

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

**ANÁLISE DE DANOS EM GEOMEMBRANAS POR
MEIO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO EM DIFERENTES
ESCALAS**

CAROLINA RUIZ GÓMEZ

ORIENTADOR: GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, DSc
CO-ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-246/2014

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2014

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

**ANÁLISE DE DANOS EM GEOMEMBRANAS POR
MEIO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO EM
DIFERENTES ESCALAS**

CAROLINA RUIZ GÓMEZ

**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 / DOUTOR.**

APROVADA POR:

**GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, D.Sc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

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

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ORENCIO MONJE VILAR, D.Sc. (USPSC)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 de DEZEMBRO de 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

RUIZ-GÓMEZ, CAROLINA

Análise de Danos em Geomembranas por meio de Ensaio de Laboratório em Diferentes Escalas [Distrito Federal] 2014

xx, 151 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2014)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Geomembranas

2. Dano Mecânico por Compressão

3. Ensaio de Média Escala

4. Geossintéticos

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RUIZ-GÓMEZ, C. (2014). Análise de Danos em Geomembranas por meio de Ensaio de Laboratório em Diferentes Escalas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-246/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Carolina Ruiz Gómez

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise de Danos em Geomembranas por meio de Ensaio de Laboratório em Diferentes Escalas.

GRAU / ANO: Mestre / 2014

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.

Carolina Ruiz Gómez

karola154@gmail.com

Carrera 34A #43-16 Interior 101

Medellín – Colombia.

A mi familia, mis padres María y Ricardo, mis hermanos Beatriz y Adrian, son mi fuerza e inspiración para seguir adelante. Gracias por su apoyo incondicional a pesar de las adversidades y por motivarme a seguir mis sueños, gracias por siempre creer en mí.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar a força para continuar neste caminho e me ajudar a vencer os obstáculos encontrados ao longo dele.

Ao professor Gregório Luís Silva Araújo, meu orientador, por confiar em mim, por sua vontade de me orientar, pelo acompanhamento constante ao longo desta pesquisa, pela paciência e disposição para resolver as inúmeras dúvidas;

Ao professor, Ennio Marques Palmeira, pela ajuda na realização deste trabalho. Tenho muito respeito e muita admiração pelo senhor;

A minha família. Vocês são meu motor, a minha força para continuar a cada dia. Especialmente à minha mãe Maria e meu pai Ricardo, que nesses dois anos sempre me apoiaram e não me deixaram desfalecer. Para vocês todo meu respeito e admiração. Aos meus irmãos Beatriz e Adrian, por seu carinho e seu apoio, os dois anos que ficamos distantes, não impediram que fôssemos os mesmos parceiros de sempre. Obrigada pelas mensagens, ligações e todas as amostras de seu amor;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, pelos conhecimentos fornecidos para minha formação profissional, especialmente ao professor Hernán Martinez;

Ao Senhor Arthur do Laboratório de Engenharia Mecânica, pela disposição e ajuda na elaboração de algumas peças para a dissertação;

Aos técnicos do laboratório de Geotecnia Thiago, Simon e Jonas, pela colaboração durante os ensaios, especialmente quando precisava de maior força física;

A minhas queridas amigas Maria Paz Duque, Rosa Dueñas e Estefanía Muñoz. Vocês foram minha família no Brasil, obrigada por me tornarem mais alegre minha permanência aqui, por ter-me ensinado muitas coisas e pela sua amizade. Agradeço muito o apoio ao longo da minha dissertação;

Aos meus amigos na Colômbia, Camila Carvajal, Julio Cesar Ortiz, Felipe Angel, Claudia Obando, Daniela Pareja e Cristina Ramirez, por terem me apoiado ao longo destes dois anos, pelo carinho e estarem sempre comigo sem importar a distância;

A meus amigos de Pasto David Bernal, Walter Rojas, Juan Bastidas, pessoas de grande apoio e com quem compartilhei grande parte do meu tempo neste ciclo. Obrigada pelo carinho, risadas e demais momentos experimentados;

Aos meus amigos e companheiros de laboratório Claudia Gomez, Jaime Obando, Ivonne Alejandra, Leonardo Ramos, Lucia Davila, Maria Paula, David Bernal, Ewerton Fonseca, Daniel Arthur, Janaina Tatto e Oisy Menendez, com quem tive a oportunidade de compartilhar experiências, sucessos e fracassos durante a realização de nossos ensaios. Obrigada pelas risadas no laboratório e pela sua constante ajuda;

Aos meus amigos Julian Buritica e Eduardo Montoya, por me receberem na minha chegada ao Brasil, e pelo seu apoio no começo desta experiência. A Maria Paula Susunaga e Juan David Del Río, por terem me acolhido no final do caminho e me fazer sentir em casa;

Aos meus amigos e companheiros os quais tive a oportunidade de conhecer ao longo destes dois anos: Helard Becerra, Armando Jaleo, Toni Tubio, Gabriel Jaime Zapata, Robinson Zuluaga, Jorge de la Rosa, Johana Pabon, Carolina Lopez, Daniel Calvo, Daniel Henao, Camilla Borges, Marlon José de Lima, Elizabeth Agudelo, Elizabeth Hernández, Raydel Lorenzo, Carlos Moreno, Jean Noël Coly, Liliana Gonzalez e as outras pessoas que de uma ou outra maneira contribuíram em minha formação acadêmica e pessoal;

Aos meus colegas de turma por todos aqueles momentos inesquecíveis juntos;

À Soraya Salatiel por ceder o agregado gráudo e me disponibilizar a distribuição granulométrica do material.

À Sansuy, Vulcan e Nortene pelo fornecimento das geomembranas sem custo algum.

À universidade de Brasília (UnB) e ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia pelo acolhimento e de ter virado a minha segunda casa ao longo destes dois anos, nas suas salas como nos seus laboratórios;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio Financeiro.

RESUMO

Considerando o aumento da demanda por minérios devido ao crescimento econômico de alguns países nos últimos anos, houve também a necessidade de maiores áreas para a disposição dos resíduos advindos de sua extração. Nesse contexto, as barragens de contenção de rejeitos vêm se tornando uma obra de engenharia geotécnica cada vez mais empregada como sistema de disposição destes resíduos. Devido às características dessas barragens, é necessária a construção de camadas de drenagem e/ou impermeabilizantes, visando trabalhar como barreiras contra o fluxo de gases e líquidos. A grande altura atingida muitas vezes por essas obras gera elevados valores de pressão em sua base podendo vir a danificar a geomembrana, afetando sua função impermeabilizante. O presente trabalho tem por objetivo estudar o dano mecânico devido à aplicação de pressão em um sistema constituído de material granular/geomembrana, por meio de ensaios de laboratório de compressão. Para tanto, foram empregados dois equipamentos (de pequena e média escala) que permitiram a realização de ensaios em geomembranas de PVC e PEAD de 1,0 mm e 2,0 mm de espessura. As pressões aplicadas foram 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 500 kPa e 1000 kPa. Nos ensaios, foram utilizados diferentes tipos de materiais granulares subjacentes ou subjacentes, como rejeito de ouro e rejeito de ferro, areia média ou brita três. Um filme ou papel alumínio foi colocado entre a geomembrana e a camada superior ou inferior, com o fim de avaliar os pontos de contato do material granular na geomembrana e, de estabelecer uma relação com o dano mecânico causado nela. Ao final foram realizados ensaios de resistência à tração após os ensaios de dano, visando obter a variação na resistência das geomembranas danificadas. Os resultados mostraram que os principais danos presenciados na geomembrana de PEAD foram arranhões, entalhes e indentações, enquanto que as geomembranas de PVC apresentaram principalmente deformações. Na distribuição de frequências das áreas de contato, as maiores frequências de áreas foram para os intervalos menores. Além disso, foi observado que o comportamento das distribuições segue uma curva exponencial para quase todas as configurações de ensaios. Os resultados demonstraram que estes ensaios de dano mecânico têm a contribuir na investigação dos mecanismos de deterioração de geossintéticos em obras de disposição de resíduos. Observou-se que os tamanhos e arranjos dos grãos, a pressão vertical aplicada, o tipo e espessura das geomembranas afetam de forma significativa os pontos de contato que atuam sobre a geomembrana.

ABSTRACT

Considering the increasing demand for minerals due to the economic growth in some countries in recent years, larger areas for the waste tailings disposal are needed. In this context, tailing dams has become increasingly used of geotechnical engineering as disposal of this waste system. Due to the nature of the materials of this kind of construction, the construction of the drainage layers and/or waterproofing are required on the base, aiming to avoid the flow of gases and liquids. Tailings dams can reach high values of height and this can produce high values of pressure on the base, causing some damage on the geomembrane and affecting its sealing function. This research aims to study the occurrence of mechanical damage due to the application of values of pressure in a system consisting of material granular/geomembrane, through laboratory testing of mechanical compression damage. For this purpose, two equipment (small scale and medium scale), were used in order to study the mechanical damage of a set of tests using PVC and HDPE geomembranes with 1.0 mm and 2.0 mm thickness. Applied pressures were 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 500 kPa and 1000 kPa. In test were used different types of overlying or underlying granular materials, such as gold tailings or iron tailings, medium sand or gravel. A film or aluminum foil was placed between the geomembrane and the top or bottom layer, in order to evaluate the contact points of the tailings, gravel or sand in the geomembrane and to establish a relationship with the mechanical damage. Some tensile strength tests were also performed on the samples after the compression tests, in order to obtain the variation in resistance of the damaged geomembranes. The results showed that the main damage witnessed HDPE geomembrane were scratches, notches and indentations, while PVC geomembranes mainly deformations. In the frequency distribution of the contact areas, the largest areas of frequencies were for shorter intervals. Furthermore, it was observed that the behavior of the distributions follow an exponential decay to nearly all testing settings. The results showed that these mechanical damage tests contributed to the research of mechanisms of deterioration of geosynthetics in construction waste disposal. It was observed that the sizes and arrangements of the grains, the vertical pressure applied, the type and thickness of the geomembranes, significantly affect the contact points acting on the geomembrane.

SUMÁRIO

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1- MOTIVAÇÃO	1
1.2- OBJETIVOS	2
1.3- ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1- MINERAÇÃO	5
2.1.1- MINERAÇÃO DE FERRO	6
2.1.2- MINERAÇÃO DE OURO	6
2.1.3- RESÍDUOS DO PROCESSO DE MINERAÇÃO.....	7
2.1.4- BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS	9
2.2- GEOMEMBRANAS.....	14
2.2.1- GEOMEMBRANAS EM OBRAS HIDRÁULICAS E DE PROTEÇÃO AMBIENTAL.....	16
2.2.2- GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS	18
2.2.3- COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS 21	
2.3- DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS	22
2.3.1- PROTEÇÃO CONTRA DANOS EM GEOMEMBRANAS	26
2.3.2- ENSAIOS DE DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS	29
CAPITULO 3 – METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	39
3.1- EQUIPAMENTOS.....	39
3.1.1- EQUIPAMENTO DE PEQUENA ESCALA	39
3.1.2. EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA.....	43
3.1.3. OUTROS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	48
3.2- MATERIAIS UTILIZADOS	49
3.2.1- GEOMEMBRANA	49

3.2.2-	MATERIAL GRANULAR	49
3.2.3-	OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS.....	52
3.3-	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	54
3.3.1-	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE GEOMEMBRANA	54
3.3.2-	PREPARAÇÃO DA AREIA.....	54
3.3.3-	PREPARAÇÃO DO REJEITO	55
3.3.4-	PREPARAÇÃO DA BRITA	56
3.3.5-	MONTAGEM DOS ENSAIOS.....	56
3.3.6-	METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	59
3.3.7-	IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA DE DANO	62
3.3.8-	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	63
CAPITULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES.....		65
4.1-	EQUIPAMENTO DE PEQUENA ESCALA.....	65
4.1.1-	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM 24 HORAS DE DURAÇÃO.....	65
4.1.2-	FORMAS DE CONTATO DOS REJEITOS NOS ENSAIOS REALIZADOS .	68
4.1.3-	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE FERRO	71
4.1.4-	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE OURO.....	80
4.1.5-	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL APÓS OS ENSAIOS	85
4.1.6-	COMPARAÇÃO ENTRE OS NÚMEROS DE CONTATO DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS	87
4.1.7-	COMPARAÇÃO ENTRE AS RAZÕES DE ÁREAS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS	89
4.1.8-	COMPARAÇÃO ENTRE AS ÁREAS DE CONTATO MÉDIAS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS	90
4.1.9-	COMPARAÇÃO DA CARGA MÉDIA DE CONTATO DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS	91
4.2-	EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA	93
4.2.1-	RESULTADOS DO ENSAIO COM 24 HORAS DE DURAÇÃO.....	93
4.2.2-	FORMAS DE CONTATO DA BRITA E DA AREIA NOS ENSAIOS REALIZADOS	94
4.2.3-	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM BRITA.....	95

4.2.4- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AREIA	102
4.2.5- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL APÓS OS ENSAIOS	103
4.2.6- COMPARAÇÃO ENTRE OS NÚMEROS DE CONTATO DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS	103
4.2.7- COMPARAÇÃO ENTRE AS RAZÕES DE ÁREAS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS	105
4.2.8- COMPARAÇÃO ENTRE AS ÁREAS DE CONTATO MÉDIAS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS	106
4.2.9- COMPARAÇÃO DA CARGA MÉDIA DE CONTATO DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS	107
4.2.10- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	108
CAPITULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .	124
5.1- CONCLUSÕES	124
5.2- SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
APÊNDICES	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema geral do processo de formação dos rejeitos (Pereira, 2005).....	8
Figura 2.2 - Métodos construtivos de barragens de rejeito (Ribeiro, 2000).....	10
Figura 2.3 - Faixa de variação granulométrica típica de rejeitos granulares de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais (Pereira, 2001 <i>apud</i> Pereira, 2005). ..	12
Figura 2.4 - Curva granulométrica típica do rejeito da Mina do Morro do Ouro (Amorim, 2007).....	12
Figura 2.5 - Configurações típicas de barreiras impermeáveis (Koerner, 1998 <i>apud</i> Rebelo, 2009).	20
Figura 2.6 - Comportamento tensão-deformação de diferentes geomembranas (Modificado - Rigo & Cazzuffi, 1991).....	22
Figura 2.7 - Danos durante a fase de operação. Dados de Nosko et al. (1996).....	23
Figura 2.8 - Danos mecânicos em geomembranas com proteção de geotêxtil (Tognon <i>et al.</i> , 2000): (a) geomembrana com geotêxtil de 435 g/m ² sob carga de 250 kPa aplicada durante 200 min; (b) geomembrana com proteção de geotêxtil de 1200 g/m ² (duas camadas de 600 g/m ² cada uma) sob carga de 900 kPa aplicada durante 720 min.	28
Figura 2.9 - Equipamento para ensaio de puncionamento (Modificado - Koerner, 1988 <i>apud</i> Bidim, S/D.).....	29
Figura 2.10 - Efeito da proteção do geotêxtil quanto aos esforços de puncionamento (Modificado - Koerner, 1988 <i>apud</i> Bidim, S/D.): (a) resultados com geotêxtil de 200 g/mm ² ; (b) resultados com geotêxtil de 400 g/mm ² ; (c) resultados com geotêxtil de 600 g/mm ²	29
Figura 2.11 - Fotografia da amostra de geomembrana depois de ensaiada (Brachman <i>et al.</i> , 2011): (a) superfície superior da geomembrana; (b) superfície inferior da geomembrana.....	31
Figura 2.12 - Vista da superfície da geomembrana de PEAD (1,5 mm) (Rebelo, 2009): (a) GM virgem; (b) GM sem proteção 200 kPa, 200 ciclos; (c) GM sem proteção 400 kPa, 200 ciclos; (d) GM com GTPET 600 200 kPa, 1000 ciclos.....	34
Figura 2.13 - Vista da superfície da geomembrana de PVC (1,0 mm) (Rebelo, 2009): (a) GM virgem; (b) GM sem proteção 200 kPa, 1000 ciclos; (c) GM sem proteção 400 kPa, 1000 ciclos; (d) GM com GT 300g/m ² 200 kPa, 1000 ciclos.....	35

Figura 2.14 - Danos visuais - GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção e brita 3 (Rebello, 2009): (a) arranhões; (b) furos; (c) entalhes; (d) indentação.	36
Figura 2.15 - Ruptura por rasgo em geomembrana de PVC (Geroto, 2008).....	36
Figura 2.16 - Ruptura por puncionamento em geomembrana de PEAD (Geroto, 2008).	37
Figura 2.17 - Ilustração da distribuição das tensões no contato das geomembranas com o cone (Geroto, 2008): (a) contato da GM de PVC com cone (b) contato da GM de PEAD com cone.....	38
Figura 3.1 - Equipamento de dano mecânico de pequena escala: (a) ensaio montado, (b) equipamento desmontado.	39
Figura 3.2 - Equipamento de dano mecânico de pequena escala – Dimensões em (mm) (modificado - Nascimento, 2002).	40
Figura 3.3 - Visão da prensa de ensaios: (a) prensa de ensaios, (b) macaco hidráulico.	41
Figura 3.4 - Sistema ar-água para coluna de água: (a) visão do sistema, (b) esquema do sistema (Dimensões em mm).....	42
Figura 3.5 - Instrumentação: (a) célula de carga e medidor de deslocamento linear, (b) aquisitor de dados e computador.	43
Figura 3.6 - Vista geral do equipamento de média escala.	44
Figura 3.7 - Peças da célula de ensaios montada.....	44
Figura 3.8 - Célula de ensaios: (a) membrana de borracha na tampa, (b) membrana de borracha colada na borda da caixa superior.....	45
Figura 3.9 - Visão da Célula de ensaios.	45
Figura 3.10 - Desenho esquemático da célula de ensaios – Dimensões em mm.....	46
Figura 3.11 - Sistema ar-água para coluna de água: (a) visão do sistema, (b) esquema do sistema (Dimensões em mm).....	47
Figura 3.12 - Manômetros: (a) manômetro ligado ao compresso e à tampa, (b) manômetro da tampa. (c) manômetro para coluna de água.	48
Figura 3.13 - Outros equipamentos utilizados: microscópio.....	49
Figura 3.14 - Material granular: (a) rejeito de ouro (b) rejeito de ferro, (c) areia médio-grossa, (d) brita 3.	50
Figura 3.15 - Curvas granulométricas dos materiais granulares.	51
Figura 3.16 – Forma dos grãos do material granular: (a) rejeito de ouro, (b) rejeito de ferro, (c) areia médio-grossa.....	52

Figura 3.17 - Outros materiais utilizados: (a) filme indicador de pressão, (b)folha de alumínio, (c) borracha natural e (d) cola vedante.....	53
Figura 3.18 - Arranjo da areia dentro do cilindro inferior.....	55
Figura 3.19 - Areia saturada dentro da caixa superior do equipamento de média escala.	55
Figura 3.20 – Preparação do rejeito de ouro.....	56
Figura 3.21 - Montagem do ensaio de média escala: (a) vaselina e filme plástico, (b) arranjo da brita 3, (c) colocação do filme de pressão, (d) colocação da geomembrana, (e) colocação da caixa superior, (f) colocação do segundo filme de pressão, (g) arranjo da areia saturada, (h) colocação da tampa.....	57
Figura 3.22 – Montagem do ensaio de pequena escala: (a) arranjo da areia, (b) saturação do rejeito, (c) colocação do filme de alumínio, (d) colocação da placa rígida e da esfera, (e) colocação do cilindro superior, (f) colocação do equipamento na prensa de ensaios.	58
Figura 3.23 - Procedimento seguido na pesquisa.	59
Figura 3.24 - Medição das áreas de contato no programa AutoCad 2010 ®.	63
Figura 3.25 – Vista da prensa de Tração.	64
Figura 3.26 – Sequência de um ensaio de tração em Geomembrana virgem PEAD 1,0 mm direção CD: (a) antes do ensaios, (b) começo do ensaio, (c) durante a metade do ensaio, (d) final do ensaio.....	64
Figura 4.1 - Tempo <i>versus</i> Pressão vertical para o ensaio com a configuração F-PEAD-2 submetido a 1000 kPa de pressão, com duração de 24 horas.	66
Figura 4.2 - Tempo <i>versus</i> Pressão vertical para o ensaio com a configuração O-PEAD-1 submetido a 200 kPa de pressão, com duração de 24 horas.	66
Figura 4.3 - Tempo <i>versus</i> Pressão vertical para o ensaio com a configuração F-PEAD-2 submetido a 1000 kPa de pressão para o ensaio com duas horas de duração.....	67
Figura 4.4 - Tempo vs Pressão vertical para o ensaio com a configuração O-PEAD-1 submetido a 200 kPa de pressão para o ensaio com duas horas de duração.....	67
Figura 4.5 - Tempo <i>versus</i> Deslocamento para o ensaio com a configuração F-PEAD-2 submetido a 1000 kPa de pressão vertical, com duração de 24 horas.	68
Figura 4.6 - Tempo <i>versus</i> Deslocamento para o ensaio com a configuração O-PEAD-1 submetido a 200 kPa de pressão vertical, com duração de 24 horas.	68
Figura 4.7 - Contatos do rejeito de ferro atuando sobre a geomembrana, quando submetida a 1000 kPa de pressão vertical: (a) geomembrana de PVC-1,0 mm de	

espessura, (b) geomembrana de PVC-2,0 mm de espessura, (c) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura, (d) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura, (d) geomembrana de PEAD-2,0 mm de espessura.....	69
Figura 4.8 - Contatos do rejeito de ouro atuando sobre a geomembrana, quando submetida a 1000 kPa de pressão vertical: (a) geomembrana de PVC-1,0 mm de espessura, (b) geomembrana de PVC-2,0 mm de espessura, (c) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura, (d) geomembrana de PEAD-2,0 mm de espessura.....	70
Figura 4.9 – Marcas nos papel alumínio com geomembrana de PVC 1,0 mm: (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 300 kPa, (d) 500 kPa e (e) 1000 kPa.	73
Figura 4.10 - Marcas nos papel alumínio com geomembrana de PVC 2,0 mm (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 300 kPa, (d) 500 kPa e (e) 1000 kPa.	74
Figura 4.11 - Marcas nos papel alumínio com geomembrana de PEAD 1,0 mm (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 300 kPa, (d) 500 kPa e (e) 1000 kPa.	75
Figura 4.12 - Marcas nos papel alumínio com geomembrana de PEAD 2,0 mm (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 300 kPa, (d) 500 kPa e (e) 1000 kPa.	76
Figura 4.13 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100kPa.	77
Figura 4.14 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200kPa.	77
Figura 4.15 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300kPa.	78
Figura 4.16 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500kPa.	79
Figura 4.17 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000kPa.	80
Figura 4.18 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100kPa.	81
Figura 4.19 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200kPa.	82
Figura 4.20 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300kPa.	83
Figura 4.21 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500kPa.	83
Figura 4.22 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000kPa.	84
Figura 4.23 - Curva granulométrica do rejeito de ferro antes e após dos ensaios de dano mecânico.....	85
Figura 4.24 - Curva granulométrica do rejeito de ouro antes e após dos ensaios de dano mecânico.....	86
Figura 4.25 – Quantificação do número de impressões na geomembrana sob a aplicação de pressão vertical.	88
Figura 4.26 – Razão de área vs. Pressão para cada um dos ensaios realizados.....	90

Figura 4.27 - Área média de contato <i>versus</i> pressão vertical.	91
Figura 4.28 - Carga média de contato <i>versus</i> pressão vertical.	92
Figura 4.29 - Tempo <i>versus</i> Altura da coluna de água no sistema ar-água para o ensaio B-PVC-1 submetido a 100 kPa de pressão durante 24 horas.	93
Figura 4.30 - Contatos da brita atuando sobre a geomembrana, quando submetida a 500 kPa de pressão: (a) geomembrana de PVC-1,0 mm de espessura, (b) geomembrana de PVC-2,0 mm de espessura, (c) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura, (d) geomembrana de PEAD-2,0 mm de espessura.....	95
Figura 4.31 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100kPa.	97
Figura 4.32 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200kPa.	97
Figura 4.33 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300kPa.	98
Figura 4.34 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500kPa.	99
Figura 4.35 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100kPa.	100
Figura 4.36 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200kPa.	100
Figura 4.37 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300kPa.	101
Figura 4.38 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500kPa.	102
Figura 4.39 - Curva granulométrica da brita 3 antes e após dos ensaios de dano mecânico.....	103
Figura 4.40 – Quantificação do número de impressões na geomembrana sob a aplicação de pressão.	104
Figura 4.41 – Razão de área <i>versus</i> Pressão para cada um dos ensaios realizados.	105
Figura 4.42 - Área média de contato <i>versus</i> pressão normal.....	106
Figura 4.43 - Carga média de contato <i>versus</i> pressão vertical.	107
Figura 4.44 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PVC de 1,0 mm - Direção MD.....	110
Figura 4.45 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PVC de 1,0 mm - Direção CD.....	110
Figura 4.46 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1,0 mm – Antes e após dano mecânico.	111
Figura 4.47 - Desvio padrão dos dados.	111

Figura 4.48 - Variação percentual da resistência à tração das geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.....	111
Figura 4.49 - Variação percentual do alongamento na ruptura das geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.	112
Figura 4.50 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PVC de 2,0 mm - Direção MD.....	113
Figura 4.51 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PVC de 2,0 mm - Direção CD.....	114
Figura 4.52 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 2,0 mm – Antes e após dano mecânico.	114
Figura 4.53 - Desvio padrão dos dados.	115
Figura 4.54 - Variação percentual da resistência à tração das geomembranas de PVC de 2,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.....	115
Figura 4.55 - Variação percentual do alongamento na ruptura das geomembranas de PVC de 2,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.	116
Figura 4.56 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 1,0 mm - Direção MD.	118
Figura 4.57 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 1,0 mm - Direção CD.	118
Figura 4.58 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembranas de PEAD de 1,0 mm – Antes e após dano mecânico.	119
Figura 4.59 - Desvio padrão dos dados.	119
Figura 4.60 - Variação percentual da resistência à tração das geomembranas de PEAD de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.....	119
Figura 4.61 - Variação percentual do alongamento na ruptura das geomembranas de PEAD de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.	120
Figura 4.62 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 2,0 mm - Direção MD.	122
Figura 4.63 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 2,0 mm - Direção CD.	122
Figura 4.64 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 2,0 mm – Antes e após dano mecânico.	122
Figura 4.65 - Desvio padrão dos dados.	123

Figura 4.66 - Variação percentual da resistência à tração das geomembranas de PEAD de 2,0 mm danificadas em relação às amostras intactas..... 123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Variação dos valores de D_r de rejeitos de ferro (Albuquerque Filho, 2004).	14
Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens do uso de geomembranas de PEAD e de PVC (modificado – Bueno <i>et al.</i> , 2004).....	16
Tabela 2.3 - Causa do dano <i>versus</i> tamanho do dano (Dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000).....	24
Tabela 2.4 - Localização do dano (Dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000).	25
Tabela 2.5 - Causa do dano <i>versus</i> a localização: (a) Piso plano, (b) Cantos, bordas, etc., (c) Sob tubulações de drenagem, (d) Penetração de tubulações, (e) Outros (rodovias de acesso, estruturas de concreto, etc.) (Nosko & Touze-Foltz, 2000).....	25
Tabela 3.1 - Especificações técnicas das geomembranas utilizadas (Dados do fabricante).....	49
Tabela 3.2 – Características da Brita 3 utilizada.	51
Tabela 3.3 – Características dos materiais granulares utilizados.	52
Tabela 3.4 - Identificação dos ensaios realizados no equipamento escala média.	61
Tabela 3.5 – Identificação dos ensaios – Equipamento pequena escala.....	62
Tabela 4.1 – Características dos rejeitos utilizados antes e depois dos ensaios de dano.	86
Tabela 4.2 - Número de pontos em contato com a geomembrana.	88
Tabela 4.3 – Resultados da razão de área para cada uma das configurações dos ensaios.	90
Tabela 4.4 - Número de pontos em contato com a geomembrana.	104
Tabela 4.5 – Resultados da razão de área para cada uma das configurações dos ensaios.	106
Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de tração em geomembrana de PVC de 1,0 mm espessura.....	109
Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de tração em geomembrana de PVC de 2,0 mm espessura.....	113
Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de tração em geomembrana de PEAD de 1,0 mm espessura.....	117
Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de tração em geomembrana de PEAD de 2,0 mm espessura.....	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AAHSTO	American Association of State Highway and Transportation Officials;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ASTM	American Society for Testing and Materials;
B	Brita;
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung Undprüfung;
Cc	Coeficiente de curvatura;
CD	Ensaio na direção transversal ao sentido de fabricação;
CR	Compacidade relativa;
Cu	Coeficiente de Uniformidade;
Dn	n% das partículas do solo possuem diâmetro D inferiores a ele;
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral;
DR	Densidade relativa;
e	Índice de vazios do material;
emax	Índice de vazios máximo no estado mais fofo;
emin	Índice de vazios mínimo possível, no estado mais compacto;
F	Ferro;
FST	Stress cracking;
GB	Geocomposto Bentonítico;
GBRs	Barreiras Geossintéticas;
GM	Geomembrana;
GCLs	Geocompostos argilosos;
Gs	Densidade real dos grãos;
GTs	Geotêxtis;
H	Altura do sistema ar água;
ICOLD	International Commission on Large Dams
Id	Índice de densidade;
MD	Ensaio na direção de fabricação;
NBR	Norma Brasileira;
PE	Polietileno clorado;
PEAD	Polietileno de Alta Densidade;
PEADML	Polietileno de Densidade Média Linear;
PECS	Polietileno Clorosulfonado;
PVC	Polivinil Clorado;
PP	Polipropileno;
SCDF	Sistemas de Captação e Desvio de Fluxo;
α	Carga máxima;
ε	Deformação;
γ	Massa unitária;
γ_d	Peso específico seco dos grãos;
ρ_s	Massa específica dos grãos.

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1- MOTIVAÇÃO

A mineração é uma atividade de grande importância econômica, sendo para alguns países uma das atividades que mais influenciam o desenvolvimento econômico. No entanto, das atividades de mineração não só se obtém o minério desejado, mas também uma grande quantidade de rejeitos que não proporcionam nenhum tipo de lucro. Estes materiais gerados no processo das atividades de mineração provocam um grande problema ambiental, referente à obtenção e consequente disposição, do qual cresce a necessidade de garantir uma eficiente e adequada disposição para esses materiais.

Segundo Espósito (2000) os rejeitos são resíduos resultantes de processos de beneficiamento a que são submetidos os minérios, visando extrair os elementos de interesse econômico (produto final). Dentro deste contexto, e considerando o aumento da demanda por minérios, devido ao crescimento de alguns países nos últimos anos, houve também a necessidade de maiores áreas para a disposição dos resíduos provenientes da extração. Deste modo, tem-se que as barragens de contenção de rejeito são as preferidas como sistema de disposição, sua construção vem se tornando uma obra de engenharia geotécnica cada vez mais empregada.

É importante destacar que na base de algumas dessas obras, é necessária a construção de camadas de drenagem e/ou impermeabilizantes, visando trabalhar como barreiras contra o fluxo de gases e líquidos em obras hidráulicas e em obras de proteção ambiental, isso com o propósito de proteger os solos e corpos d'água subterrâneos. Por outro lado, algumas vezes as exigências de qualidade, segurança e vida útil da engenharia moderna têm limitado a utilização de materiais naturais. Estas razões, associadas aos aspectos ambientais, melhoria da qualidade e redução dos custos, vêm provocando um grande aumento na utilização de materiais sintéticos. Um dos materiais sintéticos mais utilizados nas barragens de contenção de rejeitos, com o objetivo de controlar a percolação e o fluxo de líquidos e gases são as geomembranas, que têm como característica primordial gerar uma camada de baixíssima permeabilidade (Nascimento,

2002).

As geomembranas são fáceis de instalar e economizam tempo na construção, e seu uso como sistema impermeabilizante é altamente confiável. Não obstante, algumas vezes é necessária a instalação de um sistema de coleta de material que pode atravessar a camada impermeabilizante. Esse material pode gerar perfurações ou deformações indesejáveis na geomembrana durante a fase de instalação ou de operação do aterro e assim comprometer seu comportamento. É por isso que, para o bom funcionamento do sistema de impermeabilização, deve-se evitar ou minimizar os danos mecânicos e a deterioração dos geossintéticos utilizados nas obras.

Tendo em vista a grande altura atingida muitas vezes nas barragens de contenção de rejeitos, a geração de elevados valores da pressão aplicados em sua base, pode levar a danos na geomembrana empregada na impermeabilização devido às camadas granulares adjacentes. A avaliação do dano mecânico em geossintéticos em obras de disposição de resíduos é um tópico importante de pesquisa para encontrar a correta utilização destes materiais.

Diante o grande problema ambiental gerado pelos rejeitos advindos das atividades de mineração, e perante a necessidade de disposição adequada destes, os quais podem vir a contaminar o solo ou as águas subterrâneas, devido danos prováveis de ocorrer como perfurações ou furos nos sistemas de barreiras; a motivação desta pesquisa foi estudar os danos mecânicos gerados pelo rejeito nos sistemas impermeabilizantes, arranjados em obras de disposição de rejeito.

O dano na geomembrana foi avaliado por meio de dois equipamentos de laboratório, visando contribuir a o entendimento da influência do tamanho, forma e arranjo dos grãos do material granular no dano na geomembrana, quando atingindo altas pressões.

1.2- OBJETIVOS

Esta pesquisa teve como objetivo geral estudar os danos devidos à aplicação de valores elevados de pressão em um sistema constituído de material granular/geomembrana.

Estudaram-se diferentes tipos de materiais granulares, geomembranas e níveis de pressão, por meio de ensaios de dano mecânico por compressão.

Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- Efetuar ensaios de dano mecânico por compressão em geomembranas de PEAD e PVC, fazendo variações nos tipos de materiais granulares empregados, como rejeito e solos granulares;
- Realizar a análise das impressões de contatos solo-geomembrana, mediante a percentagem de área de contato entre os dois materiais, com respeito à área total da geomembrana;
- Fazer comparações entre os resultados dos mecanismos de danos para os diferentes tipos de geomembranas estudadas;
- Verificar a estanqueidade da geomembrana durante o ensaio com a injeção de líquido sob pressão.
- Executar ensaios de resistência à tração nas geomembranas, após a sua submissão a ensaios de dano mecânico.

1.3- ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em cinco capítulos. Uma breve descrição dos conteúdos apresentados em cada capítulo é feita a seguir.

No Capítulo 1 apresenta-se a motivação da pesquisa, os objetivos, e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, a qual inclui: os fundamentos teóricos e alguns trabalhos relacionados ao tema da dissertação, os quais serviram de embasamento para o melhor direcionamento da pesquisa.

No Capítulo 3 são descritos os equipamentos usados para a realização dos ensaios de dano mecânico em geomembranas, os materiais utilizados, a preparação das amostras, a montagem dos ensaios de dano mecânico e, por último, os ensaios de resistência à tração, além de explicar como foram feitas as análises das impressões na geomembrana.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa, bem como as análises realizadas dos valores obtidos.

Por fim, no Capítulo 5 são expostas as principais conclusões do presente trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras.

Os apêndices, com dados sobre os ensaios realizados, completam o volume da dissertação.

CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- MINERAÇÃO

A mineração é um conjunto de atividades de natureza fundamentalmente econômica, caracterizada pela exploração e extração de recursos minerais úteis existentes nas rochas ou no solo, que se encontram em estado natural: sólido, líquido ou gasoso. A exploração mineral se dá, basicamente, através do processo de lavra de um bem mineral e a etapa de beneficiamento do mesmo, visando obter o mineral de interesse.

O produto final, que é a substância de interesse da mineradora, encontra-se vinculado à natureza de cada mineração, ao plano de lavra estabelecido e ao tratamento a que são submetidos os minérios. Todo processo, tanto de lavra como de beneficiamento, tem por objetivo gerar produtos que satisfaçam à qualidade exigida pelo mercado consumidor (Amorim, 2007).

Ao extrair os bens minerais da crosta terrestre, automaticamente, gera-se uma alteração bastante profunda, o que modifica a estrutura física de seu jazimento - localização. Essas alterações, advindas da atividade mineral, podem provocar maior ou menor impacto, conforme os fatores geográficos, o método de lavra utilizado e o tipo de minério extraído (DNPM, 2005). De acordo com Farias (2002), no Brasil, os principais problemas oriundos da mineração podem ser englobados em quatro categorias: poluição da água, poluição do ar, poluição sonora, e subsidência do terreno.

O Brasil tem uma posição privilegiada no ranking das reservas mundiais de minerais, chegando a ser o produtor mineral mais importante da América Latina, com uma produção mineral diversificada e sendo o maior exportador de minério de ferro e ligas de nióbio (Sandroni et al., 2010). As reservas minerais do Brasil em 2012, quando comparadas mundialmente, mostraram-se significativas, se destacando como possuidor das primeiras reserva de nióbio (98,1%) e barita (64,4%), segunda reserva dos elementos terras raras (16,2%), tântalo (37,0%) e grafita natural (36,2%), além de ter a terceira reserva mundial de estanho (14%) e níquel (9,9%) e em quarto lugar as reservas do minério de ferro (11,7%). Outras importantes reservas minerais são representadas pela magnesita, manganês, zircônio, vanádio e vermiculita (DNPM, 2013).

2.1.1- MINERAÇÃO DE FERRO

O Brasil tem várias regiões mineiras, sendo a mais importante a chamada Quadrilátero Ferrífero, localizada no Estado de Minas Gerais, no sudeste do país, com área aproximadamente de 7000 km². Esta província faz parte das descobertas mais marcantes do século XX. Pereira (2005) indica que a região é assim denominada em função de sua configuração geométrica peculiar, definida como um polígono, delimitado pelas linhas que ligam as cidades de Itabira, Rio Piracicaba, Mariana, Congonhas, Casa Branca, Piedade de Paraopeba, Serra Azul e Belo Horizonte, e cortado pelos rios das Velhas e Paraopeba. Constituindo uma das maiores províncias minerais do mundo, a região comporta enormes reservas de minérios de ferro, exploradas por grandes conglomerados industriais e inúmeras minerações de pequeno e médio porte, gerando enormes quantidades de resíduos que exigem, assim, projetos específicos para a sua disposição final. Dentro dos principais problemas ambientais causados pela mineração de ferro no estado de Minas Gerais, está: as antigas barragens de contenção e a poluição de águas superficiais.

As reservas lavráveis brasileiras de minério de ferro, com um teor médio de 50,3% de ferro, representam 11,7% das reservas mundiais. Os principais estados brasileiros detentores de reservas de minério de ferro são: Minas Gerais (70,0% das reservas e teor médio de 46,9% de Fe), Mato Grosso do Sul (15,3% e teor médio de 55,4%) e Pará (13,1% e teor médio de 64,8%). A produção brasileira de minério de ferro em 2012 representou 13,4% da produção mundial (DNPM, 2013).

2.1.2- MINERAÇÃO DE OURO

A produção de ouro no Brasil remonta ao século XVII. As principais regiões produtoras estavam localizadas nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e São Paulo. A partir dos anos 60, a atividade garimpeira migrou para a Região Amazônica que tornou-se uma grande produtora. Essa atividade deixou um grande passivo ambiental na região. Os principais impactos ambientais decorrentes dessa atividade são: utilização de mercúrio na concentração do ouro de forma inadequada; aumento da turbidez,

principalmente na região de Tapajós; rejeitos ricos em arsênio; e emissão de mercúrio na queima de amálgama (Farias, 2002).

Em 2012, as reservas brasileiras de minério de ouro representaram perto do 5% das reservas mundiais deste minério. Conforme (DNPM, 2013), o Brasil se posicionou como 12º maior produtor mundial de minério de ouro (2,5% da produção mundial). As maiores empresas no país foram: Kinross, AngloGold, Yamana, Jaguar Mining, Aipoena e Aurizona. Considerando somente a produção de ouro primário das empresas, Minas Gerais continua como destaque na produção nacional com 52,4%, seguido por Bahia (14,2%), Goiás (10,3%), Mato Grosso (9,5), Pará (7,9%) e Maranhão (4,1%).

2.1.3- RESÍDUOS DO PROCESSO DE MINERAÇÃO

O processo de extração dos recursos minerais passa por uma série de eventos, que a través das atividades de lavra e aquelas de beneficiamento dos minérios, envolve acumulação de resíduos. Nas atividades de lavra são gerados os resíduos estéreis, produtos do decape da mina, e no processo de beneficiamento do minério são produzidos os rejeitos. Na Figura 2.1 pode-se apreciar o processo de formação dos rejeitos.

Os estéreis constituem todo o material, momentaneamente sem valor econômico, extraído na operação da lavra com intuito de possibilitar o aproveitamento do minério. Este material é formado normalmente por rochas ou solos provenientes do decapeamento da jazida, sendo estocados sob forma de pilhas em talwegues e encostas nas proximidades da lavra (Presotti, 2002; Albuquerque Filho, 2004).

Os rejeitos resultantes do processo do beneficiamento dos minérios podem ser ativos (contaminados) ou inertes (não contaminados), dependendo do tipo de minério e do processo utilizado em seu beneficiamento. Do processamento do minério de ferro resulta, em geral, um rejeito inerte. Além disso, nos processos de beneficiamento do ouro e do alumínio, por exemplo, produzem-se rejeitos contaminados por substâncias tóxicas (Presotti, 2002).

As operações para a extração do minério envolvem uma série de atividades que determinam as características dos resíduos descartados no processo. De acordo com o

tipo de processo industrial e do mineral explorado, os rejeitos encontram-se com variadas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas.

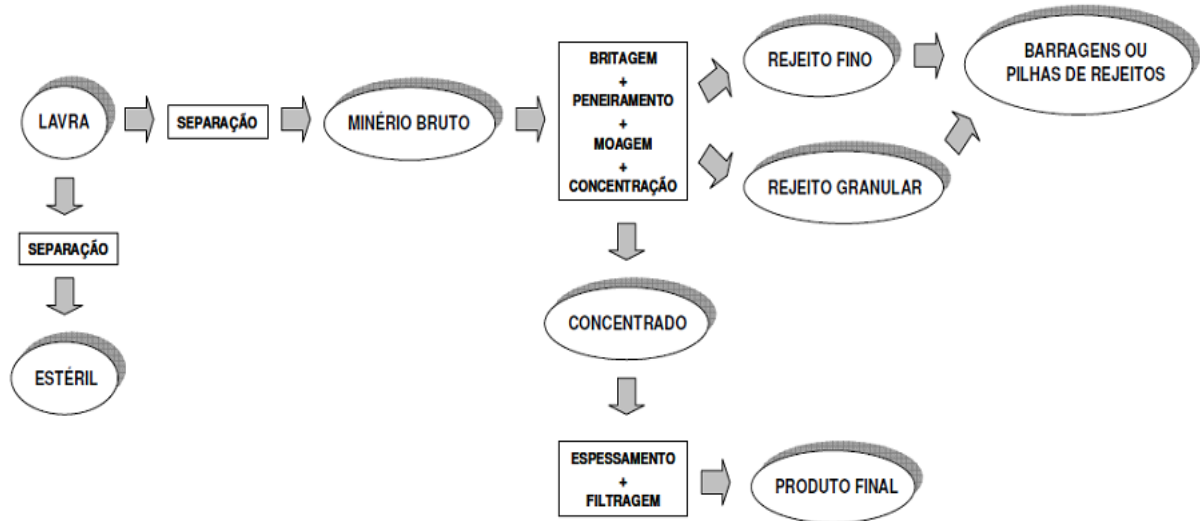


Figura 2.1 - Esquema geral do processo de formação dos rejeitos (Pereira, 2005).

Os rejeitos de granulometria fina ou lamas, em geral, são caracterizados por conter basicamente frações granulométricas correspondentes a silte e argila (com mais de 90% abaixo de 0,074 mm de diâmetro equivalente). Alguns apresentam, inclusive, características de plasticidade, com baixos valores de índice de plasticidade (Pereira, 2005).

Os rejeitos granulares apresentam partículas nas frações areia fina a média e, em alguns casos, siltosas, sem características de plasticidade. Algumas características químicas e mineralógicas, herdadas da rocha de origem, exercem influência direta no comportamento geotécnico dos rejeitos granulares. A massa específica dos grãos, em determinados casos, assume valores da ordem de 5,00 g/cm³, pouco inferiores à da hematita pura, que é da ordem de 5,25 g/cm³ (Pereira, 2005). Considerando o caso dos rejeitos do minério de ferro, a densidade dos grãos (Gs) é dependente do teor de ferro, aumentando com o acréscimo do conteúdo de ferro no rejeito.

Considerando o rejeito como material de construção de barragens, os rejeitos não coesivos apresentam maior potencial de utilização, por apresentarem melhores características de resistência e permeabilidade. Embora, apresentem características de areias, os rejeitos granulares não podem ser considerados como tal, visto que suas

características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variam em função do tipo e da forma de processamento do minério, atribuindo características bastante particulares para cada rejeito (Presotti, 2002).

2.1.4- BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS

As barragens de rejeito são estruturas criadas com a finalidade de armazenar e tratar os efluentes sólidos, produzidos em grande quantidade, provenientes do ato da mineração. Dependendo das propriedades mecânicas dos rejeitos, as barragens podem ser alteadas com o mesmo efluente ou com material de empréstimo, ao longo da vida útil da mina. O projeto de barragens de rejeito, a construção e a desativação devem garantir a segurança física dos barramentos, com suas respectivas estruturas, por períodos de tempo muito longos, normalmente maiores que a própria vida útil da mina, salvaguardando todo o ambiente circunvizinho de quaisquer efeitos prejudiciais advindos de seu funcionamento (Hernandez, 2002).

Existem três métodos básicos para o alteamento de uma barragem de contenção de rejeitos: o método de montante, o método de jusante e o método da linha de centro (Figura 2.2). A diferença entre um e outro método é função do sentido do alteamento em relação ao dique de partida. Segundo Albuquerque Filho (2004), este dique pode ser constituído de terra compactada ou enrocamento, com os alteamentos sucessivos sendo realizados com a utilização do próprio rejeito através da técnica do aterro hidráulico. Contudo, o controle construtivo destas barragens de rejeito é na maioria das vezes ineficientes e podem ocorrer rupturas associadas à má aplicação das práticas construtivas e ao descaso técnico (Ribeiro, 2000).

Dentre os métodos de construção de barragens, o mais antigo, mais simples e econômico é o Método de Montante. Neste método o rejeito é lançado à montante da crista por canhões (spigots) e/ou por hidro-ciclones em um único ponto de descarga ou em linha sobre a praia do aterro, que servirá de suporte para o próximo alteamento, onde, o novo dique é executado (sobre os rejeitos) à montante do dique do alteamento anterior (Ribeiro, 2000). Apesar de várias barragens de rejeitos terem sido construídas de uma maneira aceitável, as rupturas eram comuns devido a diversos problemas de ordem construtiva e geotécnica. Este fato revelou, inicialmente, que o método original

de montante não resultava em estruturas seguramente adequadas e assim propostas de modificações desta estrutura tradicional eram defendidas. Isto também resultou no aumento da utilização dos métodos da linha de centro e de jusante (Ribeiro, 2000). Devido a os problemas ocorridos com o uso de barragens pelo método de montante, a norma (NBR 13028 ABNT, 1993) não recomenda o alteamento de barragens por este método.

O Método de Jusante consiste no alteamento da barragem para jusante do dique de partida, inicialmente construído, de tal forma que o eixo da crista se mova nesta direção. A construção pode ser feita empregando o próprio rejeito, solo de empréstimo ou estéril proveniente da lavra. A principal desvantagem deste método é seu elevado custo de construção. Suas principais vantagens são que a estrutura assim construída resiste aos efeitos de carregamentos dinâmicos, escalona a construção sem interferência na segurança nem na operação dos rejeitos e, a mais importante de todas, aproveita integralmente as técnicas de barragens convencionais (Hernandez, 2002).

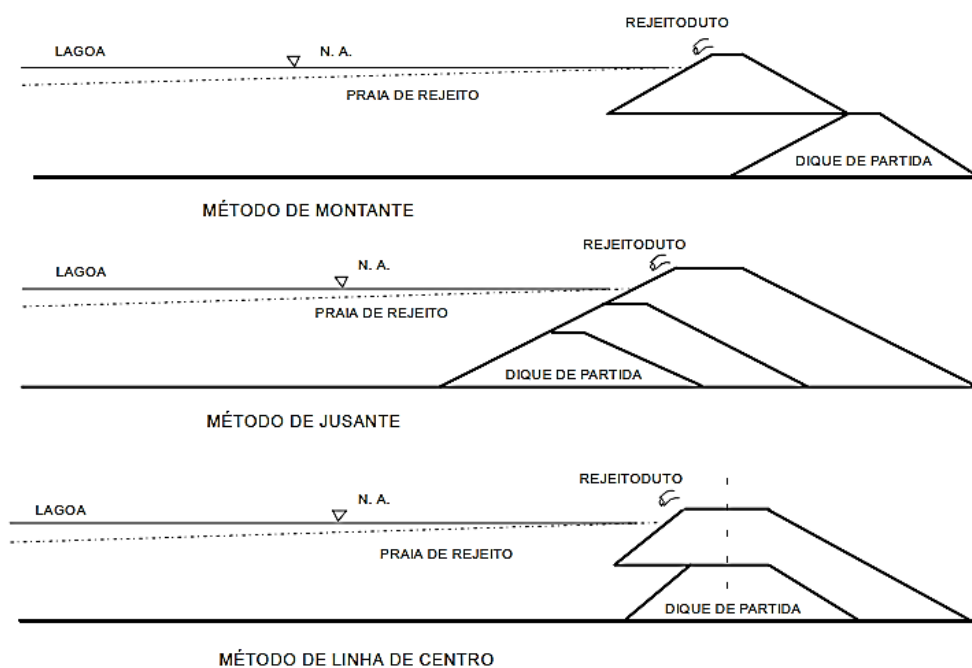


Figura 2.2 - Métodos construtivos de barragens de rejeito (Ribeiro, 2000).

O Método da Linha de Centro é geometricamente uma solução intermediária entre o método de jusante e o de montante. Como nos métodos anteriores, é construído inicialmente um dique de partida. Os alteamentos sucessivos são feitos de forma tal que

o eixo da barragem não sofra deslocamento. O método apresenta baixa economia e potenciais problemas de instabilidade por escorregamentos. As principais vantagens deste método são sua facilidade construtiva, e o fato de que o eixo do barramento permanece constante durante todo o tempo de alteamento da estrutura (Hernandez, 2002).

A escolha de um ou outro método de execução irá depender de uma série de fatores tais como tipo, características geotécnicas e nível de produção dos rejeitos; dos graus de poluição física, química e físico-química; da necessidade de reservar água ou a necessidade do controle das águas percoladas; assim como da sismicidade da região onde se localiza o barramento, da topografia, hidrologia, hidrogeologia e geologia local. Os custos envolvidos são outro fator de peso na escolha do método de execução (Hernandez, 2002).

2.1.4.1- CARACTERIZAÇÃO GRANULOMETRICA DOS REJEITOS

A determinação da curva granulométrica de um material é fundamental para a realização de qualquer trabalho de engenharia. Isto porque o tamanho e a distribuição das partículas condiciona um grande número de propriedades geotécnicas, como por exemplo, permeabilidade, propriedades de compactação, arranjo das partículas, entre outras (Hernandez, 2002). Deste modo, para o desenvolvimento da presente pesquisa, a granulometria é a base da avaliação do dano mecânico nos geossintéticos, uma vez que se tem em conta a área de dano com relação ao tamanho das partículas em contato com o material de estudo.

De acordo com diferentes pesquisas realizadas com rejeito de minério de ferro (Espósito, 2000; Presotti, 2002; Albuquerque Filho, 2004; Pereira, 2005) e com rejeito de minério de ouro (Amorim, 2007), estes materiais apresentam granulometrias de areia, na faixa de areia média a fina. No entanto, segundo Espósito (2000) não é possível afirmar que o comportamento dos materiais de rejeito se assemelha ao comportamento das areias, baseado exclusivamente no fato de que na análise granulométrica dos materiais, estes sejam classificados como areias.

Pereira (2005) indica que as granulometrias dos rejeitos granulares provenientes da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais podem ser agrupados em uma faixa característica de variação granulométrica (Figura 2.3), variando entre areias finas e siltes.

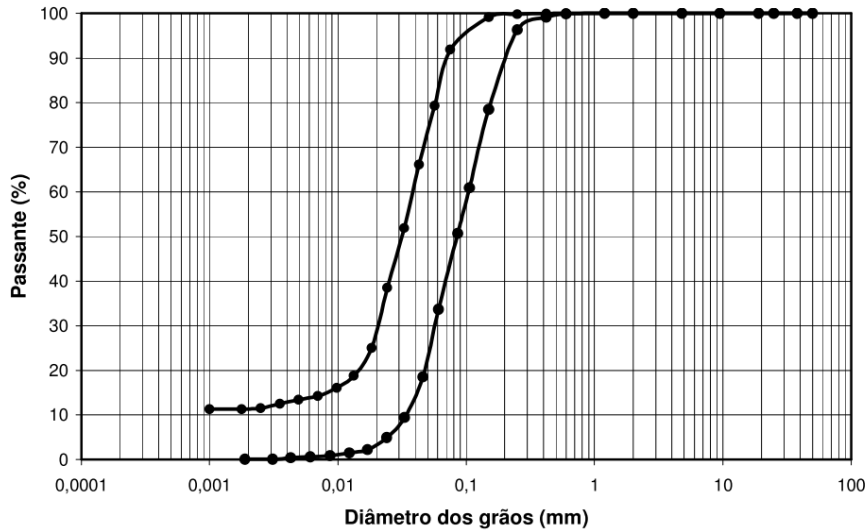


Figura 2.3 - Faixa de variação granulométrica típica de rejeitos granulares de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais (Pereira, 2001 *apud* Pereira, 2005).

Amorim (2007) ao estudar o minério de ouro, observou que o mesmo possuía granulometrias medianamente uniformes na faixa de areia fina a média. A Figura 2.4 ilustra a curva granulométrica típica do rejeito da Mina do Morro do Ouro estudada.

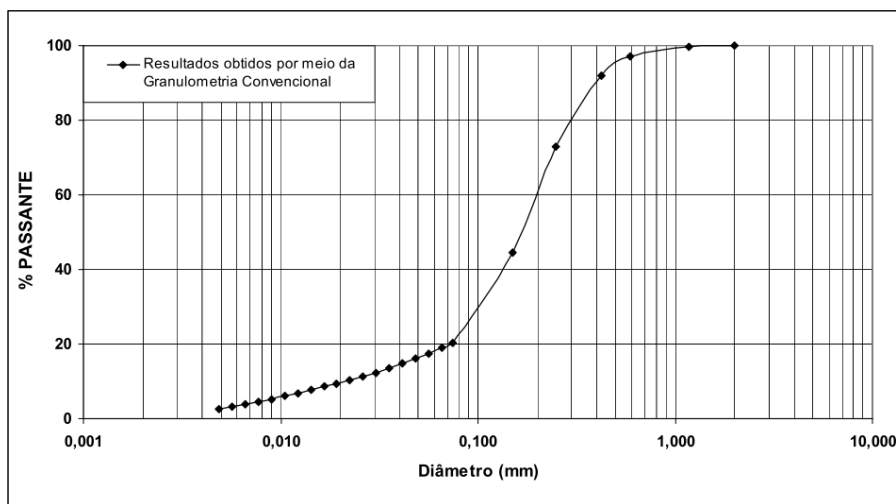


Figura 2.4 - Curva granulométrica típica do rejeito da Mina do Morro do Ouro (Amorim, 2007).

2.1.4.2- DENSIDADE RELATIVA DOS REJEITOS

A complexidade do processo de disposição e a variabilidade das propriedades dos materiais depositados hidráulicamente influenciam a distribuição das densidades e as porosidades, fazendo com que estas dificilmente obedeçam a um modelo sistemático e fácil de interpretar pelo projetista. Desta maneira, se leva a ter uma alta variabilidade dessas propriedades geotécnicas (Espósito, 2000).

Existem vários pontos que devem ser considerados no projeto de aterros hidráulicos. Entretanto, o mais crítico é o estabelecimento da densidade do material de aterro. A obtenção de uma densidade relativamente alta é essencial para a estabilidade da estrutura sob condições estáticas e dinâmicas. Os aterros hidráulicos são particularmente susceptíveis aos processos de liquefação devido às condições de disposição que favorecem a formação de depósitos arenosos fofos e saturados. Assim, a densidade e consequentemente a porosidade torna-se essencialmente crítica para os aterros hidráulicos (Ribeiro, 2000).

A disposição hidráulica dos rejeitos granulares gera uma estruturação dos grãos de difícil reprodução em experimentos de laboratório. Entretanto, podem-se prever condições que relacionam o arranjo do solo em termos do seu grau de compactação máximo e mínimo (Pereira, 2005). Neste caso, torna-se usual, nos procedimentos de estudos dos rejeitos granulares, a aplicação do índice de densidade (I_D), também conhecido como densidade relativa (Dr), utilizado para solos, expresso pela Equação 2.1:

$$Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde: e_{max} é o índice de vazios máximo, e_{min} é o índice de vazios mínimo e e é o índice de vazios do material para a Dr desejada.

Albuquerque Filho (2004) procedeu à avaliação da densidade relativa de rejeitos granulares do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais usando correlações propostas por

diferentes autores baseadas nos ensaios de piezocone. Na Tabela 2.1 se apresentam as faixas de variação da densidade relativa para diferentes barragens.

Segundo os estudos realizados por Albuquerque Filho (2004) em diferentes barragens do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, os valores obtidos destacam uma condição fofa a medianamente compacta dos depósitos. Entretanto, nas camadas superficiais da praia de disposição, observaram-se pequenos acréscimos da densificação dos depósitos. Estes resultados relacionaram-se aos efeitos do ressecamento (contração) dos rejeitos na superfície do depósito, provocado pelo rebaixamento da lâmina d'água do reservatório na proximidade da crista da barragem.

Tabela 2.1 - Variação dos valores de D_r de rejeitos de ferro (Albuquerque Filho, 2004).

Rejeito granular	D_r (%)
Barragem de Córrego do Doutor (Ouro Preto/MG)	15 - 50
Barragem de Campo Grande (Mariana/MG)	20 - 40
Barragem de Gongo Soco (Barão de Cocais/MG)	30 - 60
Barragem do Pontal (Itabira/MG)	10 - 40

2.2- GEOMEMBRANAS

A geomembrana (GM) é um produto tridimensional com pequena espessura de baixíssima permeabilidade, composta predominantemente por asfaltos, elastômeros ou plastômeros, utilizada na engenharia geotécnica para separação e controle da migração de fluidos em sistemas, estruturas ou projetos feitos pelo homem (ABNT NBR – 12553, 2003 e ASTM D 4833, 2007).

Exemplos de materiais utilizados na fabricação de geomembranas poliméricas são: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de densidade média linear (PEDML), polivinil clorado (PVC) e polietileno clorosulfonado (PECS). Com relação à permeabilidade das geomembranas, Gamski (1984) reporta um coeficiente de permeabilidade variando entre 10^{-13} m/s e 10^{-14} m/s.

