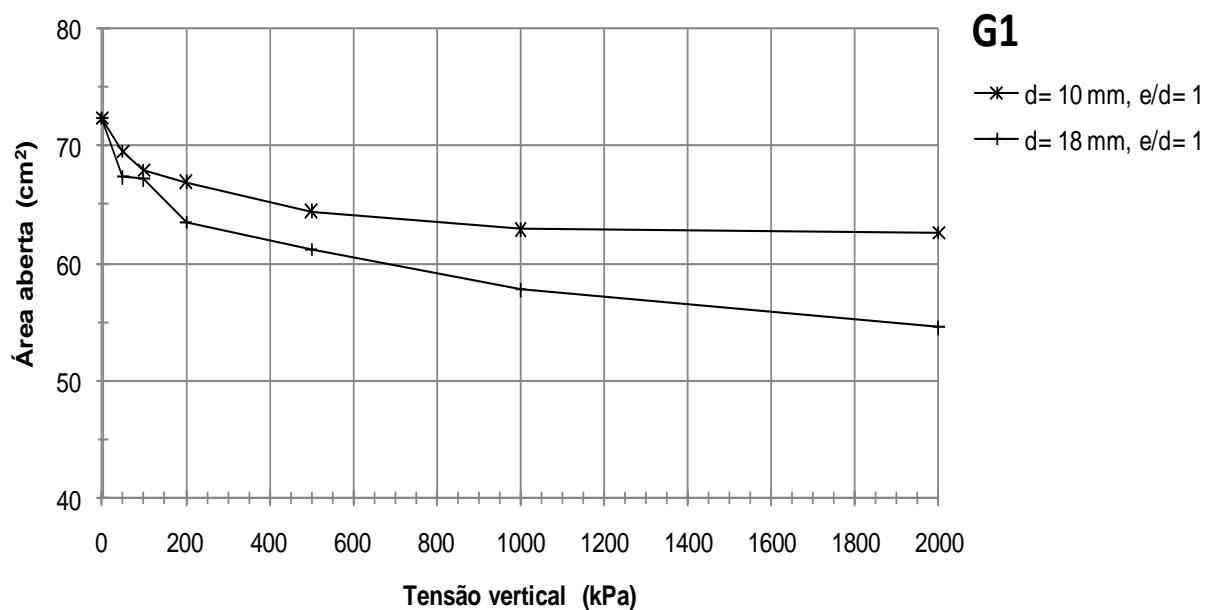


Figura 5.21 – Área aberta *versus* tensão vertical para as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro com espaçamento máximo.

5.1.1.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GRAMATURA

A análise da influência da gramatura no afundamento máximo (δ_{max}), no diâmetro de contato (D) e na área aberta (A_a) foi realizada com base nos resultados dos ensaios que empregaram os geotêxteis G1, G2 e G3, esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro (d), espaçamento variável entre esferas (e) e tensões verticais de 50 e 1000 kPa.

Os ensaios para a verificação da influência da *gramatura* do geotêxtil no *afundamento* sob tensões verticais baixas (50 kPa) foram realizados apenas com as esferas de 18 mm de diâmetro, como mostra a Figura 5.22. O geotêxtil G1 foi empregado em todos os espaçamentos entre esferas de aço ($e/d = 0; 0,17; 0,33; 0,67$ e 1). Para o geotêxtil G2 e G3, os ensaios realizados tiveram espaçamentos normalizados (e/d) entre esferas iguais a 0,17 e 1. Os resultados mostraram que para a tensão de 50 kPa, o afundamento foi maior com a redução da gramatura do geotêxtil.

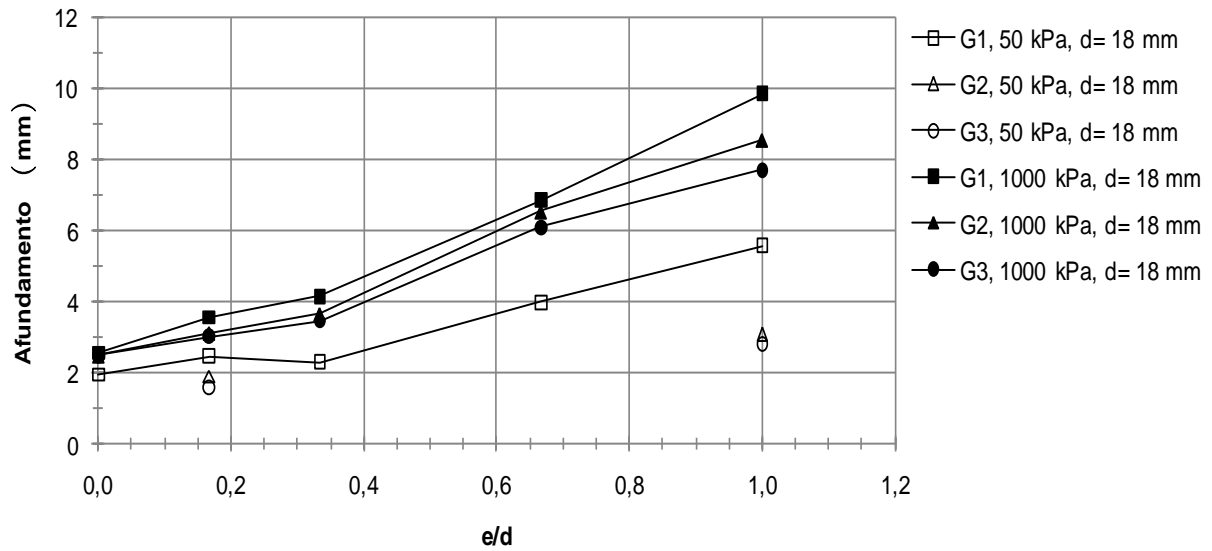


Figura 5.22 – Influência da gramatura no afundamento do geotêxtil nos vazios entre as esferas de aço com 18 mm de diâmetro com diversos espaçamentos.

Para as altas tensões (1000 kPa) foram utilizadas as esferas de aço com 10 e 18 mm de diâmetro em todos os espaçamentos, destacando-se que o geotêxtil G3 não foi empregado no ensaio realizado com esferas com $d = 10$ mm. A Figura 5.23 mostra a influência da gramatura no afundamento do geotêxtil para a tensão de 1000 kPa (esferas com $d = 10$ mm), que é similar a observada para a tensão de 50 kPa, ou seja, o afundamento foi maior com a redução da gramatura para ambos os diâmetros de esfera de aço. Este comportamento pode ser explicado devido ao geotêxtil de menor gramatura ser mais deformável, se acomodando mais facilmente aos vazios entre esferas.

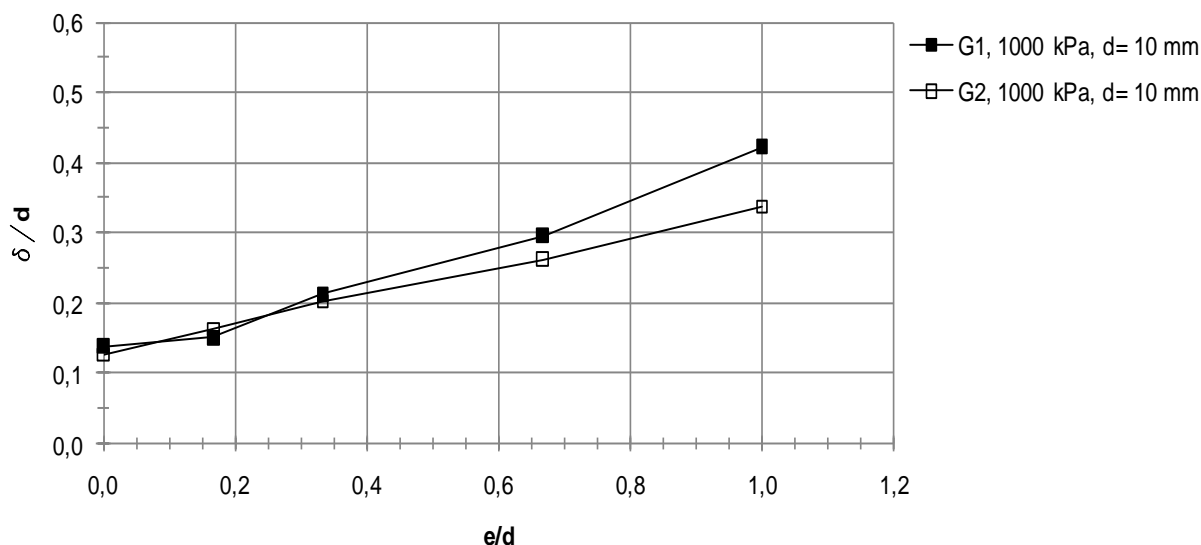


Figura 5.23 – Influência da gramatura no afundamento do geotêxtil nos vazios das esferas de aço com 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 1000 kPa.

A influência da *gramatura* no *diâmetro de contato D* entre o geotêxtil e as esferas de aço foi obtida por meio das mesmas condições de contorno dos ensaios que verificaram a influência da gramatura no afundamento do geotêxtil. A Figura 5.24 apresenta a variação do diâmetro de contato com a relação espaçamento/diâmetro das esferas, para os geotêxteis G1, G2 e G3, nos carregamentos de 50 e 1000 kPa (esferas com $d=18$ mm). O diâmetro de contato foi maior com a redução da gramatura do geotêxtil. Isso pode ser explicado, também, pela maior *deformabilidade* do geotêxtil sobre as esferas de aço quanto menor a sua gramatura, aumentando, desta forma, a área de contato entre o geotêxtil e as EA.

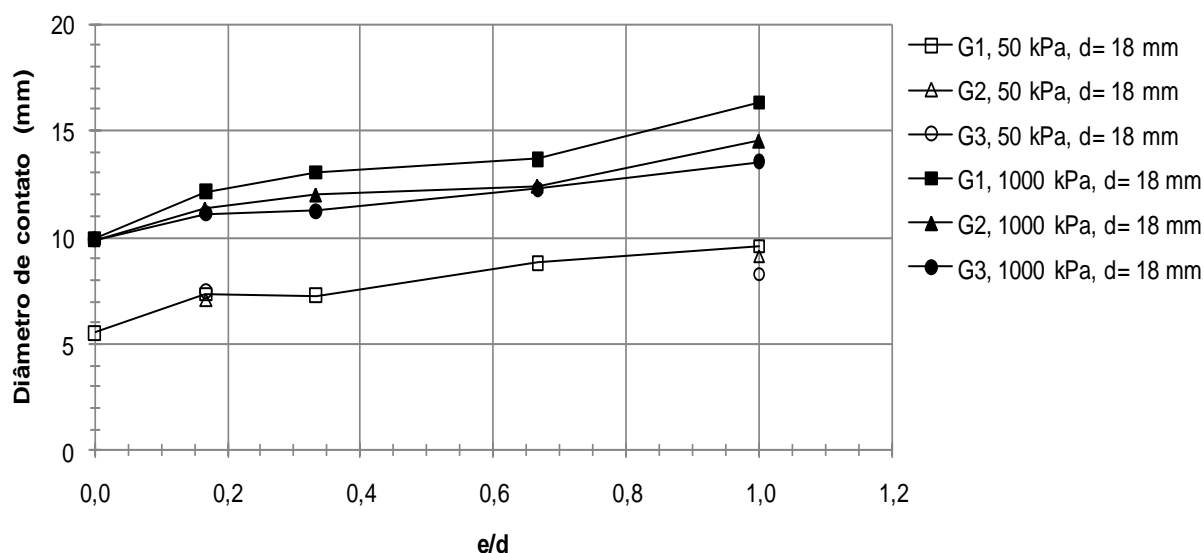


Figura 5.24 – Influência da gramatura no diâmetro de contato entre o geotêxtil e as esferas de aço com 18 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 50 e 1000 kPa.

Os resultados obtidos para altas tensões (1000 kPa), tiveram comportamento distintos dependendo do diâmetro da esfera de aço. Quando empregadas esferas de aço com $d = 18$ mm, o diâmetro de contato aumentou com a redução da gramatura. No entanto, para as esferas com $d = 10$ mm, esta relação foi contrária, houve um leve aumento do diâmetro de contato devido ao aumento da gramatura para todos os espaçamentos, como mostra a Figura 5.25. Nesse caso, a espessura do geotêxtil pode chegar a quase à metade do diâmetro da esfera. Assim, as esferas de aço com $d = 10$ mm afundam mais no geotêxtil de maior gramatura nos pontos de contato, provocando um maior envolvimento da esfera pelo geotêxtil e um leve aumento na área de contato entre eles.

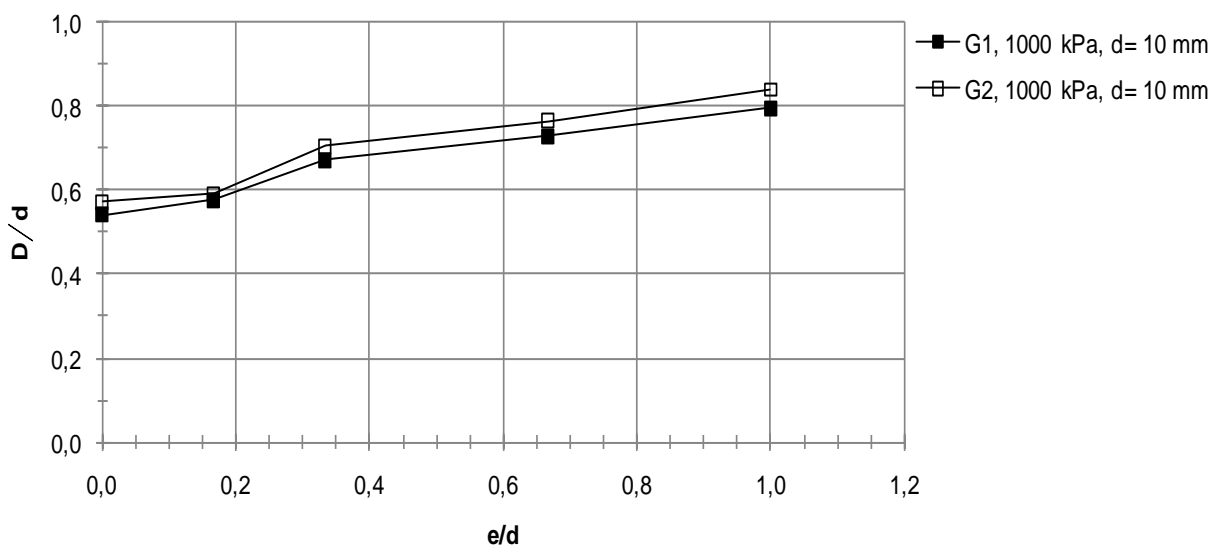


Figura 5.25 – Influência da gramatura no diâmetro de contato entre o geotêxtil e as esferas de aço com 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 1000 kPa.

A influência da gramatura na *área aberta de fluxo* é apresentada nas Figuras 5.26 e 5.27. Para a tensão de 50 kPa, a área aberta foi pouco influenciada pela gramatura. Para a tensão vertical de 1000 kPa, para esferas de aço com $d = 18$ mm (Figura 5.26), a área aberta de fluxo aumenta ligeiramente com a gramatura. Isto pode ser explicado pela redução do diâmetro de contato D e, conseqüentemente, da área fechada para esta condição de contorno. Para as esferas com $d = 10$ mm a área aberta praticamente não foi influenciada pela gramatura, para os geotêxteis ensaiados (G1 e G2), como mostra a Figura 5.27.

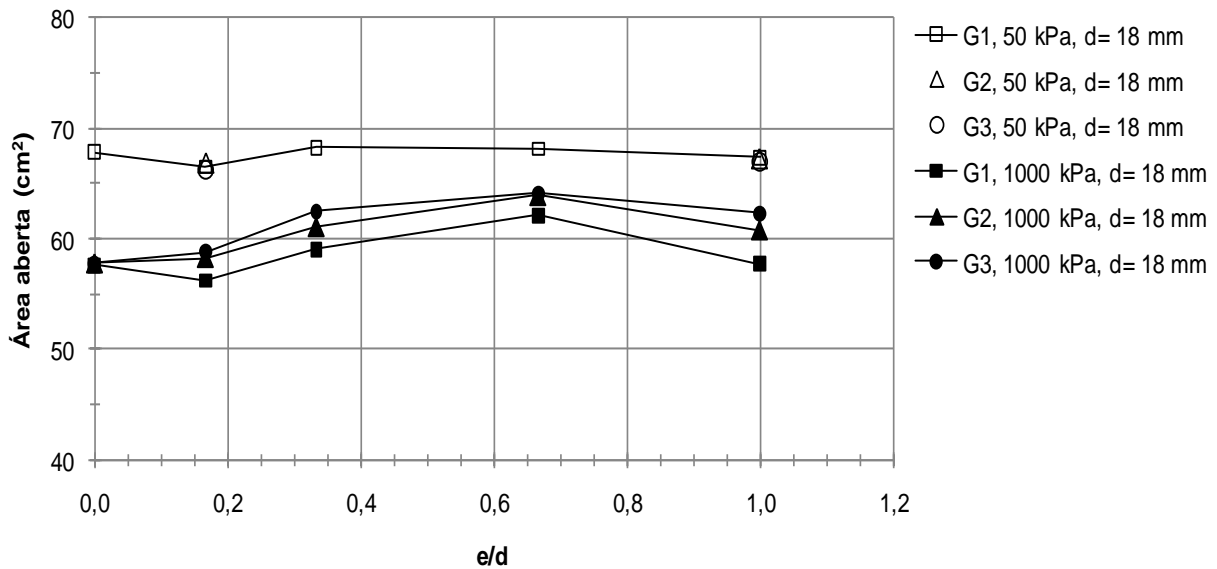


Figura 5.26 – Influência da gramatura na área aberta de fluxo, empregando as esferas de aço com 18 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 50 e 1000 kPa.

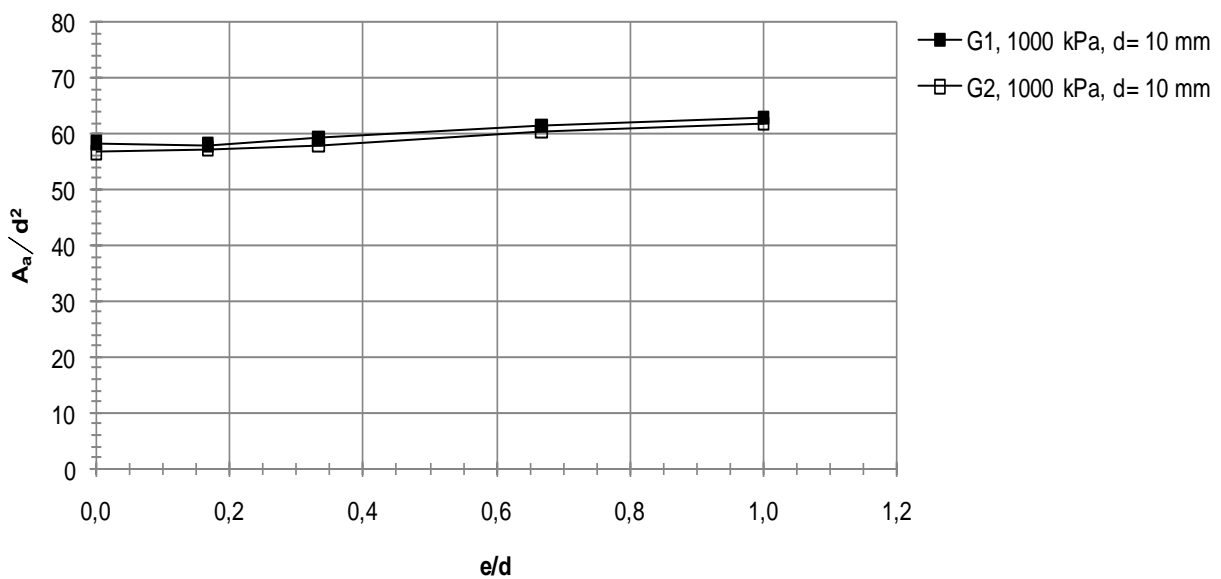


Figura 5.27 – Influência da gramatura na área aberta de fluxo, empregando as esferas de aço com 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos para a tensão vertical de 1000 kPa.

5.1.2 ENSAIO COM AGREGADO GRAÚDO

Os ensaios com agregado visaram a comparação de uma situação mais realista em termos de forma de partículas de solo, em relação à situação de referência, com esferas de aço. Os ensaios realizados com o emprego de agregados em substituição às esferas de aço como material drenante subjacente, permitiram observar o quanto seria difícil realizar as análises comentadas anteriormente, caso fosse utilizado apenas o agregado graúdo, e não as esferas. A

possível quebra dos grãos impediria a sua reutilização em outros ensaios, aumentando a diferença entre condições de um ensaio para outro, o que aumentaria, ainda mais, a dispersão dos resultados. Desta forma, foram realizados apenas três ensaios empregando o agregado graúdo: pedrisco, com diâmetro médio de 10 mm e brita 1, com diâmetro médio de 19 mm. Os ensaios atenderam às seguintes condições, conforme explicado no Capítulo 4:

- Ensaio 1: pedrisco selecionado por peneiramento;
- Ensaio 2: pedrisco selecionado por peneiramento e forma de grãos; e
- Ensaio 3: brita 1, selecionada por peneiramento e forma de grãos.

O número de pontos de medição variou em cada ensaio, devido à heterogeneidade da amostra de agregados, como mostra a Figura 5.28. A Tabela 5.3 apresenta o resumo das variáveis obtidas nestes ensaios. Os valores do afundamento e da área de contato (área fechada) em cada ponto localizado na Figura 5.28, estão apresentados no Apêndice A (Tabela A.14).

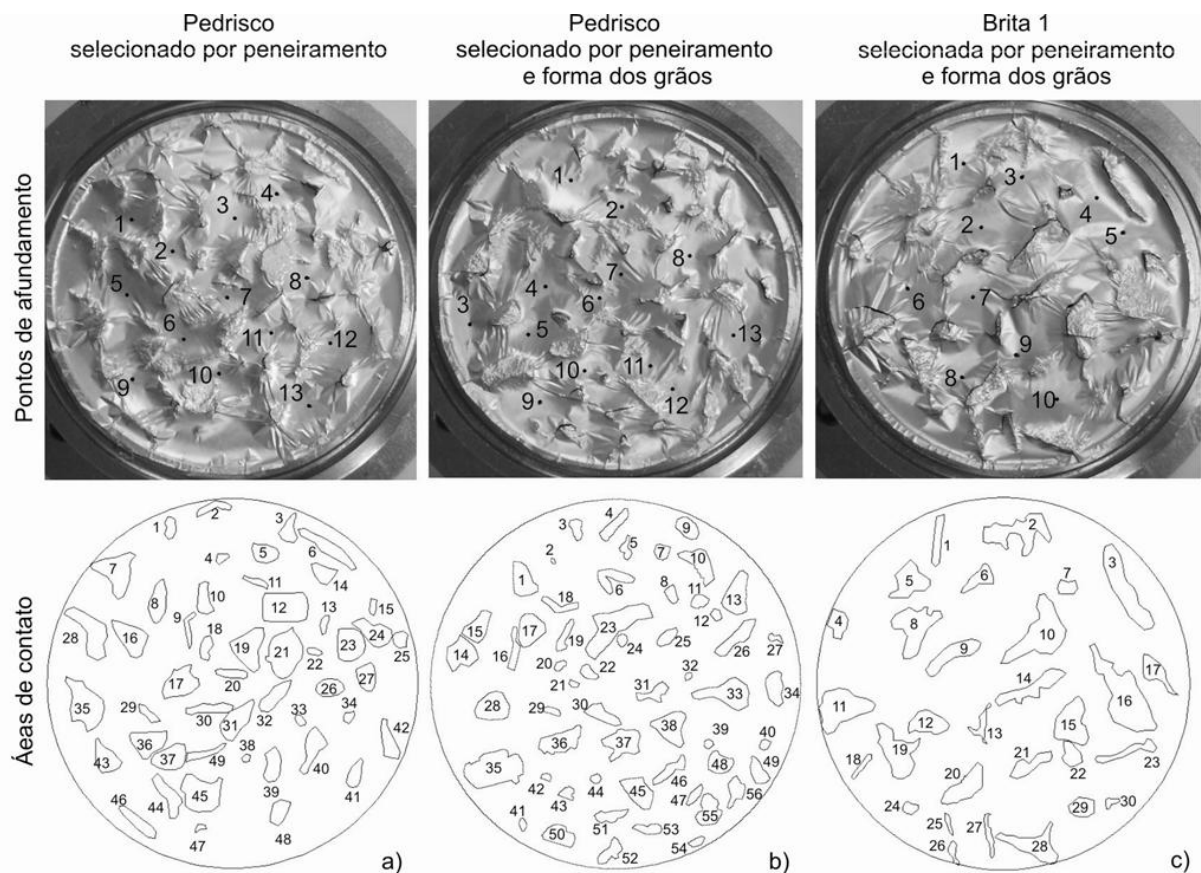


Figura 5.28 – Pontos de afundamento e a área de contato nos ensaios que empregaram agregado graúdo.

Tabela 5.3 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios que empregaram agregados.

G1, 500 kPa, e= 0 mm					
Material drenante	Pedrisco 10 mm*	Pedrisco 10 mm*	d= 10 mm (esferas)	Brita 19 mm*	d= 18 mm (esferas)
Forma de seleção	peneiramento	peneiramento e forma de grãos	-	peneiramento e forma de grãos	-
Afundamento δ (mm)	2,44	2,72	1,27**	3,22	2,36**
Área total (cm ²)	72,38				
Área fechada (cm ²)	15,34	14,43	11,93**	14,36	12,08**
Área aberta (cm ²)	57,04	57,95	60,45**	58,02	60,31**
RAA (%)	78,8	80,06	83,51**	80,16	83,32**

Notas: G1 = geotêxtil com gramatura de 200 g/m², e = espaçamento entre esferas, d = diâmetro da esfera, * = diâmetro médio, ** = valores considerando a relação e/d = 0, RAA = razão de área aberta (RAA = área aberta/área total).

Apesar dos agregados terem seus grãos selecionados, a fim de tentar-se alguma proximidade com as condições dos ensaios que empregaram esferas de aço, os resultados obtidos não apresentaram esta proximidade. O emprego do agregado graúdo aumentou os valores de afundamento e de área fechada ao fluxo quando comparados aos obtidos nos ensaios que empregaram esferas de aço.

O afundamento médio encontrado no ensaio 1 foi superior (2,44 mm) ao obtido com as esferas de aço (1,27 mm) nas mesmas condições de contorno. A seleção da forma dos grãos no ensaio 2 resultou em afundamentos ainda maiores (2,72 mm). O ensaio 3 apresentou afundamento superior (3,22 mm) quando comparado ao ensaio equivalente com esferas de aço (2,36 mm). As áreas fechadas obtidas nos ensaios 1 e 2 foram superiores (15,34; 14,43 cm²) à área fechada com a esfera (11,93 cm²). No ensaio 3 também foi obtida uma área fechada um pouco superior (14,36 cm²) à encontrada com as EA (12,08 cm²).

5.1.3 DEFORMAÇÃO DO GEOTÊXTEL

A deformação do geotêxtil nos vazios do material drenante pode originar mudanças em seu comportamento filtrante, devido a prováveis modificações em suas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas, estando diretamente relacionadas à tensão vertical aplicada. A

deformação do geotêxtil pode alterar o arranjo inicial dos filamentos do geotêxtil, mudando propriedades como porosidade, permissividade e abertura de filtração, entre outras. Em vista disto, foi obtida a deformação média na amostra de geotêxtil, por meio dos valores do afundamento do geotêxtil δ_{max} (obtido com o paquímetro digital), do diâmetro da área de contato entre o geotêxtil e o material drenante (obtido por meio de fotografias digitais) e do diâmetro da esfera (d).

Em alguns pontos da amostra de geotêxtil, não foi possível calcular as deformações, pois os valores de D necessários para o seu cálculo não foram conhecidos. Optou-se por utilizar apenas um dos três diâmetros que circunda cada afundamento para calcular as deformações em cada ponto, como já mostrado no item 4.1.7. Nos ensaios que empregaram esferas de aço com $d = 10$ mm de diâmetro, para as relações $e/d = 0; 0,17$ e $0,33$ foram obtidas apenas as deformações *médias* centrais na amostra, devido ao grande número de pontos a serem medidos. As Tabelas F.1 a F.13, do Apêndice F, mostram as deformações obtidas para cada afundamento da amostra de geotêxtil nos ensaios realizados com as esferas de aço com $d = 10$ e 18 mm, para as relações $e/d = 0; 0,17; 0,33, 0,67$ e 1 , tensão vertical de $50, 100, 200, 500, 1000$ e 2000 kPa e o geotêxtil G1. Outras condições de contorno, julgadas pertinentes, também são apresentadas.

As Figuras 5.29 e 5.35 apresentam os gráficos da deformação média *versus* tensão vertical para o geotêxtil G1 e as esferas com $d = 10$ e 18 mm nos vários afastamentos. A deformação média aumentou com a tensão vertical, como era de se esperar. Os incrementos de deformação entre as tensões verticais de 50 e 2000 kPa variaram de 248 a 321% (dependendo do espaçamento) nos ensaios realizados com esferas de aço com $d = 10$ mm. No entanto, esta variação de incremento foi maior (156 a 674%) nos ensaios com esferas com $d = 18$ mm. Foi possível verificar que as curvas deformação *versus* tensão vertical tendem a se estabilizar nos menores valores de espaçamentos entre as esferas, $e/d = 0$ e $0,17$. Para as demais relações e/d , as curvas apresentam um comportamento ascendente até a tensão vertical de 2000 kPa. Para ensaios com esferas com $d = 18$ mm, foram observadas deformações médias de 30% (para tensão normal de 2000 kPa), em torno da metade da deformação de ruptura desses geotêxteis em ensaios de tração em faixa larga.

As Figuras 5.29 e 5.30 mostram que a deformação é maior com o aumento do *espaçamento* entre as esferas de aço, independente do diâmetro da esfera e da tensão vertical aplicada. Os

ensaios que empregaram esferas de aço com $d = 10$ mm, tensão vertical de 50 kPa e relações $e/d = 0$ e 1,7, apresentaram as deformação mínimas na ordem de 1 %. A máxima deformação obtida foi de, aproximadamente, 30 % com as EA com $d = 18$ mm, 2000 kPa e $e/d = 1$.

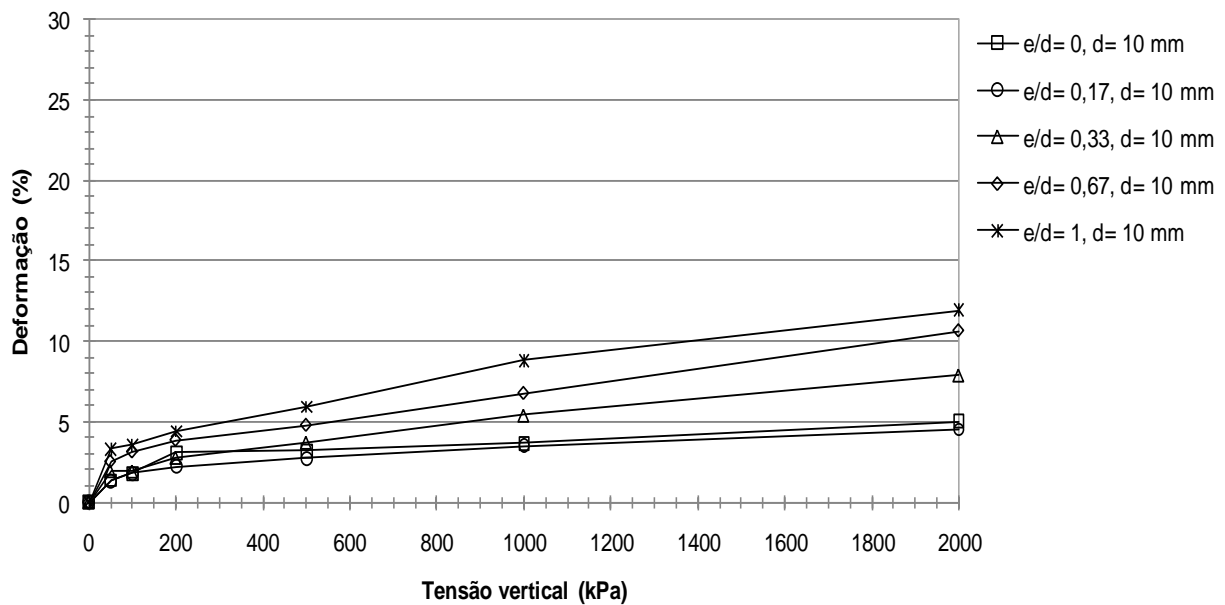


Figura 5.29 – Deformação média *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos.

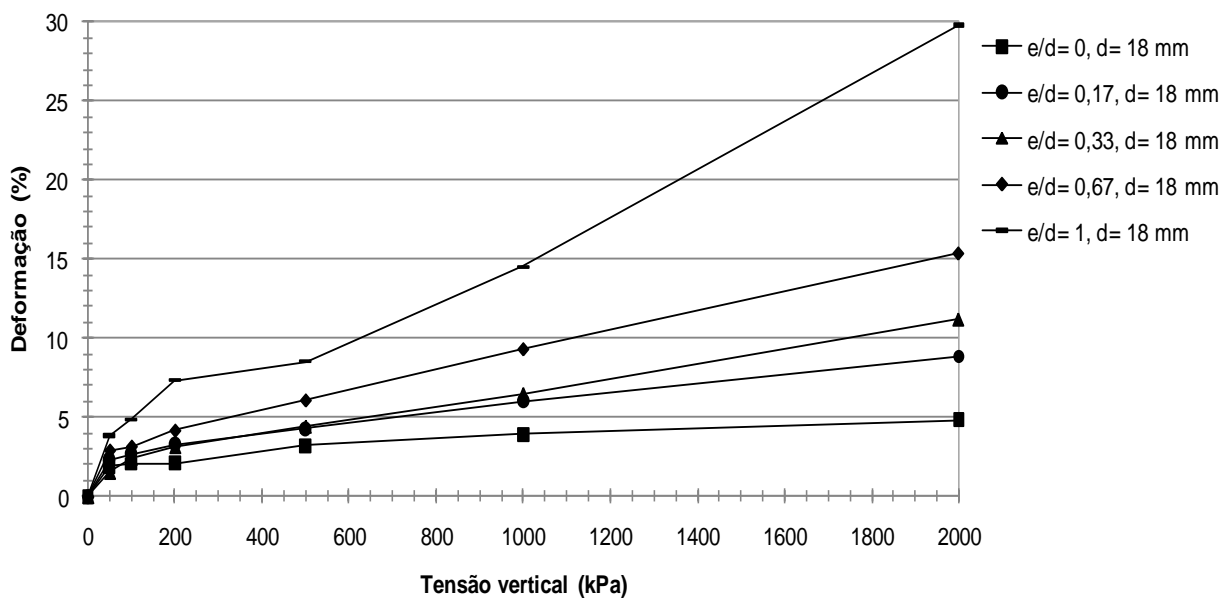


Figura 5.30 – Deformação média *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos.

A deformação do geotêxtil no vazio da esfera de aço foi influenciada também pelo *diâmetro da esfera*. Esta influência pode ser melhor observada a partir da relação $e/d = 0,17$, onde, as deformações obtidas com as esferas de aço com $d = 10$ mm, foram menores que as obtidas

com as esferas com $d = 18$ mm, independente da tensão vertical aplicada, como mostram as Figuras 5.31 a 5.35.

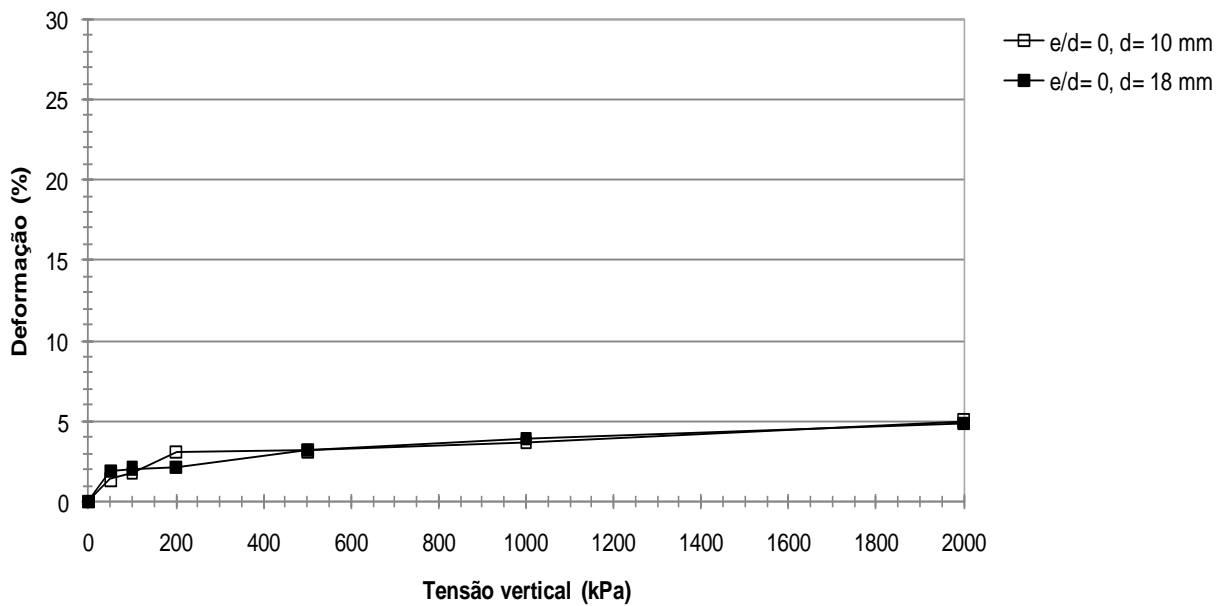


Figura 5.31 – Deformação média *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d = 0$ nas diversas tensões verticais.

