

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

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DE PROPRIEDADES DE
GEOMEMBRANAS DE PVC DEVIDO A DANOS MECÂNICOS**

JAVIER RICARDO AMARILLO SOTO

ORIENTADOR: GREGÓRIO LUIS SÍLVA ARAÚJO
CO-ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: GDM-261/15

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2015

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

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DE PROPRIEDADES DE
GEOMEMBRANAS DE PVC DEVIDO A DANOS MECÂNICOS**

JAVIER RICARDO AMARILLO SOTO

**DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil da
Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Mestre.**

APROVADA POR:

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

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

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, Ph.D. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PAULO CÉSAR DE ALMEIDA MAIA, D.Sc. (UENF)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 18 DE DEZEMBRO DE 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

AMARILLO SOTO, JAVIER RICARDO

Estudo da variação de propriedades de geomembranas de PVC devido a danos mecânicos [Distrito Federal] 2015

xxiii, 147 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2015)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Geossintéticos

2. Geomembrana

3. Dano mecânico

4. Análise Estatística

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMARILLO SOTO, J. (2015). Estudo da variação de propriedades de geomembranas de PVC devido a danos mecânicos. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM-261/15, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 147 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Javier Ricardo Amarillo Soto

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Variação da resistência à tração em geomembranas após submetidas a dano mecânico.

GRAU / ANO: Mestre / 2015

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.

Javier Ricardo Amarillo Soto

javieramarillo@ingenieros.com

Calle 8 #9-02 Barrio Suarez

Tunja, Boyacá, Colombia

A Dios que me brindó todo lo que tengo en la vida. A mi familia, mis padres Marcos Amarillo y Martha Soto quienes con su ejemplo y dedicación me han mostrado el camino y la confianza para seguir en él. A mi hermano Daniel Amarillo quién siempre ha estado pendiente de cada proyecto. Mis abuelos Ricardo Soto, Nohemy Murcia, Jorge Amarillo y Mercedes Vaca quienes me brindaron su bendición y guía desde mi hogar y el cielo. A mi novia Ximena Sanabria quién con su paciencia y consejo me ha apoyado en esta etapa de mi vida. Todos ellos que supieron brindarme la motivación, cariño y apoyo para emprender cada sueño y meta trazada en mi vida.

AGRADECIMENTOS

É sabido por todos aqueles que realizam um trabalho de dissertação, e ainda mais na parte experimental, que o mesmo exige paciência, dedicação, tempo e ajuda. A ajuda de pessoas que com seu conhecimento e apoio fizeram possível a realização deste trabalho e, essencialmente, acrescentaram meu conhecimento e tornaram-me uma melhor pessoa e estudante. Primeiramente eu agradeço a Deus que com sua benção e guia, me brindou um bom lar, pais maravilhosos e amigos incríveis, e é claro a oportunidade de realizar este estudo nesta universidade tão importante;

Ao professor Gregório Luís Silva Araújo, meu orientador, quem com seu conhecimento, confiança depositada em mim e vontade de me orientar pelo caminho certo no meu trabalho.

Também agradeço ao senhor pela paciência para me explicar e guiar nas minhas dúvidas;

Ao professor Ennio Marques Palmeira pela ajuda no trabalho com seu conhecimento e dicas.

Admiração e respeito ao senhor um exemplo de dedicação e amor pela profissão;

A minha família, motor e guia neste caminho que me brindaram força para continuar nele. A meu pai Marcos e minha mãe Martha pelo seu apoio e conselhos nesta etapa da minha vida, que sem eles não seria possível chegar até aqui. Ao meu irmão Daniel quem sempre me brindou seu apoio e palavras com força para não desistir;

A minha tia Reina e avó Nohemy por serem minhas segundas mães sempre estiveram em todo momento. Também aos meus primos Hernando e Julio Cesar irmãos e amigos, grato de ter vocês na minha vida;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pelos conhecimentos fornecidos e a vontade no esclarecimento de dúvidas, em especial ao professor André Assis;

Ao senhor Arthur do laboratório da Engenharia Mecânica, pela ajuda na construção de algumas peças para os ensaios;

Aos técnicos do laboratório da Geotecnia Thiago, Simon e Jonas pela ajuda para resolver alguns problemas que se apresentaram na realização dos ensaios;

Ao professor Oscar Ramirez da “Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia”, quem sempre me motivou a seguir meus estudos na Geotecnia e a investigação na mesma;

À Heydy Trejos quem me brindou ajuda não só com seu conhecimento mais também com seus conselhos e escuta ao longo deste último ano, agradeço a Deus poder te conhecer, meu respeito e admiração a um excelente profissional e pessoa;

Aos meus colegas de turma Carlos Moreno, Johnny Múnera, Jogério Freitas, Juan Joya, Leticia Morais, Gabriela Duboc e em especial ao Jader Ruiz a quem tenho que dizer que foi um prazer

conhecer um amigo, um colega e pessoa tão experta e disposta a ajudar não só com seu conhecimento grato de ter sua amizade;

Aos amigos da Colômbia do colégio e universidade Gustavo Barrera, Alejandro Adame e Jaime Suárez que sem vocês a vida não teria graça, a amizade que temos se tornou em irmandade sempre brindando apoio e conselhos para seguir em frente. Aqui agradeço de maneira especial ao Jaime amigo de aventura nestes dois anos de estudos;

Ao senhor Mario Suárez e à senhora Rosalba por ser como meus segundos pais neste tempo; A Cristina Martinez e o Freddy Burgos por aqueles momentos de risadas e conselhos para seguir em frente;

Aos meus colegas de Universidade Carol Sanabria, Cindy Molano, Luis Cely por me ensinar com seu exemplo que as metas são possíveis, em especial agradeço pela amizade ao Nairo Tarazona quem não só é um amigo mais também um irmão sempre prestes ajudar a qualquer momento;

A Sandra Buitrago, Monica Prieto e Diana Cárdenas pelas ligações neste tempo fora de casa;

A minha prima Vilma Amarillo quem me brindou sua ajuda no começo destes dois anos e tornou mais fáceis, ao Antonio, a Sonia orduz e Maria de los Angeles por me receber na sua casa e me fazer sentir como na minha;

Ao Jaime Obando e a Ivonne Alejandra por brinda-me sua amizade, pela ajuda ao longo destes dois anos no presente trabalho;

A minha namorada Ximena Sanabria pelo apoio, paciência e conselhos nestes dois anos de estudos, agradeço de ter você na minha vida fornecendo-me força e ensinando com exemplo que as metas são possíveis de conseguir com disciplina e constância;

À Sansuy e Vulcano pelo fornecimento das amostras de geomembrana sem custo algum;

À Universidade de Brasília (UnB) e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia pela oportunidade de realizar este estudo em tão importante instituição e haver virado minha segunda casa;

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

RESUMO

Devido à presença de substâncias tóxicas em alguns rejeitos de mineração é importante a impermeabilização do solo de fundação, para qual é comum a utilização de materiais naturais ou artificiais como é o caso das geomembranas. A presente pesquisa procura avaliar a integridade do material artificial impermeabilizante, neste caso uma geomembrana de PVC, com respeito à propriedade da resistência à tração devido à aplicação de cargas fornecidas pelo material acima, visando estabelecer a influência do possível dano mecânico proveniente da camada de drenagem sobre a resistência da geomembrana. Foram realizados ensaios de dano por compressão sobre geomembranas de PVC com espessura de 1 mm, a tensões de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa (24 amostras por tensão). Para isso, foi empregado um equipamento de média escala de compressão vertical para dano. Após feitos os ensaios de dano, foram realizados os ensaios de resistência à tração. No total, foram realizados 130 ensaios que compreendem as geomembranas danificadas e as geomembranas virgens, sendo a média destas últimas considerada a medida de referência.

Com os resultados obtidos foi então realizada uma análise estatística que visou determinar se a variação obtida era alta ou não. A metodologia empregada foi baseada na determinação de um intervalo de confiança usando a distribuição “t” de *Student*. Se o valor se encontrava dentro deste intervalo não havia variação estatística e, portanto, seu fator de redução seria igual a 1. Caso contrário, o valor do fator de redução era obtido entre a divisão do valor médio da resistência da geomembrana virgem e o valor médio da resistência da geomembrana danificada. Este mesmo procedimento foi realizado para outras propriedades tais como o alongamento e rigidez secante a 5 e a 10 de deformação.

Baseando-se nos resultados obtidos, foi encontrado que, para a configuração utilizada, não existiu uma redução na resistência à tração da geomembrana danificada para alguns valores de tensão aplicados. Por sua vez, o valor do alongamento apresentou uma diminuição com o aumento da tensão aplicada no ensaio de dano. Foram também analisados os resultados obtidos para rigidez secante e observou-se que houve um aumento nos seus valores.

ABSTRACT

The presence of toxic substances in some mining tailings makes the foundation sealing an important property. For this, it is common the use of compacted natural soil or artificial materials such as the geomembranes

This study aims to evaluate the integrity of the waterproofing artificial material, in this case a PVC geomembrane, with respect to the property of tensile strength after the application of loads related to tailing material above it in order to determine the influence of mechanical damage on the strength of the geomembrane. Compression damage tests were performed in 120 samples of PVC geomembrane with 1 mm thickness applying pressures of 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 500 kPa and 1000 kPa (24 samples per pressure). For this, a medium scale equipment was used. After the damage tests tensile strength tests were performed. A total number of 130 trials were performed including damaged and virgin geomembranes and the average of the last was considered as standard value. The obtained results were analysed using a statistical analysis aiming to determine whether the obtained variation was significant or not. The methodology was based on the determination of a confidence interval using the Student's "t" distribution. If the value was within this range, there was no significant variation and therefore its reduction factor is equal to one. Otherwise, the value of the reduction factor was obtained from the division of the average strength of the virgin geomembrane and the average value strength of the geomembrane after the damage test. This same procedure was performed for other properties such as elongation and secant stiffness at 5% and 10% deformation.

Based on the results obtained, it was observed that for the used configuration there has been no reduction in tensile strength of the damaged geomembrane for some applied pressures. The value of the elongation showed a decrease with increasing applied pressure on the damage test. It was also analyzed the results obtained of the secant stiffness modulus and it was observed that there was an increase in their values.

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2.	OBJETIVOS.....	2
1.2.1.	OBJETIVO GERAL.....	2
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	A ATIVIDADE DE MINERAÇÃO.....	4
2.1.1.	CARACTERÍSTICAS DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	6
2.1.2.	SITUAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITOS NO BRASIL.....	6
2.1.3.	PROTEÇÃO DO FUNDO DA BARRAGEM DE REJEITO.....	7
2.2.	GEOMEMBRANAS.....	10
2.2.1.	USOS DAS GEOMEMBRANAS.....	11
2.3.	ESTATÍSTICA.....	41
2.3.1.	ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	41
2.3.2.	TESTE DE HIPÓTESE.....	41
3.	METODOLOGIA: EQUIPAMENTO, MATERIAIS, MÉTODOS DE ENSAIO E ANÁLISE.....	43
3.1	INTRODUÇÃO.....	43
3.2.	EQUIPAMENTO DE DANO MECÂNICO DE MÉDIA ESCALA.....	43
3.2.1.	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA.....	44
3.3.	MATERIAIS EMPREGADOS.....	48
3.3.1.	GEOMEMBRANA.....	48
3.3.2.	MATERIAL GRANULAR.....	49
3.3.3.	OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS.....	52
3.4.	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	52

3.4.1.	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	52
3.4.2.	MONTAGEM DO ENSAIO DE DANO NO EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA	53
3.4.3.	PROCEDIMENTO DA PESQUISA.....	55
3.4.4.	INSPEÇÃO VISUAL DOS DANOS SOFRIDOS NO ENSAIO	57
3.4.5.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	58
3.4.6.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	60
4.	RESULTADOS E ANÁLISE	64
4.1.	INTRODUÇÃO	64
4.2.	ENSAIO DE DANO EM EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA.....	64
4.2.1.	VARIAÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA E DEFORMAÇÃO.....	64
4.2.2.	VARIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS GRANULARES	76
4.2.3.	COMPARAÇÃO ENTRE DEFORMAÇÕES E GRANULOMETRIAS DAS DIFERENTES TENSÕES.....	87
4.3.	INSPEÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS APÓS ENSAIO DE DANO	88
4.4.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM FAIXA LARGA.	91
4.4.1.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA E ANÁLISE PARA GEOMEMBRANAS VIRGENS	91
4.4.2.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ANÁLISE PARA GEOMEMBRANAS DANIFICADAS: RESISTÊNCIA	97
4.4.3.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ANÁLISE PARA GEOMEMBRANAS DANIFICADAS: ALONGAMENTO.	104
4.4.4.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ANÁLISE PARA GEOMEMBRANAS DANIFICADAS: MÓDULO SECANTE	110
4.5.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, DO ALONGAMENTO E DO MÓDULO SECANTE... ..	119
4.5.1.	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A RESISTÊNCIA MÁXIMA	120

4.5.2.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PORCENTAGEM DE ALONGAMENTO	122
4.5.3.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÓDULO SECANTE A 5% DE DEFORMAÇÃO	124
4.5.4.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÓDULO SECANTE A 10%	126
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	130
5.1.	CONCLUSÕES	130
5.2.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	132
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
7.	APÊNDICES	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Polímeros mais comuns na impermeabilização do fundo das barragens	8
Tabela 2.2. Recomendações sobre espessuras de geomembrana para sobrevivência na instalação (Palmeira, 2011).	9
Tabela 2.3. Densidade de geomembranas fabricadas no Brasil (Bueno & Vilar, 2004).	13
Tabela 2.4. Paramêtros usados nos ensaios de simulações no laboratório (modificado de Reddy <i>et al.</i> , 1998).	34
Tabela 3.1. Alturas de barragens simuladas no ensaio de dano sobre geomembrana.	44
Tabela 3.2. Especificações técnicas da geomembrana de PVC.	49
Tabela 3.3. Características da brita 3.	50
Tabela 3.4. Característica da areia grossa.	50
Tabela 3.5. Identificação das amostras.	57
Tabela 4.1. Características estatísticas da variação da deformação para tensão de 100 kPa. ..	66
Tabela 4.2. Características estatísticas da variação da deformação para uma tensão de 200 kPa.	68
Tabela 4.3. Características estatísticas da variação da deformação para uma tensão de 300 kPa.	69
Tabela 4.4. Características estatísticas da variação da deformação para uma tensão de 500 kPa.	71
Tabela 4.5. Características estatísticas da variação da deformação para uma tensão de 1000 kPa.	73
Tabela 4.6. Resumo das deformações médias obtidas no ensaio de dano a tensões de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa.	76
Tabela 4.7. Resumo dos resultados da granulometria da areia feita antes e após dos ensaios de dano de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa.	77
Tabela 4.8. Estatística descritiva dos resultados para ensaios em geomembranas virgens de PVC.	93
Tabela 4.9. Estatística descritiva para o alongamento no ensaio de resistência à tração em geomembrana de PVC virgens.	94
Tabela 4.10. Estatística descritiva para os resultados do módulo secante a 5% da geomembrana de PVC virgem (kN/m).	95
Tabela 4.11. Estatística descritiva para os resultados do módulo secante a 10% da geomembrana de PVC virgem (kN/m).	96

Tabela 4.12. Estatística descritiva dos dados do ensaio de resistência à tração para geomembrana de PVC após ensaio de dano a 100 kPa (kN/m).	98
Tabela 4.13. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa (kN/m).	99
Tabela 4.14. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa (kN/m).	100
Tabela 4.15. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa (kN/m).	101
Tabela 4.16. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa (kN/m).	102
Tabela 4.17 Resumo valores médios das resistências obtidas para as geomembranas virgens, após 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa, unidades em kN/m.....	103
Tabela 4.18. Estatística descritiva dos resultados de alongamento em geomembranas de PVC após aplicação da tensão de 100 kPa.....	104
Tabela 4.19 Estatística descritiva dos resultados do ensaio de alongamento em geomembranas de PVC após aplicação da tensão de 200 kPa.	105
Tabela 4.20. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de alongamento em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, alongamento.	107
Tabela 4.21. Estatística descritiva dos resultados de em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 300 kPa.	108
Tabela 4.22. Estatística descritiva dos resultados de alongamento em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 1000 kPa.	109
Tabela 4.23. Estatística descritiva dos resultados do módulo secante $J_{sec5\%}$ a partir do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 100 kPa, (kN/m).	110
Tabela 4.24. Estatística descritiva dos resultados do módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m) a partir do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após aplicação de tensão de 100 kPa.	111
Tabela 4.25. Estatística descritiva dos resultados de módulo secante $J_{sec5\%}$ (kN/m) a partir do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 200 kPa.	112
Tabela 4.26. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 200 kPa, módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m).	113

Tabela 4.27. Estatística descritiva dos resultados de módulo secante $J_{sec5\%}$ (kN/m) a partir do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 300 kPa.....	114
Tabela 4.28. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m).	115
Tabela 4.29. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, módulo secante $J_{sec5\%}$ (kN/m).	116
Tabela 4.30. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m).	116
Tabela 4.31. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa, módulo secante $J_{sec5\%}$ (kN/m).	118
Tabela 4.32. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa, módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m).	118
Tabela 4.33. Dados base para o cálculo do intervalo de confiança (μ) para a geomembrana de PVC virgem com resistência média de 7,6 kN/m.	120
Tabela 4.34. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança e fator de redução (F.R.). Unidades em kN/m.	120
Tabela 4.35. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança entre tensões para resistência (Está=encontra-se dentro do intervalo; Não= encontra-se fora do intervalo de confiança).	121
Tabela 4.36. Dados base para o cálculo do intervalo de confiança (μ) para a geomembrana de PVC virgem com percentagem média de alongamento de 285,6%.	122
Tabela 4.37. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança e fator de redução (F.R.), percentagem de alongamento. Unidades em %	122
Tabela 4.38. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança entre tensões para alongamento (Está=encontra-se dentro do intervalo; Não= encontra-se fora do intervalo de confiança).	123
Tabela 4.39. Dados base dos valores de deformação secante a 5% para o cálculo do intervalo de confiança (μ) para a geomembrana de PVC virgem.	124
Tabela 4.40. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança e fator de redução (F.R.) dos valores de deformação secante a 5%.	124

Tabela 4.41. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança entre tensões para módulo secante a 5% (Está=encontra-se dentro do intervalo; Não= encontra-se fora do intervalo de confiança).	125
Tabela 4.42. Dados base para o cálculo do intervalo de confiança (μ) para a geomembrana de PVC virgem.....	126
Tabela 4.43. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança e Fator de Redução (F.R.).	126
Tabela 4.44 Determinação da presença dentro do intervalo de confiança entre tensões para módulo secante a 10% (Está=encontra-se dentro do intervalo; Não= encontra-se fora do intervalo de confiança).	127
Tabela 4.45 Resumo dos resultados obtidos na análise para o parâmetro de resistência à tração.	128
Tabela 4.46 Resumo dos resultados obtidos na análise para o parâmetro de alongamento... ..	128
Tabela 4.47 Resumo dos resultados obtidos na análise para o parâmetro do Módulo secante 5%.	128
Tabela 4.48 Resumo dos resultados obtidos na análise para o parâmetro do Módulo secante 10%.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Índice de Produção Mineral (IPM) do 2º/2011 ao 2º/2014 (DNPM/DIPLAM, 2015).	4
Figura 2.2. Índice de Produção Mineral (IPM) no 2º/2014. Base de comparação: mesmo mês do ano anterior (DNPM/DIPLAM, 2015).	5
Figura 2.3. Índice de Produção Mineral (IPM) 2º/2014. Base de comparação: mês anterior (DNPM/DIPLAM, 2015).	5
Figura 2.4. Barragens de rejeito no Brasil ano 2014 (DNPM, 2014).	6
Figura 2.5. Histograma de frequência das alturas das barragens no Brasil em 2013, (a) Barragens de Ouro, (b) Barragens de Ferro.	7
Figura 2.6. Configurações de Barreiras Impermeáveis para o Fundo da Barragem (Bueno <i>et al.</i> , 2004).	9
Figura 2.7. Geomembranas texturada (esquerda) e lisa (direita) (<i>Plásticos Agrícolas y Geomembranas S.A.C.</i>)	10
Figura 2.8. Variação da resistência a tração das geomembranas, a) com as dimensões da tira, b) relação largura-comprimento, c) com a taxa de deformação e d) com a temperatura (Palmeira, 2003).	15
Figura 2.9. Formatos dos corpos de prova para ensaios de rasgo em geomembranas (Palmeira, 2003).	16
Figura 2.10. Danos mecânicos em geomembranas (Geroto, 2008).	18
Figura 2.11. Fotografia amostra de geomembrana depois de ensaiada (a) Superfície superior da geomembrana e (b) superfície inferior da geomembrana (Brachman <i>et al.</i> , 2011).	19
Figura 2.12. Contatos da brita atuando sobre a geomembrana, quando submetida a 500 kPa de tensão: a) geomembrana de PVC-1,0 mm de espessura; b) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura (Ruiz-Gómez, 2014).	20
Figura 2.13. Resultados dos ensaios de tração GM PVC do fabricante C, deformação específica (%) (Gardoni, 2015).	22
Figura 2.14. Resultados de tração para geomembranas de PEAD, módulo de elasticidade (MPa) (Santos, 2014).	23
Figura 2.15. Resultado dos ensaios de tração para PVC – Fabricante B, módulo de elasticidade (MPa) (Santos, 2014).	24
Figura 2.16. Resultado dos ensaios de tração para PVC – Fabricante C, módulo de elasticidade (MPa) (Santos, 2014).	24