Segundo Lodi *et al.* (2009), as geomembranas são materiais flexíveis e manufaturados fabricados a partir de produtos sintéticos ou betuminosos cuja função é a de prover uma camada impermeável para controlar a percolação e fluxo de líquidos, e em alguns casos, gases. Possuem espessuras que variam de 0,5 a 5,0 mm e são amplamente empregadas em diversas obras ambientais como aterros sanitários e industriais, canais, barragens, entre outras.

De acordo o manual técnico de (NeoPlastic, S/D), as geomembranas podem ser utilizadas na impermeabilização de diversos tipos de obras, como por exemplo:

- Base e cobertura de aterros sanitários;
- Lagoas de contenção e de tratamento de resíduos industriais;
- Revestimento de Túneis;
- Bases encapsuladas de estradas;
- Tanques e silos subterrâneos de armazenamento;
- Lagoas para piscicultura, esporte e lazer;
- Coberturas e solos de edificações;
- Caixas d'água elevadas ou enterradas;
- Canais de adução e irrigação;
- Piscinas e praias artificiais;
- Mineração: reservatórios para lixiviação e de rejeitos.

No Brasil, as geomembranas mais utilizadas são as de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e PVC (Polivinil Clorado) por possuírem maior resistência química e, por apresentarem maior versatilidade. Nos Estados Unidos, as geomembranas de PVC foram historicamente recomendadas para aplicações em obras de curto prazo, aproximadamente 1 a 5 anos, devido a incertezas quanto a sua durabilidade em longo prazo. Em sistemas de impermeabilização da base e cobertura de aterros sanitários, as geomembranas mais utilizadas são as de PEAD, devido principalmente à sua alta resistência química. A Tabela 2.2 apresenta as vantagens e desvantagens do uso das geomembranas de PEAD e de PVC (Bueno *et al.*, 2004).

Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens do uso de geomembranas de PEAD e de PVC
(modificado – Bueno *et al.*, 2004).

Tipo de Geomembrana	Vantagens e Desvantagens
PEAD	<p>Boa resistência contra diversos agentes químicos, boas características de resistência e solda, boas características de resistência mecânica, bom desempenho a baixas temperaturas baixa resistência ao puncionamento.</p> <p>Baixo atrito de interface, formação de rugas, difícil conformação ao sub-leito, sujeita ao FST (Stress Cracking).</p>
PVC	<p>Boa trabalhabilidade, facilidade de soldagem, bom atrito de interface, boas características de resistência mecânica.</p> <p>Baixa resistência aos raios UV e a alguns elementos químicos, baixo desempenho a altas e baixas temperaturas.</p>

2.2.1- GEOMEMBRANAS EM OBRAS HIDRÁULICAS E DE PROTEÇÃO AMBIENTAL

A geração de resíduos pelas mais diversas fontes, e suas consequências para o meio ambiente, é uma preocupação a nível mundial, motivada em parte devido a acidentes ecológicos ocorridos pela disposição inadequada de resíduos sólidos e/ou pelo derramamento de resíduos líquidos ocorrido em vários países, implicando na queda do padrão de qualidade ao meio ambiente, principalmente em regiões de concentração industrial, acentuando os índices de doenças em seres humanos, destruição da fauna e flora, alterações do clima, degradação das águas de superfícies e subterrâneas, etc (Bidim, S/D).

Por sua vez, a mineração ao longo do tempo tem aumentado, e com isso, também a quantidade de rejeitos a serem eliminados conforme as novas normas ambientais que visam à proteção do meio ambiente.

O aumento da sensibilidade ambiental das duas últimas décadas tem levado a regulamentos importantes, exigindo de mínimos vazamentos de contaminação para os

ambientes dos aterros e outros depósitos de resíduos. Adicionalmente, quanto mais rapidamente um aterro atinge sua capacidade, deve ser coberto para minimizar a futura geração de lixiviados (GMA, 2002).

Tendo em conta o número de resíduos e rejeitos gerados, começa-se uma pesquisa pelo melhor local para disposição dos resíduos. Assim, é como o local onde são colocados os resíduos líquidos ou sólidos perigosos é o solo, gerando-se um grande risco de que as substâncias contidas nos resíduos possam se transferir para o solo, solubilizadas pela água presente no próprio resíduo, pelas águas decorrentes das precipitações atmosféricas ou pelas águas subterrâneas.

Portanto, a preocupação pelo meio ambiente gira em torno de um controle hidráulico, tendo as águas superficiais, de infiltração ou subterrâneas, como os veículos de condução da poluição ou os corpos finais poluídos. Desta forma, busca-se proteger os corpos de água, controlando-se o fluxo das águas e/ou líquidos poluentes, por meio da impermeabilização ou da drenagem. Na impermeabilização se cria barreiras para impedir que os líquidos atinjam os locais a serem protegidos e com a drenagem se criam caminhos preferenciais para os líquidos, afastando-os dos locais que visam ser protegidos.

Segundo Giroud & Bonaparte (1989), o uso de geomembranas é obrigatório em alguns países para certos tipos de revestimento de instalações de contenção de resíduos, por exemplo, aterros de resíduos perigosos e represamentos de líquidos.

Uma das maiores aplicações das geomembranas é como *liner* na contenção de resíduos perigosos e seus lixiviados. A seleção de um revestimento envolve requisitos do local, tempo de armazenamento e resíduos para serem contidos (Aminabhavi & Naik, 1998).

De acordo GMA (2002), os sistemas convencionais para o capeamento convencional, minimizar a migração líquida e os sistemas de revestimento, geralmente incluem:

- Camadas de barreira de solo de muito baixa permeabilidade, tal como, espessas camadas de siltes e argilas;
- Camadas de drenagem areias ou cascalhos grossos uniformemente graduados, e;
- Especialmente filtros de areia graduada.

Dentro das soluções com geossintéticos, a resistência química e a flexibilidade das geomembranas e os geocompostos argilosos (GCLs), em alguns casos, os torna

tecnicamente superior a qualquer alternativa para fornecer uma barreira positiva para o movimento dos fluidos e gases.

2.2.2- GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS

Koerner (2005) expõe que o liner de borracha composto pelo polímero isobutileno (com aproximadamente 2% de isopreno) foi a geomembrana original. Além, relata que o liner de policloreto de vinil (PVC) começou-se a utilizar desde a década de 1940. Zanzinger (2007) afirma que é geralmente admitido que a contenção de líquidos represente a primeira utilização de barreiras geossintéticas (GBRs, por sua sigla em Inglês), ou pelo menos, que pode ser considerado como o precursor histórico do uso de GBRs.

Liners de geomembrana foram usados primeiramente em grandes barragens de água na Europa, em torno de 1959 e posteriormente, em projetos de mineração para barragens de rejeitos e lagoas de evaporação nos EUA na década de 1970 (Breitenbach, 2010).

A alta velocidade na qual a indústria petroquímica tem aperfeiçoado os polímeros, permitindo a exploração de novas alternativas, tem resultado em geomembranas de melhor qualidade. Em alguns casos, o desempenho das geomembranas como barreiras impermeáveis é superior ao das camadas compactadas (*liners*) constituídas por materiais naturais. Além disso, a disponibilidade de diversos produtos geossintéticos como geotêxteis, georredes e geocompostos tem oferecido aos projetistas possibilidades de novas soluções. A introdução dos geocompostos (geomembrana e geotêxtil em um mesmo produto) no mercado, em meados de 1960, foi outro fator decisivo para o avanço da técnica de utilização de geomembranas em barragens. O geocomposto é um material com melhor desempenho por possuir maior resistência à tração e ao puncionamento, maior estabilidade e por contribuir também para a drenagem sob o *liner* (Colmanetti, 2006).

As empresas projetistas e as construtoras brasileiras têm resistido à inserção de produtos geossintéticos no projeto de barragens. Dentre os fatores que contribuem para este posicionamento estão o desconhecimento das propriedades e, por conseqüência, dos benefícios gerados na aplicação destes produtos e a questão de custos. Tentativas em utilizar geomembranas na recuperação de antigas barragens, em canais e reservatórios brasileiros não têm tido aceitação por parte das projetistas e construtoras, que preferem

continuar empregando as técnicas tradicionais, mesmo quando estas se apresentam mais onerosas. Optar por materiais sintéticos, para muitos, é sinônimo de riscos e custos elevados (Colmanetti, 2006).

A primeira aplicação de geomembranas em estruturas definitivas de usinas hidrelétricas se deu recentemente, com o revestimento de alguns quilômetros de canais de grandes dimensões no AHE Itiquira, no sul do estado de Mato Grosso. Dos 5.550 m de canais, 4.800 m foram revestidos com geomembranas de PEAD, protegidas por um geotêxtil não-tecido instalado subjacente à membrana, totalizando 250.000 m² de revestimento. Dentre os aspectos que mereceram especial atenção na elaboração do projeto destaca-se a questão da ancoragem da geomembrana, a proteção mecânica e a drenagem sub-superficial (Colmanetti, 2006).

Comumente, as geomembranas são utilizadas com outros tipos de barreiras em função dos possíveis defeitos que podem resultar em grandes fluxos de percolação. Ao grupo de impermeabilizantes podem-se acrescentar os bentoníticos (GB) ou geocompostos argilosos (GCLs). Segundo Rowe (2005) a combinação de um GCL com uma geomembrana reduz significativamente o vazamento, quando se comparado só com a geomembrana. Isto é devido em parte à boa qualidade de contato entre as duas superfícies.

Portanto, estes sistemas de captação e desvio de fluxo (SCDF) podem se apresentar na forma simples, quando constituídos por único material, ou na forma composta, quando são constituídos por uma combinação de diferentes materiais. E ainda podem ser duplos, quando apresentam uma camada dupla de revestimento, sendo esta configuração mais utilizada para disposição de rejeitos perigosos (Rebelo, 2009). A Figura 2.5 apresenta algumas configurações típicas de barreiras de SCDF.

Nestes sistemas, a camada de pedregulho tem como finalidade promover a drenagem e captação dos líquidos percolados. A AASHTO recomenda as seguintes faixas de granulometria dos materiais: 9 a 13 mm, 25 a 38 mm ou 50 a 64 mm. Também é recomendada a espessura mínima de 30 cm. O Instituto Federal para Ensaio e Pesquisa de Materiais - *Bundesanstalt für Materialforschung Undprüfung* - (BAM) recomenda a faixa de variação da curva granulométrica entre 16 e 32 mm (Rebelo, 2009).

De acordo Breitenbach (2010), quando se trata da utilização das geomembranas na face a montante das barragens de rejeitos em combinação com a disposição da praia de rejeitos ao longo da face de montante, se tem melhorado significativamente, as

condições de estabilidade das faces tanto a montante como a jusante quando comparadas às barragens convencionais de armazenamento de água.

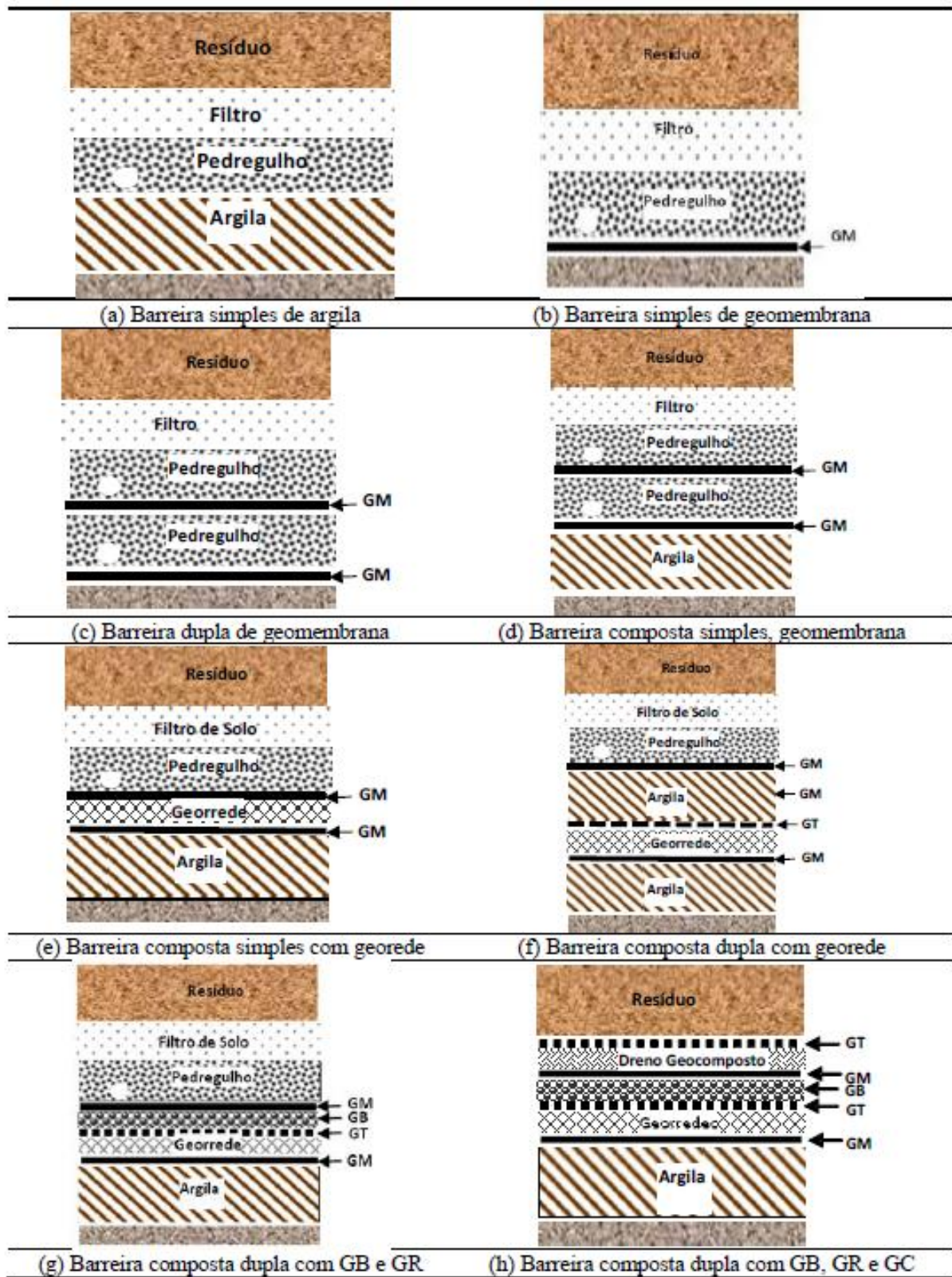


Figura 2.5 - Configurações típicas de barreiras impermeáveis (Koerner, 1998 *apud* Rebelo, 2009).

2.2.3- COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS

A geomembrana é um componente essencial para vedação de estruturas, mas, do ponto de vista mecânico, apresenta baixa resistência. A função da geomembrana em barragens é a de impermeabilização e não é esperado que ela contribua ou influencie no comportamento mecânico da estrutura, devendo, porém, suportar as tensões e/ou deslocamentos impostos a ela. Quando sujeitas a tensões de gravidade nos taludes (tensões impostas) ou recalques diferenciais (deslocamentos impostos) é importante que se conheça previamente suas propriedades mecânicas para quantificar o seu comportamento (Colmanetti, 2006).

A Figura 2.6 apresenta a curva tensão-deformação obtida em ensaios de tração uniaxial para diferentes tipos de geomembranas (Rigo & Cazzuffi, 1991). As geomembranas de PVC, CSPE, CPE e Borracha Butílica não apresentam ponto de escoamento e a ruptura é atingida com deformações em torno de 300% e 500%. Dentre essas, nota-se que a geomembrana de PVC é a que apresenta maior resistência, variando entre 18 e 20 MPa. As geomembranas de HDPE e PP apresentam ponto de escoamento bem definido, em torno de 15%. A grandes deformações, novamente ocorre um aumento na tensão, e, a geomembrana se rompe com deformações superiores a 700% para o PP e 1000% para o PEAD. A geomembrana tracionada alonga na direção da carga aplicada (Colmanetti, 2006).

Na atualidade a norma usada para testar todos os tipos de geomembranas poliméricas com o método de faixa larga, é a ASTM D 4885-01. Os corpos de prova medem 200 mm de largura e 100 mm de comprimento e a resistência da geomembrana é dada em kN/m. O ensaio mais usual para a determinação da curva tensão-deformação em geomembranas é o uniaxial, realizado em amostra estreita (tipo gravata). Projetistas e especialistas em geossintéticos, entretanto, têm reconhecido que estes ensaios não representam as condições de campo onde o estado de tensões na geomembrana é biaxial ou mesmo triaxial (Colmanetti, 2006).

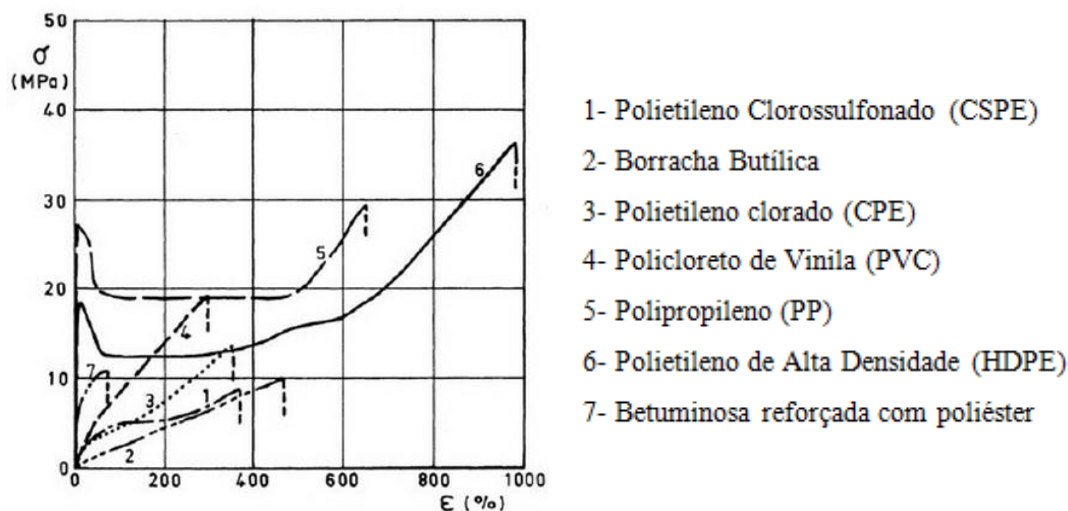


Figura 2.6 - Comportamento tensão-deformação de diferentes geomembranas
 (Modificado - Rigo & Cazzuffi, 1991).

2.3- DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS

Dano mecânico é toda transformação da estrutura do geossintético, resultante de esforços ocorridos durante seu manuseio, instalação e a compactação do solo sobrejacente. Existem formas de analisar este tipo de dano, podendo-se citar ensaios de laboratório que estabeleçam critérios de inspeção visual em amostras exumadas das estruturas, correlacionando o número de furos ou lesões existentes com a resistência remanescente dos reforços (Nascimento, 2002). As geomembranas são elementos de pequena espessura e como barreiras estão submetidas a choques e a tensões concentradas exercidas pelo material angular sobrejacente e subjacente, que pode gerar perfurações e rasgos na geomembrana (Giroud & Bonaparte, 1989).

De acordo com Fox *et al.* (2011) as geomembranas são componentes críticos de sistemas hidráulicos de barreira em um grande número de aplicações, que vão de aterros sanitários para canais a plataformas de lixiviação. A fim de proporcionar uma barreira eficaz, danos na forma de rasgos, buracos e costuras ruins devem ser minimizados, sendo muitas vezes a realização de grandes despesas para prevenir, localizar e reparar tais danos. Em particular deve se ter rigoroso controle de qualidade da fábrica a um ciclo completo de instalação.

Nosko *et al.* (1996) avaliaram a ocorrência de danos em sistemas de impermeabilização com geomembrana de aproximadamente 100 locais, totalizando uma área de 1.000.000 m². O estudo reportou que os danos nas geomembranas podem ocorrer durante três períodos: durante a instalação da camada sobrejacente à geomembrana, na qual foram causados o 73% dos danos mecânicos; durante a fase de instalação da própria geomembrana que teve o 24% dos danos; e após o período construtivo durante o qual foram causados o 2% dos danos. O ultimo 1% foi causado durante os testes de funcionamento do sistema desenvolvido.

Segundo Nosko *et al.* (1996), uma fase onde podem ser produzidos os danos mecânicos nas geomembranas é durante a fase de operação. Neste periodo se produz a menor quantidade de danos nas geomembranas, atingindo só o 2% dos danos. Os principais danos ocorridos nesta fase são os danos acidentais por caminhões compactadores, sendo o 67% do total dos danos. A segunda parte, é o 31% de danos pos-instalação decorrentes da instalação de tubulações, colectores de drenagem, estradas de acesso, etc,. O ultimo 2% é causado pelas calamidades climáticas ou outras ocorrências, exemplo, o fogo (ver Figura 2.7).

O estudo feito por Nosko et al. (1996), foi realizado em locais com os seguintes tipos de aplicações: resíduos sólidos urbanos, resíduos perigosos, resíduos industriais, lixo nuclear, bacias hidrográficas, bacias de evaporação, bacias de sedimentação, bacias e tanques para produtos químicos, estações de tratamento de esgoto, áreas de descontaminação e lagoas, isolamento de armazenamento de materiais perigosos, telhados; garagens subterrâneas; túneis, casos inespecíficos onde são utilizados geomembranas, e nivelamento de aterros.

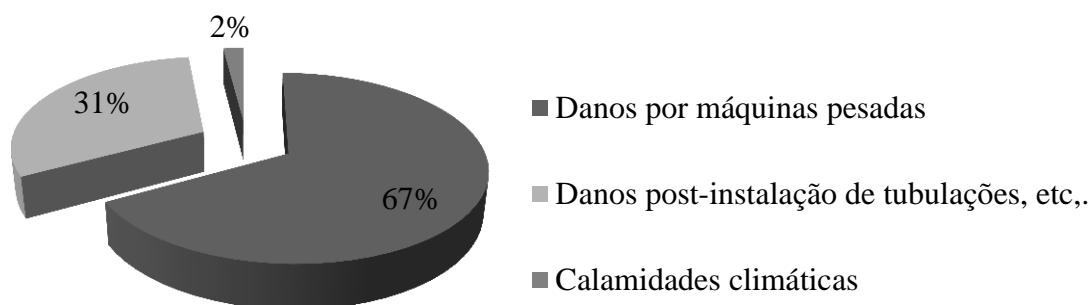


Figura 2.7 - Danos durante a fase de operação. Dados de Nosko et al. (1996).

É de se esperar que o local onde a geomembrana esteja inserida pode gerar danos ou defeitos. As geomembranas devem ser protegidas das concentrações de tensão causadas geralmente na fase de instalação da camada de cobertura, com o solo e com o peso de material sobrejacente. De tal modo, podem se prevenir os danos gerados nas geomembranas, muitas vezes colocando camadas de proteção contra o puncionamento. Assim, faz-se necessário em alguns casos a colocação de uma camada de proteção para a geomembrana. Por exemplo, há recomendações a respeito do uso de geotêxtil não tecido, já que, quando em associação com as geomembranas, as protegem de esforços mecânicos. Porém maiores estudos a respeito são necessários.

Estudos feitos por Nosko & Touze-Foltz (2000) focalizados nos critérios de posição do dano, tamanho do dano e causa do dano, descobriram que em casos de vários furos, a causa do dano pode ser agrupada em diversas categorias comuns (definidos na Tabela 2.3) e que existe uma relação entre a localização e a causa do dano na geomembrana. Além disto, verificou-se que a maior parte dos danos foram causados por pedras dentro da camada de proteção e por maquinaria pesada (bulldozer, caterpillar, etc.,).

Tabela 2.3 - Causa do dano *versus* tamanho do dano (Dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000).

Tamanho do dano (cm ²)	Pedras %		Maquinaria pesada %		Soldas %		Cortes %		Trabalhadores %		Total
<0,5	332	11,1	-	-	115	434	5	8,5	-	-	452
0,5-2,0	1720	57,6	41	6,3	105	39,6	36	61	195	84	2097
2,0-10	843	28,2	117	17,9	30	11,3	18	3,5	36	15,6	1044
>10	90	3	496	75,8	15	5,7	-	-	-	-	601
Qtd.	2985		654		265		59		2,31		4194
Total	71,17%		15,59%		6,32		1,41		5,51		

Na pesquisa realizada por Nosko & Touze-Foltz (2000) as falhas foram localizadas nas seguintes áreas: piso plano, cantos, bordas, sob as tubulações de drenagem, penetração de tubulações e outras (na Tabela 2.4 pode se ver a quantidade de furos *versus* a localização do dano). Um fato importante descoberto foi que a maioria das falhas encontrava-se dentro das áreas planas, onde novamente, as pedras e as máquinas pesadas causam a maioria das falhas. Também, podem-se ver diferentes padrões em outras áreas como: cantos e áreas de drenagem, nos quais, a maioria dos danos foram causados por soldas de extrusão e equipamentos pesados. No entanto, os danos devido às pedras continuam sendo os maiores causadores dos danos ocasionados na

geomembrana. Com respeito à penetração de tubulações através da geomembrana, os resultados obtidos foram compostos principalmente por falhas nas soldas de extrusão. Na Tabela 2.5 é apresentada a análise da causa do dano vs. a localização.

Tabela 2.4 - Localização do dano (Dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000).

Quantidade de dano	Piso plano	Cantos, bordas, ect.	Sob tubulações de drenagem	Penetração de tubulações	Outros
4194	3261	395	165	84	289
100%	77,8%	9,4%	3,9%	2,0%	6,9%

Tabela 2.5 - Causa do dano *versus* a localização: (a) Piso plano, (b) Cantos, bordas, etc., (c) Sob tubulações de drenagem, (d) Penetração de tubulações, (e) Outros (rodovias de acesso, estruturas de concreto, etc.) (Nosko & Touze-Foltz, 2000).

Tipo de falha	Quantidade de furos	%
Pedras	2641	81,00
Maquinaria pesada	430	13,20
Trabalhadores	130	4,00
Cortes	33	1,00
Soldas	26	0,80
Total	3261	100,00

(a)

Tipo de falha	Quantidade de furos	%
Pedras	234	59,20
Maquinaria pesada	75	18,90
Trabalhadores	14	3,50
Cortes	4	0,90
Soldas	69	17,50
Total	395	100,00

(b)

Tipo de falha	Quantidade de furos	%
Pedras	50	30,30
Maquinaria pesada	24	14,30
Trabalhadores	24	14,50
Cortes	23	13,70
Soldas	45	27,20
Total	165	100,00

(c)

Tipo de falha	Quantidade de furos	%
Pedras	-	-
Maquinaria pesada	-	-
Trabalhadores	7	8,50
Cortes	1	0,60
Soldas	77	90,90
Total	84	100,00

(d)

Tipo de falha	Quantidade de furos	%
Pedras	60	20,60
Maquinaria pesada	125	43,40
Trabalhadores	56	19,30
Cortes	-	0,00
Soldas	48	16,70
Total	289	100,00

(e)

Nosko & Touze-Foltz (2000) encontraram problemas na hora de contabilizar o número exato de furos individuais gerados por vários tamanhos de pedras na geomembrana. Principalmente o dano por pedras ocorreu como uma área típica com vários (às vezes dezenas) pequenos e individuais furos agrupados. Por isso, foi adotada a ideia que um furo individual causado pelas pedras é definido como uma área com furos que são agrupados dentro da região de 5 cm de diâmetro. Se outro grupo de furos agrupados é separado por mais de 5 cm, se poderia considerar como um furo separado.

2.3.1- PROTEÇÃO CONTRA DANOS EM GEOMEMBRANAS

Frente às diferentes solicitações durante as fases de instalação e operação de aterros, vários autores como Tognon *et al.* (2000), Bouazza *et al.* (2002), dentre outros, sugerem a introdução de uma camada de proteção de forma a prevenir danos mecânicos e também minimizar as tensões e deformações induzidas na geomembrana. Vários produtos geossintéticos são comumente utilizados como camadas de proteção de geomembranas. As especificações variam de país para país dependendo da filosofia de projeto adotada (Rebello, 2009). De acordo com Koerner & Koerner (1999) *apud* Palmeira (2012), nos Estados Unidos, por exemplo, para a disposição de resíduos sólidos são frequentemente utilizados geotêxteis não tecidos com baixa gramatura (200 g/m² a 600 g/m²). Ao contrário, em países da Europa, na Alemanha em particular, geotêxteis não tecidos com elevada gramatura (≥ 2000 g/m²) são geralmente utilizados em casos de aterros de pequeno porte, onde há situação de baixo carregamento.

A camada de proteção tem a função de proteger a geomembrana de danos mecânicos (queda de materiais, animais, vandalismo), físicos (ação de ondas, gelo etc.) e químicos (raios ultravioletas). A camada de proteção não pode deslizar sobre o talude ou perfurar a geomembrana quando do enchimento do reservatório, ação de ondas ou deslocamentos da barragem. Além disso, precisa agir como uma barreira eficaz contra o crescimento de plantas e evitar o acesso de animais e vândalos (Colmanetti, 2006).

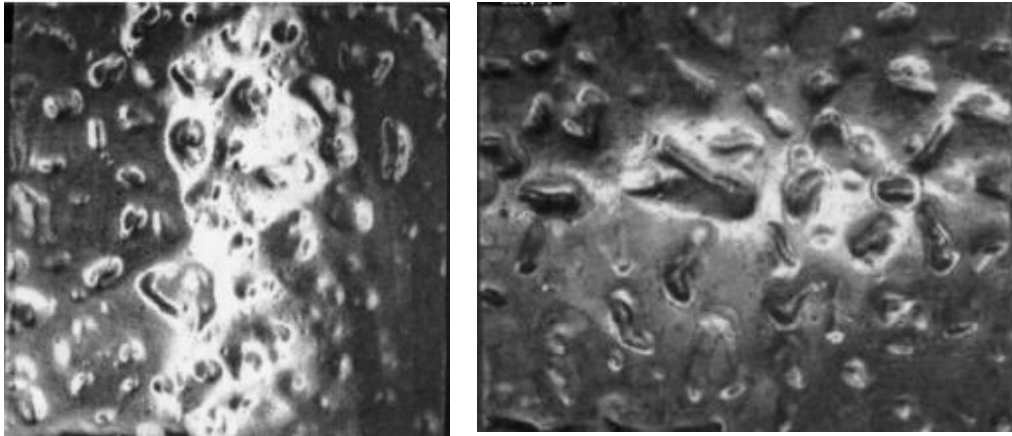
Na pesquisa feita por Tognon *et al.* (2000) observou-se que um dos principais problemas associados com o uso de pedregulho nos sistemas de drenagem é o efeito que pode ter sobre a geomembrana, particularmente nas altas pressões de sobrecarga (situação de carregamento pesado), que pode ser esperado em grandes aterros. Para

ajudar a aliviar as deformações induzidas na geomembrana pelo pedregulho, diferentes tipos de camadas de proteção (por exemplo, geotêxteis (GTs) e colchões cheios de areia) são introduzidos entre a geomembrana e o pedregulho de drenagem.

No entanto, para avaliar o desempenho destas camadas de proteção, um estado limite aceitável deve ser estabelecido para as deformações que ocorrem na geomembrana. A seleção deste limite é um assunto de debate recente por alguns autores, apresentando diferenças de opinião sendo relacionadas com diferenças de filosofia sobre o modo como as deformações devem ser limitadas a: (1) prevenir a punção em curto prazo nas geomembranas; ou (2) garantir o desempenho em longo prazo das geomembranas (Tognon *et al.*, 2000).

Uma avaliação da proteção contra furos proíbe o alongamento local da geomembrana passado o limite de escoamento, permitindo assim a deformação enquanto evita furos na geomembrana. Diversas pesquisas realizadas demonstraram a eficácia de camadas de proteção para limitar o alongamento local além do limite de escoamento e prevenir a punção de curto prazo (Tognon *et al.*, 2000). A Figura 2.8 ilustra os danos ocorridos em geomembranas com proteção de geotêxtil.

Segundo Rebelo (2009), o aspecto a curto prazo corresponde à prevenção de danos como rasgos profundos, alongamento além do ponto de escoamento ou perfurações na geomembrana durante os processos de fabricação, transporte e instalação. Bouazza *et al.* (2002) relatam que esta aproximação é bastante utilizada e comanda, na maior parte, os casos de aprovação das camadas de proteção, principalmente nos Estados Unidos. O método de projeto se baseia na seleção de uma camada de proteção de geotêxtil com gramatura (massa por unidade de área) suficiente para fornecer um fator de segurança global contra o escoamento da geomembrana. A longo prazo, o critério para estimativa do desempenho das camadas de proteção consiste na limitação de deformações locais nas geomembranas para um valor aceitável, de forma que não ocorra o fenômeno de *stress cracking* (aparecimento de fissuras sob tensão). De acordo Bouazza *et al.* (2002), 0,25% foi o valor limite definido para deformação local em geomembranas (ou seja, deformações devido impacto da camada de drenagem) na Alemanha (DGGT 1997) e no U.K. (Agência Europeia do Ambiente, 1998).



(a)

(b)

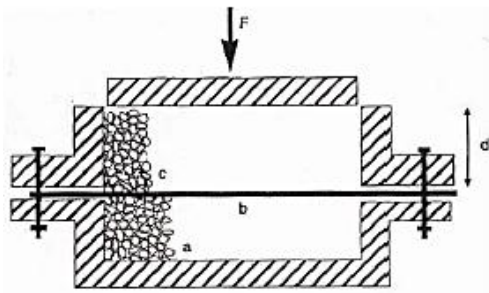
Figura 2.8 - Danos mecânicos em geomembranas com proteção de geotêxtil (Tognon *et al.*, 2000): (a) geomembrana com geotêxtil de 435 g/m^2 sob carga de 250 kPa aplicada durante 200 min; (b) geomembrana com proteção de geotêxtil de 1200 g/m^2 (duas camadas de 600 g/m^2 cada uma) sob carga de 900 kPa aplicada durante 720 min.

A utilização de geotêxtis em obras de contenção de rejeitos seja em reservatórios produzidos por escavação, seja por barramento, se constitui numa solução técnica viável e econômica.

No sistema de impermeabilização, o geotêxtil sobre e/ou sob a geomembrana atua com a função de proteção, absorvendo as tensões e esforços que poderiam danificar a geomembrana, evitando a sua deterioração e perda de estanqueidade. Estes efeitos podem ser simulados em laboratório utilizando-se um equipamento semelhante ao apresentado na Figura 2.9.

Segundo Bidim (S/D.) em ensaios utilizando-se punção com pontas chatas, efetuados por Koerner (1988), com vários tipos de geomembranas de espessuras 0,75mm, com e sem geotêxtil, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 2.10.

Os valores são indicados como incrementos na resistência do conjunto que ocorrem com a utilização do geotêxtil, pela absorção dos esforços de puncionamento, quando usado em uma ou em ambas as faces da geomembrana.



- F- Carga;
- a- Material de suporte;
- b- Geomembrana;
- c- Material de cobertura;
- d- Espessura do material de cobertura.

Figura 2.9 - Equipamento para ensaio de punção (Modificado - Koerner, 1988 *apud* Bidim, S/D.).

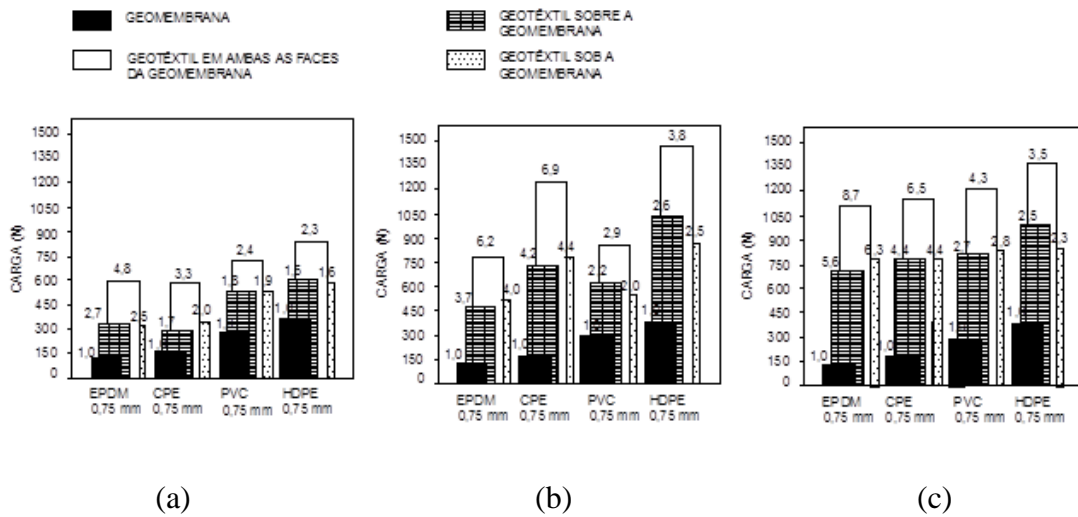


Figura 2.10 - Efeito da proteção do geotêxtil quanto aos esforços de punção (Modificado - Koerner, 1988 *apud* Bidim, S/D.): (a) resultados com geotêxtil de 200 g/mm²; (b) resultados com geotêxtil de 400 g/mm²; (c) resultados com geotêxtil de 600 g/mm².

2.3.2- ENSAIOS DE DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS

Os ensaios de dano mecânico em geomembranas correspondem a ensaios de compressão estáticos ou dinâmicos, sob forma de um mecanismo de punção. Estes ensaios são divididos em ensaios índice e ensaios de desempenho. Os primeiros são geralmente de pequena escala e utilizados principalmente durante o processo de fabricação dos materiais para controle de qualidade e são rápidos, fáceis de executar, e

não utilizados na previsão da capacidade do geossintético resistir às tensões de instalação e condições de serviço. Por outro lado, o segundo tipo de ensaio procura simular no laboratório as condições e tensões que um geossintético sofrerá na obra. Podem ser lentos e difíceis de executar e são necessários para prever o desempenho de campo (Rebelo, 2009).

Geroto (2008) estudou o comportamento das geomembranas isoladas e com elementos de proteção. Em particular, na pesquisa foram realizados ensaios de puncionamento estático, o qual faz parte dos ensaios índice e também executados ensaios de puncionamento hidrostático e carregamento estático, que por sua vez fazem parte dos ensaios de desempenho.

Diversos autores têm realizado pesquisas com ensaios de dano mecânico em geomembranas de diferentes tipos, a fim de analisar o dano gerado pelo pedregulho acima e abaixo da geomembrana (por exemplo: Nascimento, 2002; Brachman & Gudina, 2008; Geroto, 2008; Rebelo, 2009; Fox et al., 2011). Segundo Brachman & Gudina (2008), a escassez de dados sobre a natureza, tamanho, espaçamento e magnitude de contatos de pedregulho que atuam sobre a geomembrana (ou a camada de proteção) é um obstáculo para a quantificação das tensões de longo prazo na geomembrana.

Brachman & Gudina (2008) desenvolveram um método para registrar as formas, tamanhos e espaçamento dos contatos do pedregulho de uma camada de drenagem granular sobrejacente à geomembrana, num equipamento de 590 mm de diâmetro e 500 mm de altura. Na pesquisa foi utilizada uma geomembrana de PEAD (1,5 mm) em contato com dois tipos de pedregulhos mal graduados (GP1 e GP2) com diâmetro nominal entre 50 e 25 mm, respectivamente. Abaixo da geomembrana foi empregada uma argila compactada. A pressão vertical uniforme foi aplicada por meio de uma bolsa de borracha flexível, onde as amostras foram sujeitas a incrementos de 50 kPa de pressão cada 10 min, até um máximo de 250 kPa aplicado durante 10 horas. Nos resultados obtidos foram observados cinco tipos de contatos, sendo definidos por: pontos, bordas, áreas, perímetros e contatos compostos. Os pontos de contatos foram os mais frequentes e, junto com os contatos de bordas, causaram as maiores deformações. Os espaçamentos médios entre os contatos foram encontrados entre 55 mm para GP1 e 37 mm para GP2. As maiores deformações de tração na geomembrana foram 32 e 16% para o GP1 e GP2, respectivamente. Além disso, quando as geomembranas foram testadas em contato com o geotêxtil não tecido, foi encontrada uma redução na pressão

de contato agindo sobre a geomembrana e nas deformações resultantes. No entanto, nenhum dos geotêxteis testados (com massas superior a 2240 g/m^2) foram capazes de limitar as deformações de tração abaixo dos níveis permitidos propostos para longo prazo ($<0,25\%$ segundo a BAM, 1994), até mesmo para condições de curto prazo examinadas.

Brachman et al. (2011) realizaram testes de desempenho físico em uma geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espessura em contato com materiais granulares granulares acima e abaixo da geomembrana, num equipamento de 590 mm de diâmetro e 500 mm de altura, onde foi aplicada pressão vertical aplicada de 2000 kPa por 100 horas. Esta pressão vertical foi aplicada usando a pressão do fluido agindo sobre uma bolsa de borracha. Nos testes foram encontrados nove furos que se desenvolveram na amostra (indicados pelos círculos vermelhos na Figura 2.11). Este valor corresponde a mais de 300.000 orifícios por hectare. A punção 3 (Figura 2.11) tinha um diâmetro ligeiramente inferior a 1 mm e foi causada pela borda angular de uma partícula de pedregulho de 40 mm de comprimento. A punção 6 (Figura 2.11) foi causada por uma ponta afiada de uma partícula de pedregulho, o furo foi pequeno, cerca de 0,1 milímetros de largura e 0,5 mm de comprimento. A punção 7 também foi causada por uma partícula angular de pedregulho de 40 mm de comprimento e tinha um diâmetro inferior a 0,5 mm. Com os resultados, observou-se que, apesar de haver uma grande área onde não houve perfurações na geomembrana, foram detectados rasgos. Na Figura 2.11 se apresenta uma fotografia da superfície superior e inferior de uma amostra de geomembrana depois de ensaiada

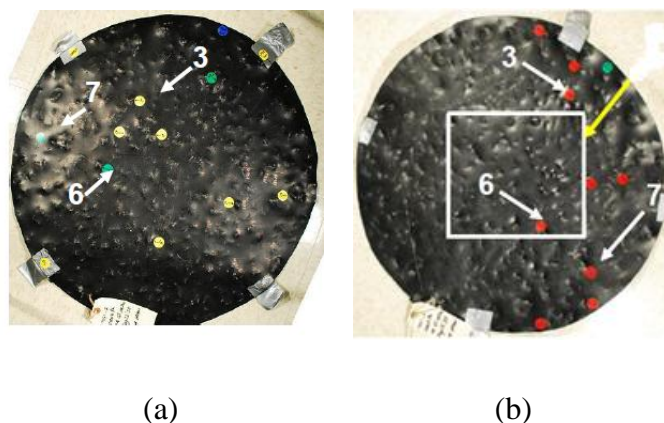


Figura 2.11 - Fotografia da amostra de geomembrana depois de ensaiada (Brachman *et al.*, 2011): (a) superfície superior da geomembrana; (b) superfície inferior da geomembrana.

Geroto (2008), nos ensaios de puncionamento hidrostático que realizou na sua pesquisa, utilizou geomembranas de PEAD de 1,5 mm de espessura e PVC de 1,0 mm de espessura, encontrando diferentes modos de falha entre as duas geomembranas. O equipamento usado consistiu em uma câmara de pressão circular, com diâmetro interno de 500 mm, onde as pressões foram aplicadas com incrementos de 15 kPa por minuto até a ruptura do elemento ou a pressão máxima de 1800 kPa. Os materiais utilizados foram cones truncados com altura exposta de 25 mm e 37 mm de altura e britas basálticas com altura exposta de 30 a 37 mm. O procedimento de ensaio com cones truncados procurou estabelecer um padrão de ensaio para uso em diferentes laboratórios, com a possibilidade de comparação dos resultados obtidos.

Nestes ensaios, a geomembrana de PEAD foi mais suscetível à ruptura por puncionamento, comandada pelo material pontiagudo. Por sua vez, a geomembrana de PVC, por ser mais flexível, apresentou tendência de envolver o pedregulho e sofrer dano por um processo similar ao rasgo.

Nessa pesquisa, também foram realizados ensaios de carregamento estático em geomembranas de PEAD (espessura 1,5 mm) e PVC (espessura 1,0 mm) em contato com brita 3. O equipamento usado consistiu numa caixa metálica com dimensões internas de 500 x 500 mm na base e altura de 500 mm. Esta caixa foi instalada no interior de um pórtico onde eram executados carregamentos com uma prensa servo-controlada. O carregamento foi simulado durante um período de 100 horas, onde a geomembrana ou o conjunto geomembrana/camada de proteção foi submetido a uma etapa de carregamento crescente com incremento de 125 kPa por hora, nas quatro horas iniciais, até a pressão máxima de ensaio de 500 kPa que foi aplicada por um período de 96 horas. Depois de realizados os ensaios de carregamento estático foi verificado que não ocorreram perfurações ou descontinuidades na superfície das geomembranas de PVC e PEAD após a aplicação da sobrecarga durante a realização dos ensaios. Nestes testes foram avaliadas geomembranas isoladas e protegidas e, como, era de se esperar, as geomembranas desprotegidas foram as mais danificadas e apresentaram grandes decréscimos na resistência à tração, em comparação com a geomembrana virgem. Estes decréscimos para a geomembrana de PEAD foram da ordem de 19% na direção longitudinal e de 16% na direção transversal, e para a geomembrana de PVC foram da ordem de 11% na direção longitudinal e de 8% na direção transversal.

Fox *et al.* (2011) desenvolveram um programa experimental com geomembranas de PEAD (espessura nominal 1,5 mm) e PEBDL (espessura nominal 1,5 mm) aplicando uma tensão normal constante de 958 kPa durante 24 horas, em testes de pressão estática. O equipamento consistiu numa caixa de 305 mm x 1067 mm no plano. Para cada teste foi compactado um subleito de 75 mm de altura, depois foi colocada a geomembrana e por ultimo sobre a geomembrana foi arranjado sal de potássio com 50 mm de altura. Após 24 horas as amostras foram retiradas, imediatamente fotografadas e submetidas à luz intensa e testes de integridade de água. Ambas geomembranas apresentaram danos ao final do ensaio. Porém, os testes só produziram de pequenas a moderadas ondulações nas geomembranas, resultado de concentração de tensão de partículas grossas no solo. Geralmente as concentrações de tensão surgem de partículas grossas (cascalho, por exemplo) em um solo subjacente ou uma camada de drenagem sobrejacente.

Rebello (2009) realizou ensaios de carregamento dinâmico em geomembranas de PVC (1,0 mm) e PEAD (1,5 mm). O equipamento consistiu em duas caixas bipartidas de dimensões de 30 x 30 x 7,5 cm, cada uma, onde na caixa inferior foi compactada uma camada de solo argiloso e a caixa superior foi preenchida com brita. Para a aplicação da carga vertical foi utilizada uma Prensa Servo – Controlada, onde as amostras foram sujeitas a uma carga inicial de 200 kPa que foi aplicada para acomodação da brita. Após, o carregamento cíclico foi aplicado através de uma pressão sinusoidal de 200 e 400 kPa, ambas na frequência de 1 Hz (um carregamento por segundo). O número de ciclos foi variado, sendo aplicados 200, 500 e 1000 ciclos.

Os resultados destes ensaios mostraram que cada geomembrana se comporta de maneira diferente e quando estão sem proteção apresentaram diversos e inúmeros tipos de danos sobre sua superfície. Além disso, as geomembranas de PEAD possuem elevada resistência à punção e podem apresentaram danos principalmente sob a forma de arranhões e entalhes, danos que podem acelerar o mecanismo de *stress cracking*. Por sua vez, as geomembranas de PVC apresentaram danos na forma de deformações ou furos. Na pesquisa, primeiramente, os danos observados visualmente nas amostras de geomembranas foram classificados em cinco categorias de danos:

- Arranhão: ranhura superficial;
- Entalhe: arranhão mais profundo, sem perfuração da geomembrana;

- Indentação: punção pontual profunda remanescente e sem perfuração da geomembrana, com um importante decréscimo de espessura (marca do pedregulho);
- Furo: furo ou rasgo da geomembrana;
- Deformação: deformação da geomembrana devido à irregularidade da superfície ou devido à proeminência de um elemento graúdo, remanescente ou não, e sem redução visível de espessura.

A Figura 2.12 mostra a superfície das geomembranas de PEAD de 1,5 mm antes e após submetida a carregamento dinâmico e sob diferentes solicitações. Em todas as configurações foram verificados arranhões nas superfícies das geomembranas depois de submetidas ao carregamento dinâmico. Mesmo em ensaios com geotêxtil de proteção foram verificados os mesmos danos, porém em menor quantidade (Rebelo, 2009).

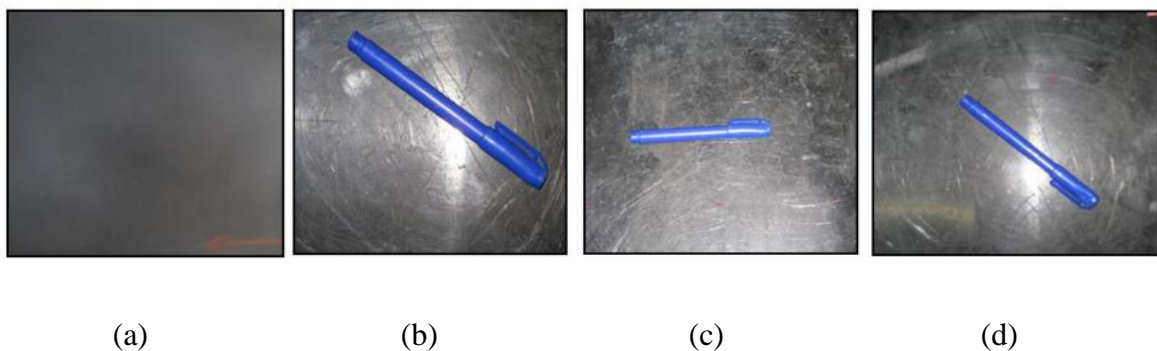


Figura 2.12 - Vista da superfície da geomembrana de PEAD (1,5 mm) (Rebelo, 2009):

(a) GM virgem; (b) GM sem proteção 200 kPa, 200 ciclos; (c) GM sem proteção 400 kPa, 200 ciclos; (d) GM com GTPET 600 200 kPa, 1000 ciclos.

A Figura 2.13 mostra a superfície das geomembranas de PVC de 1,0 mm antes e após o carregamento dinâmico, sob diferentes solicitações. Observa-se que, após o carregamento dinâmico, a superfície da geomembrana apresentou-se totalmente marcada pela brita. As marcas foram mais evidenciadas nos ensaios com maior carga e maior número de ciclos. Ao se introduzir o geotêxtil, verificou-se uma redução bastante significativa nas ondulações. No geotêxtil de gramatura de 600 g/m^2 , nenhuma marca foi verificada na superfície após o carregamento. Apesar dos efeitos verificados na superfície, em nenhuma solicitação constatou-se a presença de furos ou rasgos visíveis nas geomembranas de PVC (Rebelo, 2009).

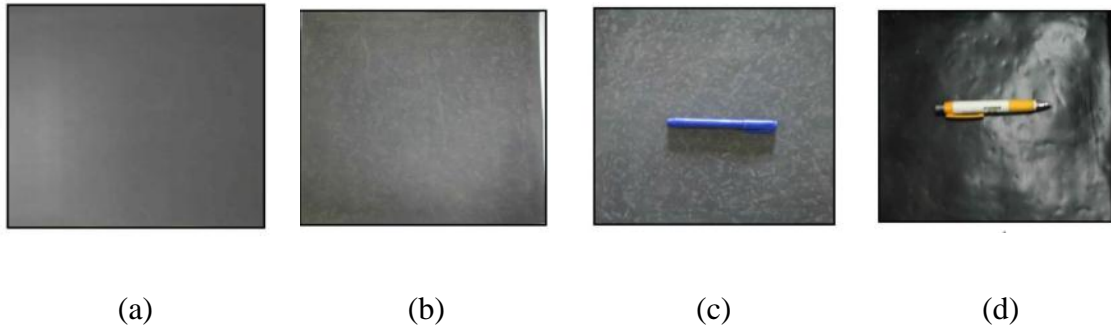


Figura 2.13 - Vista da superfície da geomembrana de PVC (1,0 mm) (Rebelo, 2009): (a) GM virgem; (b) GM sem proteção 200 kPa, 1000 ciclos; (c) GM sem proteção 400 kPa, 1000 ciclos; (d) GM com GT 300g/m² 200 kPa, 1000 ciclos.

As Figura 2.14 ilustra as superfícies das geomembranas de PEAD, após retirada da camada de drenagem, apresentando uma síntese dos tipos de danos observados.

Segundo essa pesquisa, a resistência à punção das geomembranas depende da resistência à tração da geomembrana. Geomembranas com menores valores resistência à tração (PVC) apresentam um elevado acréscimo de resistência com a introdução do geotêxtil. Por outro lado, geomembranas com maiores valores de resistência à tração (PEAD) apresentam baixos acréscimos de resistência. As análises mostraram que, como era de se esperar, a resistência à punção da geomembrana é proporcional a sua espessura. No entanto, este efeito é pequeno comparado ao efeito da introdução do geotêxtil. Além disso, a introdução de uma base de solo compactado aumenta a resistência à punção da geomembrana sem proteção.

Na pesquisa de Geroto (2008), a forma de classificação dos danos ocorridos na superfície da geomembrana, quando realizados os ensaios de carregamento estático, não é muito diferente de aquela adotada por Rebelo (2009), categorizando em:

- Arranhões: riscos e marcas ocasionadas pelo contato direto da brita;
- Entalhe: pequena deformação, sem a ocorrência de furo, devido à pressão da brita sobre a geomembrana;
- Entalhe profundo: Deformação profunda na superfície da geomembrana, com formação de estrias na parte oposta ao contato com a brita;
- Perfurações: Abertura que possibilita a passagem de um fluido ou gás, atravessando a superfície da geomembrana.

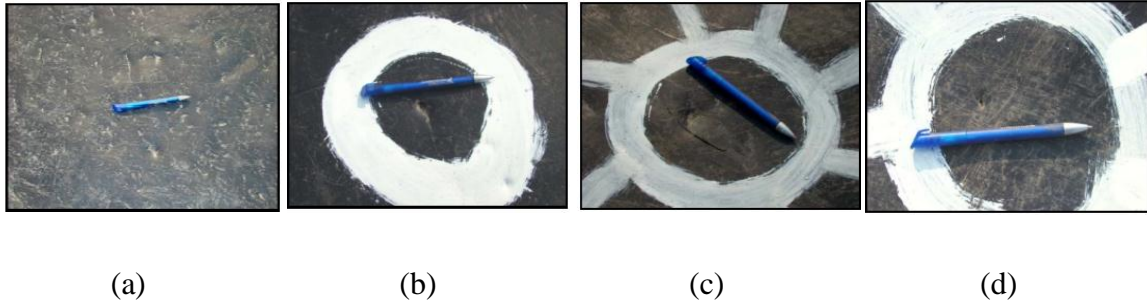


Figura 2.14 - Danos visuais - GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção e brita 3 (Rebelo, 2009): (a) arranhões; (b) furos; (c) entalhes; (d) indentação.

Nestes ensaios de carregamento estático foi possível verificar que, quando introduzida a camada de proteção, é impedida a ocorrência de arranhões e se minimiza a ocorrência de entalhes rasos e profundos na superfície das geomembranas.

Nessa pesquisa, nos ensaios de puncionamento hidrostático, as geomembranas de PVC, mais flexíveis, mostraram-se mais suscetíveis à ruptura por britas lamelares, ou seja, ruptura por rasgo. Durante a etapa de carregamento, a base com britas espaçadas permite a deformação da geomembrana de PVC nas regiões de vazios entre as britas e a base. No contato com as britas lamelares, ocorre a distribuição de tensões entre a superfície da geomembrana e a aresta destas britas. As deformações da geomembrana ocorridas na região próxima à face da brita geram solicitações de tração na superfície do material, ocasionando sua ruptura por rasgo. Ainda segundo o estudo, foi possível verificar, com a análise das amostras ensaiadas, deformações ocasionadas por puncionamento (britas pontiagudas) na superfície das geomembranas de PVC. No entanto, devido à flexibilidade do material, as tensões concentradas na ponta da brita não foram suficientes para ocasionar sua ruptura. A Figura 2.15 apresenta a ruptura da geomembrana de PVC por rasgo na região de contato com a aresta de britas lamelares.

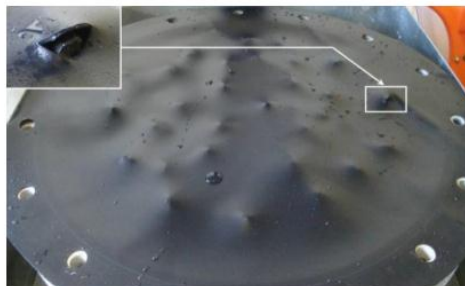


Figura 2.15 - Ruptura por rasgo em geomembrana de PVC (Geroto, 2008).

As geomembranas de PEAD, mais rígidas, mostraram-se suscetíveis à ruptura por britas pontiagudas, ou seja, ruptura por puncionamento. Devido à pouca flexibilidade do material, durante a etapa de carregamento da geomembrana de PEAD, ocorreu a concentração de tensões no contato da superfície da geomembrana com a ponta da brita. Esta concentração de tensões no contato ocasiona a ruptura por puncionamento da geomembrana, como pode ser observado na Figura 2.16 (Geroto, 2008).

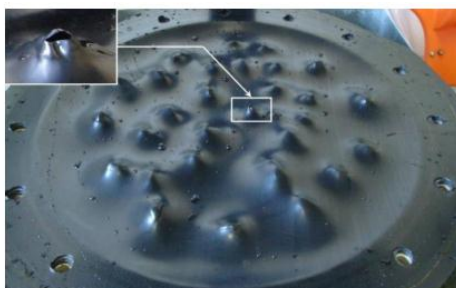


Figura 2.16 - Ruptura por puncionamento em geomembrana de PEAD (Geroto, 2008).

Geroto (2008) relata que no ensaio com a base de cones truncados, foi possível verificar que as geomembranas de PVC apresentaram desempenho superior quando comparadas às geomembranas de PEAD. O formato do cone truncado ocasiona uma concentração de tensões em sua ponta. Desta forma, foi possível observar para as geomembranas de PEAD, mais rígidas, uma redução da resistência ao puncionamento, quando comparadas às de PVC, mais flexíveis. Nestes ensaios com cones, a maior flexibilidade das geomembranas de PVC possibilitou ao material deformar-se o suficiente para apoiar determinadas regiões na base da câmara, preenchida com material granular, o que proporciona aumento na resistência à punção, devido à distribuição das tensões pela superfície do material em contato com o cone. No caso das geomembranas de PEAD, as deformações ocorridas no material não são suficientes para proporcionar este contato, o que gera rupturas com pressões mínimas. A Figura 2.17 ilustra a conformação das geomembranas isoladas de PVC e PEAD no contato com os cones truncados, o que influencia diretamente a distribuição de tensões junto aos contatos dos cones.