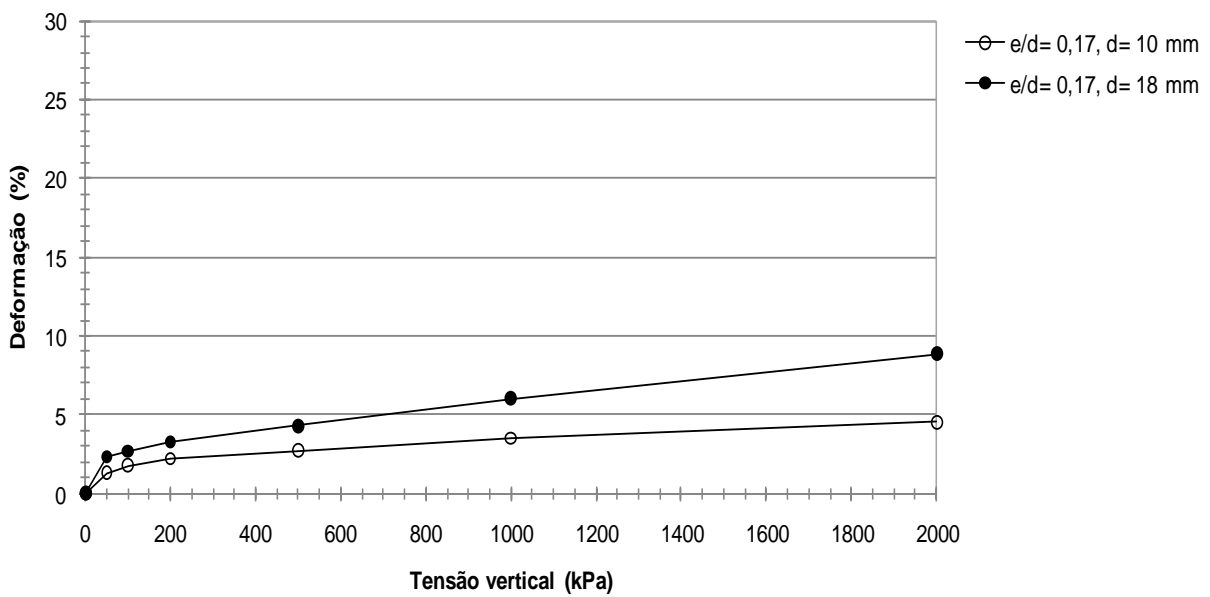


Figura 5.32 – Deformação média *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d = 0,17$ nas diversas tensões verticais.

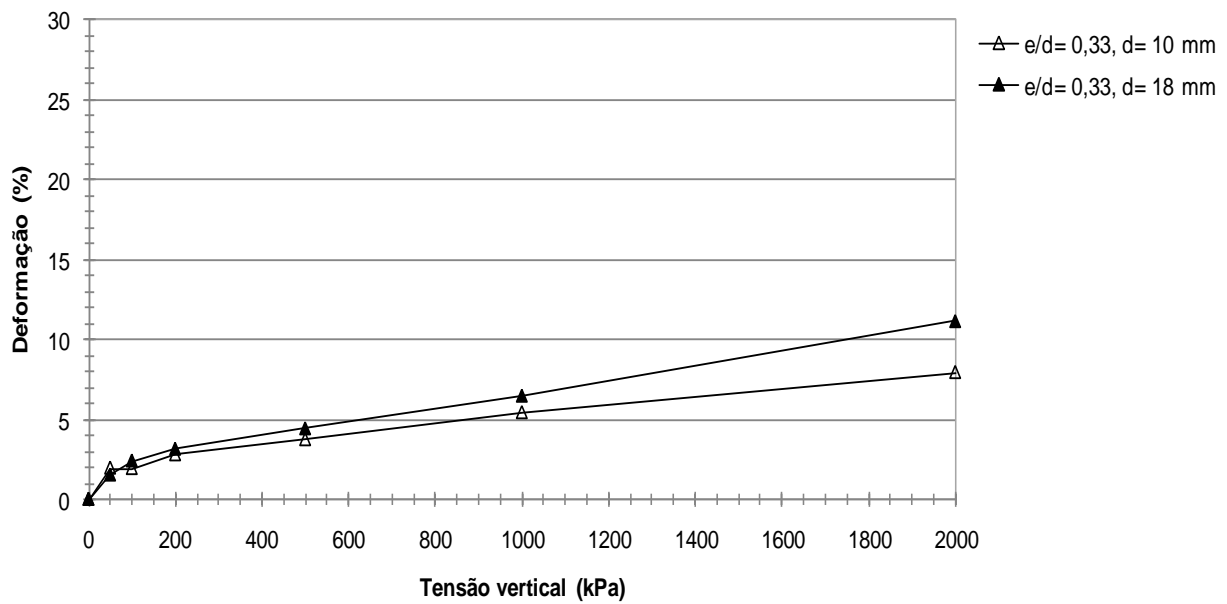


Figura 5.33 – Deformação média *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d = 0,33$ nas diversas tensões verticais.

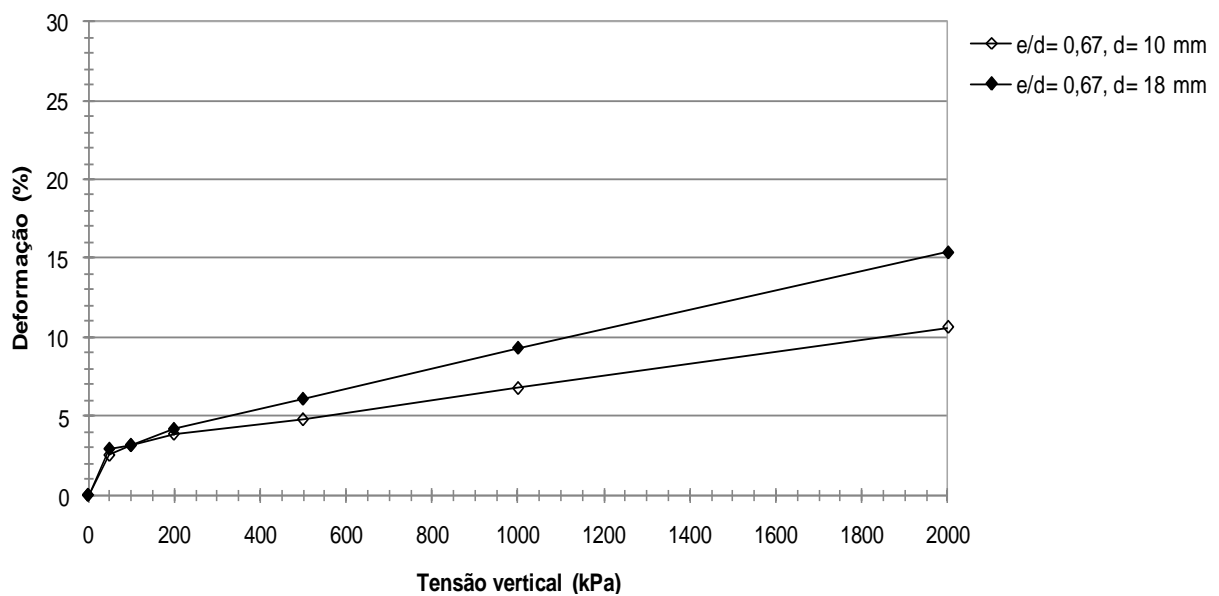


Figura 5.34 – Deformação média *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d = 0,67$ nas diversas tensões verticais.

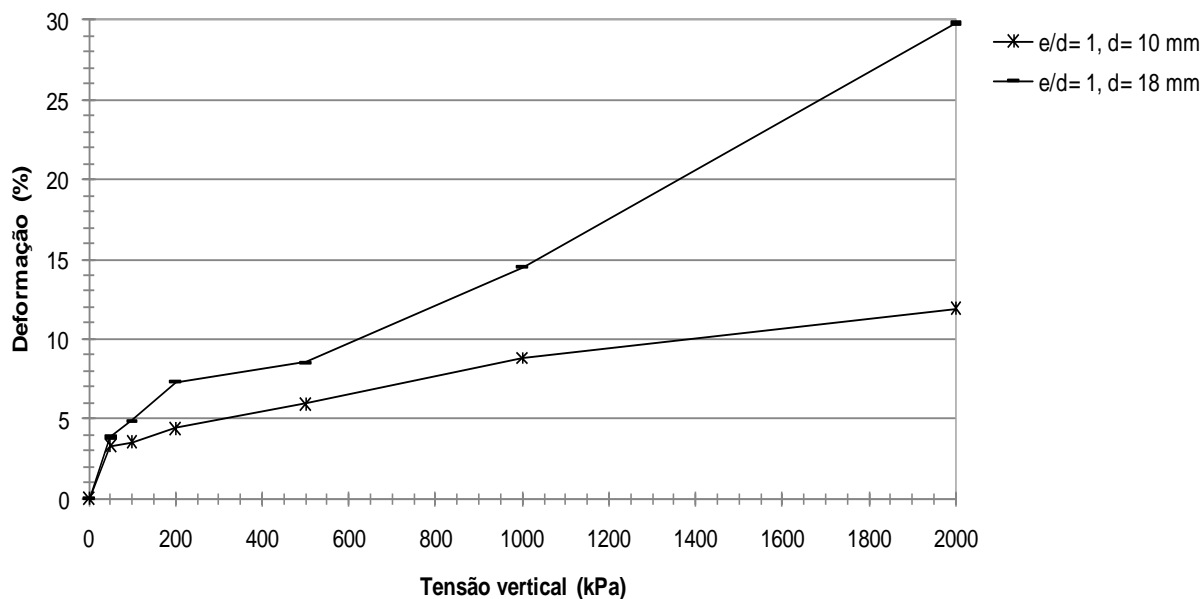


Figura 5.35 – Deformação média *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 10 e 18 mm de diâmetro, $e/d = 1$ nas diversas tensões verticais.

A gramatura do geotêxtil apresentou influência em suas deformações, sendo observado o aumento da deformação à medida que a gramatura do geotêxtil diminui. Esse comportamento pode ser observado nos resultados dos ensaios em que foram empregados os geotêxteis G1, G2 e G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro e tensões verticais de 50 e 1000 kPa, como mostra a Figura 5.36. Para as esferas com 10 mm de diâmetro, o aumento da deformação foi pouco significativo com o aumento da gramatura do geotêxtil, como mostra a Figura 5.37.

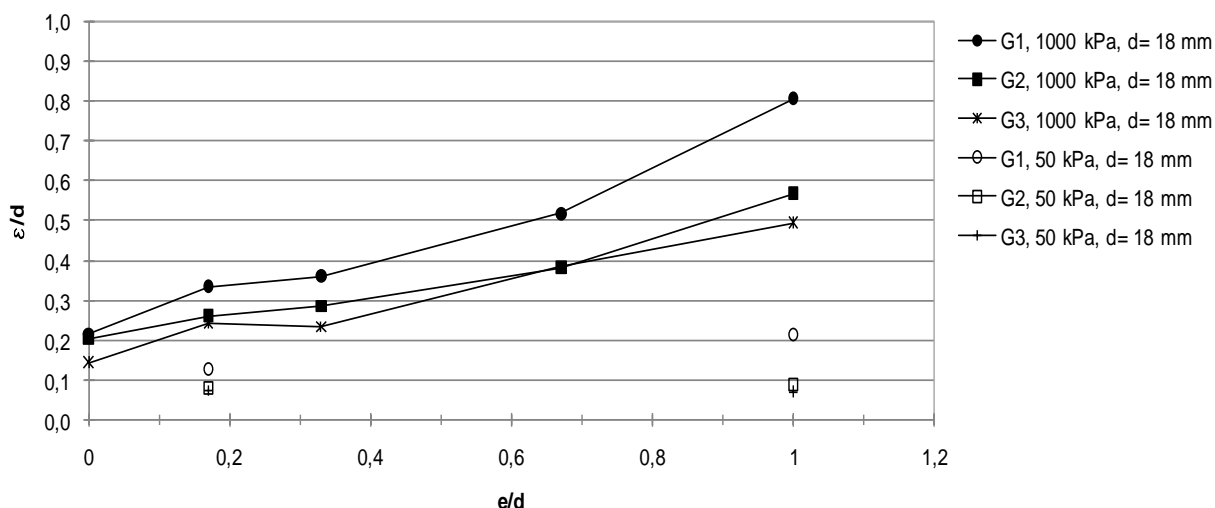


Figura 5.36 – Influência da gramatura na deformação média do geotêxtil nos vazios entre esferas de aço com 18 mm diâmetro para tensões verticais de 50 e 1000 kPa.

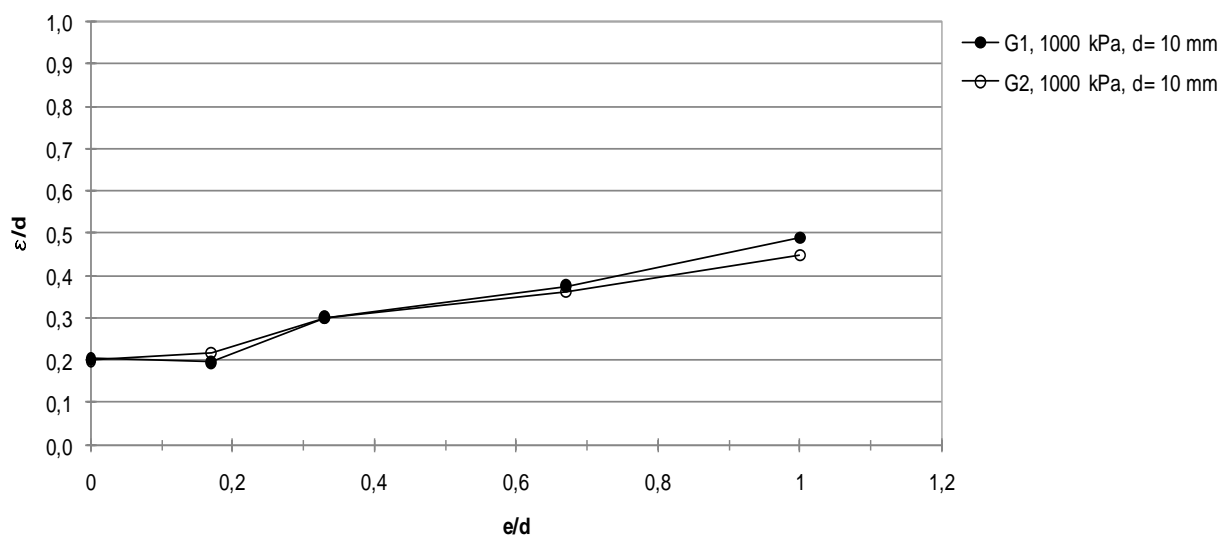


Figura 5.37 – Influência da gramatura na deformação média do geotêxtil nos vazios entre esferas de aço com 10 mm diâmetro para a tensão vertical de 1000 kPa.

5.2 ENSAIO PARA VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL PASSANTE ATRAVÉS DO GEOTÊXTEL

Os ensaios para verificação da *granulometria* do *material passante* através do geotêxtil (GMP) foram realizados, também no equipamento de Ensaio GR, e permitiram a avaliação do tamanho das partículas de microesferas de vidro que atravessaram o geotêxtil não tecido sob diferentes condições de apoio. A aplicação de tensão vertical no sistema e a presença de material drenante (esferas de aço) subjacentes ao geotêxtil visaram simular condições de apoio passíveis de ocorrência em filtros reais. A passagem de partículas pelo geotêxtil ocorreu por meio de *fluxo contínuo de água* destilada, com um gradiente hidráulico de 10, ou pela energia provida pelo *impacto de um martelo* de borracha na parede externa do permeâmetro.

Foram utilizados o geotêxtil G1 com gramatura de 200 g/m², tensões verticais de 20, 50 e 2000 kPa, EA de 18 mm de diâmetro e espaçamentos tais que a relação espaçamento entre esferas/diâmetro da esfera (*e/d*) fosse de 0 e 1. Foi também utilizada uma placa perfurada de aço em substituição das EA nos ensaios considerados pertinentes. A Tabela 5.4 apresenta um resumo dos ensaios realizados.

A amostra de microesferas de vidro foi colocada no permeâmetro sem compactação posterior, pois o impacto do martelo na parede do permeâmetro durante o processo de densificação permitiria a passagem de partículas através do geotêxtil. O Apêndice C (Tabela C.7) apresenta a altura das amostras de microesferas de vidro (L_{oc}) após o seu preparo por meio da técnica de

pluviação submersa, altura das amostras no final do ensaio (L_{fe}), e o índice de vazios (e_o) após pluviação. A Tabela C.8 e Figura C.1 (Apêndice C) apresentam o registro das vazões e cargas hidráulicas monitoradas durante os ensaios.

Tabela 5.4 – Resumo dos ensaios para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil.

Ensaio com fluxo			Ensaio com impacto								
esfera de aço		placa perfurada	esfera de aço						placa perfurada		
d = 18 mm			d = 18 mm								
e/d = 0	e/d = 1		e/d = 0			e/d = 1					
geotêxtil G1											
50 kPa			20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Notas: d = diâmetro da esfera, e = espaçamento entre esferas, G1 = geotêxtil com gramatura de 200 g/m², X = ensaio realizado.

A análise granulométrica foi realizada nas partículas localizadas na interface do geotêxtil, nas partículas retidas no interior do geotêxtil e nas partículas passantes através do geotêxtil. Em relação às partículas da *interface*, observou-se que as curvas granulométricas foram muito próximas às das microesferas de vidro, independente do tipo de base utilizada, como mostrado na Figura 5.38. As demais curvas de ensaio são apresentadas no Apêndice G (Figura G.1 a G.3).

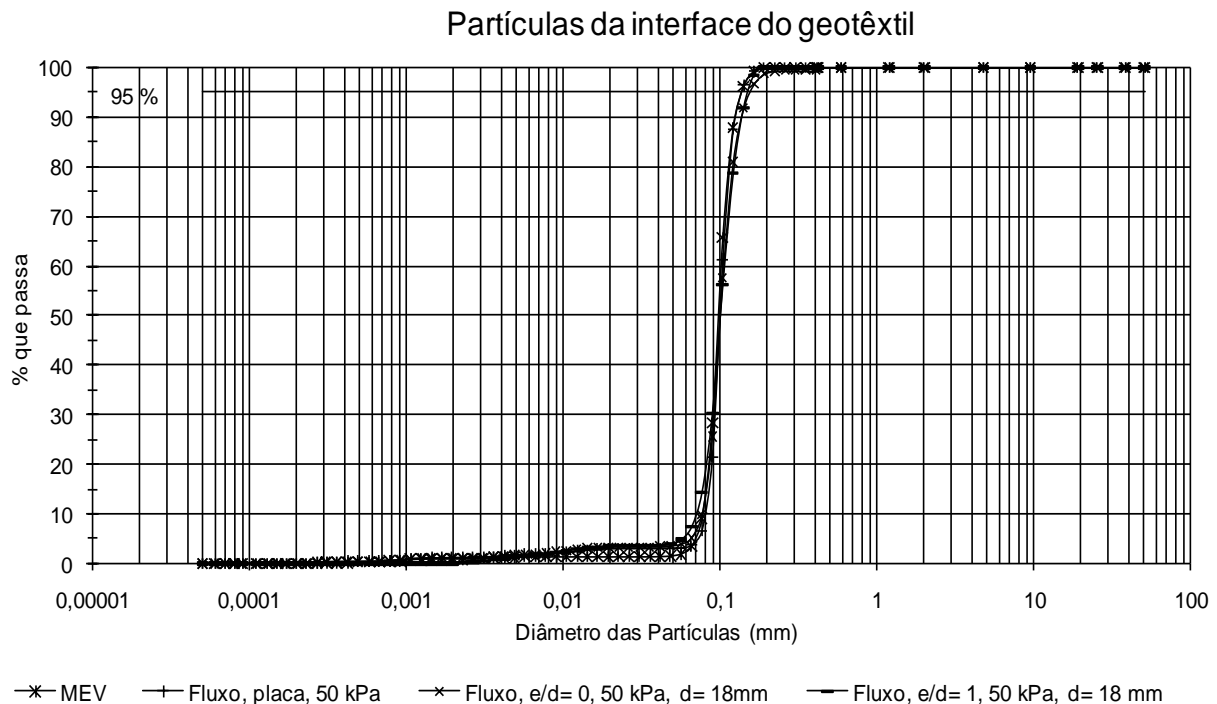


Figura 5.38 – Curvas granulométricas das partículas da interface do geotêxtil nos ensaios com fluxo.

A Figura 5.39 mostra que os resultados dos ensaios apresentaram o predomínio da fração areia fina (94 - 97 %), seguida da fração silte (2 - 6 %) e fração argila (0 - 1 %). O diâmetro das partículas correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}) variou de 0,128 mm a 0,155 mm. Apesar de alguns picos de valores de D_{95} , os resultados parecem não ter sido muito influenciados pelas condições de apoio e pelo tipo de mecanismo empregado para provocar a passagem das partículas através do geotêxtil. Os ensaios de fluxo e impacto que empregaram a placa perfurada apresentaram D_{95} ligeiramente menores ou iguais aos encontrados nos ensaios com esferas de aço.

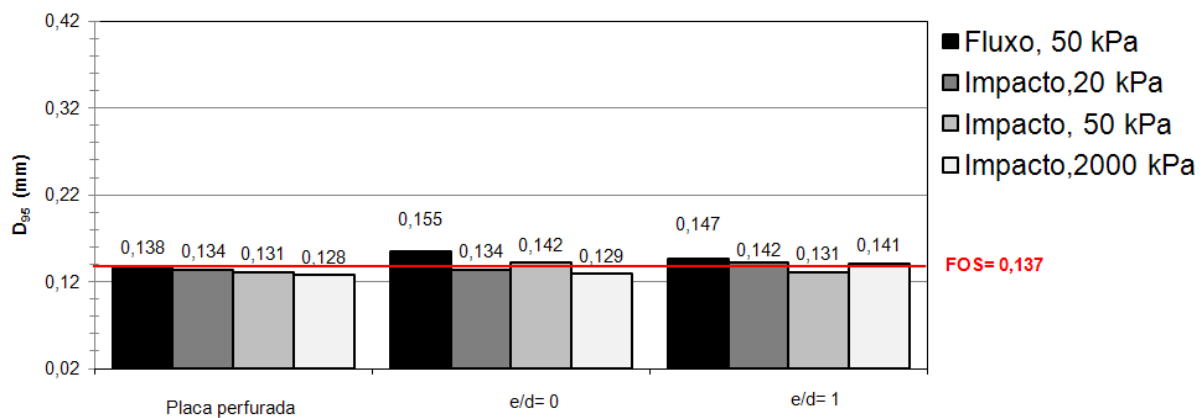


Figura 5.39 - Diâmetro das partículas da interface com o geotêxtil correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}).

As *partículas impregnadas* no geotêxtil tiveram o predomínio da fração areia fina (78 - 97 %), seguida do silte (2 - 22 %) e argila (0 - 1 %). A Figura 5.40 apresenta as curvas granulométricas das partículas impregnadas no geotêxtil no ensaio com fluxo. As demais curvas são apresentadas no Apêndice G (Figuras G.4 a G.5). Não se observa variação significativa em relação à curva das microesferas de vidro para diâmetros de partículas maiores que 0,1 mm.

O valor de D_{95} para as partículas impregnadas variou de 0,126 mm a 0,153 mm, como mostra a Figura 5.41. Os resultados mostram também pouca influência das condições de base e do tipo de mecanismo para provocar a passagem das partículas. Observou-se que algumas partículas com diâmetro superior a abertura de filtração ficaram também retidas no interior do geotêxtil. Este mesmo comportamento foi observado por Bessa da Luz (2004), quando da análise das partículas de microesferas de vidro que passaram pelo geotêxtil durante a preparação das amostras (densificação da amostra por impactos de um martelo de borracha na lateral do permeâmetro) e das partículas impregnadas em geotêxtil com gramatura de

600 g/m² em ensaios GR. Segundo este autor, partículas com D₉₅ = 0,111mm passaram pela geotêxtil com abertura de filtração de 0,060 mm após a compactação, e partículas com D₉₅ = 0,109 mm ficaram retidas no geotêxtil ao término do ensaio, que atingiu uma tensão vertical de 2000 kPa.

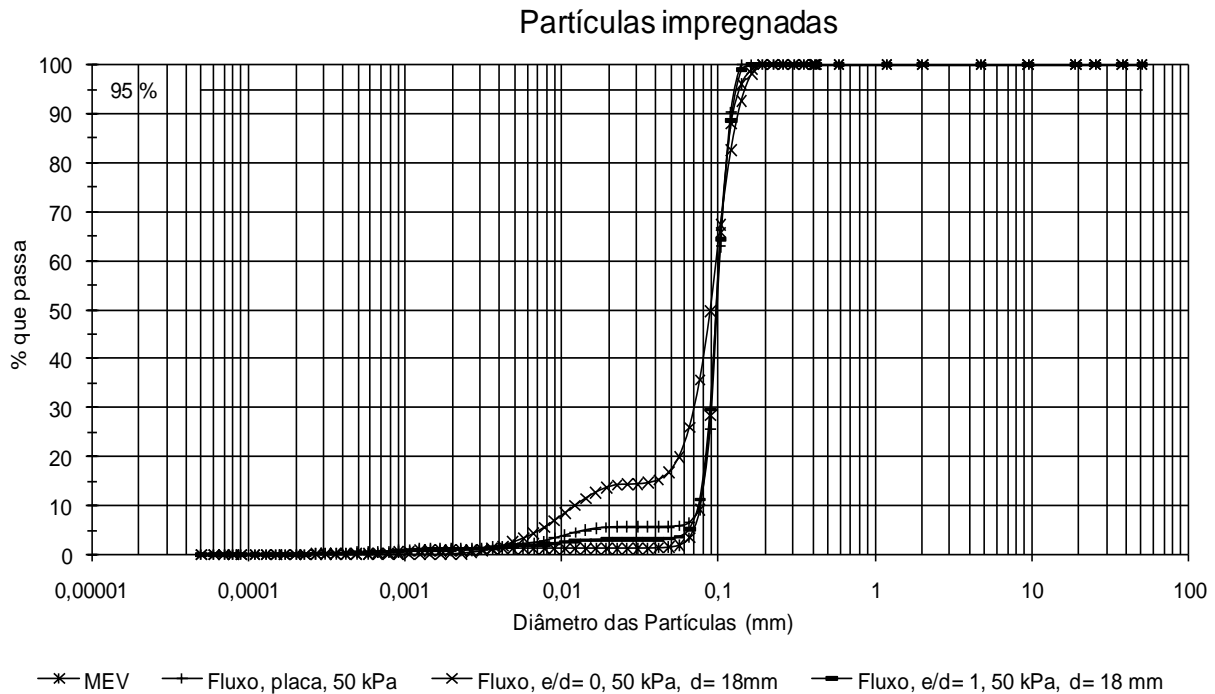


Figura 5.40 – Curvas granulométricas das partículas impregnadas no geotêxtil nos ensaios com fluxo.

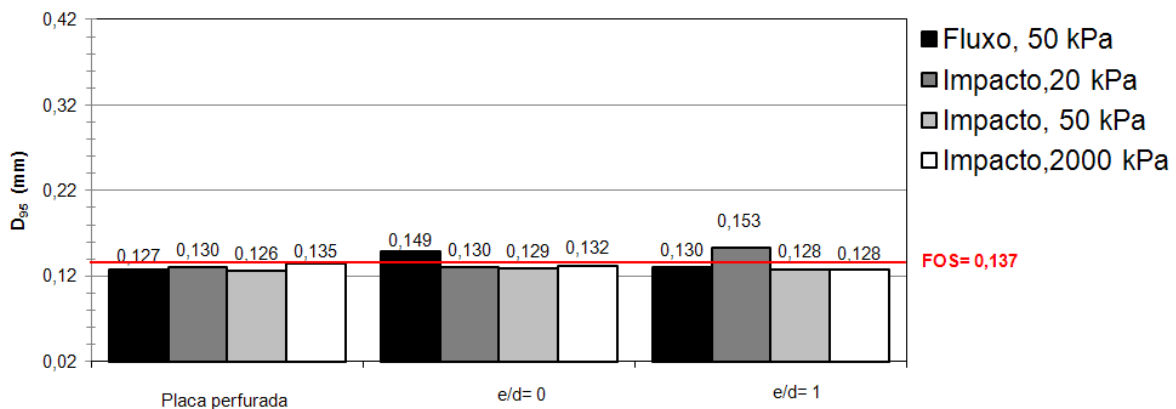


Figura 5.41 - Diâmetro das partículas impregnadas no geotêxtil correspondente a 95 % passante em massa (D₉₅).

Gerry & Raymond (1983) e Palmeira *et al.* (1996) atribuem a retenção de partículas maiores do que o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil à influência do tamanho dos furos deixados pelas agulhas durante o processo de manufatura da manta de geotêxtil não tecido por meio da técnica de agulhagem. Palmeira *et al.* (1996) descrevem que estes furos podem influenciar o diâmetro das partículas passantes através do geotêxtil, embora decresçam sob

efeito da tensão vertical. Segundo estes autores, a influência do furo da agulha pode ser reduzida ou anulada, sob condições de campo, devido ao lançamento e à compactação do solo sobre o geotêxtil, bem como devido à impregnação do geotêxtil, que poderá reduzir o diâmetro dos furos ou, até mesmo bloqueá-lo totalmente.

Os resultados referentes ao D_{95} das *partículas passantes* indicaram que partículas com o diâmetro superior a abertura de filtração foram capazes de passar pelo geotêxtil, como mostra a Figura 5.42. Os valores de D_{95} dessas partículas variaram de 0,037 mm a 0,415 mm, observando-se que o tamanho das maiores partículas que passaram através do geotêxtil alcançou até três vezes o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil, estando coerentes com os resultados apresentados por Gardoni (2000) e Bessa da Luz (2004), bem como a influência do diâmetro dos furos deixados pelas agulhas.

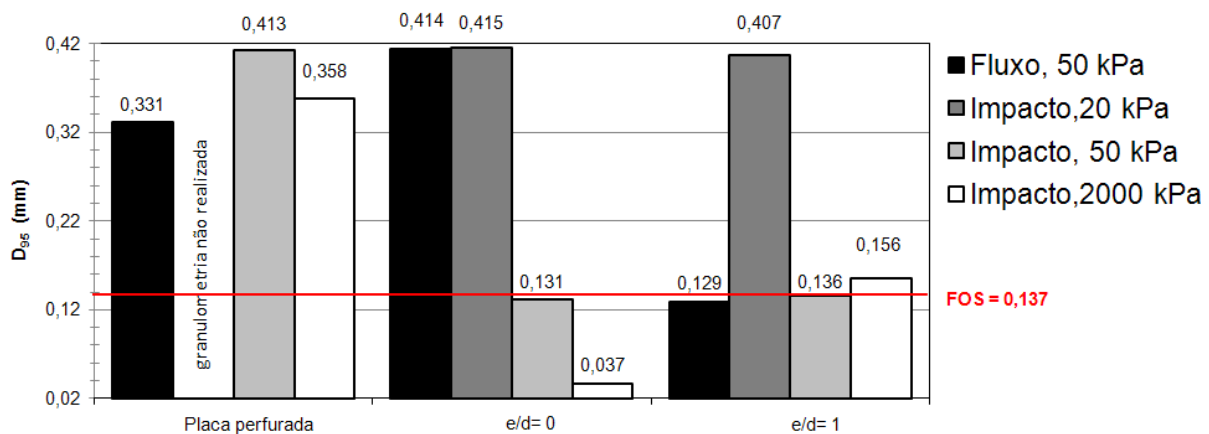


Figura 5.42 - Diâmetro das partículas passantes através do geotêxtil correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}).

Bessa da Luz (2004) também observou a passagem de partículas de microesferas de vidro com diâmetro maior ($D_{95} = 0,114$ mm) que a abertura de filtração (0,060 mm) de geotêxtil não tecido, agulhado, com gramatura de 600 g/m^2 no Ensaio GR. Gardoni (2000) observou este mesmo comportamento quando analisou os resultados deste mesmo ensaio, utilizando geotêxtil não tecido, agulhado, com gramatura 300 g/m^2 . Segundo estes autores, partículas de solo (areia fina) com 0,325 mm de diâmetro passaram pela abertura de filtração de 0,110 mm.

Como comentado anteriormente, a passagem de partículas com diâmetro superior a abertura de filtração do geotêxtil, pode ser explicada pelo diâmetro dos furos deixados pelas agulhas após a manufatura do geotêxtil por meio da técnica de agulhagem. O diâmetro das agulhas

utilizadas neste processo é de 0,6 mm, aproximadamente, e os furos deixados no geotêxtil têm diâmetro um pouco inferiores a este valor, devido à acomodação posterior dos filamentos. Apesar desta redução no diâmetro do furo, aliada ao efeito da tensão vertical que tende a reduzi-lo um pouco mais, há que se considerar também a possível influência da deformação do geotêxtil nos vazios entre as esferas de aço. O aumento do diâmetro do furo da agulha pode ser ainda influenciado pela deformação do geotêxtil, se a parte do geotêxtil localizada no vazio entre esferas possuir uma gramatura menor que a especificada, como já mostrado na Figura 4.1 d. Segundo Palmeira *et al.* (1996), em ensaios de filtração, a abertura deixada pela agulha pode se manter como a maior abertura do geotêxtil, mesmo sob elevadas tensões verticais.

De acordo com Faure *et al.* (1989), o aumento da tensão vertical causa uma redução na abertura de filtração do geotêxtil, permitindo a passagem de partículas cada vez menores, desde que não ocorram influências significativas dos furos deixados pelas agulhas, no caso de geotêxteis agulhados. Este comportamento foi observado, com mais clareza, nos resultados obtidos nos ensaios realizados com esferas de aço para a relação $e/d = 0$.

O Apêndice G (Figuras G.7 a G.10) apresenta todas as curvas granulométricas das partículas passantes nos ensaios com fluxo e impacto. Um resumo das faixas granulométricas e dos valores de D_{95} obtidos nos ensaios é apresentado na Tabela 5.5.

A massa das microesferas de vidro passantes através do geotêxtil foi obtida antes da realização da análise granulométrica. As maiores massas foram observadas nos ensaios que empregaram esferas de aço e uma tensão vertical de 50 kPa, apresentando uma média de 0,2 g. Segundo Lafleur *et al.* (1989), a relação entre a massa de solo passante e área de fluxo superior a 2500 g/m^2 indica a condição severa de *piping* através do filtro. A área de fluxo foi obtida nos ensaios que empregaram esferas de aço, subtraindo da área impregnada A_i , já mostrada na Figura 4.17, a área fechada de fluxo, apresentada no Apêndice D (Tabela D.2). Para a placa perfurada, a área de fluxo considerou apenas a área dos furos da placa, como mostrado na Figura 4.20. Os resultados obtidos mostraram que esta relação foi bem inferior ao valor sugerido por Lafleur *et al.*, tendo-se obtido um valor máximo de 93 g/m^2 no ensaio com impacto, $e/d = 1$ e 50 kPa. A Tabela 5.6 mostra as massas e a relação massa de solo passante / área de fluxo nos ensaios realizados.

Tabela 5.5 – Resumo das faixas granulométricas e dos valores de D_{95} obtidos nos ensaios de granulometria no material passante através do geotêxtil.

Condições de contorno		ENSAIOS COM FLUXO			ENSAIOS COM IMPACTO									MEV
		esfera de aço		placa perfurada	esfera de aço						placa perfurada			
		d= 18 mm			d= 18 mm									
		e/d= 0	e/d = 1		e/d= 0			e/d = 1						
Geotêxtil		G1												
Tensão vertical		50 kPa			20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa	
INTERFACE	20 < pedregulho grosso < 60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6 < pedregulho médio < 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2 < pedregulho fino < 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,6 < areia grossa < 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,2 < areia média < 0,6	1,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,06 < Areia fina < 0,20	94,5	94,2	96,6	95,8	96,1	95,0	96,0	95,6	95,0	95,9	96,3	95,8	97,4
	0,002 < Silte < 0,06	3,4	5,7	2,3	4,1	2,9	4,0	3,2	3,3	3,9	3,0	2,8	3,2	1,7
	Argila < 0,002	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	1,0	0,9	1,1	1,1	1,1	0,9	1,0	0,8
D₉₅ (mm)		0,155	0,147	0,138	0,134	0,142	0,129	0,142	0,131	0,141	0,134	0,131	0,128	0,137
IMPREGNADAS	20 < pedregulho grosso < 60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6 < pedregulho médio < 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2 < pedregulho fino < 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,6 < areia grossa < 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,2 < areia média < 0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,06 < Areia fina < 0,20	77,6	95,7	93,8	95,6	97,1	95,5	92,5	96,7	92,5	96,0	95,9	95,9	-
	0,002 < Silte < 0,06	22,2	3,3	5,0	4,3	1,9	3,6	7,4	2,4	6,5	3,8	3,2	4,0	-
	Argila < 0,002	0,2	1,0	1,1	0,1	1,0	0,9	0,1	0,9	1,1	0,2	0,9	0,1	-
D₉₅ (mm)		0,149	0,130	0,127	0,130	0,129	0,132	0,153	0,128	0,128	0,130	0,126	0,135	-
PASSANTES	20 < pedregulho grosso < 60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-
	6 < pedregulho médio < 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-
	2 < pedregulho fino < 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-
	0,6 < areia grossa < 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-
	0,2 < areia média < 0,6	77,1	-	24,6	17,5	-	-	10,7	-	0,7	*	74,3	23,4	-
	0,06 < Areia fina < 0,20	-	96,7	53,4	9,7	81,5	-	51,0	51,0	62,6	*	-	37,0	-
	0,002 < Silte < 0,06	22,9	2,4	21,1	71,6	18,2	99,7	36,4	46,6	36,4	*	25,7	39,2	-
	Argila < 0,002	-	0,9	1,0	1,1	0,3	0,3	2,0	2,4	0,3	*	-	0,4	-
D₉₅ (mm)		0,414	0,129	0,331	0,415	0,131	0,037	0,407	0,136	0,156	-	0,413	0,358	-

Notas: d = diâmetro da esfera de aço, e/d = espaçamento entre esferas / diâmetro da esfera, MEV = microesferas de vidro, G1 = geotêxtil com gramatura de 200 g/m², D₉₅ = 95 % das partículas do solo possuem diâmetro D inferiores a ele, - = faixa granulométrica não obtida, * = ensaio de granulometria não realizado.