Figura 2.17. Resultado dos ensaios de tração para PVC – Fabricante D. módulo de elasticidade (MPa) (Santos, 2014).	25
Figura 2.18. Resultados do ensaio de tração multidirecional onde mostra-se a influência do tamanho da amostra em: (a) Tensão à tração no estouro, (b) Alongamento no estouro (modificado de Reddy <i>et al.</i> ,1996).....	28
Figura 2.19. Resultados dos ensaios de tração multidirecional mostra-se: (a) resistência média à tração no estouro, (b) alongamento médio no estouro (modificado de Reddy <i>et al.</i> , 1996). 29	
Figura 2.20. Tensão média no ponto de Fluência no ensaio de Resistência à tração em faixa larga ASTM D4885. (Modificado de Reddy <i>et al.</i> , 1996)	30
Figura 2.21. Resultados da deformação média no ponto de fluência no ensaio de resistência à tração em faixa larga (modificado de Reddy <i>et al.</i> , 1996)	30
Figura 2.22. Módulo Secante médio a 10% (modificado de Reddy <i>et al.</i> , 1996).	30
Figura 2.23. Valor da tensão média na ruptura no ensaio de resistência à tração em faixa larga (modificado de Reddy <i>et al.</i> , 1996).....	31
Figura 2.24. Equipamento utilizado para simular condições de carga sobre um revestimento de geomembrana (modificado de Reddy <i>et al.</i> , 1998)	33
Figura 2.25. Resultados Ensaio do ensaio de resistência à tração: (a) Resistência à tração, (b) Deformação no ponto de fluência (Modificado Reddy <i>et al.</i> , 1998).....	35
Figura 2.26. Resultados Teste de resistência à tração em Faixa larga: (a) Tensão na ruptura, (b) Deformação na ruptura (Modificado Reddy <i>et al.</i> , 1998)	36
Figura 2.27. Resultados do Ensaio de Resistência á tração em faixa Larga com ou sem Geotêxtil, (a) Relação entre granulometria do solo de cobertura vs tensão na ruptura, (b) Relação entre granulometria do solo de cobertura vs deformação na ruptura (Modificado Reddy <i>et al.</i> , 1998).	37
Figura 2.28. Danos mecânicos em geomembrana com proteção de geotêxtil de 1200 g/m ² (duas camadas de 600g/m ² cada uma) sob carga de 900 kPa aplicada durante 720min. (Tognon <i>et al.</i> , 2000).....	37
Figura 2.29. Ruptura em geomembranas: (a) por rasgo em geomembrana de PVC, (b) por puncionamento em geomembrana de PEAD (Geroto, 2008).....	40
Figura 3.1. Equipamento de dano por compressão vertical.	44
Figura 3.2. Célula de ensaio (a) Equipamento completo, (b) Tampa da célula de ensaio, (c) Caixas metálicas receptoras do material granular.	45
Figura 3.3. Tampa do equipamento com detalhe dos sistemas de controle do fluxo e da tensão.	46

Figura 3.4. Esquema do equipamento (a) Célula de ensaio com a configuração usada e (b) Tampa do equipamento perspectiva inferior e transversal.	46
Figura 3.5. Sistema ar-água (a) Elemento no laboratório, (b) Desenho do sistema (em mm).	47
Figura 3.6. Manômetros para o controle da tensão (a) Manômetro regulador da tensão fornecida ao ensaio, (b) Manômetro de controle da tensão no equipamento do ensaio.	48
Figura 3.7. Extensômetro utilizado para o controle do deslocamento da tampa.	48
Figura 3.8. Material Granular: (a) Areia grossa, (b) Brita 3.	49
Figura 3.9. Granulometria da brita 3 e da areia grossa usada no ensaio de dano.	51
Figura 3.10. Granulometria e tamanho de grão usado para a areia. (a) Areia usada no ensaio de dano, (b) Detalhe da areia usada no ensaio de dano.	51
Figura 3.11. Material complementar utilizado nos ensaios: (a) Geomembrana de PVC, (b) Borracha natural, (c) Cola vedante, (d) Geotêxtil de Poliéster.	52
Figura 3.12. Amostra obtida do rolo de geomembrana e pronta para o ensaio de dano.	53
Figura 3.13. Processo de montagem do ensaio de dano: (a) Colocação da vaselina e filme plástico, (b) Preenchimento da caixa inferior com areia, (c) Colocação da geomembrana, (d) Fixação da caixa superior, (e) Preenchimento da caixa superior com brita, (f) Colocação da tampa e fechamento do equipamento.	54
Figura 3.14. Vista transversal do ensaio.	54
Figura 3.15. Procedimento aplicado na pesquisa	55
Figura 3.16. Inspeção visual da geomembrana: (a) Após retirada a carga e camada de drenagem e (b) Antes do armazenamento.	57
Figura 3.17. Preparação amostra para o ensaio de resistência à tração: (a) amostra após o ensaio de dano, (b) Amostra preparada para o ensaio de tração com a faixa central desenhada.	59
Figura 3.18. Equipamento para o ensaio de resistência à tração.	59
Figura 3.19. Seqüência do ensaio de resistência à tração: (a) Montagem da amostra, (b) Início do ensaio, (c) Durante o ensaio, (d) Ruptura da geomembrana no ensaio.	60
Figura 3.20 Metodologia da análise estatística feita na pesquisa.	63
Figura 4.1. Variação do nível de água para a tensão de 100 kPa, ensaios 1 a 12.	65
Figura 4.2. Variação do nível de água para a tensão de 100 kPa, ensaios 13 a 24.	65
Figura 4.3. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 100 kPa.	66
Figura 4.4. Variação do nível de água para a tensão de 200 kPa, ensaios 1 até 12.	67
Figura 4.5. Variação do nível de água para a tensão de 200 kPa, ensaios 13 até 25.	67
Figura 4.6. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 200 kPa.	68
Figura 4.7. Variação do nível de água para a tensão de 300 kPa, ensaios 1 até 12.	69

Figura 4.8. Variação do nível de água para a tensão de 300 kPa, ensaios 13 até 24.....	70
Figura 4.9. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 300 kPa.	70
Figura 4.10. Variação do nível de água para a tensão de 500 kPa, ensaios 1 até 12.....	71
Figura 4.11. Variação do nível de água para a tensão de 500 kPa, ensaios 13 até 24.....	72
Figura 4.12. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 500 kPa.	72
Figura 4.13. Variação do nível de água para a tensão de 1000 kPa, ensaios 1 até 12.....	73
Figura 4.14 Variação do nível de água para a tensão de 1000 kPa, ensaios 13 até 24.....	74
Figura 4.15. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 1000 kPa.	75
Figura 4.16. Valor da deformação média obtido nos ensaios de dano para as tensões de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa.	75
Figura 4.17. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 100 kPa.....	78
Figura 4.18 Quebra de grãos após o ensaio de dano tensão de 100 kPa.	78
Figura 4.19. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) peneira #30 e (c) peneira #60.	79
Figura 4.20. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 200 kPa.....	80
Figura 4.21. Quebra de arestas e da brita durante o ensaio a uma tensão de 200 kPa.	80
Figura 4.22. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) passa peneira #10.	81
Figura 4.23. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 300 kPa.....	82
Figura 4.24. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) peneira #30 e (c) peneira #60.	82
Figura 4.25. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 500 kPa.....	83
Figura 4.26. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) peneira #30 e (c) peneira #60.	84
Figura 4.27. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 1000 kPa.....	85
Figura 4.28. Quebra de grãos característica para uma tensão de 1000 kPa.	85
Figura 4.29. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) peneira #30 e (c) peneira #60.	86
Figura 4.30. Variação do Cu, Cc, e D ₅₀ com a tensão aplicada.	86

Figura 4.31. Tendência da variação da deformação e índice de quebra de grãos (B_g) nos ensaios de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa.	87
Figura 4.32. Deformação vs índice de quebra de grãos.	88
Figura 4.33. Danos em geomembranas com zoom 50x: (a) Geomembrana, (b) Tensão de 100kPa e (c) Tensão de 200 kPa.	89
Figura 4.34. Danos em geomembranas com zoom 50x: (a) Tensão de 300kPa, (b) Tensão de 500kPa e (c) Tensão de 1000kPa.	90
Figura 4.35. Ruptura da geomembrana pela garra (a) Geomembrana danificada, (b) Geomembrana Virgem.	92
Figura 4.36. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas virgens de PVC de 1 mm de espessura.	92
Figura 4.37. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC virgens.	93
Figura 4.38. Distribuição de frequência para o alongamento do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC virgens.	95
Figura 4.39. Distribuição de frequência para o módulo secante ao 5% da geomembrana de PVC virgem.....	96
Figura 4.40. Distribuição de frequência para o módulo secante a 10% da geomembrana de PVC virgem.....	97
Figura 4.41. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 100 kPa.	98
Figura 4.42. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa.	100
Figura 4.43. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa.	100
Figura 4.44. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa.	101
Figura 4.45. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa.	103
Figura 4.46. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 100 kPa, alongamento.	105
Figura 4.47. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa, alongamento.	106

Figura 4.48. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, alongamento.	107
Figura 4.49. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, alongamento.	108
Figura 4.50. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após aplicada a tensão de 1000 kPa, alongamento.	109
Figura 4.51. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 100 kPa, módulo secante a 5%.	111
Figura 4.52. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 100 kPa, módulo secante a 10%.	112
Figura 4.53. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa, módulo secante a 5%.	113
Figura 4.54. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa, módulo secante a 10%.	114
Figura 4.55. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, módulo secante a 5%.	115
Figura 4.56. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, módulo secante a 10%.	115
Figura 4.57. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, módulo secante a 5%.	117
Figura 4.58. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, módulo secante a 10%.	117
Figura 4.59. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa, módulo secante a 5%.	119
Figura 4.60. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa, módulo secante a 10%.	119
Figura 4.61. Comportamento da Resistência à Tração e o Fator de Redução com a tensão..	121
Figura 4.62. Comportamento da percentagem média do alongamento e o fator de redução com a tensão.	123
Figura 4.63. Comportamento do módulo secante a 5% e o fator de redução com a tensão...	125
Figura 4.64. Comportamento do módulo secante a 10% e o fator de redução com a tensão.	127

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

IPM	.....Índice de Produção Mineral
%	.....Porcentagem
ABNT NBR	.....Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	.....American Society For Testing and Materials
BA	.....Estado de Bahia, Brasil
B _g	.....Índice de quebra de Grão de Marsal
CBR	.....California Bearing Ratio, Ensaio
CD	.....Cross-Machine Direction
cm	.....Centímetros, unidade de longitude
cm ³	.....Centímetros cúbicos, unidade de Volume
CPE	.....Polietileno Clorado
CSPE	.....Polietileno Color-sulfonado
CV	.....Coeficiente de Variação
D ₀	.....Alongamento Geomembrana Virgem
D _i	.....Alongamento Geomembrana Danificada
DIPLAM	.....Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento da Mineração
DNPM	.....Departamento Nacional de Produção Mineral
Emic	.....Empresa Fabricante da Prensa de Tração
EPDM	.....Elastômero de Dien-Propileno-Etileno
EVA	.....Co-Polímero de Etileno-Acetato de Vinila
\bar{F}_i	.....Resistência à tração da geomembrana danificada a uma tensão i
\bar{F}_0	.....Resistência à tração da geomembrana Virgem
fPP	.....Polipropileno flexível
FR	.....Fator de Redução
FST	.....Fissuramento sob Tensão
g	.....Gramas
GCL'S	.....Geocompostos argilosos
GM	.....Geomembrana
HDPE, PEAD	.....Polietileno de Alta Densidade
IF	.....Índice de Fluidez
ISO	.....International Standards Organization
Jsec10%	.....Módulo secante a 10%
Jsec5%	.....Módulo secante a 5%
kg	.....kilo gramas
kN	.....Kilo Newton
kPa	.....Kilo Pascais
LDPE	.....Polietileno de Baixa densidade
m	.....Metro, unidade de longitude
m ²	.....Metros quadrados, unidade de área
MD	.....Machine Direction
MDPE	.....Polietileno de media densidade

MI	.....	Melt Index
mm	.....	Milímetros, unidade de longitude
MPa	.....	Mega Pascais
n	.....	Número de amostras
PA	.....	Poliamida
PE-EPDM	.....	Polietileno-Elastômero de Dien-propileno-Etileno
PELBD	.....	Polietileno Linear de baixa densidade
PNSB	.....	Política Nacional de Segurança de Barragens
PVC	.....	Polivinil Clorido
s	.....	Segundos, unidade de Tempo
S	.....	Desvio Padrão
T	.....	Tensão
t	.....	Variável aleatória da distribuição de Student
t_{GT}	.....	Espessura do Geossintético
$T_{máx}$	.....	Tensão máxima
UHE	.....	Usina Hidro-Electrica
USEPA	.....	US Enviroment Protection Agency
VPM	.....	Valor da Produção Mineral
WVT	.....	Water Vapor Transmission Tests, permeabilidade a vapor de água
\bar{X}	.....	Média amostral
ϵ	.....	Alongamento
μ	.....	Média populacional

1. INTRODUÇÃO.

1.1. MOTIVAÇÃO.

Sendo a mineração uma atividade de grande importância econômica, que influencia o desenvolvimento econômico e social de alguns países, a qual também gera resíduos ou rejeitos que não representam nenhum tipo de lucro em quantidades consideráveis, que são dispostos em áreas cada vez de maiores dimensões, cria a necessidade de proteger o meio ambiente (solos e corpos d'água subterrâneos ou superficiais) onde são dispostos, o que faz a utilização de geossintéticos nesses tipos de obras uma boa alternativa que garante a proteção do meio e o adequado funcionamento dos sistemas de impermeabilização das obras.

Nesse contexto, e como toda obra geotécnica deve apresentar requisitos de qualidade, segurança e vida útil altos, proporcionais às exigências da sociedade é por isso deve-se evitar ou ao menos minimizar os danos e a deterioração das camadas de geossintéticos utilizadas em tais obras. Para manter a integridade da geomembrana são usadas camadas de areia de granulometria fina, argila ou mesmo outro geossintético tais como os geotêxteis tecidos e não tecidos.

Mesmo com a existência de proteção, Rebelo (2009) encontrou que, em alguns casos as geomembranas podem apresentar um dano mecânico nelas. Sob esse tipo de condições é provável que se tenha uma queda nas características próprias da geomembrana em especial da resistência à tração razão pela qual é preciso avaliar este parâmetro visando obter ou conhecer a queda no valor desta e assim garantir a qualidade e segurança do sistema de drenagem e da obra geotécnica envolvida.

1.2. OBJETIVOS.

1.2.1. OBJETIVO GERAL.

Esta dissertação tem como objetivo geral avaliar a variação na resistência à tração de geomembranas de PVC após da aplicação de diferentes níveis de tensão de confinamento e obter um fator de redução desta propriedade mecânica.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Como objetivos específicos, este trabalho apresenta os seguintes itens:

- Determinar a resistência à tração da geomembrana antes e após o dano.
- Determinar a variação da resistência à tração após sofrer danos com diferentes níveis de tensão de confinamento.
- Determinar o fator de redução da resistência à tração na geomembrana submetida a danos.
- Determinar o fator de redução para o alongamento e o módulo de rigidez secante a 5 e 10%.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. A seguir apresenta-se uma breve descrição dos conteúdos de cada capítulo.

- No capítulo I apresenta-se a motivação da pesquisa, os objetivos, e a estrutura da dissertação.
- O capítulo II contém a revisão bibliográfica a respeito do assunto que trata a dissertação, na qual estão explicitados os fundamentos teóricos e os trabalhos já realizados relacionados ao tema da pesquisa que serviram de base para seu direcionamento.
- No capítulo III encontram-se os equipamentos usados na realização dos ensaios de dano em geomembranas, os materiais utilizados e a montagem dos ensaios de dano mecânico. Além disso, apresenta-se uma descrição dos ensaios de tração em faixa larga e uma explicação da análise feita para a variação na resistência à tração na geomembrana.

- No capítulo IV são apresentados os resultados dos ensaios realizados assim como a análise estatística dos valores obtidos nesses ensaios.
- No capítulo V encontra-se as principais conclusões do presente trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1.A ATIVIDADE DE MINERAÇÃO.

A mineração é uma atividade de objetivo econômico feita por meio da exploração e extração de minerais uteis que se encontram nas rochas e solos em estado natural. O processo de exploração se dá por meio da lavra e etapa de beneficiamento do mineral. Essas atividades (lavra e beneficiamento) procuram satisfazer a qualidade que demanda o mercado consumidor. É claro que este tipo de atividade traz alterações ao local onde se faz a extração do mineral. Essas principais alterações ou problemas, segundo Farias (2002), podem ser divididos em quatro categorias: poluição d'água, poluição do ar, poluição sonora e subsidência do terreno.

Na América Latina, o Brasil devido a sua produção diversificada de minerais, encontra-se como o produtor de maior importância na região, além de ser o maior exportador de minerais do mundo. A produção mineral do Brasil em 2014 apresentou crescimento de 7,9% quando comparado com o 2013. Este acréscimo deu-se principalmente devido à produção de mineiro de ferro (Figura 2.1).

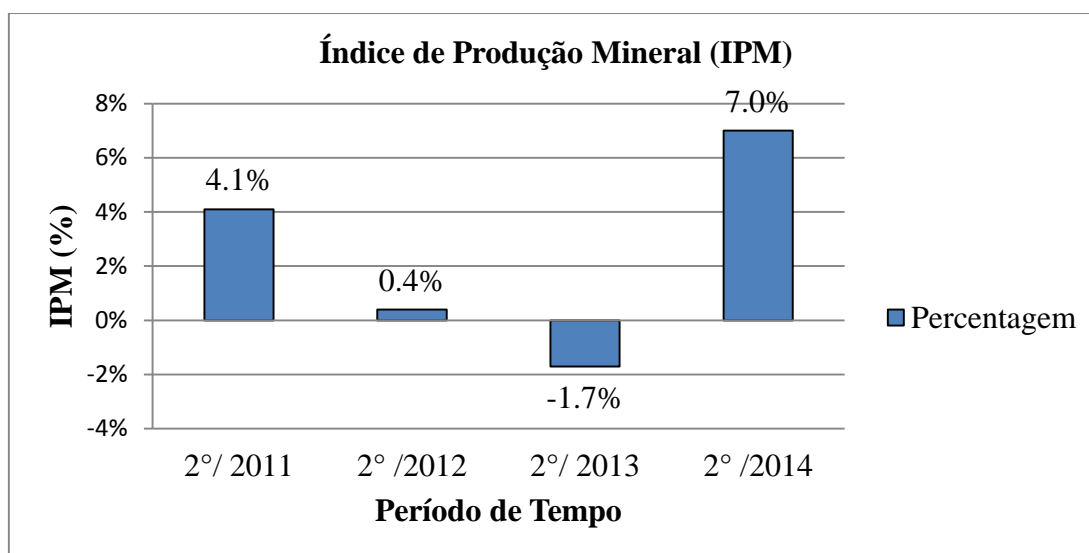


Figura 2.1. Índice de Produção Mineral (IPM) do 2º/2011 ao 2º/2014 (DNPM/DIPLAM, 2015).

Com base no mesmo ano, o segundo semestre apresentou um crescimento de 15,0% comparado com o primeiro semestre de 2014 (Figura 2.2 e Figura 2.3). A estimativa do Valor da Produção Mineral (VPM) para esse mesmo período de tempo foi de R\$48,4 bilhões (DNPM, 2014).

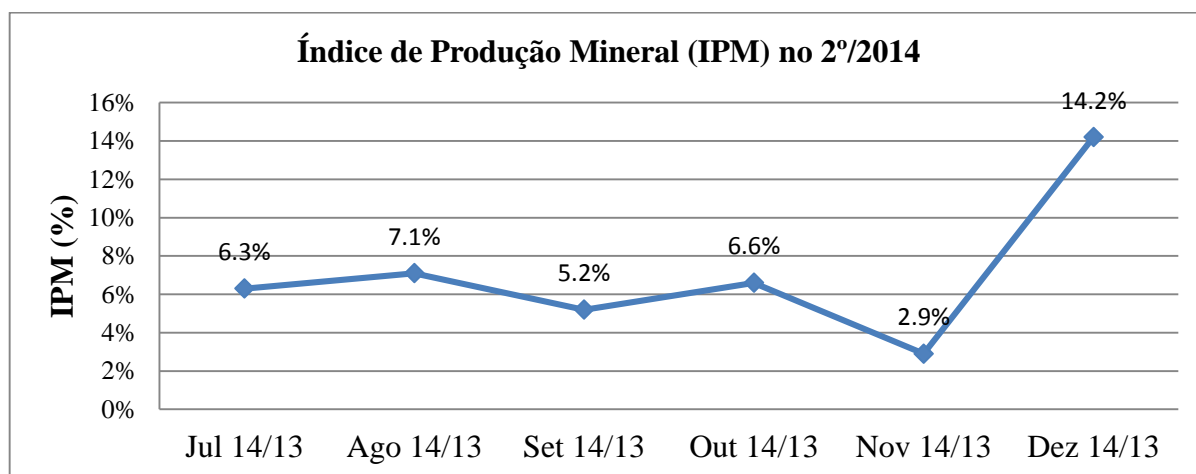


Figura 2.2. Índice de Produção Mineral (IPM) no 2º/2014. Base de comparação: mesmo mês do ano anterior (DNPM/DIPLAM, 2015).

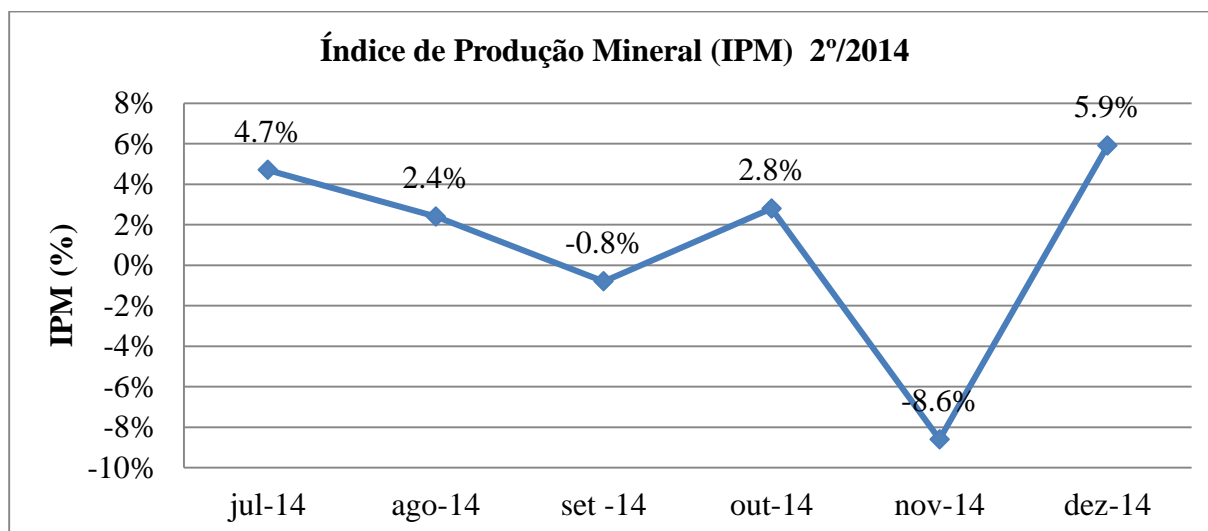


Figura 2.3. Índice de Produção Mineral (IPM) 2º/2014. Base de comparação: mês anterior (DNPM/DIPLAM, 2015).

As reservas do Brasil comparadas mundialmente são extremamente relevantes: o país é o primeiro em reservas de nióbio (98,1%) e barita (64,4%), e o segundo em elementos de terras raras (16,2%), tântalo (37,0%) e grafita natural (36,2%), além de possuir a terceira reserva

mundial de estanho (14%) e níquel (9,9%) e ser o quarto lugar em reservas de minério de ferro (11,7%) (DNPM, 2013).