Outra pesquisa desenvolvida com ensaios de dano mecânico foi realizada por Nascimento (2002), na qual foram utilizadas geomembranas de PVC com diferentes espessuras em contato com areia grossa, micro esferas de vidro e rejeito de mineração de ferro. O equipamento utilizado consistiu de duas peças cilíndricas em aço inoxidável com 60 mm de diâmetro e 50 mm de altura, cada uma. Nos ensaios realizados foram

aplicadas tensões de 300, 500 e 1000 kPa para as areias e micro-esferas de vidro. Os resultados mostraram que, para carregamento maiores, surgem na superfície da geomembrana uma quantidade maior de deformações, aumentando a área de contatos com o nível de tensões, porém não existe uma relação direta de aumento da porcentagem de contato grão – geomembrana, à medida que aumenta a espessura da amostra de geomembrana para um mesmo carregamento. Além disso, o foi observada, em uma primeira análise visual, que eram impressas na superfície das geomembranas diferentes formas e dimensões de áreas de contato, dependendo do carregamento aplicado e da proteção ou não com geotêxtil. Entretanto, com relação ao tipo de geomembrana (PVC de 0,5; 1,0 ou 2,0 mm de espessura), as formas das áreas de contato mantiveram-se similares, variando apenas em quantidade, em função do tipo de geomembrana.

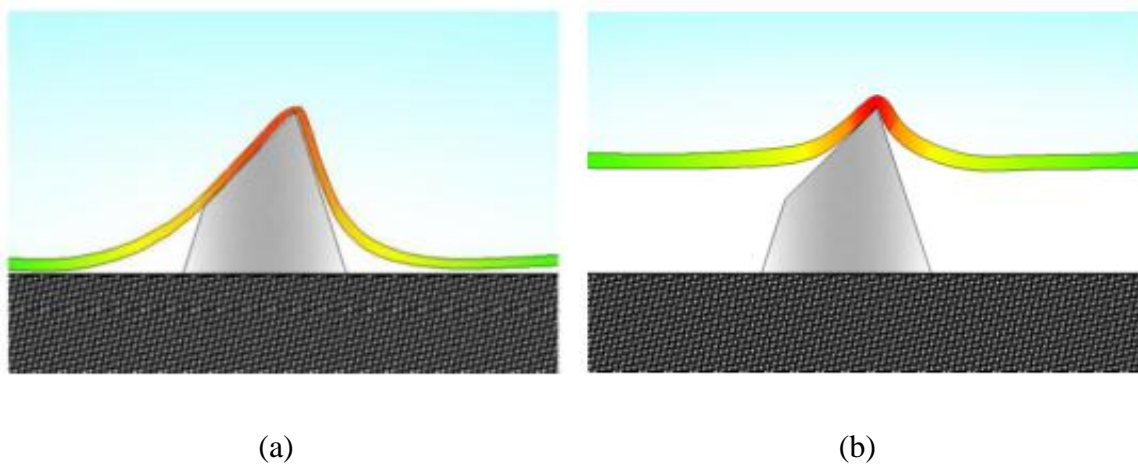


Figura 2.17 - Ilustração da distribuição das tensões no contato das geomembranas com o cone (Geroto, 2008): (a) contato da GM de PVC com cone (b) contato da GM de PEAD com cone.

CAPITULO 3 – METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Neste capítulo são descritos os equipamentos utilizados nos ensaios realizados para a avaliação dos danos em geomembranas. Na pesquisa foram empregados dois tipos de equipamentos, um de média escala e outro de pequena escala, onde se simulam aterros sanitários e outras obras hidráulicas. O uso de cada um depende do tamanho do material granular a ser utilizado. Neste capítulo também são detalhados os materiais utilizados nesta pesquisa: os tipos de geomembranas, de materiais granulares (areia, rejeito de ferro e ouro, brita 3), os materiais para a obtenção das áreas de contato entre a geomembrana e o material granular, além de outros materiais secundários. Por fim, são descritos os procedimentos usados na realização dos ensaios de dano mecânico e de resistência à tração de faixa larga.

3.1- EQUIPAMENTOS

3.1.1- EQUIPAMENTO DE PEQUENA ESCALA

O equipamento de pequena escala utilizado durante a pesquisa, foi projetado e construído na Universidade de Brasília (UnB). É composto por duas partes principais: a célula de ensaio e o sistema ar-água. Ele permite a realização de ensaios de dano mecânico gerado por materiais granulares por compressão em geossintéticos submetidos a altos carregamentos. O equipamento foi desenvolvido por trabalhos de Nascimento (2002). Na Figura 3.1 pode-se observar esse equipamento durante a realização de ensaio e desmontado.

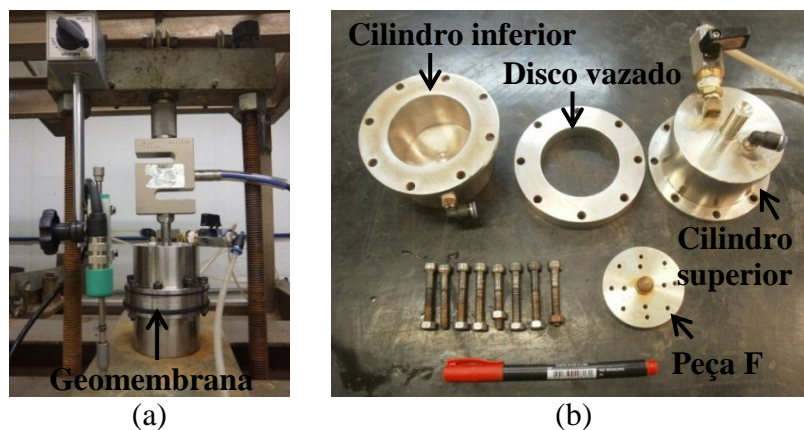


Figura 3.1 - Equipamento de dano mecânico de pequena escala: (a) ensaio montado, (b) equipamento desmontado.

3.1.1.1- CÉLULA DE ENSAIO

A célula de ensaio está constituída de aço inoxidável e permite a aplicação de tensões de até 2000 kPa sobre a amostra ensaiada, podendo ainda ser adaptado para carregamentos maiores. O equipamento está composto por três partes: um cilindro inferior, o qual é preenchido com o material granular subjacente. Na porção central do equipamento é colocada a amostra de geomembrana a ser analisada, ou seja, é colocado um disco vazado em sua parte central, o qual é preenchido com o material granular sobrejacente à geomembrana. A tensão vertical sobre as amostras de solo e do geossintético é aplicada por uma placa rígida perfurada (Peça F, na Figura 3.2). Por fim, é posicionado o terceiro cilindro sobre o disco vazado e, todo o sistema é fixado com os parafusos (Figura 3.1b). A parte superior do equipamento possui duas conexões, uma delas permite a passagem de água pressurizada desde o sistema câmara ar-água, de tal modo que se obtenha uma pressão uniforme sobre a placa rígida F da Figura 3.2 simulando a coluna de água sobre o solo e a geomembrana. A segunda conexão funciona como extravasor do sistema durante o enchimento do cilindro superior com a água.

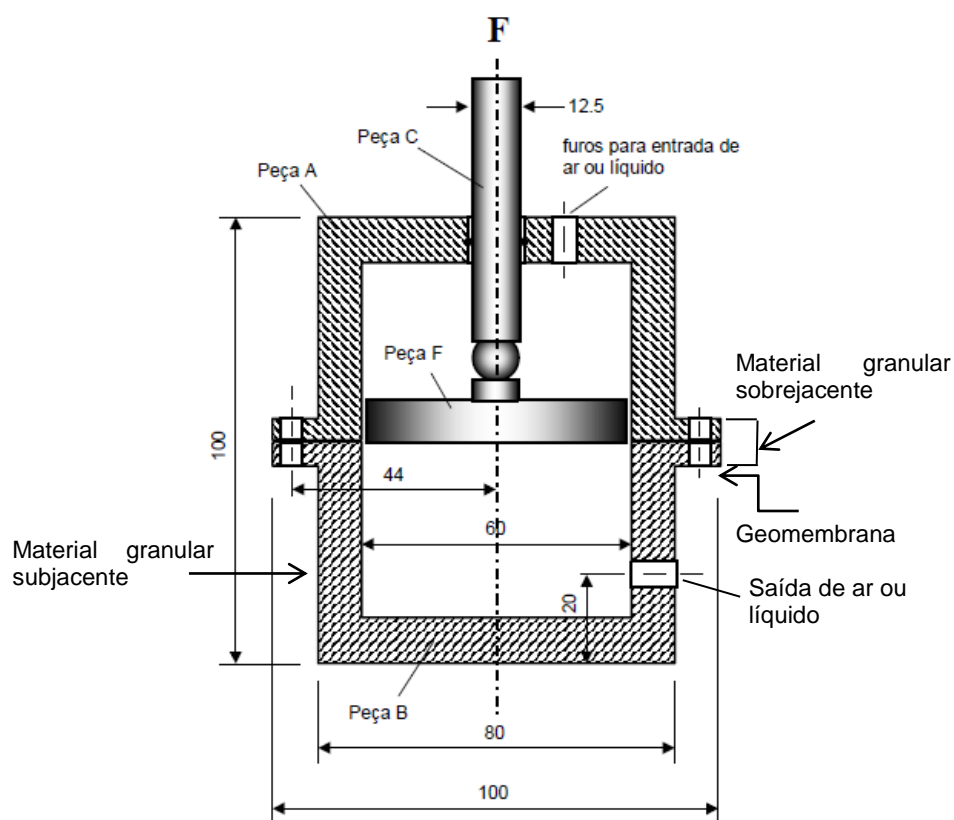


Figura 3.2 - Equipamento de dano mecânico de pequena escala – Dimensões em (mm)
(modificado - Nascimento, 2002).

No eixo F da Figura 3.2 encontra-se um pistão, o qual está em contato direto com a célula de carga. A tensão vertical aplicada sobre a camada de solo subjacente é gerada por meio de um macaco (Figura 3.3) que aplica uma força de compressão sobre o pistão, simulando assim o carregamento sobre a geomembrana. O macaco encontra-se fixado a um sistema de reação de ensaios de adensamento (Figura 3.3).

Para verificar a ocorrência de vazamentos através da geomembrana, em decorrência de danos ocorridos durante o ensaio, o cilindro inferior possui um furo de saída de água, por meio do qual se podem fazer medições de vazão.

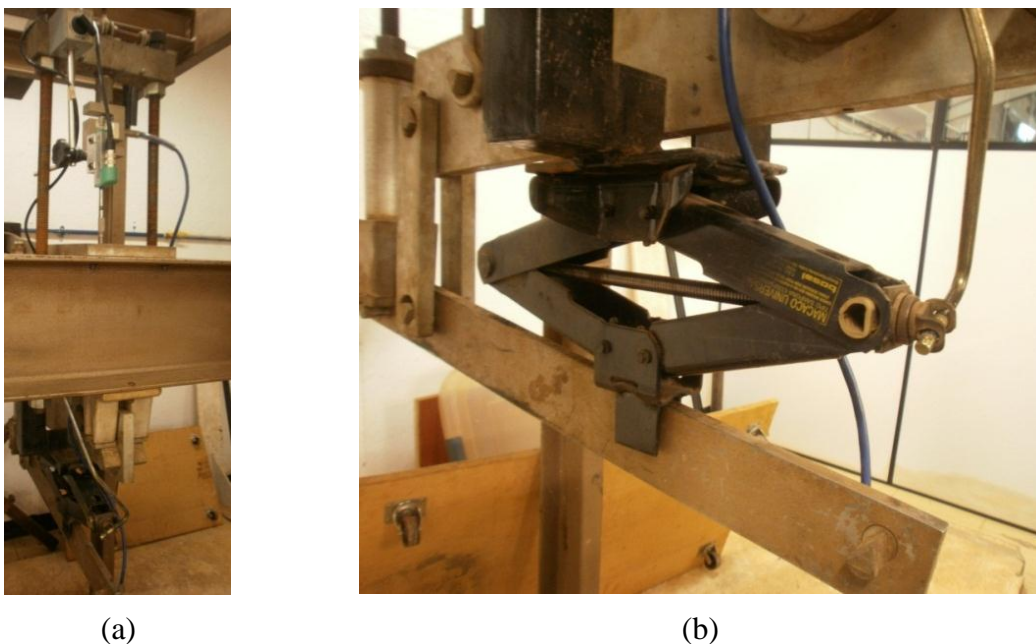


Figura 3.3 - Visão da prensa de ensaios: (a) prensa de ensaios, (b) macaco hidráulico.

3.1.1.2- SISTEMA AR-ÁGUA

O sistema ar-água utilizado neste equipamento foi fabricado pela empresa *Wykeham Farrance Engineering LTD*. O equipamento estava disponível no laboratório de Geotecnia da UnB. O sistema para aplicação de pressão está ligado a um compressor de ar, que aplica pressão sobre água que alimenta o cilindro superior. Por sua vez, o compressor é da marca *Schultz* e tem uma capacidade nominal de até 1200 kPa.

A interface tem altura de 19 cm e diâmetro de 9,5 cm e, é usada para simular a coluna de água no sistema.

O sistema de aplicação de pressão possui três conexões na sua parte superior (Figura 3.4). Uma delas permite o enchimento da câmara com água, e, depois de cheia, permite a entrada de ar pressurizado. Ao entrar na câmara, o ar exerce uma pressão uniforme sobre a coluna de água. A segunda conexão permite a saída de água pressurizada até o cilindro superior, permitindo seu enchimento de tal forma que se exerce pressão sobre o solo. Por fim, a terceira conexão funciona como extravasor do sistema, deixando sair a água e o ar do sistema durante o enchimento da câmara. Para o controle da pressão aplicada utiliza-se um manômetro com válvula reguladora de pressão.

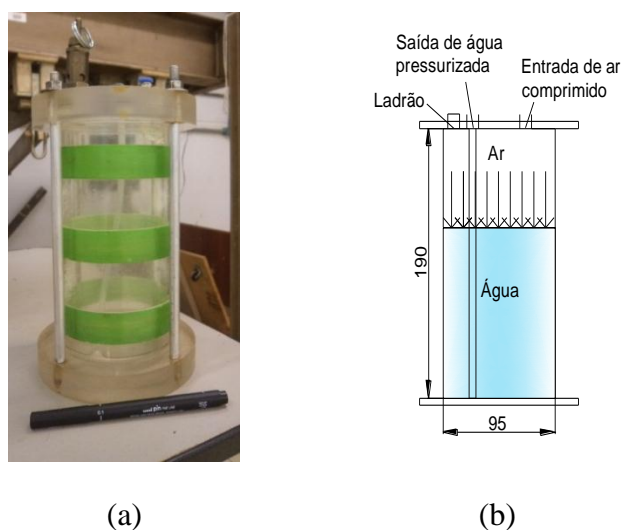


Figura 3.4 - Sistema ar-água para coluna de água: (a) visão do sistema, (b) esquema do sistema (Dimensões em mm).

3.1.1.3- INSTRUMENTAÇÃO

Nos ensaios, foi utilizada uma célula de carga posicionada entre a estrutura de reação da prensa de ensaios e o pistão do equipamento. A célula de carga permite fazer leitura dos valores de compressão e conseqüentemente da pressão de solo aplicada. A célula de carga é da marca *Kratos* com capacidade nominal de 20 kN e está ilustrada na Figura 3.5a. Foi também utilizado um medidor de deslocamento linear produzido pela empresa *Gefran* (Figura 3.5a) com curso de cinco centímetros. O medidor de deslocamento linear foi posicionado sobre a estrutura de reação da prensa de ensaios, medindo os deslocamentos do conjunto solo-geomembrana dentro do equipamento. O medidor de deslocamento linear e a célula de carga foram ligados a um sistema de aquisição de

dados fabricado pela empresa *HBM* modelo *Quantum X*. Ele possui oito (8) canais com um conector de quinze (15) pinos em cada canal. Os sinais lidos pelo *Quantum* são transferidos ao computador, no qual está instalado o software *Catman AP version 3.4.2*, que permite a coleta de dados simultaneamente de todos os instrumentos. Na Figura 3.5b pode se ver o sistema de aquisição de dados e o computador utilizado nesta pesquisa.



(a)

(b)

Figura 3.5 - Instrumentação: (a) célula de carga e medidor de deslocamento linear, (b) aquisitor de dados e computador.

3.1.2. EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA

O equipamento de laboratório de média escala utilizado nesta pesquisa foi projetado e construído na Universidade de Brasília. Este é composto por três partes principais: uma célula de dano mecânico e dois sistemas ar-água (Figura 3.6). O emprego deste equipamento foi baseado levando-se em consideração o maior tamanho dos grãos a serem ensaiados (material granular grosso).

O equipamento permitiu a aplicação de cargas de até 500 kPa. Nos ensaios, foi possível simular alturas de aterro sobre a geomembrana e a altura da coluna de água, em relação à base do aterro, por aplicação de pressões hidrostáticas. As alturas de aterro simuladas foram: 6,90 m; 13,79 m; 20,69 m; 34,48 m; 68,97 m e, as respectivas pressões de água foram: 67,66 kPa; 135,31 kPa; 202,97 kPa; 338,28 kPa; 676,55 kPa.

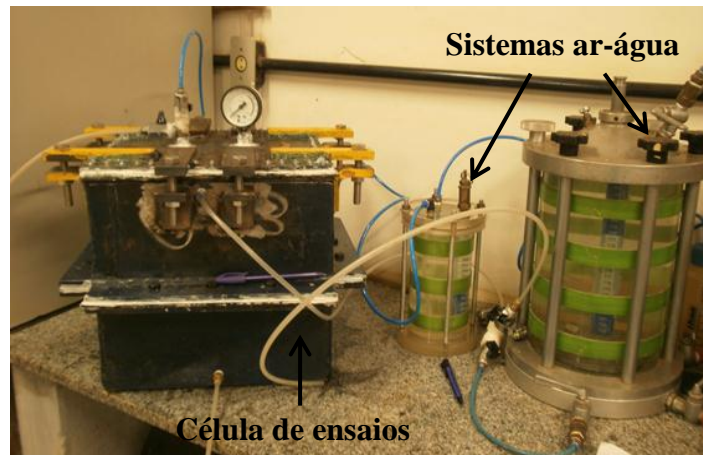


Figura 3.6 - Vista geral do equipamento de média escala.

3.1.2.1- CÉLULA DE ENSAIO

A célula consiste em duas caixas metálicas e uma tampa. A altura da caixa inferior é de 14 cm e da caixa superior é de 15 cm, ambas têm face interna de 32 cm e paredes de 1 cm. A tampa tem 34 cm de lado e 2 cm de espessura. Em sua porção inferior, a tampa tem fixada uma membrana de borracha. Dentro da membrana de borracha é inserida água para seu inflamento, permitindo a aplicação de pressões de até 500 kPa por meio de um sistema de ar comprimido e uma câmara ar-água. A célula de ensaios é apresentada na Figura 3.7.

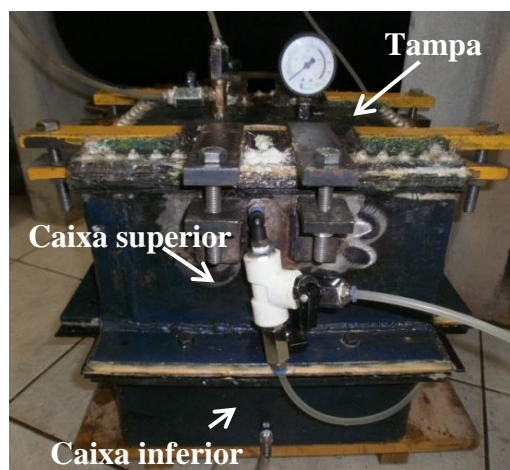


Figura 3.7 - Peças da célula de ensaios montada.

Na caixa inferior é colocado o material granular subjacente, e sobre este, uma geomembrana a ser ensaiada. Em seguida, a caixa superior é situada sobre a caixa

inferior e ambas são fixadas uma à outra. Dentro da caixa superior é colocado o material granular sobrejacente, e, finalmente é posicionada a tampa do equipamento.

A membrana de borracha fixada no interior da tampa permite aplicar pressão, e assim, simular diferentes alturas de aterro sobre a geomembrana (Figura 3.8a). A borda da caixa superior está em contato com a borda da tampa. Nesse contato borda superior/tampa foi necessário colocar uma membrana de borracha fixada com cola vedante na borda da caixa superior para permitir a vedação do sistema (Figura 3.8b).



Figura 3.8 - Célula de ensaios: (a) membrana de borracha na tampa, (b) membrana de borracha colada na borda da caixa superior.

A tampa apresenta dois furos: um para instalação do manômetro de medição de pressão dentro da bolsa de borracha e o outro, com duas válvulas fixadas, a primeira válvula regula a entrada de água pressurizada e a segunda funciona como alívio (Figura 3.9).

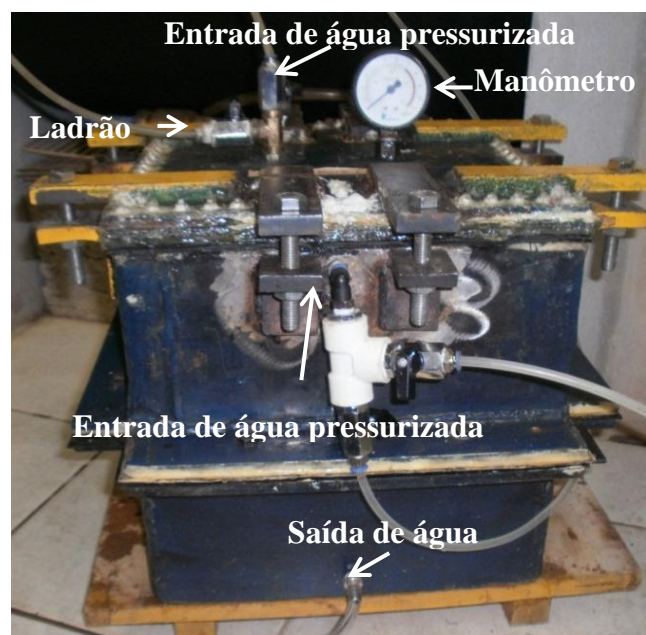


Figura 3.9 - Visão da Célula de ensaios.

Ao prever possíveis furos na geomembrana devido ao puncionamento pelo material granular (dano mecânico), foi necessário fazer um furo de saída de água na caixa inferior perto da sua base para permitir medições de vazão através da geomembrana (Figura 3.9).

A caixa superior possui um orifício perto da sua borda superior e neste estão acopladas duas válvulas (Figura 3.9). Uma válvula está ligada ao sistema ar-água e sua função é regular a entrada de água a pressão à caixa, permitindo a aplicação de pressão hidrostática. A outra válvula tem a função de servir como extravasor do sistema.

Um esquema da célula de ensaios pode ser observado na Figura 3.10.

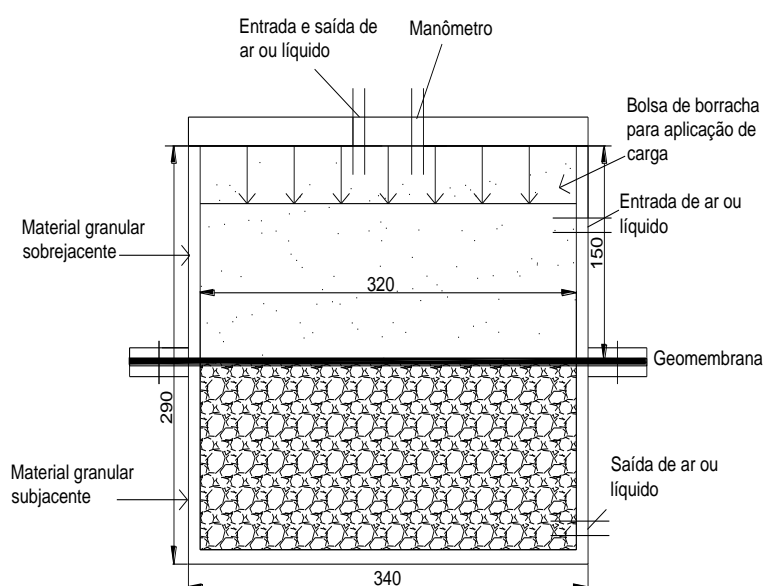


Figura 3.10 - Desenho esquemático da célula de ensaios – Dimensões em mm.

3.1.2.2- SISTEMAS AR-ÁGUA

Os sistemas ar-água utilizados nesta pesquisa, como detalhado acima, foram fabricados pela empresa *Wykeham Farrance Engineering LTD*. Foram utilizadas pois já estavam disponíveis no laboratório de Geotecnia da UnB. As interfaces ar-água usadas são transparentes e, de tal modo, permitem o acompanhamento do nível de água mediante fita métrica. A interface usada para aplicação dos carregamentos tem altura de 19 cm e a usada para simular a coluna de água no sistema tem altura de 33,6 cm. Os diâmetros das câmaras são de 9,5 cm e 19,0 cm, respectivamente.

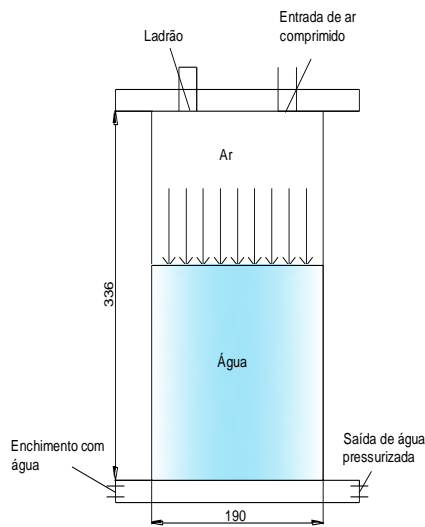
O sistema ar-água usado na aplicação de pressões na bolsa de borracha, foi a mesma câmara usada para simular a coluna de água nos ensaios de dano mecânico de pequena escala, citada anteriormente (Figura 3.4).

Anteriormente, foi detalhado o funcionamento do sistema ar-água. Nestes ensaios a câmara funciona de maneira similar a os ensaios de pequena escala. A diferença é que neste sistema, a água pressurizada é encaminhada até o cilindro superior da célula de ensaios, e, os valores de pressão aplicada são 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa e 500 kPa.

O sistema de aplicação de pressão usado para simular a coluna de água possui duas conexões na sua parte superior e duas na sua parte inferior (Figura 3.11). Uma das conexões da parte superior permite a passagem de ar à câmara. Outra conexão funciona como um extravasor (ladrão) do enchimento da câmara. Na parte inferior, uma das conexões tem a função de enchimento e a outra conexão permite a saída da água pressurizada, que vai até a caixa superior do equipamento com a finalidade de simular a coluna de água. A água pressurizada é transportada por mangueiras preparadas para suportar altas pressões.



(a)



(b)

Figura 3.11 - Sistema ar-água para coluna de água: (a) visão do sistema, (b) esquema do sistema (Dimensões em mm).

3.1.2.3- INSTRUMENTAÇÃO

Em todos os ensaios foram empregados três manômetros analógicos. O primeiro manômetro está ligado a uma válvula reguladora, por meio da qual se controla a pressão aplicada na bolsa de borracha. Este conjunto recebe o ar que transportado desde o compressor, por tubulação própria. Devido às perdas próprias do sistema de transporte de ar comprimido, foi necessário colocar outro manômetro na tampa, de forma que possa ser medida a pressão real que está sendo aplicada dentro da membrana de borracha. O terceiro manômetro também está ligado a uma válvula reguladora que auxilia a controlar a pressão que é aplicada para simular a coluna de água.

Os três manômetros foram fabricados pela empresa *Arprex*. Cada um, permite medir até 1100 kPa de pressão (Figura 3.12).

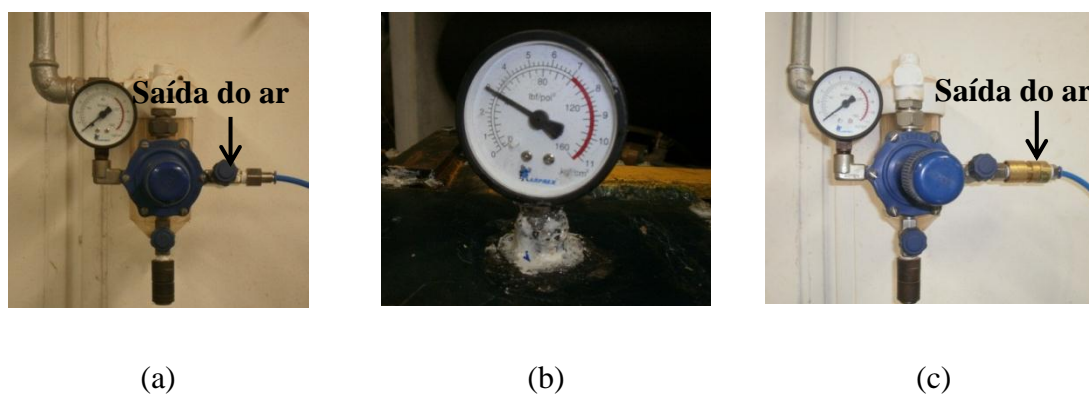


Figura 3.12 - Manômetros: (a) manômetro ligado ao compressor e à tampa, (b) manômetro da tampa. (c) manômetro para coluna de água.

3.1.3. OUTROS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Durante a pesquisa foram utilizados ainda os equipamentos listados a seguir:

➤ Microscópio eletrônico: empregado para observar as características superficiais dos grãos dos materiais granulares. Foi utilizado microscópio fabricado pela empresa *Avantgarde* do modelo *Avantscope Maxx*. Ele possui um dispositivo manual de foco, um sensor de imagem de 1,3 mega pixels, um cabo USB que se conecta ao computador, e uma ampliação máxima de até 200 vezes. As imagens são obtidas e trabalhadas por meio de software confeccionado para o microscópio (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Outros equipamentos utilizados: microscópio.

3.2- MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1- GEOMEMBRANA

A escolha das geomembranas utilizadas nesta pesquisa foi baseada na sua utilização frequente nas bases das barragens de contenção de rejeitos e aterros sanitários, além de sua disponibilidade no Brasil. As geomembranas escolhidas foram: geomembranas de PVC e PEAD lisas de 1,0 mm e 2,0 mm de espessura cada uma. As principais especificações técnicas das geomembranas obtidas em catálogos do fabricante são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações técnicas das geomembranas utilizadas (Dados do fabricante).

Propiedades	Unidades	PVC		PEAD	
Espessura	mm	1.0	2.0	1.0	2.0
Resistência à Tração	kN/m	10	25	27	53
Alongamento na Ruptura	%	300	200	700	700
Resistência ao Rasgo	N	25	65	125	249
Resistência ao Puncionamento	N	180	350	320	640

3.2.2- MATERIAL GRANULAR

De acordo com os materiais comumente utilizados nas barragens de contenção de rejeito e os danos que podem causar sobre as geomembranas, foram escolhidos para os ensaios de dano mecânico os seguintes materiais: areia média a grossa, rejeito de mineração de ferro e ouro, e brita 3.

A areia média a grossa usada é encontrada normalmente no mercado da construção civil do Distrito Federal (Figura 3.14c) Os rejeitos de mineração proveniente de minério de ouro e de ferro (Figura 3.14a e Figura 3.14b) estavam disponíveis no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e são oriundos de minas localizadas em Minas Gerais, Brasil.

A brita 3 utilizada foi a mesma usada na pesquisa de Sampaio (2013). Este material foi utilizado no 3º alteamento da barragem de contenção de rejeitos de Jacobina - BA, que é proveniente das atividades de beneficiamento da Jacobina Mineração e Comercio, empresa do Grupo Yamana Gold. A barragem de rejeitos de Jacobina foi implantada no estado da Bahia em 2008 para armazenamento dos rejeitos gerados durante os próximos 20 anos de operação da mina. A brita 3 foi obtida do estoque de material presente na mina (Sampaio, 2013). A brita 3 é apresentada na Figura 3.14d.

Na areia e no rejeito de ferro e ouro foram realizados ensaios de Análise Granulométrica (NBR 7181 ABNT, 1984), Massa Específica dos Grãos (NBR 6508 ABNT, 1984), Índice de Vazios Mínimo de Solos Não-Coesivos (MB 3388 ABNT, 1991) e Índice de Vazios Máximo de Solos Não-Coesivos (MB 3324 ABNT, 1990). Por sua vez, para caracterização da brita 3 foi realizado ensaio de Análise Granulométrica (NBR 7181 ABNT, 1984), Agregados - Determinação da massa unitária e volume de vazios (NBR/NM 45:2006). A Figura 3.15 mostra a Curva Granulométrica dos materiais granulares empregados na pesquisa.

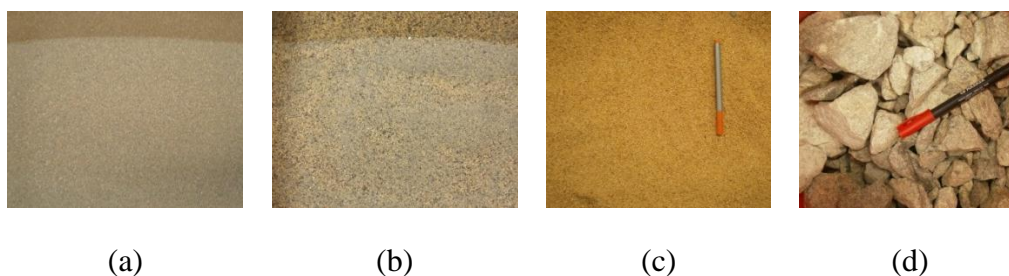


Figura 3.14 - Material granular: (a) rejeito de ouro (b) rejeito de ferro, (c) areia médio-grossa, (d) brita 3.

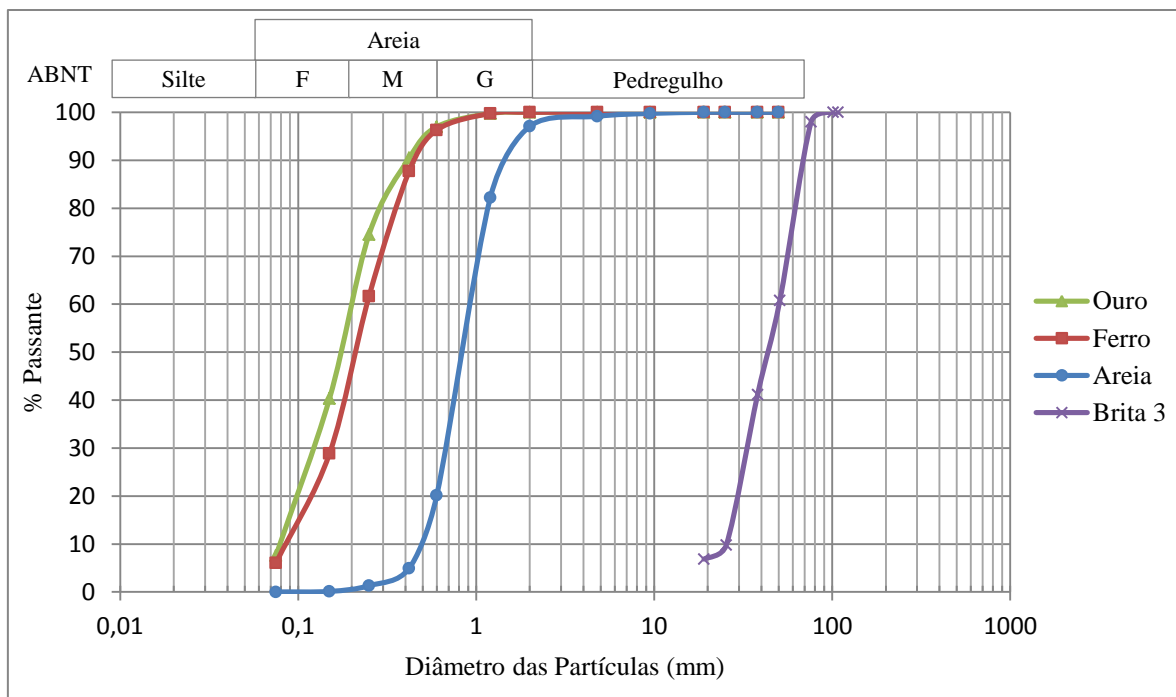


Figura 3.15 - Curvas granulométricas dos materiais granulares.

Os ensaios, tanto no equipamento de pequena escala quanto no de média escala, foram realizados com uma mesma densidade relativa, com a finalidade de comparar os resultados nas mesmas condições de compactação relativa. Para uma compactação adotada de aproximadamente 50% (valor normalmente adotado para areias medianamente compactas), pode-se calcular o valor do índice de vazios da areia e de ambos os rejeitos, e conseqüentemente o peso específico seco. Assim, pode-se garantir que todos os ensaios estejam nas mesmas condições de densidade. No caso da brita 3, com o valor da massa unitária e o volume da célula de ensaios do equipamento de média escala, obteve-se o valor da massa necessária em cada ensaio, conservando a mesma densidade. Algumas características relevantes sobre os materiais acima listados e das condições destes utilizadas nos ensaios são apresentadas na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3. A forma dos grãos da areia, de rejeito de ferro e rejeito de ouro podem-se ver na Figura 3.16.

Tabela 3.2 – Características da Brita 3 utilizada.

	Massa Unitária g/cm ³	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	Coefficiente de Uniformidade (c _u)	Coefficiente de Curvatura (c _c)
Brita 3	1,51	26,0	44,0	1,92	0,89

Tabela 3.3 – Características dos materiais granulares utilizados.

	Areia	Rejeito de Ouro	Rejeito de Ferro
Massa Específica dos Grãos (ρ_s) g/cm ³	2,67	2,92	3,39
Índice de Vazios Mínimo (e_{min})	0,73	0,96	0,69
Índice de Vazios Máximo (e_{max})	0,88	1,14	0,84
Compacidade Relativa (CR) %	50	50	50
Peso Específico Seco (γ_d) kN/m ³	14,50	13,96	18,84
D_{10} (mm)	0,50	0,080	0,085
D_{50} (mm)	0,81	0,18	0,21
Coefficiente de Uniformidade (c_u)	1,80	2,50	2,82
Coefficiente de Curvatura (c_c)	1,06	1,06	1,25

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

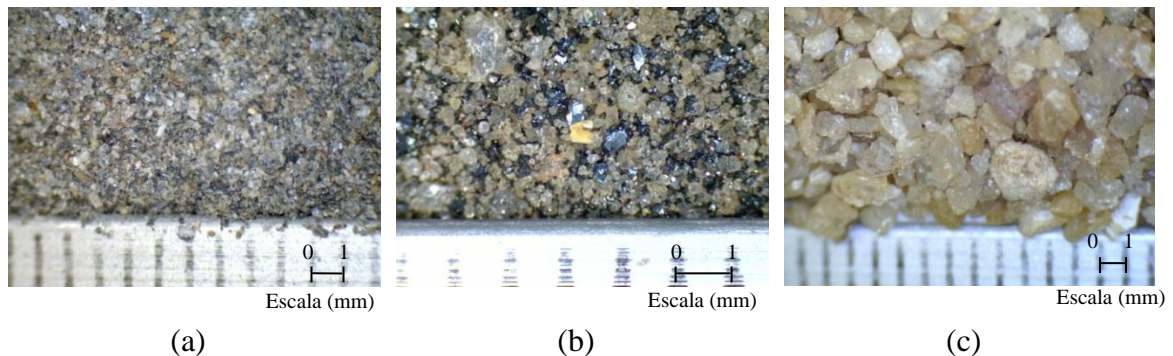


Figura 3.16 – Forma dos grãos do material granular: (a) rejeito de ouro, (b) rejeito de ferro, (c) areia médio-grossa.

3.2.3- OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS

Outros materiais de apoio foram utilizados durante a pesquisa e são listados a seguir:

➤ Filme indicador de pressão: Com o intuito de visualizar e estimar a distribuição da pressão aplicada pelos grãos do material granular (brita e areia) sobre a geomembrana foi utilizado, para o caso do equipamento de média escala, um filme indicador de pressão *Pressurex-micro*® *Green*, da empresa *Sensor Products Inc.*. O filme é extremamente fino e flexível (0,2 mm), o que permite se adaptar às superfícies curvas. O filme é composto por duas folhas, uma receptora e uma doadora. A folha doadora é impregnada por partículas microscópicas pigmentadas que são atraídas para a folha

receptora de superfície tratada quimicamente. O revestimento da folha receptora foi formulado para criar uma ligação não covalente com o revestimento da folha doadora, como descrito pela equação da força de van der Waals. A compatibilidade química entre a folha receptora e a folha doadora causa difusão intermolecular, que cria uma rede de interpenetração entre o doador e o pigmento de revestimento receptor. Após a separação, as forças de micro-cisalhamento obrigam as partículas desalojar o substrato doador pigmentado, deixando uma impressão (Pressurex-micro® Green, SPI, 2013). O Filme é apresentado na Figura 3.17a.

➤ Folha de alumínio: Foi empregada nos ensaios de dano mecânico uma folha de Alumínio (espessura de 0,01 mm) de uso doméstico da marca *Boreda* para obtenção das áreas de contato entre o rejeito de ouro, o rejeito de ferro e a geomembrana. A folha de alumínio era sempre colocada entre o rejeito e a geomembrana (Figura 3.17b).

➤ Borracha natural: Utilizou-se borracha natural com espessura de 1,5 mm com função de vedar a saída da água nas células de ensaio. A borracha também foi utilizada para criação da bolsa de aplicação de pressões para simulação do aterro dentro da célula de ensaios do equipamento de média escala (Figura 3.17c).

➤ Cola Vedante: Como ajuda à vedação da fuga da água dos equipamentos, fez-se uso de cola vedante *Pesilox Fix Tudo - Cola Vedante ExtraForte* da empresa *Adesivos Especiais* (Figura 3.17d).

➤ Vaselina sólida e filme plástico: Foi colocada vaselina nas paredes internas das células de ensaios, e em cima desta, usou-se um filme plástico para reduzir o efeito do atrito lateral entre o material granular e as paredes internas.

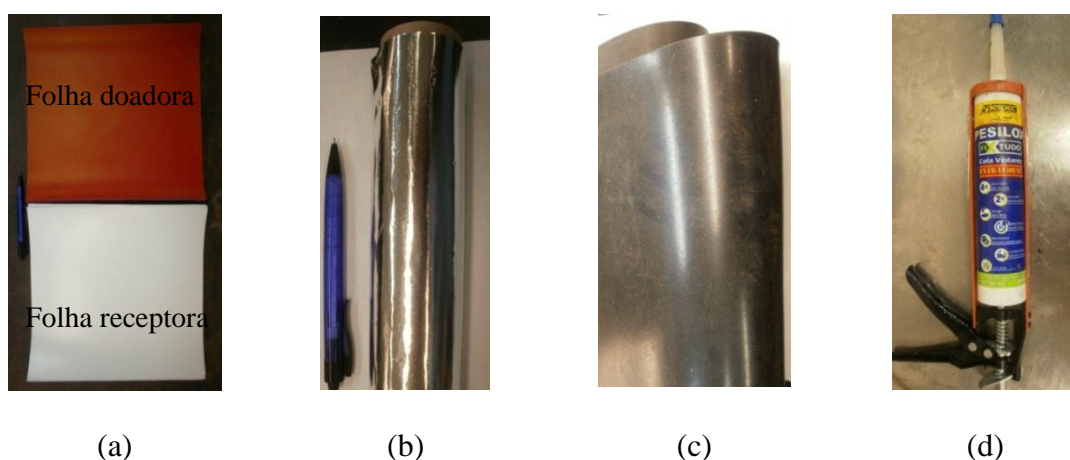


Figura 3.17 - Outros materiais utilizados: (a) filme indicador de pressão, (b) folha de alumínio, (c) borracha natural e (d) cola vedante.

3.3- METODOLOGIA DA PESQUISA

3.3.1- PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE GEOMEMBRANA

Quando da preparação das amostras, a manta de geomembrana foi colocada sobre uma superfície limpa e plana. Logo, para realização dos cortes das amostras, foram desprezadas a duas primeiras voltas do rolo de geomembrana e os 10 cm externos de cada borda visando-se evitar problemas com amostra devido à fabricação.

A seguir, foram então cortadas quarenta amostras de geomembrana com 10 cm de diâmetro, de acordo com o diâmetro externo da célula de ensaios do equipamento de menor porte utilizado nesta pesquisa.

Além disso, para os ensaios no equipamento de média escala, foram cortadas dezesseis amostras quadradas de geomembrana com 44 cm de lado, em conformidade com o tamanho da caixa de ensaios.

Após a realização de seus cortes, as amostras foram armazenadas em sacolas plásticas para evitar que fossem manuseadas e impedir possíveis alterações em suas propriedades.

3.3.2- PREPARAÇÃO DA AREIA

A quantidade de amostra separada para cada ensaio no equipamento pequeno foi de 167,25 g. Esta foi arranjada no cilindro inferior do equipamento pequeno (Figura 3.18) utilizando chuva de areia e compactação com golpes (como detalhado em 3.3.5.2), visando manter a densidade constante em todos os ensaios. Na compactação da areia, a determinação da quantidade de golpes por camada foi encontrada por tentativas até obter o número de golpes por camadas que resultasse no preenchimento integral do cilindro com a quantidade de material calculada.

No equipamento de média escala, a quantidade de areia usada foi 22,71 kg para cada ensaio. A areia foi deixada num recipiente saturando com água destilada (em tempo mínimo de uma hora), com o filme de água maior que a altura do material dentro do recipiente. Após a saturação, a areia era colocada dentro da caixa superior de ensaios (Figura 3.19).



Figura 3.18 - Arranjo da areia dentro do cilindro inferior.



Figura 3.19 - Areia saturada dentro da caixa superior do equipamento de média escala.

3.3.3- PREPARAÇÃO DO REJEITO

Para preparação do rejeito de mineração em termos de saturação, inicialmente a porção central do equipamento (vazada) foi colocada dentro de uma bandeja, posicionado sobre uma pedra porosa, previamente saturada. Dentro do cilindro e em cima da pedra porosa foi colocado um papel filtro. Em seguida, sobre este conjunto foi arranjado o rejeito de ferro ou rejeito de ouro, pelo método de chuva de areia (permite obter uma massa homogênea e uniforme) feita em três (3) camadas de 0,5 cm de espessura cada uma. Cada camada depois da chuva de areia foi compactada com a aplicação de golpes, os quais foram determinados por tentativas até obter o número de golpes por camada que resultasse no preenchimento do disco vazado com a quantidade de material calculado.

Após essa etapa, a bandeja foi cheia com água destilada até um 80% da altura da pedra porosa, com a finalidade de saturar a amostra de rejeito por ascensão capilar. As amostras foram deixadas saturando por um tempo de 30 minutos e foram fechadas com

filme plástico, para evitar que a amostra ficasse seca pela ação do ambiente (Figura 3.20).

A quantidade de amostra a utilizada para os rejeitos foram 81,45 g e 60,49 g para o rejeito de ferro e o rejeito de ouro, respectivamente. Finalmente, depois de saturadas, o sistema estava pronto para serem montados os ensaios.

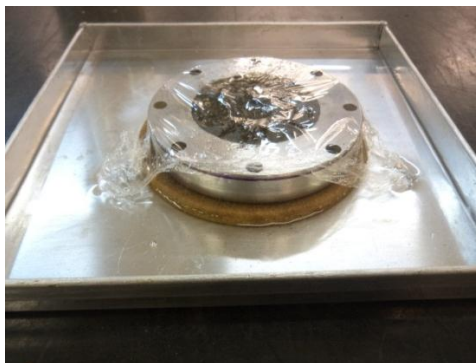


Figura 3.20 – Preparação do rejeito de ouro.

3.3.4- PREPARAÇÃO DA BRITA

Com o valor da massa unitária da brita 3 e o volume da caixa inferior do equipamento, é possível obter a quantidade de material a ser utilizado em cada ensaio (21,63 kg). Com esta quantidade de material, foi simulada a mesma granulometria encontrada no estoque da mina (local de onde foi tirada a brita 3).

3.3.5- MONTAGEM DOS ENSAIOS

3.3.5.1- EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA

A montagem do ensaio é iniciada com a colocação da vaselina nas paredes internas das células inferior e superior do ensaio objetivando a sua lubrificação. Esse lubrificante é colocado sob um filme plástico de revestimento, exercendo a função de reduzir o atrito lateral entre o material granular e as paredes internas do equipamento (Figura 3.21a).

Após isso, a caixa inferior é preenchida com a brita 3, colocada manualmente uma ao lado da outra na célula inferior, de tal forma que fosse mantida a mesma densidade em

todos os ensaios realizados (Figura 3.21b). A seguir, sobre a brita 3, foi posicionado o filme indicador de pressão (Figura 3.21c) e, acima deste, foi colocada a amostra de geomembrana (Figura 3.21d), a qual foi arranjada entre membrana de borracha para vedar a passagem de água.

A caixa superior foi posicionada sobre a caixa inferior, e então o conjunto geomembrana/ caixa superior/caixa inferior era fixado com parafusos (Figura 3.21e). Dentro da caixa superior (acima da geomembrana) foi colocado outro filme de pressão com o fim de medir a pressão de contato exercida por cada grão do material granular sobre a geomembrana (Figura 3.21f). Posteriormente, dentro da caixa superior, foi inserida a areia saturada, sendo esta arranjada em três (3) camadas de 5 cm cada. No processo, cada camada era compactada com uma placa de madeira, com o propósito de manter a densidade constante nos ensaios (Figura 3.21g).

Por último foi colocada sobre a areia uma membrana de borracha como proteção à perfuração da bolsa de borracha de aplicação de pressão e, sobre esta, foi posicionada a tampa do equipamento, sendo todo o conjunto fixado com parafusos (Figura 3.21h).

No final, a bolsa de borracha era preenchida com água destilada por meio de uma das válvulas instaladas.

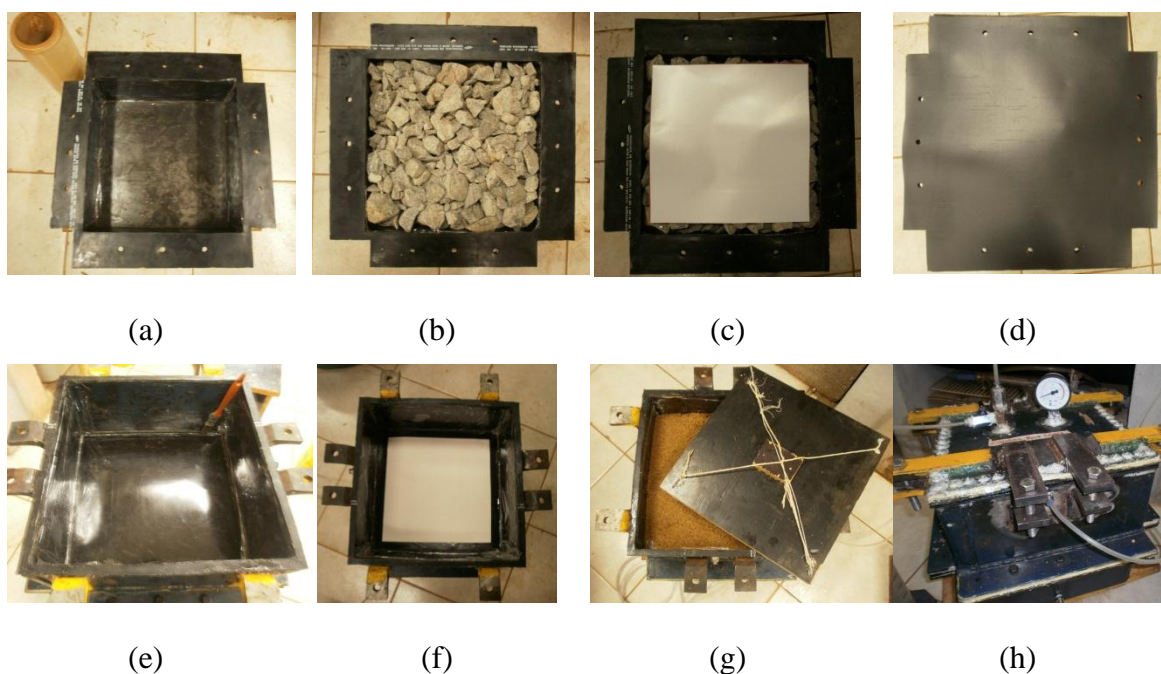


Figura 3.21 - Montagem do ensaio de média escala: (a) vaselina e filme plástico, (b) arranjo da brita 3, (c) colocação do filme de pressão, (d) colocação da geomembrana, (e) colocação da caixa superior, (f) colocação do segundo filme de pressão, (g) arranjo da areia saturada, (h) colocação da tampa.

3.3.5.2 EQUIPAMENTO DE PEQUENA ESCALA

Para a montagem do ensaio, foi colocada vaselina sob um filme plástico nos cilindros inferior e central. Este procedimento foi feito da mesma maneira que nos ensaios de média escala. O cilindro inferior era preenchido com areia (Figura 3.22a), depositada no cilindro inferior da célula de ensaios por chuva de areia, seguindo movimentos circulares. A chuva de areia foi feita em três (3) camadas, onde cada uma foi compactada com uma placa de metal com aplicação de golpes. O objetivo da chuva de areia e da compactação foi garantir a mesma densidade para todos os ensaios.

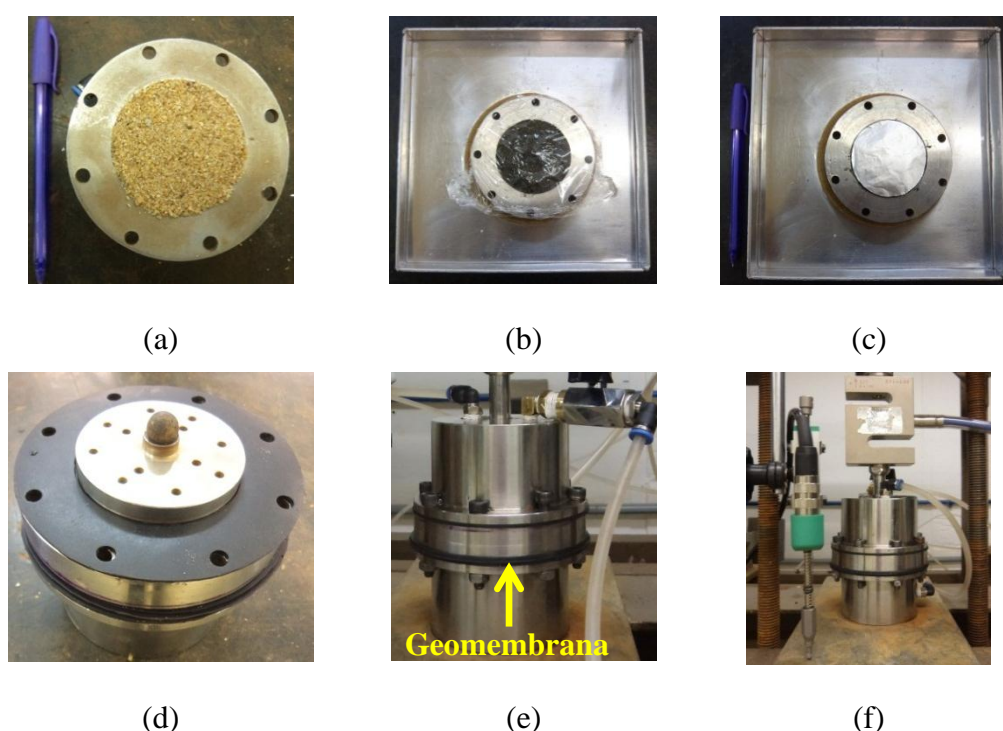


Figura 3.22 – Montagem do ensaio de pequena escala: (a) arranjo da areia, (b) saturação do rejeito, (c) colocação do filme de alumínio, (d) colocação da placa rígida e da esfera, (e) colocação do cilindro superior, (f) colocação do equipamento na prensa de ensaios.

Em seguida, o rejeito de ferro ou de ouro é saturado no cilindro do meio que compõe a célula de ensaios (Figura 3.22b). Depois de saturado, era colocada sobre ele uma folha de alumínio (Figura 3.22c) e, em seguida, foi posicionada a amostra de geomembrana acima da folha de alumínio. Duas membranas de borracha em formato anelar eram utilizadas na porção central do equipamento para auxílio na vedação do sistema.

Na porção superior do sistema era posicionada uma placa perfurada F, e uma esfera (Figura 3.22d). A tensão vertical sobre as amostras de solo e de geossintético era

aplicada por uma placa rígida. Com o conjunto posicionado abaixo da placa rígida de aplicação de pressões normais, era colocada uma membrana de borracha para evitar a passagem da água e, por fim, era posicionado o terceiro cilindro e realizada a fixação com os parafusos (Figura 3.22e).

Com o sistema montado, enche-se o cilindro superior com água destilada, sendo aberta a válvula da segunda conexão para deixar saída das bolhas de ar.

Finalmente, o ensaio montado e com água era colocado sobre a prensa de ensaios com o pistão apenas tocando a célula de carga, de tal forma que haja leituras não negativas no sistema de aquisição de dados (Figura 3.22f).

3.3.6- METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Na Figura 3.23 apresenta-se o procedimento seguido na pesquisa.

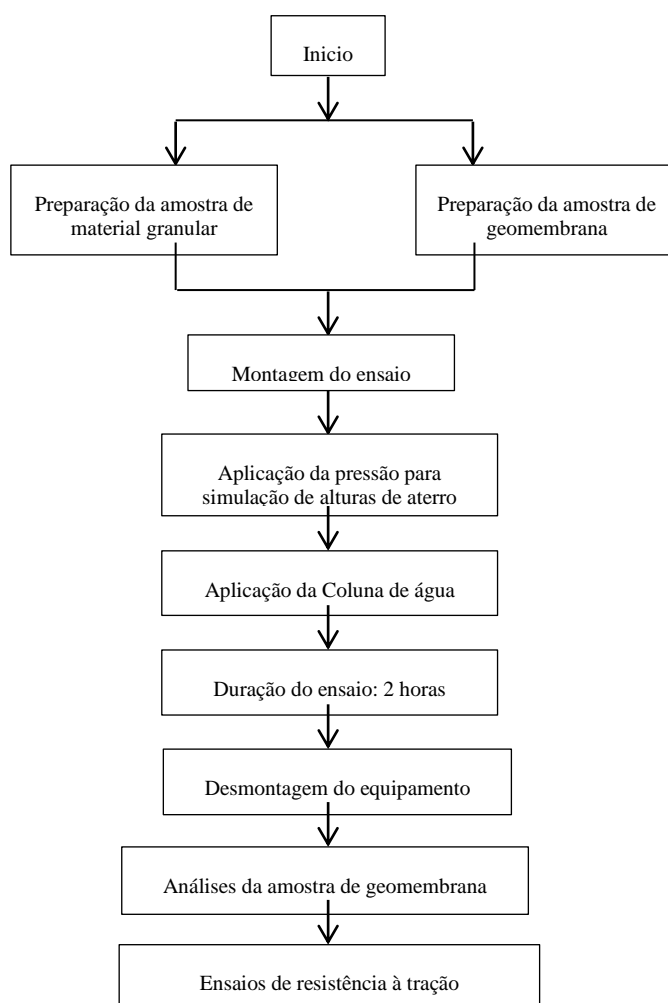


Figura 3.23 - Procedimento seguido na pesquisa.

A metodologia usada se fundamenta na realização de ensaios em geomembranas com aplicação de diferentes pressões, com o propósito de avaliar os danos causados nas geomembranas instaladas em diferentes obras hidráulicas, quando submetidas a elevados valores de pressão. Após submetidas aos ensaios de dano mecânico de média escala, as geomembranas foram levadas à prensa de ensaios de resistência à tração, visando obter sua variação na resistência depois de danificadas.