Tabela 5.6 – Massa de microesferas de vidro passante através do geotêxtil.

MASSA DE PARTÍCULAS PASSANTES		ENSAIOS COM FLUXO			ENSAIOS COM IMPACTO								
		esfera de aço		placa perfurada	esfera de aço						placa perfurada		
		d = 18 mm			d = 18 mm								
		e/d = 0	e/d = 1		e/d = 0			e/d = 1					
geotêxtil		G1											
tensão vertical		50 kPa			20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa
massa (g)		0,0241	0,2050	0,0204	0,1352	0,2055	0,0136	0,0443	0,2945	0,0579	—	0,0343	0,0483
área de fluxo (m ²)		0,0051	0,0032	0,0007	0,0053 *	0,0051	0,0039	0,0033 *	0,0032	0,0026	0,0007		
g/m ²		5	65	29	26	40	3	13	93	22	—	48	68

Notas: d = diâmetro da esfera de aço, e/d = espaçamento entre esferas / diâmetro da esfera, $G1$ = geotêxtil com gramatura de 200 g/m^2 , * = valor estimado, pois não se obteve o diâmetro de contato no ensaio especial para obtenção do afundamento do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente e da área de contato entre eles, — = granulometria não realizada.

O grau de impregnação do geotêxtil e a tensão vertical atuante nos filtros, não são levados em conta nos critérios de filtro atuais. Entretanto, de fato as partículas retidas no geotêxtil influenciam na passagem de outras partículas através dele, formando obstáculos nos canais de fluxo e impedindo a passagem de partículas maiores. Na tentativa de investigar-se a influência da impregnação na capacidade de retenção do geotêxtil, foi obtido o grau de impregnação (λ) para todas as amostras de geotêxteis ensaiadas, como já mostrado no item 4.1.6. Os valores de λ encontrados nos ensaios variaram de 1,1 a 3,3. Mendes (2006) encontrou valores de grau de impregnação médios de 1,12 de areia fina a média em geotêxteis de 200 g/m^2 . Apesar deste autor ter impregnado as amostras manualmente, os valores encontrados nos ensaios com fluxo e impacto, não foram muito diferentes dos encontrados pelo autor. A Tabela 5.7 apresenta o grau de impregnação obtido em cada ensaio.

Wu *et al.* (2006) observaram um aumento do potencial de colmatação com a redução da razão de área aberta (RAA) em ensaios GR realizados sob gradiente hidráulico de 1 e 5, empregando geotêxteis não tecidos, agulhados de poliéster, com gramaturas de 250 g/m^2 e 450 g/m^2 e de polipropileno, com gramatura de 320 g/m^2 . Os resultados obtidos nos ensaios que empregaram a placa perfurada na presente dissertação evidenciaram este comportamento. Esses ensaios apresentaram as menores RAA (10 %) e as maiores massas de microesferas de vidro (3,3 g) retidas no interior do geotêxtil, sob 20 kPa de tensão vertical, como mostrado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Grau de impregnação e razão de área aberta das amostras de geotêxteis nos ensaios para verificação das partículas passantes.

GRAU DE IMPREGNAÇÃO λ	ENSAIOS COM FLUXO			ENSAIOS COM IMPACTO								
	esfera de aço		placa perfurada	esfera de aço						placa perfurada		
	d = 18 mm			d= 18 mm								
	e/d = 0	e/d = 1		e/d = 0			e/d = 1					
geotêxtil	G1											
tensão vertical	50 kPa			20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa
nº geotêxtil G1:	38	5	7	3	17	74	4	26	1	6	73	67
gramatura (g/cm ²) M_A :	0,02											
massa do geotêxtil (g) \bar{m}_1 :	1,7966	1,6809	1,5581	1,7936	1,5276	1,7748	1,6979	1,6513	1,6533	1,6618	1,7021	1,7227
massa geotêxtil + adesivo selante (g) \bar{m}_2 :	3,9207	4,7084	1,5581	5,3323	3,5008	3,7679	3,9593	5,0178	5,2364	1,6618	1,7021	1,7227
massa geotêxtil + adesivo selante + MEV (g) m_3 :	5,2727	6,9596	3,8489	6,7695	4,7679	5,2583	5,9565	6,7144	6,7442	5,0185	3,2265	4,9012
massa MEV impregnada (g) m_{MEVi} :	1,3520	2,2512	2,2908	1,4372	1,2671	1,4904	1,9972	1,6966	1,5078	3,3567	1,5244	3,1785
área total do geotêxtil (cm ²) A_t :	72,38											
área com adesivo selante (cm ²) A_A :	16,46	38,71	0	16,46			38,71			0		
área impregnada (cm ²) A_i :	55,92	33,67	72,38	55,92			33,67			72,38		
massa de filamentos (g) m_f :	1,1184	0,6734	1,4476	1,1184			0,6734			1,4476		
grau de impregnação λ :	1,2	3,3	1,6	1,3	1,1	1,3	3,0	2,5	2,2	2,3	1,1	2,2
área de fluxo (m ²):	0,0051	0,0032	0,0007	0,0053	0,0051	0,0039	0,0033	0,0032	0,0026	0,0007		
RAA (%):	71	44	10	73	71	54	46	44	36	10	10	10

Notas: d = diâmetro da esfera de aço, e/d = espaçamento entre esferas/diâmetro da esfera, G1 = geotêxtil com gramatura de 200 g/m², MEV = microesferas de vidro, RAA = razão de área aberta.

As Figuras 5.43 a 5.44 apresentam os gráficos do diâmetro (D_{95}) das partículas na interface e impregnadas *versus* deformação estimada (Equação 4.15) no geotêxtil respectivamente. Os resultados sugerem que não houve influência do nível de deformações no geotêxtil nos resultados obtidos nestes casos, para as diferentes condições de apoio e de mecanismo provocador da passagem de partículas através do geotêxtil.

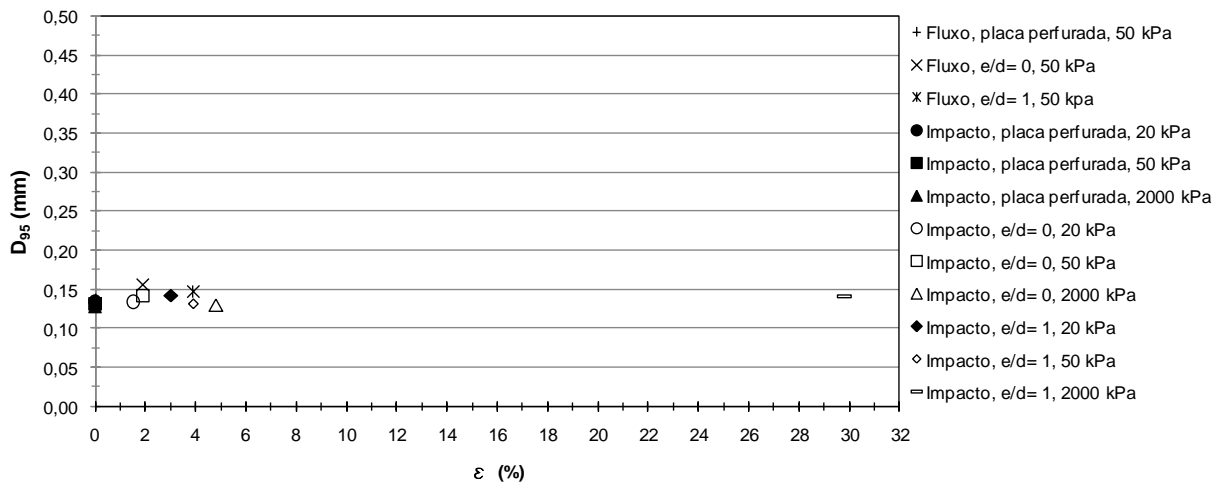


Figura 5.43 - Diâmetro das partículas da interface do geotêxtil correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}) *versus* deformação do geotêxtil.

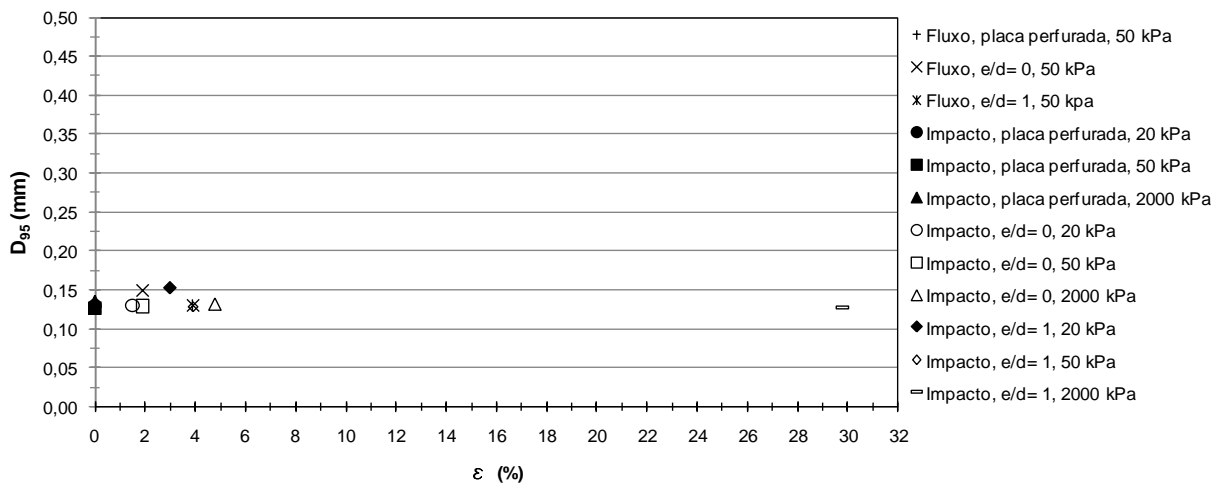


Figura 5.44 - Diâmetro das partículas impregnadas correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}) *versus* deformação do geotêxtil.

A Figura 5.45 apresenta os valores de D_{95} das partículas passantes *versus* a deformação estimada no geotêxtil. Em geral, pode-se observar que o aumento da deformação, decorrente do aumento do nível de tensões, aumentou a capacidade de retenção do geotêxtil, tendo isso sido mais evidente para os ensaios com $e/d = 0$. Cabe destacar, que os resultados obtidos nestes ensaios são preliminares e que a realização de um número maior de ensaios sob outras condições de contorno é de grande importância para a obtenção de resultados mais

conclusivos a respeito da influência do material subjacente ao filtro geotêxtil e do nível de tensões na sua capacidade de retenção.

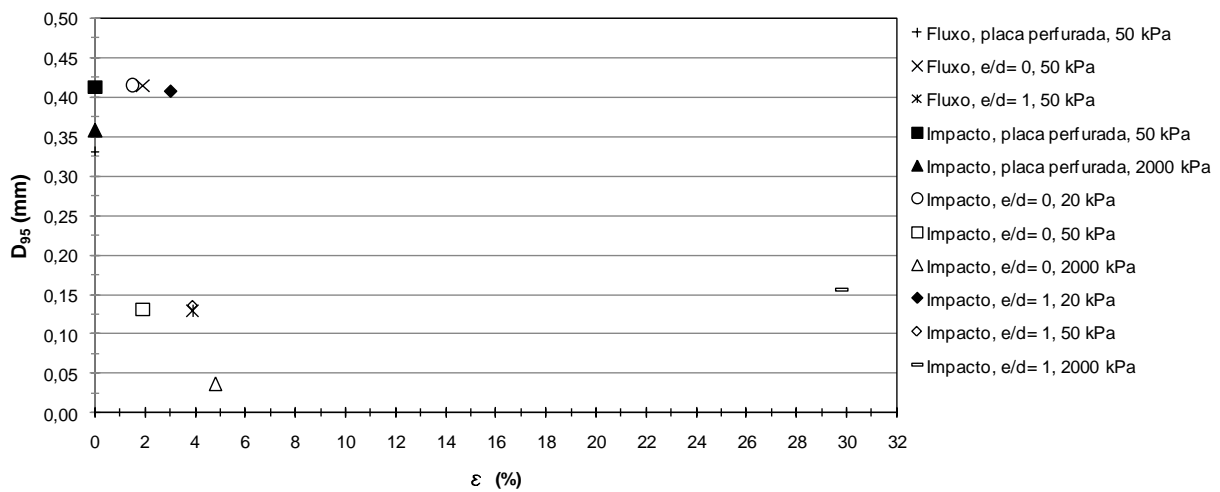


Figura 5.45 - Diâmetro das partículas passantes correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}) versus deformação do geotêxtil.

Foram analisadas, com ajuda do microscópio de alta resolução, as microesferas de vidro coletas no topo da amostra, ao término no ensaio realizado com impacto, empregando a placa perfurada, sob tensão vertical de 2000 kPa (Figura 5.46). Observou-se a quebra de algumas microesferas de vidro devido à aplicação da alta tensão vertical. Estas partículas quebradas podem ter sua passagem facilitada através do geotêxtil por apresentarem uma redução em seus diâmetros.

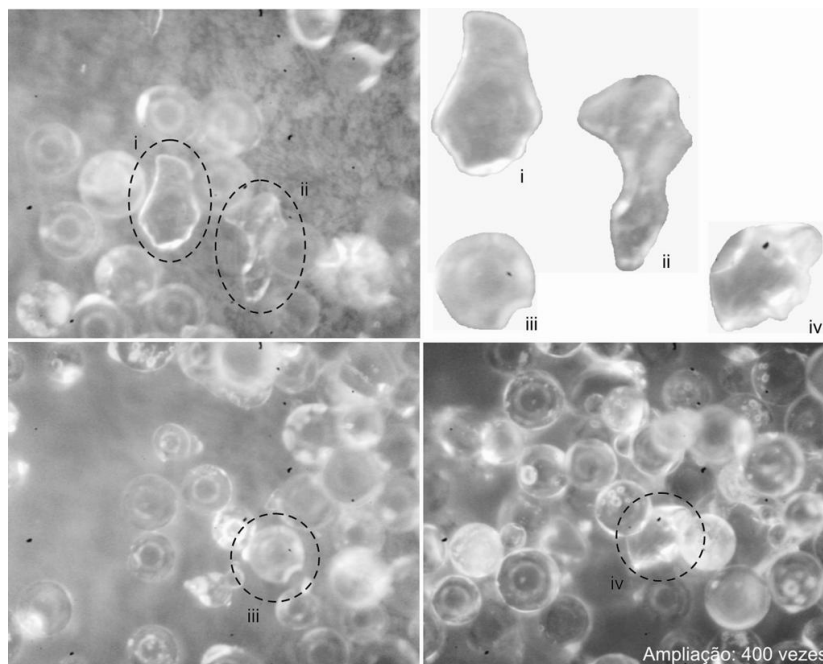


Figura 5.46 - Quebra das microesferas de vidro localizadas no topo da amostra ao término do ensaio realizado com fluxo sob tensão vertical de 2000 kPa.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou estudar o comportamento filtrante de geotêxteis não tecidos sob a ação de tensão vertical e em contato com diferentes materiais subjacentes, visando contribuir para o entendimento da influência, ou não, desse material no comportamento do filtro.

O equipamento e a metodologia empregados nos ensaios especiais para a obtenção do *afundamento* do filtro geotêxtil nos vazios do material drenante subjacente e da *área de contato* entre eles (AAC) e nos ensaios para verificação da *granulometria* do *material passante* através do geotêxtil (GMP), se mostraram adequados para os propósitos da pesquisa. Os resultados obtidos permitiram estudar o comportamento filtrante do geotêxtil não tecido, agulhado de poliéster em contato com o material subjacente ao geotêxtil, esferas de aço ou agregado graúdo, em diversos arranjos. Observou-se que este comportamento sofre a influência de diversos fatores, como: tensão vertical, espaçamento e diâmetro das esferas de aço, gramatura do geotêxtil e a deformação do mesmo nos vazios do material subjacente a ele.

A *tensão vertical* aplicada no sistema teve influência direta no *afundamento* do geotêxtil nos vazios do material drenante, na *área de contato* entre eles e na *área aberta de fluxo* (*área do geotêxtil* que não está em contato direto com o material drenante e passível de fluxo). O *afundamento* foi maior com o aumento da tensão vertical. Os incrementos do *afundamento* entre as tensões verticais de 50 e 2000 kPa variaram de 72 a 84 % (dependendo do espaçamento) nos ensaios realizados com esferas de aço com 10 mm de diâmetro (d). No entanto, esta variação de incremento foi maior (50 a 153 %) nos ensaios com EA com 18 mm de diâmetro. O *afundamento* foi maior com o aumento do *diâmetro da esfera de aço*.

Em relação ao *diâmetro de contato* entre as esferas de aço e o geotêxtil, este foi maior com o aumento da *tensão vertical*. Os incrementos de D entre as tensões verticais de 50 e 2000 kPa variaram de 84 a 108 % (dependendo do espaçamento) nos ensaios realizados com esferas de aço com $d = 10$ mm. Nos ensaios que empregaram as esferas de aço com $d = 18$ mm, esta variação foi de 78 a 104 %.

Quanto à *área aberta de fluxo* no geotêxtil, observou-se a sua redução com o aumento *tensão vertical* aplicada. Nos ensaios que empregaram as esferas de aço com $d = 18$ mm, os decréscimos foram de 14 a 22 %. Para tensões de 2000 kPa, a área aberta variou 11 %, aproximadamente, para ambos os diâmetros de esferas e espaçamentos entre elas.

O aumento do *espaçamento* entre as esferas de aço ocasionou um aumento no afundamento do geotêxtil, no diâmetro de contato e na área aberta de fluxo. O *afundamento* do geotêxtil foi maior com o aumento do espaçamento e seu incremento tendeu a ser menor com a redução do espaçamento entre as esferas de aço, para cada tensão vertical. O *diâmetro de contato* foi maior com o aumento do espaçamento e com o aumento do diâmetro da esfera. A *área aberta* aumentou levemente com o aumento do espaçamento entre as esferas de aço. Os resultados obtidos mostraram que a *área aberta* não variou com d quando o espaçamento das esferas foi mínimo ($e/d = 0$). No entanto, para o espaçamento máximo ($e/d = 1$), a área aberta foi maior para as esferas com $d = 10$ mm, em todas as tensões verticais.

Os resultados mostraram que para a tensão de 50 kPa e 1000 kPa, o *afundamento* foi maior com a redução da *gramatura* do geotêxtil, quando empregadas esferas de aço de 18 mm de diâmetro. Este comportamento foi explicado devido ao geotêxtil de menor gramatura ser mais deformável, se acomodando mais facilmente aos vazios entre esferas.

Em relação ao *diâmetro de contato*, as esferas de 10 mm e 18 mm apresentaram comportamentos distintos a respeito da influência da *gramatura*. Para as esferas maiores, o diâmetro de contato foi maior com a redução da gramatura do geotêxtil exceto para 2000 kPa de tensão vertical. Isso foi explicado pela maior *deformabilidade* do geotêxtil sobre as esferas de aço quanto menor a sua gramatura, aumentando, desta forma, a área de contato entre o geotêxtil e as esferas de aço. Para a tensão de 50 kPa, a *área aberta* foi pouco influenciada pela gramatura. Para a tensão vertical de 1000 kPa, para esferas com $d = 18$ mm, a área aberta de fluxo aumenta ligeiramente com a gramatura. Para as esferas com $d = 10$ mm a área aberta praticamente não foi influenciada pela gramatura do geotêxtil.

A *deformação* do geotêxtil nos vazios do material drenante pode originar mudanças em seu comportamento filtrante, devido a prováveis modificações em suas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas, estando diretamente relacionadas à tensão vertical aplicada. A

deformação do geotêxtil pode alterar o arranjo inicial dos filamentos do geotêxtil, mudando propriedades como porosidade, permissividade e abertura de filtração, entre outras.

A deformação média do geotêxtil aumentou com a *tensão vertical*, apresentando incrementos de deformação de 248 a 321% (dependendo do espaçamento) nos ensaios realizados com esferas de aço com 10 mm. No entanto, para as esferas com 18 mm de diâmetro, esta variação de incremento foi de até 674 %, apresentando deformações médias de 30 % (para tensão vertical de 2000 kPa e espaçamento entre esferas de 18 mm), em torno da metade da deformação de ruptura desses geotêxteis em ensaios de tração em faixa larga. As deformações mínimas foram na ordem de 1 %, obtidas nos ensaios que empregaram esferas de aço com $d = 10$ mm, tensão vertical de 50 kPa e relações $e/d = 0$ e 1,7.

A deformação do geotêxtil no vazio da esfera de aço foi influenciada também pelo *diâmetro da esfera*. Esta influência pode ser melhor observada a partir da relação $e/d = 0,17$, onde, as deformações obtidas com as esferas com $d = 10$ mm, foram menores que as obtidas com as esferas com $d = 18$ mm, independente da tensão vertical aplicada,

A *gramatura* do geotêxtil apresentou influência em suas deformações, sendo observado o aumento da deformação à medida que a gramatura do geotêxtil diminuiu, para ensaios com as esferas de aço de 18 mm. Para as esferas com 10 mm de diâmetro, o aumento da deformação foi pouco significativo com o aumento da gramatura do geotêxtil,

A passagem de partículas pelo geotêxtil por meio de fluxo contínuo de água destilada, com um gradiente hidráulico de 10, ou pela energia provida pelo impacto de um martelo de borracha na parede externa do permeâmetro, rotacionado de 90° em relação ao eixo do equipamento, apresentou desempenho satisfatório. Os resultados obtidos permitiram estudar a influência do afundamento do geotêxtil com gramatura de 200 g/m^2 , causado pela sua intrusão nos vazios das esferas de aço subjacente, em sua capacidade de retenção.

A análise granulométrica foi realizada nas partículas localizadas na interface do geotêxtil, nas partículas retidas no interior do geotêxtil e nas partículas passantes através do geotêxtil. As partículas da *interface* apresentaram curvas granulométricas muito próximas às da microesferas de vidro, independente do tipo de arranjo de base utilizada. O diâmetro das partículas correspondente a 95 % passante em massa (D_{95}) variou de 0,128 mm a 0,155 mm.

Apesar de alguns picos de valores de D_{95} , os resultados parecem não ter sido muito influenciados pelas condições de apoio e pelo tipo de mecanismo empregado para provocar a passagem das partículas através do geotêxtil. Os ensaios de fluxo e impacto que empregaram a placa perfurada apresentaram D_{95} ligeiramente menores ou iguais aos encontrados nos ensaios com esferas de aço.

As *partículas impregnadas* no geotêxtil tiveram o predomínio da fração areia fina (78 – 97 %). Os valores de D_{95} das partículas retidas pelo geotêxtil mostraram também pouca influência das condições de base e do tipo de mecanismo para provocar a passagem das partículas. Observou-se que algumas partículas com diâmetro superior a abertura de filtração ficaram também retidas no interior do geotêxtil.

Os resultados referentes ao D_{95} das *partículas passantes* indicaram que partículas com o diâmetro superior à abertura de filtração foram capazes de passar pelo geotêxtil e variaram de 0,037 mm a 0,415 mm. O diâmetro destas partículas alcançou até três vezes o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil, estando coerentes com os resultados apresentados por Gardoni (2000) e Bessa da Luz (2004). Tal fato se deveu à influência do diâmetro dos furos deixados pelas agulhas no processo de fabricação do geotêxtil por agulhagem. Apesar da redução no diâmetro do furo devido ao efeito da tensão vertical, há que se considerar também a possível influência da deformação do geotêxtil nos vazios entre as esferas de aço. A deformação do geotêxtil pode influenciar no aumento do diâmetro do furo da agulha.

As maiores massas de partículas passantes através do geotêxtil foram observadas nos ensaios que empregaram esferas de aço e uma tensão vertical de 50 kPa, apresentando uma média de 0,2 g. A relação máxima entre a massa de solo passante e a área de fluxo foi de 93 g/m² no ensaio com impacto, $e/d = 1$ e 50 kPa. Este valor é bem inferior ao limite de 2500 g/m² atribuído por Lafleur *et al.* (1989) para caracterizar uma condição severa de *piping* através do filtro.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com intuito de contribuir para a obtenção de resultados mais precisos nos ensaios, são enumeradas algumas sugestões para pesquisas futuras:

Para o ensaio AAC:

- Realizar ensaios com outras gramaturas de geotêxtil não tecido, tensões verticais e gradientes hidráulicos.
- Realizar ensaios com esferas de aço com outros diâmetros e com arranjos que possuam espaçamentos entre esferas distintos aos empregados nessa dissertação.
- Realizar ensaios empregando geotêxtil com dano mecânico induzido.
- Utilizar outras técnicas mais precisas para a medição do *afundamento* do geotêxtil nos vazios do material subjacente.
- Utilizar ferramentas para a obtenção da *superfície deformada* do geotêxtil nos vazios do material subjacente, como por exemplo: (1) programa computacional *PhotoModeler Scanner* que, por meio da captura dos *pixels* de uma fotografia digital, obtém a superfície do objeto em três dimensões e (2) Sistema tridimensional de superfícies (*Scanner 3D*), pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Para o ensaio GMP:

- Realizar ensaios com outras gramaturas de geotêxteis não tecidos.
- Realizar ensaios com outras tensões verticais e gradientes hidráulicos.
- Realizar ensaios com fluxo mantendo a tensão constante e variando o gradiente hidráulico e vice-versa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1992). Rochas para revestimento – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12766, Rio de Janeiro.
- ABNT (1992). Geotêxteis - Amostragem e preparação de corpos-de-prova de geotêxteis. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12593, Rio de Janeiro. 4p.
- ABNT (2001). Abração Los Angeles, agregado graúdo. NM 51
- ASTM (1995). Standards on Geosynthetics. Sponsored by ASTM Committee D-35 on Geosynthetics, Fourth Edition, 178p.
- Beirigo, E.A. (2005). Comportamento Filtro-Drenante de Geotêxteis em Barragens de Rejeitos de Mineração. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DM-140/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 192 p.
- Bessa da Luz, D.W. (2004). Compatibilidade de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaios de Filtração sob Tensão. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DM-120A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p.
- Bidim (2009). Soluções em geossintéticos 40 anos. Bidim Mexichem, São Paulo, SP, 8p.
- Calhoun, C.C., Jr. (1972). Development of design criteria and acceptance specifications for plastic filter cloths. Technical Report, S-72-7, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 83 p.
- Christopher, B.R. & Fischer, G.R. (1992). Geotextile filtration principles, practices and problems. *Geotextiles and Geomembranes*, 11: 337-353.
- Christopher, B.R. & Holtz, R.D. (1985). *Geotextile Engineering Manual*. [S.l.]: U.S. Federal Highway Administration FHWA, 1044 p.
- CIENTEC (2008). Relatório de ensaio. Fundação de Ciência e Tecnologia. N° 23169/81365. 9 p.
- DNER (1998). Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Método de Ensaio 081, Rio de Janeiro. 6 p.
- Fannin, R.J.; Void, Y.P. & Shi, Y.C. (1994). Filtration behaviour of nonwoven geotextiles. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 555-563.
- Faure, Y.H., Gourc, J.P & Gemdrin, P. (1989). Structural study of porometry and filtration opening size of geotextiles. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, I.D. Peggs (ed.), West Conshohocken, Pennsylvania, USA, pp. 102-119.

- Faure, Y.H., Gourc, J.P. & Gendrin, P. (1990). Structural Study of Porometry and Filtration Opening Size of Geotextiles. *Geosynthetics: Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, Peggs, I.D. (ed.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 102-119.
- Ferreira, J.C. (2009). Estudo sobre Drenagem e Redução de Umidade do Minério de Ferro de Carajás com a utilização de Geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DM-181/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p.
- Freedonia Group Inc. (2009). *World Geosynthetics to 2013*. 2512, 380 p.
- Gardoni, M.G.A. (2000). Estudo do Comportamento Dreno-Filtrante de Geossintéticos sob Compressão. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-003A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 313 p.
- Gerry, B.S. & Raymond, G.P. (1983). Equivalent opening size of geotextiles. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 6(2):53-63.
- Giroud, J.P. (1996). Granular filters and geotextiles filters. *Geofilters'96*, J. Lafleur & Rollin A.L. (eds.), Montreal, Quebec, Canada, pp. 565-678.
- Giroud, J.P. (2005). Quantification of geosynthetic behaviour. *Geosynthetics International*, 12(2): 2-27.
- Gomes, R.C., Palmeira, E.M. & Lanz, D. (1994). Failure and deformation mechanisms in model reinforced walls subjected to different loading conditions. *Geosynthetics International*, 1 (1): 45-65.
- Healy, K.A. & Long, R.P. (1969). Preliminary Report - Prefabricated Underdrains, University of Connecticut, New England, January, JHR 69-23, 23 p.
- Healy, K.A. & Long, R.P. (1972). Final Report, Prefabricated Underdrains, JHR 72-52, 36 p.
- Hsuan, Y.G. & Koerner, R.M. (2002). Durability and lifetime of polymer fibers with respect to reinforced geosynthetic clay barriers; i.e., reinforced GCLs. Zanzinger, Koerner & Gattung (eds.), *Clay Geosynthetic Barriers*. Balkema, Netherlands, pp. 73-86.
- IAEG (1979). Commission "Engineering Geological Mapping". Classification of rocks and soils for engineering geology mapping. Part 1: rock and soil materials. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Krefeld, v.19, p. 364-371.
- IGS (2000). Recommended Descriptions of Geosynthetics Functions, *Geosynthetics Terminology, Mathematical and Graphical Symbols*. South Carolina, U.S.A. 17 p.
- ISRM (1979). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties, and swelling and slake-durability index properties. pp. 154-156.
- John, N.W. (1987). *Geotextiles*. Blackie and Son, Glasgow, New York, USA, 347 p.

- Junqueira, F.F. (1994). Caracterização de calcários do Distrito Federal e avaliação de seu potencial para uso na pavimentação. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DG-0134/94, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília DF, 104 p.
- Kenney, T.C.; Chahal, R.; Chiu, E.; Ofoegbu, G.I.; Omange, G.N. & Ume, C.A. (1984). Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 32-43.
- Koerner. R.M. (1990). *Designing with geosynthetics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Lafleur, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. *Geotextiles and Geomembranes*, (17): 299-312.
- Lafleur, J.; Mlynarek, J. & Rollin, A.L. (1989). Filtration of broadly graded cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 115 (12): 1747-1768.
- Manso, E.A. (1999). Análise Granulométrica dos Solos de Brasília pelo Granulômetro a Laser. Dissertação de Mestrado, Publicação no G.DM-061A/99, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113 p.
- Mendes, M.J.A. (2006). Comportamento Carga-Alongamento de Geotêxteis Não Tecidos Submetidos à Tração Confinada. Dissertação de Mestrado. Publicação G.DM-142/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 152 p.
- Mitchell, J. & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons, 652 p.
- Palmeira, E.M. & Fannin, R.J. (2002). Soil-geotextile compatibility in filtration. *Geosynthetics*, Delmas & Girard (eds.). State of the art recent developments. Nice, França, pp. 853-870.
- Palmeira, E.M. & Gardoni, M.G. (2000). Geotextiles in filtration: a state of the art review and remaining challenges. *International Symposium on Geosynthetics*. Bouazza, M. (ed.), Melbourne, Australia, pp. 85-111.
- Palmeira, E.M. (2005). Notas de aulas. Drenagem e filtração com geossintéticos. Power Point. 29 p.
- Palmeira, E.M., Fannin, R.J. & Vaid, Y.P. (1996). A study on the behaviour of soil geotextile systems in filtration tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 899-912.
- Shi, Y.C. (1993). Filtration Behaviour of Nonwoven Geotextiles in the Gradient Ratio Tests, M.A.S.C. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 127 p.
- Shukla, S.K. (2002). *Fundamentals of geosynthetics. Geosynthetics and their applications*, Shukla (ed.), Thomas Telford, London, pp. 1-54.

- Williams, N.D. & Abouzakhm, M.A. (1989). Evolution of geotextile/soil filtration characteristics using the hydraulic conductivity ratio analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 8: 1-26.
- Wu, C.S.; Hong, Y.S.; Yan, Y.W. & Chang, B.S. (2002). The influence of the drainage particle contact area on soil-nonwoven geotextile filtration behavior. *Geosynthetics*. Delmas, J.P. Gourc & H. Girard (eds.), Lisse, The Netherlands, 3: 1079-1082.
- Wu, C.S.; Hong, Y.S.; Yan, Y.W. & Chang, B.S. (2006). Soil-nonwoven geotextile filtration behavior under contact with drainage materials. *Geotextiles and Geomembranes*, 24: 1-10.