2.1.1. CARACTERÍSTICAS DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO.

Para todo tipo de trabalho de engenharia é preciso conhecer as propriedades mecânicas e as características do material usado. Com relação aos rejeitos, eles dependem do tipo de processo de beneficiamento. Para o caso de minério de ferro e ouro, muitos autores concordam que eles possuem uma granulometria semelhante à areia na faixa de média a fina. É preciso ter claro que o comportamento dos rejeitos de mineração não é igual ao da areia, apenas aqui está sendo feita uma simples comparação entre as suas curvas granulométricas como disse Espósito (2000).

A densidade relativa dos rejeitos apresenta uma grande variabilidade devido a que se encontra influenciada por fatores tais como a falta de homogeneidade nas suas propriedades e à complexa disposição hidráulica dos mesmos rejeitos o que ocasiona diferenças nas distribuições das densidades e porosidades do material. Trabalhos relacionados com o assunto apresentam-se em Ribeiro (2000), Espósito (2000) e Ruiz-Gómez (2014).

2.1.2. SITUAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITOS NO BRASIL.

Atualmente no Brasil existem aproximadamente 389 barragens de rejeitos de mineração segundo o DNPM (2014), registradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), as quais se encontram classificadas por classes segundo o seu risco. Na Figura 2.4 são apresentadas as diferentes barragens com a classe à qual pertencem e sua localização geográfica.

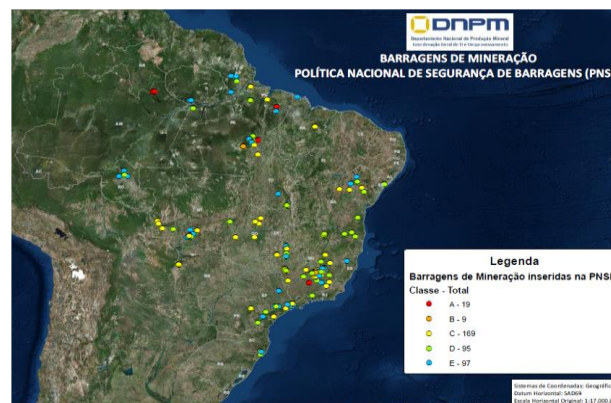
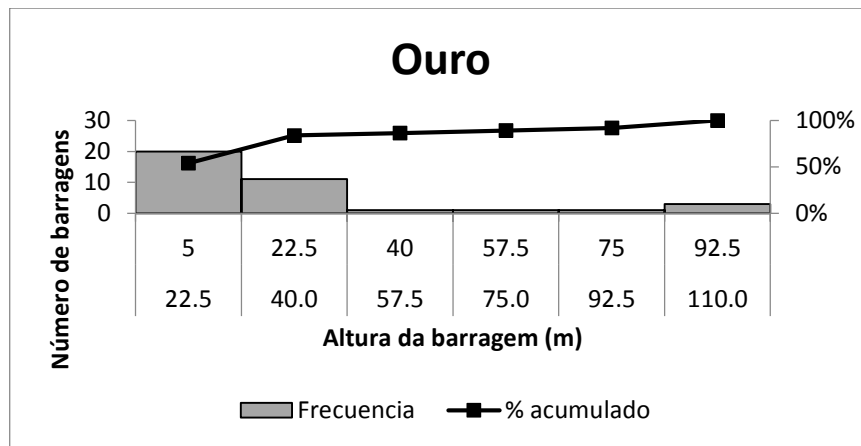
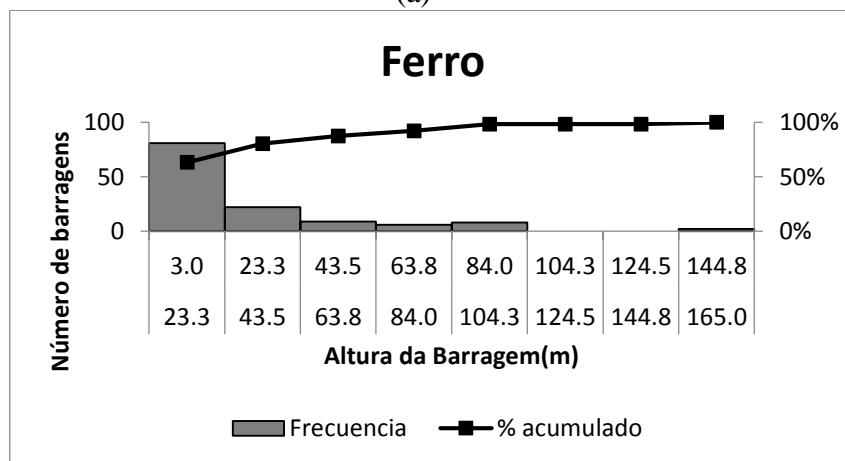


Figura 2.4. Barragens de rejeito no Brasil ano 2014 (DNPM, 2014).

No Brasil encontram-se barragens de rejeitos com alturas de até 63 metros. Barragens com maior altura pertencem à extração de minerais de ferro e ouro e apresentam-se em uma quantidade menor. A Figura 2.5 apresenta o histograma de frequência das diferentes barragens presentes no Brasil com respeito à sua altura, podendo-se observar o valor de altura máxima construída de 110 m para ouro e de 165 para ferro.



(a)



(b)

Figura 2.5. Histograma de frequência das alturas das barragens no Brasil em 2013, (a) Barragens de Ouro, (b) Barragens de Ferro.

2.1.3. PROTEÇÃO DO FUNDO DA BARRAGEM DE REJEITO.

O objetivo do revestimento do fundo da barragem é evitar a migração de líquidos provenientes ou gerados do beneficiamento e o transporte dos rejeitos e assim, o solo não apresentará nenhum tipo de contaminante na sua estrutura. O tipo de tratamento depende das condições econômicas, geológicas e geográficas do local de disposição dos rejeitos.

O sistema de revestimento contempla a execução de barreiras para o controle do fluxo na base e nas laterais da barragem, além de um sistema de drenagem que permita o adequado transporte do fluxo para o seu tratamento. A escolha de um tipo determinado de barreira é feita baseado nas características físico-químicas do fluxo e a vida útil do projeto (Daniel, 1993).

Como material empregado na impermeabilização, podem ser usadas barreiras de tipo natural, constituídas por solos argilosos compactados com permeabilidade da ordem de 10^{-6} a 10^{-7} cm/s (podendo ou não conter bentonita). A quantidade de material vai depender das características do projeto e a espessura da barreira pode variar de 0,6 m a 2 m, a qual pode ocupar um espaço considerável. Este tipo de barreira apresenta desvantagens, tais como *piping* (quando estão submetidas a altas concentrações de fluxo) e ressecamento ou recalques diferenciais que provocam trincamentos (Palmeira, 2011).

Por outro lado, como alternativa tem-se o uso de barreiras de tipo artificiais que são compostas por materiais poliméricos. Na Tabela 2.1 são apresentados os polímeros mais comuns. Os geossintéticos com maior uso como barreiras impermeabilizantes de fundo são as geomembranas e os geocompostos, os quais apresentam uma baixa condutividade hidráulica e elevadas resistências químicas e físicas e, no caso do geocompostos (GCL's), contém solos com bentonita (Geroto, 2008).

Tabela 2.1. Polímeros mais comuns na impermeabilização do fundo das barragens (Palmeira, 2011).

Tipo de Polímero	Mais Usados	
Polímeros Termoplásticos	Polivinil Clorido (PVC)	
	Poliétileno	Alta Densidade (PAD ou HDPE)
		Média Densidade (MDPE)
		Baixa Densidade (LDPE)
	Poliétileno Clorado (CPE)	
	Poliamida (PA)	
Polímeros Termofixados	Elastômero de Dieno-Propileno-Etileno (EPDM)	
	Co-Polímero de Etileno-Acetato de Vinila (EVA)	
	Butil	
Combinações	PE-EPDM	
	CPE com ligações cruzadas	
	Poliétileno Cloro-Sulfonado (CSPE)	

No caso das geomembranas, são as mãos usadas nesse tipo de obra de impermeabilização devido a sua facilidade de uso, controle de qualidade, pequena espessura (Tabela 2.2) e baixo coeficiente de permeabilidade (entre 10^{-10} a 10^{-13} cm/s).

Tabela 2.2. Recomendações sobre espessuras de geomembrana para sobrevivência na instalação (Palmeira, 2011).

INSTITUIÇÃO	ESPESSURA RECOMENDADA	APLICAÇÃO
US Bureau of Reclamation	$t_{GT} \geq 0,5$ mm	Canais.
US Environmental Protection Agency (USEPA)	$t_{GT} \geq 0,75$ mm	Disposição de resíduos perigosos.
Alemnha	$t_{GT} \geq 2,0$ mm	Disposição de resíduos Perigosos.

As primeiras configurações de barreiras apenas empregavam solos compactados de baixa permeabilidade. Posteriormente, as geomembranas passaram a ser usadas e, mais recentemente, os geocompostos argilosos. A variedade de materiais deu oportunidade a elementos antes usados muitas vezes isoladamente passaram ser combinados em diferentes configurações e arranjos, os quais dependem, em primeira aproximação, do tipo de rejeito, se é inerte ou ativo (Bueno, 2004).

A Figura 2.6 apresenta diferentes configurações para a proteção e impermeabilização do fundo de uma barragem de rejeitos.

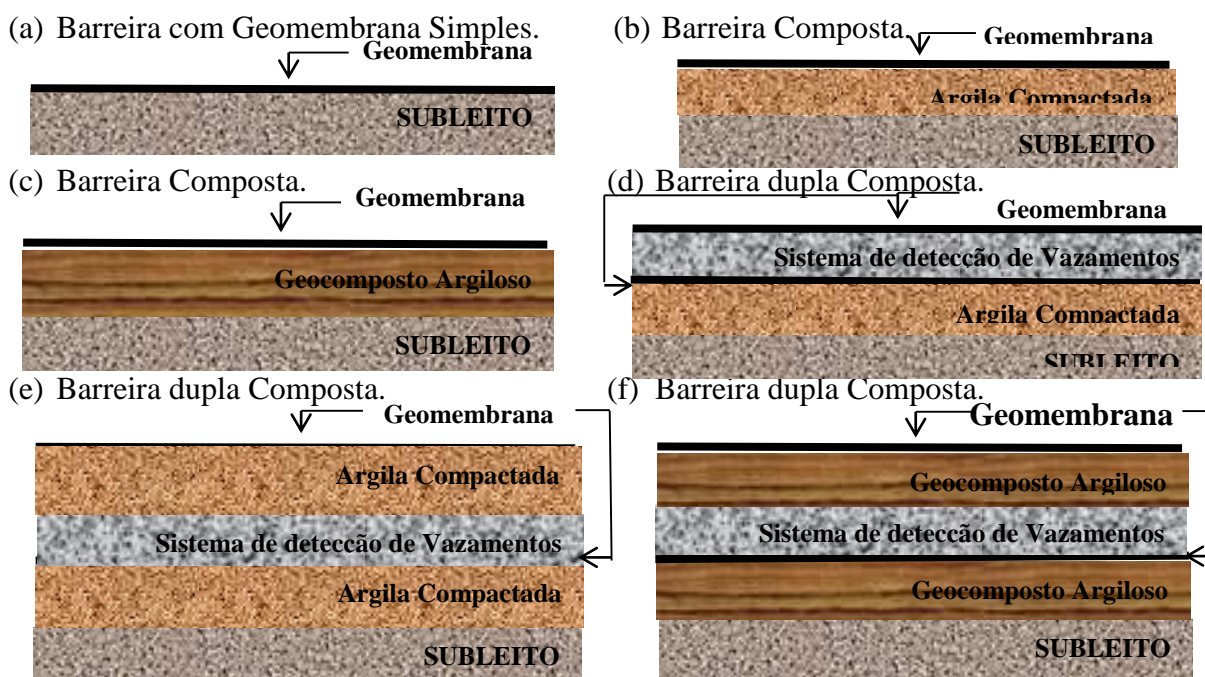


Figura 2.6. Configurações de Barreiras Impermeáveis para o Fundo da Barragem (Bueno *et al.*, 2004).

2.2. GEOMEMBRANAS.

Aguiar & Vertematti (2004) definem as geomembranas como um produto bidimensional de baixíssima permeabilidade, composto predominante por materiais termoplásticos, elastômeros e asfálticos, utilizado para controle de fluxo e separação. Ela se chama de reforçada, quando tem armadura de reforço incorporada, formando um conjunto monolítico e de texturada quando tem acabamento superficial, com o fim de aumentar as características de atrito de interface. Na Figura 2.7 são apresentadas as geomembranas texturada e lisa.



Figura 2.7. Geomembranas texturada (esquerda) e lisa (direita) (*Plásticos Agrícolas y Geomembranas S.A.C.*)

A fabricação das geomembranas começa com a produção da matéria prima, a qual inclui a resina do próprio polímero. Vários aditivos como antioxidantes, plastificantes, lubrificantes são usados na transformação dos polímeros em materiais geossintéticos. Essas matérias primas são processadas em folhas de geomembranas de diferentes larguras e espessuras, por meio de três diferentes processos: extrusão, calandragem e espalhamento.

Geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno linear de baixa densidade (PELBD) e polipropileno flexível (fPP) são fabricadas por extrusão. Geomembranas de PVC e geomembranas reforçadas são produzidas por meio de calandragem. No processo de espalhamento também é possível produzir geomembranas reforçadas. Os processos de fabricação são explicados mais detalhadamente em Koerner (2005).

2.2.1. USOS DAS GEOMEMBRANAS

Uma ampla variedade de aplicações das geomembranas tem sido desenvolvida, todas relacionadas com a sua função principal: impermeabilização. É sabido que nada é estritamente impermeável em um sentido absoluto. É por isso que se fala de uma impermeabilidade relativa comparada com outros materiais concorrentes, tais como a argila natural, usada também como elemento impermeabilizante e confinante de resíduos sólidos e/ou líquidos (Koerner, 2005).

Atualmente, as geomembranas são amplamente empregadas em diversas obras ambientais, como aterros sanitários e industriais, canais, barragens, entre outras. A função da geomembrana é proteger o solo e os aquíferos de contaminações, sendo responsável pela contenção de resíduos ou armazenamento de materiais que podem ser gasosos, líquidos e sólidos. Os gases podem ser resultantes de produtos industriais, de lixo industrial, de aterros sanitários, dentre outras fontes. Os materiais líquidos podem ser água potável, resíduos industriais e domésticos, líquidos de processos químicos, dentre outros. Lixos radioativos, industriais, municipais, hospitalares e de mineração são exemplos de materiais sólidos (Costa *et al*, 2008).

Koerner (2005) menciona uma grande quantidade de aplicações ambientais, geotécnicas, hidráulicas, infraestrutura de transporte e de desenvolvimentos privados, entre elas estão:

- ✓ Revestimento de água potável;
- ✓ Revestimento de resíduos líquidos, radiativos ou perigosos;
- ✓ Revestimento de canais;
- ✓ Revestimento primário, secundário e/ou terciários de aterros de resíduos sólidos e estacas de desperdícios;
- ✓ *Cut-off* dentro de uma barragem de terra zonada para controle de infiltração;
- ✓ Impermeabilização da face de barragens de terra, enrocamento e concreto;
- ✓ Dentro de ensecadeiras para controle de infiltração;
- ✓ Reservatório flutuante coberto para prevenção de poluição;
- ✓ Controle de solos expansivos e susceptíveis ao congelamento.

Segundo Koerner (2005), alguns dos geocompostos conformados por geomembranas geralmente usados são:

- ✓ **Geotêxtil-Geomembrana**, nesse caso o geotêxtil é colocado em uma ou ambas faces da geomembranas para aumentar a resistência ao puncionamento, à propagação de rasgos, entre outras. Em muitos casos a componente geotêxtil age como um meio de drenagem, pelo qual pode conduzir água, gases ou chorume desde o contato direto com a geomembranas.

- ✓ **Geomembranas-Georrede**, alguns tipos de geomembranas e georredes podem ser feitas do mesmo material. Elas podem ser combinadas para formar barreiras impermeáveis com resistência melhorada.

2.2.2. PROPRIEDADES DAS GEOMEMBRANAS

As geomembranas são fabricadas a partir de diferentes polímeros básicos, em várias espessuras, com superfícies lisas ou texturadas. Em função dessas características, algumas propriedades como a espessura e a resistência a tração, podem precisar ser medidas de acordo com diferentes normas técnicas. A seguir são apresentadas as principais propriedades das geomembranas utilizadas nas especificações de projetos segundo Bueno & Vilar (2004).

2.2.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

Para utilização de geomembranas em obras geotécnicas e ambientais, é fundamental a caracterização destas para posterior distinção em função dos seus aspectos físicos e seleção apropriada do geossintético de acordo com a sua função. Sabe-se que as propriedades mais relevantes são: espessura, densidade, índice de fluidez e dureza.

A **espessura** é definida como a distância entre duas superfícies rígidas paralelas que comprimem a amostra de geomembrana com uma sobrecarga de 20 kPa. Essa propriedade depende do tipo de geomembrana considerada: lisa ou texturada. Para o caso da geomembrana lisa a espessura é medida segundo a norma americana ASTM D5199 (2012), enquanto que para geomembranas texturada é determinada segundo a norma ASTM 5994 (2015). A norma brasileira que visa a obtenção desta característica é a ABNT NBR 9863-1:2013 “Geossintéticos-Determinação da espessura a tensões especificadas parte 1: Camada única”, a qual recomenda medir a espessura do corpo principal sem levar em conta as saliências das texturas. São utilizadas duas hastes de aproximação, opostas, com ponta cônica, com raio de

curvatura de $0,8 \pm 0,2$ mm e ângulo de abertura com a horizontal de $60^\circ \pm 2^\circ$ e a espessura é medida pontualmente. As espessuras usuais em geomembranas lisas sem reforço situam-se entre 0,5 e 3,0 mm (Koerner, 2005).

A **densidade ou gravidade específica** depende da matéria prima da qual é feita a geomembrana e expressa por meio de uma relação entre massa e volume de uma amostra e a densidade da água. Pode ser obtido por vários processos entre eles o de imersão (em água ou outros líquidos), o do picnomêtro e o do gradiente de densidade. O método mais aplicado para a sua determinação é padronizado pela norma americana ASTM D792 (2013), o qual é baseado no princípio fundamental de Arquimedes de gravidade específica como o peso do objeto no ar dividido pelo peso na água (Koerner, 2005). A Tabela 2.3 lista densidades médias de geomembranas fabricadas no Brasil.

Tabela 2.3. Densidade de geomembranas fabricadas no Brasil (Bueno & Vilar, 2004).

Tipo de Geomembrana	Densidade das matérias primas (g/cm³)
PVC	1,340
PEAD	0,940
PEBDL	0,935

O **índice de fluidez** (IF ou MI, *melt index*), é usado geralmente pelos fabricantes como um método de controle da uniformidade dos polímeros e processabilidade, já que está relacionado com o peso molecular do polímero. Esse parâmetro refere-se à fluidez do polímero fundido sob temperatura e tensão definidas. O método de ensaio é padronizado pela norma ASTM D1238 (2013). Um elevado índice de fluidez expressa um baixo peso molecular e vice-versa (Bueno & Vilar, 2004; Koerner, 2005).

A **dureza** é a capacidade da membrana em resistir a esforços de indentação de uma haste padronizada, que comprime localmente o material em condições também padronizadas. A dureza é inversamente proporcional à penetração obtida e função do módulo de deformabilidade e do comportamento viscoelástico do material. O ensaio para a sua determinação é padronizado pela norma americana ASTM D2240 (2010).

2.2.2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas mais relevantes a serem determinadas nas geomembranas são a resistência à tração unidirecional, tração multidirecional, resistência a rasgos e resistência a puncionamento (Bueno & Vilar, 2004).

- Resistência à tração.

Em muitas situações de projeto as geomembranas sofrem solicitação de tração por esforços atuantes no plano da manta. A avaliação da resistência a tração unidirecional pode ser feita em tiras estreitas, em corpos de prova no formato de haltere e em faixa larga. Esta propriedade pode ser determinada segundo a norma ASTM D 882 (2012), para geomembranas com espessura inferior a 1,0 mm, enquanto que para geomembranas com maiores espessuras recomenda-se a norma ASTM D638 (2014). O espécime de geomembrana é colocado segundo o disposto na norma, então aplica-se a carga de tração com a velocidade de ensaio definida. A partir do ensaio, a curva de carga-extensão do espécime é desenhada, a carga de extensão no momento da ruptura é registrada e com ela determinar-se a resistência à tração, dividindo-a pela área original do espécime.

A resistência à tração unidirecional é afetada por algumas variáveis, tais como as dimensões do corpo de prova, a relação largura-comprimento, além da taxa de deformação e temperatura impostas nas condições dos ensaios de tração. Além do anterior, o manuseio realizado para a colocação ou instalação das geomembranas em campo pode alterar o comportamento mecânico do material. Na Figura 2.8 é possível observar o comportamento dessa propriedade com as variáveis mencionadas.

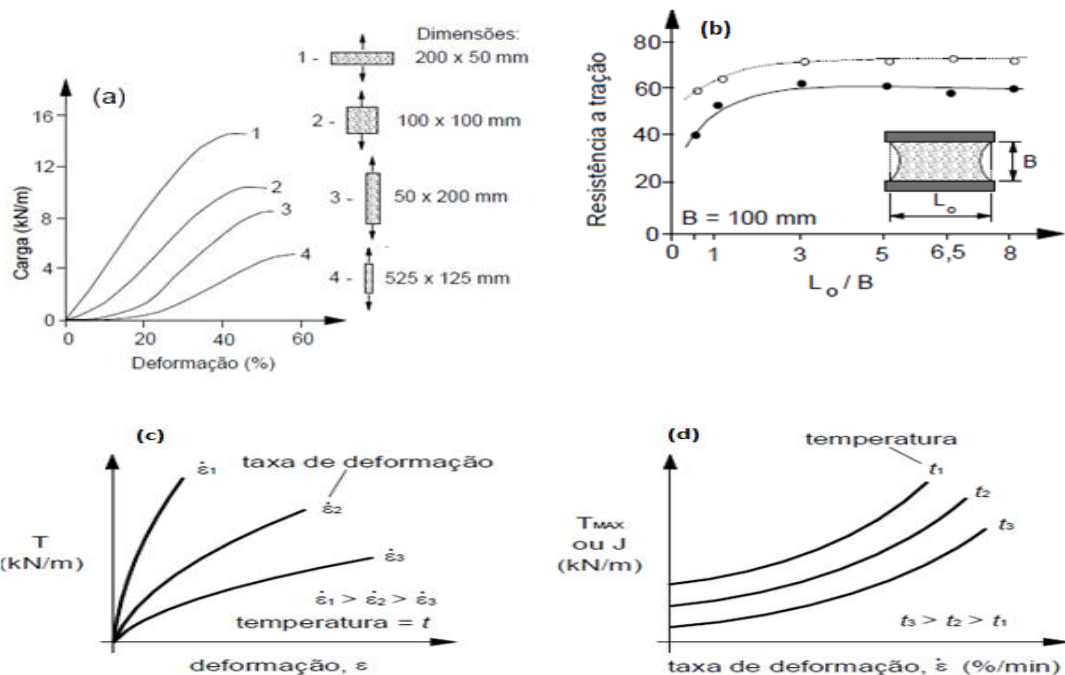


Figura 2.8. Variação da resistência a tração das geomembranas, a) com as dimensões da tira, b) relação largura-comprimento, c) com a taxa de deformação e d) com a temperatura (Palmeira, 2003).