3.3.6.1 EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA

Nestes ensaios são aplicadas pressões dentro da bolsa de borracha para simular camadas de aterro sobre a geomembrana. Para cada pressão geostática aplicada, foram também aplicadas pressões hidrostáticas que permitem simular alturas de coluna de água sobre a geomembrana. As pressões aplicadas para simular as alturas de aterro sobre a geomembrana foram 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa e 500 kPa. As alturas de coluna de água simuladas foram 6,90 m; 13,79 m; 20,69 m; 34,48 m e 68,97 m.

Cada uma das pressões foi aplicada para as diferentes geomembranas empregadas (PEAD ou PVC de 1,0 mm e 2,0 mm de espessura), com a areia como material sobrejacente e a brita como material subjacente à geomembrana.

Segundo Nascimento (2002) nos ensaios de dano mecânico por compressão é importante que o conjunto de material a ser utilizado permaneça com carregamento aplicado até a estabilização das deformações por compressão. Para o caso do equipamento de médio porte, a estabilização foi controlada por meio do uso de régua métrica, posicionada dentro do sistema ar-água da bolsa de borracha. Quando o nível da água ficava constante, percebia-se que não estava passando mais água da câmara à caixa superior, indicando que a deformação do conjunto havia estabilizado. Esta estabilização das leituras ocorreu em média após quatro minutos do início dos ensaios, mas para ter certeza na estabilização das deformações, os ensaios foram deixados durante um período de duas horas.

Em cada estágio de carga, a geomembrana foi retirada para análise, sendo colocado, para o estágio seguinte, uma nova amostra de geomembrana.

Tendo em vista as diferentes combinações de geomembranas e pressões, foram realizados 16 ensaios no equipamento de média escala, sumarizados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Identificação dos ensaios realizados no equipamento escala média.

Brita 3 + Geomembrana PVC 1,0 mm espessura	B-PVC-1	Brita 3 + Geomembrana PEAD 1,0 mm espessura	B-PEAD-1
Brita 3 + Geomembrana PVC 2,0 mm espessura	B-PVC-2	Brita 3 + Geomembrana PEAD 2,0 mm espessura	B-PEAD-2

3.3.6.2 EQUIPAMENTO DE PEQUENA ESCALA

No equipamento de pequena escala foram realizados ensaios com o rejeito de ouro e rejeito de ferro. As tensões normais aplicadas na simulação das alturas de aterros foram 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 500 kPa e 1000 kPa. Como detalhado no equipamento de média escala, os valores da coluna de água obtidos para o rejeito de ferro foram 5,3 m; 10,6 m; 15,9 m; 26,5 m; 53,1 m e, para o rejeito de ouro foram 7,2 m; 14,3 m; 21,5 m; 35,8 m; 71,6 m.

As tensões normais listadas e as alturas de coluna de água foram aplicadas com os diferentes tipos de geomembranas e com os dois tipos de rejeito (ouro ou ferro) posicionado na camada superior e com areia na camada inferior.

De forma similar ao procedimento dos ensaios com equipamento de média escala, para cada estágio de carga, a geomembrana foi retirada para sua análise e no estágio seguinte, era colocada uma nova geomembrana.

Nestes ensaios, a estabilização dos deslocamentos foi controlada por meio do uso de um medidor de deslocamento linear, posicionado sobre a estrutura de reação do equipamento, o qual se movimentava conjuntamente com o pistão da célula. A estabilização das leituras ocorreu na maioria das vezes após dois minutos, mas para ter-se certeza de tal consolidação, cada ensaio foi realizado por um período de duas horas. Após esse período, os ensaios foram desmontados e as amostras analisadas. Levando em consideração as diferentes combinações de rejeito, geomembrana e tensões aplicadas foram realizados 40 ensaios no equipamento de pequeno porte. A identificação dos ensaios é mostrada a seguir na Tabela 3.5

Tabela 3.5 – Identificação dos ensaios – Equipamento pequena escala.

Rejeito de Ferro + Geomembrana PEAD 1,0 mm espessura	F-PEAD-1	Rejeito de Ouro + Geomembrana PEAD 1,0 mm espessura	O-PEAD-1
Rejeito de Ferro + Geomembrana PEAD 2,0 mm espessura	F-PEAD -2	Rejeito de Ouro + Geomembrana PEAD 2,0 mm espessura	O-PEAD-2
Rejeito de Ferro + Geomembrana PVC 1,0 mm espessura	F-PVC -1	Rejeito de Ouro + Geomembrana PVC 1,0 mm espessura	O-PVC-1
Rejeito de Ferro + Geomembrana PVC 2,0 mm espessura	F-PVC -2	Rejeito de Ouro + Geomembrana PVC 2,0 mm espessura	O-PVC-2

3.3.7- IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA DE DANO

Quando a amostra de geomembrana era descarregada após o ensaio de compressão no equipamento pequeno, as impressões dos grãos observadas sobre a superfície da geomembrana não eram mais visíveis ao olho nu. Assim sendo, na obtenção das impressões de contato entre os grãos do rejeito e a geomembrana foi necessário usar uma folha de alumínio.

Posteriormente aos ensaios, foram feitos registros da folha de alumínio com a câmera de fotografia de alta definição. Essas imagens digitais eram então processadas no programa AutoCad 2010 ® com o fim de quantificar os pontos e medir o tamanho dos contatos do rejeito na geomembrana. Finalmente, com as medidas das áreas foram feitas as demais análises. Um exemplo da medição das áreas de contato é apresentado na Figura 3.24.

Para as amostras utilizadas no equipamento de média escala, as fotos com a câmera foram tiradas diretamente da geomembrana danificada, no momento imediatamente após o desmonte do ensaio, sem sua retirada, considerando que depois dos ensaios era possível identificar as áreas de contato marcadas na geomembrana. Depois de feitos os registros fotográficos, o procedimento adotado foi o mesmo seguido com as amostras obtidas no equipamento de média escala. Das fotos tiradas das geomembranas, só foi possível fazer medições das áreas de contato da Brita 3, tendo em vista o pequeno tamanho dos danos impressos pela areia à geomembrana, onde não era possível a distinção entre cada dano.

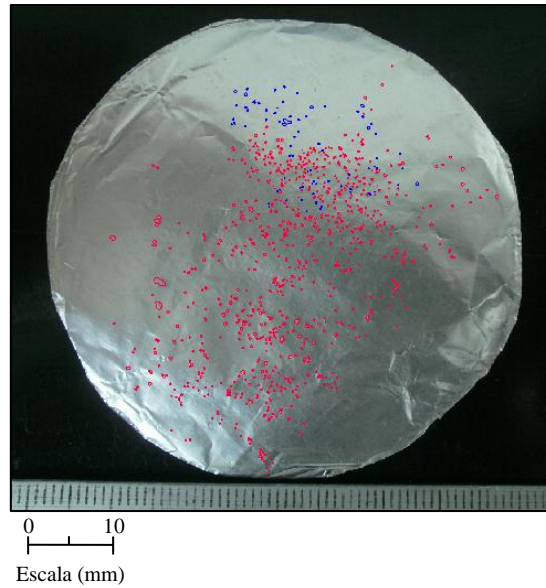


Figura 3.24 - Medição das áreas de contato no programa AutoCad 2010 ®.

3.3.8- ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os ensaios de resistência à tração foram realizados nas amostras virgens e nas amostras danificadas, visando obter a queda da resistência à tração das geomembranas quando submetidas a dano mecânico. Nestes ensaios, foram testados cinco corpos de prova de cada material virgem, com o propósito de ter mais confiança nos dados obtidos. As amostras foram ensaiadas no sentido de produção (longitudinal). Para efeitos de comparação de resistência, as amostras obtidas nos ensaios de média escala também foram testadas na prensa de tração. Para as amostras de geomembrana dos ensaios realizados no equipamento de pequena escala, não foi possível utilizar a prensa de tração, pois as amostras obtidas nestes ensaios não possuíam o tamanho adequado para serem submetidas à prensa de tração.

Na avaliação da resistência à tração dos materiais, submete-se o geossintético a uma carga de tração crescente que irá provocar um alongamento ou estiramento do material. Durante o ensaio, são medidas as deformações para cada estágio de tração. As geomembranas foram submetidas a ensaios de tração em faixa larga. Neste ensaio, as extremidades da geomembrana são fixadas a um par de garras metálicas, sendo depois submetida a cargas que tendem a alongá-la até a ruptura.

As dimensões das amostras foram 100 mm x 200 mm, sendo os 100 mm a separação entre as garras e os 200 mm a medida horizontal da amostra. A amostra de geomembrana foi tracionada a velocidade constante de 10 mm/min, até atingir a ruptura. No decorrer dos ensaios foram feitas medições das cargas e as deformações das amostras.

Os ensaios de tração em faixa larga foram realizados segundo a norma *Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembranes by the Wide Strip Tensile Method* (ASTM D4885-01, 2011). O equipamento utilizado foi uma prensa de tração da EMIC, modelo DL2000 (Figura 3.25). A seguir, na Figura 3.26, apresentam-se fotos da seqüência do ensaio de tração de faixa larga numa geomembrana.



Figura 3.25 – Vista da prensa de Tração.

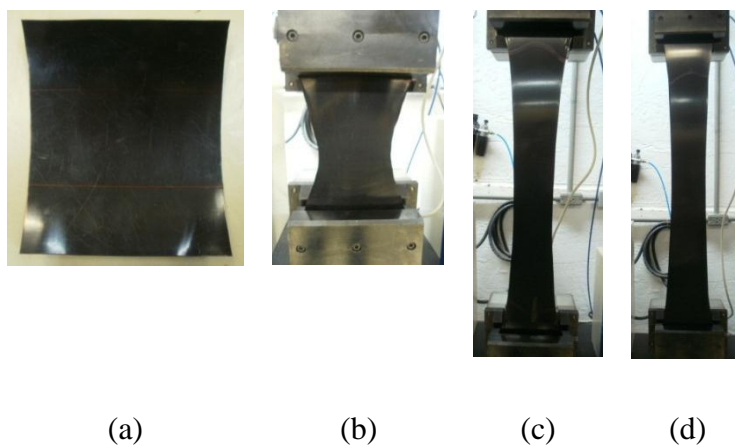


Figura 3.26 – Seqüência de um ensaio de tração em Geomembrana virgem PEAD 1,0 mm direção CD: (a) antes do ensaios, (b) começo do ensaio, (c) durante a metade do ensaio, (d) final do ensaio.

CAPITULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES

O estudo do dano mecânico em geomembranas foi avaliado nesta pesquisa a partir de ensaios efetuados em dois tipos de equipamentos (equipamento de pequena e de média escala), onde cada equipamento foi empregado como sendo uma função do tamanho do material em contato com a geomembrana. Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos durante a realização de cada um dos ensaios e, além disso, mostra as análises feitas a partir dos resultados. Serão também apresentados os resultados dos primeiros ensaios, realizados com 24 horas de duração, empregados com a finalidade de estabelecer o tempo de duração de cada ensaio e garantir o controle das variáveis nos ensaios para serem analisadas comparativamente.

Apresentam-se ainda os resultados dos ensaios de classificação granulométrica após os ensaios de dano mecânico, com o fim de verificar se a granulometria do material granular empregado sofreu modificações. Por último, apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios de resistência à tração, realizados depois do dano e suas respectivas análises.

4.1- EQUIPAMENTO DE PEQUENA ESCALA

4.1.1- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM 24 HORAS DE DURAÇÃO

Com o fim de obter-se o melhor tempo de duração dos ensaios, fizeram-se vários testes com 24 horas de duração. As configurações dos ensaios foram escolhidas aleatoriamente, visando ter o comportamento de diferentes arranjos de geomembrana com rejeito e as pressões verticais aplicadas. As configurações escolhidas foram:

- F-PEAD-2-1000kPa
- O-PEAD-1-200kPa

Onde:

F: Rejeito de ferro

O: Rejeito de Ouro

PEAD 1: Geomembrana de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) de 1,0 mm

PEAD 2: Geomembrana de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) de 2,0 mm

As figuras a seguir apresentam os resultados do tempo *versus* pressão normal aplicada e do tempo *versus* deslocamento para os ensaios escolhidos. Na Figura 4.1 e Figura 4.2 pode-se ver que a pressão vertical atinge um valor máximo e depois vai se estabilizando. Este pico seguido de estabilização é consequência do fato da acomodação da amostra de solo. Assim, ao ser aplicado o carregamento, este atinge um valor máximo inicial e depois sofre um relaxamento com o tempo até a estabilização da carga. De uma forma geral, a carga começa a se estabilizar nos primeiros 30 minutos aproximadamente para todos os ensaios realizados.

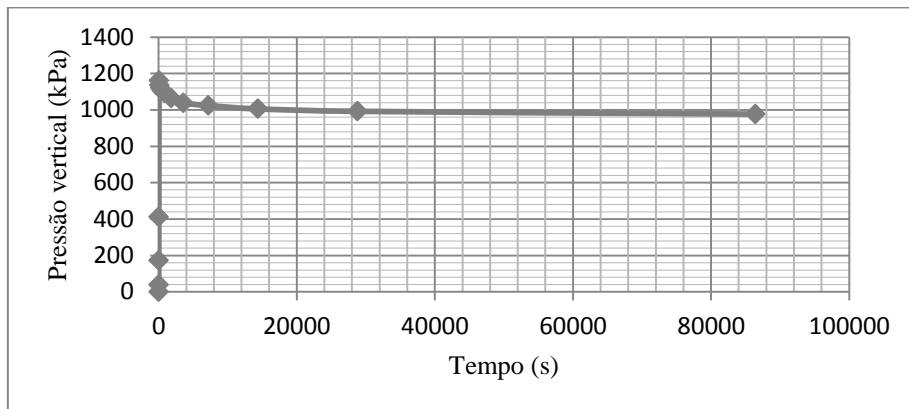


Figura 4.1 - Tempo *versus* Pressão vertical para o ensaio com a configuração F-PEAD-2 submetido a 1000 kPa de pressão, com duração de 24 horas.

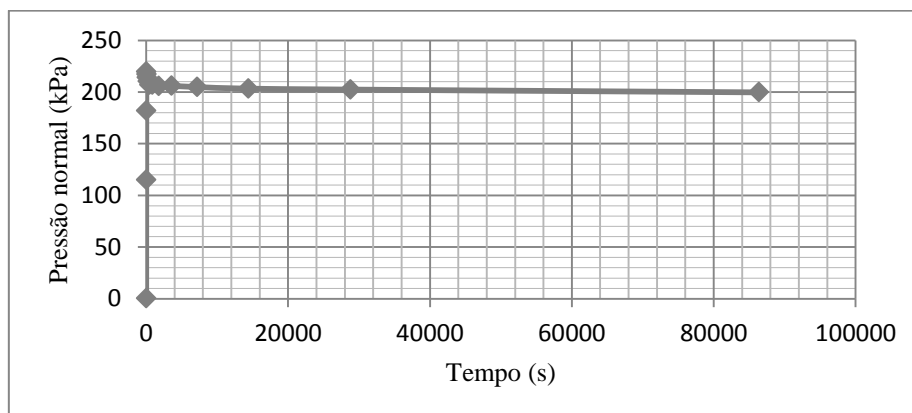


Figura 4.2 - Tempo *versus* Pressão vertical para o ensaio com a configuração O-PEAD-1 submetido a 200 kPa de pressão, com duração de 24 horas.

Na Figura 4.3 e Figura 4.4 apresentam-se os gráficos do tempo *versus* a pressão vertical para as configurações F-PEAD-2-1000kPa e O-PEAD-1-200kPa, porém para 2 horas de duração. Essa análise foi necessária para a verificação da estabilização da carga com o tempo para um intervalo de tempo menor.

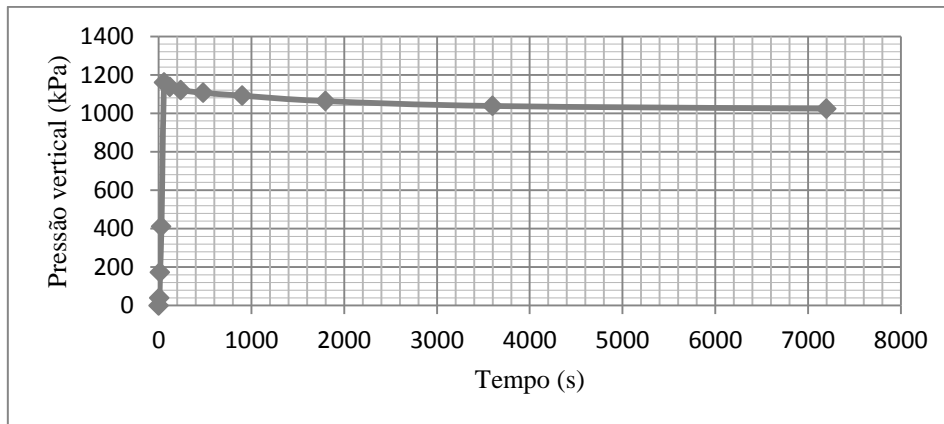


Figura 4.3 - Tempo *versus* Pressão vertical para o ensaio com a configuração F-PEAD-2 submetido a 1000 kPa de pressão para o ensaio com duas horas de duração.

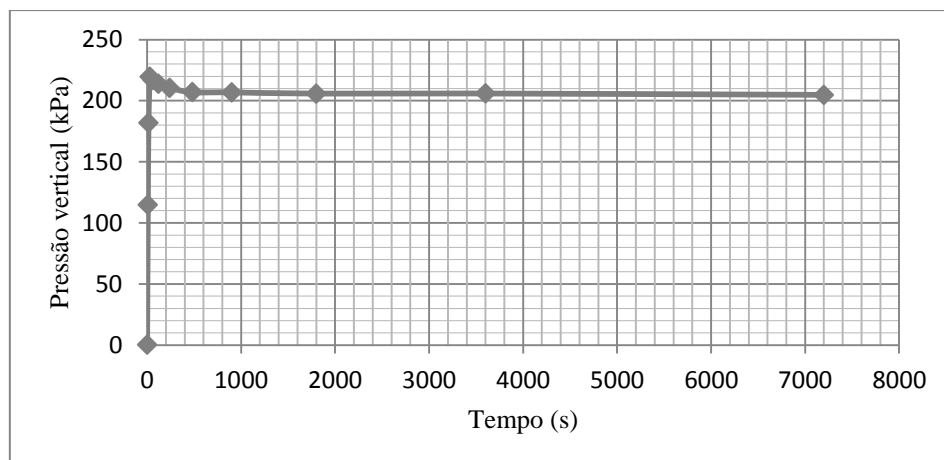


Figura 4.4 - Tempo vs Pressão vertical para o ensaio com a configuração O-PEAD-1 submetido a 200 kPa de pressão para o ensaio com duas horas de duração.

Na Figura 4.5 e Figura 4.6 pode-se ver a estabilização do deslocamento vertical conjunto rejeito-geomembrana, o qual ocorre nos primeiros minutos do ensaio. Observa-se que a estabilização ocorreu com dois minutos após a aplicação do carregamento.

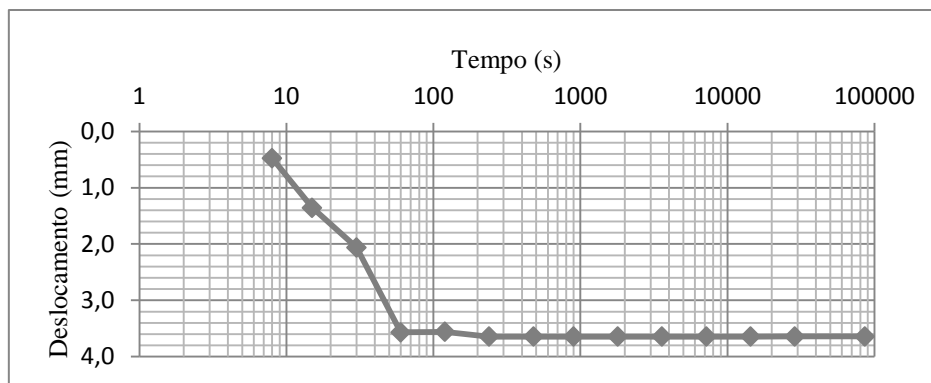


Figura 4.5 - Tempo *versus* Deslocamento para o ensaio com a configuração F-PEAD-2 submetido a 1000 kPa de pressão vertical, com duração de 24 horas.

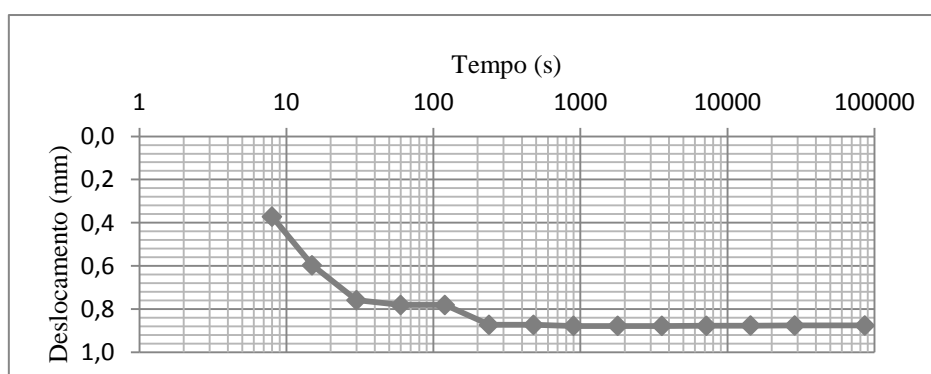


Figura 4.6 - Tempo *versus* Deslocamento para o ensaio com a configuração O-PEAD-1 submetido a 200 kPa de pressão vertical, com duração de 24 horas.

Levando em conta os resultados dos ensaios para estabilização da carga aplicada e dos deslocamentos gerados, optou-se por ter um tempo de duração para todos os ensaios de 2 horas.

4.1.2- FORMAS DE CONTATO DOS REJEITOS NOS ENSAIOS REALIZADOS

Numa primeira análise visual, observou-se que na superfície das geomembranas eram impressas diferentes formas e dimensões de áreas de contato, dependendo do carregamento aplicado e do material granular usado. Entretanto, com relação ao tipo de geomembrana (PVC ou PEAD), as formas das áreas de contato mantiveram-se similares, variando apenas a quantidade, em função do tipo de geomembrana.

Na Figura 4.7 e Figura 4.8 pode-se observar que são geradas na superfície do alumínio uma série de deformações para o carregamento de 1000 kPa, porém sem constância de forma. Também, percebe-se a concentração de alguns pontos de contato em alguns locais. Nota-se também que as áreas de contato são inferiores a $1,0 \text{ mm}^2$.

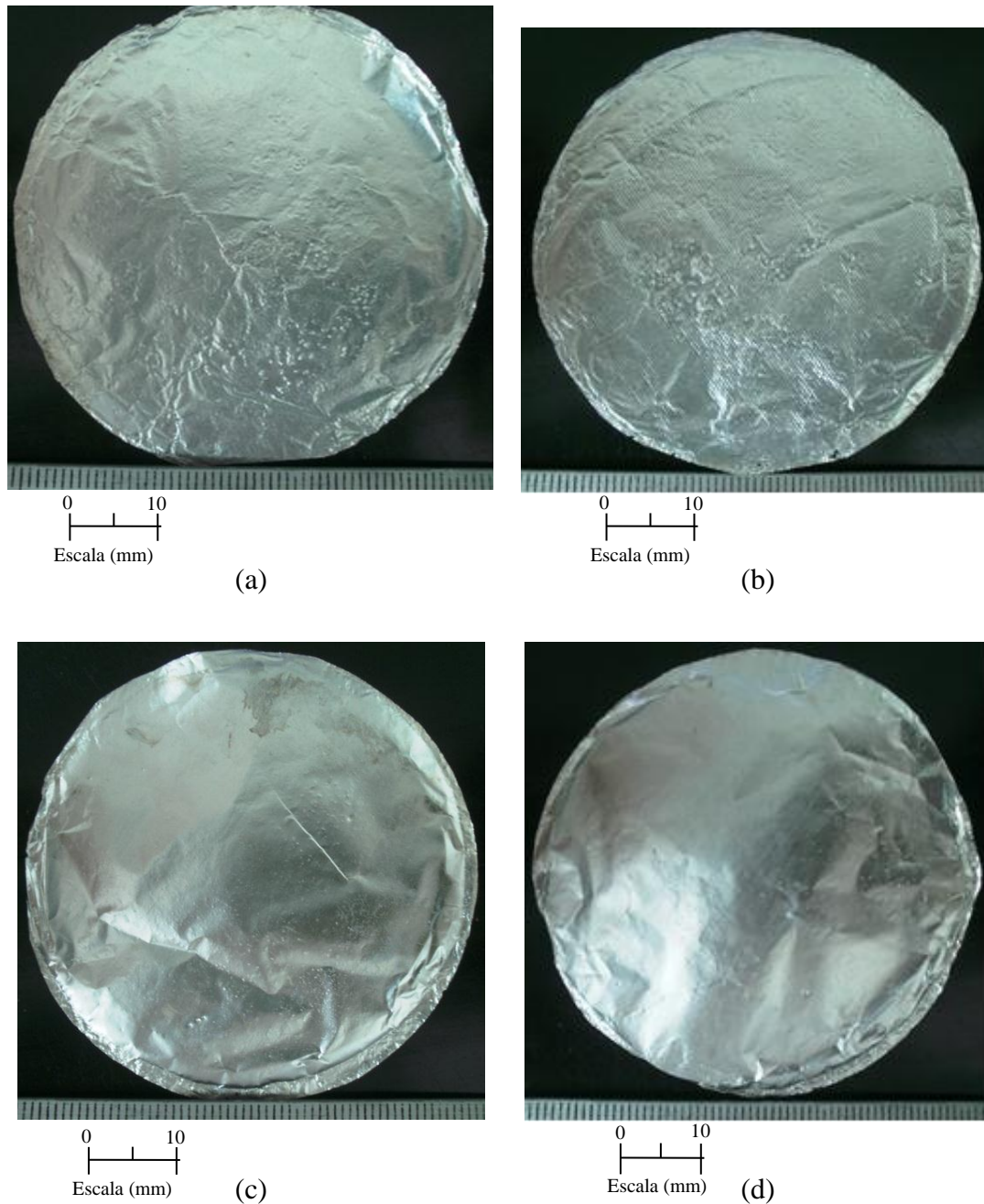


Figura 4.7 - Contatos do rejeito de ferro atuando sobre a geomembrana, quando submetida a 1000 kPa de pressão vertical: (a) geomembrana de PVC-1,0 mm de espessura, (b) geomembrana de PVC-2,0 mm de espessura, (c) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura, (d) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura, (d) geomembrana de PEAD-2,0 mm de espessura.

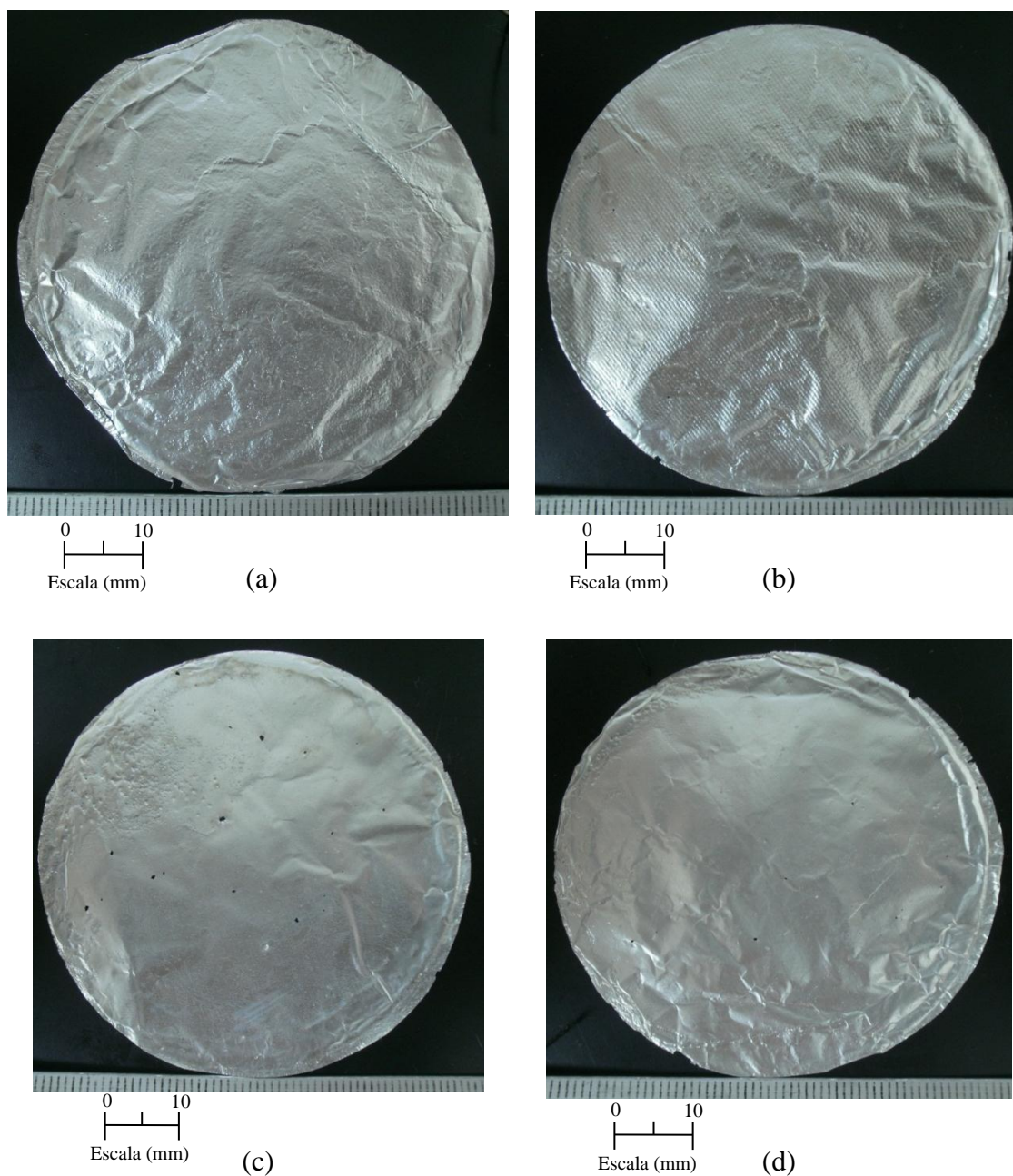


Figura 4.8 - Contatos do rejeito de ouro atuando sobre a geomembrana, quando submetida a 1000 kPa de pressão vertical: (a) geomembrana de PVC-1,0 mm de espessura, (b) geomembrana de PVC-2,0 mm de espessura, (c) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura, (d) geomembrana de PEAD-2,0 mm de espessura.

Nas imagens digitais apresentadas, podem-se notar diferentes formas nos contatos impressos no alumínio, seguindo figuras disformes e circulares dependendo do valor de pressão vertical aplicada. Nos testes realizados com a maior pressão aplicada, é mais difícil identificar o tipo de forma do contato, sendo observadas somente formas

circulares devido ao pequeno tamanho dos contatos. Nos ensaios com rejeito de ouro foi ainda mais difícil identificar o tipo de forma de contato em relação com o rejeito de ferro devido ao tamanho das partículas dos materiais. Nas figuras apresentadas, pode-se ver ainda que o papel alumínio em contato com o rejeito de ouro sofreu alguns furos pequenos, comportamento que não foi percebido com o rejeito de ferro. Os furos identificados possivelmente foram produzidos por partículas pontiagudas do rejeito de ouro. Além disso, as bordas do papel alumínio apresentam algumas rugas que provavelmente ocorreram pela condição crítica que representa o contorno da geomembrana, podendo resultar de esforços de tração nas bordas.

De acordo com o observado na Figura 4.7 e na Figura 4.8, as geomembranas de PVC de 1,0 mm e 2,0 mm de espessura, que estiveram em contato tanto com o com rejeito de ferro como com o rejeito de ouro, foram as que apresentaram o maior número de áreas de contato, quando se comparando com os testes realizados com as geomembranas de PEAD, isso é devido ao fato da geomembrana de PVC ser mais extensível.

Na realidade, a análise visual das geomembranas ensaiadas não permitiu identificar dano algum. Além disso, para nenhum dos carregamentos aplicados foram observados furos ou rasgos na superfície da geomembrana. Tal fato foi observado tendo em conta que não houve vazão em nenhum dos ensaios realizados.

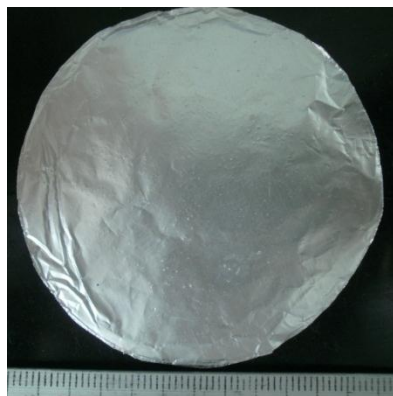
4.1.3- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE FERRO

Neste item são apresentados os gráficos de distribuição de frequência das áreas de contato impressas sobre a geomembrana e suas respectivas análises. Os resultados dos ensaios com respeito à distribuição de frequência das áreas de contato seguem um padrão para determinadas configurações. É por isso que apenas serão exibidos os gráficos para alguns dos testes realizados, sendo que os gráficos correspondentes aos outros ensaios serão apresentados nos Apêndices A, B e C.

Deve-se levar em conta que uma desvantagem deste tipo de ensaios é que a repetibilidade pode ser pobre, uma vez que a resistência à punção da geomembrana parece ser sensível à orientação e a densidade do objeto protuberante (Rebelo, 2009).

Os ensaios comentados nos seguintes subitens foram montados com rejeito de ferro como camada sobrejacente à geomembrana. Essa análise foi realizada tendo em vista a possibilidade de aglomeração dos grãos com o carregamento e possibilidade de danos devido a isso.

A seguir, na Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12 podem ser observadas as marcas geradas no papel alumínio para os ensaios feitos com rejeito de ferro e as geomembranas de PVC (1,0 e 2,0 mm de espessura) e PEAD (1,0 e 2,0 mm de espessura). Estas figuras são apresentadas com o fim de se ter um melhor entendimento dos resultados das áreas de contato impressas sobre a geomembrana. A régua posicionada na parte inferior de cada uma das fotografias das figuras tem escala com divisões milimétricas.



(a)



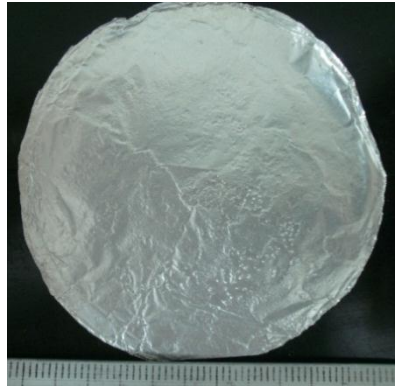
(b)



(c)

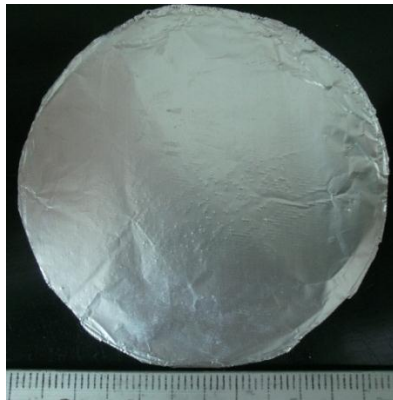


(d)

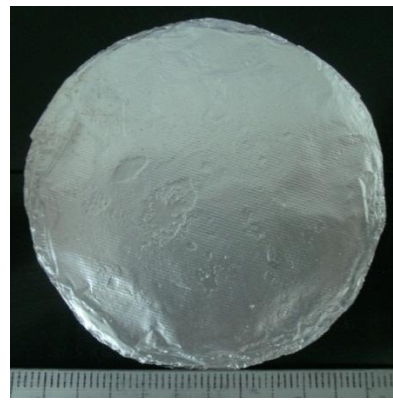


(e)

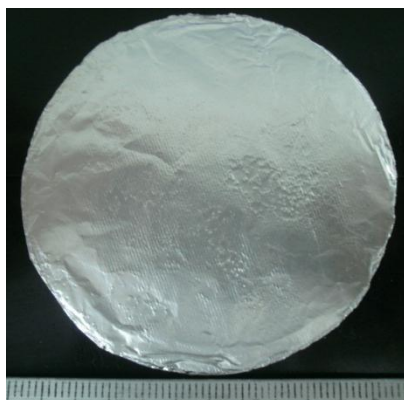
Figura 4.9 – Marcas nos papel alumínio com geomembrana de PVC 1,0 mm: (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 300 kPa, (d) 500 kPa e (e) 1000 kPa.



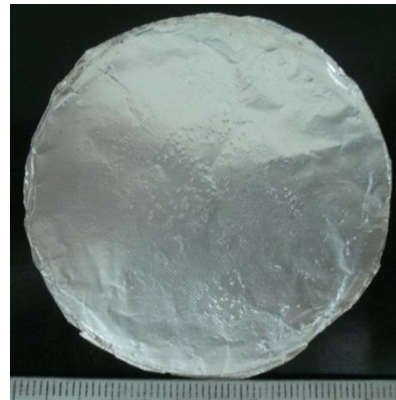
(a)



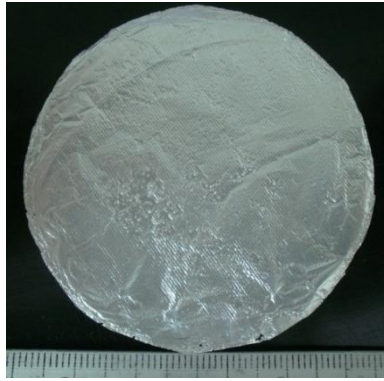
(b)



(c)



(d)

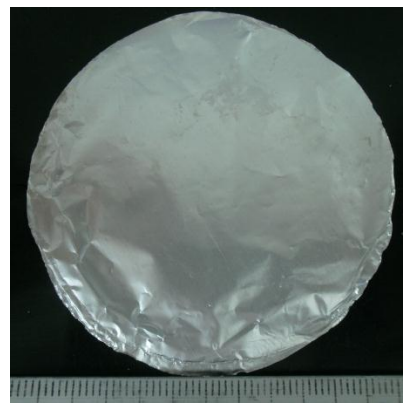


(e)

Figura 4.10 - Marcas nos papel alumínio com geomembrana de PVC 2,0 mm (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 300 kPa, (d) 500 kPa e (e) 1000 kPa.



(a)



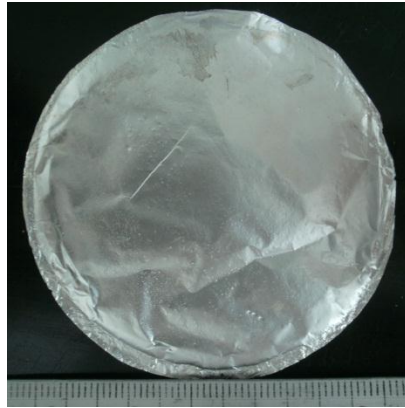
(b)



(c)



(d)

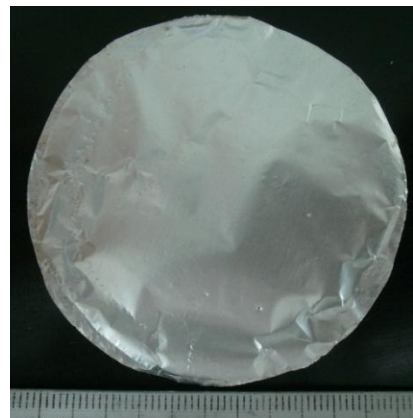


(e)

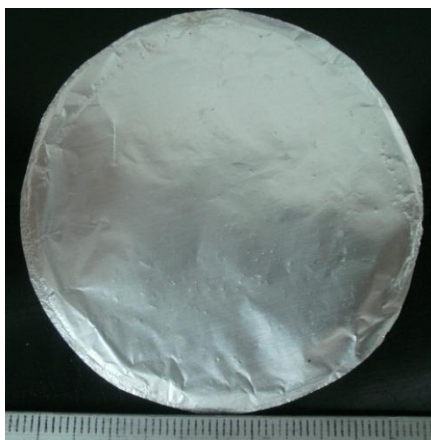
Figura 4.11 - Marcas nos papel alumínio com geomembrana de PEAD 1,0 mm (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 300 kPa, (d) 500 kPa e (e) 1000 kPa.



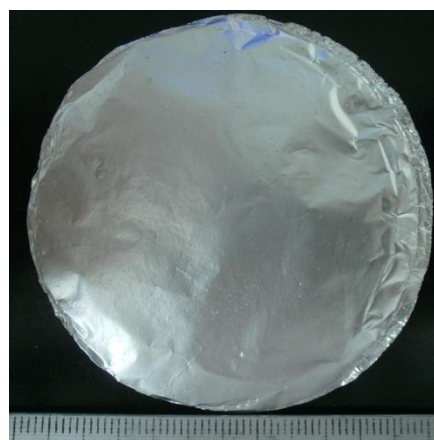
(a)



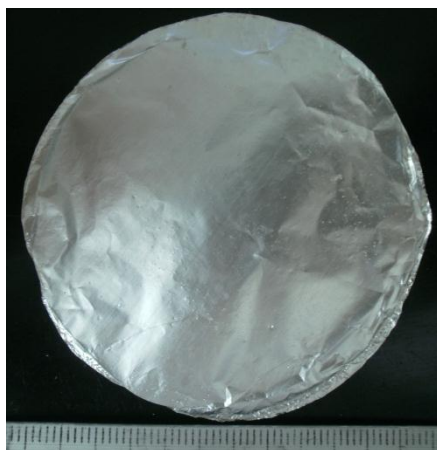
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.12 - Marcas nos papel alumínio com geomembrana de PEAD 2,0 mm (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 300 kPa, (d) 500 kPa e (e) 1000 kPa.

4.1.3.1- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM GEOMEMBRANAS DE PVC DE 2,0 mm DE ESPESSURA

A. Pressão vertical de 100 kPa

A Figura 4.13 mostra a distribuição de frequência das áreas de contato ao longo de uma área de aproximadamente $2,8 \times 10^3 \text{ mm}^2$. Observa-se que as áreas de contato variaram de 0,001 a $0,269 \text{ mm}^2$, com a tendência à predominância de áreas de contato menores.. Também se pode notar que a medida que aumenta-se o tamanho das áreas, tem-se uma diminuição na frequência das áreas de contatos, tentando-se gerar uma curva decrescente. A figura mostra ainda que as maiores frequências de áreas de contato ocorreram para os menores valores de área (primeiros intervalos na distribuição), totalizando 253 (98,4%) áreas de contato para a primeira área de contato utilizada na distribuição. Além disso, pode-se observar que diâmetro do limite superior do primeiro intervalo na distribuição está muito aproximado do D_{85} (0,40 mm) do material de rejeito empregado (ver Figura 3.15), querendo isto dizer que dentro deste intervalo está distribuído o 85% dos tamanhos dos grãos possíveis de se encontrar no rejeito de ferro utilizado.

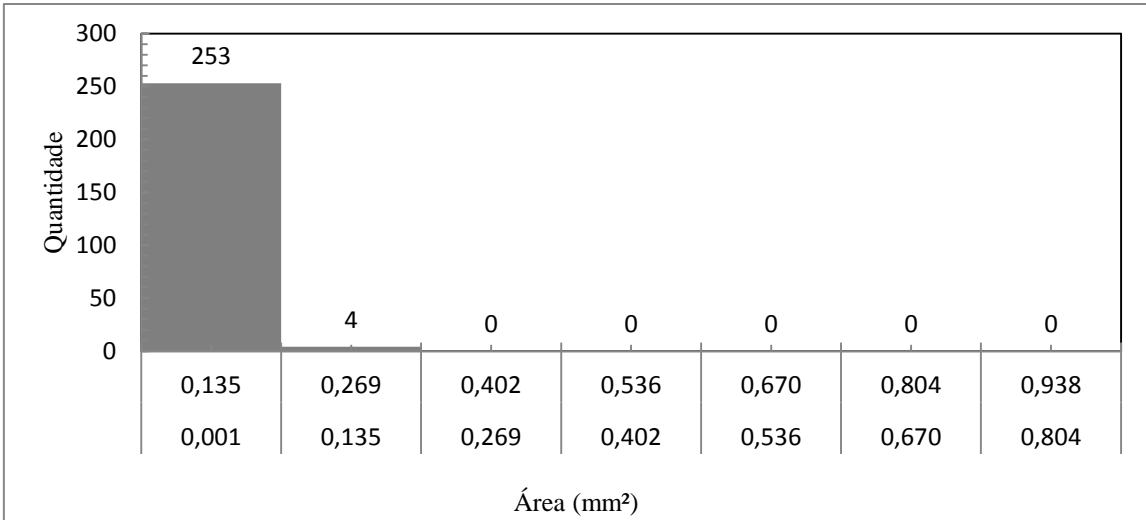


Figura 4.13 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100kPa.

B. Pressão vertical de 200 kPa

A Figura 4.14 apresenta o gráfico de distribuição de frequência das áreas de contato geradas com a pressão de 200 kPa.

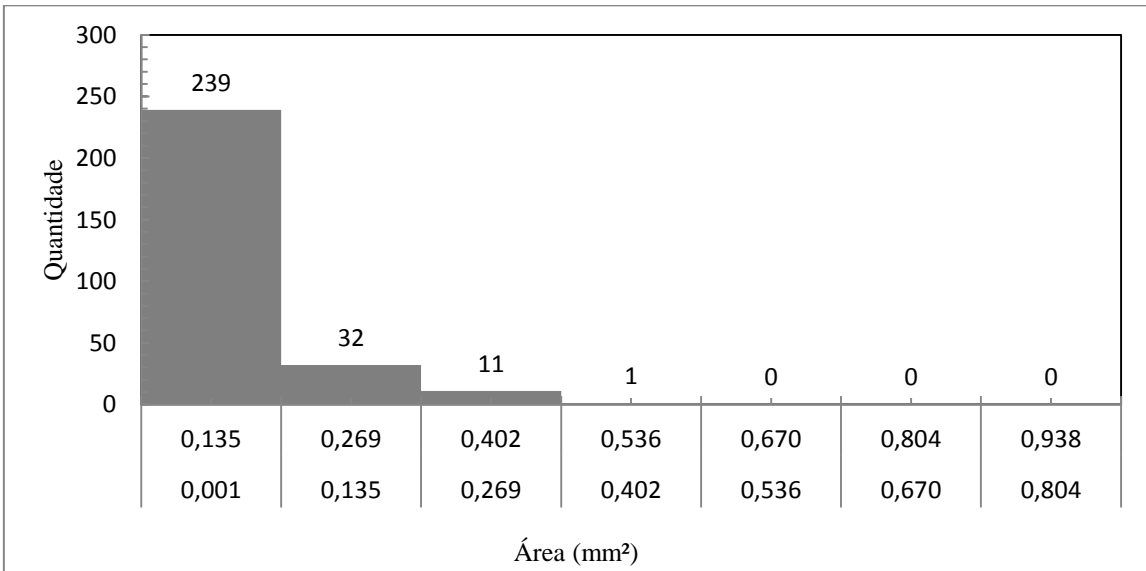


Figura 4.14 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200kPa.

Comparando-se a figura anterior com o resultado da Figura 4.13, observa-se um acréscimo nas frequências de áreas de contato (como esperado, tendo em vista o aumento de pressão), que aumentou para valores em torno de 32 no segundo intervalo

da distribuição, e o número de contatos total aumentou para 283. Além disso, também aumentaram os valores das áreas, que variaram de 0,001 a 0,536 mm². Como no caso anterior a maior parte dos contatos ocorreu para a primeira frequência utilizada (84,5%). Além disso, deve-se observar, novamente, que o maior número de áreas de contato é gerado com tamanhos até o D₈₅ do material. Verifica-se ainda que, conforme no resultado da Figura 4.13, também é gerada uma curva decrescente com o aumento da área.

C. Pressão vertical de 300 kPa

A Figura 4.15 mostra distribuição de frequência de áreas de contato geradas devido ao carregamento de 300 kPa. Observa-se que é maior a soma das quantidades de áreas de contato nos primeiros dos intervalos de áreas quando comparadas com os resultados dos primeiros dois intervalos para esta mesma geomembrana submetida a um carregamento de 200 kPa. Nota-se também que a tendência da curva a ser decrescente também ocorre para este resultado, assim como ocorreu resultados observados para esta geomembrana quando submetida a 100 kPa e 200 kPa de pressão. Para o caso de uma pressão de 300 kPa, a quantidade total de contatos aumentou para 327 e, os valores das áreas diminuíram (menor quantidade de números de contatos no terceiro intervalo da distribuição quando comparado com a Figura 4.14) variando de 0,001 a 0,536 mm².

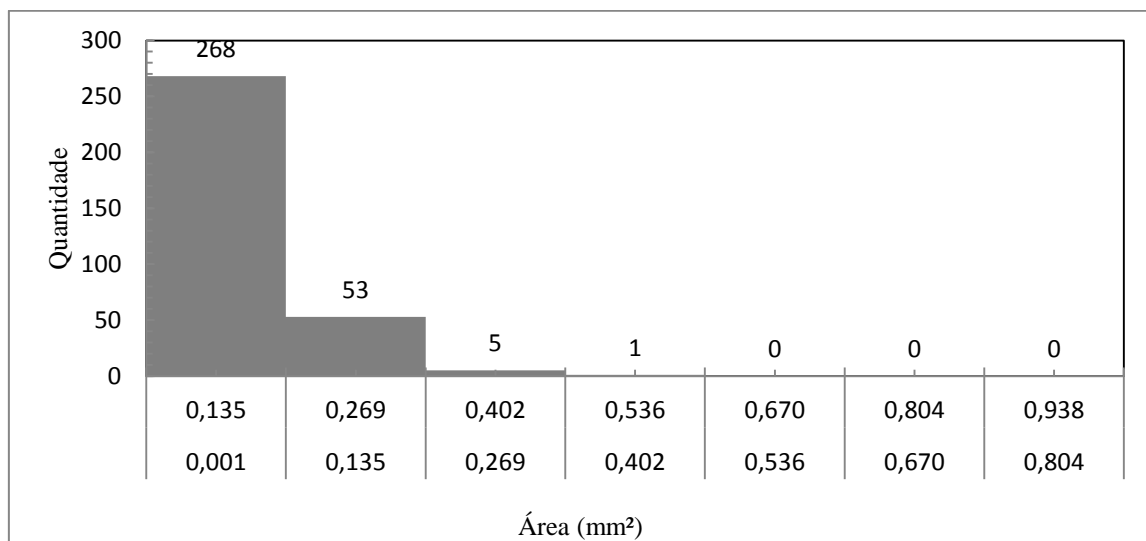


Figura 4.15 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300kPa.

D. Pressão vertical de 500 kPa

A Figura 4.16 mostra a frequência de áreas de contato geradas a partir da pressão vertical de 500 kPa. Observa-se um aumento relevante da frequência de áreas de contato do primeiro intervalo da distribuição, sendo este de 840 áreas de contato impressas na geomembrana, correspondente ao 97,2% das áreas de contato. É possível notar a predominância de áreas de contato menores. O número de áreas de contato total foi de 864.

Verifica-se, também, a tendência de curva decrescente ocorrida nos resultados com esta mesma geomembrana submetida a 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa de pressão. Além disso, pode-se observar que o tamanho das áreas de contato teve uma variação de 0,001 a 0,536 mm², mostrando que apesar de um aumento na pressão confinante, para este caso, não houve aumento com respeito a o ensaio com 300 kPa. Novamente observa-se o mesmo comportamento percebido com as outras configurações de ensaios com respeito ao tamanho dos grãos impressos na geomembrana (Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15).

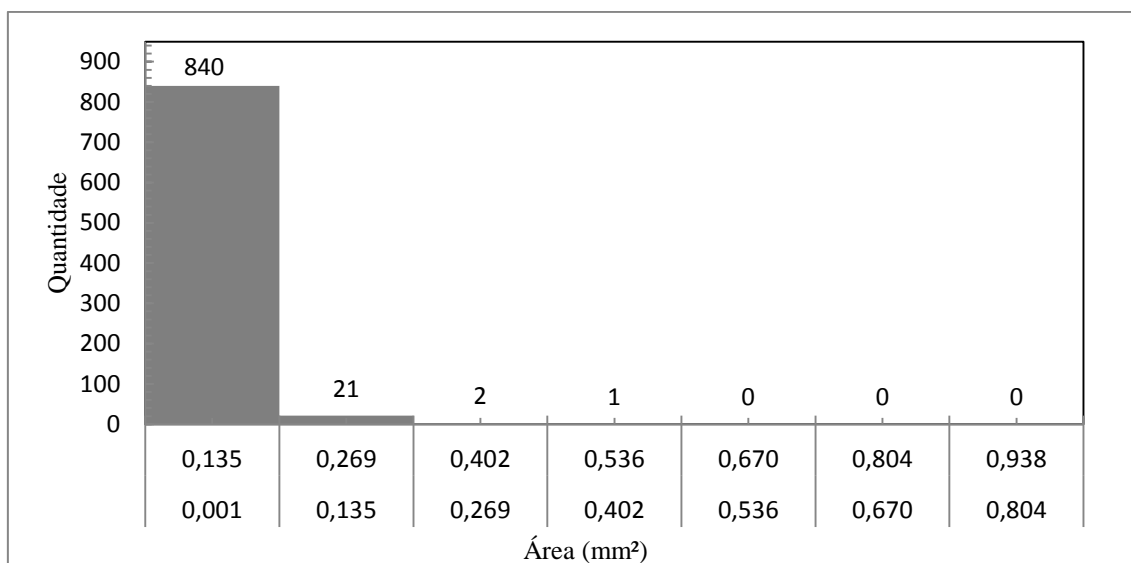


Figura 4.16 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500kPa.

E. Pressão vertical de 1000 kPa

A Figura 4.17 mostra a distribuição de frequência das áreas de contato geradas a partir

da pressão normal de 1000 kPa com área de aproximadamente $2,827 \times 10^3 \text{ mm}^2$. Nesta figura, observa-se novamente um aumento bem marcado da frequência de áreas de contato do primeiro intervalo da distribuição em uma quantidade de 1073 áreas de contato (95,7%), em um número total de áreas de contato de 1121.

Verifica-se ainda, a tendência de curva decrescente que acontece nos resultados acima listados. Além disso, pode-se observar que o tamanho das áreas de contato variou de 0,001 a 0,938 mm^2 , porém a maior frequência de áreas de contato encontra-se nos primeiros intervalos e, como nos casos anteriores, nos últimos intervalos (áreas maiores) têm-se frequências muito baixas.

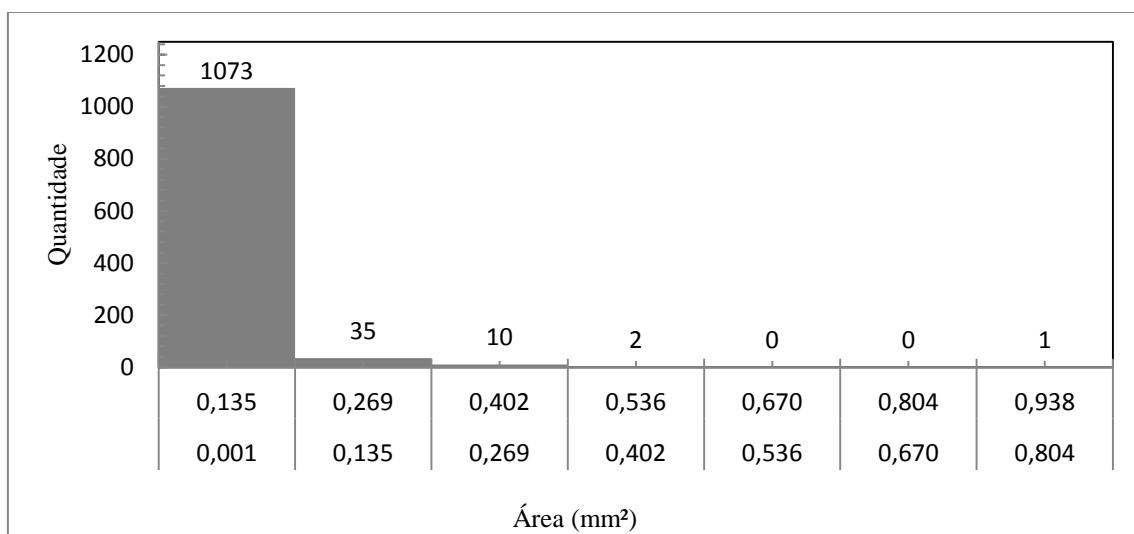


Figura 4.17 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000kPa.

4.1.4- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE OURO

Neste item são apresentados os gráficos de distribuição de frequência das áreas de contato impressas sobre a geomembrana e suas respectivas análises. Os ensaios comentados nos seguintes subitens foram montados com rejeito de ouro como camada sobrejacente à geomembrana.

Assim como no caso do rejeito de Ferro, os resultados dos ensaios com respeito à distribuição de frequência das áreas de contato seguem um padrão para determinadas configurações. Assim, neste item serão apenas apresentados os gráficos para alguns dos testes realizados. Os demais resultados estão disponíveis nos Apêndices D, E e F.

4.1.4.1- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM GEOMEMBRANAS DE PEAD DE 1,0 mm DE ESPESSURA

A. Pressão vertical de 100 kPa

A Figura 4.18 mostra a distribuição de frequência das áreas de contato ao longo de uma área de aproximadamente $2,827 \times 10^3 \text{ mm}^2$ submetida à pressão de 100 kPa para geomembrana de PEAD de 1,0 mm de espessura. Observa-se que as áreas de contato variaram de 0,001 a 0,0167 mm^2 , com predominância de áreas de contato menores. Comparando-se com os valores obtidos para a geomembrana de PVC, os valores das áreas de PEAD foram menores. Esse fato pode ser atribuído à maior rigidez da geomembrana de PEAD, o que permite uma menor acomodação dos grãos.

A maior frequência de áreas contato para esta configuração foi o primeiro intervalo da distribuição, com duas áreas de contato (66,7%), e tendo um numero de contatos total de três. Observando-se a Figura D.1 do apêndice D nota que o número de contatos está muito próximo do número de contatos gerados na geomembrana de PVC de 1,0 mm de espessura submetida a esta mesma pressão em contato com rejeito de ouro. Pode-se também notar que, assim como ocorreu nas configurações com rejeito de ferro, o diâmetro do limite superior do primeiro intervalo na distribuição coincide com o D_{85} (0,34 mm) do material (Figura 3.15).