APÊNDICES

A – DETALHAMENTO DO DIÂMETRO DE CONTATO E AFUNDAMENTO MÁXIMO

Tabela A.1 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, e/d= 0 em todas as tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 0																						
e= 0 mm		G1																		G2		
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa			
	D (mm)	Nº	M (mm)	δ _{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ _{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ _{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ _{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ _{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ _{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ _{max} (mm)
1	3,288	25	1,21	0,86	3,049	1,40	1,05	2,504	1,47	1,12	5,473	1,86	1,51	5,696	1,79	1,44	5,952	1,80	1,45	5,735	1,50	1,05
2	3,024	26	1,41	1,06	3,431	1,39	1,04	2,836	1,57	1,22	5,828	1,76	1,41	5,265	1,69	1,34	6,383	1,82	1,47	5,569	1,58	1,13
3	3,909	27	1,41	1,06	3,793	1,32	0,97	3,281	1,36	1,01	5,828	1,58	1,23	5,696	1,65	1,30	6,024	1,98	1,63	6,233	1,60	1,15
4	3,041	28	1,43	1,08	3,793	1,39	1,04	3,381	1,40	1,05	5,473	1,50	1,15	5,696	1,77	1,42	6,527	1,84	1,49	6,233	1,80	1,35
5	3,351	29	1,26	0,91	3,251	1,18	0,83	2,890	1,27	0,92	4,620	1,44	1,09	5,609	1,89	1,54	5,809	1,80	1,45	6,151	1,74	1,29
6	3,094	38	1,28	0,93	3,347	1,23	0,88	3,381	1,27	0,92	4,762	1,69	1,34	5,781	1,81	1,46	6,240	1,86	1,51	5,818	1,74	1,29
7	3,303	39	1,14	0,79	3,591	1,42	1,07	3,381	1,27	0,92	4,905	1,57	1,22	5,523	1,72	1,37	6,383	1,88	1,53	5,735	1,64	1,19
8	2,959	40	1,04	0,69	3,522	1,32	0,97	3,769	1,41	1,06	4,479	1,74	1,39	5,091	1,82	1,47	5,952	2,03	1,68	5,236	1,81	1,36
9	3,041	41	1,25	0,90	3,682	1,50	1,15	3,692	1,45	1,10	5,118	1,66	1,31	5,535	1,73	1,38	6,024	2,03	1,68	5,402	1,67	1,22
10	3,227	42	1,25	0,90	3,849	1,48	1,13	3,553	1,54	1,19	4,620	1,80	1,45	4,918	1,79	1,44	5,952	2,03	1,68	5,735	1,85	1,40
11	3,152	43	1,22	0,87	3,431	1,17	0,82	3,891	1,38	1,03	4,834	1,43	1,08	5,696	1,76	1,41	6,024	1,98	1,63	5,900	1,74	1,29
12	3,203	44	1,23	0,88	4,016	1,17	0,82	2,792	1,36	1,01	5,516	1,51	1,16	5,609	1,80	1,45	6,455	1,88	1,53	5,651	1,65	1,20
13	3,473	53	1,24	0,89	3,387	1,32	0,97	3,675	1,29	0,94	5,196	1,52	1,17	5,955	1,62	1,27	6,096	1,98	1,63	5,651	1,69	1,24
14	3,258	54	1,31	0,96	4,268	1,44	1,09	3,268	1,30	0,95	5,196	1,74	1,39	5,437	1,62	1,27	5,737	1,96	1,61	5,735	1,73	1,28
15	2,959	55	1,23	0,88	3,455	1,46	1,11	3,268	1,43	1,08	5,356	1,72	1,37	5,437	1,87	1,52	6,096	1,96	1,61	5,569	1,78	1,33
16	3,216	56	1,13	0,78	3,933	1,33	0,98	3,722	1,30	0,95	5,260	1,72	1,37	4,918	1,80	1,45	5,881	2,00	1,65	6,067	1,76	1,31
17	3,102	57	1,18	0,83	3,726	1,50	1,15	3,553	1,37	1,02	4,834	1,61	1,26	5,265	1,80	1,45	5,881	2,02	1,67	5,402	1,83	1,38
18	3,088	58	1,37	1,02	3,180	1,35	1,00	3,807	1,33	0,98	4,834	1,52	1,17	4,918	1,59	1,24	6,240	1,92	1,57	5,651	1,71	1,26
19	2,830	59	1,32	0,97	3,766	1,41	1,06	3,214	1,34	0,99	4,550	1,62	1,27	5,005	1,53	1,18	6,718	1,92	1,57	5,402	1,70	1,25
20	3,474	68	1,20	0,85	3,514	1,33	0,98	3,719	1,41	1,06	5,117	1,62	1,27	5,523	1,74	1,39	6,227	1,92	1,57	5,818	1,68	1,23
21	3,538	69	1,11	0,76	3,793	1,40	1,05	3,891	1,39	1,04	5,356	1,62	1,27	5,609	1,75	1,40	6,144	1,88	1,53	5,651	1,78	1,33
22	3,599	70	1,15	0,80	3,793	1,26	0,91	4,060	1,36	1,01	5,196	1,49	1,14	5,609	1,70	1,35	6,062	1,98	1,63	5,735	1,74	1,29
23	3,723	71	1,25	0,90	3,726	1,32	0,97	3,807	1,39	1,04	5,437	1,63	1,28	5,265	1,81	1,46	5,898	2,11	1,76	5,651	1,73	1,28
24	3,216	72	1,17	0,82	3,726	1,27	0,92	4,270	1,33	0,98	4,637	1,59	1,24	5,341	1,65	1,30	6,227	2,07	1,72	5,651	1,65	1,20
25	3,227				3,431			4,672			4,637			5,729			5,652			5,651		
26	3,102				4,048			4,431			4,397			5,535			6,472			5,651		
27	3,280				4,016			3,384			5,836			4,524			6,554			5,984		
28	3,351				4,101			3,881			5,047			5,781			6,144			5,569		
29	3,216				4,101			3,722			5,106			5,696			6,391			6,316		
30	3,661				3,658			4,270			5,473			5,696			6,144			5,735		
31	3,344				3,522			3,947			5,260			5,265			5,817			5,402		
32	3,603				4,016			4,028			5,118			5,091			6,142			5,984		
33	3,280				3,929			4,314			4,905			5,437			5,710			5,984		
34	3,537				3,671			3,807			4,834			4,833			6,144			6,067		
35	3,723				4,143			4,227			4,051			5,609			6,661			5,735		
36	2,917				3,933			3,130			5,545			5,469			6,489			5,651		
37	3,129				4,064			3,444			5,047			5,536			6,142			5,818		
38	3,216				4,351			3,898			4,834			4,928			5,796			5,402		
39	3,474				4,268			3,947			5,331			5,874			6,228			5,984		
40	3,409				4,064			3,866			5,260			5,536			6,315			5,651		
41	3,599				4,613			4,176			5,118			5,632			6,401			5,569		
42	3,859				4,331			4,275			4,620			5,265			6,575			5,984		
43	3,599				3,793			4,399			4,265			4,952			6,401			6,067		
44	3,288				4,101			3,130			5,331			6,213			6,472			5,402		
45	3,651				4,101			3,881			5,260			5,523			6,055			5,920		
46	3,041				4,435			4,192			5,260			5,437			6,401			5,710		
47	3,344				4,435			4,486			5,616			5,696			6,661			5,682		
48	3,859				4,200			4,511			4,550			5,198			6,575			5,682		
49	4,182				3,862			4,331			4,905			5,178			6,575			5,261		
50	3,661				3,929			4,275			4,194			5,265			6,834			6,103		
51	4,182				3,860			2,961			4,691			6,386			6,020			6,419		
52	4,182				4,048			4,006			5,047			6,278			6,622			5,687		
53	3,667				4,351			4,412			4,976			5,603			6,321			5,904		
54	2,792				4,518			3,705			4,905			5,523			6,096			5,492		
55	3,413				4,268			4,114			5,047			5,437			6,472			6,081		
56	3,477				4,133			3,878			4,585			5,131			6,622			5,687		
57	3,152				4,237			3,384			4,194			5,437			6,998			5,134		
58	3,651				4,184			3,437			5,118			5,178			6,548			5,529		
59	3,227				4,184			3,606			4,905			4,794			6,245			5,287		
60	2,731				4,435			4,265			4,479			4,660			6,020			5,217		
61	3,303				4,328			4,192			4,265			4,659			6,396			5,651		
Média	3,367			0,89	3,913		1,00	3,773		1,02	4,991		1,27	5,416		1,39	6,247		1,59	5,73		1,26
Desvio padrão	0,3			0,1	0,4		0,1	0,5		0,1	0,4		0,1	0,4		0,1	0,3		0,1	0,3		0,1

Tabela A.2 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, e/d= 0,17 em todas as tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 0,17																						
e= 1,7 mm		G1																		G2		
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa			
	D (mm)	Nº	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	2,902	21	1,54	1,09	4,055	1,72	1,27	3,891	1,69	1,24	6,247	1,73	1,28	5,029	1,77	1,32	6,454	2,24	1,79	6,256	2,06	1,61
2	3,188	22	1,49	1,04	3,908	1,83	1,38	4,163	1,63	1,18	5,498	1,71	1,26	5,091	2,04	1,59	6,083	2,34	1,89	6,409	2,04	1,59
3	3,188	23	1,51	1,06	4,276	1,65	1,20	4,254	1,67	1,22	4,873	1,60	1,15	5,153	1,86	1,41	6,231	2,11	1,66	6,571	1,97	1,52
4	2,582	24	1,42	0,97	3,613	1,77	1,32	4,072	1,66	1,21	5,311	1,81	1,36	5,091	1,91	1,46	6,008	2,18	1,73	6,652	2,03	1,58
5	3,113	25	1,47	1,02	3,539	1,53	1,08	4,072	1,57	1,12	5,247	1,73	1,28	5,091	2,10	1,65	5,712	2,12	1,67	6,328	2,00	1,55
6	3,357	33	1,32	0,87	3,760	1,66	1,21	4,163	1,65	1,20	5,436	1,83	1,38	5,402	1,97	1,52	5,786	2,39	1,94	6,165	2,04	1,59
7	2,572	34	1,50	1,05	3,981	1,70	1,25	3,891	1,71	1,26	5,747	1,57	1,12	5,525	1,95	1,50	5,786	2,43	1,98	6,084	1,94	1,49
8	2,732	35	1,54	1,09	3,244	1,74	1,29	4,344	1,80	1,35	5,123	1,86	1,41	4,966	1,92	1,47	5,712	2,51	2,06	5,922	2,08	1,63
9	3,053	36	1,48	1,03	3,539	1,79	1,34	4,344	1,70	1,25	6,310	1,93	1,48	5,091	2,01	1,56	5,490	2,42	1,97	6,003	2,15	1,70
10	2,733	37	1,46	1,01	3,834	1,80	1,35	4,887	1,70	1,25	4,311	1,90	1,45	5,587	2,22	1,77	6,231	2,42	1,97	6,490	2,20	1,75
11	3,528	38	1,47	1,02	3,981	1,71	1,26	4,887	1,68	1,23	5,311	1,82	1,37	5,885	2,15	1,70	6,008	2,27	1,82	5,922	2,11	1,66
12	2,962	39	1,50	1,05	3,834	1,61	1,16	4,977	1,51	1,06	5,123	1,78	1,33	6,242	1,82	1,37	5,563	2,10	1,65	6,084	2,14	1,69
13	3,244	46	1,48	1,03	3,908	1,39	0,94	4,615	1,69	1,24	5,060	1,76	1,31	6,063	1,88	1,43	6,083	2,00	1,55	5,760	2,08	1,63
14	3,341	47	1,45	1,00	4,564	1,60	1,15	5,068	1,64	1,19	5,436	1,86	1,41	6,021	1,78	1,33	6,083	2,08	1,63	5,598	1,97	1,52
15	2,732	48	1,57	1,12	3,686	1,72	1,27	4,435	1,82	1,37	5,747	1,94	1,49	5,525	2,06	1,61	6,305	2,28	1,83	5,922	2,26	1,81
16	2,732	49	1,57	1,12	3,539	1,70	1,25	4,525	1,82	1,37	4,936	1,86	1,41	5,836	2,05	1,60	6,379	2,17	1,72	6,003	2,31	1,86
17	2,732	50	1,55	1,10	3,244	1,66	1,21	5,068	1,74	1,29	4,074	1,86	1,41	6,025	2,11	1,66	6,157	2,27	1,82	6,976	2,11	1,66
18	3,244	51	1,26	0,81	3,686	1,44	0,99	4,796	1,72	1,27	4,715	1,81	1,36	5,550	1,85	1,40	6,008	2,24	1,79	5,922	2,10	1,65
19	3,037	52	1,33	0,88	3,908	1,49	1,04	4,977	1,62	1,17	5,436	1,73	1,28	5,708	2,06	1,61	6,157	2,08	1,63	6,409	2,08	1,63
20	2,803	60	1,62	1,17	3,981	1,56	1,11	4,706	1,69	1,24	5,311	1,92	1,47	5,550	1,83	1,38	5,712	2,19	1,74	6,328	2,11	1,66
21	3,072	61	1,43	0,98	3,981	1,46	1,01	4,887	1,69	1,24	5,436	1,63	1,18	5,603	1,80	1,35	6,527	2,07	1,62	6,328	2,06	1,61
22	3,357	62	1,58	1,13	3,908	1,58	1,13	5,159	1,70	1,25	5,685	1,68	1,23	5,338	1,84	1,39	5,712	2,12	1,67	6,246	1,98	1,53
23	2,962	63	1,52	1,07	3,465	1,66	1,21	4,435	1,79	1,34	5,623	1,78	1,33	6,131	1,96	1,51	6,157	2,19	1,74	6,003	2,05	1,60
24	2,474	64	1,42	0,97	3,539	1,63	1,18	4,163	1,72	1,27	5,498	1,57	1,12	6,871	1,91	1,46	6,157	2,13	1,68	5,840	1,98	1,53
25	3,487				3,392			4,525			4,809			5,172			6,231			5,679		
26	3,813				3,760			4,977			5,037			5,172			6,305			5,840		
27	3,471				3,244			5,159			5,315			5,826			6,527			5,840		
28	3,386				3,613			4,887			5,375			5,707			6,305			5,273		
29	3,645				4,129			4,887			5,793			5,707			6,379			6,165		
30	3,873				3,981			4,072			5,495			5,766			6,157			5,760		
31	3,189				4,055			4,254			5,315			6,420			6,157			5,598		
32	3,214				4,276			5,068			4,579			5,231			6,305			5,598		
33	3,455				3,760			4,435			4,655			5,528			6,713			6,713		
34	3,776				3,981			4,977			5,037			6,071			6,511			5,843		
35	3,983				3,981			4,706			5,037			5,571			5,861			5,955		
36	3,584				3,908			4,796			5,206			6,071			6,157			5,565		
37	3,581				3,834			4,533			5,419			5,928			6,157			5,383		
38	3,214				4,055			4,191			5,634			6,142			6,008			5,565		
39	3,286				4,203			4,019			4,772			6,714			5,688			5,930		
40	3,965				3,170			4,619			4,384			5,071			6,378			5,688		
41	3,711				3,834			4,019			4,580			5,642			6,008			5,994		
42	3,777				3,908			4,276			4,809			5,785			5,563			5,610		
43	3,455				4,353			4,447			5,419			5,999			6,083			5,930		
44	3,971				4,353			4,106			5,419			5,571			5,861			5,748		
45	3,375				3,686			4,362			5,315			5,856			5,861			5,656		
46	3,170				4,203			4,019			5,648			6,714			6,308			5,839		
47	3,536				4,213			4,362			4,384			5,285			6,982			5,610		
48	3,692				4,072			4,276			4,515			5,856			6,379			5,740		
49	3,906				3,651			4,447			4,907			6,285			6,379			5,918		
50	4,296				4,283			4,533			5,204			6,428			6,083			5,610		
51	4,167				4,500			4,447			5,133			6,214			6,713			5,840		
52	3,145				4,423			4,699			4,809			6,285			6,511			5,610		
53	3,857				3,440			4,106			4,174			6,499			5,773			5,294		
54	3,536				3,511			4,132			4,746			5,999			6,243			5,352		
55	3,145				3,318			3,971			4,862			6,142			6,646			5,054		
Média	3,333	-	-	1,028	3,856	-	1,19	4,492	-	1,24	5,150	-	1,33	5,764	-	1,5	6,141	-	1,77	5,917	-	1,63
Desvio padrão	0,4	-	-	0,1	0,3	-	0,1	0,4	-	0,1	0,5	-	0,1	0,5	-	0,1	0,3	-	0,1	0,4	-	0,1

Tabela A.3 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, e/d= 0,33 em todas as tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 0,33																						
e= 3,3 mm		G1																		G2		
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa			
	D (mm)	Nº	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	2,951	10	2,22	1,77	4,237	1,84	1,39	4,650	2,20	1,75	5,963	2,06	1,61	6,044	2,35	1,90	7,495	2,66	2,21	7,584	2,22	1,77
2	3,060	11	1,92	1,47	4,272	1,66	1,21	5,176	2,12	1,67	5,010	2,14	1,69	5,731	2,57	2,12	7,232	2,92	2,47	6,799	2,37	1,92
3	3,149	12	1,60	1,15	4,030	1,61	1,16	4,737	2,03	1,58	5,010	2,25	1,80	6,356	2,30	1,85	7,890	3,14	2,69	7,584	2,43	1,98
4	3,239	13	1,58	1,13	3,716	1,66	1,21	4,324	2,42	1,97	5,169	2,65	2,20	6,252	2,68	2,23	7,626	3,13	2,68	6,713	2,61	2,16
5	4,182	14	1,59	1,14	3,960	1,73	1,28	4,650	2,29	1,84	5,089	2,57	2,12	6,356	2,59	2,14	8,096	3,17	2,72	8,195	2,56	2,11
6	2,986	19	1,98	1,53	4,191	1,88	1,43	4,562	2,05	1,60	5,963	2,21	1,76	5,939	2,38	1,93	7,780	2,79	2,34	6,713	2,44	1,99
7	3,419	20	1,95	1,50	4,030	1,99	1,54	4,825	2,05	1,60	5,407	2,27	1,82	6,773	2,64	2,19	7,992	2,76	2,31	6,713	2,42	1,97
8	3,419	21	2,33	1,88	3,627	2,29	1,84	4,825	2,10	1,65	5,725	2,40	1,95	6,669	2,94	2,49	7,992	2,99	2,54	7,061	2,50	2,05
9	3,419	22	1,99	1,54	3,564	1,93	1,48	4,474	2,00	1,55	5,725	2,33	1,88	6,773	2,64	2,19	8,306	3,14	2,69	6,887	2,56	2,11
10	3,730	23	2,02	1,57	3,792	1,89	1,44	4,562	1,92	1,47	5,487	2,17	1,72	6,669	3,06	2,61	7,466	3,02	2,57	7,671	2,48	2,03
11	3,672	24	1,99	1,54	4,367	1,80	1,35	5,264	1,93	1,48	5,328	2,08	1,63	6,669	2,72	2,27	7,780	2,96	2,51	6,974	2,39	1,94
12	3,773	25	1,89	1,44	3,871	1,37	0,92	5,352	1,98	1,53	5,645	2,22	1,77	6,460	2,59	2,14	7,570	3,11	2,66	6,887	2,54	2,09
13	3,510	30	2,23	1,78	4,352	2,11	1,66	5,088	1,95	1,50	6,043	2,08	1,63	6,773	2,37	1,92	7,466	2,69	2,24	6,799	2,46	2,01
14	3,538	31	1,67	1,22	3,869	1,80	1,35	5,001	2,03	1,58	5,725	2,41	1,96	6,669	2,60	2,15	7,570	2,90	2,45	6,974	2,45	2,00
15	3,773	32	1,81	1,36	4,095	1,79	1,34	5,176	2,36	1,91	6,202	2,40	1,95	7,190	2,66	2,21	7,780	3,26	2,81	7,323	2,65	2,20
16	3,825	33	1,85	1,40	3,716	2,00	1,55	4,737	2,26	1,81	6,043	2,52	2,07	6,583	2,73	2,28	7,780	3,00	2,55	7,759	2,49	2,04
17	3,876	34	2,07	1,62	4,352	1,80	1,35	5,264	2,45	2,00	6,281	2,67	2,22	6,846	2,60	2,15	7,570	3,48	3,03	7,061	2,77	2,32
18	3,510	35	1,84	1,39	4,566	1,80	1,35	5,176	2,05	1,60	5,725	2,41	1,96	6,759	2,34	1,89	7,886	3,11	2,66	6,974	2,50	2,05
19	3,773	36	1,69	1,24	4,268	1,86	1,41	5,352	1,76	1,31	5,805	2,34	1,89	6,231	2,37	1,92	7,676	3,14	2,69	6,538	2,39	1,94
20	4,240	41	1,91	1,46	4,019	2,21	1,76	5,264	1,87	1,42	6,043	2,20	1,75	6,669	2,62	2,17	7,886	2,81	2,36	6,625	2,51	2,06
21	4,113	42	2,04	1,59	4,191	1,98	1,53	4,650	1,77	1,32	6,520	2,02	1,57	6,877	2,55	2,10	8,096	2,90	2,45	6,713	2,39	1,94
22	3,525	43	1,84	1,39	3,792	1,73	1,28	5,260	1,92	1,47	5,963	2,04	1,59	6,565	2,66	2,21	7,255	2,73	2,28	6,713	2,33	1,88
23	3,651	44	1,86	1,41	4,929	1,67	1,22	5,703	1,71	1,26	6,043	2,17	1,72	6,670	2,65	2,20	7,466	2,71	2,26	7,235	2,45	2,00
24	3,826	45	1,72	1,27	4,246	1,60	1,15	6,141	2,20	1,75	5,680	2,25	1,80	7,022	2,30	1,85	7,466	3,11	2,66	7,149	2,52	2,07
25	3,162				4,854			5,439			6,123			7,109			7,466			7,323		
26	3,869				4,474			4,825			6,352			7,022			7,150			7,410		
27	3,876				4,268			5,260			5,963			7,022			7,045			6,887		
28	3,419				4,323			5,142			6,202			7,285			8,096			6,713		
29	3,921				4,513			5,589			6,352			6,670			7,360			7,410		
30	3,779				4,605			5,041			5,122			6,934			7,780			7,061		
31	4,182				4,513			4,913			5,946			7,373			7,466			6,713		
32	4,080				4,237			5,352			6,037			7,197			7,992			7,149		
33	3,773				4,443			4,909			5,946			7,109			7,150			7,149		
34	3,730				4,698			4,743			6,860			6,583			6,729			6,277		
35	3,730				5,158			5,258			6,769			6,231			7,466			7,149		
36	3,773				4,881			5,362			7,135			7,081			7,255			7,149		
37	3,699				5,016			4,743			5,763			7,548			7,150			6,799		
Média	3,653	-	-	1,45	4,271	-	1,38	5,048	-	1,609	5,896	-	1,836	6,722	-	2,13	7,601	-	2,53	7,049	-	2,026
Desvio padrão	0,3	-	-	0,2	0,4	-	0,2	0,4	-	0,2	0,5	-	0,2	0,4	-	0,2	0,3	-	0,2	0,4	-	0,1

Tabela A.4 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, e/d= 0,67 em todas as tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 0,67																						
e= 6,7 mm		G1																		G2		
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa			
	D (mm)	Nº	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	4,408	1	2,50	2,05	3,829	3,17	2,72	5,644	2,83	2,38	6,129	3,10	2,65	6,504	3,35	2,90	7,833	3,96	3,51	6,446	3,06	2,61
2	3,749	2	2,43	1,98	4,610	3,33	2,88	5,241	3,18	2,73	6,484	3,03	2,58	6,898	3,37	2,92	7,833	4,63	4,18	8,617	3,09	2,64
3	4,665	3	2,11	1,66	5,102	2,82	2,37	5,443	2,70	2,25	6,484	2,72	2,27	6,394	3,02	2,57	8,088	3,99	3,54	7,659	2,95	2,50
4	5,088	4	2,16	1,71	5,156	2,89	2,44	5,712	2,61	2,16	6,573	2,80	2,35	7,170	3,22	2,77	8,769	4,40	3,95	8,115	2,96	2,51
5	5,288	5	2,53	2,08	4,845	2,23	1,78	4,991	2,91	2,46	6,661	3,22	2,77	7,519	3,10	2,65	8,429	4,18	3,73	7,314	3,22	2,77
6	4,065	6	2,62	2,17	5,287	2,73	2,28	5,913	3,05	2,60	6,484	3,05	2,60	6,677	3,52	3,07	8,684	4,07	3,62	7,438	3,20	2,75
7	4,451	7	2,73	2,28	5,287	3,15	2,70	5,779	3,32	2,87	6,217	3,70	3,25	6,765	4,01	3,56	7,747	4,18	3,73	8,342	3,26	2,81
8	4,620	8	2,71	2,26	5,334	2,65	2,20	5,577	3,44	2,99	6,661	3,54	3,09	7,924	4,16	3,71	8,939	4,14	3,69	8,038	3,12	2,67
9	5,088	9	2,59	2,14	5,547	2,82	2,37	5,308	3,07	2,62	6,750	3,11	2,66	7,656	3,47	3,02	9,365	4,60	4,15	7,740	2,96	2,51
10	4,486	10	2,41	1,96	4,784	2,74	2,29	5,510	2,50	2,05	6,750	2,92	2,47	7,910	3,06	2,61	8,172	4,28	3,83	7,910	3,00	2,55
11	3,124	11	2,06	1,61	3,679	2,38	1,93	5,577	2,42	1,97	6,306	2,49	2,04	5,608	3,00	2,55	7,662	4,41	3,96	6,750	2,86	2,41
12	4,537	12	2,12	1,67	5,194	2,49	2,04	5,443	2,45	2,00	6,040	2,61	2,16	7,210	3,16	2,71	8,513	4,30	3,85	7,584	3,00	2,55
13	4,082	13	1,92	1,47	5,199	2,70	2,25	5,510	2,40	1,95	6,397	2,83	2,38	6,962	3,60	3,15	8,088	4,21	3,76	7,052	3,15	2,70
14	4,486	14	2,64	2,19	5,485	2,60	2,15	5,712	2,60	2,15	6,661	3,06	2,61	7,572	3,74	3,29	8,172	3,95	3,50	6,962	3,07	2,62
15	4,486	15	2,24	1,79	5,374	2,41	1,96	5,510	2,35	1,90	6,484	3,02	2,57	8,190	3,63	3,18	8,769	3,73	3,28	7,399	3,02	2,57
16	3,851	16	2,21	1,76	4,172	2,92	2,47	5,467	2,91	2,46	5,862	3,18	2,73	6,982	3,80	3,35	8,343	4,13	3,68	6,889	2,98	2,53
17	3,543	17	2,84	2,39	5,131	3,05	2,60	5,980	3,08	2,63	6,661	3,38	2,93	6,320	4,16	3,71	7,747	4,42	3,97	7,763	3,00	2,55
18	4,017	18	2,80	2,35	5,266	2,91	2,46	5,913	3,41	2,96	6,573	3,08	2,63	7,029	3,15	2,70	8,172	4,72	4,27	7,963	2,99	2,54
19	4,390	19	2,34	1,89	5,266	2,52	2,07	5,779	3,68	3,23	6,889	3,06	2,61	7,567	3,27	2,82	8,769	4,70	4,25	7,508	3,36	2,91
20	4,005	20	2,29	1,84	5,131	2,54	2,09	5,980	2,90	2,45	6,661	2,78	2,33	7,924	3,12	2,67	9,110	4,37	3,92	7,282	3,13	2,68
21	3,851	21	2,34	1,89	4,666	2,59	2,14	5,510	2,77	2,32	7,461	2,97	2,52	7,656	3,41	2,96	7,321	4,25	3,80	7,910	3,40	2,95
22	4,178	22	2,08	1,63	4,726	2,55	2,10	5,846	2,79	2,34	6,393	2,96	2,51	8,012	3,16	2,71	7,662	4,05	3,60	8,242	2,97	2,52
23	3,543	23	2,21	1,76	5,131	2,06	1,61	5,443	2,66	2,21	6,573	3,11	2,66	7,478	3,22	2,77	8,088	3,59	3,14	8,190	3,04	2,59
24	4,236	24	1,96	1,51	4,456	2,34	1,89	5,846	2,86	2,41	6,661	3,19	2,74	8,190	3,14	2,69	8,172	3,51	3,06	8,115	2,90	2,45
25	3,620	25	2,38	1,93	4,203	2,57	2,12	5,577	3,13	2,68	6,838	3,22	2,77	7,745	3,45	3,00	7,662	3,68	3,23	7,602	2,77	2,32
26	3,667	26	3,00	2,55	4,793	2,63	2,18	5,107	3,17	2,72	6,217	3,50	3,05	7,745	3,55	3,10	6,981	4,01	3,56	8,163	2,79	2,34
		27	2,97	2,52		2,88	2,43		3,49	3,04		3,36	2,91		3,40	2,95		4,95	4,50		3,36	2,91
		28	2,63	2,18		2,65	2,20		3,31	2,86		2,85	2,40		3,38	2,93		4,46	4,01		3,60	3,15
		29	2,44	1,99		2,78	2,33		3,14	2,69		2,87	2,42		3,69	3,24		4,42	3,97		3,47	3,02
		30	2,59	2,14		2,74	2,29		2,73	2,28		3,08	2,63		4,13	3,68		4,66	4,21		3,60	3,15
		31	2,88	2,43		2,20	1,75		2,63	2,18		3,03	2,58		3,27	2,82		3,92	3,47		3,12	2,67
		32	2,76	2,31		2,50	2,05		2,84	2,39		3,22	2,77		3,84	3,39		3,70	3,25		2,99	2,54
		33	3,21	2,76		3,21	2,76		3,11	2,66		3,68	3,23		3,95	3,50		3,70	3,25		3,07	2,62
		34	3,05	2,60		2,87	2,42		3,00	2,55		3,20	2,75		3,82	3,37		4,47	4,02		3,19	2,74
Média	4,212	—	—	2,04	4,910	—	2,24	5,589	—	2,42	6,534	—	2,59	7,293	—	2,96	8,196	—	3,75	7,654	—	2,62
Desvio padrão	0,5	—	—	0,3	0,5	—	0,3	0,3	—	0,3	0,3	—	0,3	0,6	—	0,3	0,6	—	0,4	0,5	—	0,2

Tabela A.5 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 10 mm de diâmetro, e/d= 1 em todas as tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 1																						
e= 10 mm		G1																		G2		
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa			
	D (mm)	Nº	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	4,175	1	3,22	2,77	4,901	3,62	3,17	5,542	4,50	4,05	7,245	4,02	3,57	8,021	4,76	4,31	8,600	5,44	4,99	8,118	3,65	3,20
2	4,390	2	3,10	2,65	5,611	4,08	3,63	6,633	4,14	3,69	7,241	4,07	3,62	8,264	4,65	4,20	8,812	5,71	5,26	8,386	3,64	3,19
3	3,710	3	3,06	2,61	5,028	3,47	3,02	5,815	3,72	3,27	7,686	4,13	3,68	7,925	4,49	4,04	8,007	6,13	5,68	8,475	3,85	3,40
4	4,312	4	3,65	3,20	5,101	3,50	3,05	6,360	4,08	3,63	8,431	4,03	3,58	7,403	4,44	3,99	7,964	5,45	5,00	9,100	3,65	3,20
5	4,791	5	3,30	2,85	5,392	3,66	3,21	5,673	4,07	3,62	6,684	3,84	3,39	8,460	4,42	3,97	9,194	5,33	4,88	8,475	3,57	3,12
6	4,914	6	3,45	3,00	5,392	3,53	3,08	5,768	4,08	3,63	6,977	3,76	3,31	8,499	4,23	3,78	7,682	5,91	5,46	7,494	3,82	3,37
7	3,695	7	2,79	2,34	5,903	3,38	2,93	6,249	3,98	3,53	6,905	3,85	3,40	7,568	4,61	4,16	7,964	5,94	5,49	8,208	3,97	3,52
8	4,112	8	3,15	2,70	4,372	3,22	2,77	5,961	3,36	2,91	7,764	3,95	3,50	7,830	4,50	4,05	7,795	5,70	5,25	8,654	3,94	3,49
9	4,791	9	3,06	2,61	5,246	3,52	3,07	6,103	3,91	3,46	7,830	3,49	3,04	7,499	4,55	4,10	6,948	5,29	4,84	8,118	4,00	3,55
10	4,518	10	3,15	2,70	5,756	3,54	3,09	6,321	3,30	2,85	6,842	3,86	3,41	8,403	4,56	4,11	7,174	5,22	4,77	7,419	3,90	3,45
11	4,791	11	3,08	2,63	5,829	3,20	2,75	6,865	3,12	2,67	7,754	3,41	2,96	7,734	4,55	4,10	8,473	4,91	4,46	8,262	3,69	3,24
12	4,038	12	3,69	3,24	6,193	3,22	2,77	6,153	3,47	3,02	6,758	4,07	3,62	7,734	4,79	4,34	7,908	5,12	4,67	8,654	3,82	3,37
13	4,313	13	3,66	3,21	5,538	3,61	3,16	6,249	3,53	3,08	7,830	3,83	3,38	7,830	4,93	4,48	7,682	5,88	5,43	9,010	3,57	3,12
14	5,014	14	2,56	2,11	6,048	3,52	3,07	5,961	3,32	2,87	7,375	3,77	3,32	9,166	5,15	4,70	8,925	6,17	5,72	9,100	3,71	3,26
15	4,435	15	3,00	2,55	5,538	3,08	2,63	6,153	3,68	3,23	7,602	4,00	3,55	8,976	4,72	4,27	7,739	6,26	5,81	9,635	3,71	3,26
16	4,515	16	3,00	2,55	5,392	3,20	2,75	5,961	3,41	2,96	6,994	3,81	3,36	7,689	4,87	4,42	8,078	5,68	5,23	8,475	3,79	3,34
17	4,412	17	3,03	2,58	5,173	3,08	2,63	5,673	3,65	3,20	6,977	4,18	3,73	7,637	5,02	4,57	8,473	6,19	5,74	8,029	3,95	3,50
18	4,515	18	3,37	2,92	6,048	3,56	3,11	6,056	3,64	3,19	7,196	4,33	3,88	7,124	4,38	3,93	8,360	6,05	5,60	8,296	3,77	3,32
19	4,112	19	3,74	3,29	5,028	3,47	3,02	5,480	3,27	2,82	6,614	4,03	3,58	7,555	4,46	4,01	8,000	5,69	5,24	7,762	3,37	2,92
		20	3,20	2,75		2,93	2,48		3,11	2,66		3,55	3,10		5,26	4,81		5,39	4,94		4,10	3,65
		21	3,47	3,02		2,73	2,28		3,28	2,83		4,04	3,59		4,95	4,50		5,92	5,47		4,11	3,66
		22	3,97	3,52		2,77	2,32		3,65	3,20		4,11	3,66		4,73	4,28		5,77	5,32		4,09	3,64
		23	4,00	3,55		2,60	2,15		3,47	3,02		4,02	3,57		4,70	4,25		6,23	5,78		4,21	3,76
		24	3,66	3,21		2,89	2,44		3,48	3,03		4,00	3,55		4,54	4,09		6,25	5,80		3,96	3,51
Média	4,398	–	–	2,86	5,447	–	2,86	6,051	–	3,18	7,300	–	3,47	7,964	–	4,23	8,094	–	5,28	8,404	–	3,38
Desvio padrão	0,4	–	–	0,4	0,5	–	0,4	0,4	–	0,4	0,5	–	0,2	0,5	–	0,3	0,6	–	0,4	0,6	–	0,2

Tabela A.6 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, e/d= 0 em todas as tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 0																					
e= 0 mm	G1																		G2		
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	5,150	2,18	1,83	–	2,44	2,09	–	2,57	2,22	8,535	3,02	2,67	9,981	3,02	2,67	10,706	3,43	3,08	9,843	2,62	2,27
2	5,150	2,17	1,82	–	2,36	2,01	–	2,71	2,36	8,592	3,01	2,66	9,920	2,91	2,56	9,843	3,10	2,75	10,062	2,73	2,38
3	5,493	2,02	1,67	–	1,88	1,53	–	2,80	2,45	8,314	2,75	2,40	9,482	2,81	2,46	10,102	3,02	2,67	9,516	2,82	2,47
4	6,486	2,17	1,82	–	2,35	2,00	–	2,43	2,08	9,760	2,98	2,63	10,377	2,82	2,47	10,584	3,10	2,75	10,609	2,94	2,59
5	6,359	2,73	2,38	–	2,45	2,10	–	2,60	2,25	9,365	2,82	2,47	10,226	2,80	2,45	10,584	2,90	2,55	10,280	2,97	2,62
6	5,531	2,33	1,98	–	2,28	1,93	–	2,63	2,28	8,140	3,08	2,73	9,461	2,92	2,57	10,584	3,18	2,83	10,171	2,57	2,22
7	5,150	2,42	2,07	–	2,43	2,08	–	2,49	2,14	7,824	2,85	2,50	9,260	2,92	2,57	10,584	3,24	2,89	9,843	2,65	2,30
8	6,180	2,19	1,84	–	1,96	1,61	–	2,50	2,15	10,383	2,60	2,25	10,113	2,77	2,42	10,584	3,14	2,79	10,280	2,62	2,27
9	5,875	2,42	2,07	–	1,99	1,64	–	2,43	2,08	9,880	2,64	2,29	9,981	2,91	2,56	10,584	3,35	3,00	9,843	2,85	2,50
10	5,427	2,02	1,67	–	2,54	2,19	–	2,41	2,06	8,982	2,64	2,29	10,226	2,94	2,59	10,584	3,29	2,94	9,516	2,83	2,48
11	5,254	2,62	2,27	–	2,42	2,07	–	2,30	1,95	8,443	2,51	2,16	9,585	2,94	2,59	10,584	3,44	3,09	9,406	2,87	2,52
12	4,196	2,48	2,13	–	2,42	2,07	–	2,29	1,94	7,904	2,64	2,29	8,686	2,85	2,50	10,584	3,29	2,94	9,406	2,99	2,64
13	6,485	2,22	1,87	–	2,23	1,88	–	2,39	2,04	9,916	3,17	2,82	10,421	2,81	2,46	10,589	3,44	3,09	10,827	2,69	2,34
14	6,359	2,20	1,85	–	2,28	1,93	–	2,81	2,46	9,988	2,48	2,13	10,509	2,68	2,33	10,589	3,33	2,98	9,406	2,78	2,43
15	5,932	2,21	1,86	–	2,37	2,02	7,670	2,34	1,99	9,772	2,65	2,30	9,937	2,75	2,40	10,589	3,24	2,89	9,953	2,74	2,39
16	4,195	2,00	1,65	7,210	2,31	1,96	7,940	2,35	2,00	7,940	2,60	2,25	9,981	2,79	2,44	10,128	3,20	2,85	10,280	2,87	2,52
17	5,341	1,95	1,60	6,124	2,18	1,83	7,430	2,02	1,67	9,751	2,50	2,15	10,597	3,18	2,83	10,606	3,42	3,07	9,734	2,85	2,50
18	4,959	2,29	1,94	6,050	2,38	2,03	7,190	2,31	1,96	9,449	2,55	2,20	10,025	2,97	2,62	11,022	3,06	2,71	9,296	2,89	2,54
19	5,570	2,40	2,05	6,600	2,48	2,13	7,120	2,10	1,75	7,976	2,49	2,14	10,465	2,90	2,55	11,166	3,31	2,96	9,624	3,04	2,69
20		2,39	2,04		2,47	2,12		2,71	2,36		2,75	2,40		2,84	2,49		3,25	2,90		2,96	2,61
21		2,42	2,07		2,45	2,10		2,14	1,79		2,70	2,35		2,83	2,48		3,40	3,05		2,84	2,49
22		2,44	2,09		2,14	1,79		2,26	1,91		2,48	2,13		2,92	2,57		3,45	3,10		2,78	2,43
23		2,38	2,03		2,29	1,94		2,49	2,14		2,54	2,19		3,15	2,80		3,08	2,73		2,78	2,43
24		2,32	1,97		2,37	2,02		2,25	1,90		2,52	2,17		3,17	2,82		3,48	3,13		2,85	2,50
Média	5,531	–	1,94	6,496	–	1,96	7,470	–	2,08	8,995	–	2,36	9,960	–	2,55	10,557	–	2,91	9,889	–	2,46
Desvio padrão	0,7	–	0,2	0,5	–	0,2	0,3	–	0,2	0,9	–	0,2	0,5	–	0,1	0,3	–	0,2	0,4	–	0,1

Tabela A.7 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ em todas as tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 0,17																					
e= 3 mm		G1																		G2	
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	6,828	2,89	2,44	5,501	2,81	2,36	5,677	3,47	3,02	9,624	3,78	3,33	12,299	3,90	3,45	12,426	4,68	4,23	10,517	3,27	2,82
2	7,323	2,84	2,39	5,460	3,21	2,76	6,625	3,60	3,15	9,756	3,71	3,26	12,182	4,00	3,55	14,090	5,08	4,63	11,556	3,19	2,74
3	6,850	3,13	2,68	5,308	4,10	3,65	6,965	3,94	3,49	10,020	3,43	2,98	11,133	4,04	3,59	14,090	5,00	4,55	12,724	3,21	2,76
4	7,475	2,83	2,38	5,404	3,01	2,56	6,455	3,07	2,62	10,020	3,66	3,21	11,483	3,94	3,49	13,992	4,61	4,16	11,296	3,37	2,92
5	7,377	2,74	2,29	6,147	3,10	2,65	7,219	3,68	3,23	9,624	3,39	2,94	12,240	4,14	3,69	14,774	4,40	3,95	11,946	3,35	2,90
6	7,475	3,02	2,57	7,228	3,29	2,84	8,494	3,82	3,37	10,547	3,46	3,01	11,307	4,19	3,74	14,187	4,73	4,28	11,167	3,40	2,95
7	7,548	2,82	2,37	7,566	3,44	2,99	8,239	3,35	2,90	11,074	3,47	3,02	11,658	3,89	3,44	13,306	4,96	4,51	11,946	3,50	3,05
8	7,828	3,08	2,63	7,516	2,84	2,39	8,069	3,47	3,02	10,419	3,78	3,33	10,842	3,89	3,44	14,774	5,07	4,62	11,167	3,62	3,17
9	7,170	2,92	2,47	6,755	2,79	2,34	8,324	2,83	2,38	10,094	3,80	3,35	11,425	4,15	3,70	14,285	4,72	4,27	11,425	3,87	3,42
10	–	2,94	2,49	7,334	2,64	2,19	8,239	2,83	2,38	10,636	3,54	3,09	13,232	4,10	3,65	12,788	4,96	4,51	11,686	3,75	3,30
11	–	3,07	2,62	8,299	3,19	2,74	8,713	3,69	3,24	10,528	3,80	3,35	12,823	3,93	3,48	13,963	4,81	4,36	11,037	3,69	3,24
12	–	2,98	2,53	7,612	3,17	2,72	9,173	3,13	2,68	9,876	3,77	3,32	12,649	4,02	3,57	13,180	4,64	4,19	11,037	3,92	3,47
13	–	3,20	2,75	7,178	2,82	2,37	8,204	3,26	2,81	10,419	3,81	3,36	13,174	3,89	3,44	12,658	4,97	4,52	10,258	3,65	3,20
14	–	2,70	2,25	7,684	2,68	2,23	8,663	3,13	2,68	10,203	3,88	3,43	13,464	4,00	3,55	11,745	4,32	3,87	10,777	3,64	3,19
15		2,75	2,30		3,46	3,01		3,62	3,17		3,97	3,52		4,25	3,80		4,44	3,99		3,64	3,19
16		2,65	2,20		3,46	3,01		3,48	3,03		3,45	3,00		3,60	3,15		4,41	3,96		3,82	3,37
Média	7,319	–	2,46	6,785	–	2,68	7,790	–	2,95	10,203	–	3,22	12,136	–	3,55	13,590	–	4,29	11,324	–	3,11
Desvio padrão	0,3	–	0,2	1,0	–	0,4	1,0	–	0,3	0,4	–	0,2	0,8	–	0,2	0,9	–	0,3	0,6	–	0,2