- Resistência à tração multidireccional.

Em situações particulares como, por exemplo, quando é colocada junto com um geotêxtil em aterros sanitários sobre um vazio circular, a geomembrana pode ser tracionada multidireccionalmente e, ao se deformar, adquire a conformação de uma calota esférica ou parabólica. A resistência à tração multidireccional ou axissimétrico pode ser modelada colocando-se as geomembranas num molde grande e vazio e aplicando tensão crescente até conseguir a tensão extrema, na qual a membrana colapse.

- Resistência ao rasgo.

A possibilidade de ocorrência de rasgos em geomembranas, especialmente nas mais finas e não reforçadas, devido a solicitações de tração em direções opostas, tanto no plano da manta como em situação tridimensional, deve ser sempre investigada e levada em consideração nos projetos. Por sua vez, a resistência a rasgos, no caso de membranas, é avaliada a partir de corpos de prova com geometria particular, na qual induz-se o rasgo tracionando-se as extremidades da amostra (Figura 2.9). O ensaio é padronizado pela norma ASTM D1004 (2013).

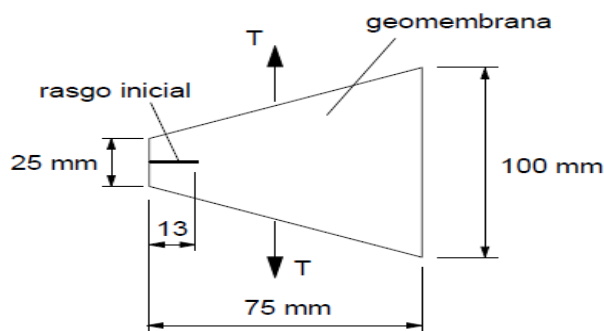


Figura 2.9. Formatos dos corpos de prova para ensaios de rasgo em geomembranas (Palmeira, 2003).

- Resistência ao puncionamento.

Em muitas situações práticas, os geossintéticos podem ficar sujeitos a esforços de compressão localizados como, por exemplo, quando em contato com material granular graúdo. Nesse caso, os esforços de compressão gerados por grãos isolados podem ser de tal valor que causam sua perfuração. O puncionamento das geomembranas é uma ocorrência importante, já que pode acontecer após a geomembrana ser coberta e não pode ser detectada até que um vazamento do sistema executado seja evidente, além dos altos custos que leva a reparação (Koerner, 2005).

Essa propriedade é quantificada fixando-se um corpo de prova às bordas de um cilindro rígido e submetendo-o a uma força estática ou dinâmica. O puncionamento estático é geralmente executado utilizando-se o pistão CBR, conforme prescrito pela NBR ISO 12236 (2013). O puncionamento dinâmico, conforme prescrito pela NBR ISO 13433 (2013), compreende a verificação do dano causado pela queda de um cone padrão sobre uma amostra. Nesse caso, o ensaio tenta representar o lançamento de material granular sobre o geossintético. O puncionamento pode ser uma das causas de danos mecânicos das geomembranas quando instaladas na obra (Geroto, 2008).

2.2.2.3. PROPRIEDADES DE DESEMPENHO

Nas obras, as geomembranas podem ser implantadas em situações particulares de carregamento, entrar em contato com substâncias agressivas ou ficar sujeitas a condições climáticas e ambientais adversas. Tais situações são características de cada projeto e devem ser simuladas em laboratório para que se possa antever o comportamento da membrana ao longo de sua vida útil. De um modo geral, as propriedades físicas, mecânicas, hidráulicas ou de

constituição das membranas submetidas a essas ações são comparadas com as amostras virgens para se quantificar em percentual a modificação ocorrida (Bueno & Vilar, 2004).

Algumas dessas ações são reproduzidas em montagens normalizadas como, por exemplo, a ação da radiação ultravioleta, do aumento de temperatura, de exposição a produtos químicos agressivos, entre outras.

Algumas das ações de solicitação mais frequentes segundo Bueno & Vilar (2004) são: resistência a intempéries, resistência a degradação química, resistência a degradação térmica, resistência de degradação biológica, resistência a atrito de interfaces, resistência das soldas e resistência a fissuramentos sob tensão.

2.2.3. DANOS EM GEOMEMBRANAS

Dano mecânico é toda transformação da estrutura do geossintético, resultante de esforços ocorridos durante seu manuseio, instalação e a compactação do solo subjacente. 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).

Para a disposição de resíduos em aterros, é necessário um sistema adequado de contenção de fluidos, para evitar a contaminação do solo e águas subjacentes. As geomembranas são amplamente empregadas no revestimento de base ou de cobertura destas obras. A configuração das barreiras de controle e desvio de fluxo pode ocasionar o contato direto da geomembrana com materiais agressivos, como britas do sistema de drenagem. O contato com estes materiais poderá submeter a superfície da geomembrana a esforços de punção que podem ocasionar perfurações e deformações indesejáveis (Geroto, 2008). Esses danos podem prejudicar o desempenho da barreira no confinamento dos resíduos e dos percolados.

No estudo de Jacquelin *et al* (2008), verificou-se que a ocorrência de perfurações nas geomembranas é decorrente de uma série de fatores, tais como: inexperiência do instalador, falta de controle de qualidade dos materiais e ausência de procedimentos durante a etapa de instalação da geomembranas ou lançamento de brita de drenagem.

Segundo Geroto (2008), os esforços de punção que poderiam ocasionar perfurações ou deformações na superfície da geomembrana, podem ocorrer em duas etapas distintas:

- Danos em curto prazo: estes danos ocorrem durante a fase de instalação das geomembranas e são ocasionados pelo lançamento da brita do sistema de drenagem, queda de objetos e tráfego de maquinário e pessoas durante a etapa de instalação da manta;
- Danos em longo prazo: ocorrem durante o período de operação do aterro com o lançamento dos resíduos e as cargas subjacentes, da ordem de 500 a 1000 kPa, sobre a superfície da geomembrana.

A Figura 2.10 ilustra os danos ocorridos em geomembranas durante a instalação, e os danos devido a ação de sobrecarga na superfície da geomembrana. Esses danos foram simulados por meio de ensaios de laboratório a grande escala de punçamento e de carregamento estático.

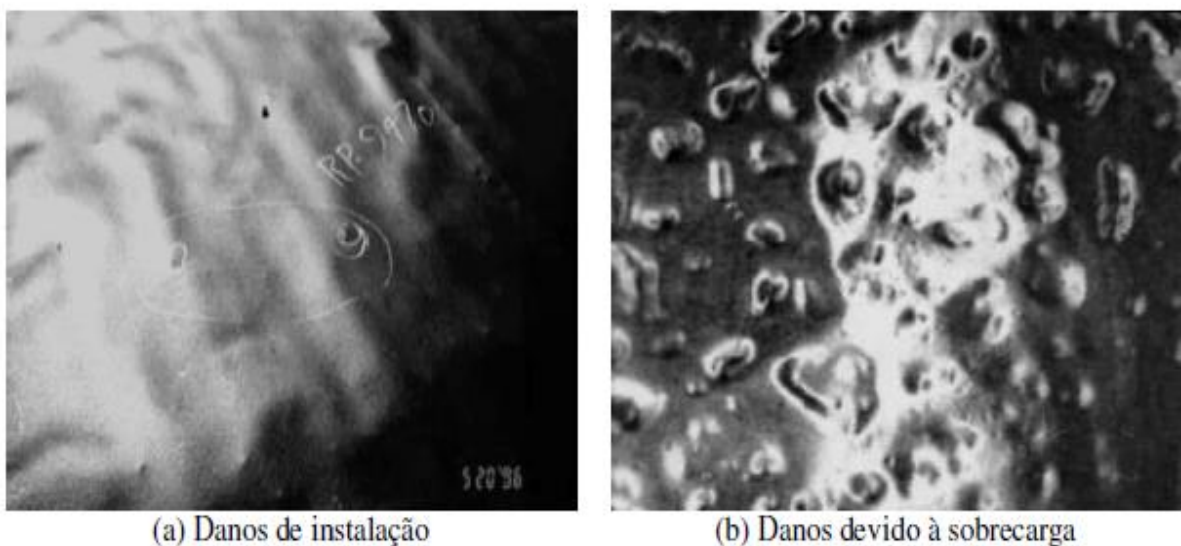


Figura 2.10. Danos mecânicos em geomembranas (Geroto, 2008).

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 acima e em baixo da geomembrana, num equipamento de 590 mm de diâmetro e 500 mm de altura, onde foi aplicada tensão vertical de 2000 kPa por 100 horas. O carregamento foi aplicado usando a tensão do fluido agindo sobre uma bolsa de borracha. Na Figura 2.11 apresenta uma fotografia da superfície superior e inferior de uma amostra de geomembrana depois de ensaiada.

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 orifício perfurado 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.

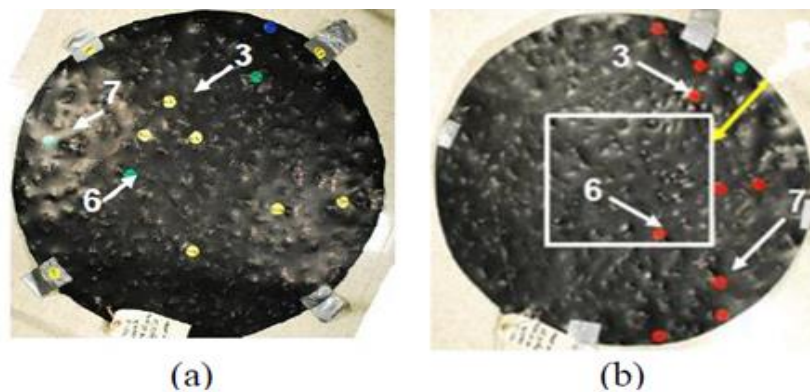


Figura 2.11. Fotografia amostra de geomembrana depois de ensaiada (a) Superfície superior da geomembrana e (b) superfície inferior da geomembrana (Brachman *et al.*, 2011).

Ruiz-Gómez (2014), fez ensaios de dano em geomembranas de PEAD e PVC com espessuras de 1,0 mm e 2,0 mm envolvendo brita e fazendo uso de uma célula que 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. 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 tensões por meio de um sistema de ar comprimido e uma câmara ar-água. Nos resultados obtidos foi encontrado que os principais tipos de danos apresentados na 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. 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 intensões, quando se comparando com as geomembranas de PVC. Para nenhum dos carregamentos aplicados, foram observados furos ou rasgos na superfície da geomembrana. Na Figura 2.12 é possível observar os contatos da brita atuando sobre a geomembrana quando submetida a 500 kPa.

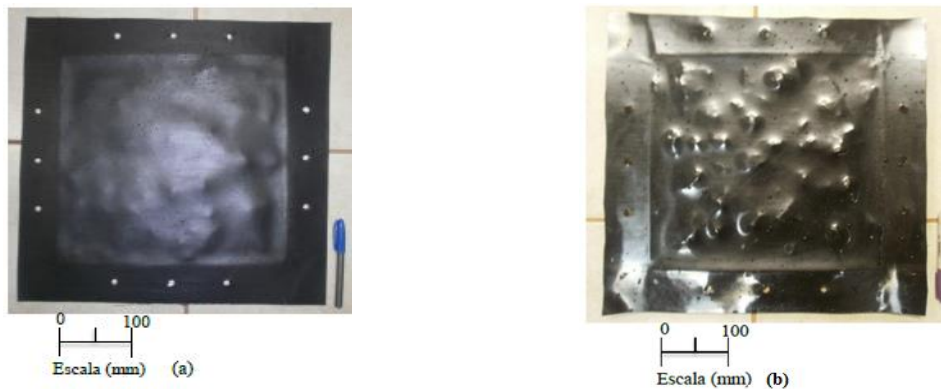


Figura 2.12. Contatos da brita atuando sobre a geomembrana, quando submetida a 500 kPa de tensão: a) geomembrana de PVC-1,0 mm de espessura; b) geomembrana de PEAD-1,0 mm de espessura (Ruiz-Gómez, 2014).

Gardoni (2015) apresenta um estudo sobre fatores que afetam a durabilidade das geomembranas utilizadas em obras de proteção ambiental, especificamente como barreiras para fluidos contaminantes. Nesse estudo foram feitas análises da durabilidade para dois casos, o primeiro para aterros sanitários e o segundo para barragens de rejeitos, especificamente de ouro (pela utilização de substâncias contaminantes). Na metodologia usada foram feitos cinco tipos de ensaios de laboratório sendo os de durabilidade químico-mecânica e os de difusão de contaminantes executados sobre as amostras de geomembranas presentes em aterros sanitários. Para a avaliação do desempenho nas geomembranas presentes nas barragens de rejeitos foram feitos ensaios de envelhecimento simultâneo e envelhecimento na câmara de imtempismo, visando avaliar o envelhecimento e os ensaios laboratoriais os resultados obtidos foram comparados com as amostras exumadas da barragem. Para o estudo foram empregadas geomembranas de PEAD (1,5 mm e 2mm) e de PVC (0,8mm) e um filme de polietileno (PE). Este último foi fabricado para a pesquisa usando uma resina da mesma base utilizada para a fabricação das geomembranas de PEAD para avaliar a influência do envelhecimento na transferência difusiva através de geomembranas virgens e envelhecidas. Os ensaios de difusão foram feitos num equipamento o qual tem duas câmaras cilíndricas de vidro semelhantes às utilizadas previamente por Touze-Foltz *et al.* (2011 e 2012).

O procedimento experimental foi baseado naquele adotado por Islam & Rowe (2009) e sua descrição encontra-se detalhada em Mendes *et al.* (2014).

Para os ensaios de envelhecimento simultâneo as amostras de geomembrana foram imersas no fluido próprio da barragem com uma temperatura de controle de 40°C fornecida por lâmpadas de radiação infravermelha de 250 W Segundo recomendações da norma ASTM D5322 (2009) o período de duração do envelhecimento foi de 30, 60, 120 e 180 dias e, para cada período de

tempo, foram retiradas 6 amostras (2 de PEAD e 4 de PVC) para realização dos ensaios de tração, termogravimetria, microscopia eletrônica de varredura e de força atômica.

Com respeito às geomembranas exumadas foram retiradas do dique de segurança (PEAD) e do lago de coleta de fluidos II (PVC) das barragens de Jacobina e da Fazendas Brasileiro, construídas no período compreendido entre 2006 e 2011. As amostras foram submetidas diretamente aos ensaios de tração, termo gravimetria, microscopia eletrônica de varredura e de força atômica

Nos ensaios de difusão, Gardoni (2015) encontrou uma diminuição dos coeficientes de difusão nas geomembranas envelhecidas que pode ser explicado pelo aumento da cristalinidade nos filmes de PE devido ao envelhecimento dos mesmos.

Os valores do módulo de Young obtidos em 24 meses de duração dos ensaios de degradação químico-mecânico, comparados com os resultados das geomembranas virgens não apresentaram variações visíveis. Por outro lado, as amostras imersas no percolado sob material granular (mantidas por um tempo de maior duração com respeito às condições iniciais) e submetidas a tensão de compressão apresentaram uma redução nos valores do modulo de Young.

No entanto, a influência do envelhecimento, segundo Gardoni (2015), no comportamento à tração para o caso de obra é semelhante ao observado no final dos testes de relaxamento em laboratório.

“Os resultados de todos os ensaios de tração efetuadas para as amostras retiradas dos ensaios de envelhecimento simultâneo, dos ensaios de câmara de intemperismo e as exumadas em campo são apresentados na Figura 2.13 para a geomembrana de PVC. A nomenclatura usada é: GMV=geomembrana virgem; GMex=geomembrana exumada GMD = geomembrana do ensaio de envelhecimento simultâneo; 3000h = câmara de intemperismo por 3000 horas” (Gardoni, 2015).

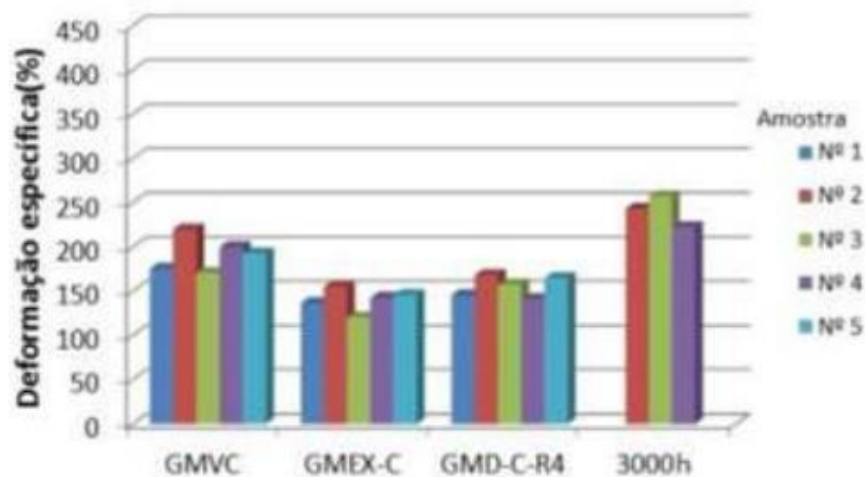


Figura 2.13. Resultados dos ensaios de tração GM PVC do fabricante C, deformação específica (%) (Gardoni, 2015).

De maneira geral, ambas geomembranas, de PVC e de PEAD apresentaram-se mais rígidas em relação às amostras virgens, fato que pode ser observado nos valores de módulo de elasticidade. A amostra exumada de PVC do fabricante D apresentou uma rigidez muito elevada, mostrando-se extremamente quebradiça, sendo que o seu módulo de elasticidade variou de 40 a 530 MPa.

Gardoni (2015) conclui que o envelhecimento que sofrem as geomembranas são de dois tipos: envelhecimento químico no qual apresenta-se uma modificação na estrutura química das macromoléculas e envelhecimento o físico, onde não se dá uma modificação da estrutura mas sim na configuração espacial do material, ou seja, rearranjo das cadeias poliméricas (Farcas *et al.*, 2013). Estes dois tipos de processo têm uma importante influência na degradação das geomembranas o que afeta sua durabilidade além de influenciar na difusão dos contaminantes através da geomembrana.

Com respeito às geomembranas de PVC, instaladas há 9 anos nas barragens, apresentaram elevada rigidez e estrutura quebradiça, ou seja, a geomembrana tem uma redução em sua vida útil. Em relação à perda de flexibilidade e aumento da rigidez, as amostras analisadas apresentaram valores entre 6 e 12 MPa, que superaram em muito o indicado pelo fabricante (4,50 MPa).

Santos (2014), usando os mesmos procedimentos utilizados na pesquisa da Gardoni (2015), mas só para o âmbito da mineração, utilizou dois tipos de geomembranas (PEAD e PVC) e fez

comparações entre amostras padrão de geomembranas virgens de PEAD, com uma resistência média à tração de 18 MPa, uma deformação específica variando entre 11 e 17% e um módulo de elasticidade entre 105 e 150 MPa, com amostras exumadas da barragem de rejeitos da Mineração Fazenda Brasileira (MFB), localizada no estado da Bahia, região nordeste do Brasil, para as mesmas propriedades já ditas. Aquelas amostras, após os ensaios, mostraram uma resistência média à tração que variou entre 18 a 20 MPa com deformações correspondentes no escoamento, que variaram entre 12 e 20% e módulos de elasticidade entre 65 e 150 MPa e para as amostras envelhecidas simultaneamente as quais apresentaram uma resistência média à tração de 19 MPa, deformação específica média de 14,70 e módulo de elasticidade de 135 MPa. Os resultados são apresentados na Figura 2.14.

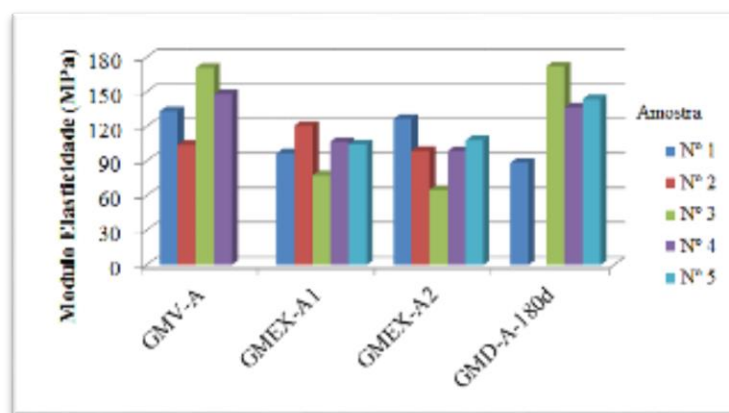


Figura 2.14. Resultados de tração para geomembranas de PEAD, módulo de elasticidade (MPa) (Santos, 2014).

Por outro lado para as geomembranas de PVC foram feitas as mesmas comparações entre os resultados das geomembranas virgens, exumadas e envelhecidas tendo como resultado que para as amostras virgens apresenta-se uma resistência à tração entre 14 e 17 Mpa, com deformações específicas que variam entre 190 a 340% e o módulo de elasticidade varia entre 5 e 7 MPa. Para as amostras exumadas a resistência à tração média foi de 15 MPa, com deformações específicas entre 140 e 210% e módulo de elasticidade variando entre 7 e 11 MPa. Nestes resultados se apresentou um dado não usual com a amostra do fabricante D, na qual foi obtido um módulo de elasticidade da ordem de 530 MPa. Também apresentou-se rígida e quebradiça com o qual se justifica o valor encontrado. Este e os anteriores resultados podem ser observados nas Figura 2.15, Figura 2.16 e Figura 2.17.