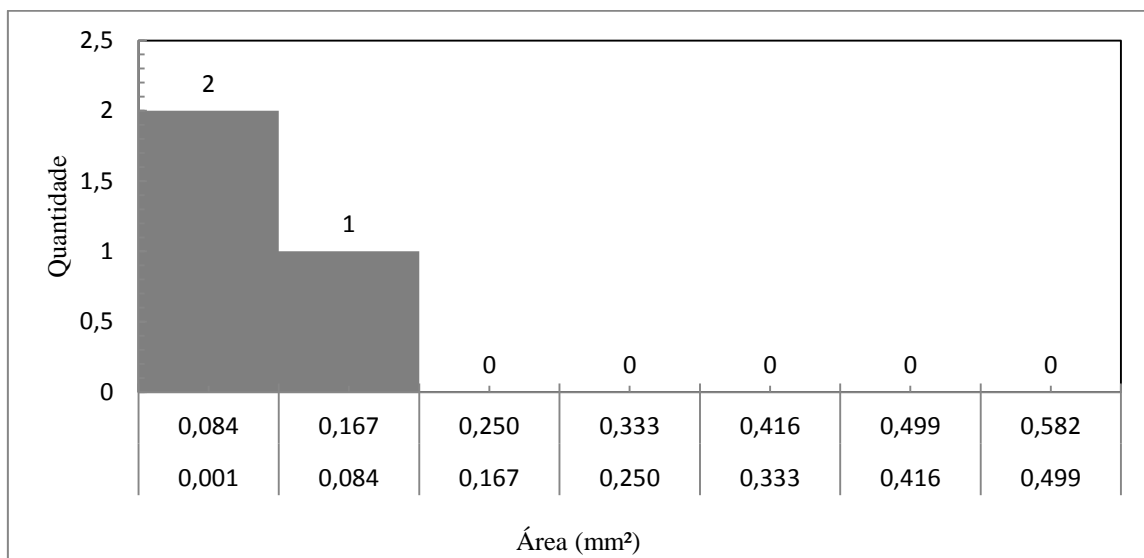


Figura 4.18 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100kPa.

B. Pressão vertical de 200 kPa

A Figura 4.19 mostra a distribuição de frequência das áreas de contato para a geomembrana de PEAD de 1,0 mm de espessura submetida à pressão de 200 kPa. Observa-se que o tamanho das áreas de contato aumentou, tendo uma variação entre 0,001 e 0,582 mm². Nos resultados pode-se identificar uma predominância por áreas de contato menores. A maior frequência de áreas contato para esta configuração foi o primeiro intervalo da distribuição, com 16 (76,2%) áreas de contato em um número total de contatos de vinte e um. Pode-se notar ainda que o número de contatos total continua similar aos resultados das configurações com geomembranas de PVC. Também se verifica o mesmo comportamento das outras configurações de ensaios com respeito à geração de uma curva decrescente com o aumento do tamanho das áreas.

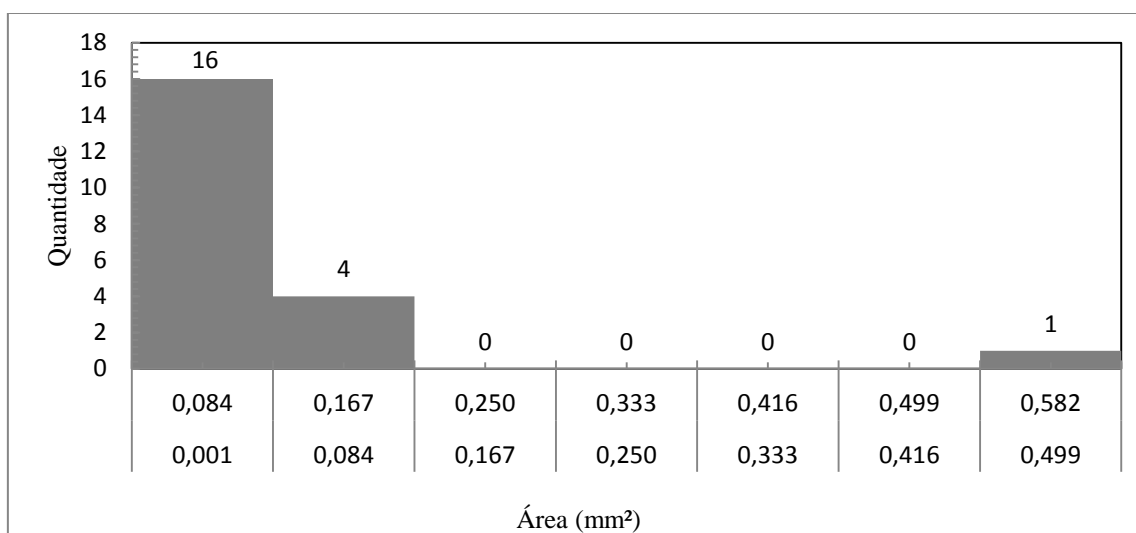


Figura 4.19 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200kPa.

C. Pressão vertical de 300 kPa

A Figura 4.20 apresenta a distribuição de frequência das áreas de contato para a geomembrana submetida à pressão de 300 kPa. Na figura em menção, observa-se que o tamanho das áreas de contato diminuiu com relação à pressão de 200 kPa. Para este caso, as áreas variaram entre 0,001 a 0,250 mm². Neste ensaio, novamente foi observado o mesmo comportamento referente à predominância por áreas de contato menores e à geração de uma curva decrescente com o aumento do tamanho das áreas. Para o total de

vinte e oito áreas de contato, a maior frequência de áreas contato para esta configuração foi o primeiro intervalo da distribuição, com 21 (75%) áreas de contato.

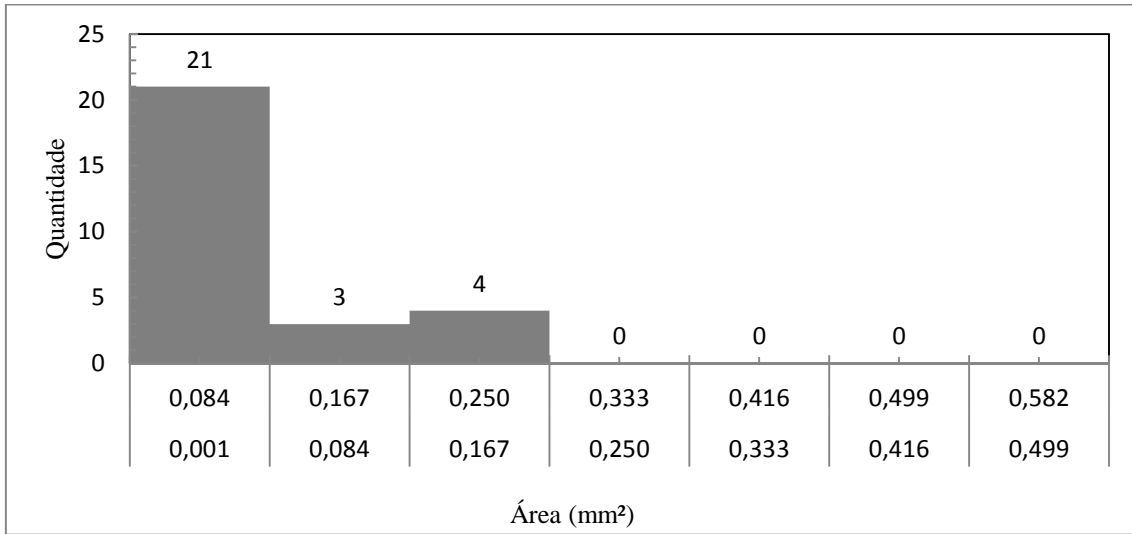


Figura 4.20 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300kPa.

D. Pressão vertical de 500 kPa

Os resultados para a pressão de 500 kPa estão mostrados na Figura 4.21.

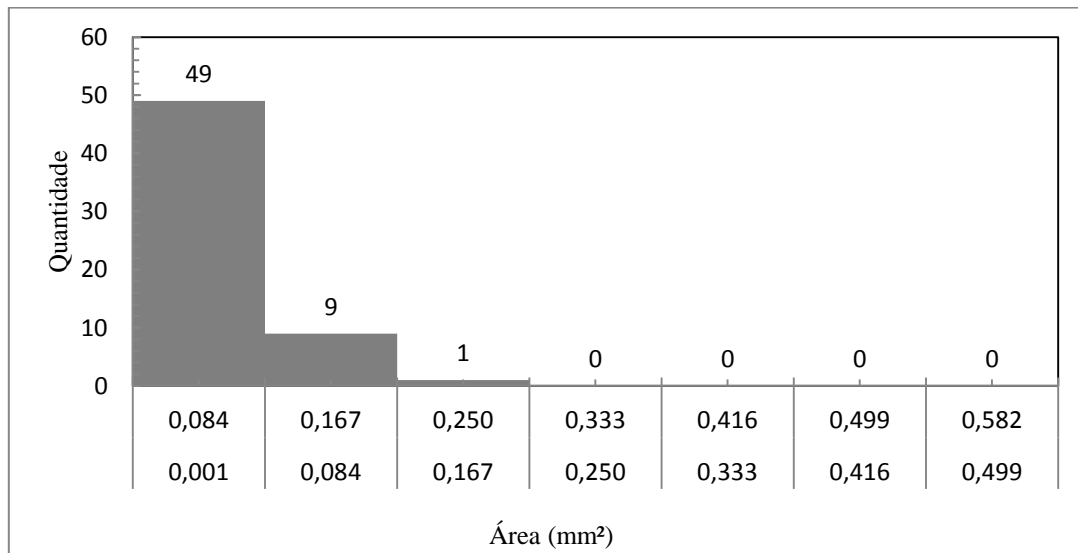


Figura 4.21 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500kPa.

Nesta distribuição, observa-se que o tamanho das áreas de contato varia entre 0,001 a 0,250 mm². Para tal configuração é possível verificar ainda o mesmo comportamento

referente à predominância das áreas de contato menores e à geração de uma curva decrescente com o aumento do tamanho das áreas. A maior frequência de áreas contato para esta configuração foi o primeiro intervalo da distribuição, com 49 (83%) áreas de contato, em um número de contatos total de 59.

E. Pressão vertical de 1000 kPa

A Figura 4.22 apresenta a distribuição de frequência das áreas de contato para a geomembrana submetida à pressão de 1000 kPa.

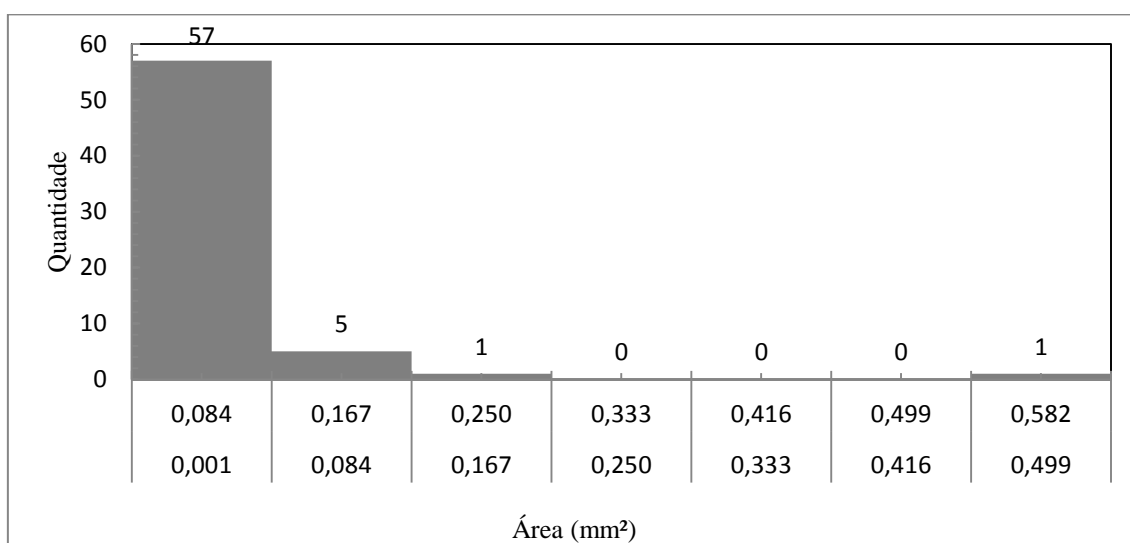


Figura 4.22 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000kPa.

Nesta distribuição, observa-se que o tamanho das áreas de contato varia entre 0,001 a 0,582 mm². Isso implica um aumento quando se comparando aos valores obtidos para a pressão de 500 kPa. Novamente, os resultados mostram o mesmo comportamento já comentado com relação à uma predominância por áreas de contato menores e à geração de uma curva decrescente com o aumento do tamanho das áreas. Neste caso, para o número total de sessenta e quatro contatos, a maior frequência de áreas contato foi verificada para o primeiro intervalo da distribuição com 57, correspondente ao 89%. É possível notar ainda que as áreas de contato dos últimos intervalos têm frequências de contato muito baixas quando comparadas com as áreas de contatos dos primeiros intervalos (menores). Novamente nota-se o mesmo comportamento percebido com as outras configurações de ensaios com o rejeito de ferro e com o rejeito de ouro, ao se

analisar os tamanhos dos grãos impressos na geomembrana, onde se observou que o maior número de áreas de contato (primeiro intervalo das distribuições) é gerado com tamanhos até o D_{85} do material.

4.1.5- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL APÓS OS ENSAIOS

A fim de se verificar a possível ocorrência de quebra de grãos, foram realizadas análises granulométricas antes e depois de alguns ensaios de dano mecânico. Os ensaios foram realizados usando o equipamento Granulômetro a laser. Dos resultados obtidos, foi possível ser constatada a quebra de grãos de ambos os rejeitos utilizados (ferro e ouro). Na Figura 4.23 e Figura 4.24 são apresentadas as análises granulométricas para o rejeito de ferro e para o rejeito de ouro, respectivamente.

Algumas características relevantes sobre a distribuição granulométrica do rejeito de ferro e do rejeito de ouro são apresentadas na Tabela 4.1.

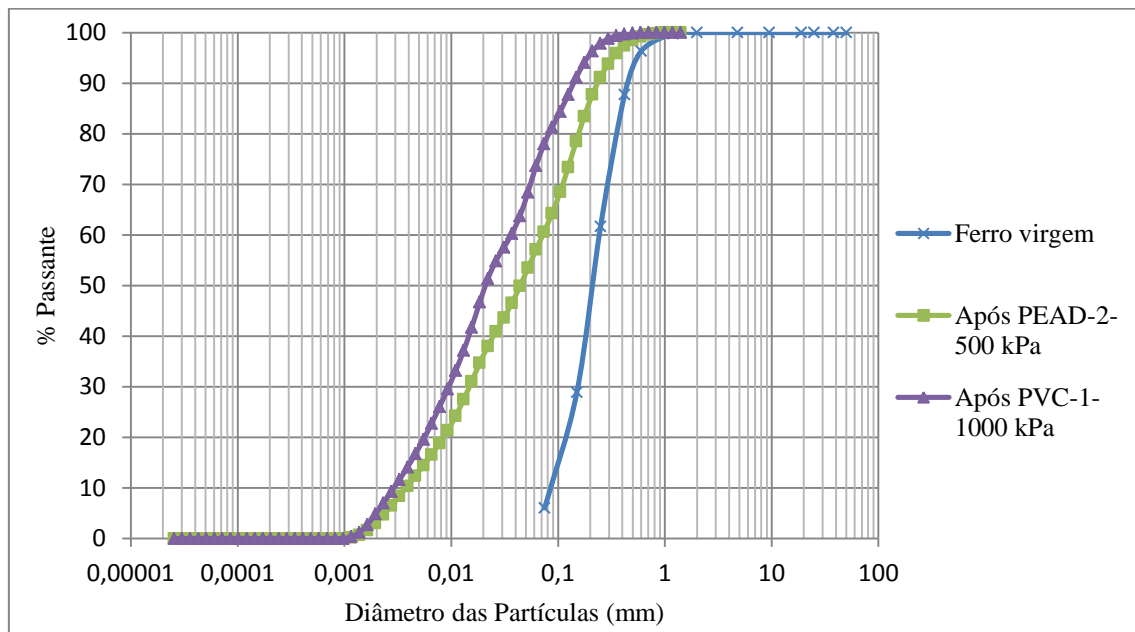


Figura 4.23 - Curva granulométrica do rejeito de ferro antes e após dos ensaios de dano mecânico.

De acordo com os resultados da Figura 4.23, pode-se observar a quebra de grãos quando aplicada a pressão sobre o rejeito de ferro. Tem-se maior quebra de grãos com a aplicação de 1000 kPa de pressão comparada com 500 kPa de pressão. A quebra que ocorreu para os dois tipos de rejeitos certamente influenciou nas áreas de contato medidas

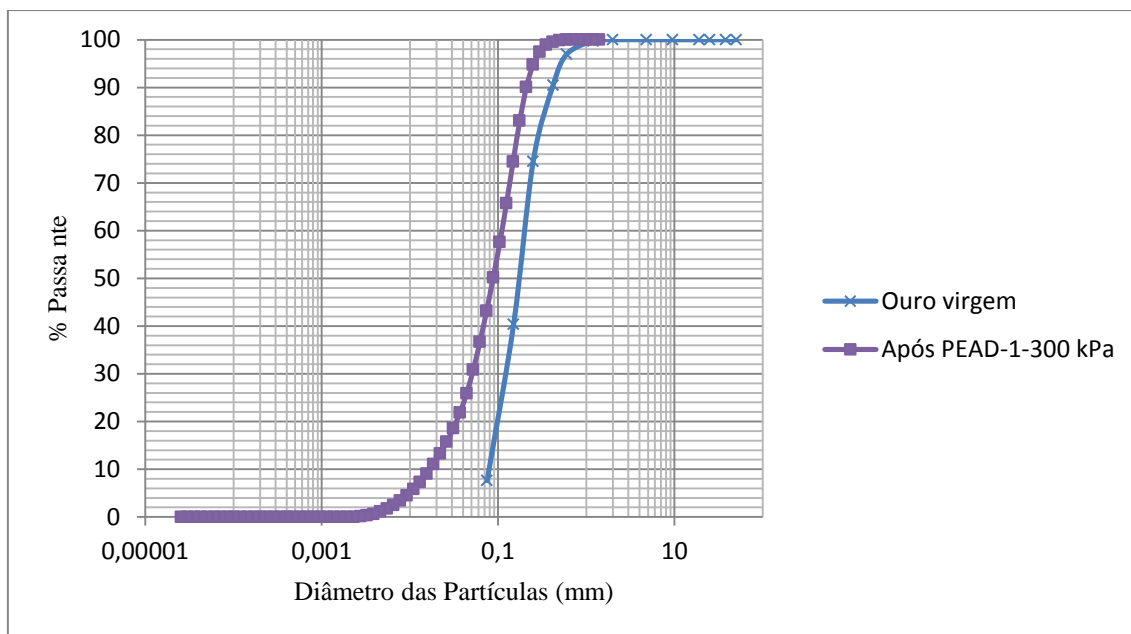


Figura 4.24 - Curva granulométrica do rejeito de ouro antes e após dos ensaios de dano mecânico.

Tabela 4.1 – Características dos rejeitos utilizados antes e depois dos ensaios de dano.

	Rejeito de Ouro		Rejeito de Ferro		
	Virgem	Após PEAD-1-300 kPa	Virgem	Após PEAD-2-500 kPa	Após PVC-1-1000 kPa
D_{10} (mm)	0,08	0,018	0,085	,003	0,0039
D_{30} (mm)	0,13	0,051	0,160	0,015	0,0095
D_{50} (mm)	0,18	0,090	0,210	0,045	0,0200
D_{60} (mm)	0,20	0,110	0,240	0,075	0,0370
Coefficiente de Uniformidade (c_u)	2,50	6,110	2,820	25,0	9,490
Coefficiente de Curvatura (c_c)	1,06	1,310	1,250	1,00	0,6300

Notas: D_n = n% das partículas do solo possuem diâmetro D inferiores a ele, D_{10} = diâmetro efetivo dos grãos, D_{50} = diâmetro médio dos grãos, $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ = coeficiente de uniformidade, $C_c =$

$\frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$ = coeficiente de curvatura.

4.1.6- COMPARAÇÃO ENTRE OS NÚMEROS DE CONTATO DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

De acordo com os resultados observados em todos os itens, as impressões na geomembrana são incrementadas conforme aumenta a pressão aplicada, como era de se esperar. Por exemplo, nos testes F-PVC-2 sob 500 kPa e 1000 kPa de pressão, os números de pontos de contato foram 864 e 1121 respectivamente. Pode se observar na Figura 4.25, que a curva cresce, porque ao incrementar-se o carregamento, tem se maior numero de grãos em contato com a geomembrana. Quando se incrementa o carga aplicada, se tem uma redistribuição das partículas, fazendo que maior quantidade de grãos se desloquem para baixo, e entrem em contato com a geomembrana

De acordo com o material usado, houve uma variação no número de impressões. O rejeito de ferro teve maior número de impressões nas geomembranas quando se comparado com os resultados obtidos para o rejeito de ouro. Este resultado é contrário ao esperado, pois segundo Brachman & Gudina (2008) espera-se que, quando se tem maior tamanho da partícula, é menor o número de grãos em contato com a geomembrana, ou seja, o resultado esperado era ter maior número de impressões na geomembrana quando usado o rejeito de ouro. Nos ensaios com geomembrana de PEAD de 1,0 mm sob aplicação de 1000 kPa de pressão e em contato com rejeito de ouro ou com rejeito de ferro, os números de contatos foram 64 e 536 respectivamente, notando-se uma diferença muito relevante na quantidade de pontos de contato com os dois tipos de rejeito para um mesmo tipo de geomembrana. Isto pode se dever à quebra dos grãos do rejeito de ferro durante o ensaio, do modo que gera mais numero de impressões na geomembrana (ver Figura 4.23). Pode-se ver na Figura 4.25 o comportamento das curvas quando representada graficamente a pressão aplicada *versus* o número de impressões em cada uma das geomembranas testadas. Na Tabela 4.2 apresenta-se o número de impressões geradas nas geomembranas.

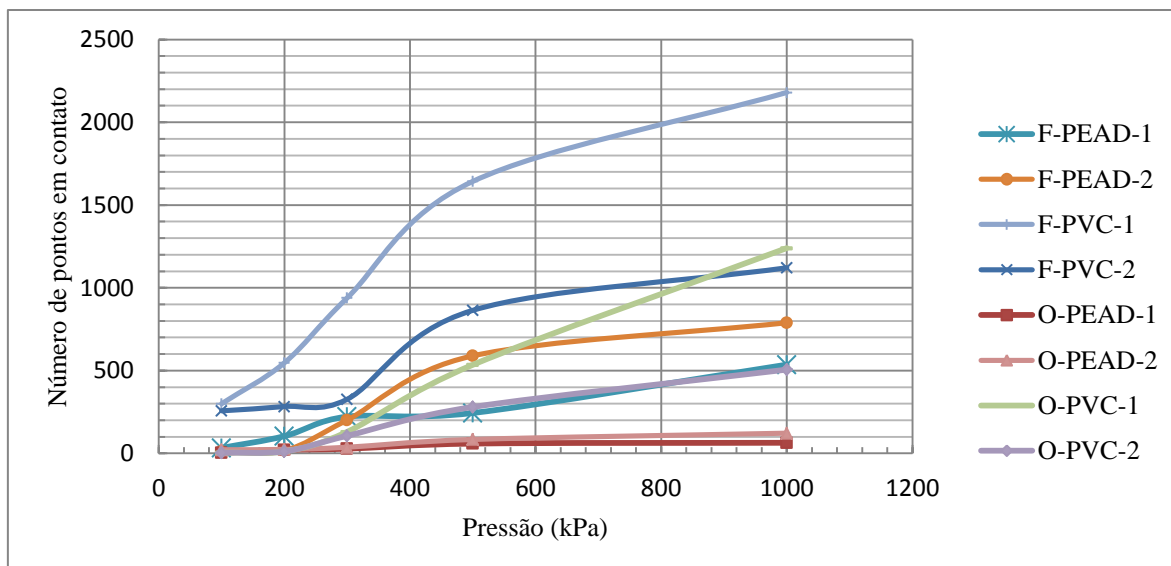


Figura 4.25 – Quantificação do número de impressões na geomembrana sob a aplicação de pressão vertical.

Tabela 4.2 - Número de pontos em contato com a geomembrana.

Número de pontos de contato	Pressão vertical (kPa)				
	100	200	300	500	1000
F-PEAD-1	33	104	222	244	536
F-PEAD-2	11	17	201	589	789
F-PVC-1	300	547	939	1643	2180
F-PVC-2	257	283	327	864	1121
O-PEAD-1	3	21	28	59	64
O-PEAD-2	22	24	37	84	122
O-PVC-1	5	12	130	535	1240
O-PVC-2	4	12	106	280	506

Por outro lado, levando-se em consideração o tipo de geomembrana empregada, a geomembrana de PVC de menor espessura (1,0 mm) teve maior número de impressões quando avaliadas com respeito às geomembranas de PEAD.

Com relação à espessura, para o caso das geomembranas de PEAD, as de maior espessura (2,0 mm) tiveram uma maior quantidade de pontos de contato quando comparado com as de 1,0 mm de espessura. Com exceção da geomembrana de PEAD em contato com o rejeito de ferro e submetida a 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa de pressão normal, onde o número de contatos foi menor para a espessura de 1,0 mm em comparação com a de 2,0 mm. Para o caso das geomembranas de PVC ocorreu

totalmente o contrário, onde as geomembranas de menor espessura (1,0 mm) exibiram um maior número de pontos de contato com respeito às de 2,0 mm.

4.1.7- COMPARAÇÃO ENTRE AS RAZÕES DE ÁREAS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

A razão de área do dano é definida como área total de contato do rejeito impresso no papel alumínio dividido pela área total da amostra do papel alumínio. De acordo Brachman and Gudina (2008) este valor fornece uma medida da pressão atuando sobre a geomembrana. Na Figura 4.26 apresenta-se a razão de área de cada uma das geomembranas testadas *versus* a pressão à que estão submetidas.

A maior razão de área encontrada foi para as geomembranas de PVC em contato com o rejeito de ferro para a pressão aplicada de 1000 kPa. É possível que o ferro gere uma maior área de contato devido ao tamanho de suas partículas. No entanto, nos resultados não era de se esperar que ele tivesse um maior número de partículas em contato com a geomembrana ao ser comparado com o rejeito de ouro, devido que quando se têm maior tamanho das partículas é menor o número de grãos em contato com a geomembrana.

As razões de área de contato produzidas pelo rejeito de ferro ou pelo rejeito de ouro têm um padrão nos dois tipos de geomembranas empregadas. Por exemplo, para a geomembrana de PVC, ao aumentar-se a espessura da geomembrana, tem-se um incremento na razão de área e, para o caso da geomembrana de PEAD, ao se acrescentar a espessura da geomembrana, diminui-se a razão de área dos contatos. Assim, para a geomembrana de PVC submetida a 1000 kPa de pressão de contato com o rejeito de ferro com espessura de 1,0 mm e 2,0 mm, as razões de área foram 1,37% e 1,65 %, respectivamente. Por sua vez, para a geomembrana de PEAD com estas mesmas condições, as razões de área foram (0,96%) e (0,43%) para 1,0 m e 2,0 mm, respectivamente. Na Tabela 4.3 são apresentadas as razões de área para os 40 testes realizados.

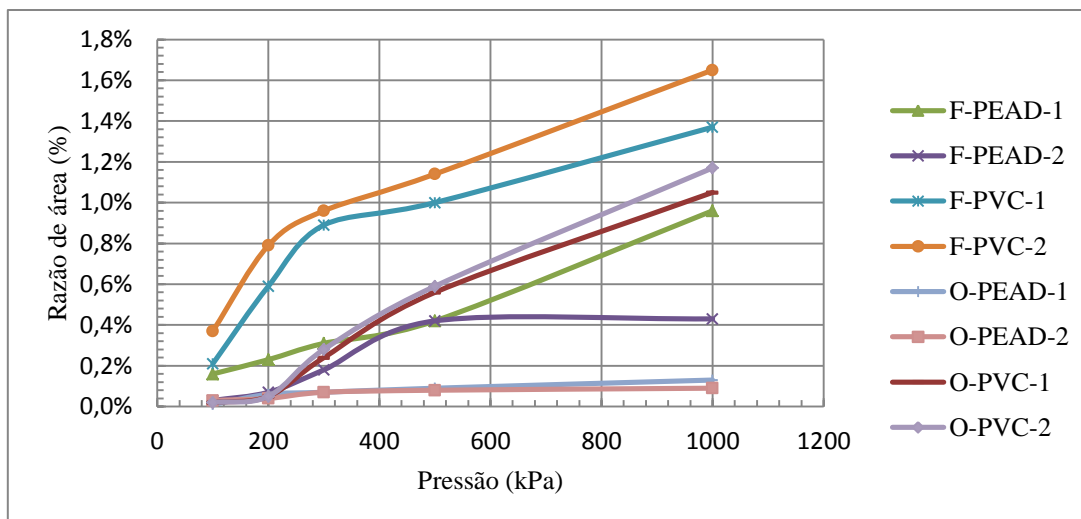


Figura 4.26 – Razão de área vs. Pressão para cada um dos ensaios realizados.

Tabela 4.3 – Resultados da razão de área para cada uma das configurações dos ensaios.

Razão de área média (%)	Pressão vertical (kPa)				
	100	200	300	500	1000
F-PEAD-1	0,16%	0,23%	0,31%	0,42%	0,96%
F-PEAD-2	0,03%	0,07%	0,18%	0,42%	0,43%
F-PVC-1	0,21%	0,59%	0,89%	1,00%	1,37%
F-PVC-2	0,37%	0,79%	0,96%	1,14%	1,65%
O-PEAD-1	0,01%	0,06%	0,07%	0,09%	0,13%
O-PEAD-2	0,03%	0,04%	0,07%	0,08%	0,09%
O-PVC-1	0,02%	0,05%	0,24%	0,56%	1,05%
O-PVC-2	0,02%	0,05%	0,28%	0,59%	1,17%

4.1.8- COMPARAÇÃO ENTRE AS ÁREAS DE CONTATO MÉDIAS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

Na Figura 4.27 apresenta-se o gráfico que relaciona a área média de contato e a pressão normal aplicada para as geomembranas de PVC e PEAD com 1,0 mm e 2,0 mm de espessura. Segundo os resultados obtidos, nota-se que as geomembranas de PVC de 1,0 e 2,0 mm possuem comportamentos semelhantes quando analisadas às áreas de contatos médias geradas a partir do ensaio de dano mecânico por compressão utilizando o rejeito de ferro. No entanto, para o caso da pressão aplicada de 1000 kPa, a geomembrana de 1,0 mm diminui o valor da área de contato e, ao contrário do que era esperado, para o

caso da geomembrana de 2,0 mm esse valor aumenta. Por sua vez, para o caso da geomembrana de PEAD com 1,0 e 2,0 mm utilizando rejeito de ferro, observa-se comportamento diferenciado com respeito a todas as pressões aplicadas. Porém, de uma maneira geral, é possível observar um aumento nessas áreas seguido de uma tendência de redução com o aumento da pressão aplicada.

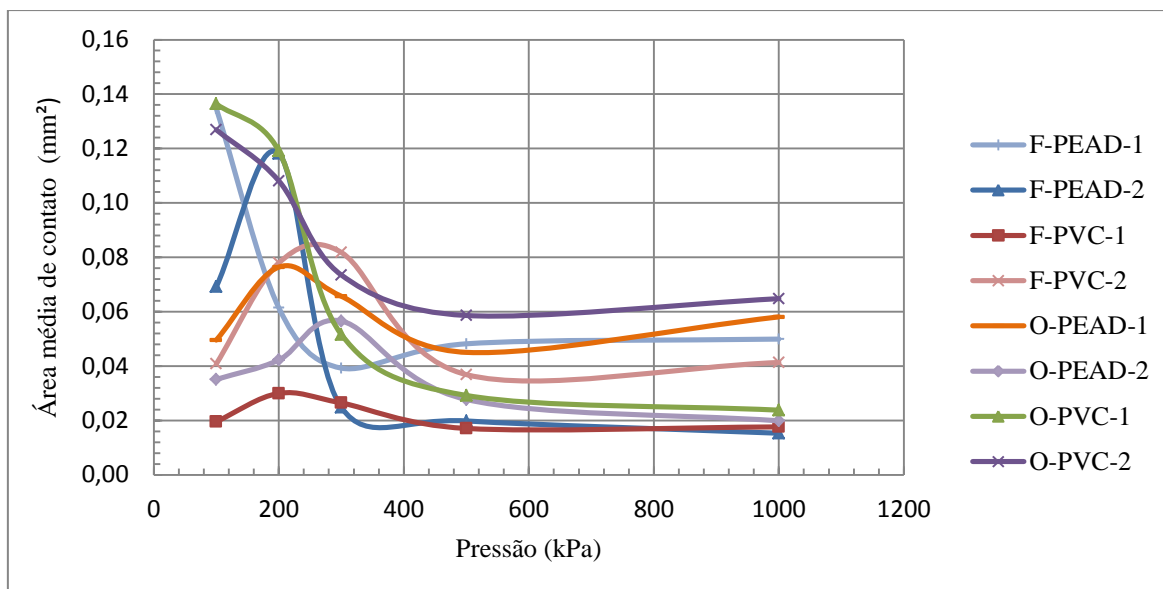


Figura 4.27 - Área média de contato *versus* pressão vertical.

De acordo com o observado no gráfico anterior, não é possível identificar um padrão para as áreas médias de contato. Porém é possível dizer que as maiores áreas médias de contato foram geradas, de uma maneira geral, para a pressão de 200 kPa pois apenas em três casos a maior área média de contato foi para 100 kPa. Também podem ser observadas áreas médias de contato menores quando os carregamentos atingiram maiores valores (500 kPa e 1000 kPa). Este resultado está dentro do esperado, uma vez que, com o aumento da pressão aplicada, a área de contato vai diminuindo.

4.1.9- COMPARAÇÃO DA CARGA MÉDIA DE CONTATO DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

A Figura 4.28 mostra a carga média de contato gerada pela compressão dos grãos nos ensaios de dano mecânico. Para o caso das geomembranas de PVC com 1,0 mm e 2,0

mm de espessura, para ensaios empregando rejeito de ferro, as duas curvas apresentaram comportamentos semelhantes, aumentando mais significativamente de um valor para o outro a carga média de contato para a geomembrana de 2,0 mm. Entretanto, para o caso das geomembranas de PEAD, de 1,0 mm e 2,0 mm de espessura, em contato com o rejeito de ferro observaram-se comportamentos muito diferenciados nas curvas.

Pode-se verificar ainda, que para as geomembranas de PVC de 1,0 e 2,0 mm de espessura em ensaios com o rejeito de ouro, as duas curvas possuem uma mesma tendência, ou seja, começam com uma carga média de contato pequena, e então aumenta com a pressão de 200 kPa, diminui para a pressão de 300 kPa, para então aumentar de novo com 500 kPa e 1000 kPa. Já para as geomembranas de PEAD com 1,0 mm e 2,0 mm de espessura em contato com o rejeito de ouro, as duas curvas para as cargas médias de contato apresentam comportamentos diferenciados com a aplicação da tensão normal. Isso pode ocorrer tendo em vista a variação granulometria dos grãos com a aplicação do carregamento.

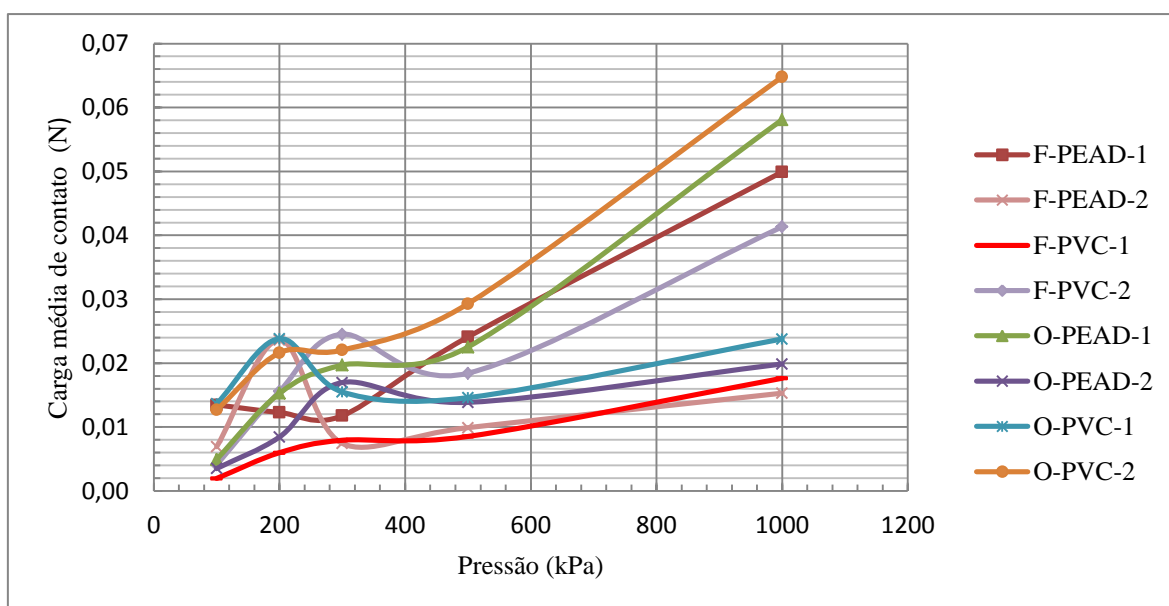


Figura 4.28 - Carga média de contato *versus* pressão vertical.

Observa-se na Figura 4.28 que, assim como as curvas para as áreas médias de contato (Figura 4.27), não é possível identificar um padrão seguido pelas cargas médias de contato. No entanto, identificou-se que, como esperado, as maiores cargas médias foram geradas com a pressão de 1000 kPa para todos os casos reportados, sendo maior a configuração O-PVC-2 com valor de 0,065 N. Além disso, percebe-se que as cargas

médias de contato menores foram para 100 kPa, de uma maneira geral (com a configuração F-PEAD-1, o menor valor obtido foi para 300 kPa de pressão aplicada). A menor carga média de contato foi 0,02 N com a configuração F-PVC-1 submetida a 100 kPa de pressão.

4.2- EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA

4.2.1- RESULTADOS DO ENSAIO COM 24 HORAS DE DURAÇÃO

Neste item será detalhado um teste com 24 horas de duração para o equipamento de média escala empregado na pesquisa. Este teste foi feito com a finalidade de definir o tempo de duração de cada um dos ensaios realizados no equipamento de média escala. A configuração escolhida foi:

- B-PVC-1-100kPa

Onde: B: Brita 3

PVC 1: Geomembrana de PVC (Poli-Vinil Clorado) de 1,0 mm.

Na Figura 4.29 apresentam-se os resultados para o tempo *versus* altura da coluna de água no sistema ar-água para o ensaio realizado com 24 horas de duração. Optou-se por empregar apenas a geomembrana de PVC a de PEAD devido ao fato de a primeira ser a mais extensível.

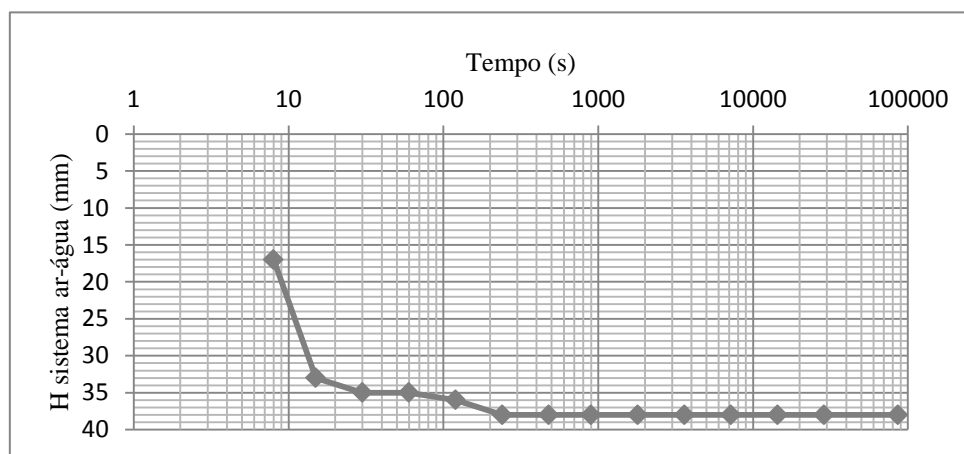


Figura 4.29 - Tempo *versus* Altura da coluna de água no sistema ar-água para o ensaio B-PVC-1 submetido a 100 kPa de pressão durante 24 horas.

Observa-se que, a partir do minuto quatro de ensaio, a altura da coluna de água estabilizou, indicando que não houve mais vazão da água do sistema ar-água até a bolsa de borracha de aplicação de pressão. O fato de não ter mais variação da altura de água, pode indicar que as deformações dentro da caixa se estabilizaram.

Segundo os resultados do ensaio para estabilização das deformações dentro da caixa de ensaios, optou-se por ter um tempo de duração para todos os ensaios de 1 hora.

4.2.2- FORMAS DE CONTATO DA BRITA E DA AREIA NOS ENSAIOS REALIZADOS

Na análise visual das geomembranas observou-se que eram impressas na superfície das geomembranas diferentes formas e dimensões de áreas de contato, dependendo do carregamento aplicado. Com relação à geomembrana (PVC ou PEAD), as formas das áreas de contato mantiveram-se similares, variando apenas em quantidade, em função do tipo de geomembrana.

A Figura 4.30 mostra os contatos obtidos após aplicação do carregamento de 500 kPa. Pode-se notar que é gerada na superfície da geomembrana uma série de danos sem constância de forma. De acordo com os resultados, os dois tipos de geomembranas se comportam de maneira diferente. Isso está de acordo com os resultados obtidos por Geroto (2008) e Rebelo (2009). Os principais tipos de danos apresentados pela geomembrana de PEAD foram arranhões, entalhes e em alguns poucos lugares indentações. Enquanto que, para o caso das geomembranas de PVC, os danos se apresentaram principalmente na forma de deformações. Isto pode ser devido à natureza rígida da geomembrana de PEAD e à natureza flexível da geomembrana de PVC que tende a envolver a brita.

De acordo com as análises visuais das geomembranas, as de PEAD de 1,0 mm e 2,0 mm de espessura foram as que apresentaram o maior número de impressões, quando se comparando com as geomembranas de PVC. Para nenhum dos carregamentos aplicados, foram observados furos ou rasgos na superfície da geomembrana. Desta forma, não se teve vazão em nenhum dos ensaios realizados.

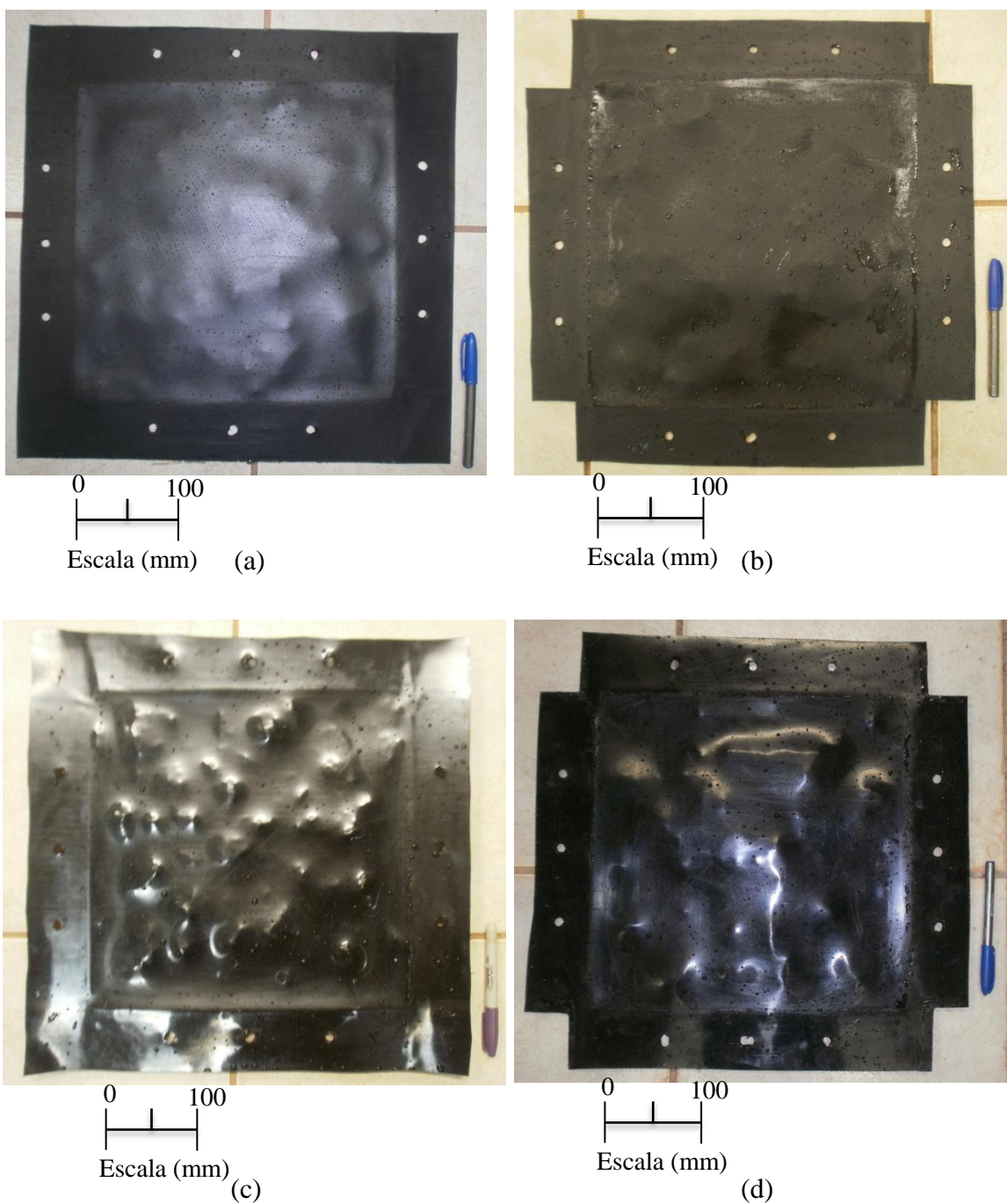


Figura 4.30 - Contatos da brita atuando sobre a geomembrana, quando submetida a 500 kPa de pressão: (a) geomembrana de PVC-1,0 mm de espessura, (b) geomembrana de PVC-2,0 mm de espessura, (c) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura, (d) geomembrana de PEAD-2,0 mm de espessura.

4.2.3- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM BRITA

A seguir serão apresentados os gráficos de distribuição de frequência das áreas de contato impressas sobre a geomembrana e suas respectivas análises. Os ensaios comentados nos seguintes subitens foram montados com brita como camada subjacente à geomembrana e com areia como camada sobrejacente.

Assim como ocorreu para o caso dos ensaios onde foi utilizado um equipamento de menor porte, os resultados dos ensaios com respeito à distribuição de frequência das áreas de contato seguem um padrão para determinadas configurações. É por isso que aqui só serão exibidos os gráficos para alguns dos testes realizados, sendo apresentados os gráficos dos outros ensaios nos Apêndices G e H.

4.2.3.1- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM GEOMEMBRANAS DE PVC DE 2,0 mm DE ESPESSURA

A. Pressão vertical de 100 kPa

A Figura 4.31 mostra a distribuição de frequência das áreas de contato ao longo de uma área de aproximadamente $102,4 \times 10^3 \text{ mm}^2$. Nota-se que as áreas de contato variaram de 2,769 a 604,910 mm^2 , com predominância de áreas de contato menores. A maior frequência de áreas de contato para esta configuração foi o terceiro intervalo na distribuição, com cinco (38,5%) áreas de contato, com respeito ao número de contatos total de treze. Também se pode observar que, nesta configuração, a curva gerada não é uma curva que decresce com o aumento do tamanho das áreas, assim como ocorreu com o equipamento pequeno e o emprego de rejeito mais fino. Além disso, com respeito ao tamanho dos grãos, observa-se que as áreas geradas no primeiro intervalo não coincidem com os tamanhos da brita utilizada. Isto é devido ao fato de que as impressões deixadas na geomembrana foram por protuberâncias de diferentes áreas que se encontravam nos grãos da brita. Na figura, observa-se que o limite superior do terceiro intervalo (valor de maior frequência) da distribuição está muito aproximado do diâmetro D_{10} (26,0 mm) da brita.

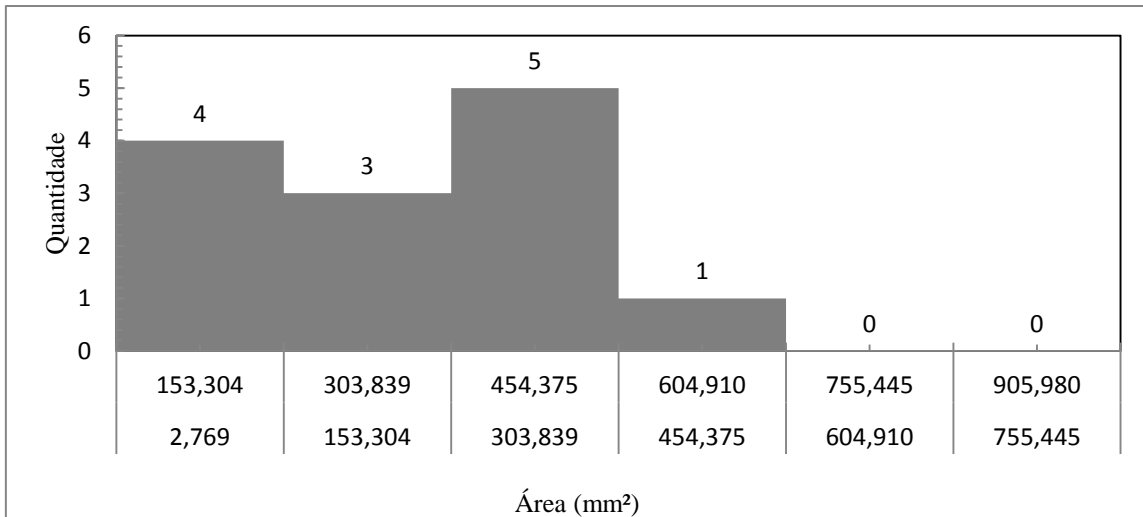


Figura 4.31 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100kPa.

B. Pressão vertical de 200 kPa

A Figura 4.32 apresenta o gráfico de distribuição de frequência das áreas de contato geradas com a pressão de 200 kPa. Comparando-se com o resultado da Figura 4.31, nota-se um acréscimo na frequência de áreas de contato, que aumentou para valores em torno de vinte e um (72,4%) no primeiro intervalo da distribuição em um número de contatos total de vinte e nove. Além disso, observou-se uma diminuição nos valores das áreas, que variaram de 2,769 a 454,375 mm². Com esta configuração, pode-se ainda observar que é gerada uma curva decrescente com o aumento da área, de forma semelhante ao que ocorreu com os ensaios utilizando rejeitos de menor granulometria.

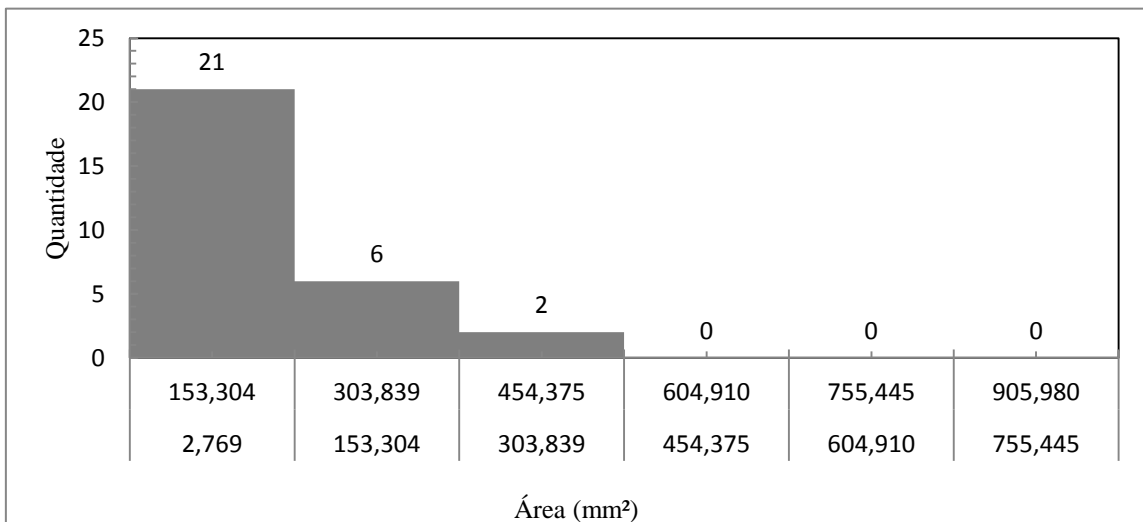


Figura 4.32 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200kPa.

C. Tensão normal de 300 kPa

A Figura 4.33 mostra a frequência de áreas de contato geradas a partir da pressão vertical de 300 kPa. É possível notar que houve um aumento no primeiro intervalo da distribuição de frequências, sendo este valor de 23 (71,9%). Também foi possível observar que a quantidade total de contatos aumentou para 32 quando comparando com o valor total obtido para 200 kPa (que foi de 29 áreas de contato), e os valores das áreas variaram de 2,769 a 604,910 mm². A partir dos resultados obtidos, pode se notar que a tendência de curva decrescente continua para este resultado, assim, como ocorreu nos resultados observados para esta geomembrana submetida a 200 kPa de pressão normal, e para os ensaios realizados no equipamento pequeno.

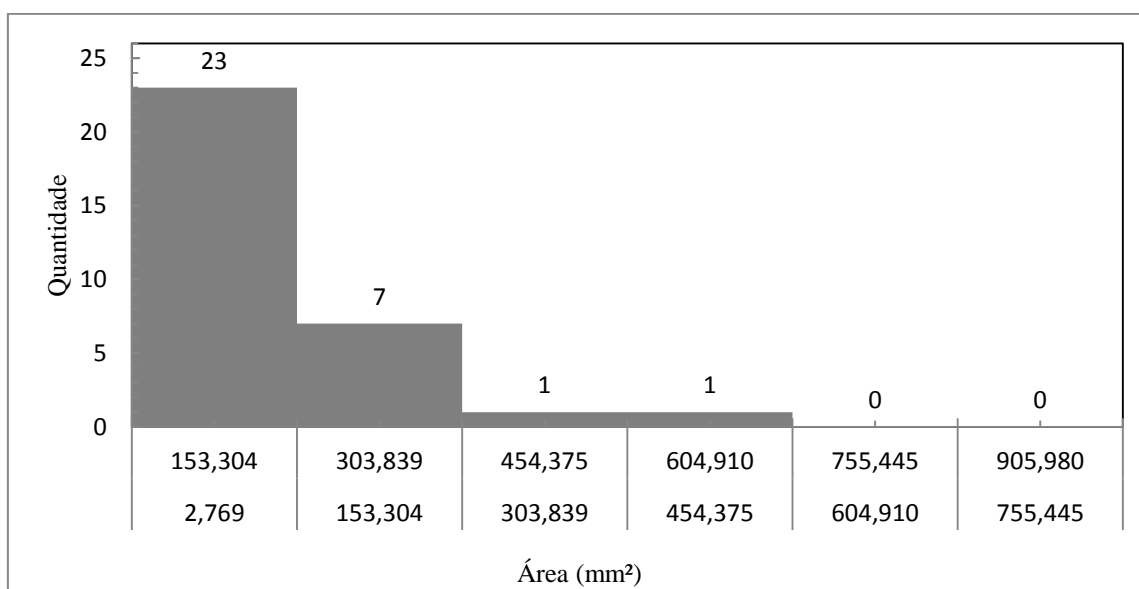


Figura 4.33 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300kPa.

D. Pressão vertical de 500 kPa

Os resultados da pressão de 500 kPa estão apresentados na Figura 4.34. Nota-se uma diminuição na frequência de áreas de contato do primeiro intervalo da distribuição, com oito (38,1%) áreas de contato impressas na geomembrana. É possível observar também que o número de áreas de contato total diminuiu para 21, sendo este número menor que o número total de áreas de contato para a mesma geomembrana quando submetida a 300 kPa de pressão normal (ver Figura 4.33). Novamente, verifica-se uma tendência de

curva decrescente para as frequências de áreas de contato. Além disso, pode-se notar que o tamanho das áreas de contato teve uma variação no intervalo de 2,769 a 604,910 mm². Isto significa um aumento com relação aos resultados obtidos para o ensaio com uma pressão de 300 kPa , onde a frequência de áreas aumentou para os últimos intervalos.

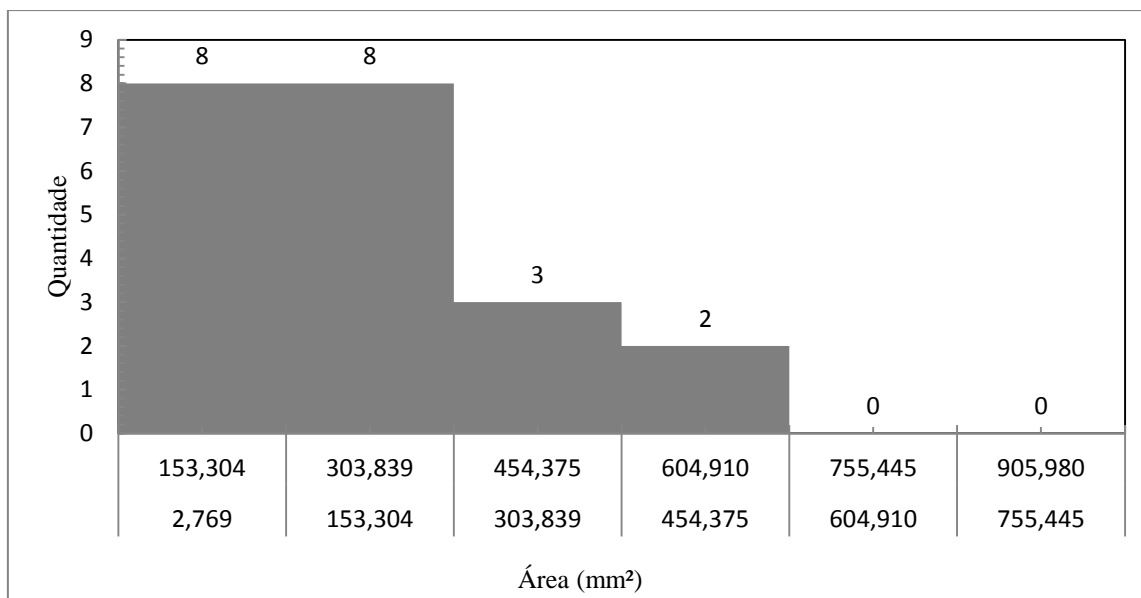


Figura 4.34 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500kPa.

4.2.3.2- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM GEOMEMBRANAS DE PEAD DE 1,0 mm DE ESPESSURA

A. Pressão vertical de 100 kPa

A Figura 4.35 mostra a distribuição de frequência das áreas de contato ao longo de uma área de aproximadamente $102,4 \times 10^3$ mm² para geomembrana de PEAD de 1,0 mm de espessura submetida à pressão de 100 kPa. Observa-se que as áreas de contato variaram de 2,769 a 755,445 mm², com predominância de áreas de contato menores.

A maior frequência de áreas contato para esta configuração foi o primeiro intervalo da distribuição, com 37 áreas de contato, representando 80,4% do total das áreas de contato que foi de 46. O número de contatos gerados com esta configuração foi maior que o numero de contatos gerados com as outras configurações quando submetidas a 100 kPa de pressão vertical (ver Figura 4.31, Apêndice G - Figura G.0.1 e Apêndice H - Figura H.0.1). Pode-se ainda observar na Figura 4.35, que com respeito ao número das áreas impressas, tem-se o mesmo comportamento que com as geomembranas de PVC, ou

seja, o primeiro; segundo ou o terceiro intervalo na distribuição são aqueles com maior frequência de áreas de contato.