Tabela A.8 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ em todas as tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 0,33																					
e= 6 mm		G1															G2				
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (cm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	6,557	2,67	2,22	6,707	3,33	2,88	8,363	4,22	3,77	10,560	4,34	3,89	12,841	4,62	4,17	13,954	5,76	5,31	11,961	4,16	3,71
2	6,893	2,68	2,23	6,638	3,26	2,81	9,005	3,82	3,37	11,032	4,22	3,77	13,471	4,29	3,84	15,738	5,40	4,95	11,835	4,38	3,93
3	7,818	2,50	2,05	7,426	3,46	3,01	9,598	3,72	3,27	10,940	4,04	3,59	13,077	4,42	3,97	14,059	5,58	5,13	11,709	4,36	3,91
4	7,313	2,60	2,15	8,101	3,42	2,97	9,374	3,86	3,41	10,187	4,17	3,72	12,918	4,36	3,91	14,689	5,85	5,40	13,094	3,77	3,32
5	7,898	2,79	2,34	7,200	3,61	3,16	9,842	3,49	3,04	11,307	4,22	3,77	12,367	4,57	4,12	15,633	5,98	5,53	12,843	3,61	3,16
6	7,146	2,83	2,38	8,604	3,22	2,77	9,530	3,87	3,42	11,307	4,00	3,55	12,998	4,88	4,43	14,899	5,85	5,40	12,843	4,37	3,92
7	–	2,58	2,13	8,551	3,00	2,55	9,625	3,34	2,89	10,296	4,09	3,64	12,289	4,95	4,50	14,899	6,26	5,81	10,576	4,01	3,56
8	–	2,71	2,26	8,171	3,43	2,98	10,000	3,40	2,95	11,057	3,98	3,53	13,785	4,34	3,89	15,423	6,13	5,68	11,584	4,44	3,99
9	–	2,86	2,41	8,400	3,32	2,87	10,290	3,00	2,55	11,892	3,97	3,52	13,155	4,77	4,32	14,794	6,44	5,99	11,961	4,17	3,72
10	–	3,05	2,60	8,400	3,40	2,95	9,662	3,11	2,66	10,940	3,98	3,53	13,471	4,58	4,13	14,374	5,98	5,53	11,458	3,64	3,19
Média	7,271	–	2,28	7,820	–	2,90	9,529	–	3,13	10,952	–	3,65	13,037	–	4,13	14,846	–	5,47	11,986	–	3,64
Desvio padrão	0,5	–	0,2	0,8	–	0,2	0,5	–	0,4	0,5	–	0,1	0,5	–	0,2	0,6	–	0,3	0,8	–	0,3

Tabela A.9 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,67$ em todas as tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 0,67																						
e= 12 mm		G1																		G2		
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa			
	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (cm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	
1	9,009	4,40	3,95	8,159	4,39	3,94	10,845	4,63	4,18	12,504	5,79	5,34	13,906	7,53	7,08	15,646	9,49	9,04	12,400	6,47	6,02	
2	8,931	4,56	4,11	10,163	4,61	4,16	11,408	4,51	4,06	13,215	5,69	5,24	12,594	8,17	7,72	17,021	9,61	9,16	–	7,34	6,89	
3	9,371	4,27	3,82	8,684	4,71	4,26	10,845	4,93	4,48	13,012	5,76	5,31	13,431	7,10	6,65	15,726	9,14	8,69	–	7,12	6,67	
4	9,262	4,44	3,99	10,272	4,51	4,06	11,408	4,86	4,41	13,043	5,80	5,35	13,906	7,12	6,67	16,373	8,90	8,45	–	7,27	6,82	
5	8,316	4,59	4,14	10,377	4,34	3,89	11,549	4,94	4,49	14,063	5,92	5,47	12,753	6,93	6,48	16,466	9,67	9,22	–	7,15	6,70	
6	8,428	4,31	3,86	9,531	4,15	3,70	11,268	5,38	4,93	13,269	5,61	5,16	14,042	6,89	6,44	14,649	8,80	8,35	–	6,50	6,05	
7	8,365			10,590			12,394			12,707			15,100			14,182			–			
Média	8,812	–	3,98	9,682	–	4,00	11,388	–	4,43	13,116	–	5,31	13,676	–	6,84	15,723	–	8,82	12,400	–	6,53	
Desvio padrão	0,4	–	0,1	0,9	–	0,2	0,5	–	0,3	0,5	–	0,1	0,9	–	0,5	1,0	–	0,4	0,0	–	0,4	

Tabela A.10 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou esferas de aço com 18 mm de diâmetro, e/d= 1 em todas as tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 1																					
e= 18 mm		G1																		G2	
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	10,065	5,91	5,46	8,880	6,97	6,52	12,339	8,45	8,00	13,687	8,81	8,36	15,895	11,12	10,67	18,000	13,79	13,34	13,246	8,95	8,50
2	8,718	6,14	5,69	9,358	6,65	6,20	13,439	7,34	6,89	13,279	8,22	7,77	14,982	9,93	9,48	18,000	15,87	15,42	15,045	8,48	8,03
3	9,492	6,27	5,82	8,880	6,94	6,49	12,171	7,90	7,45	12,984	8,17	7,72	15,895	9,91	9,46	18,000	13,40	12,95	13,655	8,87	8,42
4	10,143	5,62	5,17	10,837	6,93	6,48	13,861	8,07	7,62	15,149	7,58	7,13	16,416	10,49	10,04	18,000	14,58	14,13	15,493	8,97	8,52
5	10,171	5,90	5,45	8,784	5,90	5,45	12,339	7,86	7,41	14,951	6,88	6,43	16,546	9,98	9,53	18,000	15,66	15,21	14,016	9,20	8,75
6	9,362	6,21	5,76	10,360	6,78	6,33	12,847	7,63	7,18	15,330	8,33	7,88	17,719	–	–	18,000	13,68	13,23	15,142	9,53	9,08
7	9,063	–	–	11,091	–	–	12,171	–	–	14,459	–	–	16,806	–	–	18,000	–	–	15,006	–	–
Média	9,573	–	5,56	9,742	–	6,25	12,738	–	7,43	14,263	–	7,55	16,323	–	9,84	18,000	–	14,05	14,514	–	8,55
Desvio padrão	0,6	–	0,2	1,0	–	0,4	0,7	–	0,4	0,9	–	0,7	0,9	–	0,5	0,0	–	1,1	0,9	–	0,3

Tabela A.11 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio de repetibilidade que empregou geotêxtil G1, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, e/d= 0,33 em todas as tensões verticais.

REPETIBILIDADE																		
e= 6 mm			d= 18 mm, e/d= 0,33															
			G1															
Nº	50 kPa			100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa		
	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	6,989	3,84	3,39	8,523	3,84	3,39	9,858	4,11	3,66	11,316	4,04	3,59	14,487	4,95	4,50	14,179	5,62	5,17
2	6,967	3,62	3,17	8,679	3,71	3,26	9,634	3,76	3,31	11,588	4,02	3,57	13,421	4,94	4,49	14,720	5,52	5,07
3	6,862	3,29	2,84	8,836	3,44	2,99	10,754	3,56	3,11	10,497	3,82	3,37	13,179	4,43	3,98	12,880	5,50	5,05
4	7,344	2,60	2,15	7,897	3,04	2,59	9,666	3,63	3,18	11,498	3,63	3,18	13,002	4,64	4,19	15,694	5,41	4,96
5	8,106	2,71	2,26	8,562	2,82	2,37	10,306	3,81	3,36	11,611	3,94	3,49	12,790	4,10	3,65	14,395	5,68	5,23
6	6,514	3,49	3,04	8,441	3,04	2,59	10,306	3,95	3,50	10,907	4,33	3,88	12,849	4,95	4,50	14,395	5,77	5,32
7	5,844	3,32	2,87	8,441	2,71	2,26	10,915	3,82	3,37	10,907	4,61	4,16	11,456	4,49	4,04	13,529	5,61	5,16
8	7,107	2,92	2,47	7,408	2,87	2,42	9,858	3,67	3,22	12,952	3,95	3,50	12,367	4,11	3,66	14,503	5,43	4,98
9	7,388	2,86	2,41	8,535	2,79	2,34	10,194	4,14	3,69	11,860	4,12	3,67	11,870	4,10	3,65	13,854	5,71	5,26
10	7,862	2,69	2,24	8,722	3,08	2,63	10,754	4,12	3,67	10,907	3,87	3,42	10,882	4,01	3,56	13,367	5,78	5,33
Média	7,098	–	2,68	8,404	–	2,68	10,224	–	3,41	11,404	–	3,58	12,630	–	4,02	14,152	–	5,15
Desvio padrão	0,6	–	0,4	0,4	–	0,4	0,5	–	0,2	0,7	–	0,3	1,0	–	0,4	0,8	–	0,1

Tabela A.12 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio que empregou geotêxtil G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, em todos os espaçamentos e tensão vertical de 1000 kPa.

d= 18 mm, 1000 kPa															
Nº	G3														
	e/d= 0			e/d= 0,17			e/d= 0,33			e/d= 0,67			e/d= 1		
	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	7,925	2,84	2,39	11,104	3,34	2,89	10,721	3,82	3,37	12,546	6,50	6,05	–	7,87	7,42
2	9,523	2,94	2,49	11,615	3,41	2,96	11,783	4,00	3,55	12,494	6,44	5,99	–	7,66	7,21
3	8,652	3,04	2,59	10,976	3,41	2,96	11,783	3,98	3,53	12,442	6,13	5,68	–	8,59	8,14
4	9,742	2,64	2,19	10,849	3,19	2,74	11,571	3,85	3,40	11,901	6,97	6,52	–	8,82	8,37
5	10,250	2,85	2,40	12,125	3,47	3,02	11,783	4,09	3,64	12,817	6,76	6,31	13,661	8,10	7,65
6	10,250	2,69	2,24	11,359	3,66	3,21	11,147	3,85	3,40	11,681	6,42	5,97	13,419	7,76	7,31
7	9,960	2,82	2,37	10,976	3,49	3,04	10,510	3,77	3,32	11,952			–		
8	9,597	3,01	2,56	12,380	3,35	2,90	11,147	3,71	3,26						
9	10,324	2,99	2,54	11,742	3,42	2,97	11,147	3,85	3,40						
10	9,669	3,18	2,73	10,976	3,71	3,26	10,828	3,85	3,40						
11	9,814	3,00	2,55	10,211	3,58	3,13									
12	9,669	3,27	2,82	11,615	3,53	3,08									
13	10,250	2,74	2,29	9,700	3,52	3,07									
14	10,250	3,06	2,61	9,828	3,33	2,88									
15	10,324	2,89	2,44		3,45	3,00									
16	10,178	2,98	2,53		3,40	2,95									
17	9,669	2,98	2,53												
18	10,833	2,89	2,44												
19	10,905	2,98	2,53												
20		2,78	2,33												
21		2,81	2,36												
22		2,69	2,24												
23		2,94	2,49												
24		2,95	2,50												
Média	9,883	–	2,47	11,104	–	3,00	11,242	–	3,43	12,262	–	6,09	13,540	–	7,68
Desvio padrão	0,7	–	0,2	0,8	–	0,1	0,5	–	0,1	0,4	–	0,3	0,2	–	0,5

Tabela A.13 – Diâmetro de contato e afundamento máximo no ensaio de repetibilidade que empregou geotêxtil G1, G2 e G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, e/d= 0,17 e 1 na tensão vertical de 50 kPa.

d= 18 mm, 50 kPa																		
Nº	e/d= 0,17									e/d= 1								
	G1			G2			G3			G1			G2			G3		
	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)	D (mm)	M (mm)	δ_{max} (mm)
1	6,828	2,89	2,44	6,911	2,56	2,11	7,467	2,13	1,68	10,06	5,91	5,46	9,752	3,57	3,12	8,036	2,95	2,50
2	7,323	2,84	2,39	7,648	2,59	2,14	7,894	2,21	1,76	8,718	6,14	5,69	8,577	3,36	2,91	7,799	3,03	2,58
3	6,850	3,13	2,68	7,279	2,51	2,06	7,041	2,33	1,88	9,492	6,27	5,82	8,812	3,74	3,29	8,863	3,20	2,75
4	7,475	2,83	2,38	6,266	2,04	1,59	7,575	1,71	1,26	10,14	5,62	5,17	9,753	3,58	3,13	9,141	3,29	2,84
5	7,377	2,74	2,29	7,003	2,20	1,75	7,360	2,05	1,60	10,17	5,90	5,45	8,695	3,40	2,95	7,949	3,52	3,07
6	7,475	3,02	2,57	6,911	2,44	1,99	7,788	1,98	1,53	9,362	6,21	5,76	8,695	3,45	3,00	8,364	3,51	3,06
7	7,548	2,82	2,37	7,095	2,36	1,91	8,137	2,38	1,93	9,063			9,517			7,741		
8	7,828	3,08	2,63	7,003	2,30	1,85	6,293	2,30	1,85									
9	7,170	2,92	2,47	6,911	2,10	1,65	7,041	1,55	1,10									
10	–	2,94	2,49	7,187	2,47	2,02	8,405	1,58	1,13									
11	–	3,07	2,62	6,450	2,38	1,93	7,894	2,26	1,81									
12	–	2,98	2,53	7,279	2,38	1,93	5,974	2,22	1,77									
13	–	3,2	2,75	7,740	2,18	1,73	7,337	2,28	1,83									
14	–	2,7	2,25	7,187	2,20	1,75	8,672	1,58	1,13									
15		2,75	2,30		2,37	1,92		1,60	1,15									
16		2,65	2,20		2,10	1,65		1,90	1,45									
Média	7,319	–	2,46	7,062	–	1,874	7,491	–	1,55	9,573	–	5,56	9,114	–	3,07	8,271	–	2,80
Desvio padrão	0,3	–	0,2	0,4	–	0,2	0,7	–	0,3	0,6	–	0,2	0,5	–	0,1	0,5	–	0,2

Tabela A.14 – Área fechada e afundamento máximo nos ensaios que empregaram agregado graúdo.

Nº	Agregado graúdo								
	Pedrisco						Brita 1		
	Selecionado por peneiramento			Selecionado por peneiramento e forma de grãos			Selecionado por peneiramento e forma de grãos		
	A _f (mm ²)	M (mm)	δ _{max} (mm)	A _f (mm ²)	M (mm)	δ _{max} (mm)	A _f (mm ²)	M (mm)	δ _{max} (mm)
1	13,330	2,10	1,65	40,340	3,56	3,11	24,920	2,61	2,16
2	16,480	2,67	2,22	1,210	3,69	3,24	88,050	3,00	2,55
3	20,760	3,58	3,13	13,110	2,60	2,15	101,740	3,41	2,96
4	5,990	1,23	0,78	22,810	3,27	2,82	26,450	4,00	3,55
5	26,820	3,28	2,83	9,790	2,75	2,30	56,380	4,14	3,69
6	42,280	3,31	2,86	30,010	2,83	2,38	27,710	3,88	3,43
7	67,980	2,68	2,23	12,500	3,11	2,66	15,200	4,00	3,55
8	36,680	3,11	2,66	10,970	3,35	2,90	85,530	3,60	3,15
9	10,640	3,15	2,70	24,460	2,82	2,37	51,120	4,15	3,70
10	23,760	2,98	2,53	41,290	3,10	2,65	123,550	3,89	3,44
11	8,620	3,34	2,89	12,500	3,25	2,80	97,320		
12	84,120	3,16	2,71	6,210	3,61	3,16	44,960		
13	7,680	3,00	2,55	50,320	3,32	2,87	15,510		
14	21,770			46,290			55,040		
15	6,110			34,360			73,720		
16	50,020			17,570			155,700		
17	51,210			44,440			33,870		
18	14,500			16,810			9,190		
19	60,020			15,440			79,940		
20	15,630			5,820			54,970		
21	82,710			3,390			31,090		
22	6,110			11,490			23,520		
23	51,340			98,860			26,800		
24	41,660			6,460			9,480		
25	13,020			14,950			5,330		
26	26,540			36,350			8,640		
27	27,640			5,430			13,270		
28	65,820			50,480			63,940		
29	10,860			6,480			27,100		
30	24,540			26,470			5,920		
31	48,330			19,680					
32	31,670			2,610					
33	5,340			64,990					
34	5,620			31,540					
35	80,770			108,330					
36	46,340			48,990					
37	44,250			50,130					
38	3,290			49,900					
39	29,980			4,300					
40	37,760			5,690					
41	19,700			46,000					
42	28,050			3,940					
43	34,940			9,070					
44	35,300			5,250					
45	75,560			42,780					
46	28,480			22,630					
47	3,410			10,530					
48	23,790			27,090					
49	16,540			21,430					
50				32,690					
51				18,670					
52				20,990					
53				14,650					
54				6,720					
55				36,350					
56				21,980					
Média	31,301	—	2,44	25,778	—	2,72	47,865	—	3,22
Desvio padrão	22,5	—	0,6	23,4	—	0,3	38,3	—	0,5
Somatório	1534	—	—	1444	—	—	1436	—	—

B - REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS

As Figuras B.1 a B.3 apresentam os gráficos do afundamento *versus* número de medições dos ensaios realizados com o geotêxtil G2 para a tensão vertical de 1000 kPa, nos seguintes espaçamentos (e) e diâmetro de esfera (d): $d = 10$ mm, $e = 1,7$ mm; $d = 10$ mm, $e = 3,3$ mm e $d = 18$ mm, $e = 3$ mm.

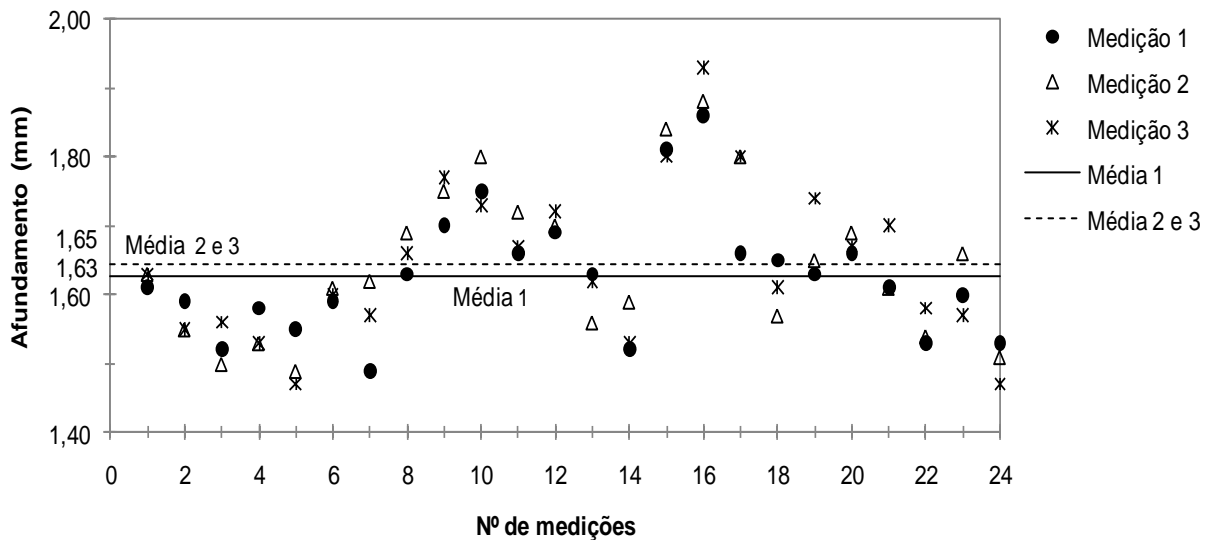


Figura B.1 – Distribuição dos valores de afundamento da medição 1, 2 e 3 do ensaio: $d = 10$ mm, $e = 1,7$ mm, 1000 kPa e G2.

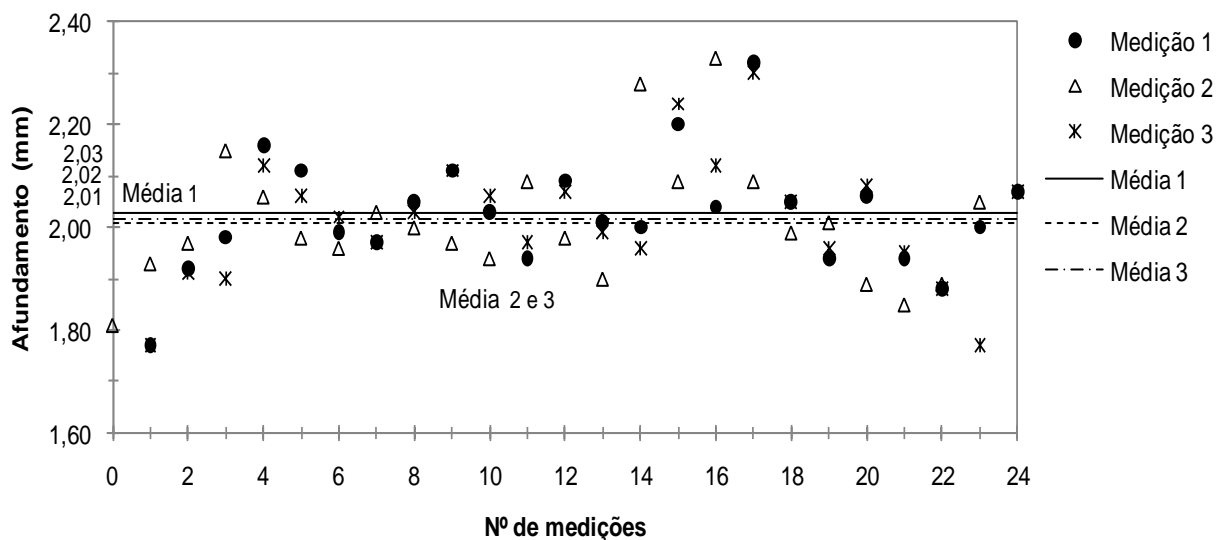


Figura B.2 – Distribuição dos valores de afundamento da medição 1, 2 e 3 do ensaio: $d = 10$ mm, $e = 3,3$ mm, 1000 kPa e G2.

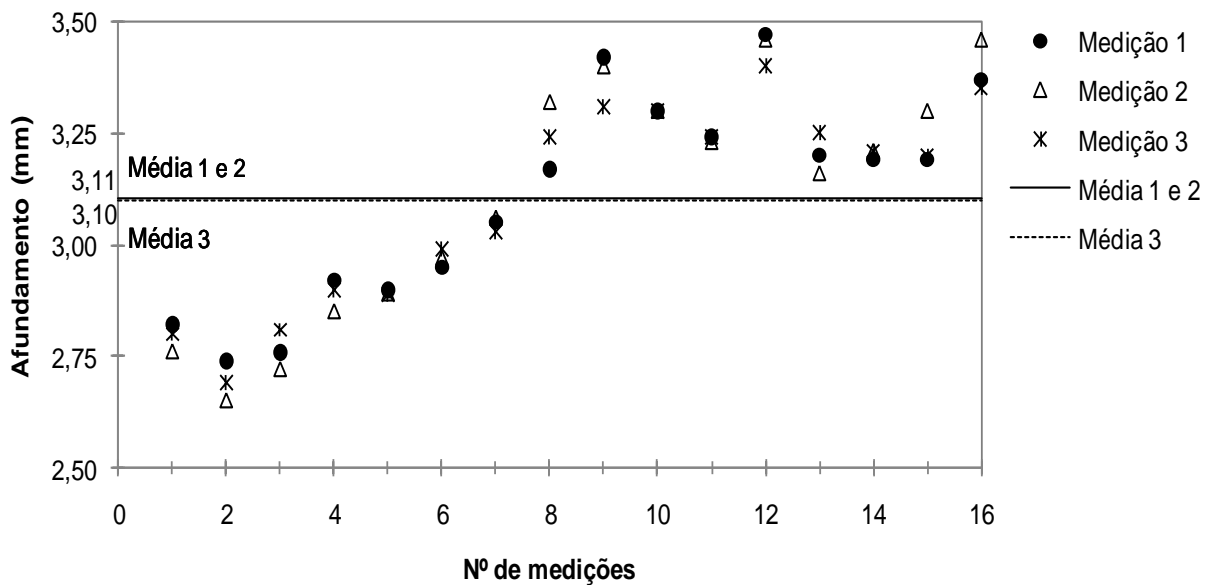


Figura B.3 – Distribuição dos valores de afundamento da medição 1, 2 e 3 do ensaio: $d = 18 \text{ mm}$, $e = 3 \text{ mm}$, 1000 kPa e G2.

A Tabela B.1 apresenta os afundamentos obtidos na repetição das medições nos três ensaios. Os resultados mostraram um desvio padrão relativamente baixo, apresentando maiores valores quando empregadas as esferas de 18 mm de diâmetro.

A variabilidade dos valores de afundamento pode ser justificada seguintes tipos de erros:

- *erro sistemático*, causado pela calibração imprópria ou alteração da calibração com o tempo;
- *erro de conformidade*, causado pela limitação do próprio instrumento;
- *erro de amostragem*, onde o instrumento é posicionado em local incorreto;
- *erro causado pela flexão da lâmina de aço* usada para apoiar o paquímetro digital sobre as esferas de aço; e
- *erro causado pelo afundamento do papel alumínio* por meio do contato excessivo do paquímetro digital.

Houve a preocupação de repetir-se um dos ensaio para verificar a precisão dos resultados. Para isso foi escolhido, aleatoriamente, o ensaio realizado com EA de $d = 18 \text{ mm}$, $e = 6 \text{ mm}$, geotêxtil G1 em todas as tensões verticais. O Apêndice A (Figura A.11) apresenta os diâmetros de contato D e os afundamentos, em cada ponto, no ensaio de repetibilidade. O resumo das variáveis obtidas (σ_{max} , D , A_a , A_f , RAA) é mostrado no Apêndice D (Figura D.5).

Tabela B.1 – Resumo dos afundamentos obtidos nas repetições das medições.

d= 10 mm, e/d= 0,17							d= 10 mm, e/d= 0,33						
e= 1,7 mm	G2						e= 3,3 mm	G2					
	1000 kPa							1000 kPa					
	Medida 1		Medida 2		Medida 3			Medida 1		Medida 2		Medida 3	
Nº	M	δ_{max}	M	δ_{max}	M	δ_{max}	Nº	M	δ_{max}	M	δ_{max}	M	δ_{max}
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	2,06	1,61	2,08	1,63	2,08	1,63	1	2,22	1,77	2,26	1,81	2,22	1,77
2	2,04	1,59	2,00	1,55	2,00	1,55	2	2,37	1,92	2,38	1,93	2,36	1,91
3	1,97	1,52	1,95	1,50	2,01	1,56	3	2,43	1,98	2,42	1,97	2,35	1,90
4	2,03	1,58	1,98	1,53	1,98	1,53	4	2,61	2,16	2,60	2,15	2,57	2,12
5	2,00	1,55	1,94	1,49	1,92	1,47	5	2,56	2,11	2,51	2,06	2,51	2,06
6	2,04	1,59	2,06	1,61	2,05	1,60	6	2,44	1,99	2,43	1,98	2,47	2,02
7	1,94	1,49	2,07	1,62	2,02	1,57	7	2,42	1,97	2,41	1,96	2,42	1,97
8	2,08	1,63	2,14	1,69	2,11	1,66	8	2,50	2,05	2,48	2,03	2,48	2,03
9	2,15	1,70	2,20	1,75	2,22	1,77	9	2,56	2,11	2,45	2,00	2,56	2,11
10	2,20	1,75	2,25	1,80	2,18	1,73	10	2,48	2,03	2,42	1,97	2,51	2,06
11	2,11	1,66	2,17	1,72	2,12	1,67	11	2,39	1,94	2,39	1,94	2,42	1,97
12	2,14	1,69	2,15	1,70	2,17	1,72	12	2,54	2,09	2,54	2,09	2,52	2,07
13	2,08	1,63	2,01	1,56	2,07	1,62	13	2,46	2,01	2,43	1,98	2,44	1,99
14	1,97	1,52	2,04	1,59	1,98	1,53	14	2,45	2,00	2,35	1,90	2,41	1,96
15	2,26	1,81	2,29	1,84	2,25	1,80	15	2,65	2,20	2,73	2,28	2,69	2,24
16	2,31	1,86	2,33	1,88	2,38	1,93	16	2,49	2,04	2,54	2,09	2,57	2,12
17	2,11	1,66	2,25	1,80	2,25	1,80	17	2,77	2,32	2,78	2,33	2,75	2,30
18	2,10	1,65	2,02	1,57	2,06	1,61	18	2,5	2,05	2,54	2,09	2,5	2,05
19	2,08	1,63	2,10	1,65	2,19	1,74	19	2,39	1,94	2,44	1,99	2,41	1,96
20	2,11	1,66	2,14	1,69	2,12	1,67	20	2,51	2,06	2,46	2,01	2,53	2,08
21	2,06	1,61	2,06	1,61	2,15	1,70	21	2,39	1,94	2,34	1,89	2,4	1,95
22	1,98	1,53	1,99	1,54	2,03	1,58	22	2,33	1,88	2,3	1,85	2,33	1,88
23	2,05	1,60	2,11	1,66	2,02	1,57	23	2,45	2	2,34	1,89	2,22	1,77
24	1,98	1,53	1,96	1,51	1,92	1,47	24	2,52	2,07	2,5	2,05	2,52	2,07
Média	1,63		1,65		1,65		Média	2,03		2,01		2,02	
Desvio padrão	0,1		0,1		0,1		Desvio padrão	0,1		0,1		0,1	

d= 18 mm, e/d= 0,17						
e= 3 mm	G2					
	1000 kPa					
	Medida 1		Medida 2		Medida 3	
Nº	M	δ_{max}	M	δ_{max}	M	δ_{max}
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	3,27	2,82	3,21	2,76	3,25	2,80
2	3,19	2,74	3,10	2,65	3,14	2,69
3	3,21	2,76	3,17	2,72	3,26	2,81
4	3,37	2,92	3,30	2,85	3,35	2,90
5	3,35	2,90	3,34	2,89	3,34	2,89
6	3,40	2,95	3,42	2,97	3,44	2,99
7	3,50	3,05	3,51	3,06	3,48	3,03
8	3,62	3,17	3,77	3,32	3,69	3,24
9	3,87	3,42	3,85	3,40	3,76	3,31
10	3,75	3,30	3,75	3,30	3,75	3,30
11	3,69	3,24	3,68	3,23	3,69	3,24
12	3,92	3,47	3,91	3,46	3,85	3,40
13	3,65	3,20	3,61	3,16	3,70	3,25
14	3,64	3,19	3,66	3,21	3,66	3,21
15	3,64	3,19	3,75	3,30	3,65	3,20
16	3,82	3,37	3,91	3,46	3,80	3,35
Média	3,11		3,11		3,10	
Desvio padrão	0,2		0,3		0,2	

As Figuras B.4 a B.7 apresentam os gráficos que mostram o comportamento das curvas:

- afundamento *versus* tensão vertical;
- diâmetro de contato *versus* tensão vertical;
- diâmetro de contato *versus* afundamento;
- área aberta *versus* tensão vertical; e
- área aberta *versus* afundamento.

Pode-se observar, em geral, que os resultados obtidos no ensaio 1 e 2 foram próximos um dos outros, apresentando curvas de comportamento semelhante, garantindo, desta maneira, que o equipamento, o preparo dos materiais e o procedimento de ensaio e a obtenção do afundamento e a área de contato foram satisfatórios para assegurar a precisão destes resultados.

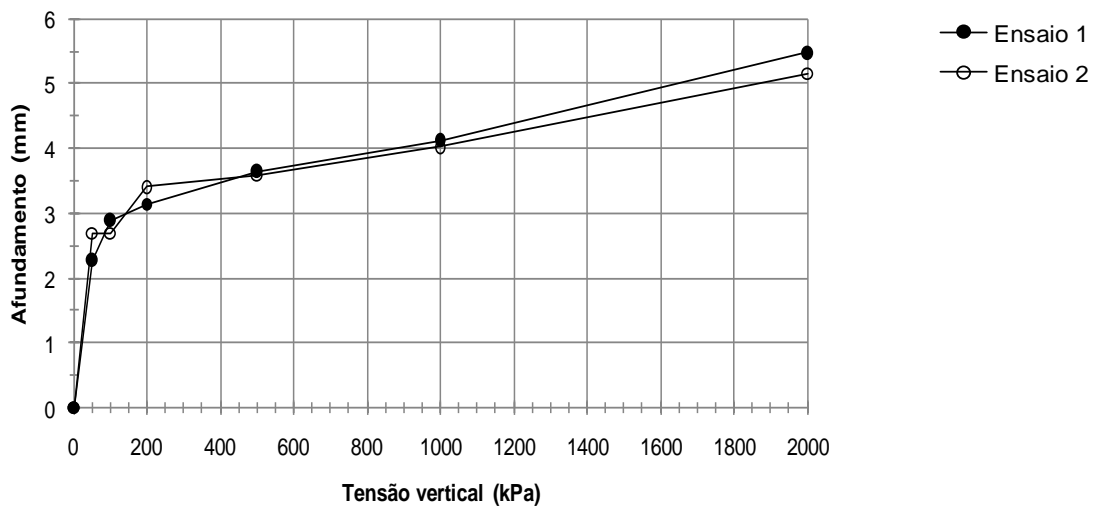


Figura B.4 – Afundamento *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro e 6 mm de espaçamento.

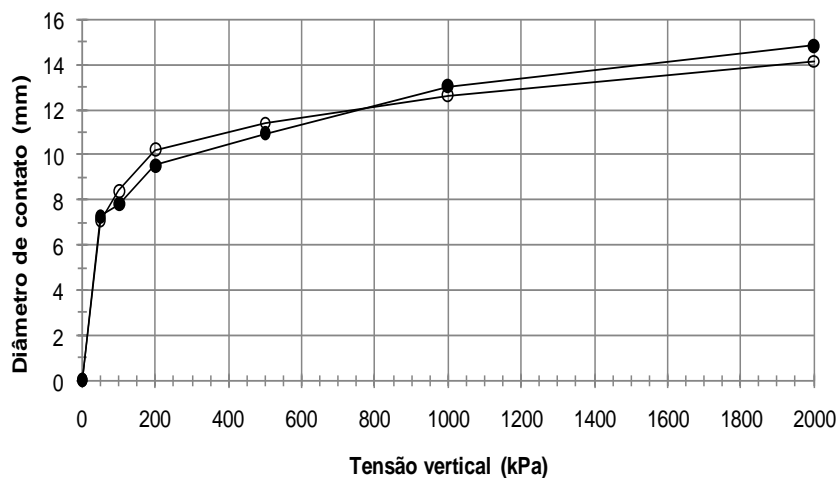


Figura B.5 – Diâmetro de contato *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro e 6 mm de espaçamento.

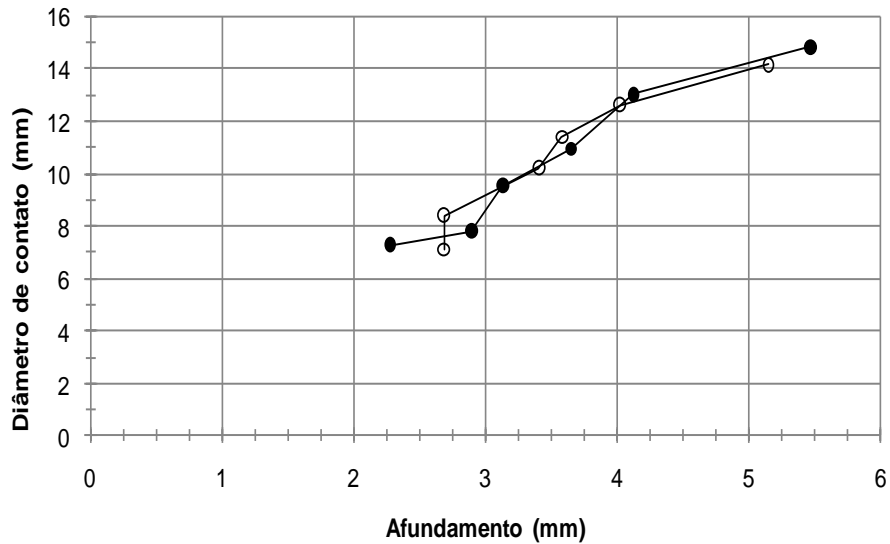


Figura B.6 – Diâmetro de contato *versus* afundamento do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro e 6 mm de espaçamento.

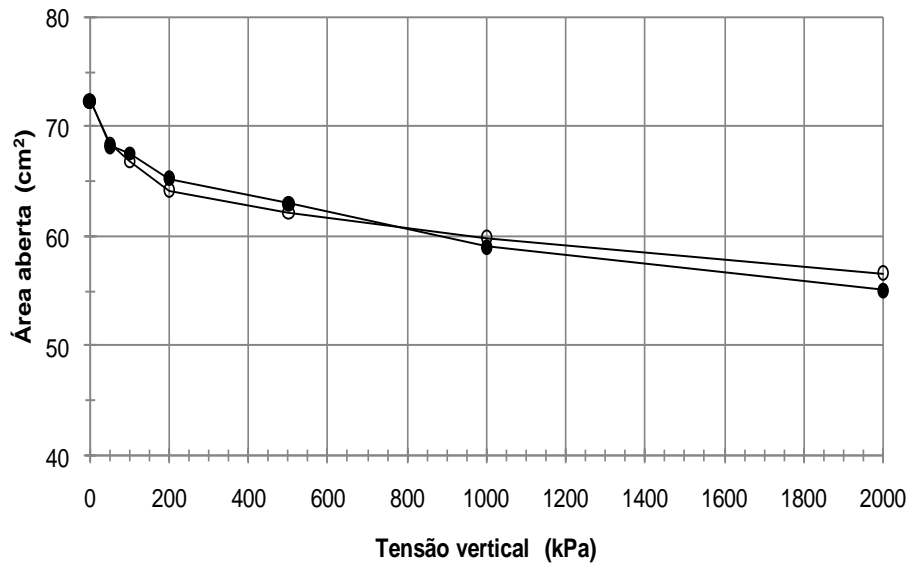


Figura B.7 – Área aberta *versus* tensão vertical do geotêxtil G1 com esferas de aço de 18 mm de diâmetro e 6 mm de espaçamento.