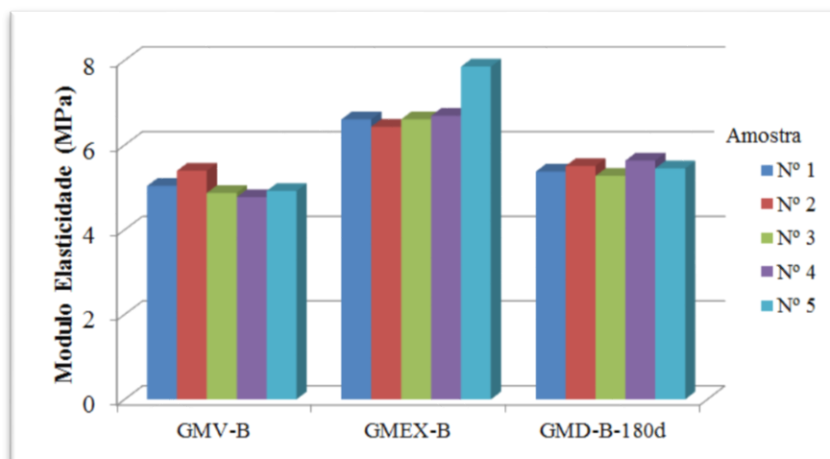


Figura 2.15. Resultado dos ensaios de tração para PVC – Fabricante B, módulo de elasticidade (MPa) (Santos, 2014).

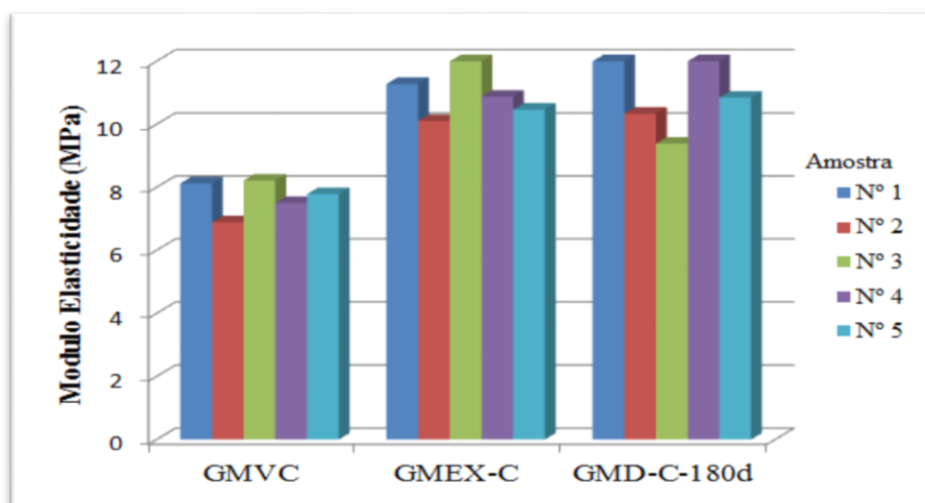


Figura 2.16. Resultado dos ensaios de tração para PVC – Fabricante C, módulo de elasticidade (MPa) (Santos, 2014).

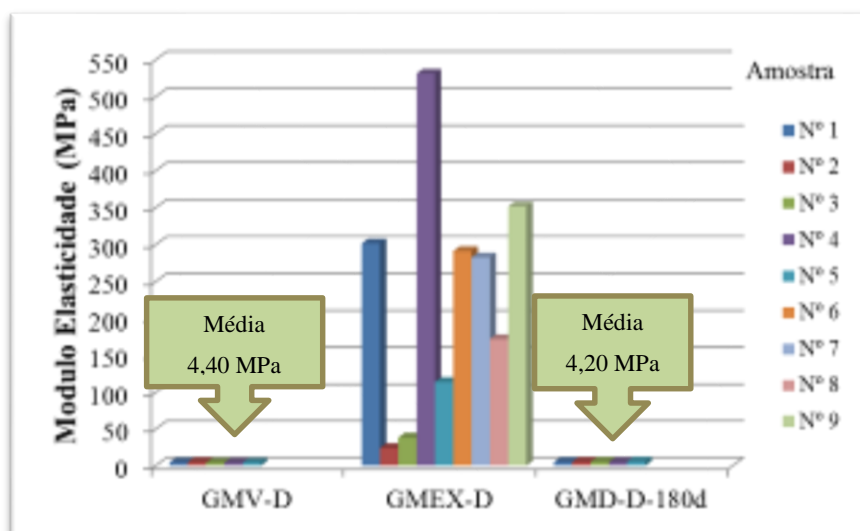


Figura 2.17. Resultado dos ensaios de tração para PVC – Fabricante D. módulo de elasticidade (MPa) (Santos, 2014).

“De maneira geral, ambas as geomembranas PVC e PEAD apresentaram-se mais rígidas, fato que pode ser observado nos valores de módulo de elasticidade. A amostra exumada de PVC do fabricante D apresentou uma rigidez elevada, mostrando-se extremamente quebradiça, sendo que o seu módulo de elasticidade variou de 40 a 530%” (Santos, 2014), pode-se concluir que o envelhecimento ou degradação tanto química como mecânica que sofre a geomembrana se traduz em um aumento da rigidez (esta característica é de maior tendência em geomembranas de PEAD), assim como um aumento na resistência à tração, ou seja, se apresenta uma maior rigidez e menor durabilidade dela, tanto em geomembranas de PEAD como de PVC.

2.2.3.1. PROTEÇÃO DE GEOMEMBRANAS

Com o fim de prevenir possíveis danos mecânicos e também minimizar as tensões e deformações induzidas nas geomembranas, deve-se introduzir uma camada de proteção sobre a superfície da mesma (Tognon *et al.*, 2000; Bouazza *et al.*, 2002). Dentre os materiais empregados para esta finalidade, destacam-se: geotêxteis não tecidos, tapetes pneumáticos (camadas de pneus triturados com uma dupla função proteção da geomembrana e drenagem do aterro, tema sugerido por Hall (1991), Ahmed & Lovell (1993), Edil *et al.*(1992), Narejo & Shettim (1995) e Duffy (1995)), geocompostos bentoníticos, georredes, tapetes domésticos ou industriais ou uma combinação desses materiais (Geroto, 2008).

Reddy *et al.* (1998) fizeram uma avaliação das melhores condições e o grau de dano que fornece uma camada de pneu sobre um revestimento de geomembrana, durante o tempo da construção e operação do aterro. Por meio de ensaios de campo e laboratório foram avaliadas seis variáveis (i) material do subleito, (ii) tipo de revestimento de geomembrana, (iii) tipo de geotêxtil, (iv) tamanho da partícula de pneu, (v) espessura da camada de pneu (vi) e tipo de carga na construção (equipamento usado na colocação das camadas). O autor fez uso de materiais tais como argila siltosa, geomembrana de PEAD lisa com uma espessura de 1,5 mm e geotêxteis com gramaturas de 543 e 270 g/m² e pneu. O procedimento feito consistiu na montagem de 9 configurações (as quais dependeram das características antes numeradas) e submetidas a uma tensão de compressão para a avaliação do dano e o benefício de um tipo específico de proteção. Foram feitas análises visuais e de laboratório tanto na geomembrana como na camada de drenagem. Para a etapa de construção a inspeção visual obteve-se como resultado que todas as amostras apresentaram marcas superficiais com pouca ou nenhuma profundidade. Para condições de operação encontrou-se características semelhantes e com uma diminuição de 60% da espessura da camada de pneu. Com respeito à sua condutividade hidráulica se manteve em 1×10^{-3} cm/s a uma tensão vertical de 958 kPa.

Para os outros ensaios de resistência à tração em faixa larga e tração multidirecional estes mantiveram valores semelhantes às das geomembranas virgem ou um ligeiramente maiores. Reddy (1998) concluiu que a camada de proteção fornecida pelos pneus apresenta boas características e que os danos provenientes desta camada é devido à angularidade e tamanhos dos pneus.

Reddy *et al.* (1996) avaliaram diferentes combinações de materiais e elementos de proteção para geomembranas em aterros sanitários durante a etapa de construção. Este trabalho compreende testes em campo, nos quais foram usadas geomembranas de PEAD lisas com espessura de 1,5 mm, nas quais eram colocadas camadas de solo para proteção de 0,3 m de espessura e algumas vezes geotêxtil de 270 g/m², o que depende da combinação que fosse ensaiada. Para estabelecer as cargas de construção foram usados dois tipos de equipamentos um bull dozer leve (modelo CAT D4) e outro bull dozer pesado (modelo CAT D7). As combinações usadas nos ensaios de campo foram: 1. Brita média, sem geotêxtil, CAT D4 (bulldozer leve); 2. Brita média, com geotêxtil, CAT D7 (bulldozer pesado); 3. Brita média, sem geotêxtil, CAT D7; 4. Brita fina, sem geotêxtil, CAT D4; 5. Brita fina, sem geotêxtil, CAT D7; 6. Brita fina, com geotêxtil, CAT D4; and 7. Brita fina, com geotêxtil, CAT D7.

O procedimento seguido por Reddy *et al.* (1996) foi em primeiro lugar a colocação da geomembrana sobre o solo de fundação do aterro (para este fim foi usado um local previsto para a disposição de resíduos sólidos), após isso foi colocada a camada protetora, se assim era a combinação, e acima desta a camada drenante. A aplicação das camadas eram feitos pela maquinaria mencionada anteriormente, sendo 6 vezes num sentido e seis no outro.

As amostras foram exumadas e submetidas á inspeção visual. Não foram encontrados danos aparentes no caso das geomembranas protegidas pela camada de solo ou geotêxtil, no entanto as que não tinham proteção alguma, apresentavam rasgos e mundaças na seção transversal. Após feita a simulação das cargas nas condições iniciais de construção do aterro foram feitos ensaios no solo e para as geomembranas. No solo foram feitos os ensaios de granulometria e condutividade hidráulica. Para a condutividade hidráulica obseva-se valores de 1.3×10^{-2} m/s e 6.6×10^{-3} m/s para brita de grão meio e fino, respectivamente. Com respeito à granulometria, a mesma não apresentou mundaças singnificativas antes e após da construção o que indica que este processo ligeiramente influencia o solo de cobertura da geomembrana.

Para a geomembrana foram feitos ensaios que procuravam avaliar os possiveis danos. As amostras exumadas foram submetidas á 3 tipos de ensaios: permeabilidade a vapor de água (*Water Vapor transmission Tests, WVT*), tração multidirecional (*Multi-Axial Tension Tests*) e o ensaio de resistência à tração de faixa larga (*wide strip tensile tests*).

O ensaio de *WVT* fornece informação sobre a mundaça na permeabilidade da geomembrana devido algum tipo de dano presente e os quais não são visíveis. Em teoria uma geomembrana com dano apresenta uma alta capacidade de transmissão de vapor de água comparada com uma geomembrana que não tivesse este tipo de dano (feita segundo a norma ASTM E96). Para avaliar essa propriedade foram feitos 24 testes nos quais incluíam-se 3 para amostras virgens e nos resultados, tendo em conta que se apresentam diferentes configurações de coberturas de proteção para a geomembrana, não tem-se uma diferença alta entre eles. A aparente variação presente nos resultados é devido a que a taxa de *WVT* é tão baixa (só se perderão por cada amostra uma média de 4 mg de água durante o ensaio) que até os erros pequenos nas medições do peso são significativos.

No ensaio de tração multidirecional também foi feito para 24 amostras, incluindo 3 amostras virgens, 15 amostras de diâmetro de 0,3 m e 9 amostras de diâmetro de 0,6 m. Os resultados das duas classes de amostras têm uma concordância entre elas como apresentado na Figura 2.18. A média da resistência atingida neste ensaio é apresentada na Figura 2.19, onde pode ser observado que as geomembranas não apresentam variação na resistência à tração quando comparadas com as amostras virgens. Também é possível observar que as amostras de geomembranas que foram testadas no campo sem proteção têm uma resistência à tração ligeiramente maior em relação às geomembranas sem dano algum (virgens). Por sua vez as geomembranas com proteção proveniente do geotêxtil apresentam uma resistência um pouco menor com respeito às geomembranas virgens como se observa na Figura 2.19(a). Este comportamento é atribuído à condição mais rígida ou frágil da geomembrana em ausência do geotêxtil (Reddy *et al.*, 1996).

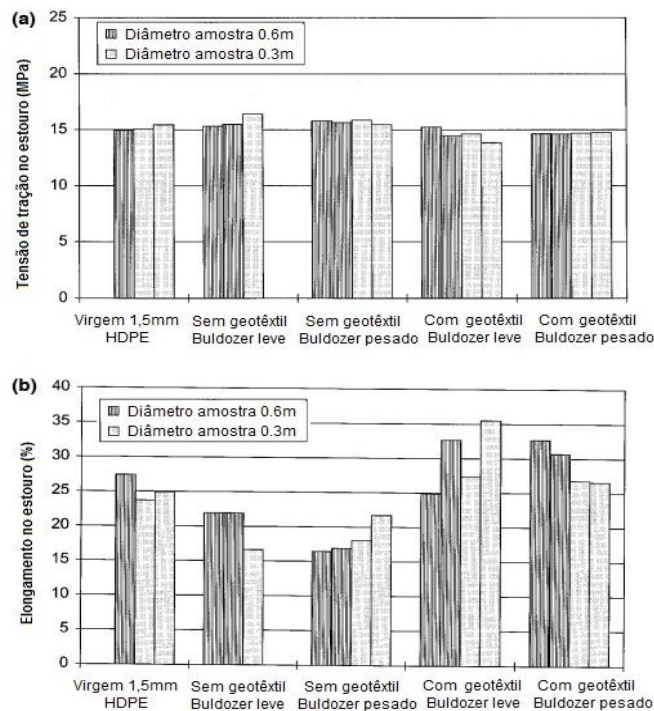


Figura 2.18. Resultados do ensaio de tração multidirecional onde mostra-se a influência do tamanho da amostra em: (a) Tensão à tração no estouro, (b) Alongamento no estouro (modificado de Reddy *et al.*, 1996)

Também é possível ver na Figura 2.19(b) que o alongamento da geomembrana decresce na ruptura com o aumento no tamanho da partícula da camada de proteção e o peso do equipamento usado para o espalhamento do material. Mas, quando é usado o geotêxtil como meio de proteção o alongamento aumenta com respeito às geomembranas virgens. O anterior reflecte a vantagem de usar um geotêxtil como proteção para as geomembranas. Para uma camada de proteção de brita de tamanho meio o alongamento foi de 15,2% e equipamento pesado e para uma

geomembrana com geotêxtil foi de 32,1% com brita fina, equipamento leve e gramatura de 270g/m². Outro aspecto relevante é que a aplicação de uma camada de brita diretamente sobre a geomembrana gera uma mundaça de grande importância na resistência.

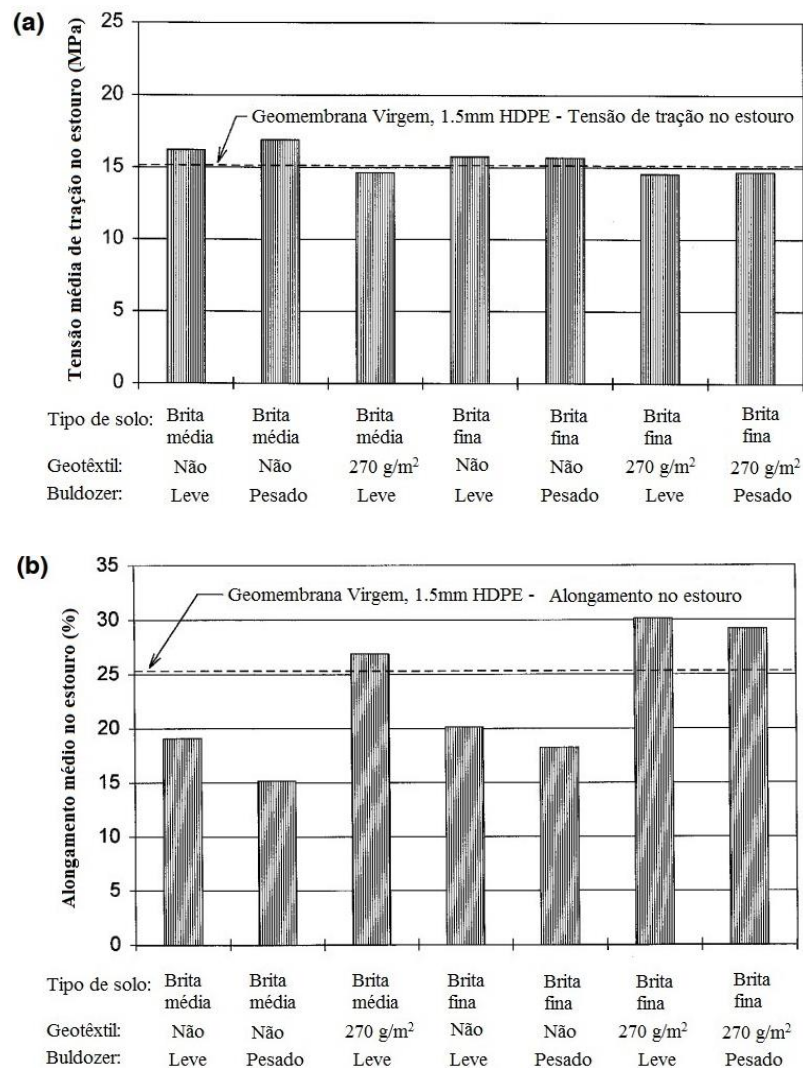


Figura 2.19. Resultados dos ensaios de tração multidirecional mostra-se: (a) resistência média à tração no estouro, (b) alongamento médio no estouro (modificado de Reddy *et al.*, 1996).

Por último o ensaio de tração em faixa larga, feito segundo a norma ASTM D4885, com 21 amostras provenientes do campo experimental e 3 mais de geomembranas virgens para as quais foram calculados (i) Tensão no ponto de fluência, (ii) deformação no ponto de fluência, (iii) módulo secante ao 10%, (iv) tensão na ruptura, (v) deformação na ruptura e (vi) carga / largura na ruptura. Com base nesses aspectos os resultados obtidos com respeito à tensão no ponto de fluência e à sua deformação nesse mesmo ponto, guardaram similitude entre as diferentes configurações e a geomembrana virgem (Figura 2.20 e Figura 2.21), essa mesma observação é feita para o módulo secante ao 10% (Figura 2.22). O anterior indica que o tipo de cobertura

usada para a proteção da geomembrana não faz diferença alguma sobre esta característica tendo em conta as configurações utilizadas nesta pesquisa.

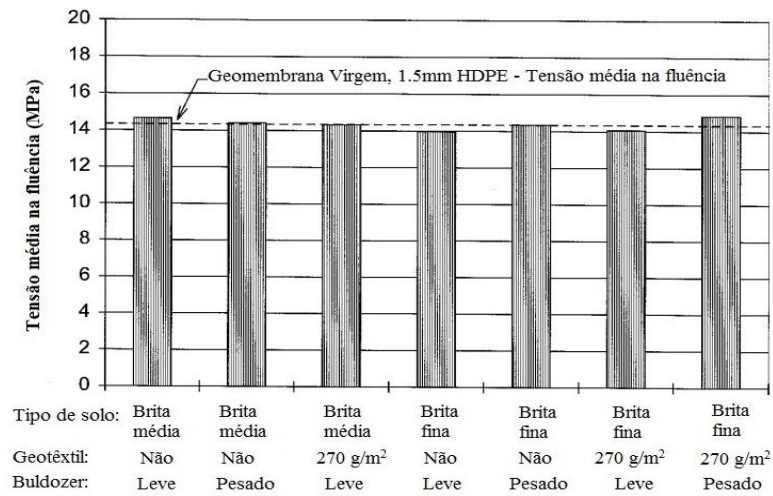


Figura 2.20. Tensão média no ponto de Fluência no ensaio de Resistência à tração em faixa larga ASTM D4885. (Modificado de Reddy *et al.*, 1996)

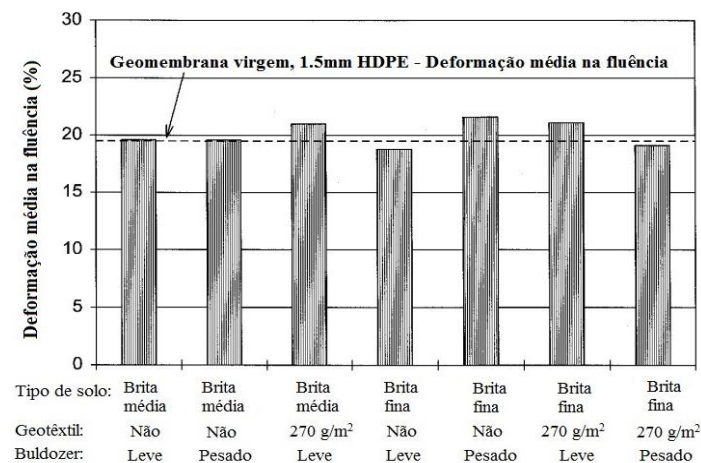


Figura 2.21. Resultados da deformação média no ponto de fluência no ensaio de resistência à tração em faixa larga (modificado de Reddy *et al.*, 1996)

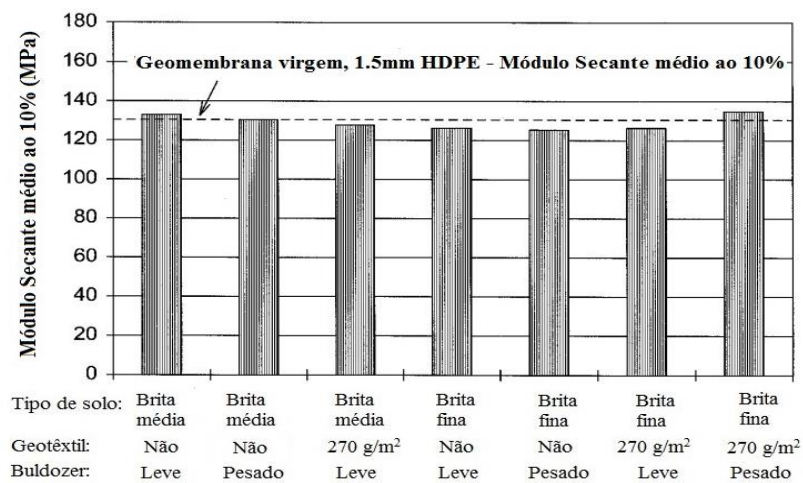


Figura 2.22. Módulo Secante médio a 10% (modificado de Reddy *et al.*, 1996).

Para a característica da tensão na ruptura (Figura 2.23), observa-se uma diminuição dessa propriedade nas amostras de campo quando comparadas com as amostras virgens; essa diferença se ve reduzida quando se utiliza geotêxtil como meio de proteção em comparação com aquelas que não têm esse tipo de proteção. O valor máximo desta diferença dá-se quando a cobertura só consiste em uma brita de grão médio.