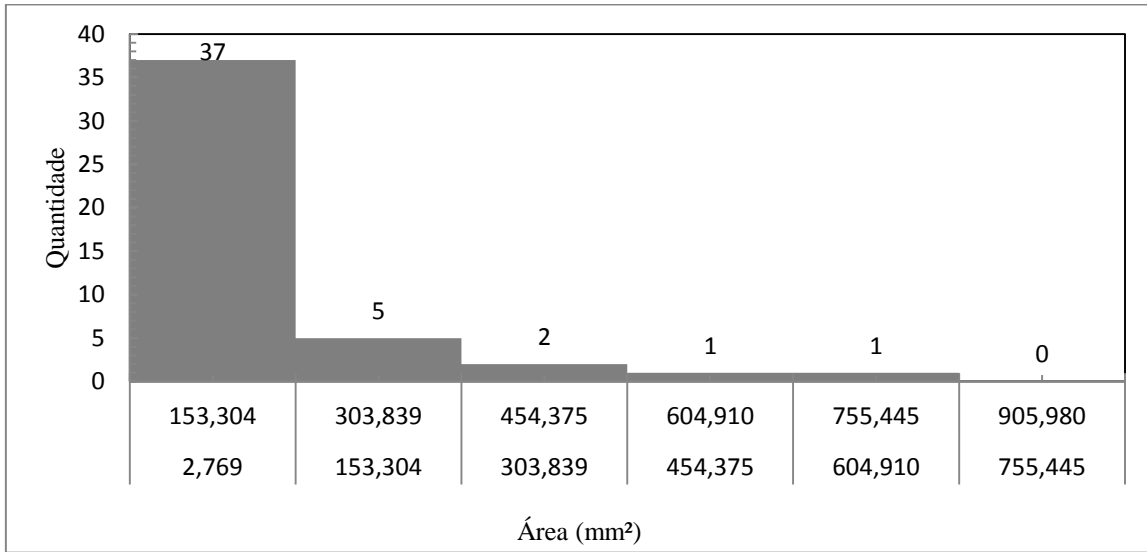


Figura 4.35 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100kPa.

B. Pressão vertical de 200 kPa

Os resultados da distribuição de frequência das áreas de contato para a geomembrana de PEAD de 1,0 mm de espessura submetida à pressão de 200 kPa estão apresentados na Figura 4.36.

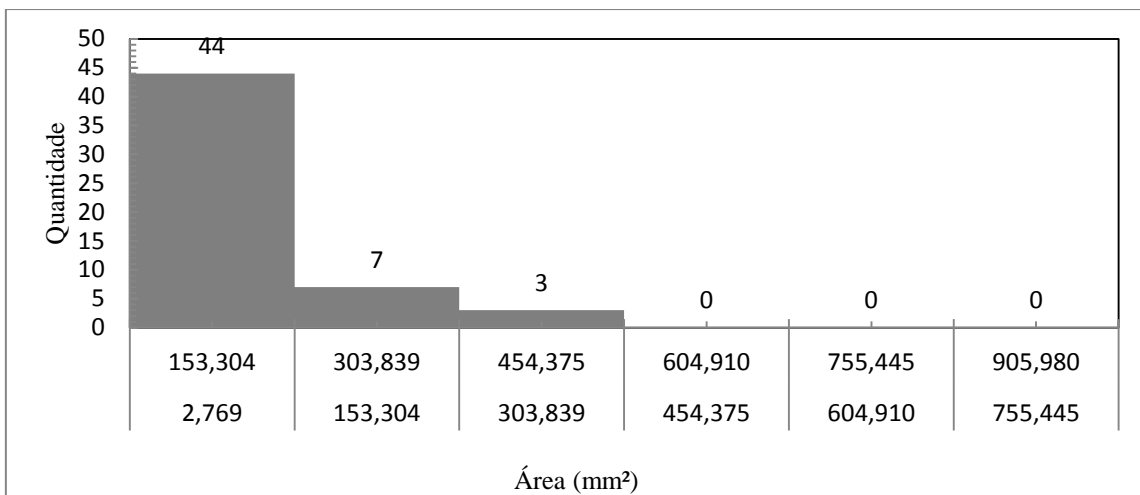


Figura 4.36 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200kPa.

Observa-se que o tamanho das áreas de contato diminuiu, tendo uma variação de 2,769 a 454,375 mm². É possível ainda, identificar uma predominância por áreas de contato

menores. A maior frequência de áreas contato para tal configuração foi o primeiro intervalo da distribuição, onde obtiveram-se 44 áreas de contato, correspondentes ao 81,5%, com respeito a um número total de 54. Além disso, pode-se verificar o comportamento decrescente da curva com o aumento do tamanho das áreas, assim como o observado em outros ensaios.

C. Pressão vertical de 300 kPa

A Figura 4.37 apresenta a distribuição de frequência das áreas de contato para a geomembrana submetida à pressão de 300 kPa. Na figura é possível notar que o tamanho das áreas de contato diminuiu apesar da pressão confinante ter aumentado. As áreas variaram entre 2,769 a 454,375 mm². Neste ensaio, observa-se o mesmo comportamento referente à predominância de áreas de contato menores e à geração de uma curva decrescente com o aumento do tamanho das áreas.

Para um total de 70 áreas de contato, a maior frequência de áreas contato para esta configuração foi o primeiro intervalo da distribuição, com 60 áreas de contato correspondentes ao 85,7% do total.

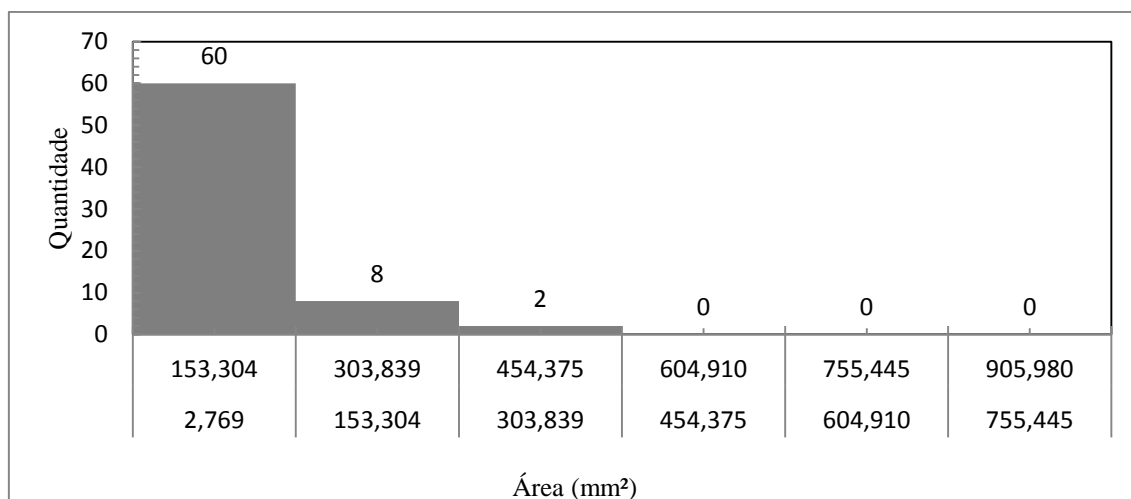


Figura 4.37 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300kPa.

D. Pressão vertical de 500 kPa

Para a pressão de 500 kPa, os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.38. Nessa distribuição, observa-se que o tamanho das áreas de contato variou entre 2,769 a

905,980 mm², valores significativamente maiores que os que ocorreram para a pressão de 300 kPa.

Assim como em outros casos, com esta configuração observa-se o mesmo comportamento referente à predominância por áreas de contato menores e à geração de uma curva decrescente com o aumento do tamanho das áreas. A maior frequência de áreas contato para esta configuração foi o primeiro intervalo da distribuição, com 39 (69,6%) áreas de contato em um número de contatos total de 56. É de se notar que o número de contatos total diminuiu quando comparado à configuração anterior (ver Figura 4.37).

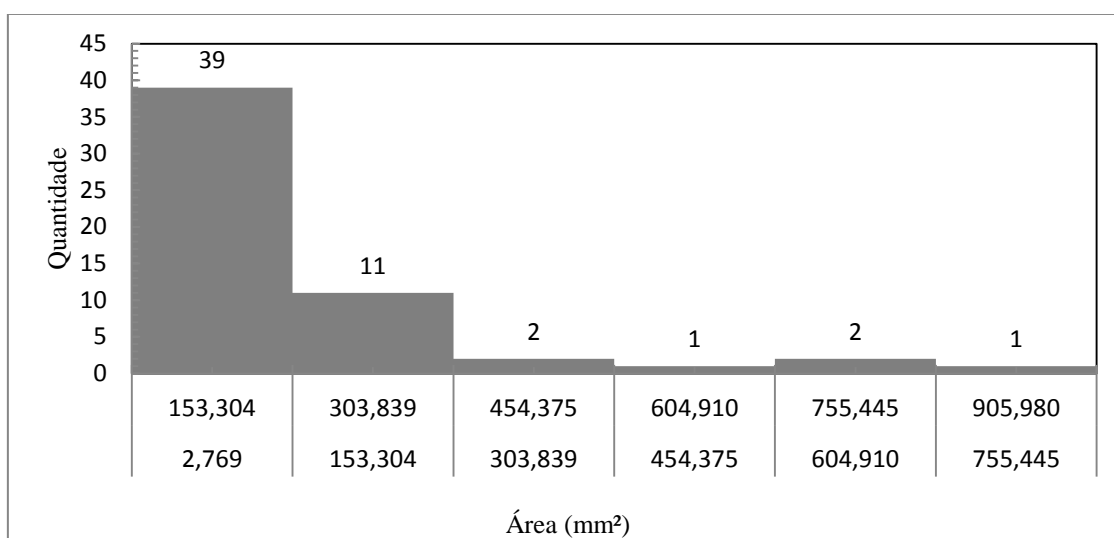


Figura 4.38 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500kPa.

4.2.4- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AREIA

Com relação à areia utilizada, não foi possível a obtenção de resultados com relação a danos devidos à presença desse material como camada granular sobrejacente, uma vez que não ficou nenhuma impressão de contato devido à areia. Somente foram observadas impressões devido à brita 3. Além disso, como a areia encontrava-se saturada, a coloração do filme utilizado para medir pressão foi perdida em quase sua totalidade, o que também impossibilitou a medição das áreas de contato impressas no filme.

Entretanto, foi possível observar alguns contatos da areia no filme com o qual estava em contato, porém isso ocorreu somente sobre as mesmas impressões deixadas pela brita no filme do lado oposto, devido à protuberância da brita sobre a areia.

4.2.5- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO MATERIAL APÓS OS ENSAIOS

Com o intuito de constatar quebra das partículas da brita durante os ensaios, foram realizadas análises granulométricas antes e depois dos ensaios de dano mecânico. De acordo com os resultados obtidos (Figura 4.39), foi possível verificar que não há quebra nenhuma das partículas da brita.

Na Figura 4.39 é apresentada a análise granulométrica para a brita 3 antes e depois dos ensaios. Algumas características relevantes sobre a distribuição granulométrica da brita 3 é apresentada na Tabela 3.3.

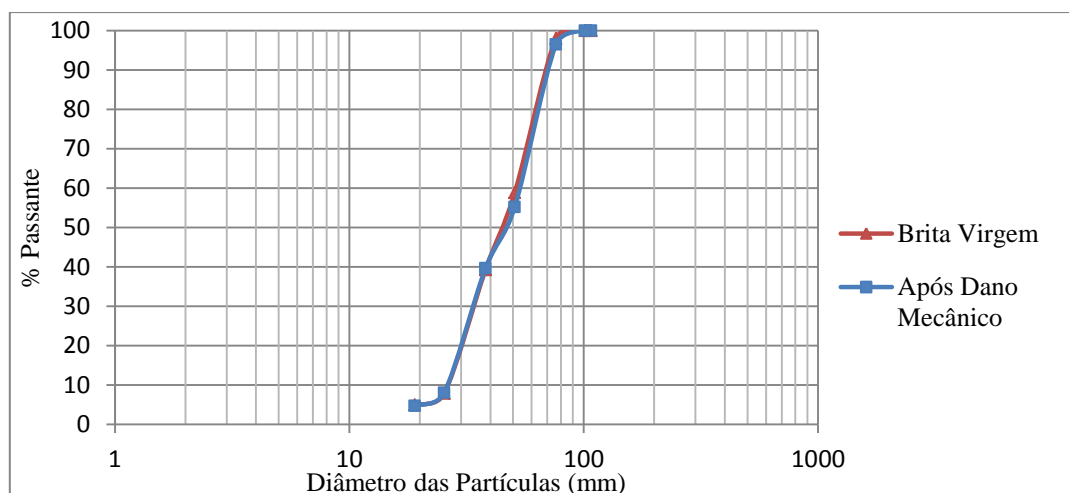


Figura 4.39 - Curva granulométrica da brita 3 antes e após dos ensaios de dano mecânico.

4.2.6- COMPARAÇÃO ENTRE OS NÚMEROS DE CONTATO DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

Na Figura 4.40 pode ser observado o comportamento dos quatro tipos de geomembranas testadas. Baseando-se no comportamento apresentado pelo gráfico, pode-se inferir que o comportamento das geomembranas é semelhante com relação ao tipo de carregamento aplicado. As impressões na geomembrana incrementam conforme aumenta a pressão aplicada até o valor de 300 kPa, onde atingem um pico, e logo diminuem os números de

contatos para a pressão de 500 kPa. Por exemplo, nos testes B-PEAD-1 sob 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa e 500 kPa de pressão vertical, os números de pontos de contato foram 46, 54, 70 e 56 respectivamente.

Observa-se também que as geomembranas de menor espessura (1,0 mm), sejam as de PVC ou de PEAD, foram as que geraram o maior número de impressões de contato ao se comparar com respeito às geomembranas de 2,0 mm de espessura, como esperado. Para todas as pressões aplicadas, as geomembranas de PEAD de 1,0 mm tiveram maior número de contatos quando se comparando aos resultados obtidos para as geomembranas de PVC de mesma espessura. O mesmo pode ser notado para o caso das geomembranas de 2,0 mm de espessura. Isto pode estar relacionado com o acima exposto quanto à flexibilidade da geomembrana de PVC, a qual tende a envolver a brita. Na Tabela 4.4 são apresentados o número de impressões nas geomembranas empregadas.

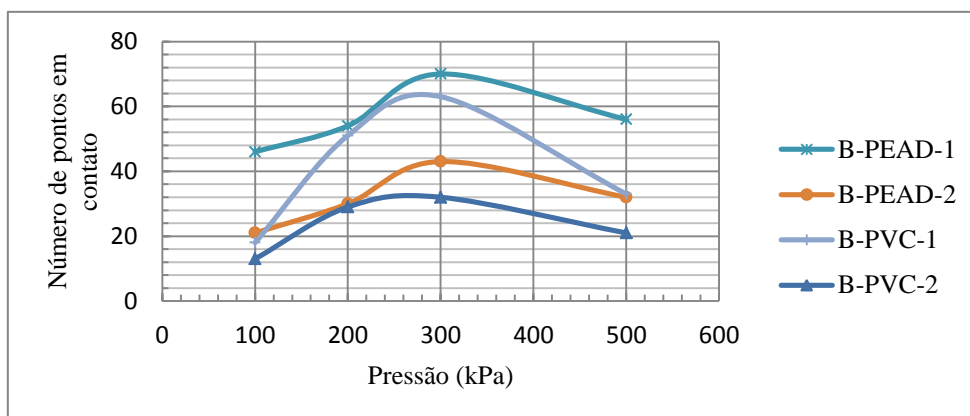


Figura 4.40 – Quantificação do número de impressões na geomembrana sob a aplicação de pressão.

Tabela 4.4 - Número de pontos em contato com a geomembrana.

Número de pontos de contato	Pressão vertical (kPa)			
	100	200	300	500
B-PEAD-1	46	54	70	56
B-PEAD-2	21	30	43	32
B-PVC-1	18	51	63	33
B-PVC-2	13	29	32	21

4.2.7- COMPARAÇÃO ENTRE AS RAZÕES DE ÁREAS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

De acordo com o comentado no item 4.1.7-, a razão de área fornece uma medida da pressão atuando sobre a geomembrana e os resultados para os ensaios empregando brita estão apresentados na Figura 4.41. A razão de área das geomembranas de PEAD e de PVC com 1,0 mm de espessura e submetidas a 500 kPa de pressão normal foi de 7,48% e 5,24%, respectivamente. Isto significa que as geomembranas de PEAD e de PVC estão sendo submetidas a uma pressão de contato de 6,69 Mpa e 9,54 Mpa, respectivamente.

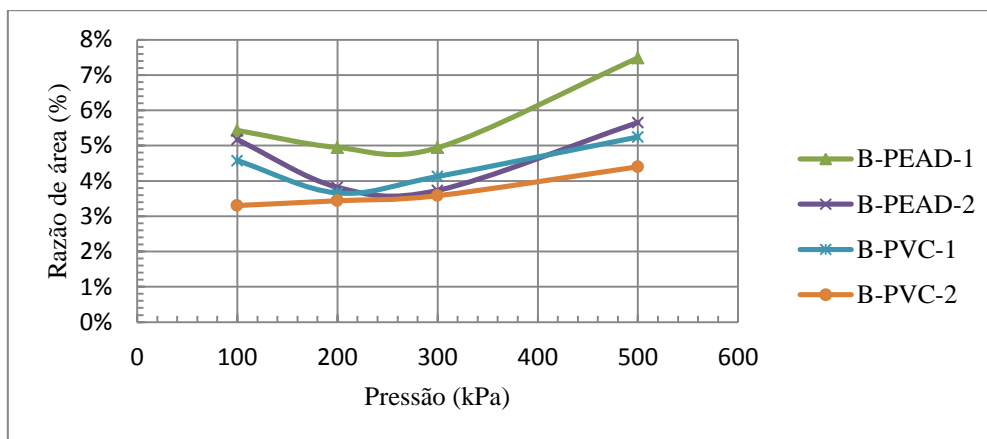


Figura 4.41 – Razão de área *versus* Pressão para cada um dos ensaios realizados.

As razões de área de contato produzidas pelos dois tipos de geomembranas têm comportamentos semelhantes. Por exemplo, para as geomembranas de PEAD, ao aumentar-se a pressão aplicada tem-se uma diminuição na razão de área até a pressão de 300 kPa, e então aumenta para a pressão de 500 kPa. Por sua vez, para o caso da geomembrana de PVC de 1,0 mm, ao aumentar a pressão aplicada de 100 kPa para 200 kPa, a razão de área diminui, e logo de 200 kPa para 300 kPa e então 500 kPa, a razão de área incrementa. Entretanto, para a geomembrana de PVC de 2,0 mm, ao aumentar a pressão aplicada a razão de área também incrementa.

Com relação à espessura das geomembranas, nota-se na Figura 4.41 que as maiores razões de áreas foram geradas com emprego das geomembranas de 1,0 mm de espessura, seja na geomembrana de PEAD ou de PVC. Além disso, tem-se que a

geomembranas de PEAD foram as que geraram a maior razão de área de dano quando comparadas com as geomembranas de PVC. Na Tabela 4.5 são apresentadas as razões de área para os 16 testes realizados.

Tabela 4.5 – Resultados da razão de área para cada uma das configurações dos ensaios.

Razão de área média (%)	Pressão vertical (kPa)			
	100	200	300	500
B-PEAD-1	5,43%	4,95%	4,94%	7,48%
B-PEAD-2	5,17%	3,82%	3,73%	5,65%
B-PVC-1	4,58%	3,66%	4,13%	5,24%
B-PVC-2	3,30%	3,44%	3,58%	4,40%

4.2.8- COMPARAÇÃO ENTRE AS ÁREAS DE CONTATO MÉDIAS DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

Na Figura 4.42 apresenta-se o gráfico que relaciona a área média de contato e a pressão normal aplicada para as geomembranas de PVC e PEAD com, 1,0 mm e 2,0 mm de espessura.

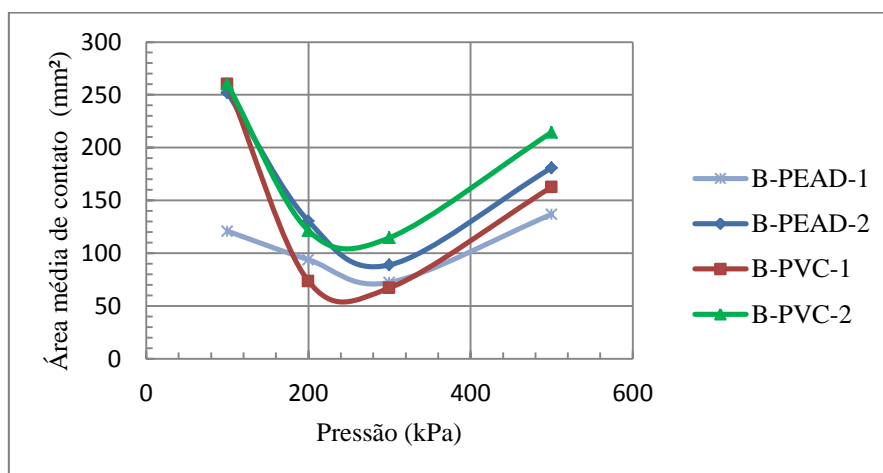


Figura 4.42 - Área média de contato *versus* pressão normal.

Observa-se que as geomembranas de PVC de 1,0 e 2,0 mm possuem comportamentos semelhantes no que diz respeito às áreas de contatos médias, tendo valores muito aproximados para a pressão de 100 kPa. Já com a geomembrana de PEAD de 1,0 e 2,0 mm, nota-se comportamento semelhante, mas com valores de área de contato média

diferenciados. A partir desses resultados, pode-se ainda ver que as geomembranas de PEAD e PVC de 2,0 mm de espessura foram as que tiveram maior valor de área de contato média, inferindo que quanto maior a espessura da geomembrana, é maior a área de contato gerada pela brita. As geomembranas de PVC de 1,0 mm e 2,0 mm foram as que geraram maiores áreas de contato médias ao se comparar com as geomembranas de PEAD de 1,0 mm e 2,0 mm.

De acordo com o gráfico pode-se concluir que as maiores áreas médias de contato foram geradas com a pressão de 100 kPa, e que as áreas médias de contato diminuem de 100 kPa até 300 kPa, mas incrementam quando aplicada a pressão normal de 500 kPa.

4.2.9- COMPARAÇÃO DA CARGA MÉDIA DE CONTATO DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

Na Figura 4.43 apresenta-se o gráfico que relaciona a área média de contato e a pressão normal aplicada para as geomembranas de PVC e PEAD com 1,0 mm e 2,0 mm de espessura.

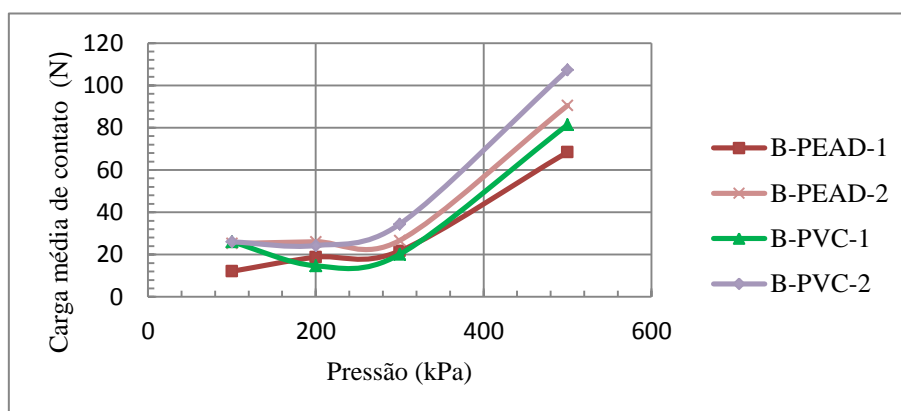


Figura 4.43 - Carga média de contato versus pressão vertical.

Observa-se que os quatro tipos de geomembranas testadas possuem uma tendência semelhante no que diz respeito às cargas médias de contato. É possível notar ainda que as geomembranas de PEAD e PVC de 2,0 mm de espessura foram as que tiveram maior valor de carga média

Segundo o gráfico pode ser deduzido que as maiores cargas médias de contato foram geradas com a pressão de 500 kPa, como esperado. Nas geomembranas de PEAD, as

cargas médias de contato aumentam de valor ao incrementar-se a pressão normal aplicada. Já para o caso das geomembranas de PVC, há uma diminuição na carga média de contato ao se aplicar as pressões 100 kPa a 200 kPa, e logo aumentam ao aplicarem-se as pressões normais de 300 kPa e 500 kPa.

4.2.10- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Neste item serão detalhados os ensaios de resistência à tração nas geomembranas utilizadas na pesquisa. Com o fim de se obter a queda da resistência a tração das geomembranas após a submissão aos ensaios de dano mecânico, fizeram-se testes de resistência à tração de faixa larga em geomembranas virgens e em amostras submetidas ao ensaio de dano. As geomembranas virgens foram ensaiadas nas duas direções de trabalho que podem ter no campo. Segundo a norma (ASTM D4885-01, 2011), estas direções são no sentido de fabricação (MD) e na direção transversal ao sentido de fabricação (CD) e devem ser ensaiados cinco corpos de prova em cada uma das duas direções detalhadas. Assim, neste capítulo são apresentados os resultados dos testes nas 16 amostras de geomembranas danificadas. Por fim, faz-se uma comparação entre as resistências obtidas para as geomembranas virgens e as submetidas ao ensaio de dano. Os ensaios aqui apresentados são de caráter preliminar, uma vez que a norma exige um mínimo de cinco amostras para cada ensaio e, para o caso desta pesquisa, foram realizados apenas um ensaio por amostra submetida a dano. Estudos complementares devem ser realizados.

4.2.10.1- RESULTADOS DOS ENSAIOS EM GEOMEMBRANAS DE PVC DE 1,0 mm DE ESPESSURA

A Tabela 4.6 apresenta a média dos resultados obtidos em geomembrana virgem (ensaçada nas duas direções: MD e CD) e da geomembrana após a submissão aos ensaios de dano mecânico. Pode-se observar que existe uma variação na resistência à tração da geomembrana quando avaliadas nas direções de fabricação e transversal ao sentido de fabricação. Esta é uma queda de 16,7% da resistência na geomembrana

avaliada na direção CD com respeito à direção MD, assim, nota-se que o melhor comportamento é atingido na direção de fabricação (MD). Além disso, observa-se na Figura 4.48 que a maior queda registrada é com respeito a direção MD. Esta queda é de 17,4 % na geomembrana submetida a 300 kPa de pressão. Também nota-se que, o maior aumento na resistência da geomembrana, é quando submetida a 200 kPa de pressão (26,64 %) com respeito à resistência da geomembrana virgem na direção CD. É possível que esse aumento seja devido a algum erro de realização do ensaio e a variabilidade do material.

Na Figura 4.49 pode ser observado que a maior queda com respeito ao alongamento na ruptura da geomembrana é 7,56 % na geomembrana submetida a 500 kPa de pressão normal, quando comparada com a direção MD. Os gráficos dos resultados para a geomembrana virgem em cinco corpos de prova diferentes estão apresentados na Figura 4.44 e na Figura 4.45 e para a geomembrana submetida a ensaios de danos estão mostrados na Figura 4.46. Além disso, a variação da resistência à tração e alongamento na ruptura da geomembrana de PVC com espessura de 1,0 mm com relação ao valor determinado para as amostras virgens estão apresentadas na Figura 4.48 e Figura 4.49, respectivamente.

Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de tração em geomembrana de PVC de 1,0 mm espessura.

PVC	Alongamento Força Máx.	Força Máx.	Resistência à Tração Máx.	Alongamento Ruptura	Rigidez Secante a 5%
1,0 mm	(%)	(kN)	(kN/m)	(%)	(kN/m)
MD	147,5	2,08	10,41	173,3	24,19
CD	153,5	1,73	8,67	161,6	22,59
100 kPa	140,94	1,78	8,92	161,57	23,32
200 kPa	147,3	2,2	10,98	171,19	26,26
300 kPa	139,4	1,72	8,59	162,91	23,39
500 kPa	159,05	1,83	9,16	160,19	23,8

Notas: **MD** = Ensaio na direção de fabricação, **CD** = Ensaio na direção transversal ao sentido de fabricação.

Os resultados destes ensaios de resistência à tração estão ligados diretamente com o arranjo da brita dentro da caixa inferior, mais particularmente com as partículas da brita que estão em contato com a geomembrana. A área ensaiada nos ensaios de resistência a tração é menor que a área ensaiada nos ensaios de dano mecânico. Portanto, pode ser

que não esteja ocorrendo diminuição na resistência à tração da geomembrana em todos os ensaios realizados pelo fato que neste ensaio as protuberâncias da brita não marcaram incisivamente a geomembrana na área testada (200 mm de largura por 100 mm de comprimento). Cabe salientar que ensaios complementares são necessários tendo em vista que a quantidade de ensaios com as amostras danificadas foi menor do que a recomendada pela norma.

Na Figura 4.47 apresenta-se a média e o desvio padrão dos dados mostrados na Figura 4.46, onde pode-se observar que o desvio padrão começa muito pequeno, e logo vai crescendo até um valor aproximado de $\bar{x} \pm 6,0$ para o conjunto de dados analisados. A dispersão observada com respeito á média do conjunto de dados, pode se dever à variabilidade nas características mecânicas que apresentam as geomembranas.

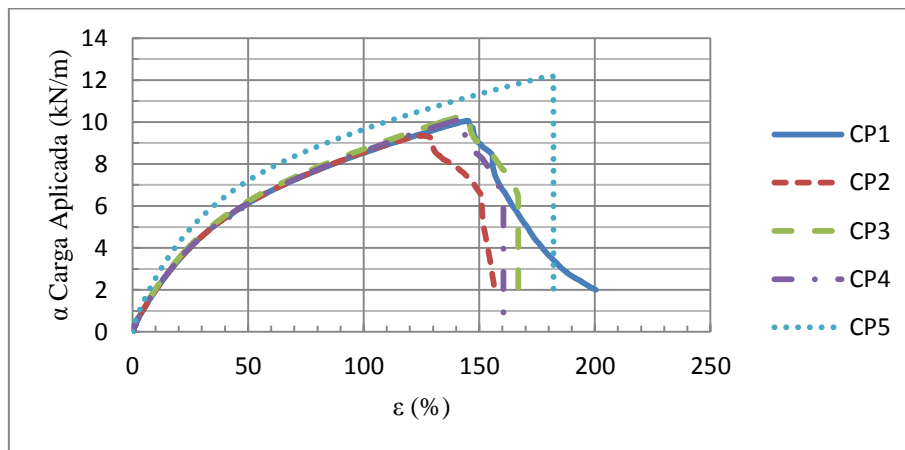


Figura 4.44 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PVC de 1,0 mm - Direção MD.

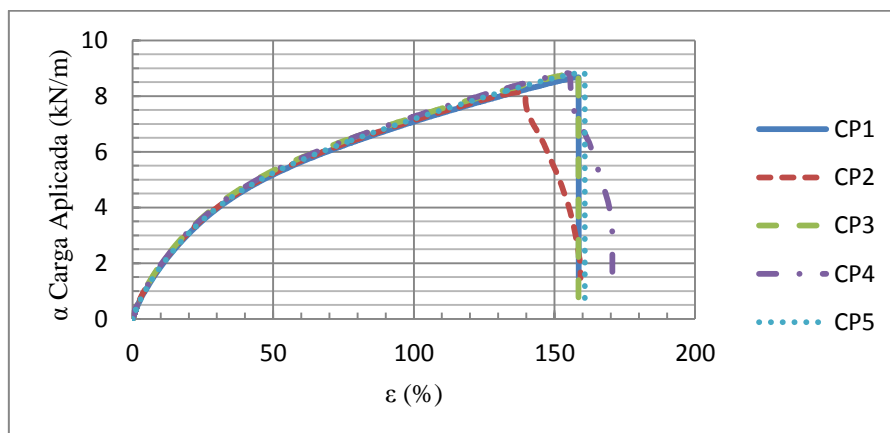


Figura 4.45 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PVC de 1,0 mm - Direção CD.

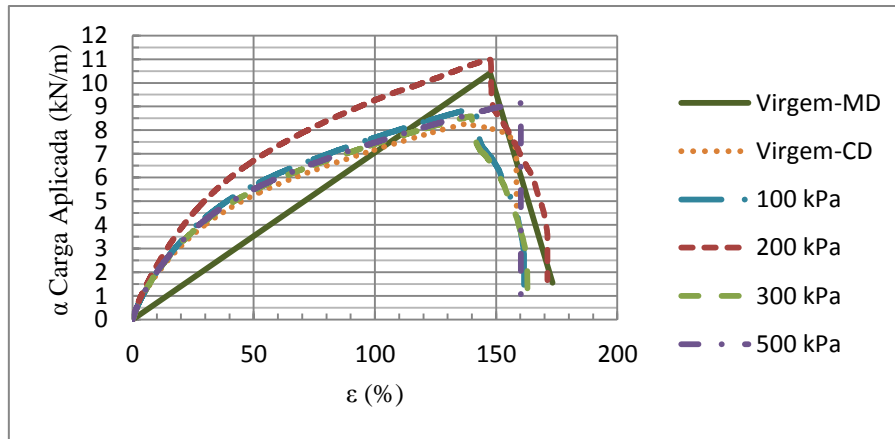


Figura 4.46 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1,0 mm – Antes e após dano mecânico.

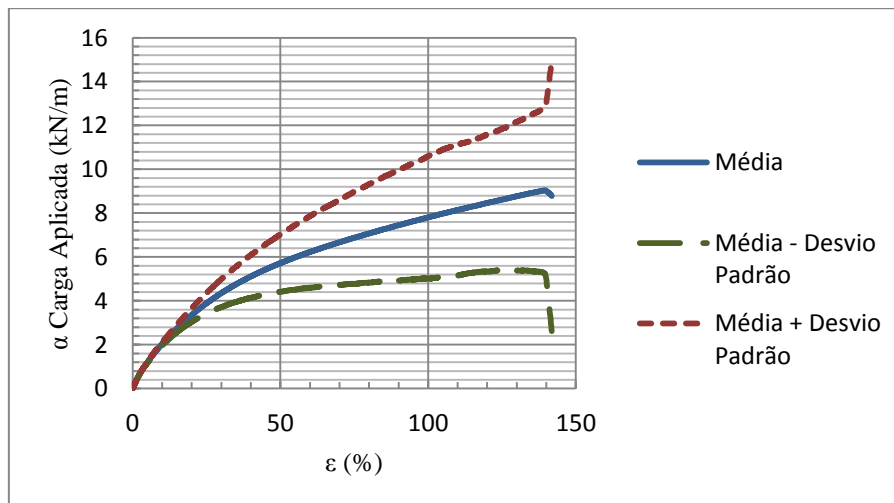


Figura 4.47 - Desvio padrão dos dados.

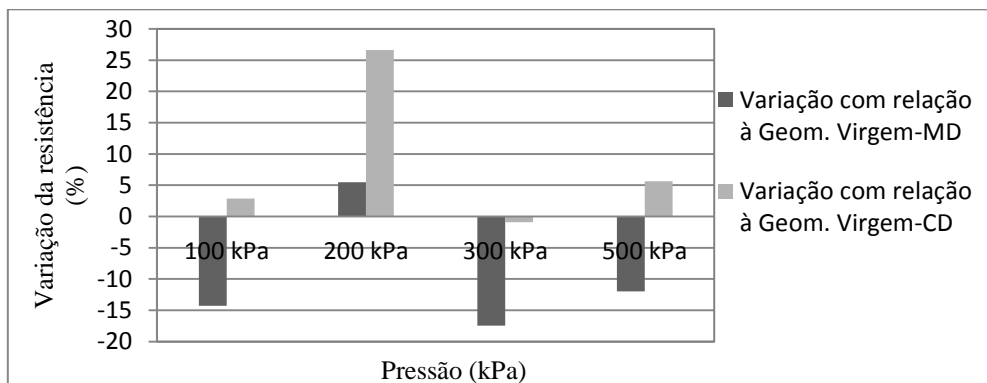


Figura 4.48 - Variação percentual da resistência à tração das geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.

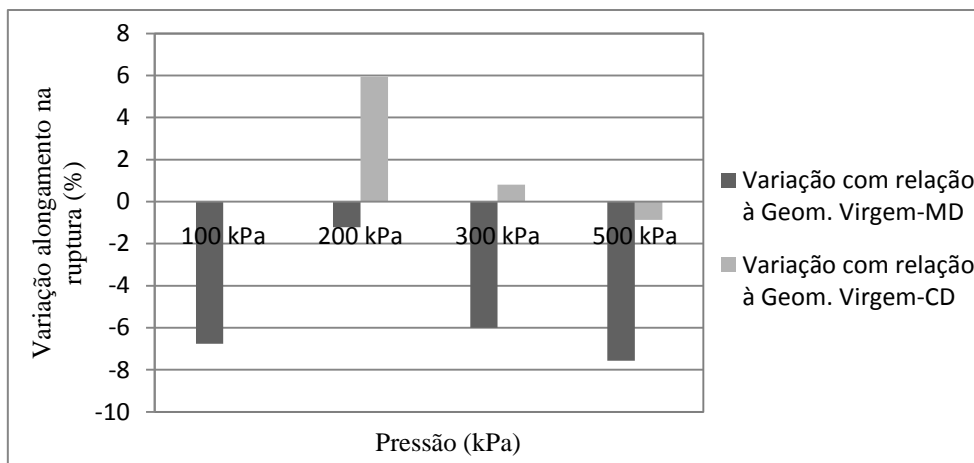


Figura 4.49 - Variação percentual do alongamento na ruptura das geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.

4.2.10.2- RESULTADOS DOS ENSAIOS EM GEOMEMBRANAS DE PVC DE 2,0 mm DE ESPESSURA

Neste item apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à tração em geomembranas virgens e para geomembranas de PVC de 2,0 mm de espessura após os ensaios de dano mecânico. A Tabela 4.7 apresenta a média dos resultados obtidos em geomembrana virgem (ensaiada nas duas direções: MD e CD) e da geomembrana após a submissão aos ensaios de dano mecânico. Assim como o ocorrido na geomembrana de PVC de 1,0 mm de espessura, pode ser observado que existe uma variação de 12,6 % na resistência à tração da geomembrana avaliada nas direções de fabricação e transversal (MD e CD). Além disso, pode-se notar que o melhor comportamento é atingido na direção de fabricação (MD). Segundo os resultados apresentados, tem-se queda da resistência à tração nas geomembranas quando submetidas a ensaios de dano com pressões normais de 200 kPa e 300 kPa, se comparadas com a geomembrana virgem na direção de fabricação (MD). Por sua vez, observa-se na Figura 4.54 um aumento na resistência à tração das geomembranas de 7,80 % e 6,70 % sob submissão de 100 kPa e 500 kPa de pressão, respectivamente. De acordo com os resultados da Figura 4.55, é possível observar que com 100 kPa de pressão normal, a geomembrana teve um incremento de 25,98 % de alongamento na ruptura com respeito à amostra virgem avaliada na direção transversal (CD) e teve sua maior queda com 200 kPa (13,66 %), com respeito à direção de fabricação (MD). A Figura 4.50 e a Figura 4.51 apresentam os

resultados para a geomembrana virgem em ambas as direções, de fabricação e transversal. Por sua vez, a Figura 4.52 mostra os resultados obtidos para os ensaios em que a geomembrana foi submetida aos ensaios de dano. Na Figura 4.54 e na Figura 4.55 são apresentadas a variações na resistência à tração e o alongamento na ruptura da geomembrana após submissão ao dano, respectivamente.

Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de tração em geomembrana de PVC de 2,0 mm espessura.

PVC	Alongamento Força Máx.	Força Máx.	Resistência à Tração Máx.	Alongamento Ruptura	Rigidez Secante a 5%
2,0 mm	(%)	(kN)	(kN/m)	(%)	(kN/m)
MD	176,8	3,82	19,11	205,3	51,1
CD	171,5	3,34	16,7	177,3	46,79
100 kPa	195,59	4,12	20,6	223,36	53,02
200 kPa	177,11	3,47	17,34	177,25	53,32
300 kPa	179,23	3,4	17,01	180,33	49,91
500 kPa	173,69	4,08	20,39	203,46	53,34

Notas: **MD** = Ensaio na direção de fabricação, **CD** = Ensaio na direção transversal ao sentido de fabricação.

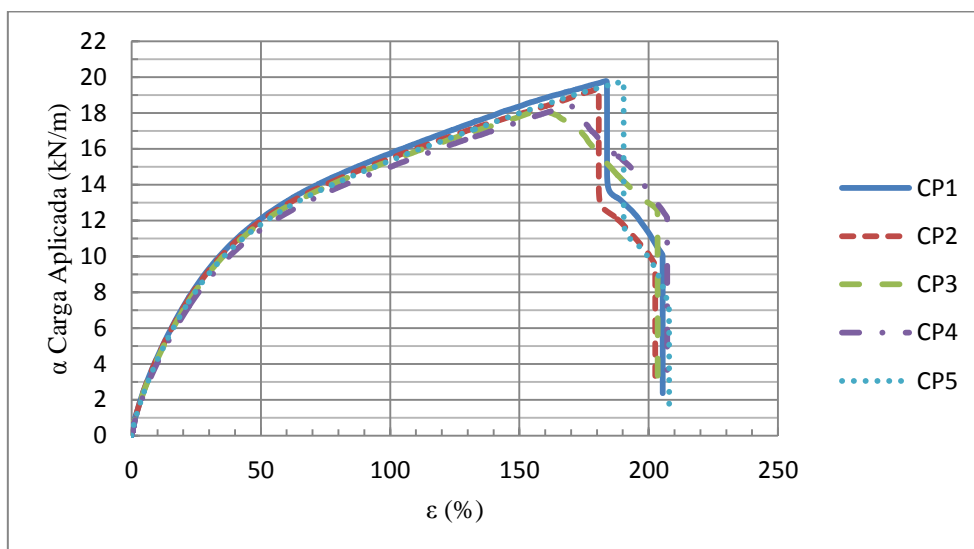


Figura 4.50 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PVC de 2,0 mm - Direção MD.

Os resultados aqui exibidos têm igual comportamento aos resultados com geomembrana de PVC de 1,0 mm. Portanto, pode-se dizer que a variação na resistência à tração da geomembrana após de submetidas aos ensaios de dano mecânico está influenciada pelas partículas da brita em contato com a geomembrana na área testada. As partículas da brita podem haver marcado incisivamente a geomembrana só para alguns ensaios.

O fato da resistência à tração aumentar em alguns casos, não é dado a concluir que este é o comportamento da geomembrana devido que os ensaios aqui apresentados são de caráter preliminar, sendo preciso testar um mínimo de cinco amostras para cada ensaio, segundo exige a norma. Estudos complementares devem ser realizados e, assim obter o comportamento da geomembrana e conseguir fazer análise estatística dos dados.

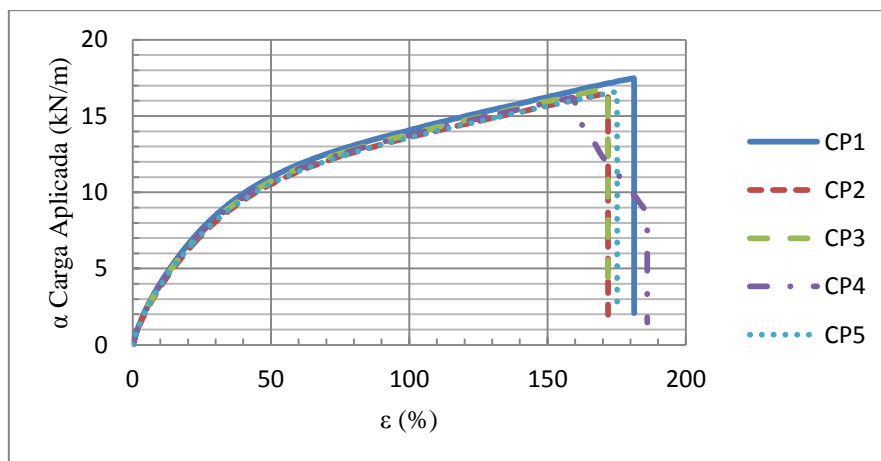


Figura 4.51 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PVC de 2,0 mm - Direção CD.

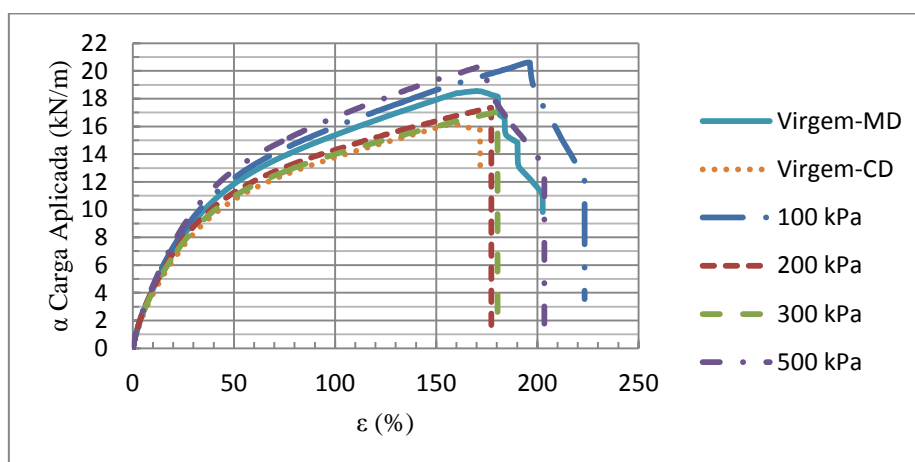


Figura 4.52 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 2,0 mm – Antes e após dano mecânico.

Na Figura 4.53 apresenta-se a média e o desvio padrão dos dados mostrados na Figura 4.52, onde pode-se observar que o desvio padrão começa muito pequeno, e logo vai crescendo até um valor aproximado de $\bar{x} \pm 11,0$ para o conjunto de dados analisados. A dispersão observada com respeito á média do conjunto de dados, pode se dever à variabilidade nas características mecânicas que apresentam as geomembranas.

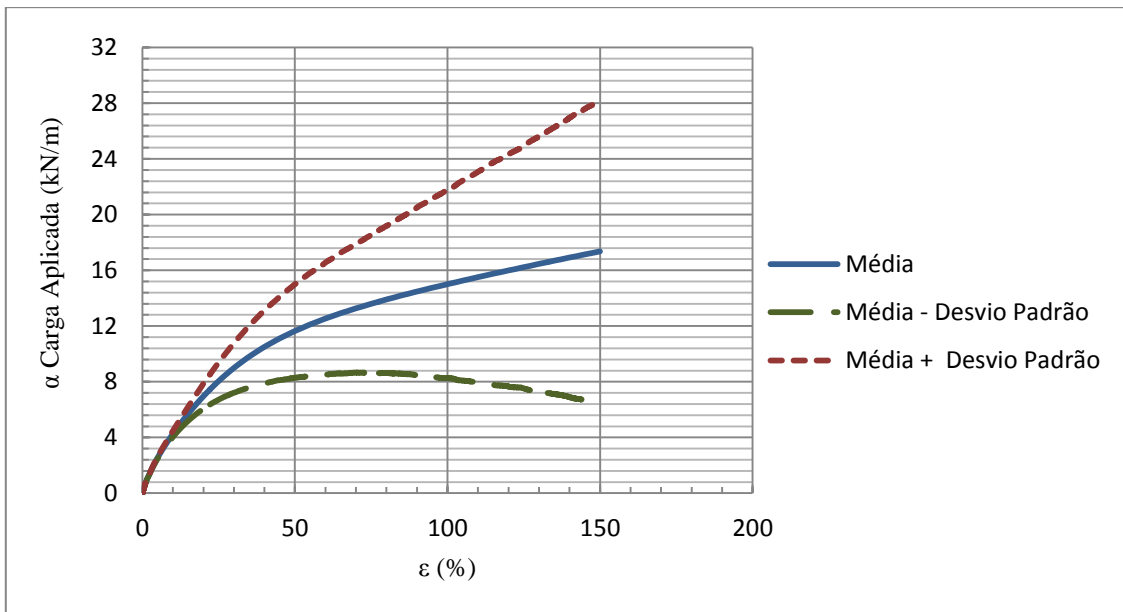


Figura 4.53 - Desvio padrão dos dados.

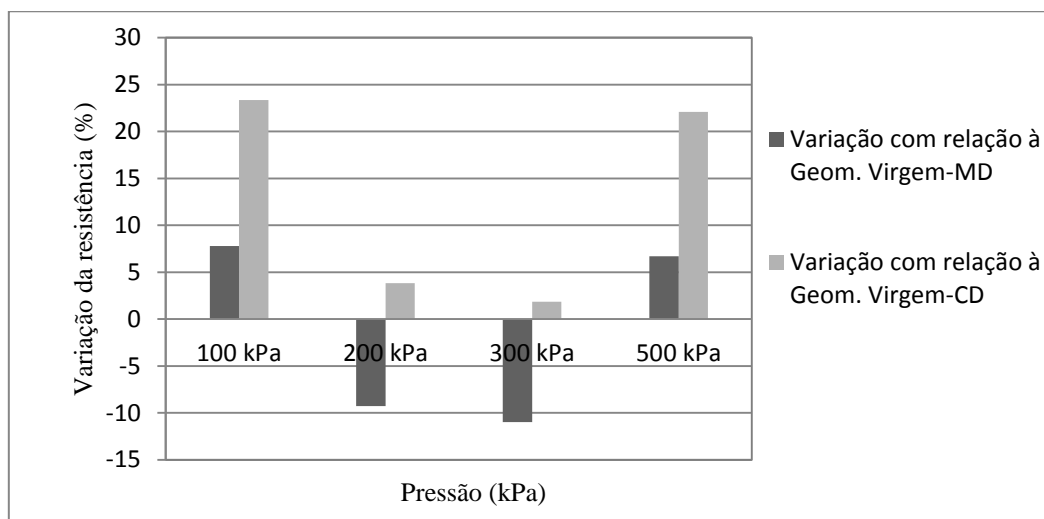


Figura 4.54 - Variação percentual da resistência à tração das geomembranas de PVC de 2,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.

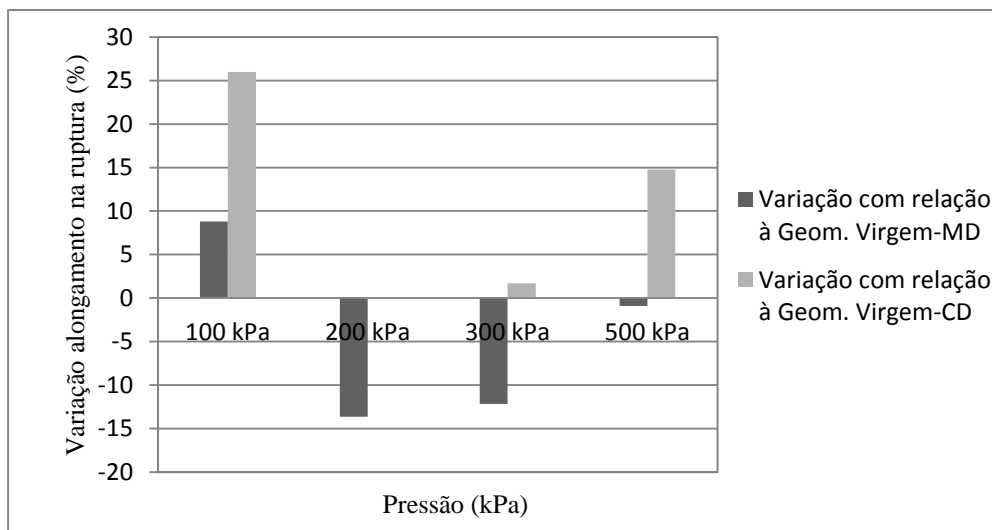


Figura 4.55 - Variação percentual do alongamento na ruptura das geomembranas de PVC de 2,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.

4.2.10.3- RESULTADOS DOS ENSAIOS EM GEOMEMBRANAS DE PEAD DE 1,0 mm DE ESPESSURA

Os resultados obtidos de resistência à tração em geomembranas virgem e após os ensaios de dano mecânico para geomembranas de PEAD de 1,0 mm de espessura são apresentados na Tabela 4.8, onde é mostrada a média dos resultados obtidos para a geomembrana virgem (ensaiada nas duas direções: MD e CD) e da geomembrana após submetida aos ensaios de dano mecânico. Pode ser observado que, como ocorrido para casos anteriores, existe uma variação na resistência à tração da geomembrana avaliada nas duas direções (MD e CD) para o caso da amostra virgem. É possível notar ainda que o melhor comportamento é atingido na direção de fabricação MD. Além disso, pode ser observado que a maior diminuição na resistência da geomembrana ocorre para o caso quando submetida a 200 kPa de pressão normal, com 12,84 % de queda com respeito a direção de fabricação MD, e o maior aumento é para 100 kPa de pressão (9,88 %) com relação à resistência da geomembrana virgem na direção transversal CD. Assim como nos outros casos, um aumento no valor da resistência à tração não era esperado e isso pode ser devido a algum problema ocorrido durante o ensaio de tração. Com objetivo de esclarecer mais os dados obtidos na Tabela 4.8, a Figura 4.56 e a Figura 4.57 apresentam os gráficos dos resultados para a geomembrana virgem em 5 corpos de

prova diferentes, nas direções de fabricação e transversal a esse sentido, respectivamente. Para o caso das amostras submetidas às pressões confinantes de 300 kPa e 500 kPa, os pequenos incrementos medidos estão dentro da dispersão do próprio ensaio. Assim como observado em outros casos, deve-se levar em consideração o fato de que esses resultados são preliminares, sendo necessários mais ensaios para obtenção de conclusões mais sólidas.

Na Figura 4.60 pode ser observada a variação na resistência à tração da geomembrana após o dano, quando comparada com as direções MD e CD. A Figura 4.61 apresenta a variação no alongamento na ruptura após submissão ao dano mecânico, comparado-se com a direção de fabricação MD. Não se apresenta a comparação com o caso na direção transversal CD devido a que a geomembrana virgem não ter apresentado ruptura durante o ensaio.

Na Figura 4.59 apresenta-se a média e o desvio padrão dos dados mostrados na Figura 4.58, onde pode-se observar que o desvio padrão é pequeno para o conjunto de dados analisados, sendo este de aproximadamente: $\bar{x} \pm 3,0$. A dispersão observada com respeito á média do conjunto de dados, pode se dever à variabilidade que apresentam as geomembranas.

Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de tração em geomembrana de PEAD de 1,0 mm espessura.

PEAD	Alongamento Força Máx.	Força Máx.	Resistência à Tração Máx.	Alongamento Ruptura	Rigidez Secante a 5%
1,0 mm	(%)	(kN)	(kN/m)	(%)	(kN/m)
MD	14,63	3,57	17,84	733,03	272,53
CD	795,15	3,50	17,51	*	265,73
100 kPa	13,85	3,85	19,24	660,5	311,2
200 kPa	778,04	3,31	15,55	799,2	256,88
300 kPa	13,84	3,59	17,96	*	289,41
500 kPa	13,84	3,53	17,63	*	283,94

Notas: **MD** = Ensaio na direção de fabricação, **CD** = Ensaio na direção transversal ao sentido de fabricação.

De uma maneira geral, os resultados aqui exibidos têm comportamento semelhante aos resultados com geomembrana de PVC (1,0 mm e 2,0 mm). Portanto, pode-se dizer que

a variação na resistência à tração da geomembrana, com respeito a qualquer uma das duas direções de fabricação, está influenciada pela orientação das partículas da brita em contato com a geomembrana. Além de estar influenciada pela direção com a qual a amostra é testada na prensa de resistência à tração após o dano mecânico pois, assim como já ocorrido em outros casos o melhor comportamento é atingido com a direção de fabricação MD.

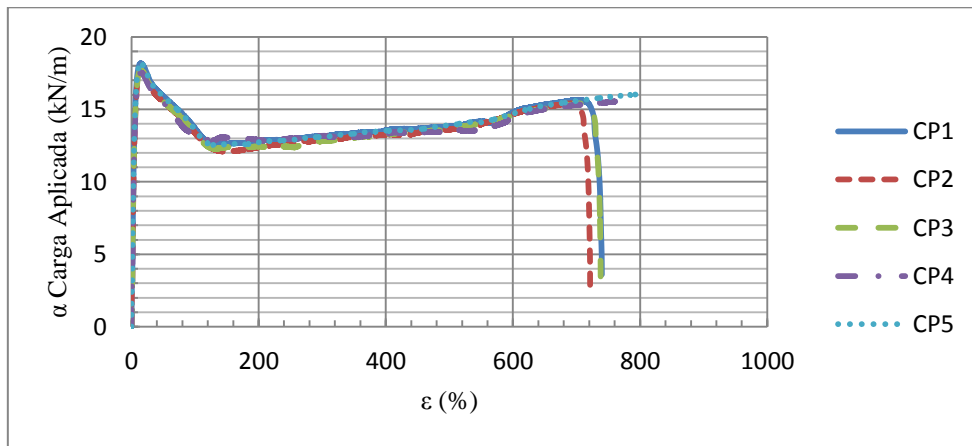


Figura 4.56 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 1,0 mm - Direção MD.

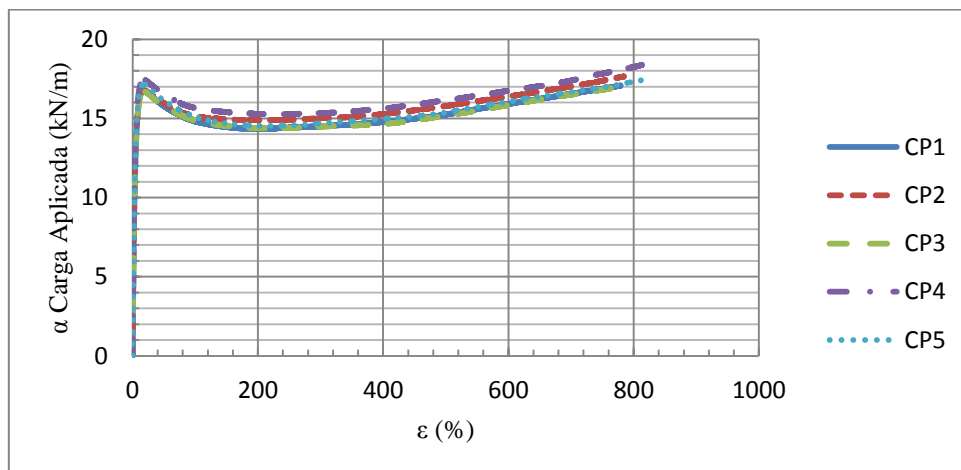


Figura 4.57 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 1,0 mm - Direção CD.