A repetibilidade do ensaio apresentou deformações próximas nos dois ensaios realizados, como mostra a Figura B.8.

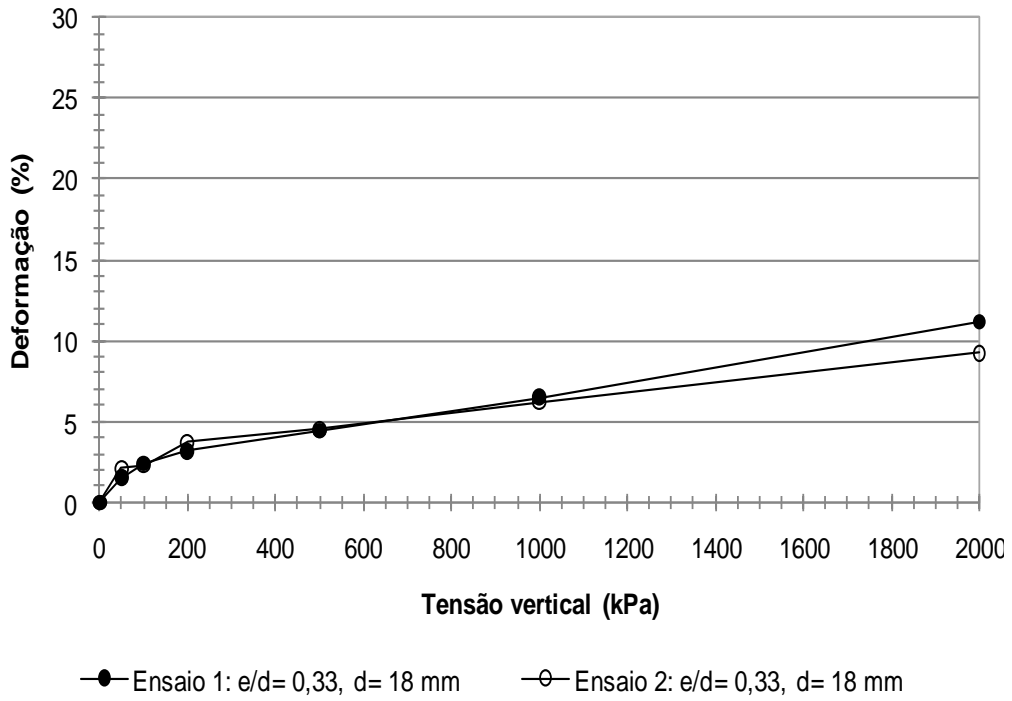


Figura B.8 – Influência da gramatura na deformação do geotêxtil nos vazios da esfera de aço no ensaio de repetibilidade.

C – CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS DE MICROESFERAS DE VIDRO: ALTURA E ÍNDICE DE VAZIOS ANTES E DEPOIS DO PROCESSO DE DENSIFICAÇÃO

Tabela C.1 – Características das amostras nos ensaios que empregaram esferas de aço com 10 mm de diâmetro, em todos os espaçamentos e tensões verticais.

d = 10 mm							
	G1						G2
e/d= 0	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,60	5,50	0,79	5,52	5,54	5,60	5,76
L_{fc} (cm)	5,16	5,03	5,10	5,10	5,15	5,18	5,30
L_{fe} (cm)	5,16	5,03	5,06	5,10	5,13	5,10	5,13
e_o	0,79	0,76	0,79	0,77	0,78	0,79	0,85
e_f	0,65	0,61	0,63	0,63	0,65	0,66	0,70
e/d= 0,17	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,60	5,50	5,53	5,53	5,65	5,60	5,80
L_{fc} (cm)	5,20	5,20	5,10	5,10	5,17	5,16	5,20
L_{fe} (cm)	5,20	5,20	5,10	5,10	5,12	5,10	5,18
e_o	0,79	0,76	0,77	0,77	0,81	0,79	0,86
e_f	0,67	0,67	0,63	0,63	0,66	0,65	0,67
e/d= 0,33	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,52	5,75	5,68	5,66	5,70	5,64	5,80
L_{fc} (cm)	4,95	5,10	5,03	5,12	5,16	5,10	5,27
L_{fe} (cm)	4,95	5,10	5,03	5,10	5,05	4,96	5,10
e_o	0,77	0,84	0,82	0,81	0,83	0,81	0,86
e_f	0,59	0,63	0,61	0,64	0,65	0,63	0,63
e= 0,67	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,60	5,55	5,60	5,60	5,60	5,60	5,83
L_{fc} (cm)	5,30	5,13	5,10	5,16	5,24	5,24	5,40
L_{fe} (cm)	5,30	5,10	5,06	5,10	5,10	5,08	5,27
e_o	0,79	0,78	0,79	0,79	0,79	0,79	0,87
e_f	0,70	0,64	0,63	0,65	0,68	0,68	0,73
e/d= 1	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,66	5,55	5,67	5,65	5,70	5,64	5,70
L_{fc} (cm)	5,16	5,27	5,15	5,16	5,20	4,98	5,18
L_{fe} (cm)	5,16	5,14	5,02	5,06	4,98	4,85	5,17
e_o	0,81	0,78	0,82	0,81	0,83	0,81	0,83
e_f	0,65	0,69	0,65	0,65	0,67	0,60	0,66

Tabela C.2 – Características das amostras nos ensaios que empregaram esferas de aço com 18 mm de diâmetro, em todos os espaçamentos e tensões verticais.

d = 18 mm							
e/d= 0	G1						G2
	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,54	5,49	5,40	5,44	5,50	5,50	5,74
L_{fc} (cm)	5,15	5,10	5,14	5,20	5,10	5,07	5,16
L_{fe} (cm)	5,15	5,10	5,14	5,03	5,07	4,96	5,10
e_o	0,78	0,76	0,73	0,74	0,76	0,76	0,84
e_f	0,65	0,63	0,65	0,67	0,63	0,62	0,65
e/d= 0,17	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,48	5,44	5,38	5,49	5,53	5,45	5,90
L_{fc} (cm)	5,05	5,04	5,00	5,13	5,20	5,15	5,25
L_{fe} (cm)	5,05	5,04	5,00	5,00	4,95	4,90	5,10
e_o	0,76	0,74	0,72	0,76	0,77	0,75	0,89
e_f	0,62	0,61	0,60	0,64	0,67	0,65	0,68
e/d= 0,33	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,50	5,45	5,41	5,43	5,47	5,42	5,98
L_{fc} (cm)	5,13	5,03	5,10	5,03	5,15	4,97	5,33
L_{fe} (cm)	5,13	5,03	5,10	5,00	5,05	4,80	5,1
e_o	0,76	0,75	0,73	0,74	0,75	0,74	0,92
e_f	0,64	0,61	0,63	0,61	0,65	0,59	0,71
e= 0,67	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,45	5,65	5,49	5,45	5,60	5,59	5,85
L_{fc} (cm)	4,94	5,14	5,14	5,00	5,10	4,95	5,31
L_{fe} (cm)	4,94	5,11	5,10	4,93	4,80	4,50	4,53
e_o	0,75	0,81	0,76	0,75	0,79	0,79	0,87
e_f	0,58	0,65	0,65	0,60	0,63	0,59	0,70
e/d= 1	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
W_{sd} (g)	564,73						
L_{oc} (cm)	5,38	5,40	5,40	5,58	5,50	5,60	5,90
L_{fc} (cm)	5,08	5,02	4,93	5,05	5,03	5,20	5,18
L_{fe} (cm)	5,08	5,02	4,86	4,90	4,70	4,70	4,83
e_o	0,72	0,73	0,73	0,79	0,76	0,79	0,89
e_f	0,63	0,61	0,58	0,62	0,61	0,67	0,66

Tabela C.3 – Características das amostras nos ensaios de repetibilidade que empregaram geotêxtil G1, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ em todas as tensões verticais.

REPETIBILIDADE		G1, $d= 18$ mm, $e/d= 0,33$					
Tensão vertical		50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa
Ensaio 1	W_{sd} (g)	564,73					
	L_{oc} (cm)	5,50	5,45	5,41	5,43	5,47	5,42
	L_{fc} (cm)	5,13	5,03	5,10	5,03	5,15	4,97
	L_{fe} (cm)	5,13	5,03	5,10	5,00	5,05	4,80
	e_o	0,76	0,75	0,73	0,74	0,75	0,74
	e_f	0,64	0,61	0,63	0,61	0,65	0,59
Ensaio 2	W_{sd} (g)	564,73					
	L_{oc} (cm)	5,74	5,80	5,56	5,70	5,84	5,60
	L_{fc} (cm)	5,00	5,27	5,15	5,01	5,10	5,10
	L_{fe} (cm)	5,00	5,20	5,05	5,00	4,93	4,90
	e_o	0,84	0,86	0,78	0,83	0,87	0,79
	e_f	0,60	0,69	0,65	0,60	0,63	0,63

Tabela C.4 – Características das amostras nos ensaios que empregaram geotêxtil G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, em todos os espaçamentos e tensão vertical de 1000 kPa.

		G3, $d= 18$ mm, 1000 kPa				
		$e/d= 0$	$e/d= 0,17$	$e/d= 0,33$	$e/d= 0,67$	$e/d= 1$
	W_{sd} (g)	564,73				
	L_{oc} (cm)	6,00	5,80	5,97	5,74	5,90
	L_{fc} (cm)	5,53	5,40	5,60	5,50	5,50
	L_{fe} (cm)	5,26	5,24	5,20	4,88	4,87
	e_o	0,92	0,86	0,91	0,84	0,89
	e_f	0,69	0,73	0,79	0,76	0,76

Tabela C.5 – Características das amostras nos ensaios que empregaram geotêxtil G1, G2 e G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,17$ e 1 e tensão vertical de 50 kPa.

		$d= 18$ mm, 50 kPa					
		$e/d= 0,17$			$e/d= 1$		
Geotêxtil		G1	G2	G3	G1	G2	G3
	W_{sd} (g)	564,73					
	L_{oc} (cm)	5,48	5,88	5,90	5,38	5,84	5,85
	L_{fc} (cm)	5,05	5,36	5,46	5,08	5,20	5,60
	L_{fe} (cm)	5,05	5,22	5,36	5,08	5,10	5,28
	e_o	0,76	0,88	0,89	0,72	0,87	0,87
	e_f	0,62	0,72	0,75	0,63	0,67	0,79

Tabela C.6 – Características das amostras nos ensaios que empregaram agregado graúdo.

Agregado graúdo			
500 kPa, G1, e= 0 mm	Pedrisco		Brita 1
	selecionado por peneiramento	selecionado por peneiramento e forma de grãos	selecionado por peneiramento e forma de grãos
W_{sd} (g)	564,73		
L_{oc} (cm)	5,50	5,80	5,72
L_{fc} (cm)	5,20	5,20	5,10
L_{fe} (cm)	5,10	5,10	5,08
e_o	0,76	0,86	0,83
e_f	0,67	0,67	0,63

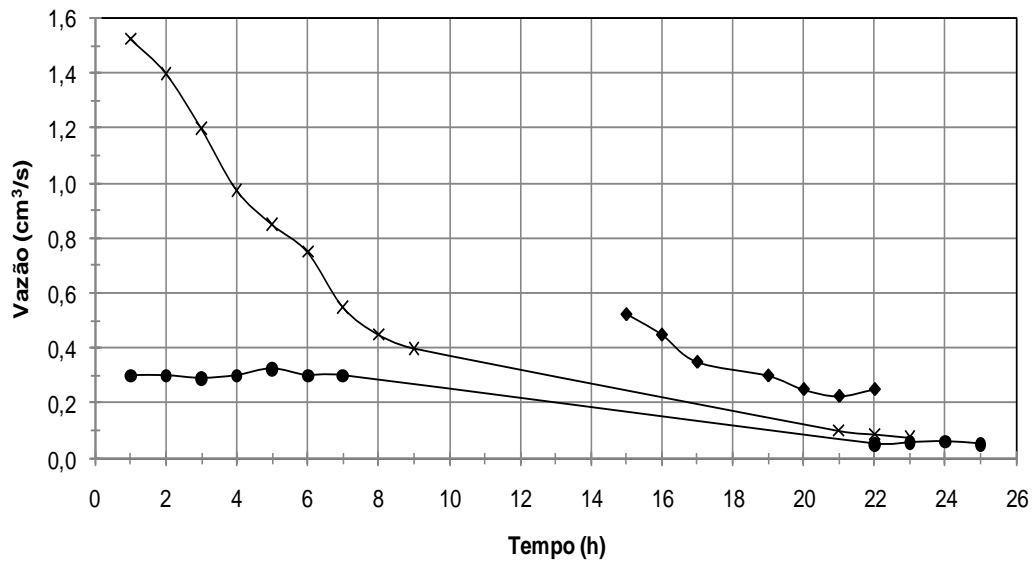
Tabela C.7 – Características das amostras nos ensaios para verificação da granulometria do material passante através do geotêxtil.

ENSAIOS COM FLUXO												
geotêxtil G1	50 kPa, i= 10			esfera de aço d= 18 mm						placa perfurada		
	esfera de aço d= 18 mm		placa perfurada	e/d= 0			e/d= 1					
	e/d= 0	e/d= 1		20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa	20 kPa	50 kPa	2000 kPa
	W_{fwm} (g)	3143,0	2966,3	2963,6	2963,1	3142,1	2960,6	2962,1	2960,5	2961,9	2960,2	2961,9
$W_{fwm f}$ (g)	2809,0	2670,5	2668,2	2668,0	2808,7	2668,8	2667,4	2667,1	2668,3	2667,5	2669,0	2663,5
W_{sd} (g)	556,7	493,0	492,3	491,8	555,7	486,3	491,2	489,0	489,3	487,8	488,17	492,5
L_{oc} (cm)	5,80	4,94	5,08	5,08	5,58	5,03	4,78	4,96	5,1	4,9	5,10	5,00
L_{fe} (cm)	5,45	4,52	4,76	4,60	5,00	4,66	4,57	4,62	4,38	4,74	4,78	4,63
e_o	0,89	0,81	0,87	0,87	0,82	0,87	0,76	0,84	0,89	0,82	0,89	0,85

Tabela C.8 – Vazões e as cargas hidráulicas do ensaio de granulometria do material passante através do geotêxtil, realizado com fluxo.

d= 18 mm, e= 0 mm, e/d= 0, G1													
50 kPa	nº horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	21	22	23
i=10	h ₁	1115	1126	1145	1153	1171	1180	1188	1192	1196	1208	1208	1209
	h ₉	867	852	830	809	797	784	774	767	760	736	735	734
	h ₁₀	850	835	818	798	778	777	767	760	755	735	734	733
	h ₁₁	845	833	814	797	786	775	765	759	754	734	733	733
	h ₁₂	828	818	801	785	778	768	760	755	750	733	733	733
	v (cm ³):	15,25	14,00	12,00	9,75	8,50	7,50	5,50	4,50	4,00	2,00	1,75	1,5
	t (s):	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20	20	20
Q (cm ³ /s):	1,53	1,40	1,20	0,98	0,85	0,75	0,55	0,45	0,40	0,10	0,09	0,08	
d= 18 mm, e= 18 mm, e/d= 1, G1													
50 kPa	nº horas	15	16	17	19	20	21	22					
i=10	h ₁	1190	1193	1197	1200	1202	1203	1204					
	h ₉	433	425	420	424	424	424	425					
	h ₁₀	779	770	764	756	753	750	748					
	h ₁₁	775	767	762	755	752	749	747					
	h ₁₂	749	753	750	746	744	743	742					
	v (cm ³):	5,25	4,50	3,50	3,00	2,50	2,25	2,50					
	t (s):	10	10	10	10	10	10	10					
Q (cm ³ /s):	0,525	0,450	0,350	0,300	0,250	0,225	0,250						
PLACA PERFURADA, G1													
50 kPa	nº horas	1	2	3	4	5	6	7	22	23	24	25	
i=10	h ₁	1197	1197	1197	1197	1194	1195	1198	1209	1209	1209	1209	
	h ₉	863	777	764	762	762	761	760	735	735	737	738	
	h ₁₀	779	828	795	777	765	760	757	735	734	736	737	
	h ₁₁	816	791	770	759	754	752	750	734	734	736	736	
	h ₁₂	746	745	745	746	747	746	746	734	733	736	737	
	v (cm ³):	3,00	3,00	2,90	6,00	3,25	3,00	3,00	0,50	1,10	1,75	1,00	
	t (s):	10	10	10	20	10	10	10	10	20	30	20	
Q (cm ³ /s):	0,300	0,300	0,290	0,300	0,325	0,300	0,300	0,050	0,055	0,058	0,050		

Figura C.1 – Vazão *versus* tempo no ensaio de granulometria do material passante através do geotêxtil realizado com fluxo.



—x— e/d= 0, i= 10, 50 kPa, d= 18 mm, G1 —◆— e/d= 1, i= 10, 50 kPa, d= 18 mm, G1 —●— placa perfurada, i= 10, 50 kPa, G1

D – RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NOS ENSAIOS COM ESFERA DE AÇO DE 10 E 18 mm DE DIÂMETRO DE ACORDO COM O SEU ESPAÇAMENTO E TENSÃO VERTICAL.

Tabela D.1 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios com esferas de aço com 10 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos e tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 0								
e= 0 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\sigma}_{max}$ (mm):	0,00	0,89	1,00	1,02	1,27	1,39	1,59	1,26
Diâmetro médio \bar{D} (mm):	0,00	3,37	3,91	3,77	4,99	5,42	6,25	5,73
Área total A_t (cm ²):	72,38							
Área fechada A_f (cm ²):	0,00	5,43	7,34	6,82	11,93	14,05	18,69	15,72
Área aberta A_a (cm ²):	72,38	66,95	65,05	65,56	60,45	58,33	53,69	56,66
RAA (%):	100,00	92,50	89,87	90,57	83,51	80,58	74,17	78,28

d= 10 mm, e/d= 0,17								
e= 1,7 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\sigma}_{max}$ (mm):	0,00	1,03	1,19	1,24	1,33	1,50	1,77	1,63
Diâmetro médio \bar{D} (mm):	0,00	3,33	3,86	4,49	5,15	5,76	6,14	5,92
Área total A_t (cm ²):	72,38							
Área fechada A_f (cm ²):	0,00	4,80	6,42	8,72	11,46	14,35	16,29	15,12
Área aberta A_a (cm ²):	72,38	67,58	65,96	63,66	60,92	58,03	56,09	57,26
RAA (%):	100,00	93,37	91,13	87,96	84,17	80,17	77,50	79,11

d= 10 mm, e/d= 0,33								
e=3,3 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\sigma}_{max}$ (mm):	0,00	1,45	1,38	1,61	1,84	2,13	2,53	2,03
Diâmetro médio \bar{D} (mm):	0,00	3,65	4,27	5,05	5,90	6,72	7,60	7,05
Área total A_t (cm ²):	72,38							
Área fechada A_f (cm ²):	0,00	3,88	5,30	7,41	10,10	13,13	16,79	14,44
Área aberta A_a (cm ²):	72,38	68,50	67,08	64,98	62,28	59,25	55,59	57,94
RAA (%):	100,00	94,64	92,68	89,77	86,04	81,86	76,81	80,05

d= 10 mm, e/d= 0,67								
e= 6,7 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\sigma}_{max}$ (mm):	0,00	2,04	2,24	2,42	2,59	2,96	3,75	2,62
Diâmetro médio \bar{D} (mm):	0,00	4,21	4,91	5,59	6,53	7,29	8,20	7,65
Área total A_t (cm ²):	72,38							
Área fechada A_f (cm ²):	0,00	3,62	4,92	6,38	8,72	10,86	13,72	11,96
Área aberta A_a (cm ²):	72,38	68,76	67,46	66,00	63,67	61,52	58,67	60,42
RAA (%):	100,00	94,99	93,20	91,19	87,96	85,00	81,05	83,47

d= 10 mm, e/d= 1								
e= 10 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\sigma}_{max}$ (mm):	0,00	2,86	2,86	3,18	3,47	4,23	5,28	3,38
Diâmetro médio \bar{D} (mm):	0,00	4,40	5,45	6,05	7,30	7,96	8,09	8,40
Área total A_t (cm ²):	72,38							
Área fechada A_f (cm ²):	0,00	2,89	4,43	5,46	7,95	9,46	9,78	10,54
Área aberta A_a (cm ²):	72,38	69,50	67,96	66,92	64,43	62,92	62,61	61,84
RAA (%):	100,00	96,01	93,88	92,45	89,01	86,92	86,49	85,44

Tabela D.2 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios com esferas de aço com 18 mm de diâmetro nos diversos espaçamentos e tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 0								
e= 0 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\delta}_{max}(mm)$:	0,00	1,94	1,96	2,08	2,36	2,55	2,91	2,46
Diâmetro médio $\bar{D}(mm)$:	0,00	5,53	6,50	7,47	9,00	9,96	10,56	9,89
Área total $A_t(cm^2)$:	72,38							
Área fechada $A_f(cm^2)$:	0,00	4,57	6,30	8,33	12,07	14,80	16,63	14,59
Área aberta $A_a(cm^2)$:	72,38	67,82	66,09	64,06	60,31	57,58	55,75	57,79
RAA (%):	100,00	93,69	91,30	88,50	83,32	79,55	77,02	79,84

d= 18 mm, e/d= 0,17								
e= 3 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\delta}_{max}(mm)$:	0,00	2,46	2,68	2,95	3,22	3,55	4,29	3,11
Diâmetro médio $\bar{D}(mm)$:	0,00	7,32	6,79	7,79	10,20	12,14	13,59	11,32
Área total $A_t(cm^2)$:	72,38							
Área fechada $A_f(cm^2)$:	0,00	5,89	5,06	6,67	11,45	16,20	27,56	14,10
Área aberta $A_a(cm^2)$:	72,38	66,49	67,32	65,71	60,94	56,19	44,82	58,28
RAA (%):	100,00	91,86	93,01	90,78	84,19	77,62	61,92	80,52

d= 18 mm, e/d= 0,33								
e= 6 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\delta}_{max}(mm)$:	0,00	2,28	2,90	3,13	3,65	4,13	5,47	3,64
Diâmetro médio $\bar{D}(mm)$:	0,00	7,27	7,82	9,53	10,95	13,04	14,85	11,99
Área total $A_t(cm^2)$:	72,38							
Área fechada $A_f(cm^2)$:	0,00	4,15	4,80	7,13	9,42	13,35	17,31	11,28
Área aberta $A_a(cm^2)$:	72,38	68,23	67,58	65,25	62,96	59,03	55,07	61,10
RAA (%):	100,00	94,26	93,36	90,15	86,98	81,56	76,08	84,41

d= 18 mm, e/d= 0,67								
e= 12 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\delta}_{max}(mm)$:	0,00	3,98	4,00	4,43	5,31	6,84	8,82	6,53
Diâmetro médio $\bar{D}(mm)$:	0,00	8,81	9,68	11,39	13,12	13,68	15,72	12,40
Área total $A_t(cm^2)$:	72,38							
Área fechada $A_f(cm^2)$:	0,00	4,27	5,15	7,13	9,46	10,28	13,59	8,45
Área aberta $A_a(cm^2)$:	72,38	68,11	67,23	65,25	62,92	62,10	58,79	63,93
RAA (%):	100,00	94,10	92,88	90,15	86,93	85,79	81,22	88,32

d= 18 mm, e/d= 1								
e= 18 mm	G1							G2
Tensão vertical	0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	1000 kPa
Afundamento máximo médio $\bar{\delta}_{max}(mm)$:	0,00	5,56	6,25	7,43	7,55	9,84	14,05	8,55
Diâmetro médio $\bar{D}(mm)$:	0,00	9,57	9,74	12,74	14,26	16,32	18,00	14,51
Área total $A_t(cm^2)$:	72,38							
Área fechada $A_f(cm^2)$:	0,00	5,04	5,22	8,92	11,18	14,65	17,81	11,58
Área aberta $A_a(cm^2)$:	72,38	67,34	67,17	63,46	61,20	57,73	54,57	60,80
RAA (%):	100,00	93,04	92,79	87,68	84,55	79,76	75,39	84,00

Tabela D.3 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios com o geotêxtil G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, nos diversos espaçamentos e tensão vertical de 1000 kPa.

d= 18 mm, 1000 kPa					
e= 0, 3, 6, 12 e 18 mm	G3				
	e/d= 0	e/d= 0,17	e/d= 0,33	e/d= 0,67	e/d= 1
Afundamento máximo médio $\bar{\delta}_{max}$ (mm):	2,47	3,00	3,43	6,09	7,68
Diâmetro médio \bar{D} (mm):	9,88	11,10	11,24	12,26	13,54
Área total A_t (cm ²):	72,38				
Área fechada A_f (cm ²):	14,58	13,56	9,93	8,27	10,08
Área aberta A_a (cm ²):	57,81	58,82	62,46	64,12	62,30
RAA (%):	79,86	81,27	86,29	88,58	86,08

Tabela D.4 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios com os geotêxteis G1, G2 e G3, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, relação e/d= 0,17 e 1 e tensão vertical de 50 kPa.

d= 18 mm, 50 kPa						
e= 3 e 18 mm	e/d= 0,17			e/d= 1		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Afundamento máximo médio $\bar{\delta}_{max}$ (mm):	2,46	1,87	1,55	5,56	2,46	1,70
Diâmetro médio \bar{D} (mm):	7,32	7,06	7,49	9,57	6,83	7,02
Área total A_t (cm ²):	72,38					
Área fechada A_f (cm ²):	5,89	5,48	6,17	5,04	5,13	5,41
Área aberta A_a (cm ²):	66,49	66,90	66,21	67,34	67,26	66,97
RAA (%):	91,86	92,42	91,47	93,04	92,92	92,52

Tabela D.5 – Resumo das variáveis obtidas nos ensaios de repetibilidade empregando o geotêxtil G1, esferas de aço com 18 mm de diâmetro, relação e/d= 0,33 em todas as tensões verticais.

REPETIBILIDADE		G1, d= 18 mm, e/d= 0,33						
Tensão vertical		0 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa
Ensaio 1	Afundamento máximo médio $\bar{\delta}_{max}$ (mm):	0,00	2,28	2,90	3,13	3,65	4,13	5,47
	Diâmetro médio \bar{D} (mm):	0,00	7,27	7,82	9,53	10,95	13,04	14,85
	Área total A_t (cm ²):	72,38						
	Área fechada A_f (cm ²):	0,00	4,15	4,80	7,13	9,42	13,35	17,31
	Área aberta A_a (cm ²):	72,38	68,23	67,58	65,25	62,96	59,03	55,07
	RAA (%):	100,00	94,26	93,36	90,15	86,98	81,56	76,08
Ensaio 2	Afundamento máximo médio $\bar{\delta}_{max}$ (mm):	0,00	2,68	2,68	3,41	3,58	4,02	5,15
	Diâmetro médio \bar{D} (mm):	0,00	7,10	8,40	10,22	11,40	12,63	14,15
	Área total A_t (cm ²):	72,38						
	Área fechada A_f (cm ²):	0,00	3,96	5,55	8,21	10,21	12,53	15,73
	Área aberta A_a (cm ²):	72,38	68,42	66,83	64,17	62,17	59,85	56,65
	RAA (%):	100,00	94,53	92,34	88,66	85,89	82,69	78,27

E – GRÁFICOS AFUNDAMENTO/DIÂMETRO *VERSUS* ESPAÇAMENTO/DIÂMETRO

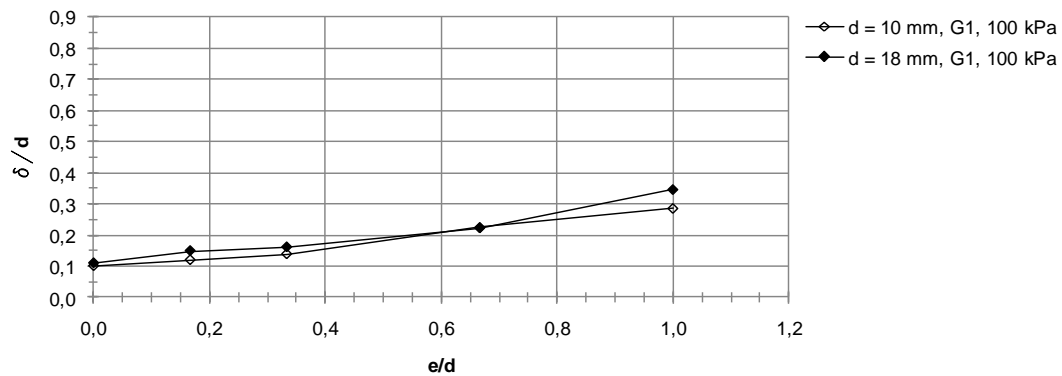


Figura E.1 – Curvas afundamento/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 100 kPa.

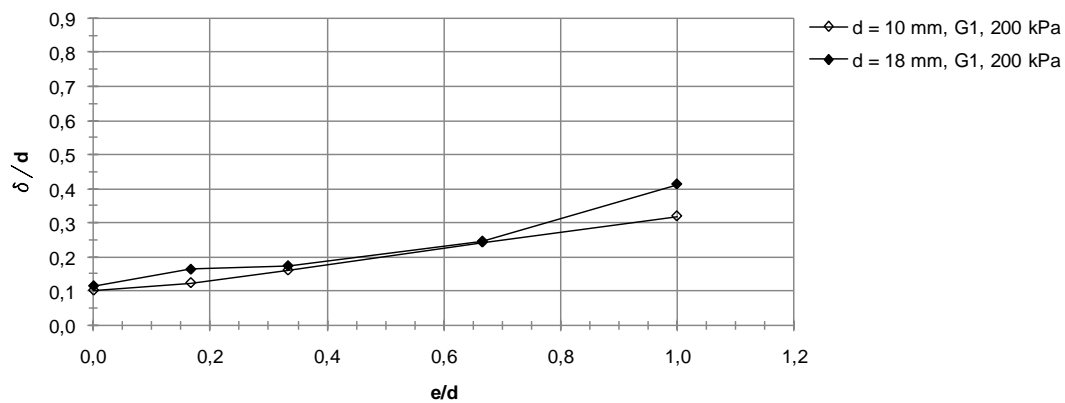


Figura E.2 – Curvas afundamento/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 200 kPa.

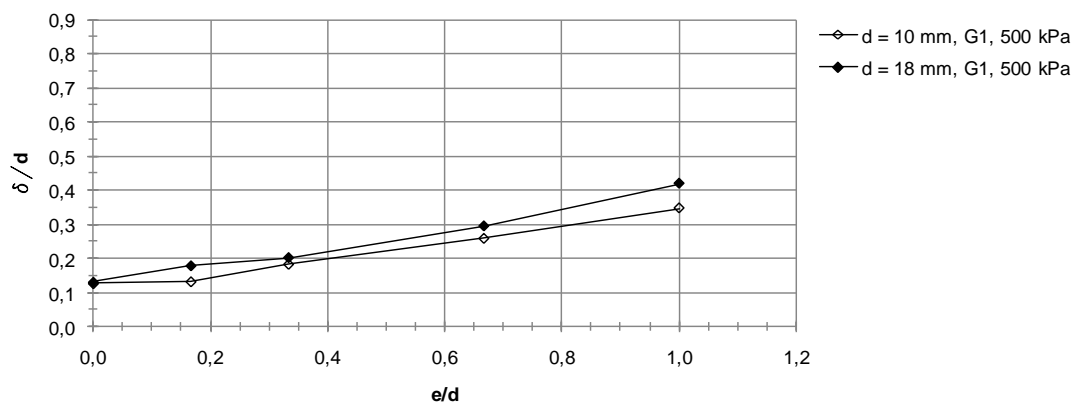


Figura E.3 – Curvas afundamento/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 500 kPa.

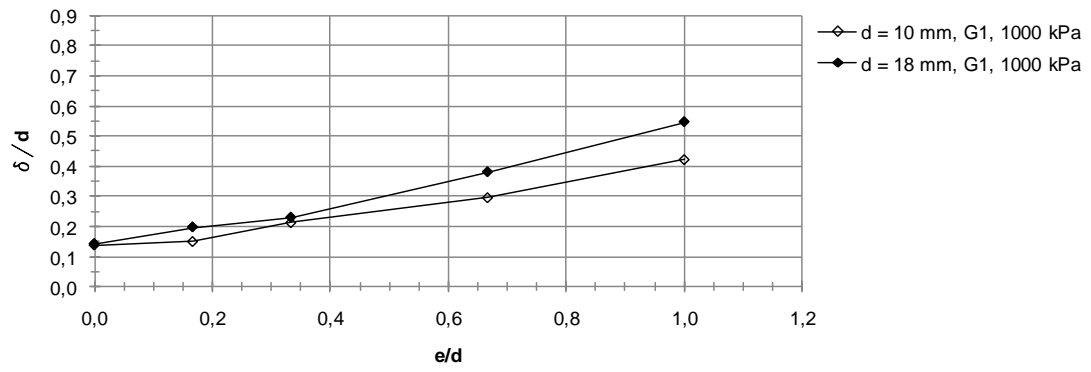


Figura E.4 – Curvas afundamento/diâmetro da esfera *versus* espaçamento/diâmetro da esfera para a tensão vertical de 1000 kPa.

F – O RESUMO DAS DEFORMAÇÕES DAS AMOSTRAS DE GEOTÊXTIL.