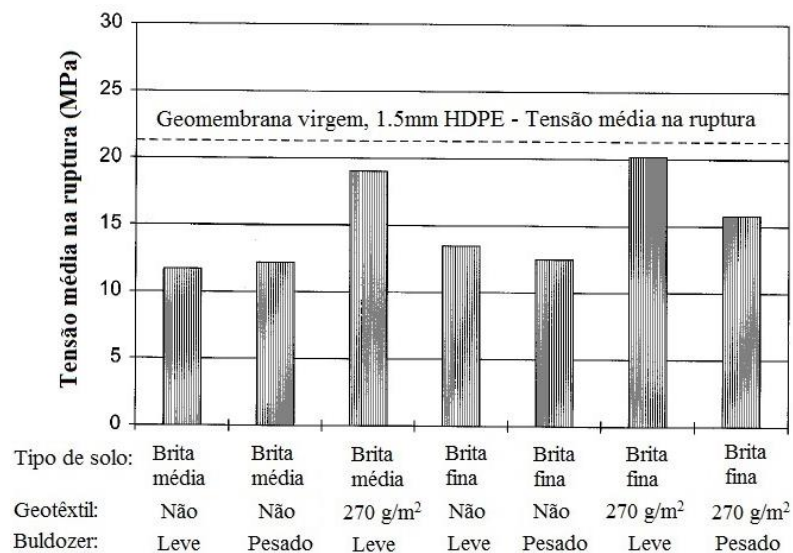


Figura 2.23. Valor da tensão média na ruptura no ensaio de resistência à tração em faixa larga (modificado de Reddy *et al.*, 1996).

Uma tendência similar se apresenta nas características de deformação na ruptura e carga /largura na ruptura. Reddy conclui que os danos causados na geomembrana não influenciam os pontos de tensão e deformação na fluência, mas sim nos pontos de tensão e deformação na ruptura do material. Além disso, a pesquisa conclui também que a melhor proteção é aquela provida por um geotêxtil o qual influencia na resistência ao punzonamento da geomembrana e protege de rasgos ou furações que poderia sofrer se estivesse em contato direto com a camada drenante.

Reddy *et al.*(1998), fez uma outra pesquisa seguindo os mesmos parâmetros mencionados anteriormente, onde empregou uma geomembrana lisa de PEAD com espessura de 1,5 mm como revestimento do fundo de um aterro de resíduos sólidos e para cinco granulometrias de solos diferentes, que vão desde um tamanho de um cuarzo até areia de grão meio as quais poderiam estar ou não em presença de um geotêxtil e sob condições de carga de 1,4 MPa, com o qual procurava-se estabelecer o comportamento desses configurações a longo prazo.

Igualmente que na anterior pesquisa a metodologia para a avaliação dessa carga nesse tempo sobre o solo foi uma análise de partículas e para o dano feito nas geomembranas foram feitos ensaios de permeabilidade a vapor de água, tração multidirecional e resistência à tração em faixa larga assim como uma inspeção visual do elemento ensaiado.

Para a realização da pesquisa foi projetado e construído um equipamento de aço como se mostra na Figura 2.24, no qual foram ensaiadas as amostras de geomembrana. Este equipamento tem a possibilidade de aplicar cargas de até 890 kN sobre um área de 0,45m², levando em conta isso foram aplicadas cargas de até 1,4 MPa (equivalente a um aterro de resíduos sólidos de 100 m de altura com um peso específico de 14 kN/m³) sobre uma amostra de igual área.

A configuração do ensaio ou disposição dos elementos é a seguinte: na base do equipamento encontra-se uma placa elastômerica que visava simular um revestimento de argila compactada (solo de fundação), a qual ajuda na avaliação do comportamento dos diferentes revestimentos tendo em conta que as propriedades da argila mudam com o tipo de mineral, grau de saturação e de compactação. A escolha do tipo de elastômero foi feita baseado em testes de compressão uniaxial sobre o solo e sobre varios tipos de elastômeros e, levando em conta os resultados de tensão, deformação (ensaio de compressão) e dureza dos dois elementos se avaliou a utilização de um tipo determinado de elastômero. Com base nesses testes foi escolhido um elastômero de 13 mm com uma dureza de 80 no aparelho de dureza. Na parte superior encontra-se disposta a geomembrana seguida ou não de um geotêxtil de polipropileno de gramatura de 270 g/m², tanto a geomembrana como o geotêxtil têm dimensões de 495 mm x 902 mm e foram submetidos a inspeção para verificar que se havia danos antes dos ensaios.

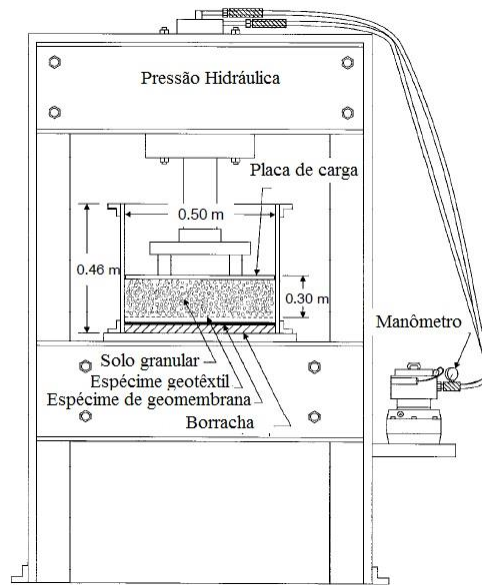


Figura 2.24. Equipamento utilizado para simular condições de carga sobre um revestimento de geomembrana (modificado de Reddy *et al.*, 1998)

Após isso, foi colocada uma camada drenante, a qual podia pertencer a qualquer das 5 granulometrias usadas. Aquelas camadas de brita cumprem com o critério de condutividade hidráulica (1×10^{-3} cm/s), e a diferença entre camadas reside basicamente no tamanho de partículas e na forma destas que vão desde partículas arredondadas a subarredondadas.

Após feita a montagem do ensaio é aplicada uma carga de 205 kPa a cada 30 minutos até atingir uma tensão máxima de 1,4 MPa a qual foi mantida por 48 horas para permitir a deformação e creep na amostra ensaiada. Posteriormente a carga foi retirada com a mesma taxa de incremento com a qual foi aplicada. Para esta simulação foram feitos 10 ensaios com as configurações que se apresentam na Tabela 2.4.

Para a avaliação dos danos na configuração aplicada a metodologia foi, em primeiro lugar, determinar a mudança na granulometria da camada drenante. Para este caso a mudança obtida para dita característica é nula, o tamanho de partícula é a mesmo antes e depois da aplicação de carga por um longo tempo. Só foi vista uma pequena variação com respeito às granulometrias da brita fina e triturada a qual não causa nenhuma influência na condutividade, critério de alto valor, o qual se mantém em 1×10^{-3} cm/s.

Tabela 2.4. Paramêtros usados nos ensaios de simulações no laboratório (modificado de Reddy *et al.*, 1998).

Teste	Tipo de solo	Espessura (m)	Geotêxtil usado (Massa por unidade de área)	Densidade Inicial do Solo (g/cm ³)	Tensão Máxima Aplicada (kPa)	Duração sob carga máxima (horas)
1	Brita Triturada	0,3	Não	1,79	1436	48
2	Brita Triturada	0,3	270 g/m ²	1,79	1436	48
3	Brita Média	0,3	Não	1,84	1436	48
4	Brita Média	0,3	270 g/m ²	1,84	1436	48
5	Brita Fina	0,3	Não	1,86	1436	48
6	Brita Fina	0,3	270 g/m ²	1,86	1436	48
7	Brita Muito Fina	0,3	Não	1,92	1436	48
8	Brita Muito Fina	0,3	270 g/m ²	1,92	1436	48
9	Areia Média	0,3	Não	1,97	1436	48
10	Areia Média	0,3	270 g/m ²	1,97	1436	48

Por outro lado para a avaliação do dano na geomembrana foi feita em primeiro lugar uma inspeção visual do elemento, seguido de testes de tração multidirecional, resistência à tração em faixa larga e por último um teste de permeabilidade a vapor de água (WVT). No caso da inspeção visual, foram encontrados em todas as amostras algum tipo de marca, incluindo nas amostras virgens. Geralmente as partículas de maior tamanho, granulometrias da brita triturada, meia e fina geram danos mais visíveis sobre a geomembrana, aqui é preciso ressaltar que o dano causado pela brita triturada é de maior profundidade, ou seja, gera mudanças na espessura da geomembrana. Além disso, as geomembranas com proteção do geotêxtil apresentam danos quase nulos nas observações feitas por Reddy *et al.*(1998).

Continuando com o ensaio de tração multidirecional os resultados obtidos apresentam que a resistência à tração das geomembranas exumadas do ensaio é igual à resistência à tração das geomembranas virgens como já tinha sido mostrado por Reddy *et al.* (1996). Este comportamento se apresenta em geomembranas com ou sem geotêxtil como proteção. Caso contrario ocorre com o alongamento das amostras, que apresentaram uma alta diferença com as amostras virgens. Isso indica uma mudança física que acontece durante o período de duração do ensaio (48 horas).

O uso do geotêxtil influencia nesta característica mantendo o alongamento em valores pertos dos obtidos nas geomembranas virgens. Para os casos onde não foi colocado geotêxtil o alongamento se viu influenciado pelo tamanho das partículas, tendo um perda de 35% com

respeito às geomembranas virgens quando o material era brita triturada e um valor mínimo entre 10% e 12% quando o material era brita fina ou areia meia, ou seja, quanto maior seja o tamanho da partícula de solo de cobertura, maior será a perda no valor do alongamento da geomembrana. No ensaio de resistência à tração em faixa larga, na Figura 2.25 se mostra que igualmente na pesquisa anterior (Reddy *et al.*, 1996) e em concordância com o ensaio anterior o valor de tensão na fluência não muda ou apresenta um leve aumento com respeito ao valor obtido nas geomembranas virgens. No caso da deformação neste mesmo ponto, ela apresenta um valor um pouco menor à geomembrana virgem. Isso indica que as características de resistência à tração e deformação neste ponto não são afetadas devido à carga imposta por um período de tempo prolongado.

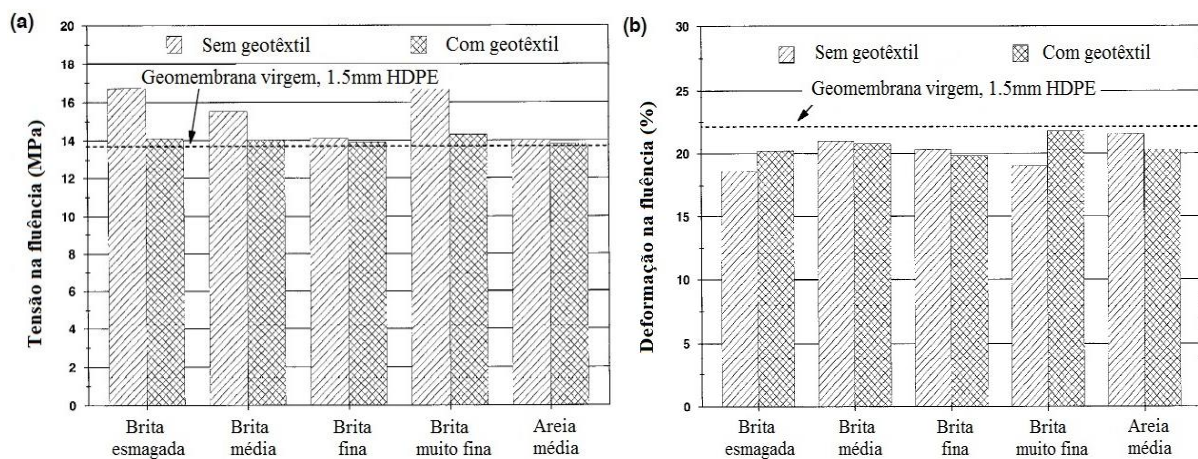


Figura 2.25. Resultados Ensaio do ensaio de resistência à tração: (a) Resistência à tração, (b) Deformação no ponto de fluência (Modificado Reddy *et al.*, 1998).

Por sua vez a tensão na ruptura assim como a deformação neste ponto estão altamente influenciadas pela cobertura e/ou proteção aplicada sobre a geomembrana. Esses valores decem quando a cobertura sobre o elemento impermeabilizante é só uma camada granular, de tamanho de grão bem maior igual à brita triturada, de 0,3m de espessura. Com isto pode-se inferir que se não é usado um geotêxtil como proteção da geomembrana a tensão e deformação na ruptura dependerão da granulometria da camada de drenante como mostra-se na Figura 2.26. No ensaio *WVT* os resultados obtidos pelas geomembranas exumadas não têm diferença razoável quando comparado com as geomembranas virgens. As geomembranas que não tinham proteção de um geotêxtil junto com aquelas que sim possuíam a proteção, comparados com os valores das geomembranas virgens, não representam uma mudança alta o que indica que o tipo de cobertura ou proteção não influencia as propriedades hidráulicas da geomembrana.

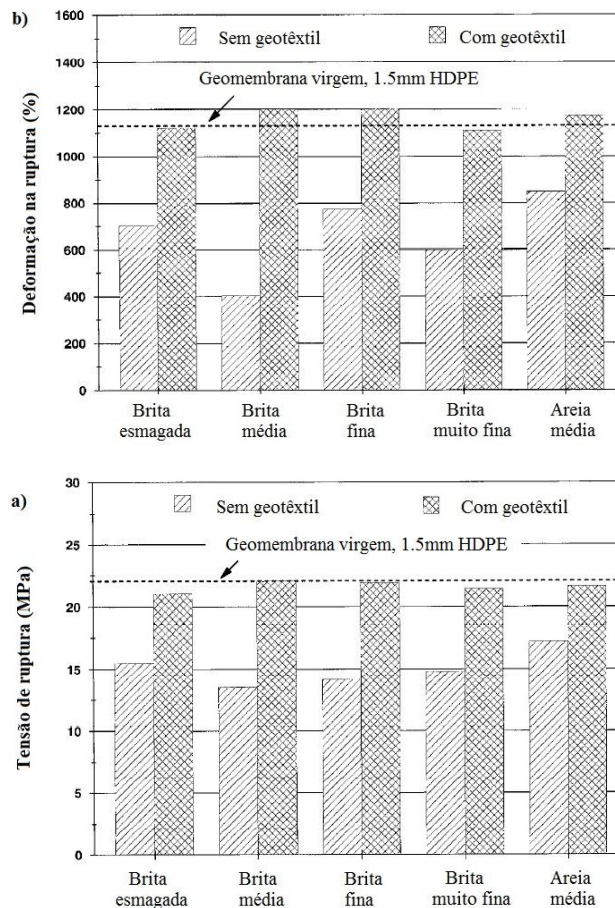


Figura 2.26. Resultados Teste de resistência à tração em Faixa larga: (a) Tensão na ruptura, (b) Deformação na ruptura (Modificado Reddy *et al.*, 1998)

Na Figura 2.27 se observa que no caso de geomembranas que não apresentam uma cobertura por um geotêxtil o alongamento na ruptura, a tensão e deformação na ruptura dependem da granulometria da camada drenante e esses valores decrescem quando o tamanho da partícula aumenta. Isso pode ser devido à distribuição de tensões sobre a geomembrana, ou seja, para tamanho de partículas maiores apresentam grandes espaços entre elas o que faz as tensões se concentrem numa área menor o que permite que a geomembrana se deforme com mais facilidade e a tensão sobre a geomembrana seja de maior magnitude quando comparada com um tamanho de partícula menor a qual tem uma melhor distribuição da carga e menor espaço entre partículas.

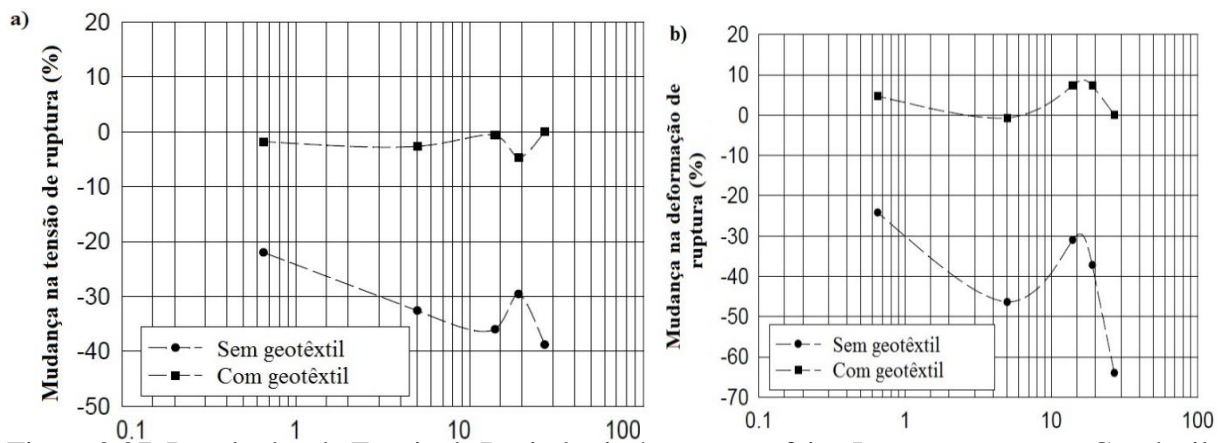


Figura 2.27. Resultados do Ensaio de Resistência á tração em faixa Larga com ou sem Geotêxtil, (a) Relação entre granulometria do solo de cobertura vs tensão na ruptura, (b) Relação entre granulometria do solo de cobertura vs deformação na ruptura (Modificado Reddy *et al.*, 1998).

Segundo Tognon *et al.* (2000) um dos principais problemas associados com o uso de pedregulho nos sistemas de drenagem é o efeito sobre a geomembrana, particularmente nas altas tensões 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 podem ser introduzidos entre a geomembrana e o pedregulho de drenagem.

Uma avaliação da proteção contra furos restringe 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 2.28 ilustra os danos ocorridos em geomembranas com proteção de geotêxtil.



Figura 2.28. Danos mecânicos em geomembrana com proteção de geotêxtil de 1200 g/m² (duas camadas de 600g/m² cada uma) sob carga de 900 kPa aplicada durante 720min. (Tognon *et al.*, 2000).

Para a avaliação da eficiência das camadas de proteção, Budka *et al.* (2007) simularam a etapa de instalação de geomembranas de PEAD em uma base de solo compactado, com a construção de um campo experimental de 540m². Para a proteção da geomembrana foram utilizados geotêxteis de diferentes gramaturas, espessura e resistência. Foi executada uma camada com brita, empregando-se duas configurações: uma com brita angular e outra com brita arredondada. Os danos foram ocasionados pela movimentação de caminhões e tratores sobre as camadas de brita.

A presença de danos foi avaliada por meio de análises visuais e ensaios de tração biaxial. Com os resultados obtidos foi verificado que as britas angulares ocasionam danos mais contundentes que as britas arredondadas, aliás a ocorrência de danos reduz a resistência à tração. "Estudos realizados por Tognon *et al.* (2000), avaliaram a deformação da superfície das geomembranas devido à incidência de partículas de brita. Por meio de um novo método proposto, foram comparados os resultados obtidos com os correspondentes ao método tradicional da arco de alongamento" (Geroto, 2008).

Com base nas deformações determinadas pelos autores, comparou-se o desempenho de alternativas de proteção para geomembranas, tais como geotêxteis não tecidos e uma camada de geotêxtil preenchido com areia ou borracha. Os melhores desempenhos foram verificados para as alternativas com o colchão de borracha, com deformações da ordem de 1,0%. Para as alternativas de proteção em que se empregaram geotêxteis não tecidos, foram observadas deformações próximas a deformação de escoamento da geomembrana utilizada, da ordem de 13%.

Segundo Geroto (2008), há duas filosofias difundidas no meio técnico para avaliar o desempenho das camadas de proteção. A filosofia americana é baseada na prevenção de danos em curto prazo, onde deve-se garantir que o alongamento não ultrapasse o ponto de escoamento das geomembranas sem que ocorram perfurações. A filosofia alemã, baseada na prevenção de danos em longo prazo, procura restringir deformações na superfície da geomembrana que possam acelerar processos de ruptura frágil, como o fenômeno de fissuramento sob tensão (FST).

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.

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 ensaios de puncionamento hidrostático e carregamento estático, que por sua vez fazem parte dos ensaios de desempenho. A pesquisa classificou os danos ocorridos na superfície da geomembranas como:

- Arranhões: riscos e marcas ocasionadas pelo contato direto da brita;
- Entalhe: pequena deformação, sem a ocorrência de furo, devido à tensão 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 geomembranas.

Segunda a pesquisa, nos ensaios de puncionamento hidrostático com a base de britas pontiagudas e lamelares, para o caso das geomembranas isoladas, foi observado que 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, enquanto que 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, ocorre 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.

A Figura 2.29(a) apresenta a ruptura da geomembrana de PVC por rasgo na região de contato com a aresta de britas lamelares e a Figura 2.29(b) apresenta a ruptura por puncionamento em geomembrana de PEAD.

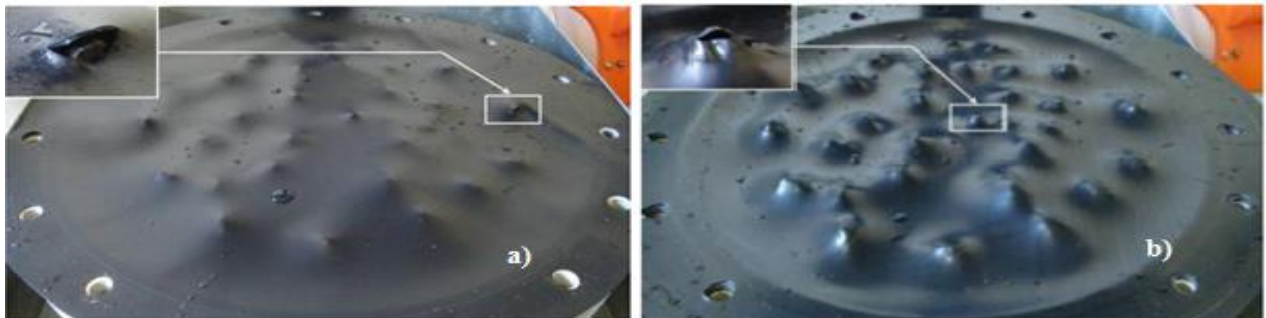


Figura 2.29. Ruptura em geomembranas: (a) por rasgo em geomembrana de PVC, (b) por puncionamento em geomembrana de PEAD (Geroto, 2008).