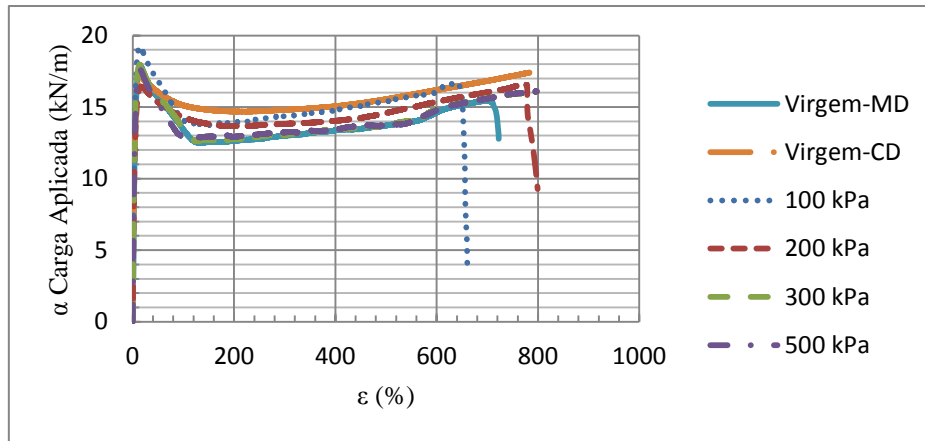


Figura 4.58 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembranas de PEAD de 1,0 mm – Antes e após dano mecânico.

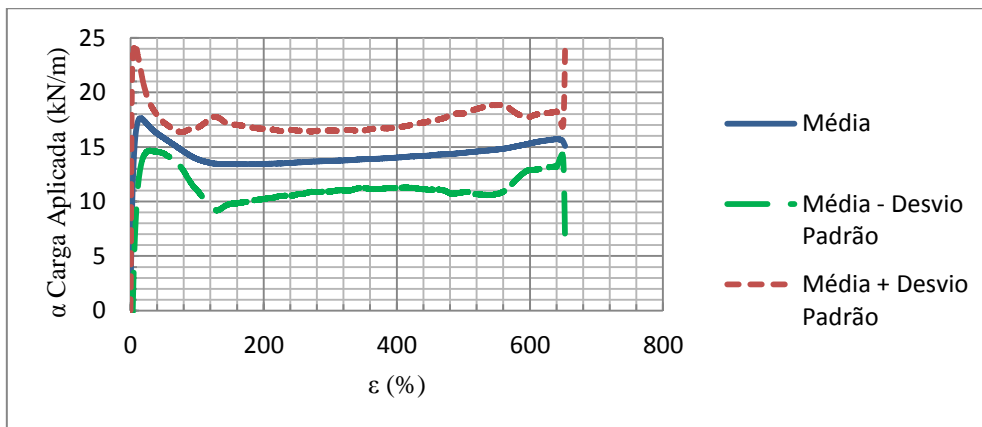


Figura 4.59 - Desvio padrão dos dados.

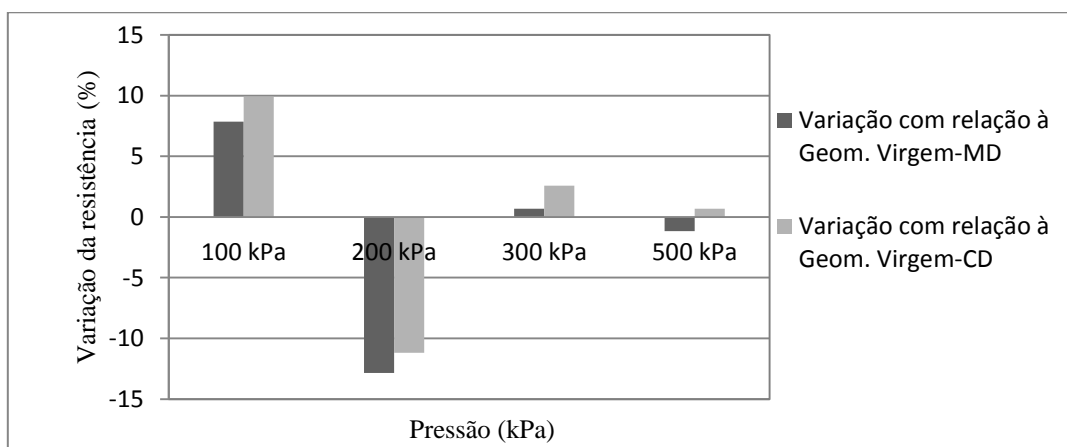


Figura 4.60 - Variação percentual da resistência à tração das geomembranas de PEAD de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.

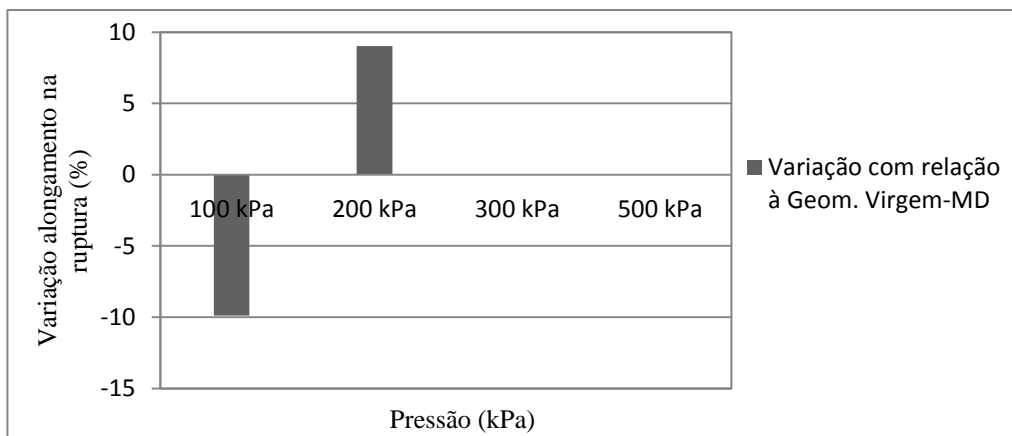


Figura 4.61 - Variação percentual do alongamento na ruptura das geomembranas de PEAD de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.

4.2.10.4- RESULTADOS DOS ENSAIOS EM GEOMEMBRANAS DE PEAD DE 2,0 mm DE ESPESSURA

Para as geomembranas de PEAD de 2,0 mm de espessura, os resultados dos ensaios de resistência à tração estão mostrados na Tabela 4.9. Assim como nos outros resultados apresentados do mesmo tipo, a tabela apresenta a média dos resultados obtidos na geomembrana virgem (ensaiada nas duas direções: MD e CD) e da geomembrana após a submissão aos ensaios de dano mecânico. Baseando-se nos resultados obtidos, verifica-se o mesmo comportamento obtido para a geomembrana de PEAD de 1,0 mm. Pode ser observado ainda que houve diferença no valor da resistência da geomembrana entre os valores nas direções MD e CD, observando-se o melhor comportamento de resistência na direção de fabricação MD. Além disso, nota-se que a maior queda da resistência à tração na geomembrana apresentou-se quando submetida a 200 kPa, sendo esta diminuição de 6,12 % com respeito à direção de fabricação da geomembrana MD. Os gráficos dos resultados para a geomembrana virgem em cinco corpos de prova diferentes nas direções de fabricação e transversal a essa estão mostrados na Figura 4.62 e na Figura 4.63, respectivamente. Para a geomembrana após os ensaios de dano em média escala, os resultados encontram-se apresentados na Figura 4.64.

Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de tração em geomembrana de PEAD de 2,0 mm espessura.

PEAD	Alongamento Força Máx.	Força Máx.	Resistência à Tração Máx.	Alongamento Ruptura	Rigidez Secante a 5%
2,0 mm	(%)	(kN)	(kN/m)	(%)	(kN/m)
MD	17,56	6,83	34,17	*	502,94
CD	18,32	6,41	32,04	*	485,7
100 kPa	19,25	6,93	34,65	786,64	513,33
200 kPa	19,24	6,42	32,08	*	482,19
300 kPa	19,39	6,75	33,77	334,49	509,35
500 kPa	18,08	7,21	36,66	*	550,67

Notas: **MD** = Ensaio na direção de fabricação, **CD** = Ensaio na direção transversal ao sentido de fabricação.

Os resultados aqui exibidos têm comportamento semelhante aos resultados com geomembrana de PEAD de 1,0 mm de espessura, no sentido em que as variações na resistência à tração podem ser de aumento ou de diminuição com respeito à geomembrana virgem. O fato de ter variação na resistência à tração da geomembrana após os ensaios de dano mecânico pode ser atribuído ao fato de que a área testada está influenciada pela orientação (arranjo) das partículas da brita em contato com a geomembrana. Desta maneira, as impressões deixadas pela brita na geomembrana foram decisivas. Igualmente, isso pode gerar zonas preferenciais de ruptura na geomembrana. Por conseguinte, é por isso que se tem geomembranas que se esticaram até a ruptura e geomembranas que chegaram até o limite da prensa sem romper. Os valores de aumento podem estar atribuídos a algum tipo de erro de execução do ensaio de resistência à tração.

Na Figura 4.65 apresenta-se a média e o desvio padrão dos dados mostrados na Figura 4.64, onde pode-se observar que o desvio padrão é grande para o conjunto de dados analisados, sendo este de aproximadamente: $\bar{x} \pm 12,0$. A dispersão observada com respeito à média do conjunto de dados, pode se dever à variabilidade que apresentam as geomembranas.

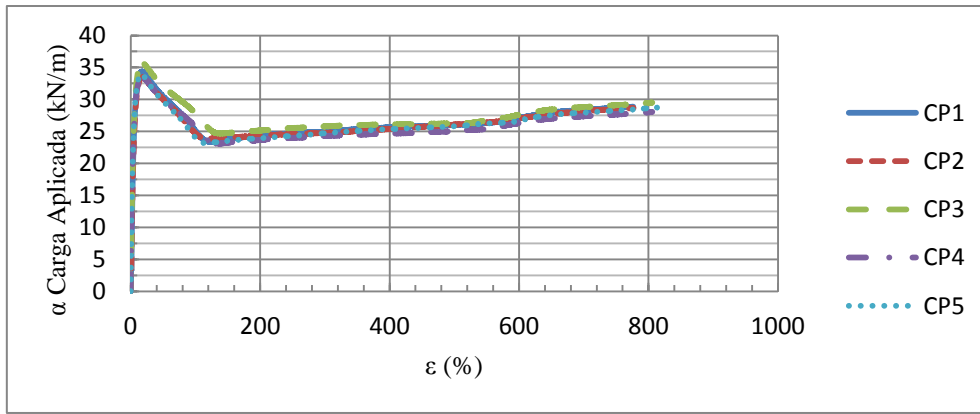


Figura 4.62 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 2,0 mm - Direção MD.

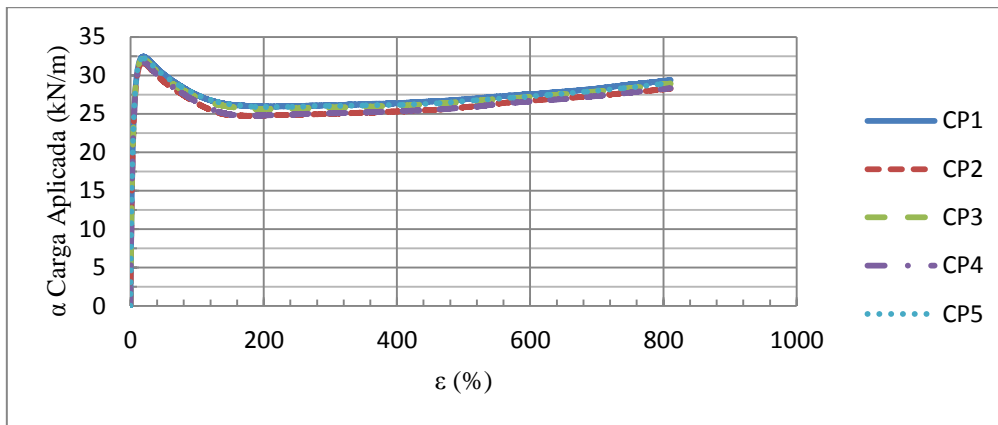


Figura 4.63 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 2,0 mm - Direção CD.

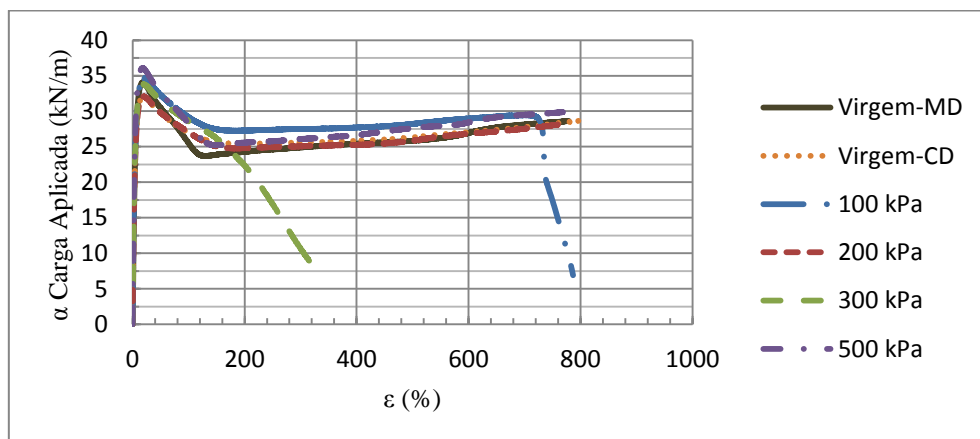


Figura 4.64 - Resultado ensaio de resistência à tração em geomembrana virgem de PEAD de 2,0 mm – Antes e após dano mecânico.

A Figura 4.66 mostra a variação na resistência à tração da geomembrana após os ensaios de dano mecânico. Não é apresentado o gráfico de variação do alongamento na ruptura, devido a que a geomembrana virgem nas direções MD e CD esticou até o limite da prensa sem romper.

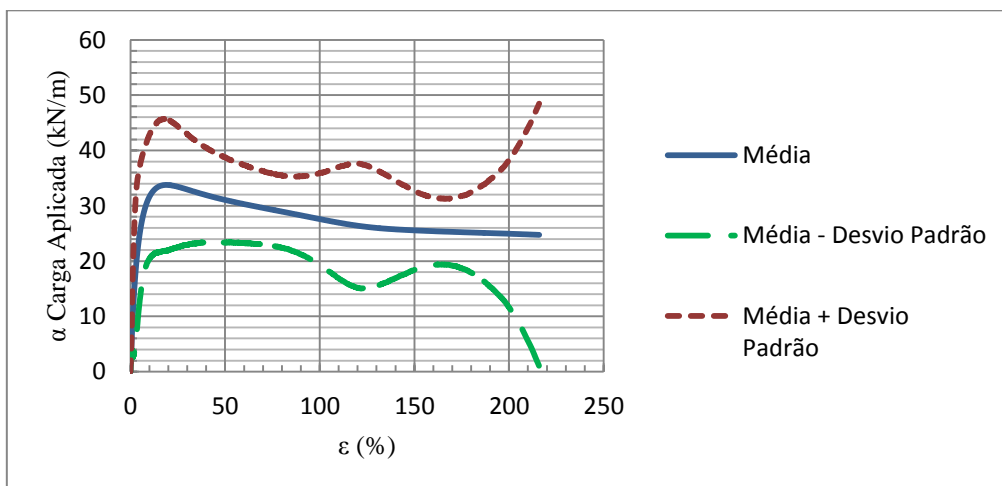


Figura 4.65 - Desvio padrão dos dados.

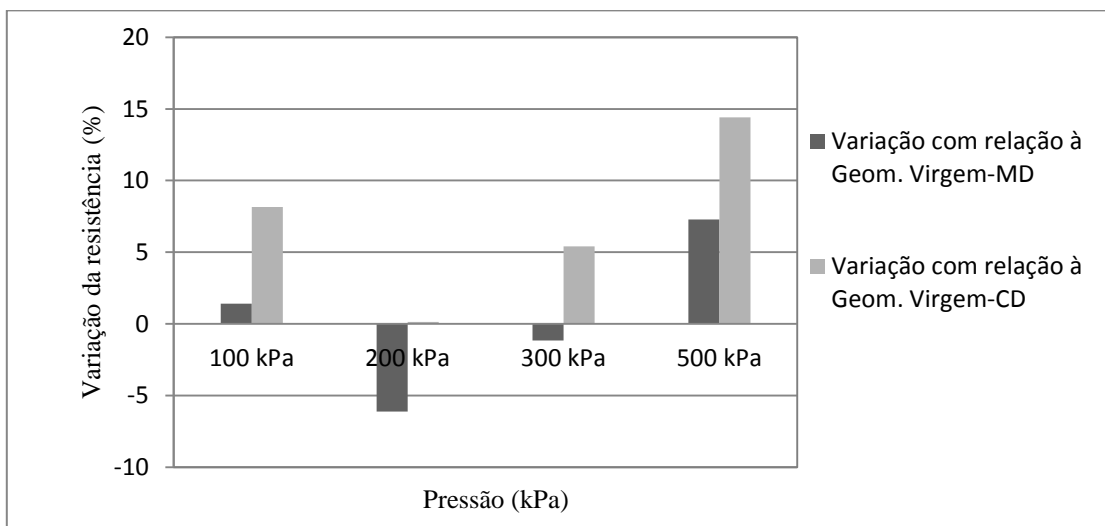


Figura 4.66 - Variação percentual da resistência à tração das geomembranas de PEAD de 2,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.

CAPITULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1- CONCLUSÕES

A presente pesquisa apresentou um estudo que buscou analisar os danos mecânicos gerados nas geomembranas dadas as altas pressões atingidas nas barragens de contenção de rejeito. Foram empregados dois equipamentos de laboratório (Nascimento, 2002 e Nascimento, 2007), com sistemas constituídos de material granular/geomembrana, visando contribuir o entendimento da influência do material granular em contato e o dano gerado nas geomembranas.

Os equipamentos, a instrumentação e a metodologia utilizados ao longo da pesquisa se mostraram adequados para os propósitos da pesquisa. Os resultados permitiram avaliar o desempenho de cada uma das geomembranas em contato com o material subjacente ou sobrejacente. Desta maneira, foi observado que o comportamento das geomembranas sofre influência de diversos fatores, tais como: a pressão vertical aplicada, espessura e tipo de geomembrana, tamanho e forma dos grãos.

Com relação ao equipamento de pequena escala, são apresentadas as seguintes conclusões:

A análise visual das geomembranas ensaiadas no equipamento de pequena escala não permitiu identificar dano. O dano só possível de ser identificado com a utilização do papel alumínio. Além disso, não foram constatados furos em nenhuma configuração de ensaio, até mesmo nos ensaios com maior carga aplicada. Em nenhum dos ensaios realizados houve vazamento.

Se observou que eram impressas na superfície das geomembranas diferentes formas e dimensões de áreas de contato, dependendo do carregamento aplicado e do material granular usado. Além, foi possível identificar que para as maiores cargas aplicadas era mais difícil determinar as formas de contato, sendo ainda mais complicado reconhecer as formas quando usado o rejeito de ouro devido ao seu pequeno tamanho.

Com relação à distribuição de frequências das áreas de contato geradas para cada uma das configurações de ensaios, observou-se que as maiores frequências de áreas em contato foram os intervalos menores, isto é, predominantemente as áreas mínimas

estiveram em contato com a geomembrana. Além disso, foi observado que o comportamento das distribuições de frequências seguem uma curva exponencial para quase todas as configurações de ensaios.

Como era esperado, a pressão normal aplicada teve influência direta no número de impressões na geomembrana e na razão de área de dano. O número de impressões na geomembrana incrementa com o aumento do carregamento porque a maior pressão aplicada tem-se um rearranjo de partículas, fazendo que estas se desloquem para baixo e entrem em contato com a geomembrana. Além, se tem influencia direta da pressão normal aplicada na razão de área de dano, porque quando se incrementa o carregamento, tem se maior área superficial dos grãos fazendo contato com a geomembrana.

De acordo com o tipo de rejeito usado, o rejeito de ferro teve maior número de impressões nas geomembranas quando se comparado com os resultados para o rejeito de ouro, possivelmente devido a quebra de partículas do rejeito de ferro durante o ensaio.

A maior razão de área, nos testes com geomembranas de PVC e de PEAD, foi para os ensaios realizados com rejeito de ferro, sendo as maiores razões de área quando em contato com geomembrana de PVC (1,0 mm e 2,0 mm) para pressão aplicada de 1000 kPa.

O tipo de geomembrana usada e a espessura, também, foram fatores predominantes nos resultados. Os maiores números de impressões de contato foram para as geomembranas de PVC, especificamente as de menor espessura (1,0 mm). Referente à razão de área, para a geomembrana de PVC, ao se aumentar a espessura da geomembrana, tem-se um incremento na razão de área e, para a geomembrana de PEAD, ao acrescentar-se a espessura da geomembrana, diminui-se a razão de área dos contatos.

Por sua vez, as principais conclusões relacionadas aos ensaios empregando o equipamento de média escala foram:

A análise visual das geomembranas permitiu identificar que é gerada uma série de danos sem constância de forma, onde, os dois tipos de geomembrana se comportaram de maneira diferente. Por exemplo, os principais danos presenciados na geomembrana de PEAD foram arranhões, entalhes e em algumas zonas indentações. Enquanto que as geomembranas de PVC apresentaram principalmente deformações. Os resultados

podem-se dever à natureza rígida da geomembrana de PEAD e à natureza flexível da geomembrana de PVC que tende a envolver a brita.

Os resultados mostraram que na distribuição de frequências das áreas de contato, as maiores frequências de áreas em contato foram para os intervalos menores, estando entre os três primeiros intervalos nas distribuições. Além disso, foi observado que o comportamento das distribuições segue uma curva exponencial para quase todas as configurações de ensaios. Com relação à pressão vertical aplicada, observou-se comportamento semelhante das geomembranas no número de impressões, nas razões de área de dano e nas áreas médias de contato.

Observou-se, segundo o esperado, que as geomembranas de menor espessura (1,0 mm), seja de PVC ou de PEAD, foram as que geraram o maior número de impressões de contato. Além disso, foi observado que, para todas as pressões aplicadas, as geomembranas de PEAD de 1,0 mm foram as que tiveram o maior número de contatos. Tal fato pode estar relacionado com a flexibilidade da geomembrana de PVC, a qual tende a envolver a brita.

As razões de áreas foram encontradas em maior valor com o emprego das geomembranas de 1,0 mm de espessura, seja nas geomembranas de PEAD ou de PVC. Por sua vez, tem-se que as geomembranas de PEAD foram as que geraram a maior razão de área de dano. As áreas médias de contato foram maiores para as geomembranas de PEAD e PVC de 2,0 mm, do qual pode-se deduzir que quanto maior a espessura da geomembrana, é maior a área de contato gerada pela brita.

A resistência à tração das geomembranas virgens mostrou-se ser maior para as geomembranas avaliadas na direção de fabricação (MD) sobre as avaliadas no sentido transversal (CD) de fabricação, como esperado.

As propriedades mecânicas das geomembranas danificadas avaliadas com respeito aos ensaios de resistência à tração foram alteradas pelos ensaios de compressão de dano mecânico, obtendo as maiores variações para as geomembranas de PVC. A queda máxima de resistência foi para a geomembrana após sumissão a 300 kPa, sendo esta de 17,4 % com respeito à direção de fabricação (MD) da geomembrana virgem. Estas variações podem ser devidas à influência da orientação das partículas da brita que se encontram em contato com a geomembrana na área testada.

Os resultados apresentados mostram que os tamanhos e arranjos dos grãos, a pressão vertical aplicada, o tipo e espessura das geomembranas afetam de forma significativa as formas, tamanhos e números das áreas de contato geradas na geomembrana. Além de mostrar que os equipamentos desenvolvidos apresentaram bom desempenho para a avaliação do dano mecânico em geomembranas, permitindo fazer simulações com carregamentos que são prováveis de ocorrer em obras reais.

5.2- SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com o intuito de obter resultados mais precisos que permitam fortalecer os objetivos expostos nesta pesquisa, algumas sugestões para pesquisas futuras são listadas abaixo:

- Realizar maior quantidade de ensaios de dano mecânico para cada configuração, com o fim de conseguir realizar análise estatística dos dados obtidos com relação ao dano mecânico e com relação à variação da resistência à tração após o dano.
- Realizar ensaios empregando geotêxtil como proteção à geomembrana, a fim de verificar a redução no dano devido à presença desse material.
- Adequar o equipamento de média escala para a realização de ensaios com maior pressão vertical aplicada que 500 kPa.
- Utilizar ferramentas para a obtenção da superfície deformada da geomembrana, como por exemplo: o programa computacional *PhotoModeler Scanner* ou o Sistema tridimensional de superfícies (*Scanner 3D*).
- Adequar a escala da cor do papel filme de medir pressão, com o intuito de analisar a distribuição de pressões na geomembrana.
- Simular a degradação química nas amostras submetidas ao ensaio de dano mecânico no próprio ensaio, através da percolação de fluido agressivo, e posteriormente analisar as perdas de resistência.
- Fazer uso de DEM – Métodos dos elementos discretos para fazer simulações do comportamento da Brita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984). Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6508, 8 p.
- ABNT (1984). Solo – Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7181, 13 p.
- ABNT (1990). Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, MB 3324, 6 p
- ABNT (1991). Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, MB 3388, 14 p
- ABNT (1993). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13028, 10 p.
- ABNT (1993). Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não-confinada - Ensaio de tração de faixa larga. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12824, 5 p.
- ABNT (2003). Geossintéticos e Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12553, Rio de Janeiro, RJ, 3p.
- ABNT (2006). Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR/NM 45, 8 p.
- AMINABHAVI, T. M., & NAIK, H. G. (1998). Chemical Compatibility Testing of Diffusion, Permeation and Swelling Phenomena. *Geotextiles and Geomembranes*, 16: 333–354.
- ASTM (2007). Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes, and Related Products. *Annual Book of ASTM Standards*, D 4833, Vol. 04.13, 4p.
- ASTM (2011). Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembranes by the Wide Strip Tensile Method. *Annual Book of ASTM Standards*, D4885-01, Vol. 04.13, 10p.
- ALBUQUERQUE FILHO, L.H. (2004). Avaliação do Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro através de Ensaios de Piezocone. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 192 p.
- AMORIM, E.F. (2007). Efeitos do Processo de Deposição Hidráulica no Comportamento de um Rejeito de Mineração de Ouro. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 109 p.

- BAM (1994). Guidelines for the certification of geomembranes as a component of composite liners for municipal and hazardous waste landfills and for lining contaminated land. Bundesanstalt für Materialforschung undprüfung (Instituto Federal para Ensaio e Pesquisa de Materiais), Berlin.
- BARRETO, M.L. (2001). Mineração e Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o Brasil. III CETEM/. Rio de Janeiro, 215 p.
- BIDIM. (S/D.). Obras de Proteção ao Meio Ambiente - Manual Técnico.
- BOUAZZA, A., ZORNBERG, J.G. & ADAM, D. (2002). Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. 7th International Conference on Geosynthetics, Nice - França, 445–507.
- BRACHMAN, R. & GUDINA, S. (2008). Gravel contacts and geomembrane strains for a gm/ccl composite liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(6): 448–459.
- BRACHMAN, R.W.I., ROWE, R.K., IRFAN, H. & GUDINA, S. (2011). High-pressure puncture testing of hdpe geomembranes. 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto, 7.
- BREITENBACH, A. (2010). Impact of geomembrane liners on the design and construction of tailings dams. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010, Guarujá, 1107–1110.
- BUENO, B.S.; BENVENUTO, C. & VILAR, O. M. (2004). Aplicações em Barreiras Impermeabilizantes. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Vertematti, José Carlos, (ed.) Edgar Blücher, São Paulo, Brasil, pp. 335-380
- CARDONA, L.I.D. (2013). Estudo de Fluxo através de Danos Mecânicos em Geomembranas. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 73 p.
- CAZZUFFI, D., GIROUD, J.P. & SCUERO, A. & VASCETTI, G. (2010). Geosynthetic barriers systems for dams. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010, .
- COLMANETTI, J.P. (2006). Estudos sobre a Aplicação de Geomembranas na Impermeabilização da Face de Montante de Barragens de Enrocamento. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 272 p.
- DNPM. (2005). Gestão Mineral em Destaque - Boletim Informativo do Departamento Nacional de Produção Mineral.
- DNPM. (2013). Sumário Mineral 2013. Volume 33. Brasília, 137 p.
- ESPÓSITO, T. DE J. (2000). Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 363 p.

- FARIAS, C.E.G. (2002). *Mineração e Meio Ambiente no Brasil*.
- FORGET, B., ROLLIN, A.L. & JACQUELIN, T. (2005). Lessons learned from 10 years of leak detection surveys on geomembranes. *Sardinia Symposium, Sardinia*.
- FOX, P.J., ROSS, J.D., SURA, J.M. & THIEL, R.S. (2011). Geomembrane damage due to static and cyclic shearing over compacted gravelly sand. *Geosynthetics International*, 18(5): 272–279.
- GAMSKI, K. (1984). Geomembranes : classification , use and performance. *Geotextiles and Geomembranes*, 1: 85–117.
- GEROTO, R.E. (2008). *Desempenho de Camadas de Proteção para Geomembranas*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 188 p.
- GIROUD, J.P. & BONAPARTE, R. (1989). Leakage through liners constructed with geomembrane - part i. geomembrane liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 8: 27–67.
- GMA. (2002). *Handbook of Geosynthetics - Geosynthetic Materials Association*. 59 p.
- GOURC, J.P. & PERRIER, H. (1991). Tensile tests for geomembranes. *Geomembranes - Identification and Performance Testing*. RILEM – Report of Technical Committee 103-MGH Mechanical and Hydraulic Testing of Geomembranes, Rollin, A. & Rigo, J.M. (Eds.), pp. 280.
- HEMSI, P. S. & VIDAL, D.M., FONSECA, C. & YOSHIMURA, P. & URASHIMA, D.C. (2010). Mechanical behavior of a pvc geosynthetic barrier exhumed from an industrial waste disposal trench. *Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World*, Guarujá, Brazil, 881–886.
- HERNANDEZ, H.M.O. (2002). *Caracterização Geomecânica de Rejeitos Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 174 p.
- ICOLD. (2010). Geomembrane sealing systems for dams, design principles and review of experience. *Bulletin 135 of the International Commission on Large Dams*, Paris, 464.
- KOERNER, R.M. (2005). *Designing with Geosynthetics*. 5th ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 796 p.
- LODI, P.C., BUENO, B.D.S. & ZORNBERG, J.G. (2009). Avaliação da degradação de geomembranas de polietileno de alta densidade (pead) e de poli (cloreto de vinila)(pvc) utilizando análise termogravimétrica. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 10(2): 110–118.
- LOZANO, F.A.E. (2006). *Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 115 p.

- NASCIMENTO, M.T. (2002). Avaliação de Dano Mecânico em Geossintéticos em Obras de Disposição de Resíduos. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 105 p.
- NEOPLASTIC. (S/D.). Geomembrana PEAD - Manual Técnico.
- NOSKO, V., ANDREZAL, T., GREGOR, T., & GANIER, P. (1996). SENSOR Damage Detection System (DDS) - The unique geomembrane testing method. Proceedings of the First European Geosynthetics Conference Eurogeo I, IGS, Maastricht, Netherlands, 743 - 748.
- NOSKO, V. & TOUZE-FOLTZ, N. (2000). Geomembrane liner failure: modeling of its influence on contaminant transfer. Proceedings of the 2nd European Geosynthetics Conference, AGI – IGS, Bologna, 2: 557–560.
- PEREIRA, E.L. (2005). Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro Sob Carregamento Estático. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 185 p.
- PRESOTTI, E.D.S. (2002). Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 153 p.
- REBELO, K.M.W. (2009). Avaliação de Camadas de Proteção para Geomembranas de PVC e PEAD. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 247 p.
- RIBEIRO, L.F.M. (2000). Simulação Física de Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 235 p.
- RIGO, J.M. & CAZZUFFI, D.A. (1991). Test standards and their classification. Geomembranes - Identification and Performance Testing. RILEM – Report of Technical Committee 103-MGH Mechanical and Hydraulic Testing of Geomembranes, Rollin, A. & Rigo, J.M. (Eds.), pp. 280.
- ROLLIN, A.L., LAFLEUR, J., MARCOTTE, M.; DASCAL, O., AKBER, Z. (1984). Selection criteria for the use of geomembranes in dams and dykes in northern climate. International Conference on Geomembranes, Denver, pp. 493-499
- ROWE, R.K.. (2005). Long-term performance of contaminant barrier systems. Géotechnique, 55(9): 631–678.
- SAMPAIO, S.S. (2013). Estudo do Comportamento de Barreiras Poliméricas em Sistemas de Disposição de Rejeito de Minério de Ouro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil, 173 p.
- SANDRONI, S.S., DE MELLO, L.G., GOMES, R.C. & VILAR, O.M. (2010). Brazilian research and practice with geosynthetics. Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, Guarujá, Brazil, 3–41.

- SEMBENELLI, P., SEMBENELLI, G., & SCUCRO, A. (1998). Geosynthetic System for the Facing of Bovilla Dam. 6th International Conference on Geosynthetics, IFAI Proceedings, Atlanta, Georgia USA, 2: 1099 - 1106.
- SENSOR PRODUCTS INC. (2013). Tactile Pressure Indicating Film - *Pressurex-micro* ® *Green*. General Brochure. SPI.
- SHIMAOKA, T. & NAKAYAMA, H., HIRAI, T. & HIRONAKA, J., KATSUMI, T., UEDA, S. & KANOU, H. (2010). Evaluation of physical properties of aged geomembranes taken from landfill sites in japan. Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, Guarujá, Brazil, 809–812.
- TOGNON, A.R., ROWE, R.K., FELLOW & MOORE, I.D. (2000). Geomembrane strain observed in large-scale testing of protection layers. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126: 1194–1208.
- TOUZE-FOLTZ, N. & GIROUD, J.P. (2005). Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to large circular defects in the geomembrane. Geosynthetics International, 12(4): 205–207.
- VILLAR, L.F. DE S. (2002). Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 461 p.
- YAKO, M.A., KOERNER, G. R. AND KOERNER, R.M. & HSUAN, Y.G. (2010). Case history of a 20-year old exposed hdpe surface impoundment liner. Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, Guarujá, 805–808.
- ZANZINGER, H. (2007). The use of geosynthetics as barrier materials in civil engineering. Geosynthetics in Civil Engineering, Sarsby, R.W. (Ed.), Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, pp. 295.

APÊNDICES

APÊNDICE A. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE FERRO E GEOMEMBRANA DE PVC DE 1,0 mm DE ESPESSURA

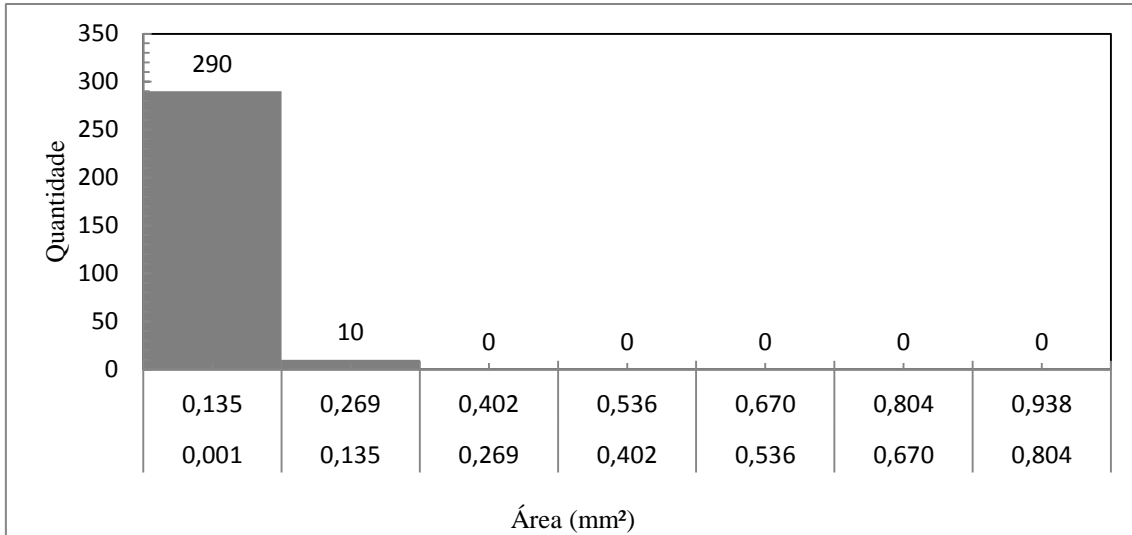


Figura A.0.1 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100 kPa.

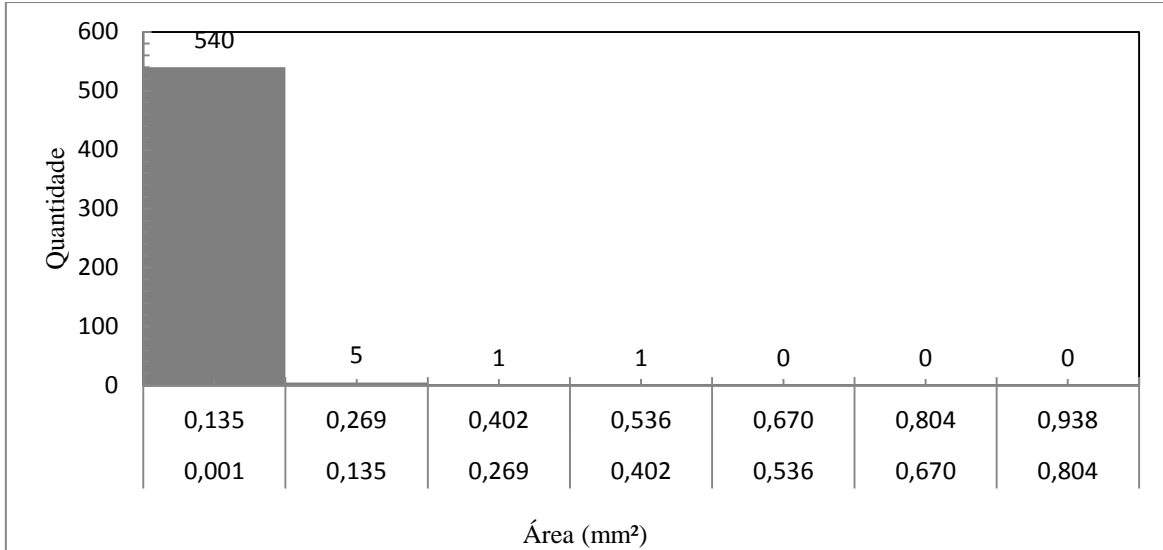


Figura A.0.2 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200 kPa.

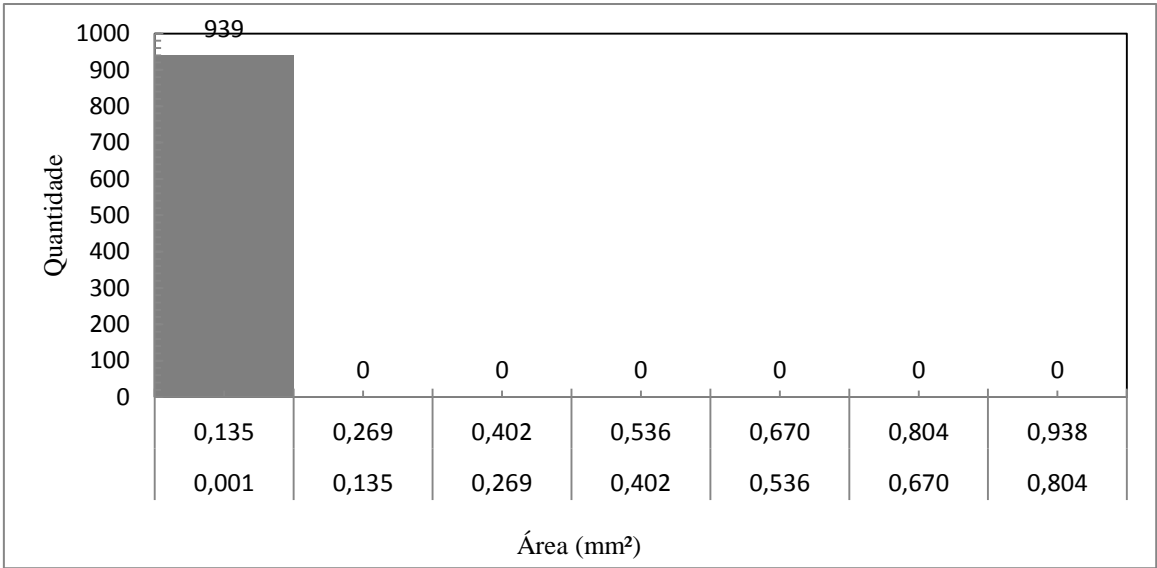


Figura A.0.3 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300 kPa.

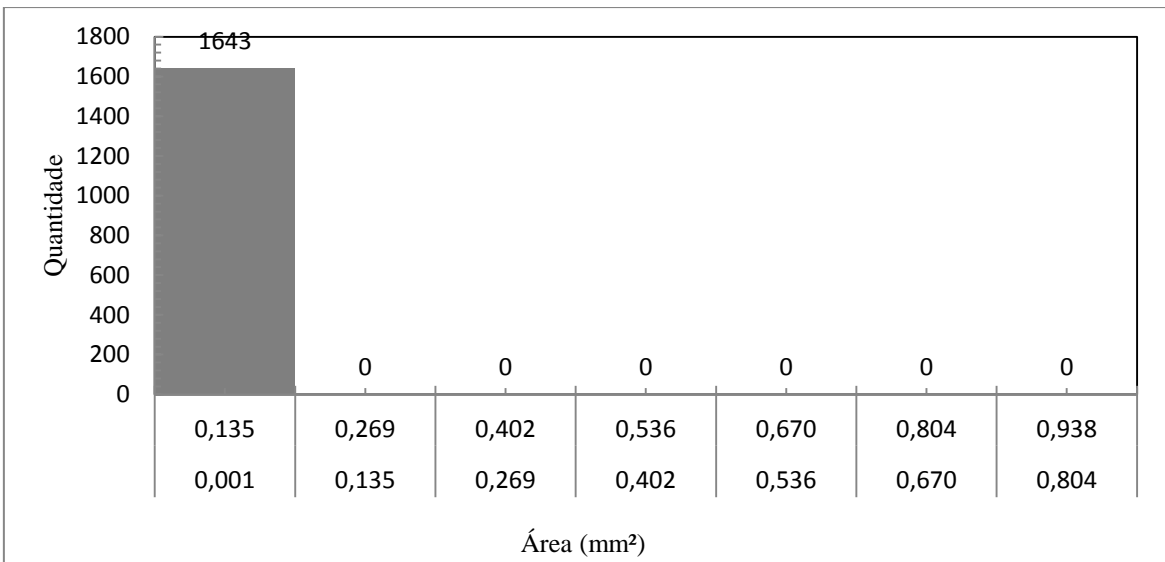


Figura A.0.4 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500 kPa.

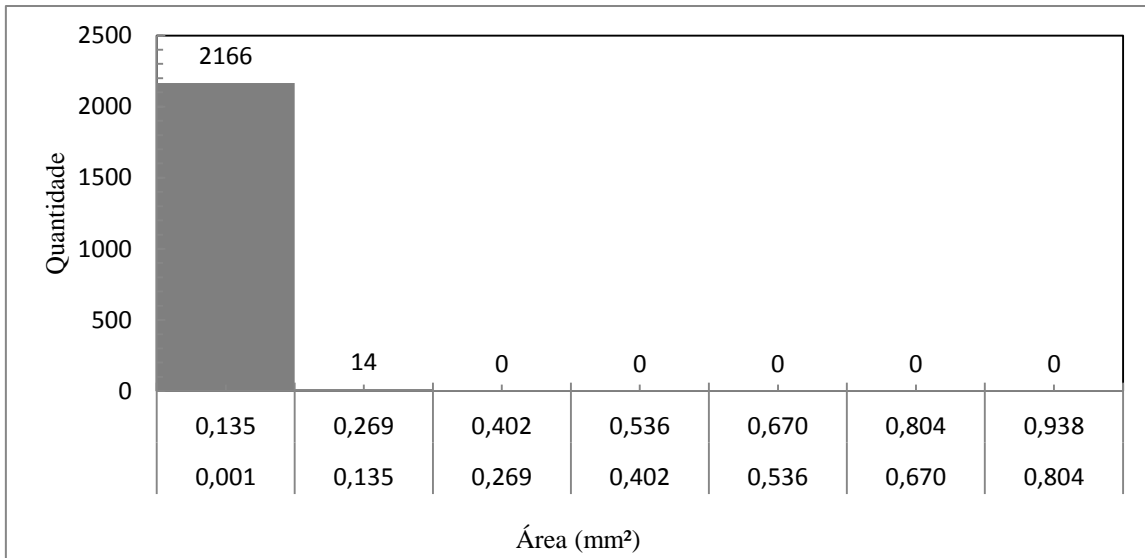


Figura A.0.5 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000 kPa.

APÊNDICE B. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE FERRO E GEOMEMBRANA DE PEAD DE 1,0 mm DE ESPESSURA

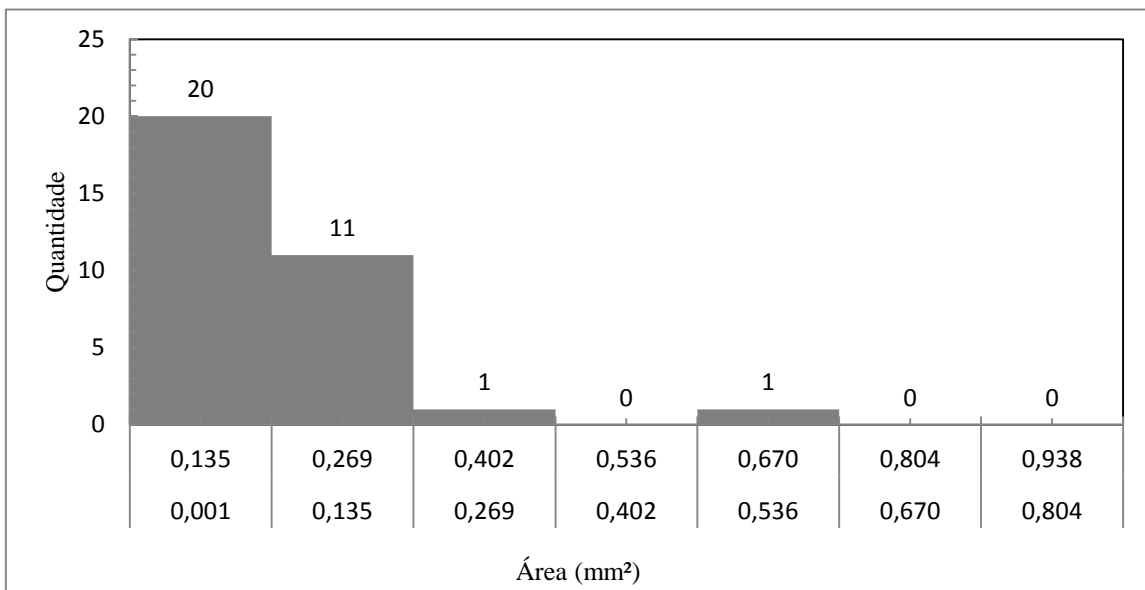


Figura B.0.1 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100 kPa.

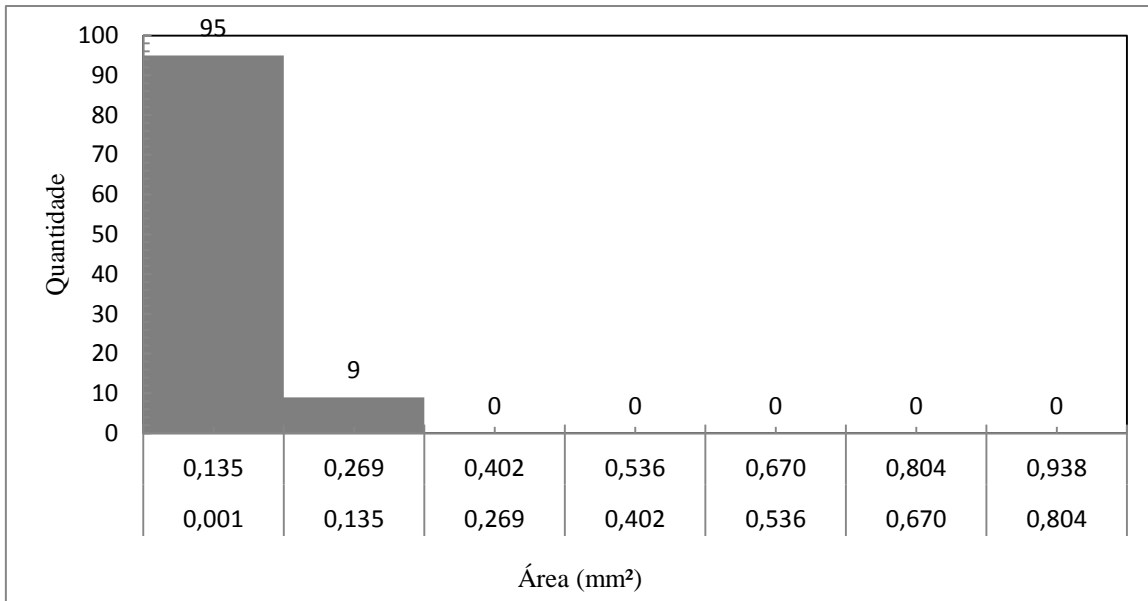


Figura B.0.2 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200 kPa.

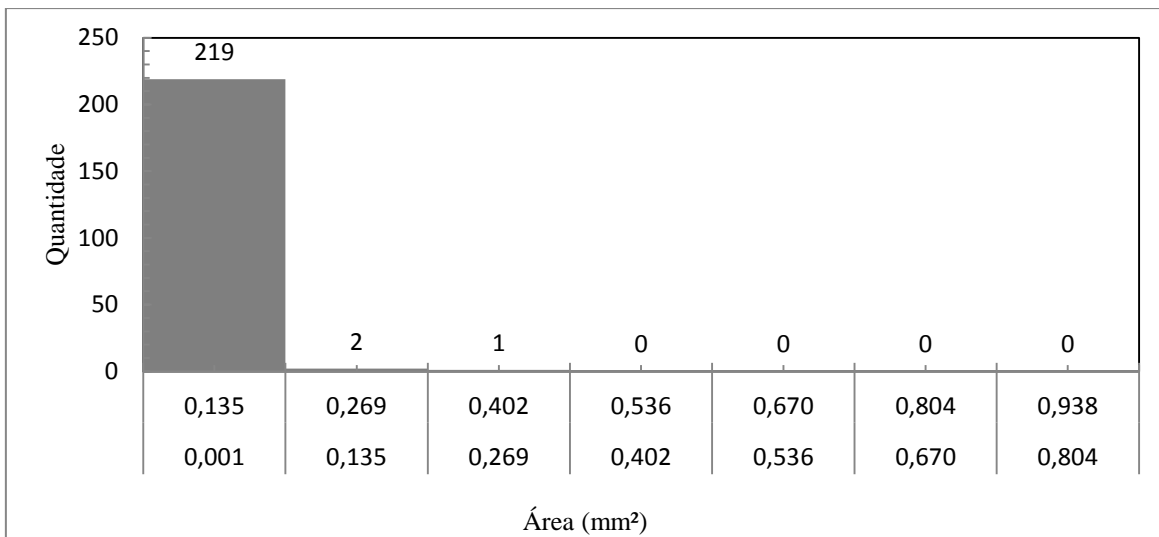


Figura B.0.3 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300 kPa.

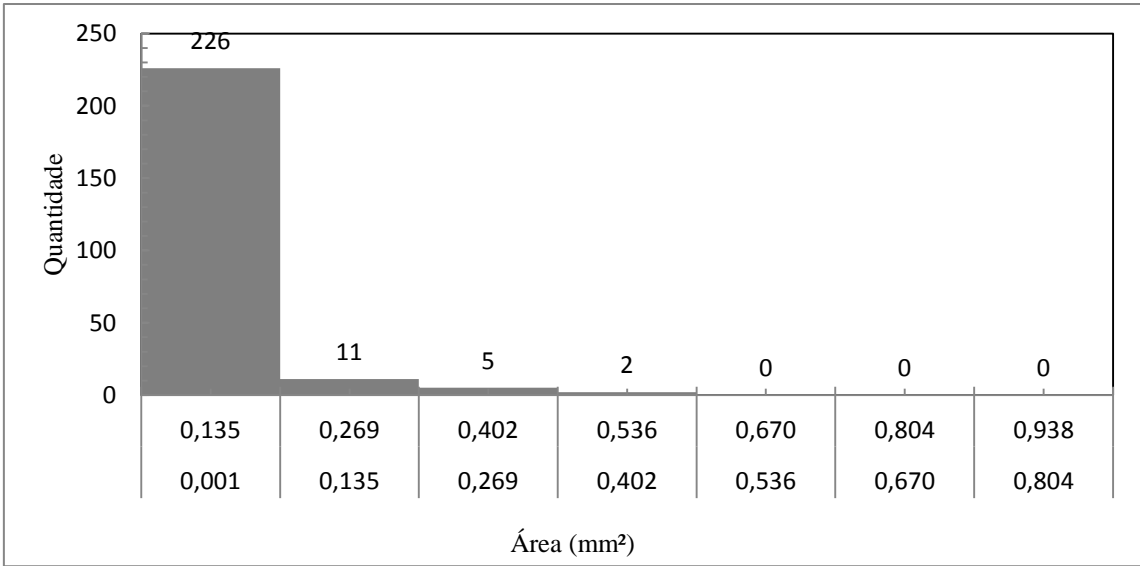


Figura B.0.4 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500 kPa.

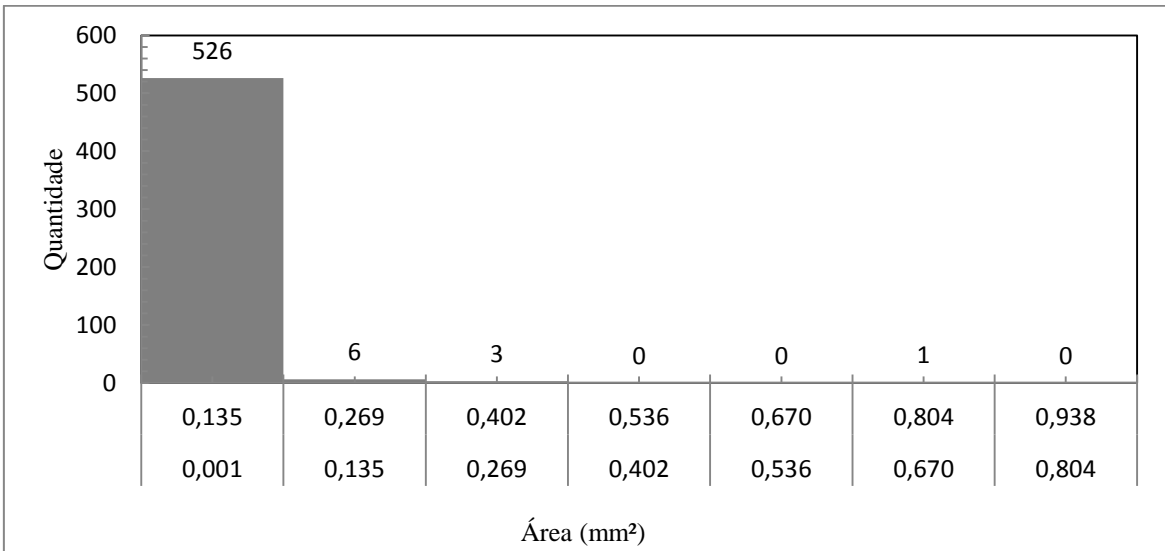


Figura B.0.5 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000 kPa.

APÊNDICE C. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE FERRO E GEOMEMBRANA DE PEAD DE 2,0 mm DE ESPESSURA

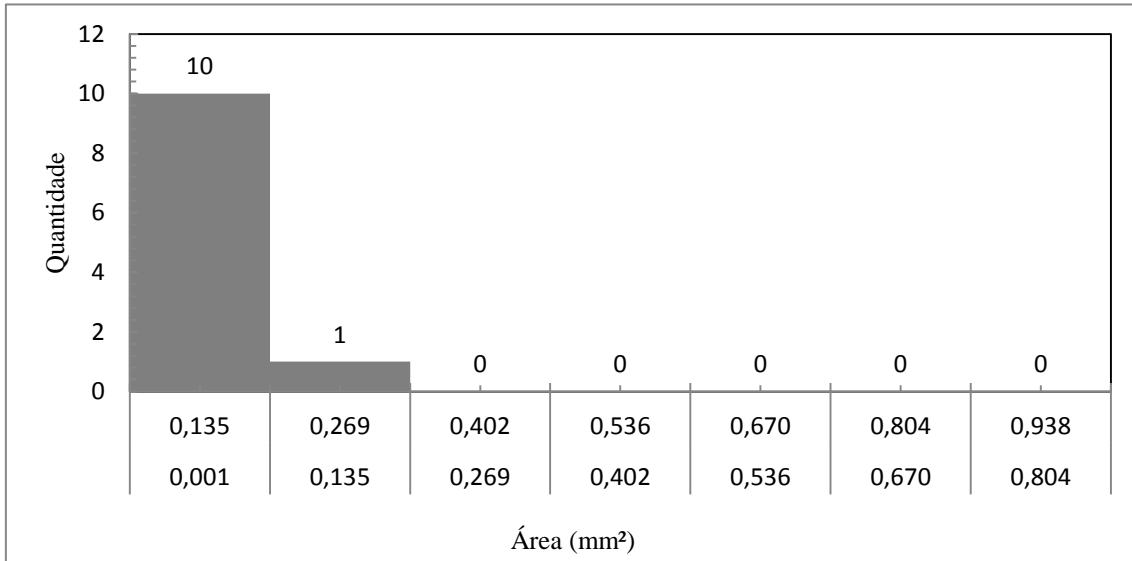


Figura C.0.1 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100 kPa.

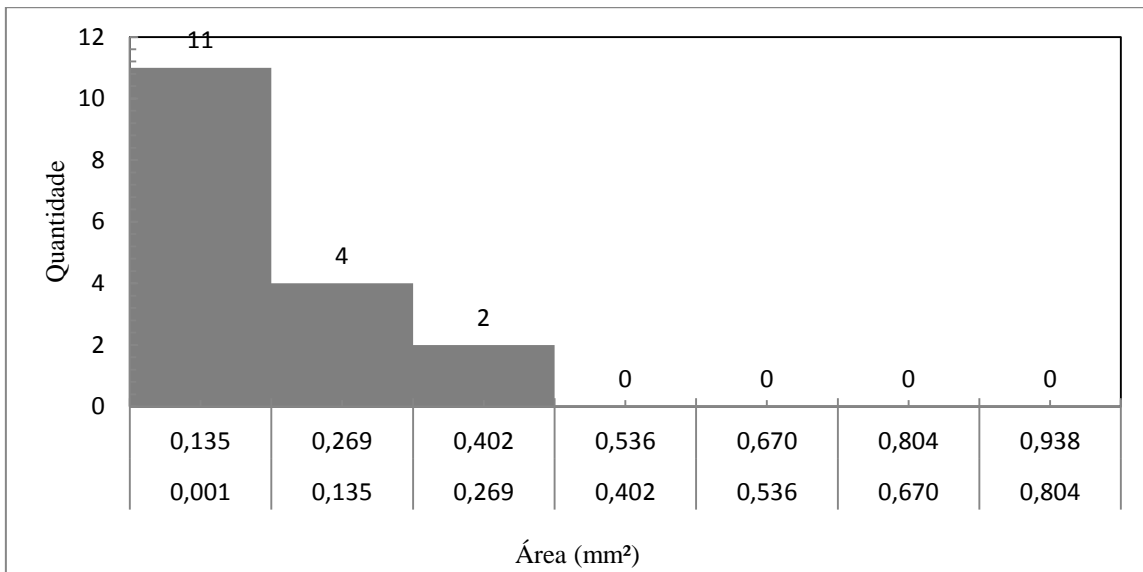


Figura C.0.2 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200 kPa.