Tabela F.1 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d=0$ nas diversas tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 0 C= 10,4 mm																						
e= 0 mm		G1															G2					
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
1	5,150	1	1,83	1,6	—	2,09	—	—	2,22	—	8,535	2,67	3,7	9,981	2,67	4,1	10,706	3,08	5,3	9,843	2,27	3,3
5	6,359	2	1,82	1,7	—	2,01	—	—	2,36	—	9,365	2,66	3,8	10,226	2,56	4,0	10,584	2,75	4,5	10,280	2,38	3,7
2	5,150	3	1,67	1,4	—	1,53	—	—	2,45	—	8,592	2,40	3,1	9,920	2,46	3,6	9,843	2,67	4,0	10,062	2,47	3,7
6	5,531	4	1,82	1,6	—	2,00	—	—	2,08	—	8,140	2,63	3,5	9,461	2,47	3,5	10,584	2,75	4,5	10,171	2,59	4,0
3	5,493	5	2,38	2,8	—	2,10	—	—	2,25	—	8,314	2,47	3,2	9,482	2,45	3,4	10,102	2,55	3,9	9,516	2,62	3,8
4	6,486	6	1,98	2,0	—	1,93	—	—	2,28	—	9,760	2,73	4,1	10,377	2,57	4,1	10,584	2,83	4,7	10,609	2,22	3,8
9	5,875	7	2,07	2,1	—	2,08	—	—	2,14	—	9,880	2,50	3,7	9,981	2,57	3,9	10,584	2,89	4,8	9,843	2,30	3,4
5	6,359	8	1,84	1,7	—	1,61	—	—	2,15	—	9,365	2,25	3,1	10,226	2,42	3,7	10,584	2,79	4,6	10,280	2,27	3,6
10	5,427	9	2,07	2,1	—	1,64	—	—	2,08	—	8,982	2,29	3,0	10,226	2,56	4,0	10,584	3,00	5,0	9,516	2,50	3,6
6	5,531	10	1,67	1,4	—	2,19	—	—	2,06	—	8,140	2,29	2,8	9,461	2,59	3,7	10,584	2,94	4,9	10,171	2,48	3,8
11	5,254	11	2,27	2,5	—	2,07	—	—	1,95	—	8,443	2,16	2,6	9,585	2,59	3,8	10,584	3,09	5,3	9,406	2,52	3,6
7	5,150	12	2,13	2,2	—	2,07	—	—	1,94	—	7,824	2,29	2,7	9,260	2,50	3,5	10,584	2,94	4,9	9,843	2,64	4,0
13	6,485	13	1,87	1,8	—	1,88	—	—	2,04	—	9,916	2,82	4,4	10,421	2,46	3,9	10,589	3,09	5,3	10,827	2,34	4,1
9	5,875	14	1,85	1,7	—	1,93	—	—	2,46	—	9,880	2,13	3,2	10,584	2,33	3,9	10,584	2,98	5,0	9,843	2,43	3,6
14	6,359	15	1,86	1,8	—	2,02	—	—	1,99	—	9,988	2,30	3,4	10,509	2,40	3,9	10,589	2,89	4,8	9,406	2,39	3,3
10	5,427	16	1,65	1,4	—	1,96	—	—	2,00	—	8,982	2,25	2,9	10,226	2,44	3,8	10,584	2,85	4,7	9,406	2,52	3,6
15	5,932	17	1,60	1,3	—	1,83	—	7,670	1,67	1,7	9,772	2,15	3,1	9,937	2,83	4,4	10,589	3,07	5,2	9,953	2,50	3,7
11	5,254	18	1,94	1,8	—	2,03	—	—	1,96	—	8,443	2,20	2,7	9,585	2,62	3,8	10,584	2,71	4,4	9,406	2,54	3,6
16	4,195	19	2,05	2,1	7,210	2,13	2,3	7,940	1,75	1,9	7,940	2,14	2,5	9,981	2,55	3,8	10,128	2,96	4,8	10,280	2,69	4,2
17	5,341	20	2,04	2,0	6,124	2,12	2,2	7,430	2,36	2,8	9,751	2,40	3,5	10,597	2,49	4,1	10,606	2,90	4,8	9,734	2,61	3,8
14	6,359	21	2,07	2,1	—	2,10	—	—	1,79	—	9,988	2,35	3,5	10,509	2,48	4,0	10,589	3,05	5,2	9,406	2,49	3,5
18	4,959	22	2,09	2,1	6,050	1,79	1,6	7,190	1,91	1,9	9,449	2,13	2,9	10,025	2,57	3,9	11,022	3,10	5,5	9,296	2,43	3,3
15	5,932	23	2,03	2,0	—	1,94	—	7,670	2,14	2,4	9,772	2,19	3,2	9,937	2,80	4,3	10,589	2,73	4,5	9,953	2,43	3,6
19	5,570	24	1,97	1,9	6,600	2,02	2,1	7,120	1,90	1,9	7,976	2,17	2,5	10,465	2,82	4,6	11,166	3,13	5,6	9,624	2,50	3,6
Média	5,644	—	1,94	1,9	6,496	1,96	2,1	7,503	2,08	2,1	9,050	2,36	3,2	10,040	2,55	3,9	10,563	2,91	4,8	9,862	2,46	3,7
Desvio padrão	0,6	—	0,2	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,8	0,2	0,5	0,4	0,1	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,1	0,2

Tabela F.2 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d=0,17$ nas diversas tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 0,17 C= 12,1 mm																						
e=3 mm		G1															G2					
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
1	6,828	1	2,44	2,2	5,501	2,36	2,0	5,677	3,02	3,3	9,624	3,33	4,3	12,299	3,45	5,8	12,426	4,23	7,4	10,517	2,82	3,7
4	7,475	2	2,39	2,2	5,404	2,76	2,7	6,455	3,15	3,6	10,020	3,26	4,2	11,483	3,55	5,4	13,992	4,63	9,7	11,296	2,74	4,1
2	7,323	3	2,68	2,7	5,460	3,65	4,8	6,625	3,49	4,4	9,756	2,98	3,6	12,182	3,59	6,0	14,090	4,55	9,7	11,556	2,76	4,4
3	6,850	4	2,38	2,1	5,308	2,56	2,3	6,965	2,62	2,5	10,020	3,21	4,1	11,133	3,49	5,1	14,090	4,16	9,1	12,724	2,92	5,9
7	7,548	5	2,29	2,0	7,566	2,65	2,6	8,239	3,23	3,8	11,074	2,94	4,2	11,658	3,69	5,8	13,306	3,95	7,7	11,946	2,90	4,9
4	7,475	6	2,57	2,5	5,404	2,84	2,9	6,455	3,37	4,1	10,020	3,01	3,8	11,483	3,74	5,8	13,992	4,28	9,1	11,296	2,95	4,4
8	7,828	7	2,37	2,2	7,516	2,99	3,3	8,069	2,90	3,1	10,419	3,02	4,0	10,842	3,44	4,9	14,774	4,51	10,9	11,167	3,05	4,4
5	7,377	8	2,63	2,6	6,147	2,39	2,1	7,219	3,02	3,3	9,624	3,33	4,3	12,240	3,44	5,8	14,774	4,62	11,1	11,946	3,17	5,2
10	—	9	2,47	—	7,334	2,34	2,1	8,239	2,38	2,3	10,636	3,35	4,6	13,232	3,70	7,2	12,788	4,27	7,8	11,686	3,42	5,3
7	7,548	10	2,49	2,4	7,566	2,19	1,9	8,239	2,38	2,3	11,074	3,09	4,4	11,658	3,65	5,7	13,306	4,51	8,7	11,946	3,30	5,3
11	—	11	2,62	—	8,299	2,74	2,9	8,713	3,24	3,9	10,528	3,35	4,6	12,823	3,48	6,4	13,963	4,36	9,2	11,037	3,24	4,6
8	7,828	12	2,53	2,5	7,516	2,72	2,7	8,069	2,68	2,7	10,419	3,32	4,5	10,842	3,57	5,2	14,774	4,19	10,7	11,167	3,47	5,1
12	—	13	2,75	—	7,612	2,37	2,2	9,173	2,81	3,2	9,876	3,36	4,4	12,649	3,44	6,2	13,180	4,52	8,6	11,037	3,20	4,6
13	—	14	2,25	—	7,178	2,23	1,9	8,204	2,68	2,8	10,419	3,43	4,7	13,174	3,55	7,0	12,658	3,87	6,8	10,258	3,19	4,2
11	—	15	2,30	—	8,299	3,01	3,4	8,713	3,17	3,8	10,528	3,52	4,9	12,823	3,80	6,9	13,963	3,99	8,7	11,037	3,19	4,5
14	—	16	2,20	—	7,684	3,01	3,3	8,663	3,03	3,5	10,203	3,00	3,8	13,464	3,15	7,2	11,745	3,96	6,4	10,777	3,37	4,7
Média	7,408	—	2,46	2,3	6,862	2,68	2,70	7,732	2,95	3,3	10,265	3,22	4,3	12,124	3,546	6,0	13,614	4,29	8,9	11,337	3,11	4,7
Desvio padrão	0,3	—	0,2	0,2	1,1	0,4	0,8	1,0	0,3	0,6	0,5	0,2	0,4	0,9	0,2	0,7	0,9	0,3	1,4	0,6	0,2	0,5

Tabela F.3 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d=0,33$ nas diversas tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 0,33 C= 13,9 mm																						
e=6 mm		G1																		G2		
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (cm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
1	6,557	1	2,22	1,4	6,707	2,88	2,3	8,363	3,77	3,9	10,560	3,89	4,6	12,841	4,17	6,3	13,954	5,31	9,3	11,961	3,71	5,0
5	7,898	2	2,23	1,6	7,200	2,81	2,2	9,842	3,37	3,5	11,307	3,77	4,7	12,367	3,84	5,4	15,633	4,95	12,0	12,843	3,93	6,0
2	6,893	3	2,05	1,3	6,638	3,01	2,5	9,005	3,27	3,1	11,032	3,59	4,3	13,471	3,97	6,7	15,738	5,13	12,4	11,835	3,91	5,2
6	7,146	4	2,15	1,4	8,604	2,97	2,6	9,530	3,41	3,5	11,307	3,72	4,6	12,998	3,91	6,1	14,899	5,40	10,7	12,843	3,32	5,4
3	7,818	5	2,34	1,7	7,426	3,16	2,8	9,598	3,04	3,0	10,940	3,77	4,5	13,077	4,12	6,4	14,059	5,53	9,8	11,709	3,16	4,2
8	—	6	2,38	—	8,171	2,77	2,3	10,000	3,42	3,6	11,057	3,55	4,2	13,785	4,43	7,7	15,423	5,40	11,8	11,584	3,92	5,0
5	7,898	7	2,13	1,5	7,200	2,55	1,9	9,842	2,89	2,9	11,307	3,64	4,5	12,367	4,50	6,5	15,633	5,81	12,8	12,843	3,56	5,6
9	—	8	2,26	—	8,400	2,98	2,6	10,290	2,95	3,1	11,892	3,53	4,7	13,155	3,89	6,3	14,794	5,68	11,0	11,961	3,99	5,4
6	7,146	9	2,41	1,7	8,604	2,87	2,5	9,530	2,55	2,4	11,307	3,52	4,3	12,998	4,32	6,6	14,899	5,99	11,8	12,843	3,72	5,7
10	—	10	2,60	—	8,400	2,95	2,6	9,662	2,66	2,6	10,940	3,53	4,1	13,471	4,13	6,9	14,374	5,53	10,2	11,458	3,19	4,0
Média	7,336	—	2,28	1,5	7,735	2,90	2,4	9,566	3,13	3,2	11,165	3,65	4,4	13,1	4,1	6,5	14,941	5,47	11,2	12,188	3,64	5,1
Desvio padrão	0,5	—	0,2	0,2	0,8	0,2	0,3	0,5	0,4	0,5	0,4	0,1	0,2	0,5	0,2	0,6	0,7	0,3	1,2	0,6	0,3	0,6

Tabela F.4 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d=0,67$ nas diversas tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 0,67 C= 17,3 mm																						
e= 12 mm		G1															G2					
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (cm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
1	9,009	1	3,95	2,9	8,159	3,94	2,8	10,845	4,18	3,6	12,504	5,34	5,9	13,906	7,08	9,6	15,646	9,04	15,4	12,400	6,02	6,9
4	9,262	2	4,11	3,2	10,272	4,16	3,4	11,408	4,06	3,8	13,043	5,24	6,0	13,906	7,72	11,0	16,373	9,16	16,7	—	6,89	—
2	8,931	3	3,82	2,7	10,163	4,26	3,5	11,408	4,48	4,2	13,215	5,31	6,3	12,594	6,65	8,1	17,021	8,69	17,5	—	6,67	—
6	8,428	4	3,99	2,9	9,531	4,06	3,1	11,268	4,41	4,1	13,269	5,35	6,4	14,042	6,67	9,0	14,649	8,45	13,2	—	6,82	—
4	9,262	5	4,14	3,2	10,272	3,89	3,1	11,408	4,49	4,2	13,043	5,47	6,4	13,906	6,48	8,5	16,373	9,22	16,9	—	6,70	—
7	8,365	6	3,86	2,7	10,590	3,70	3,1	12,394	4,93	5,2	12,707	5,16	5,7	15,100	6,44	9,7	14,182	8,35	12,6	—	6,05	—
Média	8,876	—	3,98	2,9	9,831	4,00	3,2	11,455	4,43	4,2	12,963	5,31	6,1	13,909	6,84	9,3	15,707	8,82	15,4	12,400	6,53	6,9
Desvio padrão	0,4	—	0,1	0,2	0,9	0,2	0,3	0,5	0,3	0,6	0,3	0,1	0,3	0,8	0,5	1,0	1,1	0,4	2,0	0,0	0,4	0,0

Tabela F.5 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d=1$ nas diversas tensões verticais.

d= 18 mm, e/d= 1 C= 20,8 mm																						
e= 18 mm	G1																			G2		
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
1	10,065	1	5,46	3,8	8,880	6,52	5,1	12,339	8,00	7,9	13,687	8,36	9,0	15,895	10,67	14,8	18,000	13,34	28,4	13,246	8,50	9,1
4	10,143	2	5,69	4,1	10,837	6,20	4,9	13,861	6,89	7,0	15,149	7,77	9,2	16,416	9,48	13,5	18,000	15,42	32,6	15,493	8,03	10,0
2	8,718	3	5,82	4,1	9,358	6,49	5,1	13,439	7,45	7,5	13,279	7,72	7,8	14,982	9,46	11,7	18,000	12,95	27,8	15,045	8,42	10,0
6	9,362	4	5,17	3,4	10,360	6,48	5,2	12,847	7,62	7,4	15,330	7,13	8,7	17,719	10,04	19,1	18,000	14,13	29,8	15,142	8,52	10,3
4	10,143	5	5,45	3,8	10,837	5,45	3,9	13,861	7,41	7,6	15,149	6,43	7,8	16,416	9,53	13,5	18,000	15,21	32,1	15,493	8,75	11,0
7	9,063	6	5,76	4,0	11,091	6,33	5,1	12,171	7,18	6,6	14,459	7,88	8,7	16,806	—	—	18,000	13,23	28,2	15,006	9,08	11,0
Média	9,582	—	5,56	3,9	10,227	6,25	4,9	13,086	7,43	7,3	14,509	7,55	8,5	16,372	9,84	14,5	18,000	14,05	29,8	14,904	8,55	10,2
Desvio padrão	0,6	—	0,2	0,3	0,9	0,4	0,5	0,7	0,4	0,5	0,9	0,7	0,6	0,9	0,5	2,8	0,0	1,1	2,1	0,8	0,3	0,7

Tabela F.6 – Resumo das deformações do geotêxtil G3 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 0; 0,17; 0,33; 0,67$ e 1 tensão vertical de 1000 kPa.

d= 18 m 1000 kPa																								
G3	e/d= 0				e/d= 0,17				e/d= 0,33				e/d= 0,67				e/d= 1							
	C= 10,4 mm				C= 12,1 mm				C= 13,9 mm				C= 17,3 mm				C= 20,8 mm							
Nº de D	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	Nº de D	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	Nº de D	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	Nº de D	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)					
1	7,925	1	2,39	2,9	1	11,104	1	2,89	4,2	1	10,721	1	3,37	3,8	1	12,546	1	6,05	7,0	1	—	1	7,42	—
5	10,250	2	2,49	2,7	4	10,849	2	2,96	4,1	5	11,783	2	3,55	4,6	4	11,901	2	5,99	6,7	4	—	2	7,21	—
2	9,523	3	2,59	2,4	2	11,615	3	2,96	4,6	2	11,783	3	3,53	4,6	2	12,494	3	5,68	6,4	2	—	3	8,14	—
6	10,250	4	2,19	2,5	3	10,976	4	2,74	3,9	6	11,147	4	3,40	4,1	6	11,681	4	6,52	7,6	6	13,419	4	8,37	8,9
3	8,652	5	2,40	2,0	7	10,976	5	3,02	4,2	3	11,783	5	3,64	4,8	4	11,901	5	6,31	7,3	4	—	5	7,65	—
4	9,742	6	2,24	2,2	4	10,849	6	3,21	4,5	8	11,147	6	3,40	4,1	7	11,952	6	5,97	6,6	7	—	6	7,31	—
9	10,324	7	2,37	2,6	8	12,380	7	3,04	5,5	5	11,783	7	3,32	4,4										
5	10,250	8	2,56	2,7	5	12,125	8	2,90	5,1	9	11,147	8	3,26	3,9										
10	9,669	9	2,54	2,4	10	10,976	9	2,97	4,2	6	11,147	9	3,40	4,1										
6	10,250	10	2,73	2,9	7	10,976	10	3,26	4,6	10	10,828	10	3,40	3,9										
11	9,814	11	2,55	2,5	11	10,211	11	3,13	4,1															
7	9,960	12	2,82	2,8	8	12,380	12	3,08	5,5															
13	10,250	13	2,29	2,5	12	11,615	13	3,07	4,8															
9	10,324	14	2,61	2,8	13	9,700	14	2,88	3,5															
14	10,250	15	2,44	2,6	11	10,211	15	3,00	3,8															
10	9,669	16	2,53	2,4	14	9,828	16	2,95	3,6															
15	10,324	17	2,53	2,7																				
11	9,814	18	2,44	2,4																				
16	10,178	19	2,53	2,7																				
17	9,669	20	2,33	2,3																				
14	10,250	21	2,36	2,6																				
18	10,833	22	2,24	2,9																				
15	10,324	23	2,49	2,7																				
19	10,905	24	2,50	3,1																				
Média	9,975	—	2,47	2,6	—	11,048	—	3,00	4,4	—	11,327	—	3,43	4,2	—	12,079	—	6,09	6,9	—	13,419	—	7,68	8,9
Desvio padrão	0,6	—	0,2	0,3	—	0,8	—	0,1	0,6	—	0,4	—	0,1	0,3	—	0,4	—	0,3	0,5	—	0	—	0,5	0,0

Tabela F.7 – Resumo das deformações dos geotêxteis G1, G2 e G3 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d=0,17$ e 1 na tensão vertical de 50 kPa.

d= 18 mm, 50 kPa																					
Nº de D	e/d=0,17									e/d=1											
	G1				G2			G3		G1				G2			G3				
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	Nº de	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
1	6,828	1	2,44	2,2	6,911	2,11	1,7	7,467	1,68	1,3	1	10,06	1	5,46	3,8	9,752	3,12	1,8	8,036	2,50	1,1
4	7,475	2	2,39	2,2	6,266	2,14	1,7	7,575	1,76	1,4	4	10,14	2	5,69	4,1	9,753	2,91	1,7	9,141	2,58	1,3
2	7,323	3	2,68	2,7	7,648	2,06	1,8	7,894	1,88	1,6	2	8,718	3	5,82	4,1	8,577	3,29	1,6	7,799	2,75	1,1
3	6,850	4	2,38	2,1	7,279	1,59	1,2	7,041	1,26	0,9	6	9,362	4	5,17	3,4	8,695	3,13	1,5	8,364	2,84	1,3
7	7,548	5	2,29	2,0	7,095	1,75	1,3	8,137	1,60	1,5	4	10,14	5	5,45	3,8	9,753	2,95	1,7	9,141	3,07	1,6
4	7,475	6	2,57	2,5	6,266	1,99	1,5	7,575	1,53	1,2	7	9,063	6	5,76	4,0	9,517	3,00	1,6	7,741	3,06	1,3
8	7,828	7	2,37	2,2	7,003	1,91	1,5	6,293	1,93	1,4											
5	7,377	8	2,63	2,6	7,003	1,85	1,4	7,360	1,85	1,5											
10	-	9	2,47	-	7,187	1,65	1,2	8,405	1,10	1,4											
7	7,548	10	2,49	2,4	7,095	2,02	1,6	8,137	1,13	1,3											
11	-	11	2,62	-	6,450	1,93	1,4	7,894	1,81	1,6											
8	7,828	12	2,53	2,5	7,003	1,93	1,5	6,293	1,77	1,2											
12	-	13	2,75	-	7,279	1,73	1,3	5,974	1,83	1,3											
13	-	14	2,25	-	7,740	1,75	1,5	7,337	1,13	1,0											
11	-	15	2,30	-	6,450	1,92	1,4	7,894	1,15	1,2											
14	-	16	2,20	-	7,187	1,65	1,2	8,672	1,45	1,6											
Média	7,408	-	2,46	2,3	6,991	1,87	1,5	7,497	1,55	1,3	-	9,582	-	5,56	3,9	9,341	3,07	1,6	8,370	2,80	1,3
Desvio padrão	0,3	-	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,8	0,3	0,2	-	0,6	-	0,2	0,3	0,6	0,1	0,1	0,6	0,2	0,2

Tabela F.8 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 18 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ e 1 nas diversas tensões verticais, no ensaio de repetibilidade.

REPETIBILIDADE - ENSAIO 2																			d= 18 mm, e/d= 0,33 C= 13,9 mm		
e= 6 mm	G1															G2					
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa				
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)		
1	6,989	1	3,39	3,1	8,523	3,39	3,3	9,858	3,66	4,0	11,316	3,59	4,4	14,487	4,50	8,8	14,179	5,17	9,3		
5	8,106	2	3,17	2,8	8,562	3,26	3,0	10,306	3,31	3,6	11,611	3,57	4,6	12,790	4,49	6,7	14,395	5,07	9,4		
2	6,967	3	2,84	2,2	8,679	2,99	2,7	9,634	3,11	3,1	11,588	3,37	4,3	13,421	3,98	6,7	14,720	5,05	9,9		
6	6,514	4	2,15	1,3	8,441	2,59	2,1	10,306	3,18	3,4	10,907	3,18	3,7	12,849	4,19	6,3	14,395	4,96	9,2		
3	6,862	5	2,26	1,5	8,836	2,37	2,0	10,754	3,36	3,8	10,497	3,49	3,9	13,179	3,65	6,1	12,880	5,23	8,3		
8	7,107	6	3,04	2,5	7,408	2,59	1,9	9,858	3,50	3,7	12,952	3,88	6,0	12,367	4,50	6,5	14,503	5,32	9,9		
5	8,106	7	2,87	2,4	8,562	2,26	1,8	10,306	3,37	3,6	11,611	4,16	5,4	12,790	4,04	6,1	14,395	5,16	9,5		
9	7,388	8	2,47	1,8	8,535	2,42	2,0	10,194	3,22	3,4	11,860	3,50	4,6	11,870	3,66	4,8	13,854	4,98	8,5		
6	6,514	9	2,41	1,6	8,441	2,34	1,9	10,306	3,69	4,1	10,907	3,67	4,3	12,849	3,65	5,7	14,395	5,26	9,7		
10	7,862	10	2,24	1,6	8,722	2,63	2,2	10,754	3,67	4,3	10,907	3,42	4,0	10,882	3,56	4,1	13,367	5,33	8,8		
Média	7,241	—	2,68	2,1	8,471	2,68	2,3	10,227	3,41	3,7	11,416	3,58	4,5	12,748	4,02	6,2	14,108	5,15	9		
Desvio padrão	0,6	—	0,4	0,6	0,4	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,7	0,3	0,7	0,9	0,4	1,2	0,6	0,1	0,6		

Tabela F.9 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d=0$ nas diversas tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 0 C= 5,8 mm																						
e= 0 mm		G1															G2					
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
14	3,258	25	0,86	1,2	4,268	1,05	2,0	3,268	1,47	3,4	5,196	1,51	3,9	5,437	1,44	3,8	5,737	1,45	4,1	5,735	1,05	3,3
22	3,599	26	1,06	1,8	3,793	1,04	1,8	4,060	1,57	3,9	5,196	1,41	3,5	5,6088	1,34	3,6	6,062	1,47	4,5	5,735	1,13	3,4
15	2,959	27	1,06	1,8	3,455	0,97	1,5	3,268	1,36	2,9	5,356	1,23	3,1	5,437	1,30	3,4	6,096	1,63	5,1	5,569	1,15	3,2
23	3,723	28	1,08	1,9	3,726	1,04	1,8	3,807	1,40	3,1	5,437	1,15	3,0	5,2648	1,42	3,6	5,898	1,49	4,4	5,651	1,35	3,7
16	3,216	29	0,91	1,4	3,933	0,83	1,4	3,722	1,27	2,6	5,260	1,09	2,7	4,918	1,54	4,0	5,881	1,45	4,2	6,067	1,29	4,1
21	3,538	38	0,93	1,5	3,793	0,88	1,4	3,891	1,27	2,6	5,356	1,34	3,4	5,6088	1,46	4,0	6,144	1,51	4,7	5,651	1,29	3,6
30	3,661	39	0,79	1,2	3,658	1,07	1,9	4,270	1,27	2,7	5,473	1,22	3,2	5,6957	1,37	3,8	6,144	1,53	4,8	5,735	1,19	3,5
22	3,599	40	0,69	1,0	3,793	0,97	1,6	4,060	1,41	3,2	5,196	1,39	3,5	5,6088	1,47	4,0	6,062	1,68	5,2	5,735	1,36	3,8
31	3,344	41	0,90	1,3	3,522	1,15	2,1	3,947	1,45	3,4	5,260	1,31	3,3	5,2648	1,38	3,5	5,817	1,68	5,0	5,402	1,22	3,1
23	3,723	42	0,90	1,4	3,726	1,13	2,1	3,807	1,54	3,8	5,437	1,45	3,8	5,2648	1,44	3,7	5,898	1,68	5,1	5,651	1,40	3,8
32	3,603	43	0,87	1,3	4,016	0,82	1,4	4,028	1,38	3,1	5,118	1,08	2,6	5,091	1,41	3,5	6,142	1,63	5,1	5,984	1,29	4,0
24	3,216	44	0,88	1,3	3,726	0,82	1,3	4,270	1,36	3,0	4,637	1,16	2,4	5,3411	1,45	3,8	6,227	1,53	4,9	5,651	1,20	3,4
38	3,216	53	0,89	1,3	4,351	0,97	1,8	3,898	1,29	2,7	4,834	1,17	2,6	4,9278	1,27	2,9	5,796	1,63	4,8	5,402	1,24	3,2
30	3,661	54	0,96	1,6	3,658	1,09	1,9	4,270	1,30	2,8	5,473	1,39	3,7	5,6957	1,27	3,6	6,144	1,61	5,0	5,735	1,28	3,6
39	3,474	55	0,88	1,3	4,268	1,11	2,2	3,947	1,43	3,3	5,331	1,37	3,5	5,2648	1,52	4,0	6,228	1,61	5,1	5,984	1,33	4,1
31	3,344	56	0,78	1,1	3,522	0,98	1,6	3,947	1,30	2,7	5,260	1,37	3,4	5,2648	1,45	3,7	5,817	1,65	4,9	5,402	1,31	3,4
40	3,409	57	0,83	1,2	4,064	1,15	2,2	3,866	1,37	3,0	5,260	1,26	3,1	5,536	1,45	3,9	6,315	1,67	5,4	5,651	1,38	3,8
32	3,603	58	1,02	1,7	4,016	1,00	1,8	4,028	1,33	2,9	5,118	1,17	2,8	5,091	1,24	2,9	6,142	1,57	4,9	5,984	1,26	3,9
41	3,599	59	0,97	1,6	4,613	1,06	2,2	4,176	1,34	2,9	5,118	1,27	3,0	5,6323	1,18	3,3	6,401	1,57	5,3	5,569	1,25	3,4
46	3,041	68	0,85	1,2	4,435	0,98	1,9	4,192	1,41	3,2	5,260	1,27	3,1	5,4374	1,39	3,6	6,401	1,57	5,3	5,710	1,23	3,5
39	3,474	69	0,76	1,1	4,268	1,05	2,0	3,947	1,39	3,1	5,331	1,27	3,2	5,8741	1,40	4,1	6,228	1,53	4,9	5,984	1,33	4,1
47	3,344	70	0,80	1,1	4,435	0,91	1,7	4,486	1,36	3,1	5,616	1,14	3,2	5,6957	1,35	3,8	6,661	1,63	5,9	5,682	1,29	3,6
40	3,409	71	0,90	1,4	4,064	0,97	1,7	3,866	1,39	3,1	5,260	1,28	3,2	5,536	1,46	3,9	6,315	1,76	5,8	5,651	1,28	3,5
48	3,859	72	0,82	1,3	4,200	0,92	1,6	4,511	1,33	3,0	4,550	1,24	2,7	5,1978	1,30	3,2	6,575	1,72	6,0	5,682	1,20	3,4
Média	3,453	—	0,89	1,4	3,971	1,00	1,8	3,981	1,37	3,1	5,222	1,27	3,2	5,404	1,39	3,7	6,131	1,59	5,0	5,708	1,26	3,6
Desvio padrão	0,2	—	0,1	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,4	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,5	0,2	0,1	0,3

Tabela F.10 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d=0,17$ nas diversas tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 0,17 C= 6,8 mm																						
e=1,7 mm		G1															G2					
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
12	2,962	21	1,09	1,4	3,834	1,27	1,9	4,977	1,24	2,3	5,123	1,28	2,4	6,242	1,32	3,8	5,563	1,79	4,1	6,084	1,61	4,0
20	2,803	22	1,04	1,2	3,981	1,38	2,2	4,706	1,18	2,0	5,311	1,26	2,6	5,550	1,59	3,5	5,712	1,89	4,5	6,328	1,59	4,3
13	3,244	23	1,06	1,3	3,908	1,20	1,8	4,615	1,22	2,0	5,060	1,15	2,2	6,063	1,41	3,6	6,083	1,66	4,1	5,760	1,52	3,5
21	3,072	24	0,97	1,1	3,981	1,32	2,1	4,887	1,21	2,2	5,436	1,36	2,8	5,603	1,46	3,2	6,527	1,73	4,9	6,328	1,58	4,3
14	3,341	25	1,02	1,2	4,564	1,08	1,7	5,068	1,12	2,1	5,436	1,28	2,7	6,021	1,65	4,0	6,083	1,67	4,1	5,598	1,55	3,4
19	3,037	33	0,87	0,9	3,908	1,21	1,8	4,977	1,20	2,2	5,436	1,38	2,9	5,708	1,52	3,4	6,157	1,94	5,0	6,409	1,59	4,4
27	3,471	34	1,05	1,3	3,244	1,25	1,8	5,159	1,26	2,4	5,315	1,12	2,3	5,826	1,50	3,5	6,527	1,98	5,5	5,840	1,49	3,5
20	2,803	35	1,09	1,4	3,981	1,29	2,0	4,706	1,35	2,4	5,311	1,41	2,9	5,550	1,47	3,2	5,712	2,06	5,2	6,328	1,63	4,4
28	3,386	36	1,03	1,3	3,613	1,34	2,1	4,887	1,25	2,2	5,375	1,48	3,1	5,707	1,56	3,5	6,305	1,97	5,2	5,273	1,70	3,6
21	3,072	37	1,01	1,2	3,981	1,35	2,2	4,887	1,25	2,2	5,436	1,45	3,0	5,603	1,77	4,0	6,527	1,97	5,5	6,328	1,75	4,6
29	3,645	38	1,02	1,3	4,129	1,26	2,0	4,887	1,23	2,2	5,793	1,37	3,2	5,707	1,70	3,9	6,379	1,82	4,9	6,165	1,66	4,2
22	3,357	39	1,05	1,3	3,908	1,16	1,7	5,159	1,06	2,1	5,685	1,33	3,0	5,338	1,37	2,8	5,712	1,65	3,8	6,246	1,69	4,4
34	3,776	46	1,03	1,4	3,981	0,94	1,3	4,977	1,24	2,3	5,037	1,31	2,5	6,071	1,43	3,6	6,511	1,55	4,5	5,843	1,63	3,8
27	3,471	47	1,00	1,2	3,244	1,15	1,5	5,159	1,19	2,3	5,315	1,41	2,9	5,826	1,33	3,2	6,527	1,63	4,7	5,840	1,52	3,5
35	3,983	48	1,12	1,6	3,981	1,27	1,9	4,706	1,37	2,4	5,037	1,49	2,9	5,571	1,61	3,5	5,861	1,83	4,4	5,955	1,81	4,4
28	3,386	49	1,12	1,5	3,613	1,25	1,8	4,887	1,37	2,5	5,375	1,41	2,9	5,707	1,60	3,6	6,305	1,72	4,5	5,273	1,86	4,2
36	3,584	50	1,10	1,5	3,908	1,21	1,8	4,796	1,29	2,3	5,206	1,41	2,8	6,071	1,66	4,1	6,157	1,82	4,6	5,565	1,66	3,7
29	3,645	51	0,81	1,0	4,129	0,99	1,4	4,887	1,27	2,3	5,793	1,36	3,2	5,707	1,40	3,2	6,379	1,79	4,8	6,165	1,65	4,2
37	3,581	52	0,88	1,0	3,834	1,04	1,4	4,533	1,17	1,9	5,419	1,28	2,7	5,928	1,61	3,8	6,157	1,63	4,1	5,383	1,63	3,5
42	3,777	60	1,17	1,7	3,908	1,11	1,6	4,276	1,24	2,0	4,809	1,47	2,7	5,785	1,38	3,2	5,563	1,74	3,9	5,610	1,66	3,7
35	3,983	61	0,98	1,3	3,981	1,01	1,4	4,706	1,24	2,1	5,037	1,18	2,2	5,571	1,35	2,9	5,861	1,62	3,8	5,955	1,61	3,9
43	3,455	62	1,13	1,5	4,353	1,13	1,7	4,447	1,25	2,0	5,419	1,23	2,6	5,999	1,39	3,5	6,083	1,67	4,1	5,930	1,53	3,7
36	3,584	63	1,07	1,4	3,908	1,21	1,8	4,796	1,34	2,4	5,206	1,33	2,6	6,071	1,51	3,8	6,157	1,74	4,4	5,565	1,60	3,5
44	3,971	64	0,97	1,3	4,353	1,18	1,8	4,106	1,27	2,0	5,419	1,12	2,5	5,571	1,46	3,2	5,861	1,68	4,0	5,748	1,53	3,5
Média	3,433	—	1,03	1,3	3,926	1,19	1,8	4,800	1,24	2,2	5,324	1,33	2,7	5,783	1,50	3,5	6,113	1,77	4,5	5,897	1,63	3,9
Desvio padrão	0,3	—	0,1	0,2	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,4	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1	0,4

Tabela F.11 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d= 0,33$ nas diversas tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 0,33 C= 7,7 mm																						
e=3,3mm		G1															G2					
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
6	2,986	10	1,77	2,8	4,191	1,39	1,9	4,562	1,75	2,8	5,963	1,61	3,3	5,939	1,90	3,9	7,780	2,21	7,6	6,713	1,77	4,5
12	3,773	11	1,47	2,0	3,871	1,21	1,4	5,352	1,67	2,9	5,645	1,69	3,2	6,460	2,12	4,9	7,570	2,47	7,5	6,887	1,92	5,1
7	3,419	12	1,15	1,2	4,030	1,16	1,4	4,825	1,58	2,5	5,407	1,80	3,3	6,773	1,85	4,8	7,992	2,69	9,1	6,713	1,98	4,9
13	3,510	13	1,13	1,2	4,352	1,21	1,6	5,088	1,97	3,6	6,043	2,20	4,8	6,773	2,23	5,6	7,466	2,68	7,9	6,799	2,16	5,4
8	3,419	14	1,14	1,2	3,627	1,28	1,5	4,825	1,84	3,2	5,725	2,12	4,4	6,669	2,14	5,2	7,992	2,72	9,1	7,061	2,11	5,7
11	3,672	19	1,53	2,1	4,367	1,43	2,0	5,264	1,60	2,7	5,328	1,76	3,1	6,669	1,93	4,7	7,780	2,34	7,8	6,974	1,99	5,3
18	3,510	20	1,50	2,0	4,566	1,54	2,3	5,176	1,60	2,7	5,725	1,82	3,5	6,759	2,19	5,4	7,886	2,31	8,0	6,974	1,97	5,3
12	3,773	21	1,88	3,1	3,871	1,84	3,0	5,352	1,65	2,9	5,645	1,95	3,8	6,460	2,49	6,1	7,570	2,54	7,7	6,887	2,05	5,3
19	3,773	22	1,54	2,1	4,268	1,48	2,1	5,352	1,55	2,7	5,805	1,88	3,7	6,231	2,19	4,9	7,676	2,69	8,3	6,538	2,11	5,0
13	3,510	23	1,57	2,2	4,352	1,44	2,0	5,088	1,47	2,4	6,043	1,72	3,6	6,773	2,61	6,8	7,466	2,57	7,6	6,799	2,03	5,1
20	4,240	24	1,54	2,2	4,019	1,35	1,7	5,264	1,48	2,5	6,043	1,63	3,4	6,669	2,27	5,6	7,886	2,51	8,4	6,625	1,94	4,7
14	3,538	25	1,44	1,9	3,869	0,92	1,0	5,001	1,53	2,5	5,725	1,77	3,4	6,669	2,14	5,2	7,570	2,66	8,0	6,974	2,09	5,5
24	3,826	30	1,78	2,8	4,246	1,66	2,5	6,141	1,50	3,3	5,680	1,63	3,1	7,022	1,92	5,3	7,466	2,24	6,8	7,149	2,01	5,7
18	3,510	31	1,22	1,4	4,566	1,35	1,9	5,176	1,58	2,6	5,725	1,96	3,9	6,759	2,15	5,3	7,886	2,45	8,3	6,974	2,00	5,4
25	3,162	32	1,36	1,6	4,854	1,34	2,0	5,439	1,91	3,6	6,123	1,95	4,2	7,109	2,21	6,0	7,466	2,81	8,3	7,323	2,20	6,4
19	3,773	33	1,40	1,8	4,268	1,55	2,2	5,352	1,81	3,3	5,805	2,07	4,3	6,231	2,28	5,2	7,676	2,55	7,9	6,538	2,04	4,8
26	3,869	34	1,62	2,4	4,474	1,35	1,9	4,825	2,00	3,7	6,352	2,22	5,1	7,022	2,15	5,7	7,150	3,03	8,8	7,410	2,32	6,8
20	4,240	35	1,39	1,9	4,019	1,35	1,7	5,264	1,60	2,7	6,043	1,96	4,1	6,669	1,89	4,7	7,886	2,66	8,7	6,625	2,05	4,9
27	3,876	36	1,24	1,5	4,268	1,41	1,9	5,260	1,31	2,2	5,963	1,89	3,9	7,022	1,92	5,3	7,045	2,69	7,3	6,887	1,94	5,1
30	3,779	41	1,46	1,9	4,605	1,76	2,9	5,041	1,42	2,3	5,122	1,75	3,0	6,934	2,17	5,6	7,780	2,36	7,8	7,061	2,06	5,6
25	3,162	42	1,59	2,2	4,854	1,53	2,4	5,439	1,32	2,4	6,123	1,57	3,4	7,109	2,10	5,8	7,466	2,45	7,2	7,323	1,94	6,0
31	4,182	43	1,39	1,9	4,513	1,28	1,8	4,913	1,47	2,3	5,946	1,59	3,2	7,373	2,21	6,5	7,466	2,28	6,9	6,713	1,88	4,7
26	3,869	44	1,41	1,8	4,474	1,22	1,6	4,825	1,26	1,9	6,352	1,72	3,9	7,022	2,20	5,8	7,150	2,26	6,2	7,410	2,00	6,3
32	4,080	45	1,27	1,6	4,237	1,15	1,4	5,352	1,75	3,1	6,037	1,80	3,7	7,197	1,85	5,6	7,992	2,66	9,0	7,149	2,07	5,8
Média	3,685	—	1,45	2,0	4,282	1,38	1,9	5,174	1,61	2,8	5,849	1,84	3,7	6,763	2,13	5,4	7,628	2,53	7,9	6,938	2,03	5,4
Desvio padrão	0,3	—	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,2	0,6	0,3	0,2	0,7	0,3	0,1	0,6