Na sua pesquisa, Geroto (2008) concluiu que o emprego das camadas de proteção proporcionou um incremento da resistência ao puncionamento para as geomembranas de PVC e de PEAD. A introdução de geotêxteis de proteção, para o caso das geomembranas de PVC, impedia o contato direto da geomembranas com a ponta do cone truncado. Assim, a ruptura da geomembranas ocorria após a ruptura do geotêxtil e consequente contato direto da geomembranas com o cone. Para as geomembranas de PEAD, foi verificada, em alguns casos, a ruptura do material independente da ruptura do geotêxtil de proteção. A pesquisa concluiu também que o incremento de resistência da geomembrana deve-se ao emprego de materiais de maior resistência e espessura, já que estes materiais, mesmo quando submetidos a esforços de compressão, geram um aumento do diâmetro do contato do cone com a superfície da geomembrana, e, em consequência, uma maior distribuição das tensões na superfície da geomembrana nestas regiões. Também foi possível observar que os geotêxteis mais flexíveis deformam-se em conjunto com a geomembrana, o que impede o contato direto da geomembrana com o cone, aumentando a resistência ao puncionamento do conjunto.

2.3. ESTATÍSTICA.

Há muitos anos que a engenharia civil tem-se apoiado na estatística para resolver diferentes problemas, tais como a variação de parâmetros de resistência de materiais naturais ou artificiais sob diferentes condições. A estatística se divide em três grandes áreas (Assis, 2014):

- Amostragem e Planejamento de Experimentos (mecanismo de coleta de dados);
- Estatística Descritiva (organização, apresentação e sintetização de dados);
- Estatística Inferencial (métodos de interpolar ou extrapolar dados para tomada de decisão em situações com incertezas).

A continuação é explicada a estatística descritiva e teste de hipóteses.

2.3.1. ESTATÍSTICA DESCRITIVA.

Envolve a coleta, a apresentação e caracterização de um conjunto de dados. A apresentação dos dados pode ser feita por meio de tabelas onde se encontram organizados de menor a maior ou também mediante de gráficos como os histogramas de frequências os quais permitem observar o comportamento dos dados assim como sua distribuição.

Para a caracterização do conjunto de dados existem medidas de tendência central que pelo geral permitem a escolha de um valor central torno no qual se encontram os dados do conjunto e permite descrever o mesmo, dentro destas medidas estão a média aritmética, a mediana e a moda. Também existem medidas de variação que indica a quantidade de dispersão ou de espalhamento dos dados, entre elas encontramos: variância, desvio padrão e coeficiente de variação (este último é muito utilizado para este tipo de descrição já que é um valor constante). E por último estão as medidas de formas que descreve a maneira como estão distribuídos os dados.

2.3.2. TESTE DE HIPÓTESE.

Com o teste de hipótese se procura estabelecer a diferença ou similitude entre dois conjuntos de dados. Uma maneira simples de realizar esse teste é utilizando a distribuição de “student”, por meio do qual e com um nível de confiança do 98% (valor para materiais industriais), se determina um intervalo de confiança onde se encontra a média populacional de um conjunto de

dados. A continuação se compara este intervalo de confiança com as médias amostrais de outros conjuntos de dados, se aquelas médias amostrais se encontram dentro do intervalo de confiança pertence ao mesmo conjunto de dados, ou seja, não existe nenhuma diferença entre esses dois conjuntos de dados.

Se por outro lado as médias amostrais não se encontram dentro do intervalo de confiança, isso significa que são dos conjuntos de dados totalmente diferentes.

Outra maneira de realizar este tipo de comprovações é mediante a análises das variâncias ou análise Anova, a qual mediante a distribuição de Fisher se faz a comparação da variância de dois conjuntos de dados e determinando um valor F e um valor de $F_{\text{crítico}}$, se esse valor de F é maior que $F_{\text{crítico}}$ então os dados pertencem à mesma população, se pelo contrário o valor é menor se fala que existem dois conjuntos de dados diferentes.

3. METODOLOGIA: EQUIPAMENTO, MATERIAIS, MÉTODOS DE ENSAIO E ANÁLISE.

3.1 INTRODUÇÃO.

A geomembrana, durante sua instalação e posterior vida útil, pode apresentar danos devido às solicitações compressivas geradas pela carga dos rejeitos de mineração depositados no local. Os danos sofridos podem modificar as propriedades mecânicas da geomembrana tal como a resistência à tração. Nesta ordem de ideias, o ensaio de dano por compressão vertical visa simular no laboratório, as tensões que suportam as geomembranas durante sua vida útil, para após avaliar a queda na resistência à tração por meio do ensaio segundo a norma ASTM D4885 “*Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembrane by Wide Strip Tensile Method*”. Os ensaios de dano foram realizados para 5 níveis de tensão: 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa, com 24 repetições em cada nível de solicitação, associadas a uma espessura de geomembrana de 1 mm, resultando em 120 ensaios de dano mecânico por compressão. No ensaio de resistência à tração foram feitos 131 testes segundo a normativa atual. Após os resultados do ensaio de resistência, foi realizada uma análise estatística com a qual obteve-se um fator de redução dessa propriedade mecânica. Neste capítulo são descritos os equipamentos utilizados nos ensaios de dano de média escala e resistência à tração, assim como os materiais granulares usados (brita 3 e areia), material geossintético testado (geomembrana de PVC) e a metodologia usada para atingir o objetivo da pesquisa.

3.2. EQUIPAMENTO DE DANO MECÂNICO DE MÉDIA ESCALA

Este ensaio permite simular os danos mecânicos que apresentam as geomembranas por compressão vertical devido a cargas geradas por rejeitos de mineração, em condições pré-determinadas em laboratório.

3.2.1. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA.

O equipamento de média escala utilizado nesta pesquisa foi projetado e construído na Universidade de Brasília e consta de três partes principais: uma célula de dano mecânica e dois sistemas ar-água. Para a presente pesquisa só foi necessário usar um sistema ar-água dos dois existentes (Figura 3.1). A escolha deste equipamento em maior escala está baseada em duas condições: o tamanho do material empregado na pesquisa (material granular grosso) e as dimensões da amostra de geomembrana para o ensaio de resistência à tração (200 mm x 240 mm). O equipamento permite aplicar tensões de até 1000 kPa. As alturas de barragens de ouro e ferro simuladas com as tensões empregadas nos ensaios, com peso específico de 13,96 kN/m³ e 18,84 kN/m³ respectivamente, se apresentam na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Alturas de barragens simuladas no ensaio de dano sobre geomembrana.

Tensão (kPa)	Altura da Barragem Simulada (m)	
	Ouro	Ferro
100	7,16	5,31
200	14,32	10,62
300	21,49	15,92
500	35,82	26,54
1000	71,63	53,1



Figura 3.1. Equipamento de dano por compressão vertical.

3.2.1.1. CÉLULA DE ENSAIO.

A célula de ensaio é composta por três partes: duas caixas metálicas e uma tampa. A caixa inferior tem dimensões de 14 cm de altura, 32 cm de face interna e a caixa superior tem uma altura de 15 cm com uma face interna de 32 cm. A espessura das paredes de ambas caixas é de 1 cm. A tampa tem 34 cm de lado e 2 cm de espessura (Figura 3.2). Com respeito à tampa, a mesma tem uma membrana de borracha fixa a qual é preenchida com água permitindo a aplicação de tensões de até 1000 kPa.

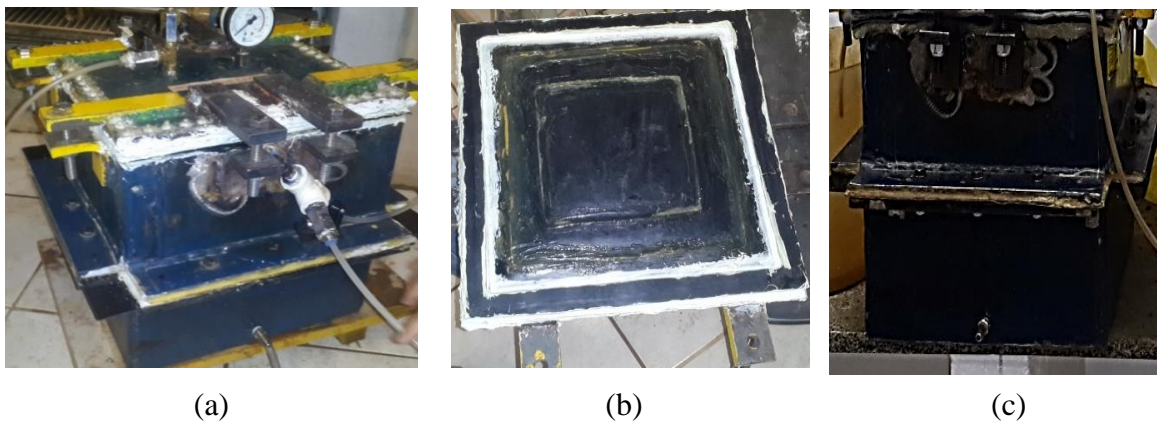


Figura 3.2. Célula de ensaio (a) Equipamento completo, (b) Tampa da célula de ensaio, (c) Caixas metálicas receptoras do material granular.

Na parte inferior do equipamento é preenchida com material granular que procura simular uma camada drenante sobre o solo de apoio (o material granular para o ensaio é areia de granulometria grossa), na qual é colocada a geomembrana. Em seguida, é colocada a caixa superior, acima da geomembrana, a qual é fixada à caixa inferior por meio de 12 parafusos e, dentro desta, é colocado o material granular sobrejacente (brita 3). Finalmente põe-se a tampa do equipamento. Em sua porção superior, a tampa tem dois furos: um para a instalação de um manômetro que permite o controle da tensão na bolsa de borracha. No segundo furo têm-se duas válvulas, com diferentes funções; a primeira permite a entrada de água para obter a tensão desejada e a segunda tem função de alívio. O sistema é apresentado na Figura 3.3 e Figura 3.4.

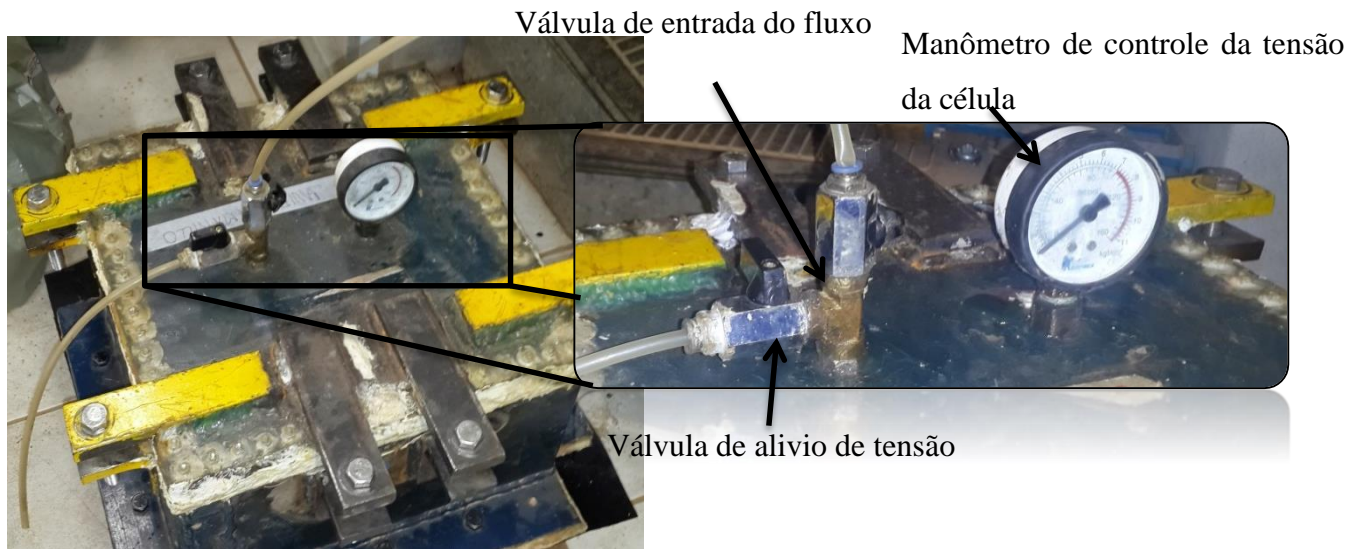


Figura 3.3. Tampa do equipamento com detalhe dos sistemas de controle do fluxo e da tensão.

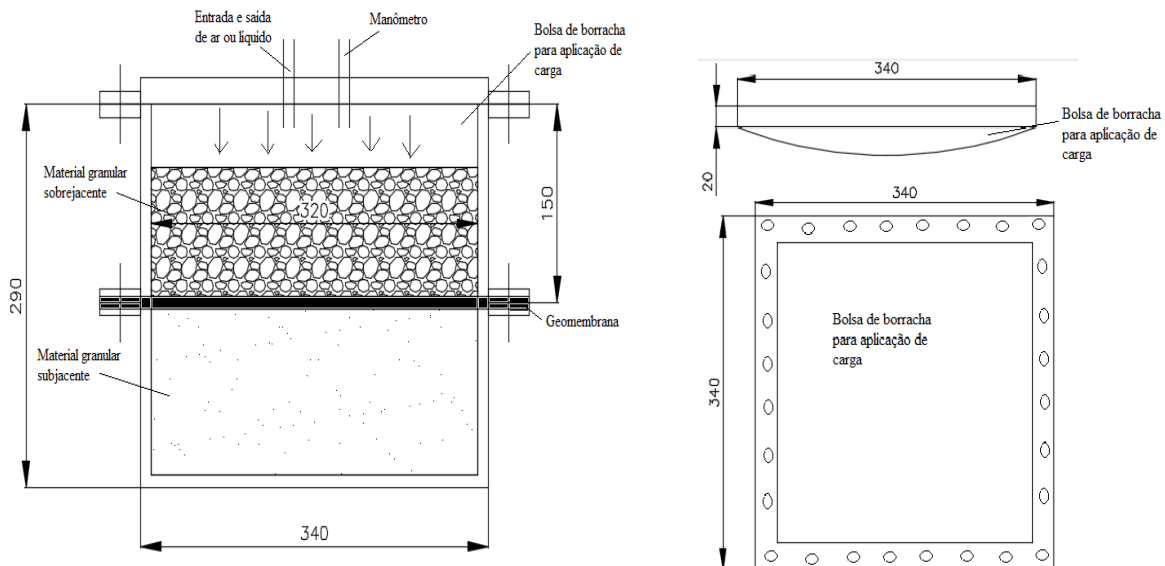


Figura 3.4. Esquema do equipamento (a) Célula de ensaio com a configuração usada e (b) Tampa do equipamento perspectiva inferior e transversal.

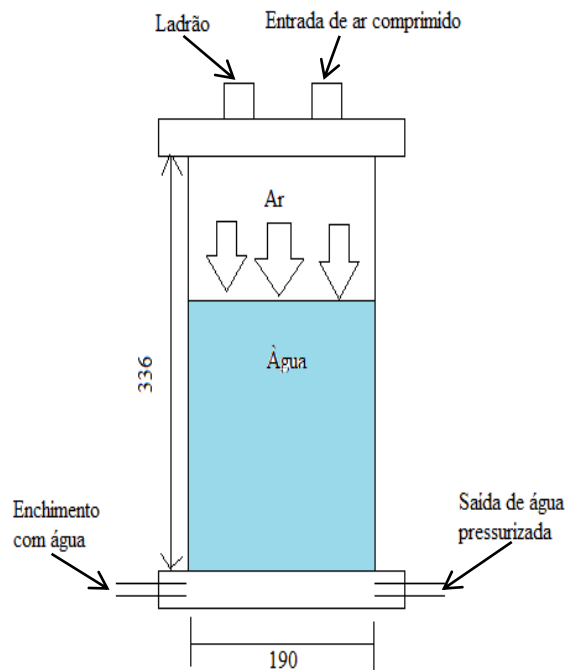
3.2.1.2.SISTEMA AR-ÁGUA.

O sistema de ar-água utilizado no equipamento foi uma câmara de equipamento triaxial, fabricado pela empresa *Wykeham Farrance Engineering LTD*. Sua escolha deveu-se a que o mesmo já se encontrava disponível no laboratório da UnB. A célula do reservatório d'água é transparente o que torna fácil o controle do nível de água mediante uma fita métrica. Este controle é necessário para determinar quando os deslocamentos devido a recalques das camadas drenantes se encontram estabilizados.

O sistema tem uma altura de 33,6 cm com um diâmetro de 19,0 cm. Na Figura 3.5 se apresenta o detalhe da peça. O funcionamento do sistema é simples: na parte superior do equipamento encontra-se a entrada de ar, além de uma válvula para aliviar a tensão, a qual pressuriza a água que está dentro câmara, os valores de tensão aplicadas foram de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa. A água pressurizada é encaminhada à tampa da célula de ensaio por meio da válvula que se acha na parte inferior do reservatório e de uma mangueira ligada à parte superior da mesma tampa.



(a)



(b)

Figura 3.5. Sistema ar-água (a) Elemento no laboratório, (b) Desenho do sistema (em mm).

3.2.1.3. INSTRUMENTAÇÃO

Durante os ensaios foram empregados dois manômetros. O primeiro deles apresenta-se na Figura 3.6(a), tem como função o controle da tensão que vem do compressor e de estabelecer o valor de tensão necessária para o ensaio. O segundo manômetro (Figura 3.6(b)) foi empregado como controle do valor de tensão que entra na célula de ensaio devido a possíveis perdas apresentadas no sistema e assim garantirá a aplicação da tensão desejada.

Além dos manômetros, foi utilizado um extensômetro para determinar os deslocamentos da tampa devido à tensão aplicada. Com este instrumento foi determinado que o deslocamento na tampa, na sua parte central, foi menor do que 1 mm. Na Figura 3.7 se apresenta o instrumento utilizado para o controle do deslocamento.



(a)



(b)

Figura 3.6. Manômetros para o controle da tensão (a) Manômetro regulador da tensão fornecida ao ensaio, (b) Manômetro de controle da tensão no equipamento do ensaio.



Figura 3.7. Extensômetro utilizado para o controle do deslocamento da tampa.

3.3. MATERIAIS EMPREGADOS.

3.3.1. GEOMEMBRANA

Para a presente pesquisa foi aplicada uma geomembrana de PVC com espessura de 1mm. O critério para sua escolha está baseado no fato que este tipo de geomembranas é frequentemente empregado para o revestimento do fundo das barragens de rejeito de mineração, além da sua disponibilidade no Brasil. Para a escolha da espessura foi levado em conta que é o valor mínimo que recomendam várias instituições no mundo para o revestimento do solo de fundação e assim

evitar contaminação do mesmo. Na Tabela 3.2 encontram-se as principais especificações técnicas da geomembrana.

Tabela 3.2. Especificações técnicas da geomembrana de PVC.

Propriedades	Geomembrana de PVC
Espessura (mm)*	1,0
Resistência à tração (kN/m)**	7,63
Alongamento na Ruptura (%)**	285,6
Resistência ao Rasgo (N)*	25
Resistência ao Puncionamento (N)*	180

(*Dados do fabricante, **Dados autor)

3.3.2. MATERIAL GRANULAR

A escolha do material granular empregado na pesquisa leva em conta o uso destes elementos em barragens de rejeitos. Com base nisso os materiais escolhidos foram: areia grossa e brita 3, visando simular um caso bastante desfavorável em termos de danos.

A areia grossa usada no ensaio é comumente encontrada na área comercial da construção civil do Distrito Federal (Figura 3.8(a)). Para o caso da brita 3 utilizada foi a mesma utilizada nas pesquisas de Ruiz-Gómez (2014) e Sampaio (2013). Este material foi usado no terceiro alteamento da barragem de rejeitos de Jacobina – BA, barragem que foi implantada para o armazenamento dos rejeitos gerados durante os próximos 20 anos. A brita 3 é mostrada na Figura 3.8(b).



(a)



(b)

Figura 3.8. Material Granular: (a) Areia grossa, (b) Brita 3.

Na areia 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). Na Tabela 3.3 e Tabela 3.4 são apresentadas as características da brita 3 e da areia respectivamente. Na Figura 3.9 é mostrada a granulometria do material granular utilizado na pesquisa.

Tabela 3.3. Características da brita 3.

Material	Massa Específica Seca (g/m^3)	Compacidade Relativa (CR) (%)	D₁₀ (mm)	D₅₀ (mm)	Coefficiente de Uniformidade (C_u)	Coefficiente de Curvatura (C_c)
Brita 3	1,5	50	27,0	55,0	2,22	1,04

Tabela 3.4. Característica da areia grossa.

*Dados tomados de Ruiz-Gómez (2014)

Característica	Areia	Rejeito de Ouro*	Rejeito de Ferro*
Massa Específica dos Grãos (ρ_s) g/cm^3	2,66	2,92	3,39
Índice de Vazios Mínimo ($e_{mín}$)	0,63	0,96	0,69
Índice de Vazios Máximo ($e_{máx}$)	0,9	1,14	0,84
Compacidade Relativa (CR) %	85	50	50
Peso Específico Seco (γ_d) kN/m^3	15,5	13,96	18,84
D₁₀ (mm)	1,4	0,08	0,085
D₅₀ (mm)	1,8	0,18	0,21
Coefficiente de Uniformidade (C_u)	1,4	2,5	2,82
Coefficiente de Curvatura (C_c)	0,85	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 = coeficiente de uniformidade, C_c = coeficiente de curvatura.

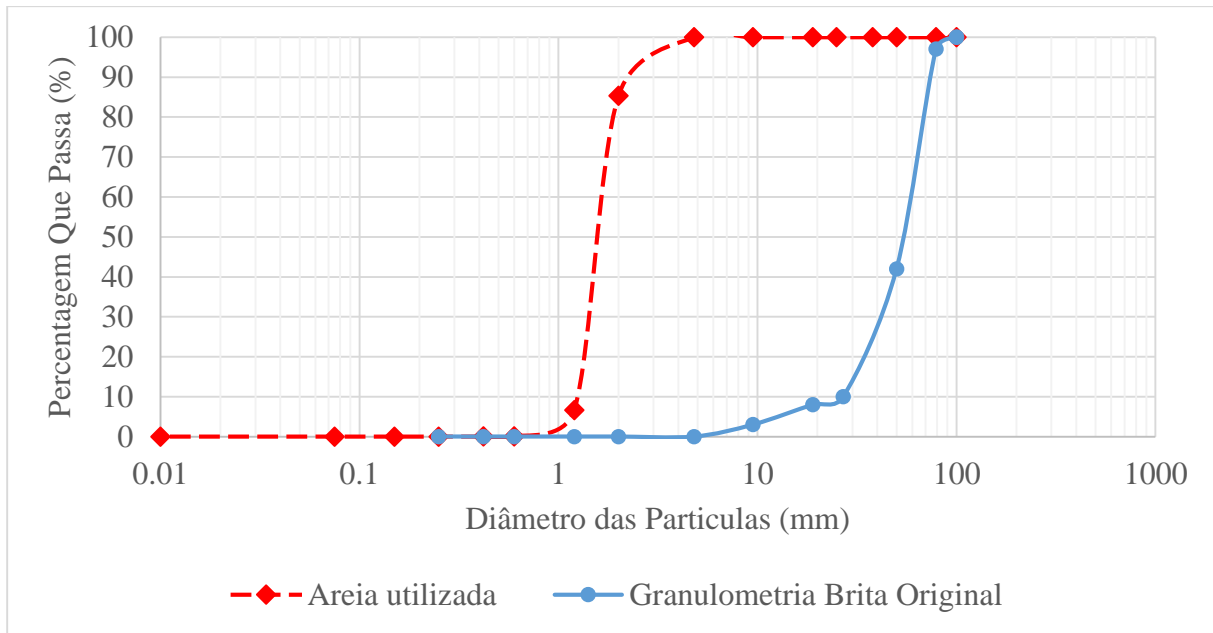


Figura 3.9. Granulometria da brita 3 e da areia grossa usada no ensaio de dano.