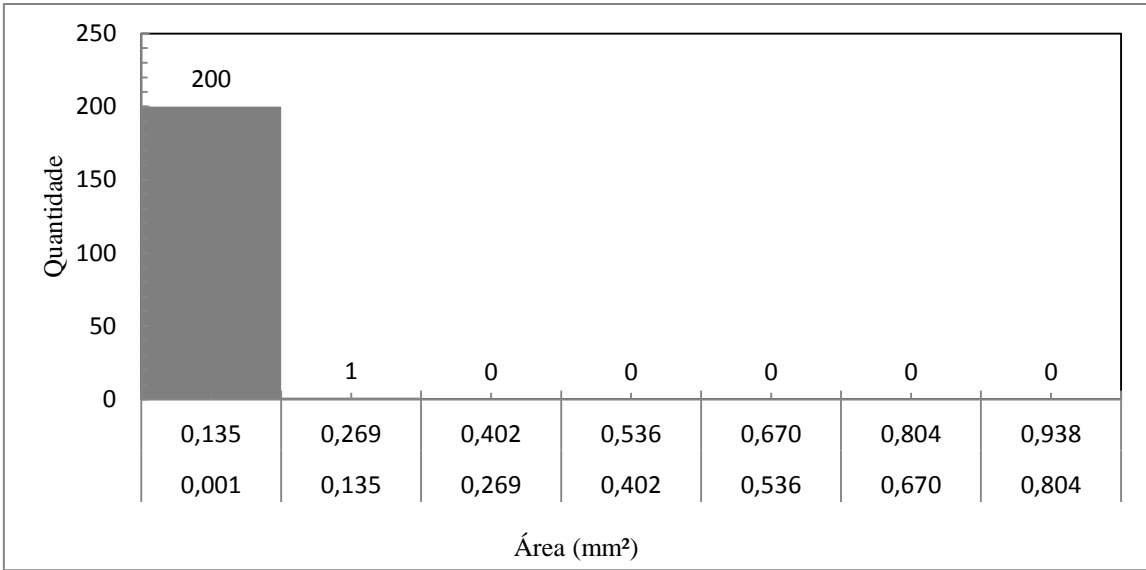


Figura C.0.3 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300 kPa.

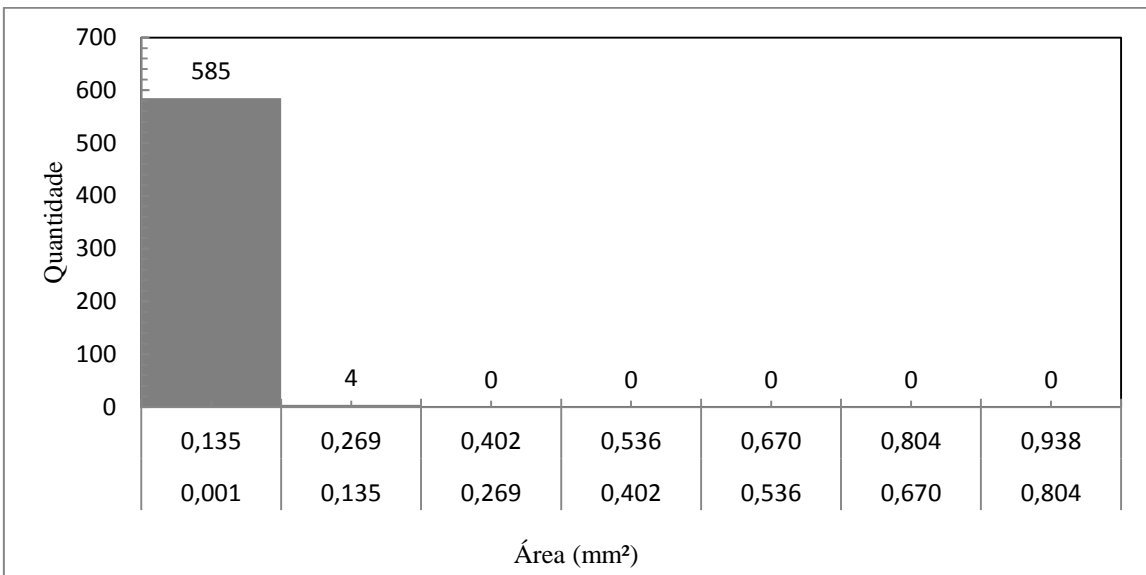


Figura C.0.4 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500 kPa.

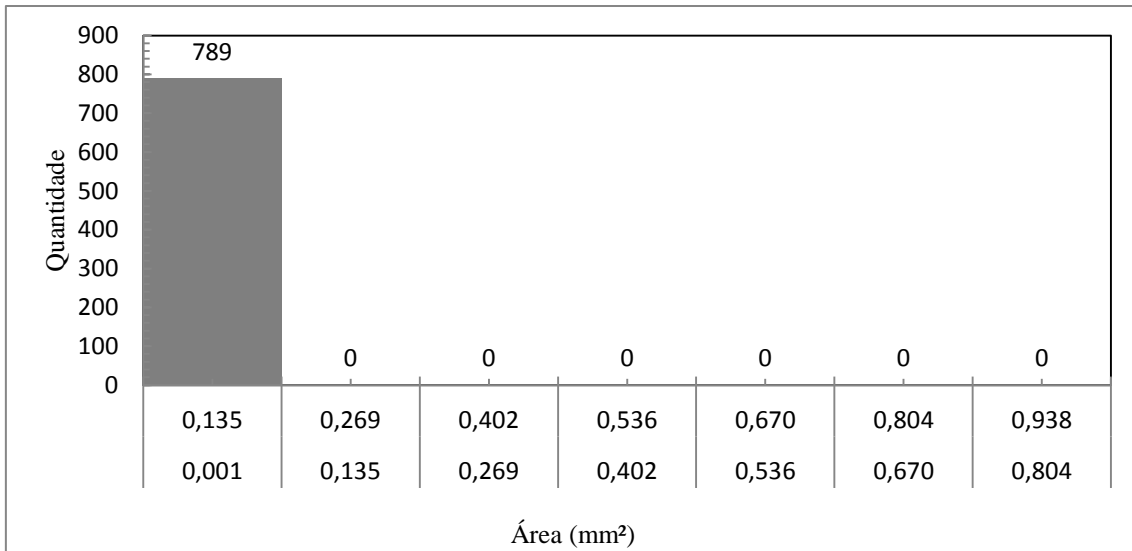


Figura C.0.5 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000 kPa.

APÊNDICE D. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE OURO E GEOMEMBRANA DE PVC DE 1,0 mm DE ESPESSURA

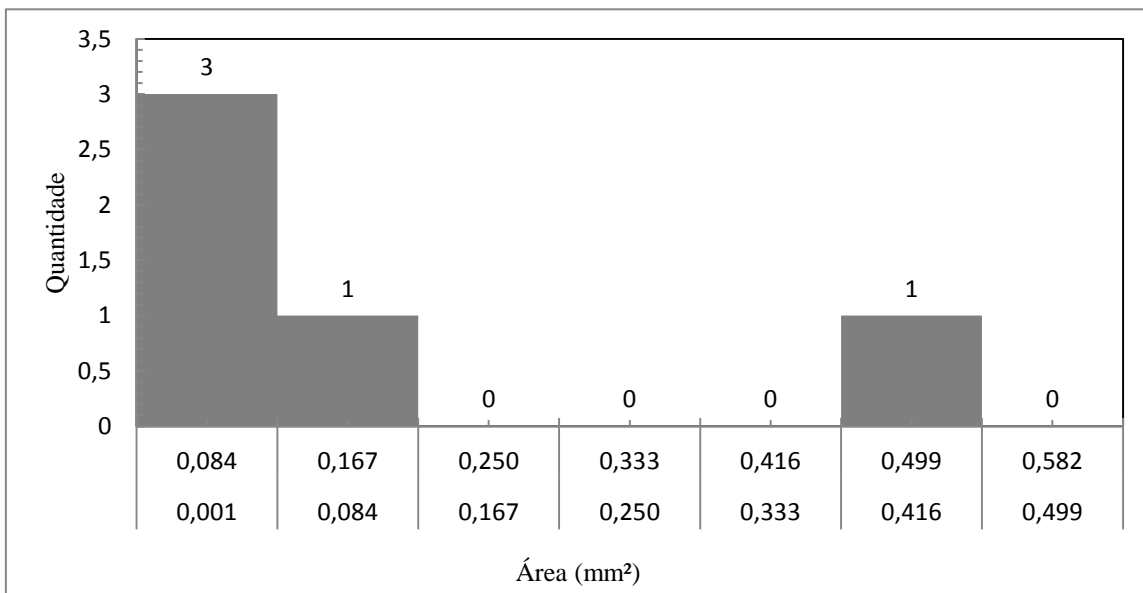


Figura D.0.1 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100 kPa.

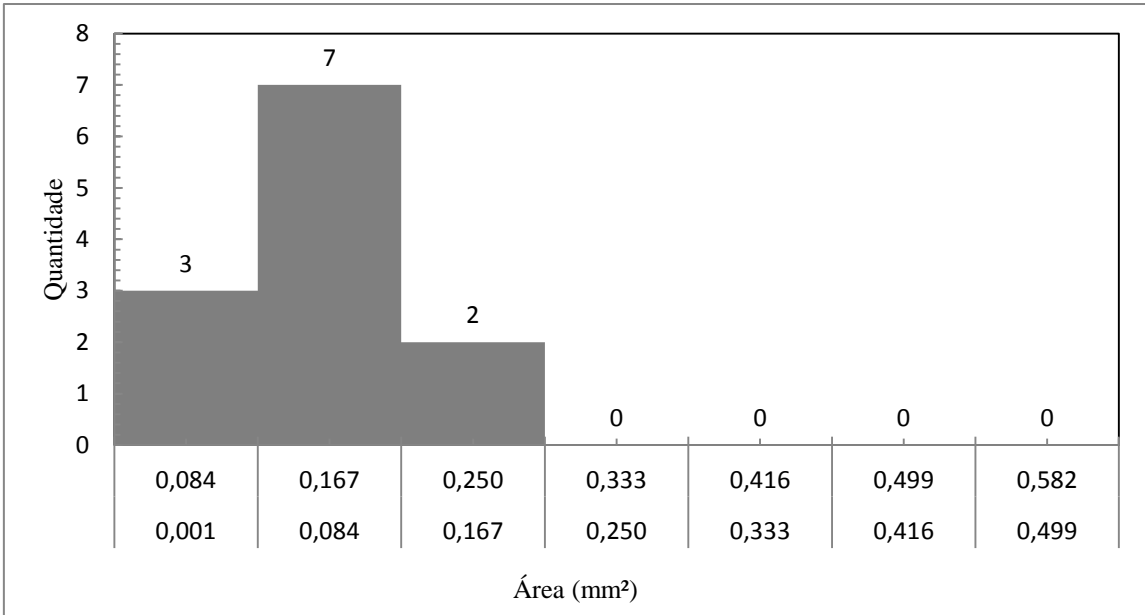


Figura D.0.2 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200 kPa.

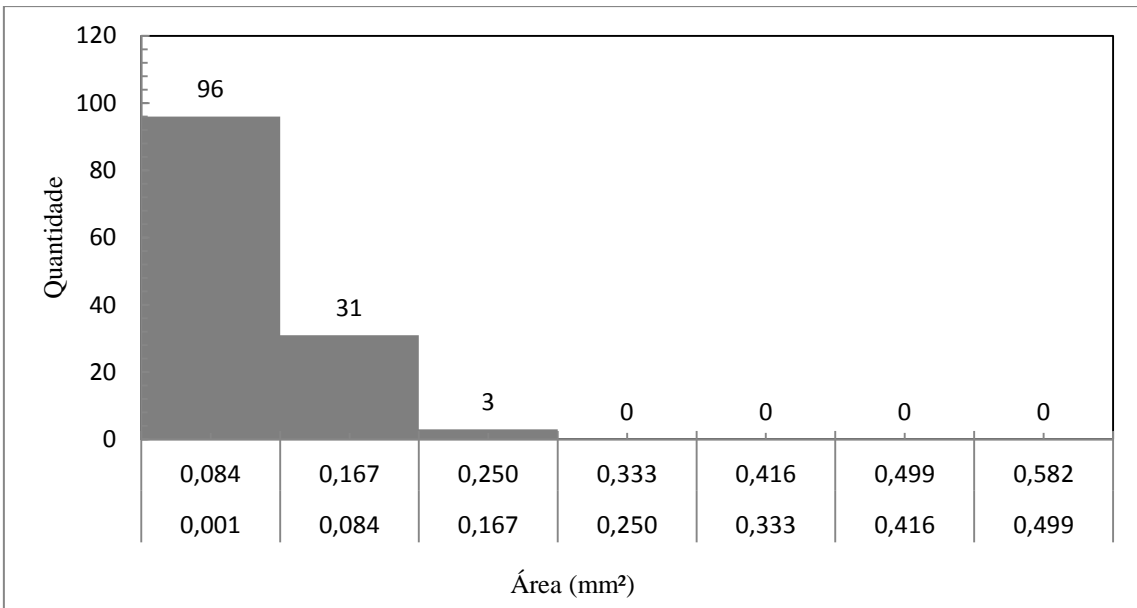


Figura D.0.3 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300 kPa.

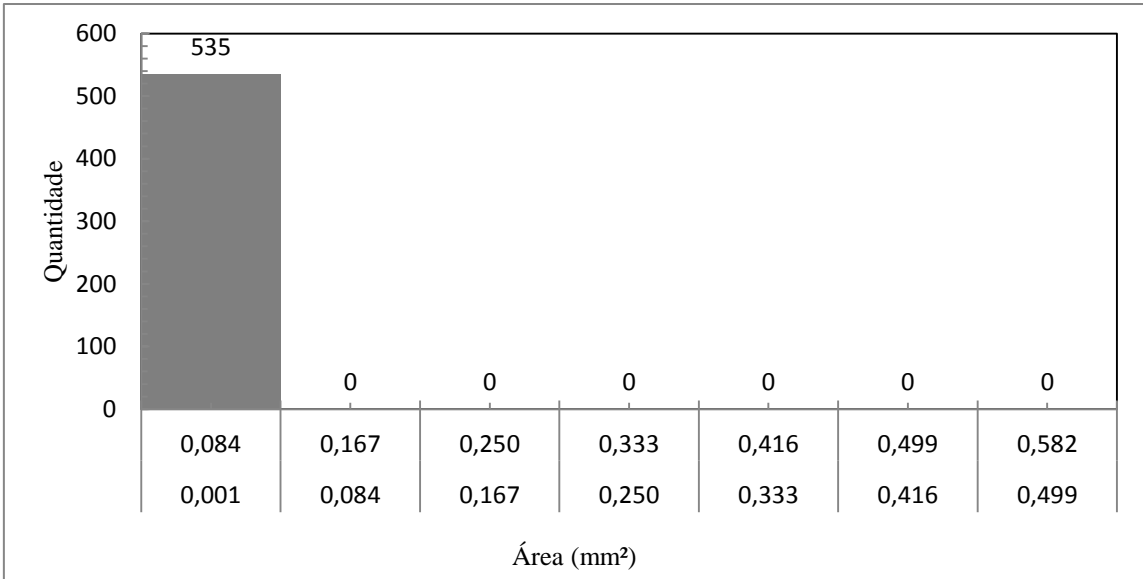


Figura D.0.4 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500 kPa.

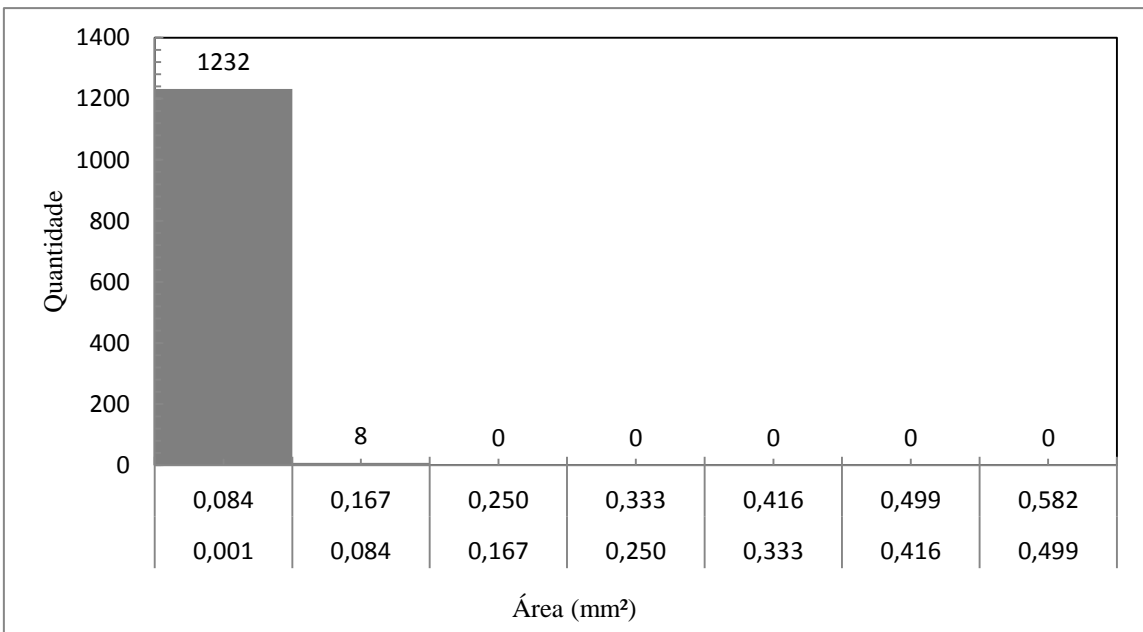


Figura D.0.5 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000 kPa.

APÊNDICE E. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE OURO E GEOMEMBRANA DE PVC DE 2,0 mm DE ESPESSURA

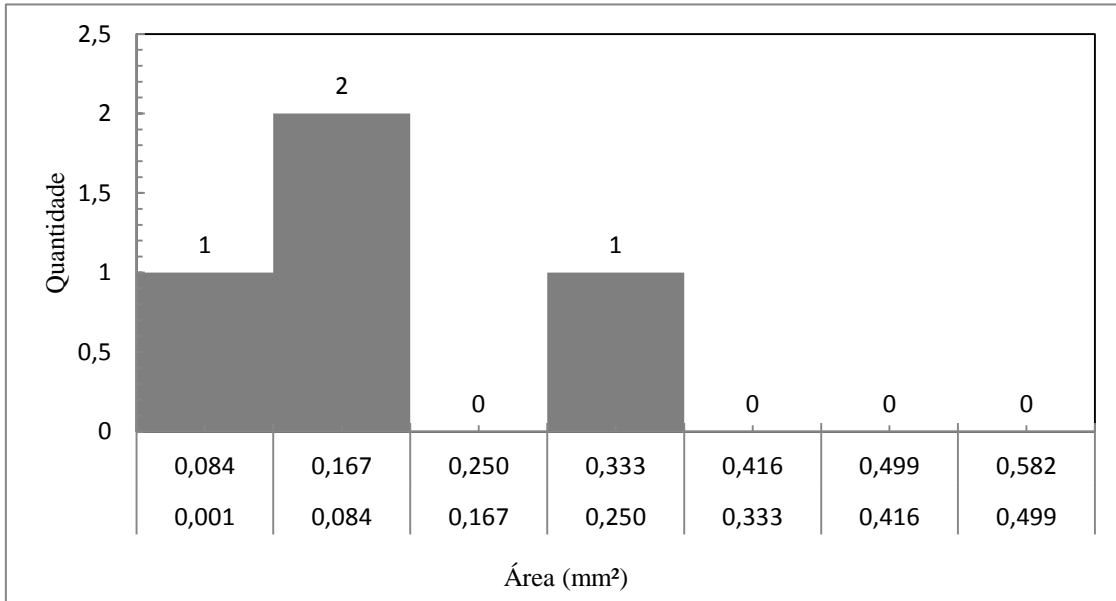


Figura E.0.1 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100 kPa.

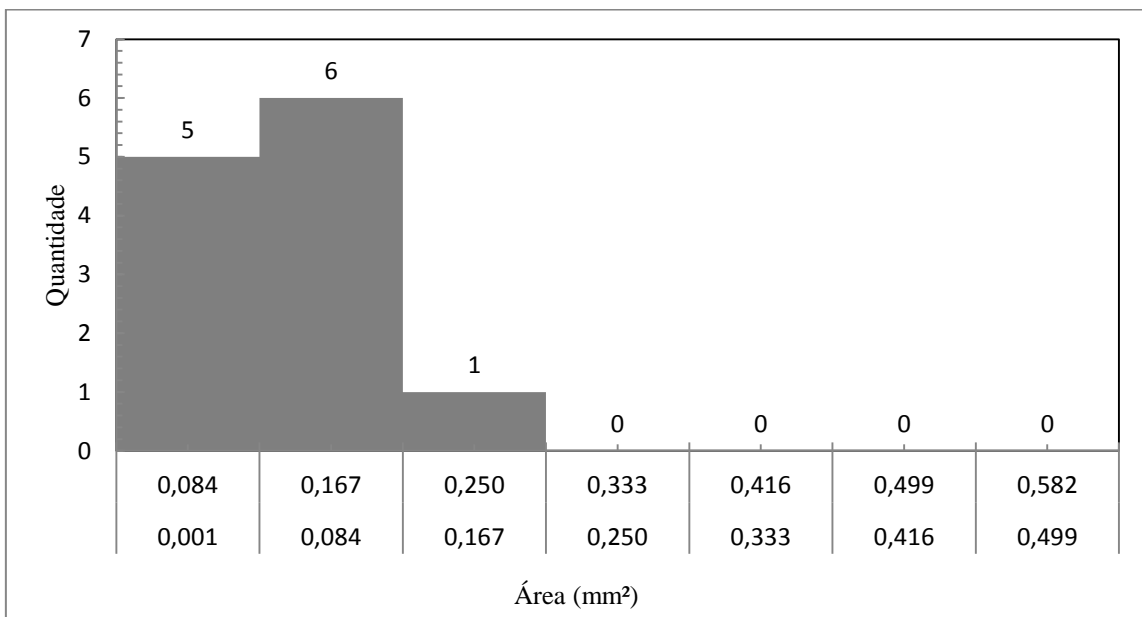


Figura E.0.2 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200 kPa.

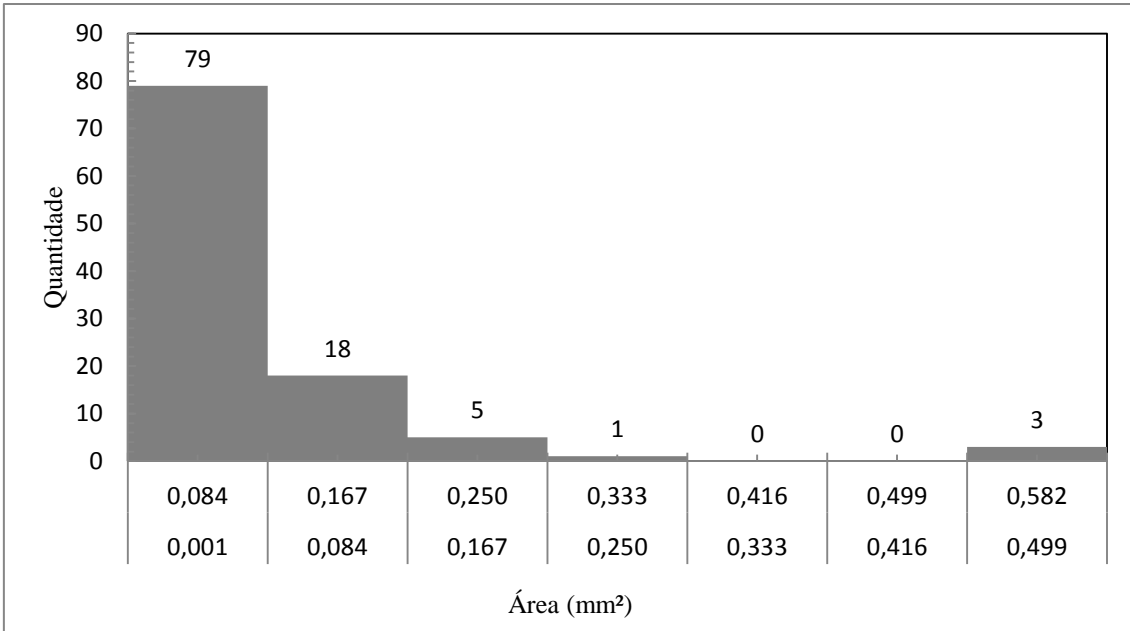


Figura E.0.3 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300 kPa.

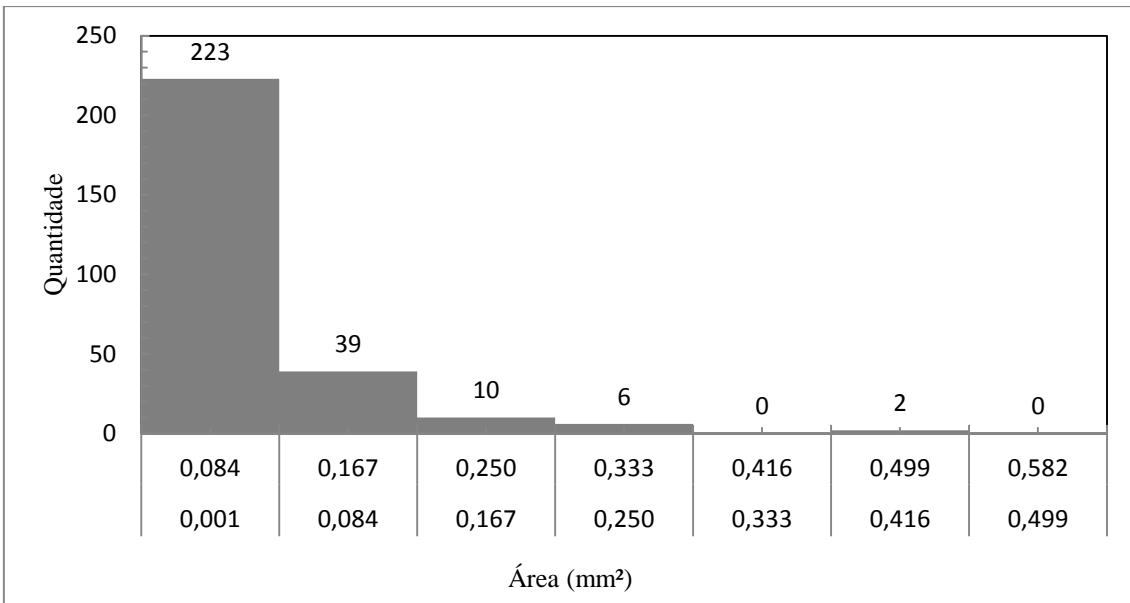


Figura E.0.4 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500 kPa.

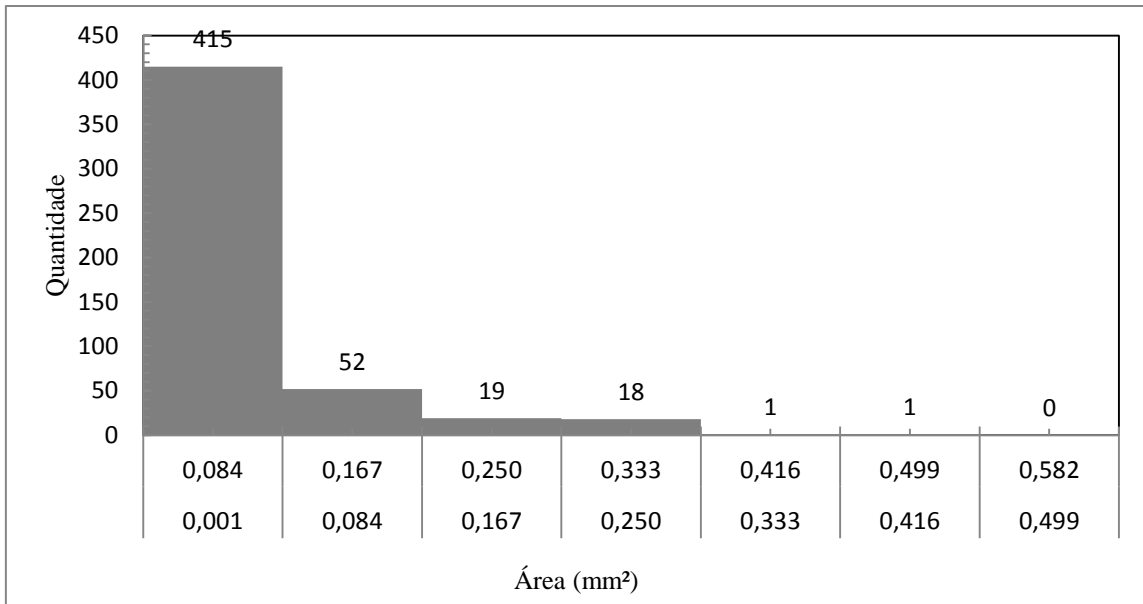


Figura E.0.5 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000 kPa.

APÊNDICE F. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM REJEITO DE OURO E GEOMEMBRANA DE PEAD DE 2,0 mm DE ESPESSURA

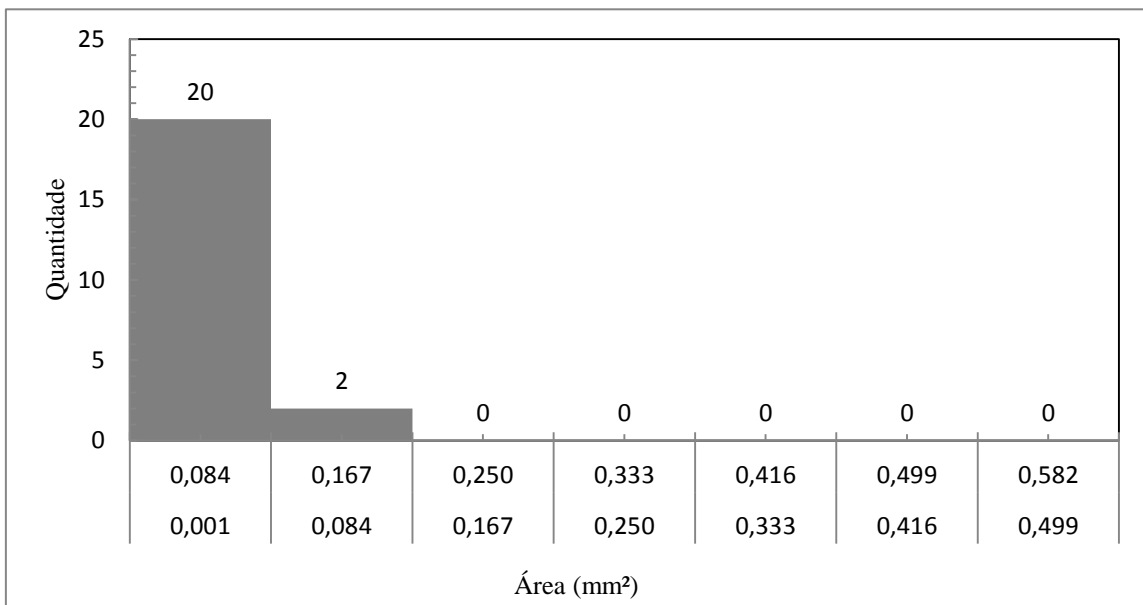


Figura F.0.1 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100 kPa.

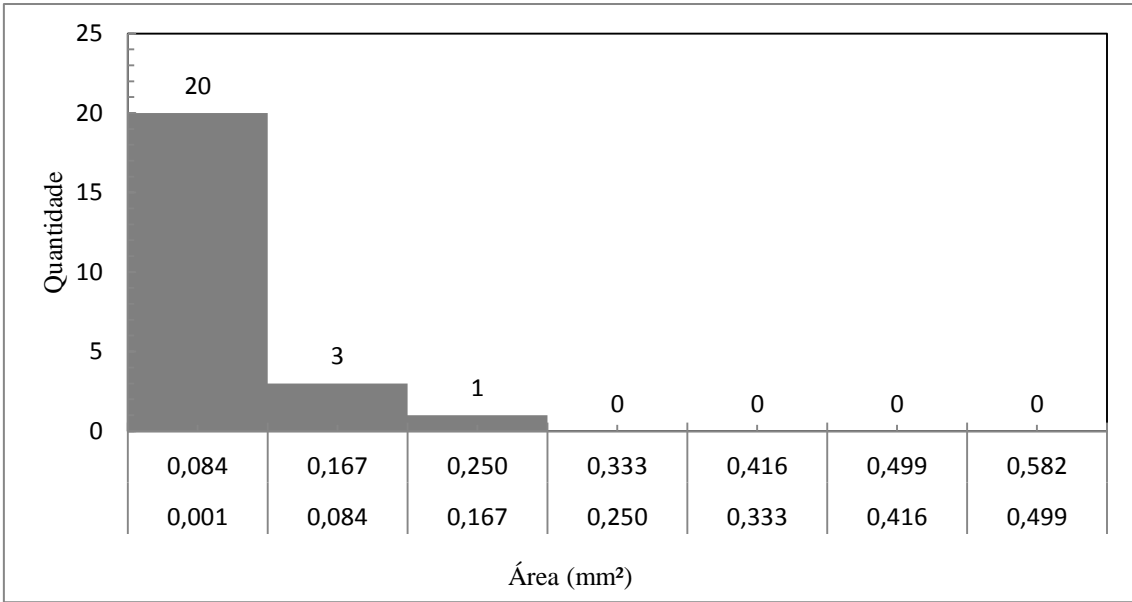


Figura F.0.2 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200 kPa.

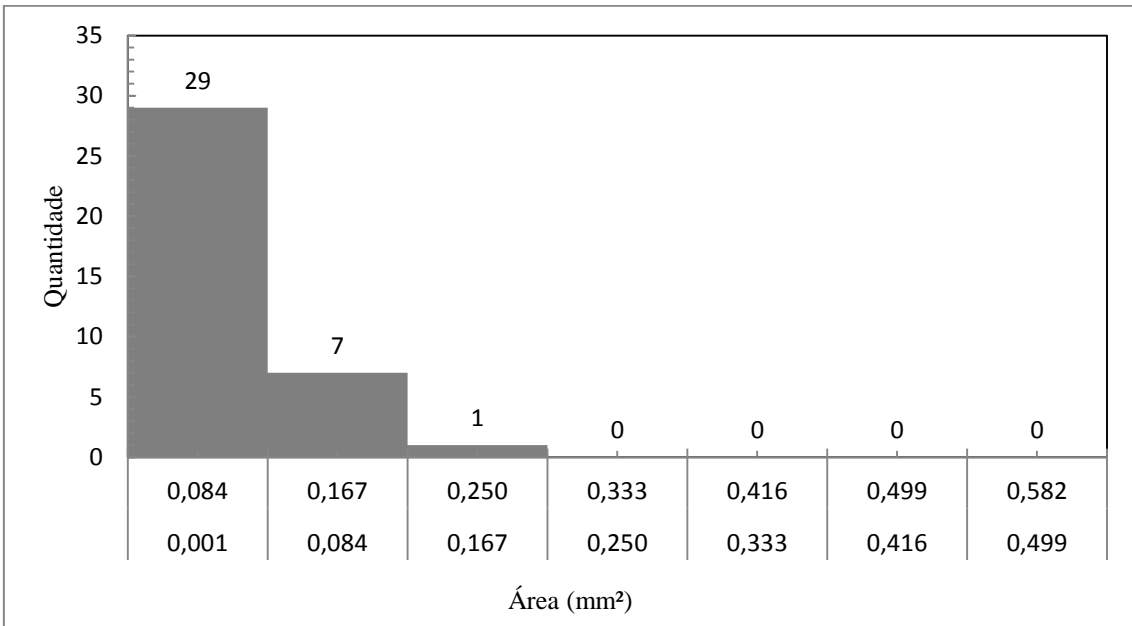


Figura F.0.3 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300 kPa.

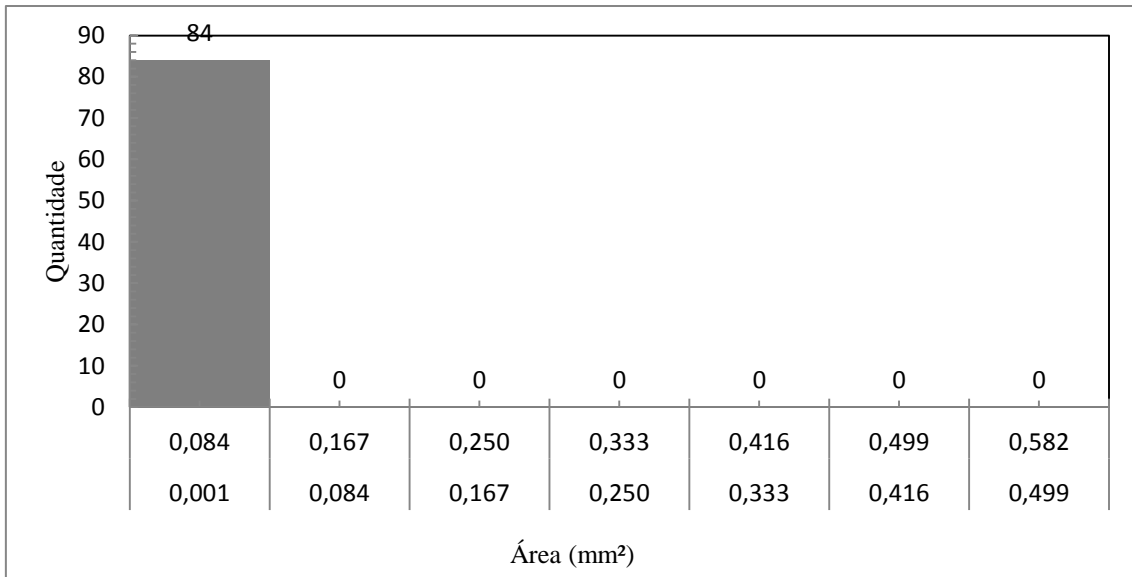


Figura F.0.4 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500 kPa.

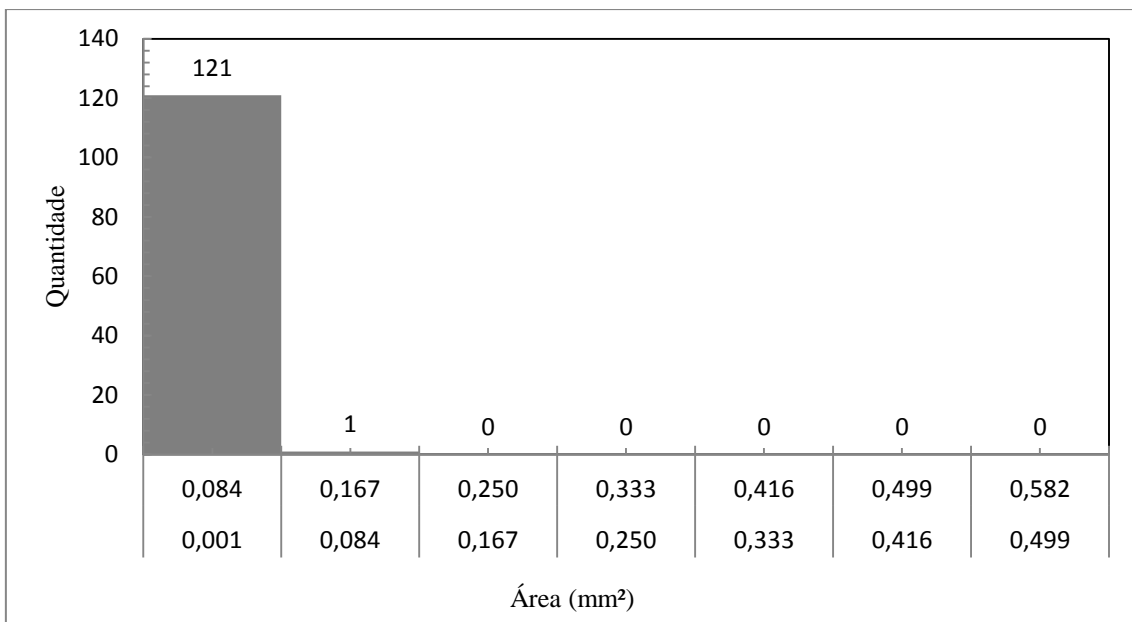


Figura F.0.5 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 1000 kPa.

APÊNDICE G. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM BRITA E GEOMEMBRANA DE PVC DE 1,0 mm DE ESPESSURA

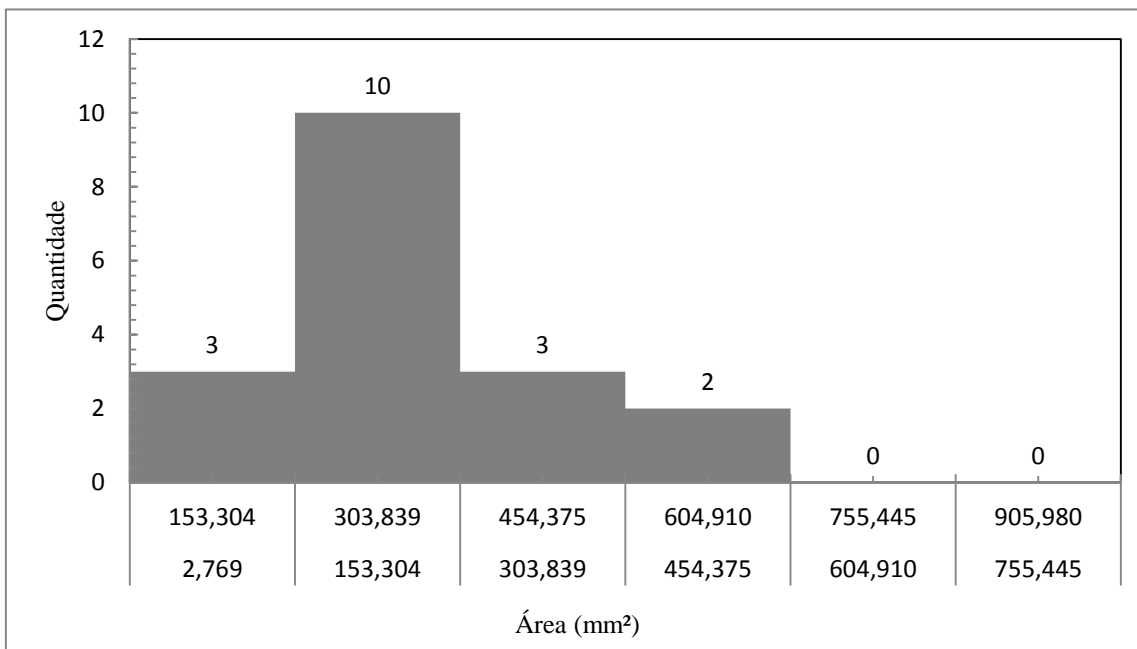


Figura G.0.1 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100 kPa.

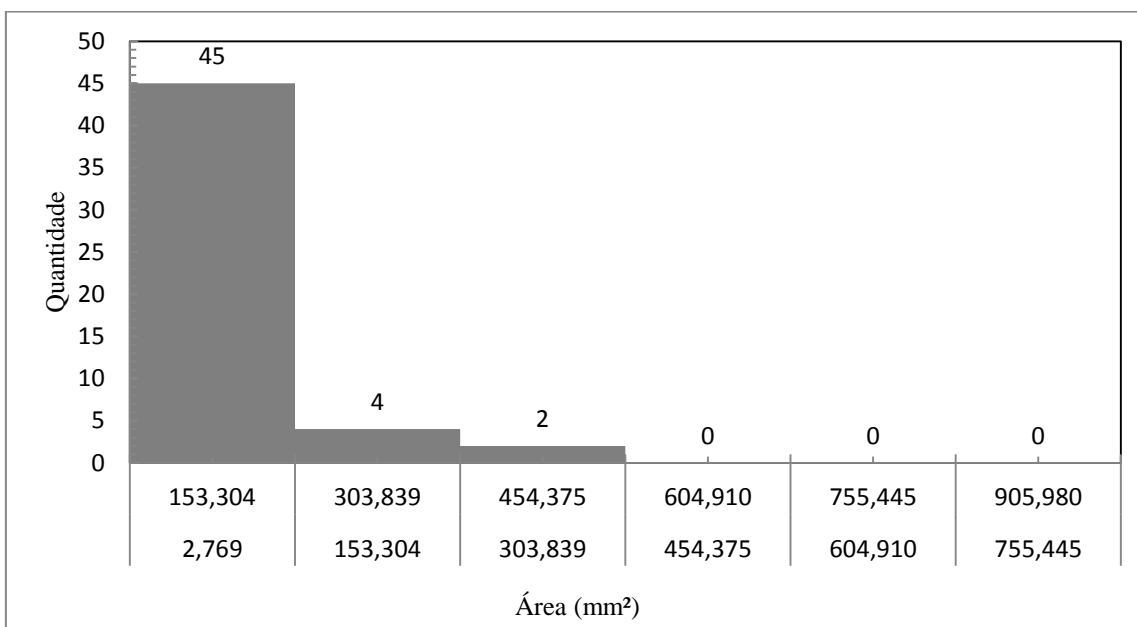


Figura G.0.2 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200 kPa.

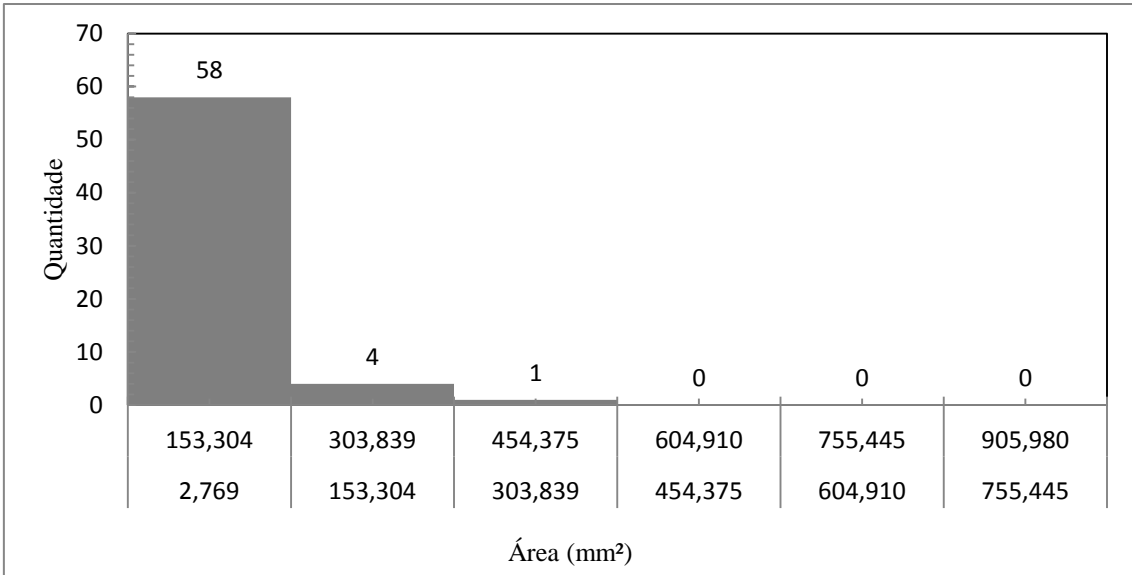


Figura G.0.3 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300 kPa.

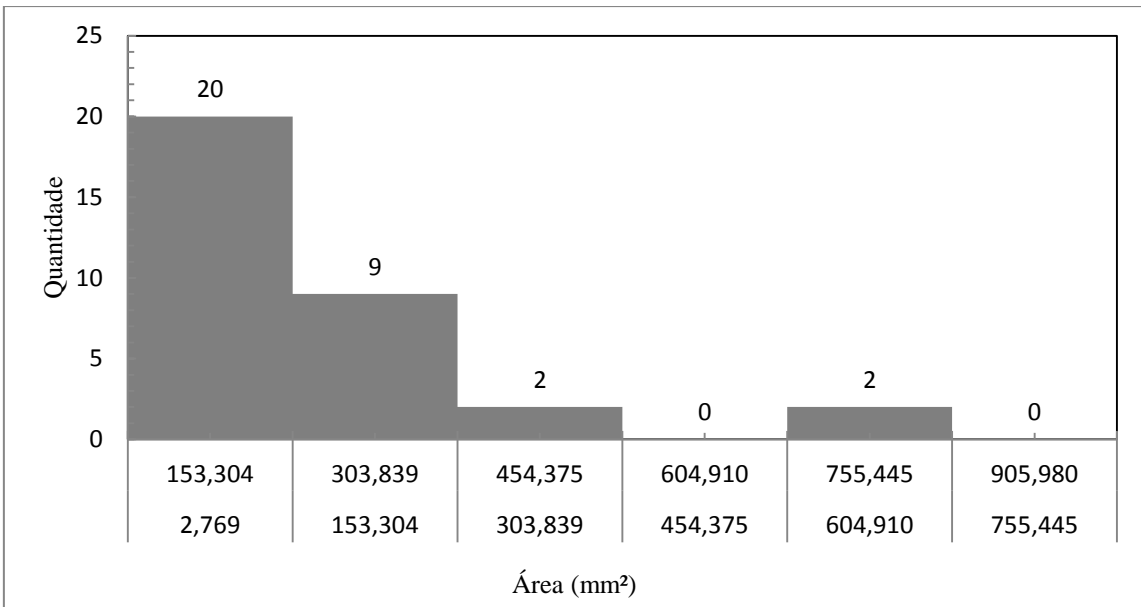


Figura G.0.4 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500 kPa.

APÊNDICE H. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM BRITA E GEOMEMBRANA DE PEAD DE 2,0 mm DE ESPESSURA

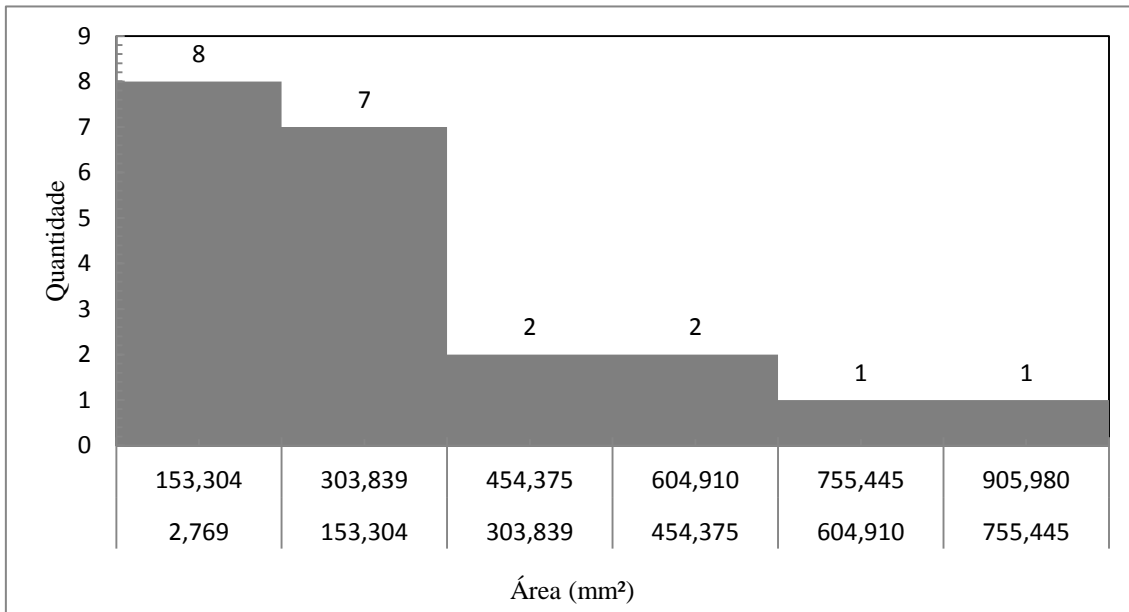


Figura H.0.1 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 100 kPa.

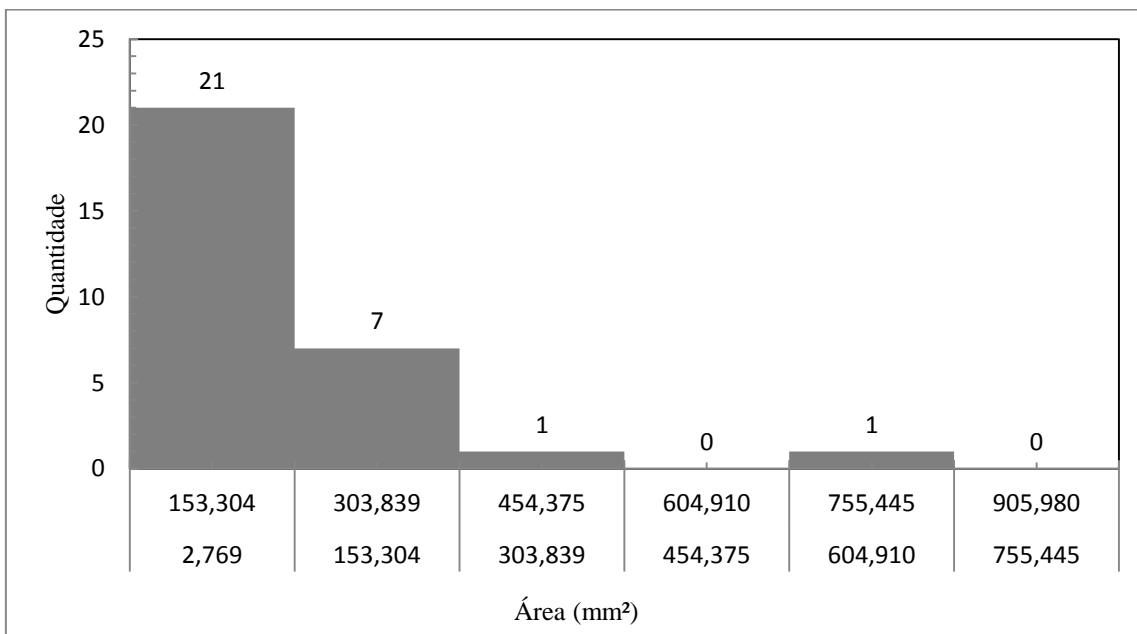


Figura H.0.2 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 200 kPa.

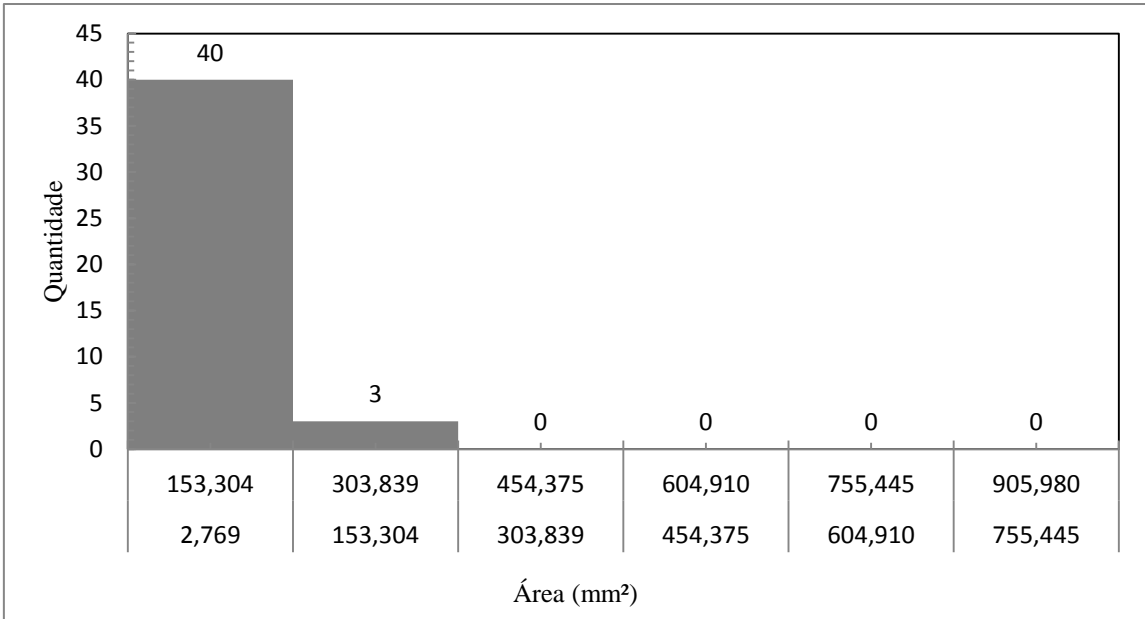


Figura H.0.3 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 300 kPa.

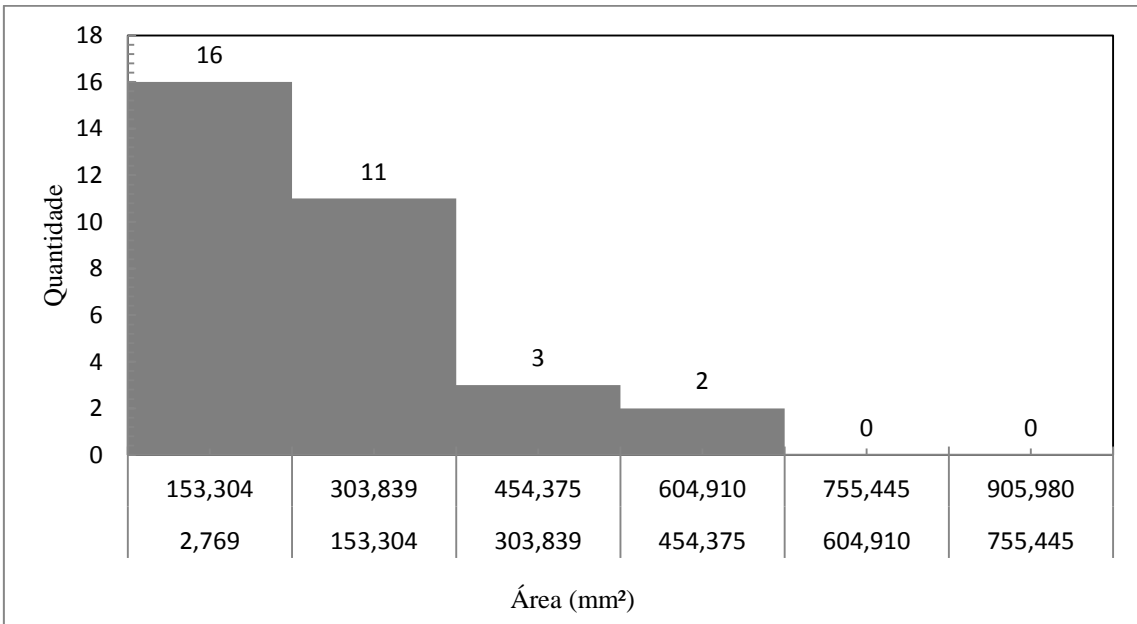


Figura H.0.4 - Distribuição de frequência das áreas de contato para pressão de 500 kPa.