Tabela F.12 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d=0,67$ nas diversas tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 0,67 C= 9,6 mm																						
e=6,7 mm		G1															G2					
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ϵ (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ϵ (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ϵ (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ϵ (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ϵ (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ϵ (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ϵ (%)
1	4,408	1	2,05	2,5	3,829	2,72	4,1	5,644	2,38	3,6	6,129	2,65	4,5	6,504	2,90	5,3	7,833	3,51	8,4	6,446	2,61	4,6
2	3,749	2	1,98	2,2	4,610	2,88	4,7	5,241	2,73	4,3	6,484	2,58	4,5	6,898	2,92	5,7	7,833	4,18	10,7	8,617	2,64	9,2
7	4,451	3	1,66	1,8	5,287	2,37	3,4	5,779	2,25	3,4	6,217	2,27	3,7	6,765	2,57	4,8	7,747	3,54	8,4	8,342	2,50	8,0
3	4,665	4	1,71	1,9	5,102	2,44	3,5	5,443	2,16	3,0	6,484	2,35	4,1	6,394	2,77	4,9	8,088	3,95	10,2	7,659	2,51	6,0
8	4,620	5	2,08	2,6	5,334	1,78	2,3	5,577	2,46	3,7	6,661	2,77	5,1	7,924	2,65	6,8	8,939	3,73	12,0	8,038	2,77	7,3
4	5,088	6	2,17	2,9	5,156	2,28	3,2	5,712	2,60	4,1	6,573	2,60	4,6	7,170	3,07	6,4	8,769	3,62	11,1	8,115	2,75	7,5
9	5,088	7	2,28	3,1	5,547	2,70	4,3	5,308	2,87	4,8	6,750	3,25	6,5	7,656	3,56	8,3	9,365	3,73	14,6	7,740	2,81	6,6
5	5,288	8	2,26	3,2	4,845	2,20	2,9	4,991	2,99	5,1	6,661	3,09	6,0	7,519	3,71	8,6	8,429	3,69	10,1	7,314	2,67	5,6
6	4,065	9	2,14	2,6	5,287	2,37	3,4	5,913	2,62	4,3	6,484	2,66	4,7	6,677	3,02	5,8	8,684	4,15	12,1	7,438	2,51	5,6
12	4,537	10	1,96	2,3	5,194	2,29	3,2	5,443	2,05	2,8	6,040	2,47	4,0	7,210	2,61	5,4	8,513	3,83	10,7	7,584	2,55	5,9
7	4,451	11	1,61	1,7	5,287	1,93	2,5	5,779	1,97	2,8	6,217	2,04	3,3	6,765	2,55	4,7	7,747	3,96	9,8	8,342	2,41	8,0
13	4,082	12	1,67	1,7	5,199	2,04	2,7	5,510	2,00	2,7	6,397	2,16	3,6	6,962	2,71	5,3	8,088	3,85	9,9	7,052	2,55	5,1
8	4,620	13	1,47	1,5	5,334	2,25	3,1	5,577	1,95	2,7	6,661	2,38	4,3	7,924	3,15	7,7	8,939	3,76	12,1	8,038	2,70	7,2
14	4,486	14	2,19	2,8	5,485	2,15	3,0	5,712	2,15	3,1	6,661	2,61	4,7	7,572	3,29	7,4	8,172	3,50	9,0	6,962	2,62	5,1
9	5,088	15	1,79	2,2	5,547	1,96	2,7	5,308	1,90	2,5	6,750	2,57	4,7	7,656	3,18	7,3	9,365	3,28	14,4	7,740	2,57	6,3
15	4,486	16	1,76	1,9	5,374	2,47	3,7	5,510	2,46	3,7	6,484	2,73	4,9	8,190	3,35	8,7	8,769	3,68	11,2	7,399	2,53	5,5
10	4,486	17	2,39	3,3	4,784	2,60	3,9	5,510	2,63	4,1	6,750	2,93	5,6	7,910	3,71	9,1	8,172	3,97	10,4	7,910	2,55	6,7
17	3,543	18	2,35	3,1	5,131	2,46	3,6	5,980	2,96	5,2	6,661	2,63	4,8	6,320	2,70	4,7	7,747	4,27	11,0	7,763	2,54	6,3
12	4,537	19	1,89	2,2	5,194	2,07	2,7	5,443	3,23	5,9	6,040	2,61	4,3	7,210	2,82	5,8	8,513	4,25	12,0	7,584	2,91	6,5
18	4,017	20	1,84	2,0	5,266	2,09	2,8	5,913	2,45	3,9	6,573	2,33	4,1	7,029	2,67	5,3	8,172	3,92	10,2	7,963	2,68	7,0
13	4,082	21	1,89	2,1	5,199	2,14	2,9	5,510	2,32	3,4	6,397	2,52	4,3	6,962	2,96	5,9	8,088	3,80	9,7	7,052	2,95	5,9
19	4,390	22	1,63	1,7	5,266	2,10	2,8	5,779	2,34	3,5	6,889	2,51	4,8	7,567	2,71	6,1	8,769	3,60	11,0	7,508	2,52	5,7
14	4,486	23	1,76	1,9	5,485	1,61	2,1	5,712	2,21	3,2	6,661	2,66	4,9	7,572	2,77	6,3	8,172	3,14	8,2	6,962	2,59	5,0
20	4,005	24	1,51	1,4	5,131	1,89	2,4	5,980	2,41	3,8	6,661	2,74	5,0	7,924	2,69	6,9	9,110	3,06	12,2	7,282	2,45	5,2
15	4,486	25	1,93	2,2	5,374	2,12	2,9	5,510	2,68	4,3	6,484	2,77	5,0	8,190	3,00	8,0	8,769	3,23	10,4	7,399	2,32	5,3
21	3,851	26	2,55	3,7	4,666	2,18	2,8	5,510	2,72	4,4	7,461	3,05	6,7	7,656	3,10	7,1	7,321	3,56	8,0	7,910	2,34	6,5
22	4,178	27	2,52	3,6	4,726	2,43	3,4	5,846	3,04	5,4	6,393	2,91	5,3	8,012	2,95	7,5	7,662	4,50	11,9	8,242	2,91	8,1
18	4,017	28	2,18	2,7	5,266	2,20	3,0	5,913	2,86	4,9	6,573	2,40	4,2	7,029	2,93	5,9	8,172	4,01	10,5	7,963	3,15	7,8
23	3,543	29	1,99	2,2	5,131	2,33	3,3	5,443	2,69	4,3	6,573	2,42	4,3	7,478	3,24	7,2	8,088	3,97	10,3	8,190	3,02	8,1
19	4,390	30	2,14	2,7	5,266	2,29	3,2	5,779	2,28	3,4	6,889	2,63	5,0	7,567	3,68	8,6	8,769	4,21	12,6	7,508	3,15	7,0
24	4,236	31	2,43	3,3	4,456	1,75	1,9	5,846	2,18	3,3	6,661	2,58	4,7	8,190	2,82	7,8	8,172	3,47	9,0	8,115	2,67	7,4
20	4,005	32	2,31	3,0	5,131	2,05	2,7	5,980	2,39	3,8	6,661	2,77	5,1	7,924	3,39	8,3	9,110	3,25	12,3	7,282	2,54	5,4
25	3,620	33	2,76	4,3	4,203	2,76	4,3	5,577	2,66	4,2	6,838	3,23	6,5	7,745	3,50	8,3	7,662	3,25	7,5	7,602	2,62	6,1
26	3,667	34	2,60	3,8	4,793	2,42	3,4	5,107	2,55	3,8	6,217	2,75	4,8	7,745	3,37	7,9	6,981	4,02	9,4	8,163	2,74	7,6
Média	4,315	—	2,04	2,5	5,085	2,24	3,1	5,611	2,47	3,86	6,560	2,64	4,78	7,406	3,03	6,8	8,316	3,75	10,6	7,683	2,66	6,5
Desvio padrão	0,4	—	0,3	0,7	0,4	0,3	0,6	0,3	0,3	0,8	0,3	0,3	0,8	0,5	0,3	1,3	0,6	0,4	1,7	0,5	0,2	1,1

Tabela F.13 – Resumo das deformações do geotêxtil G1 nos vazios das esferas de aço de 10 mm de diâmetro, $e/d=1$ nas diversas tensões verticais.

d= 10 mm, e/d= 1,00 C= 11,5 mm																						
e=1 mm		G1															G2					
Nº de D	50 kPa				100 kPa			200 kPa			500 kPa			1000 kPa			2000 kPa			1000 kPa		
	D (mm)	Nº de δ	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)	D (mm)	δ_{max} (mm)	ε (%)
1	4,175	1	2,77	3,0	4,901	3,17	4,0	5,542	4,05	6,4	7,245	3,57	5,9	8,021	4,31	8,6	8,600	4,99	11,4	8,118	3,20	6,6
5	4,791	2	2,65	2,9	5,392	3,63	5,2	5,673	3,69	5,4	6,684	3,62	5,6	8,460	4,20	9,1	9,194	5,26	13,8	8,475	3,19	7,5
2	4,390	3	2,61	2,7	5,611	3,02	3,8	6,633	3,27	4,8	7,241	3,68	6,2	8,264	4,04	8,4	8,812	5,68	14,0	8,386	3,40	7,5
6	4,914	4	3,20	4,0	5,392	3,05	3,8	5,768	3,63	5,3	6,977	3,58	5,7	8,499	3,99	8,8	7,682	5,00	10,3	7,494	3,20	5,5
3	3,710	5	2,85	3,2	5,028	3,21	4,1	5,815	3,62	5,3	7,686	3,39	6,1	7,925	3,97	7,6	8,007	4,88	10,2	8,475	3,12	7,5
4	4,312	6	3,00	3,5	5,101	3,08	3,8	6,360	3,63	5,5	8,431	3,31	7,5	7,403	3,78	6,6	7,964	5,46	12,1	9,100	3,37	10,3
9	4,791	7	2,34	2,3	5,246	2,93	3,5	6,103	3,53	5,1	7,830	3,40	6,4	7,499	4,16	7,6	6,948	5,49	11,7	8,118	3,52	7,1
5	4,791	8	2,70	2,9	5,392	2,77	3,2	5,673	2,91	3,6	6,684	3,50	5,3	8,460	4,05	8,8	9,194	5,25	13,8	8,475	3,49	7,9
10	4,518	9	2,61	2,7	5,756	3,07	4,0	6,321	3,46	5,1	6,842	3,04	4,5	8,403	4,10	8,8	7,174	4,84	9,4	7,419	3,55	6,1
6	4,038	10	2,70	2,9	5,392	3,09	3,9	5,768	2,85	3,5	6,977	3,41	5,4	8,499	4,11	9,0	7,682	4,77	9,5	7,494	3,45	6,0
11	4,791	11	2,63	2,8	5,829	2,75	3,4	6,865	2,67	4,0	7,754	2,96	5,6	7,734	4,10	7,7	8,473	4,46	9,7	8,262	3,24	7,0
7	3,695	12	3,24	4,1	5,903	2,77	3,4	6,249	3,02	4,1	6,905	3,62	5,8	7,568	4,34	8,1	7,964	4,67	9,5	8,208	3,37	7,1
13	4,313	13	3,21	4,0	5,538	3,16	4,1	6,249	3,08	4,2	7,830	3,38	6,3	7,830	4,48	8,8	7,682	5,43	11,8	9,010	3,12	9,7
9	4,515	14	2,11	1,9	5,246	3,07	3,8	6,103	2,87	3,7	7,830	3,32	6,2	7,499	4,70	9,2	6,948	5,72	12,6	8,118	3,26	6,7
14	5,014	15	2,55	2,7	6,048	2,63	3,3	5,961	3,23	4,4	7,375	3,55	6,0	9,166	4,27	11,6	8,925	5,81	14,7	9,100	3,26	10,2
10	4,412	16	2,55	2,6	5,756	2,75	3,3	6,321	2,96	4,0	6,842	3,36	5,1	8,403	4,42	9,5	7,174	5,23	10,8	7,419	3,34	5,7
15	4,435	17	2,58	2,7	5,538	2,63	3,0	6,153	3,20	4,4	7,602	3,73	6,7	8,976	4,57	11,3	7,739	5,74	13,0	9,635	3,50	14,6
11	4,515	18	2,92	3,4	5,829	3,11	4,1	6,865	3,19	4,8	7,754	3,88	7,2	7,734	3,93	7,3	8,473	5,60	13,2	8,262	3,32	7,1
16	4,515	19	3,29	4,2	5,392	3,02	3,7	5,961	2,82	3,5	6,994	3,58	5,7	7,689	4,01	7,4	8,078	5,24	11,4	8,475	2,92	7,3
17	4,412	20	2,75	3,0	5,173	2,48	2,6	5,673	2,66	3,1	6,977	3,10	4,8	7,637	4,81	9,6	8,473	4,94	11,0	8,029	3,65	7,1
14	5,014	21	3,02	3,7	6,048	2,28	2,8	5,961	2,83	3,6	7,375	3,59	6,1	9,166	4,50	12,0	8,925	5,47	13,6	9,100	3,66	10,5
18	4,515	22	3,52	4,8	6,048	2,32	2,8	6,056	3,20	4,4	7,196	3,66	6,1	7,124	4,28	7,6	8,360	5,32	12,0	8,296	3,64	7,7
15	4,435	23	3,55	4,9	5,538	2,15	2,3	6,153	3,02	4,0	7,602	3,57	6,3	8,976	4,25	10,7	7,739	5,78	13,2	9,635	3,76	14,6
19	4,112	24	3,21	4,0	5,028	2,44	2,5	5,480	3,03	3,8	6,614	3,55	5,4	7,555	4,09	7,5	8,000	5,80	13,4	7,762	3,51	6,4
Média	4,464	—	2,86	3,3	5,505	2,86	3,5	6,071	3,18	4,4	7,302	3,47	5,9	8,104	4,23	8,8	8,092	5,28	11,9	8,369	3,38	8,1
Desvio padrão	0,4	—	0,4	0,8	0,3	0,4	0,6	0,4	0,4	0,8	0,5	0,2	0,7	0,6	0,3	1,4	0,7	0,4	1,6	0,6	0,2	2,4

G – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS PARTÍCULAS DA INTERFACE DO GEOTÊXTIL, IMPREGNADAS E PASSANTES NOS ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DO MATERIAL PASSANTE ATRAVÉS DO GEOTÊXTIL

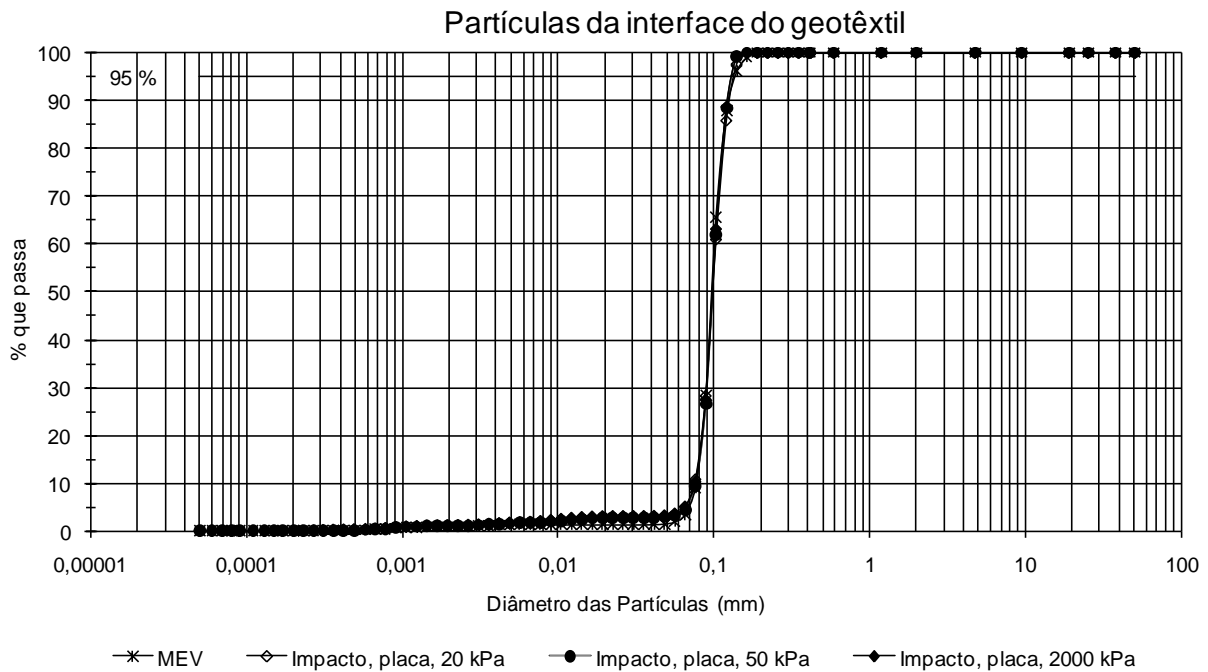


Figura G.1 – Curva granulométrica das partículas da interface do geotêxtil nos ensaios com impacto, empregando a placa perfurada.

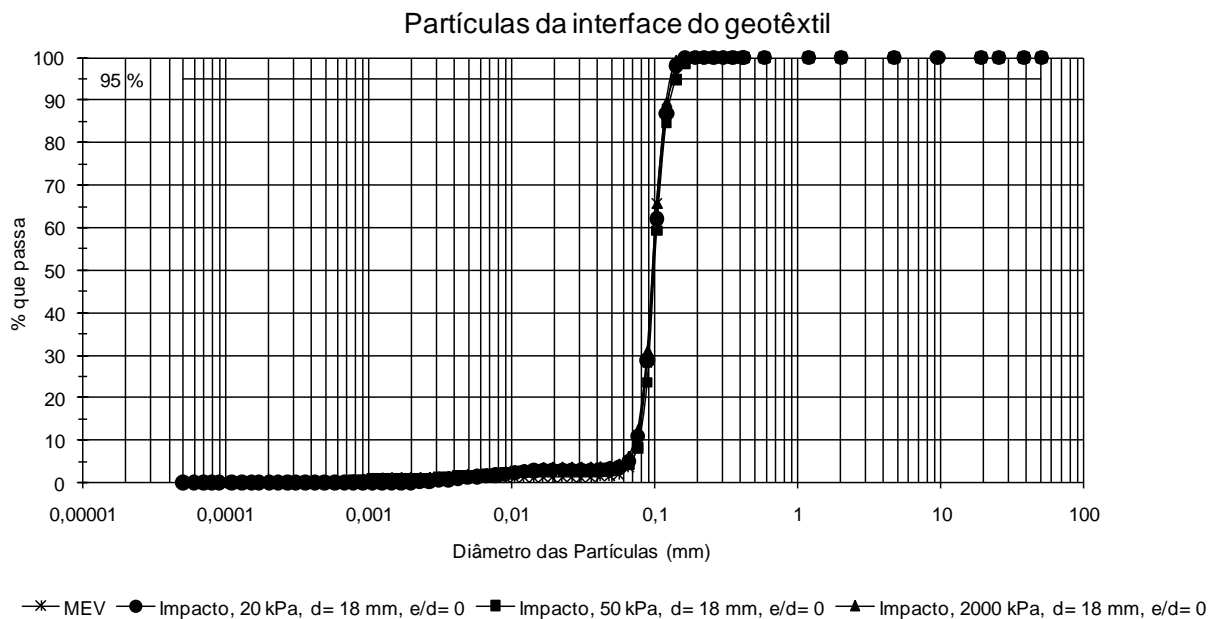


Figura G.2 – Curva granulométrica das partículas da interface do geotêxtil nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, e/d= 0.

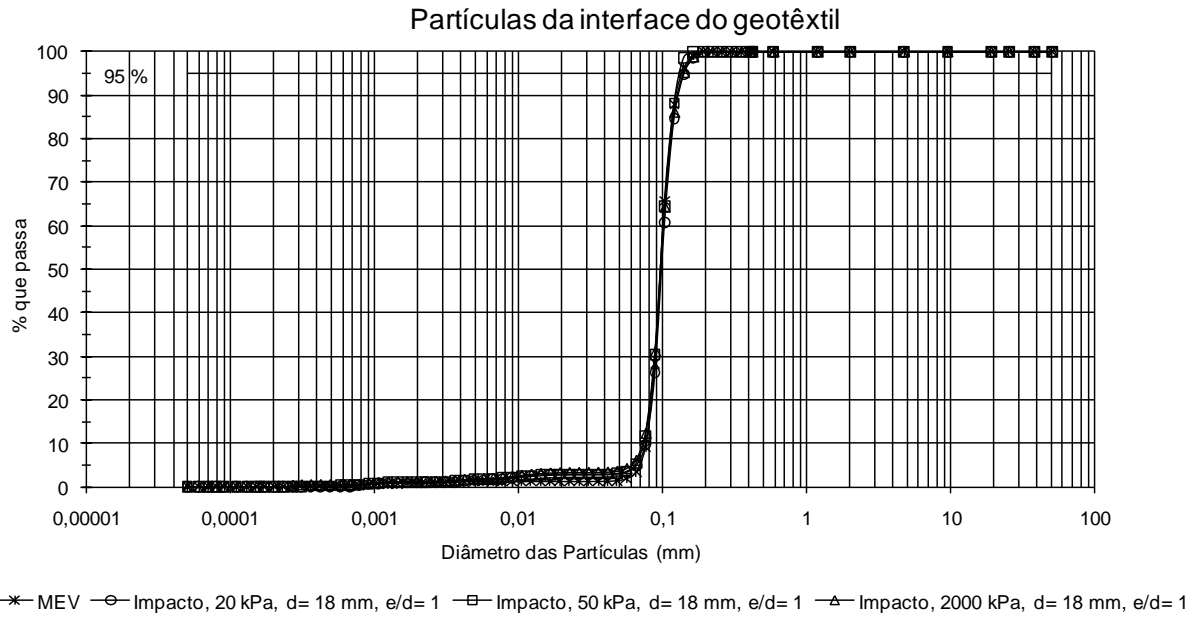


Figura G.3 – Curva granulométrica das partículas da interface do geotêxtil nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d=1$.

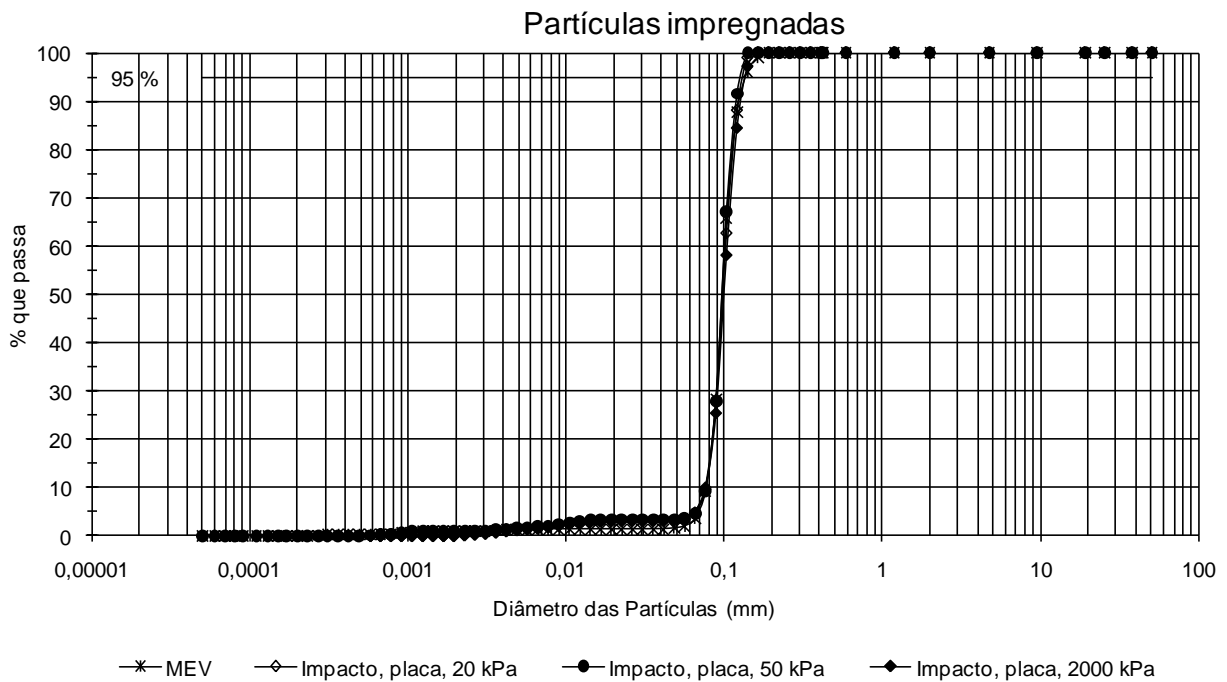


Figura G.4 – Curva granulométrica das partículas impregnadas nos ensaios com impacto, empregando a placa perfurada.

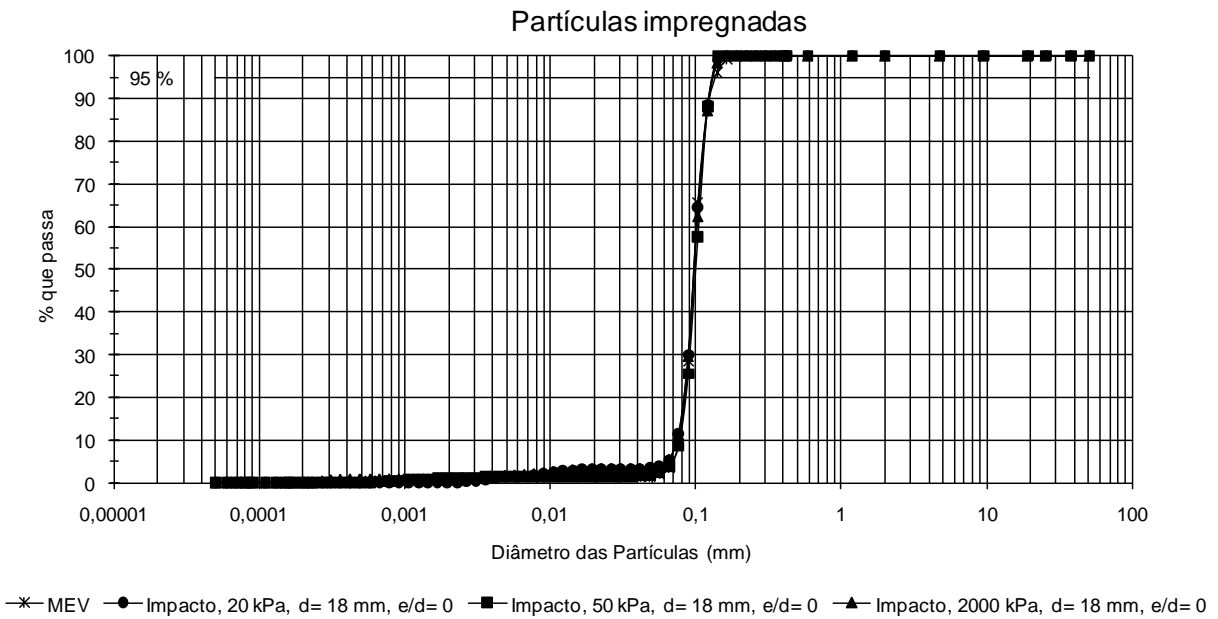


Figura G.5 – Curva granulométrica das partículas impregnadas nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 0$.

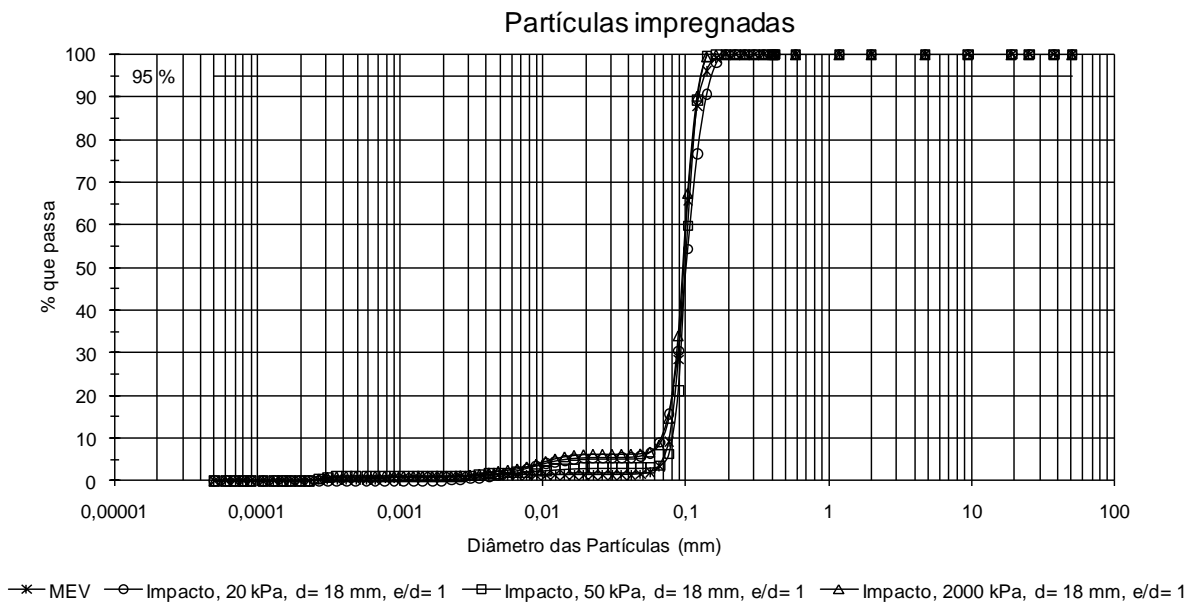


Figura G.6 – Curva granulométrica das partículas impregnadas do geotêxtil nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 1$.

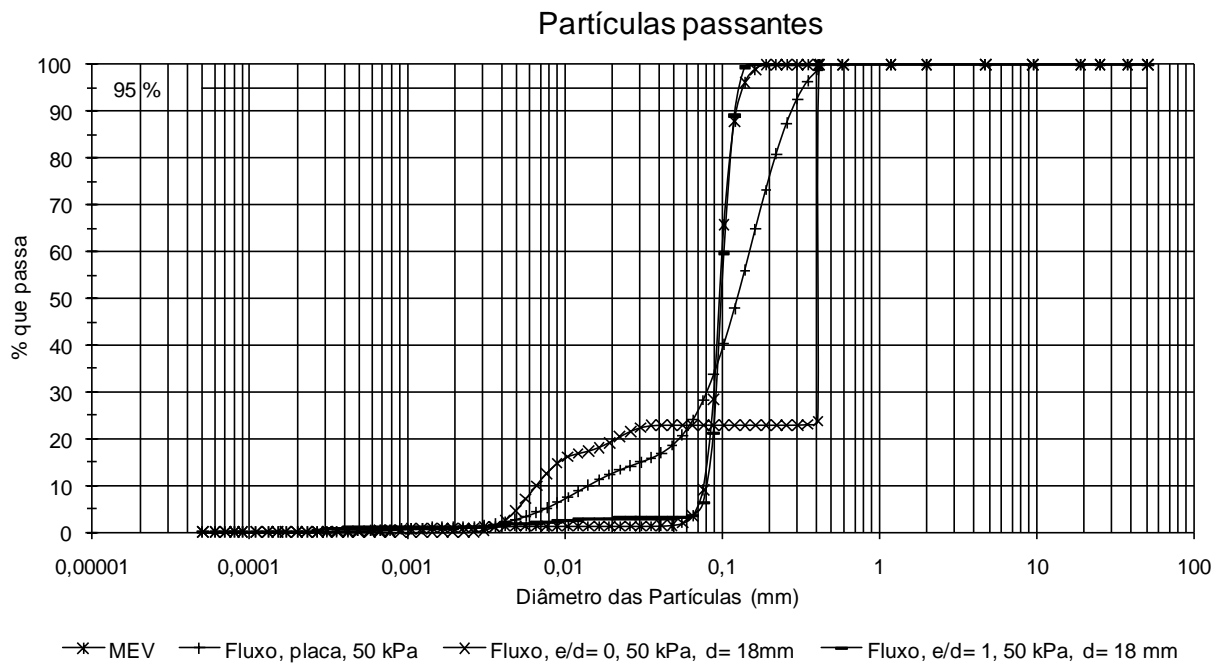


Figura G.7 – Curva granulométrica das partículas passantes nos ensaios com fluxo.

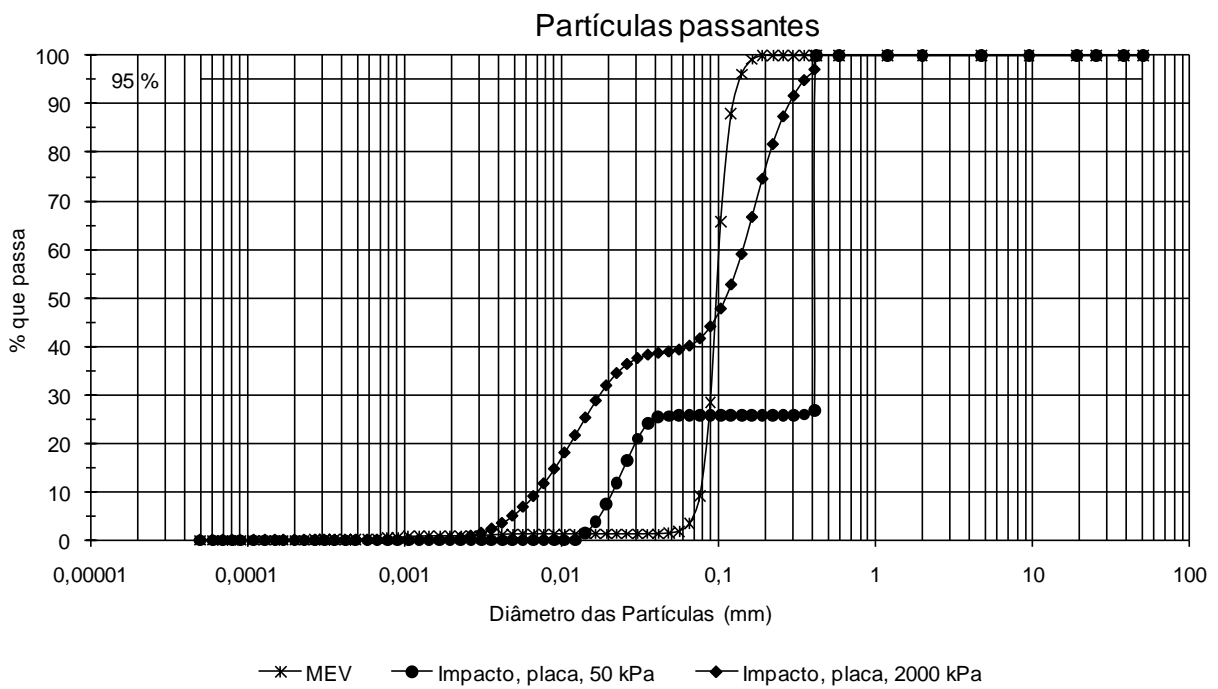


Figura G.8 – Curva granulométrica das partículas passantes nos ensaios com impacto, empregando a placa perfurada.

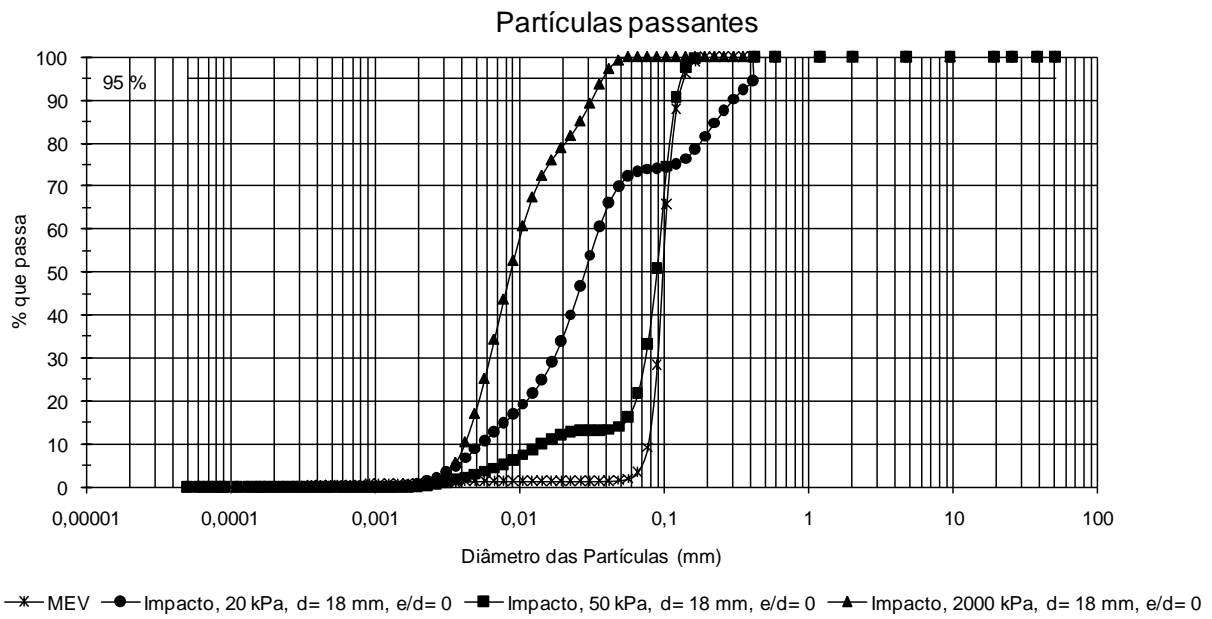


Figura G.9 – Curva granulométrica das partículas passantes nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 0$.

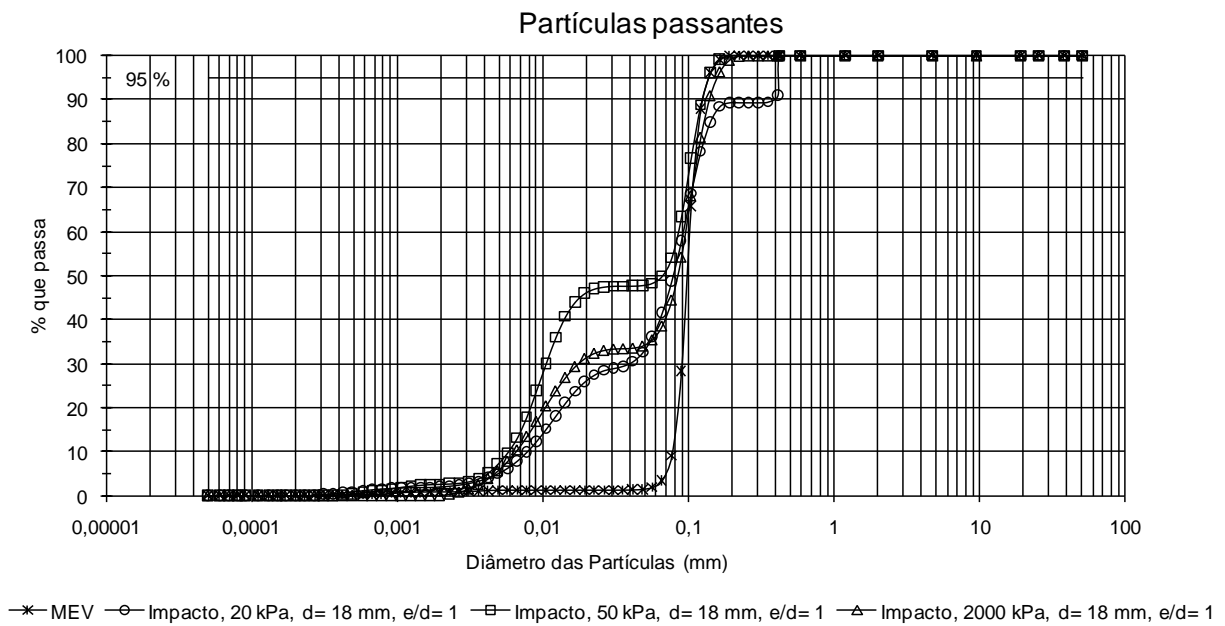


Figura G.10 – Curva granulométrica das partículas passantes nos ensaios com impacto, empregando esferas de aço, $e/d= 1$.