Os dois tipos de materiais apresentaram granulometrias de tamanhos uniformes de partículas. Para o caso da brita 3 a razão da escolha deste tipo de granulometria foi simular as características de uma camada drenante em uma barragem de rejeito em escala real. Com respeito à areia procurou-se encontrar as características de uma camada drenante em contato com o solo de fundação e que evite possíveis tensões por parte de gases ou lençóis freáticos artesianos. Foi estabelecido um nível de compactação no valor de 85%, areia muito densa de excelentes características mecânicas e que fornece uma rigidez similar à vista em campo para este tipo de camadas (usada em projetos como UHE Tucuruí (Penna, 2007)). A anterior característica foi mantida para todos os ensaios a fim de garantir a repetitividade dos mesmos. Na Figura 3.10 se observa a uniformidade na granulometria assim como detalhe dos grãos da mesma areia.

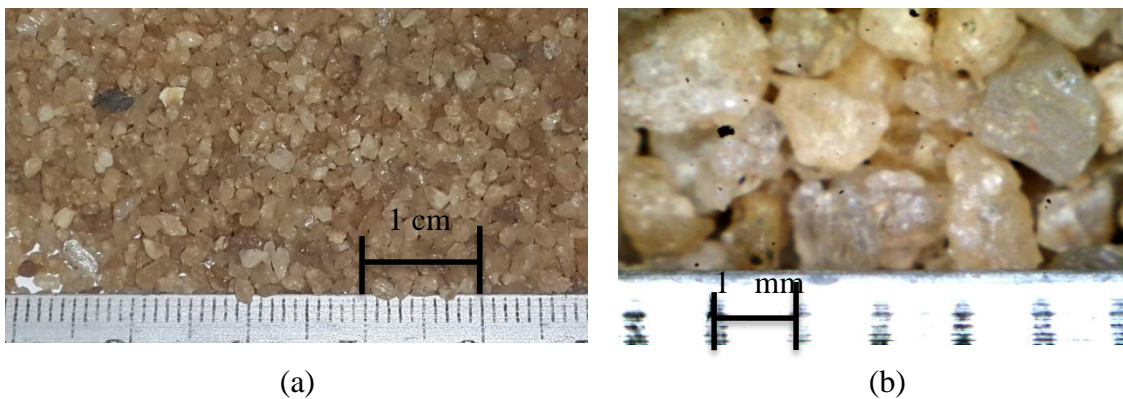


Figura 3.10. Granulometria e tamanho de grão usado para a areia. (a) Areia usada no ensaio de dano, (b) Detalhe da areia usada no ensaio de dano.

3.3.3. OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização dos ensaios foi necessário o emprego de outros materiais, tais como:

- Geomembrana de PVC: usada para construção da bolsa de aplicação da tensão sobre o material granular. Usou-se uma geomembrana de espessura de 2,0 mm a qual fornecia características de resistência adequadas (Figura 3.11a);
- Borracha natural: para vedar as fugas de água que tinham nas juntas da tampa, a espessura utilizada era de 1,5 mm (Figura 3.11b);
- Cola vedante: com função de vedação nos locais onde se apresentaram fugas de água, além de as diferentes uniões entre mangueiras, válvulas e a tampa (Figura 3.11c);
- Geotêxtil de poliéster: com uma gramatura de 600 g/m², cuja função era a de proteger a bolsa de aplicação de tensão (Figura 3.11d).
- Vaselina sólida e filme plástico: tem a função de diminuir o atrito que pudesse ocorrer entre o material granular usado nos ensaios e as paredes do equipamento, visando minimizar sua influência.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.11. Material complementar utilizado nos ensaios: (a) Geomembrana de PVC, (b) Borracha natural, (c) Cola vedante, (d) Geotêxtil de Poliéster.

3.4. METODOLOGIA DA PESQUISA.

3.4.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a preparação das amostras de geomembrana foram levadas em conta as seguintes considerações: primeiramente o rolo de geomembrana foi colocado sobre uma mesa limpa e plana, desprezando as primeiras duas voltas e 10 cm a partir das laterais do rolo da geomembrana.

Posteriormente, foram cortadas amostras retangulares com dimensões em concordância com as dimensões da caixa de ensaio de dano. Após a obtenção das amostras, elas foram armazenadas em sacolas plásticas com o fim de evitar alterações das suas propriedades por dano ou manuseio. A Figura 3.12 mostra o detalhe da amostra usada.



Figura 3.12. Amostra obtida do rolo de geomembrana e pronta para o ensaio de dano.

3.4.2. MONTAGEM DO ENSAIO DE DANO NO EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA

Para o ensaio de dano no equipamento de média escala foi feito em primeiro lugar a colocação de vaselina nas paredes da caixa superior e inferior para sua lubrificação, seguida da aplicação de um filme plástico sobre a camada de vaselina. Este tipo de medida visa diminuir o atrito que se apresenta entre as paredes do equipamento e o material granular empregado no ensaio.

Após a aplicação do filme, foi então colocada a primeira camada de areia por meio de uma chuva fornecida por um funil a qual foi compactada até atingir uma altura de 4,5 cm, repetindo-se o até processo atingir uma altura final de 14 cm. Sobre a camada de areia era posicionada a geomembrana de PVC e, acima desta, foi arranjada a caixa superior do equipamento e fixada à parte inferior deste junto com a geomembrana. A geomembrana deve ficar levemente submetida à tensão e totalmente plana sem deformação prévia alguma (simulando a colocação teórica desta no campo). Em seguida, a caixa superior era preenchida com a brita, onde para sua colocação foi feita uma chuva similar à da areia evitando-se que o material sofresse uma segregação.

Uma vez feita a colocação da camada drenante, era fixada a tampa com a bolsa de aplicação de tensão, que se encontra ligada ao sistema ar-água cuja função é transmitir a tensão aplicada. A

Figura 3.13 mostra o processo de montagem do equipamento de dano de média escala e na Figura 3.14 a configuração utilizada nos ensaios após a montagem.

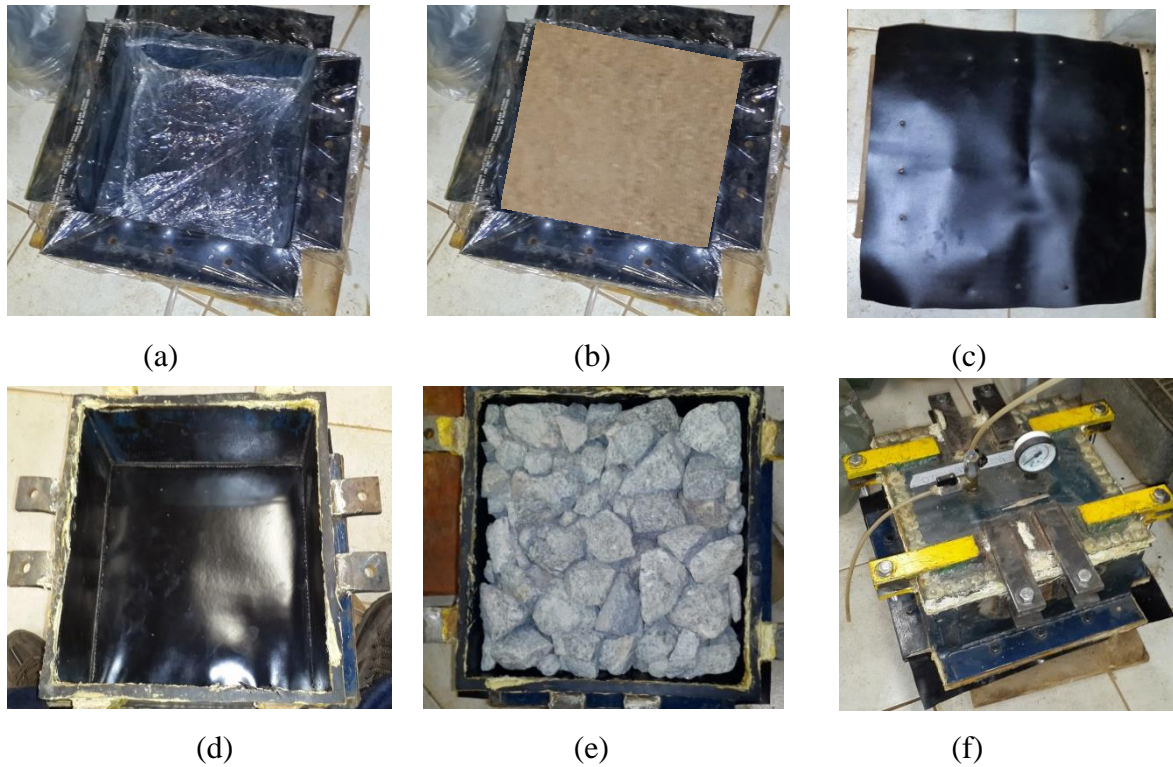


Figura 3.13. Processo de montagem do ensaio de dano: (a) Colocação da vaselina e filme plástico, (b) Preenchimento da caixa inferior com areia, (c) Colocação da geomembrana, (d) Fixação da caixa superior, (e) Preenchimento da caixa superior com brita, (f) Colocação da tampa e fechamento do equipamento.

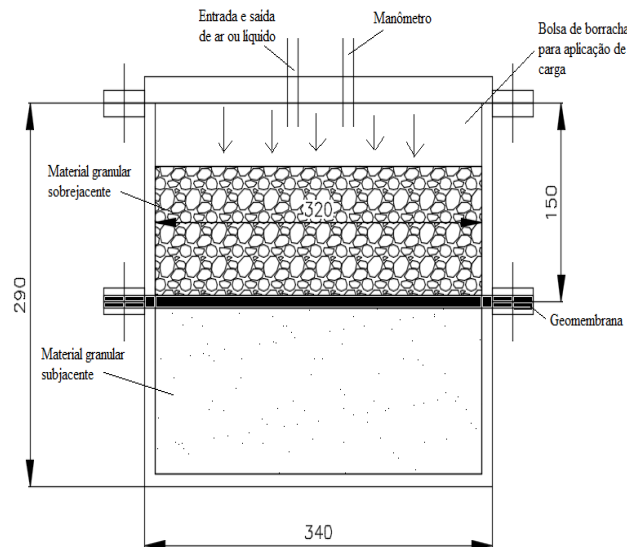


Figura 3.14. Vista transversal do ensaio.

3.4.3. PROCEDIMENTO DA PESQUISA.

Na Figura 3.15 se apresenta o esquema do processo seguido nesta pesquisa.

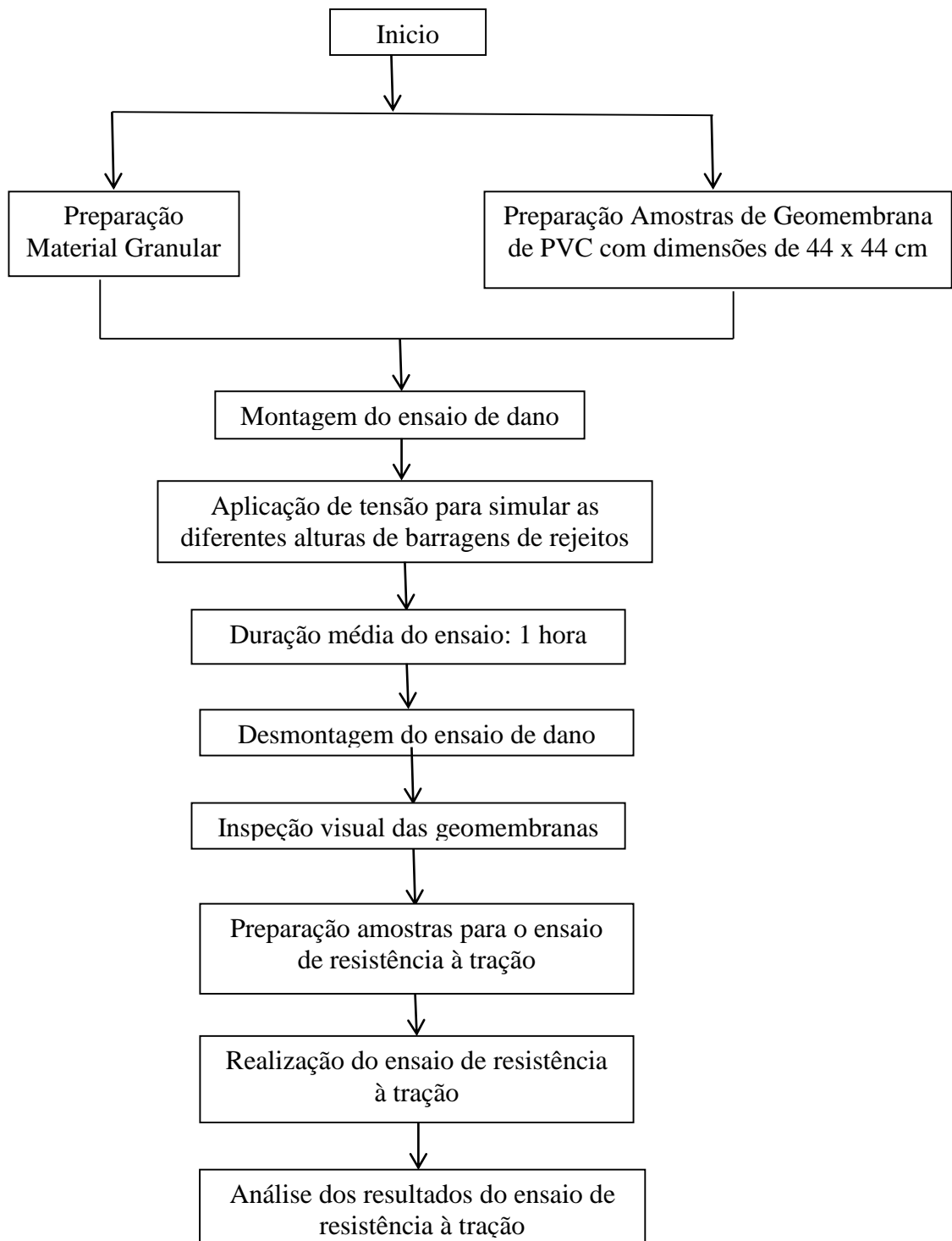


Figura 3.15. Procedimento aplicado na pesquisa

3.4.5.1. EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA

Neste equipamento, desenvolvido por Nascimento (2002), foram feitos ensaios de dano mecânico, onde foram aplicadas tensões de compressão por meio de uma bolsa de PVC a qual procurava simular as cargas provenientes das camadas de material de mineração. As tensões geostáticas simuladas foram 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa as quais correspondiam a alturas de barragens como apresentadas na Tabela 3.1.

Cada tensão foi aplicada a uma geomembrana de PVC de 1 mm de espessura a qual se encontrava entre uma camada de areia (que visava simular as condições de uma camada drenante entre o solo de fundação e a geomembrana) e uma camada de brita (camada superior que procurava simular o elemento drenante da estrutura de contenção de rejeitos).

Na preparação da areia o procedimento adotado foi o seguinte: primeiramente a areia foi submetida a um peneiramento para retirar o material fino que ela apresentava. Posteriormente foi preparada uma quantidade para cada ensaio de 22,7 kg de amostra seca ao ar. Esse valor de areia procurava garantir a compactação relativa prevista. Cabe mencionar que, para manter esse valor de compactação, o material foi colocado em três camadas de 4,5 cm de altura. Para cada camada se realizou uma chuva de areia seguido de uma compactação aplicando 27 golpes de forma uniforme sobre toda a superfície. O número de golpes foi obtido por meio de tentativas até atingir-se o preenchimento integral da caixa com todo o material granular.

Para a brita levando-se em conta o valor da massa específica seca da brita 3 e as dimensões da caixa superior do equipamento, é possível calcular a quantidade de material que é necessário para preencher a caixa (21,6 kg), este mesmo era colocado manualmente com o objetivo de manter uma distribuição única em todos os ensaios realizados.

Levando-se em conta as recomendações dadas por Ruiz-Gómez (2014) e Nascimento (2002) o tempo de aplicação da carga seria aquele onde a variação das deformações por compressão fossem iguais a zero (estabilização das deformações da configuração utilizada no ensaio). Para o controle da deformação do sistema, foi usada uma fita métrica instalada dentro do sistema ar-água, a qual mostrava a variação do nível de água que preenchia a bolsa de PVC. Quando o nível de água ficava estável indicava que a água não estava mais passando do sistema para a bolsa de PVC o que significava que as deformações na configuração utilizada já tinham parado. Para a presente pesquisa a estabilização das deformações ocorreu em média após 10 minutos

do início do ensaio mas, para maior certeza nos resultados, o carregamento foi mantido por um tempo igual a uma hora.

Em cada etapa de carregamento foi retirada a amostra ensaiada para análise visual e posterior ensaio de resistência à tração, sendo colocada uma nova amostra de geomembrana em seguida. A identificação de cada amostra se encontra na Tabela 3.5. Cabe ressaltar que foram feitos 24 ensaios por carga para um totalizado de 120 ensaios de dano mecânico.

Tabela 3.5. Identificação das amostras.

Identificação	Configuração do ensaio
GM-PVC-1-100kPa-1-MD	Geomembrana de PVC + espessura em mm + tensão aplicada + número de amostra + direção de tração (MD, machine direction)
GM-PVC-1-200kPa-1-MD	Geomembrana de PVC + espessura em mm + tensão aplicada + número de amostra + direção de tração
GM-PVC-1-200kPa-1-CD	Geomembrana de PVC + espessura em mm + tensão aplicada + número de amostra + direção de tração (CD, cross machine direction)

3.4.4. INSPEÇÃO VISUAL DOS DANOS SOFRIDOS NO ENSAIO

Depois de feitos os ensaios de dano mecânico as amostras foram submetidas a inspeção visual com o objetivo de determinar a presença de perfurações, rasgos ou imtensões de contato dos materiais granulares. A inspeção visual das geomembranas era feita em dois momentos: quando a carga e a camada drenante eram retiradas (Figura 3.16(a)) e antes da amostra ser armazenada (Figura 3.16(b)).



Figura 3.16. Inspeção visual da geomembrana: (a) Após retirada a carga e camada de drenagem e (b) Antes do armazenamento.

3.4.5. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para os ensaios de resistência à tração foram avaliadas 130 amostras, as quais se encontram discriminadas da seguinte forma: 120 ensaios para amostras submetidas ao ensaio de dano mecânico e dez para amostras virgens. Com relação às geomembranas ensaiadas e que antes foram submetidas a um dano mecânico estavam divididas por tensão aplicada; para cada tensão, foram feitos 24 ensaios de resistência sendo 12 ensaios na direção *MD* (*Machine direction*) e 12 ensaios na direção *CD* (*Cross machine direction*). Da mesma forma, também foram feitos os ensaios para as amostras virgens (5 na direção *MD* e 5 na direção *CD*).

A resistência à tração foi determinada em amostras virgens e danificadas com fins comparativos e segundo a norma ASTM D4885, a qual recomenda fazer cinco ensaios para cada direção de fabricação (*MD* e *CD*) e que com essa quantidade de testes é possível obter dados confiáveis com o objetivo de realizar uma análise estatística.

3.4.5.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.

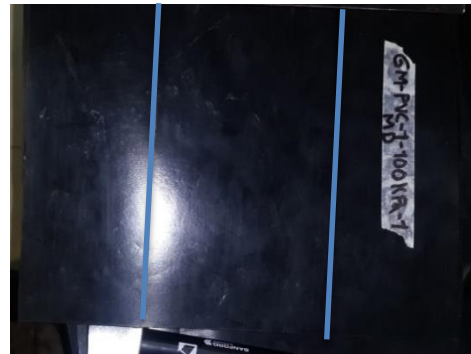
A amostra utilizada para o ensaio de resistência à tração tem dimensões de 200 mm de largura por 240 mm de altura, na qual é desenhada uma faixa central de 200 mm de largura por 100 mm de altura conforme especificado em norma, é a faixa central a qual será ensaiada. O critério para realizar o corte nas geomembranas danificadas foi estabelecer uma região na qual se apresentará o maior dano (resultado de uma inspeção visual), e que a mesma estivesse centrada na amostra de 44 cm por 44 cm longe dos limites dimensionais do elemento já ensaiado (Figura 3.17).

3.4.5.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO

Para a realização deste ensaio, foi utilizada uma prensa universal da EMIC, modelo DL2000 a qual tem uma capacidade de aplicação de carga até 20 kN. A prensa está constituída por duas garras cuja função é transmitir a carga aplicada ao elemento ensaiado. Na parte superior da garra de cima são medidos os deslocamentos e existe uma célula de carga que transmite os dados de força a um equipamento para seu processamento. Para a abertura das garras é usado um sistema ar. O equipamento pode ser observado na Figura 3.18. As garras utilizadas no ensaios usam a pressão do ar para assegurar a amostra.



(a)



(b)

Figura 3.17. Preparação amostra para o ensaio de resistência à tração: (a) amostra após o ensaio de dano, (b) Amostra preparada para o ensaio de tração com a faixa central desenhada.



Figura 3.18. Equipamento para o ensaio de resistência à tração.

3.4.5.3. PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio de resistência à tração fornece valores de alongamento e força aplicada no material testado e o procedimento seguido para a realização dos ensaios é o normatizado pela ASTM D4885-01 (2011), “*Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembranes by the Wide Strip Tensile Method*” e é explicado abaixo:

1. Colocar a amostra entre as duas garras do equipamento mantendo uma distância de 100 mm;
2. Inserir uma velocidade de ensaio de 10 mm/min;
3. Aplicar o carregamento de tração sobre a geomembrana, mantendo a razão da velocidade requerida;
4. Manter a carga de tração até que a geomembrana apresente rasgo ou ruptura da sua estrutura;
5. Salvar os dados de alongamento e força aplicada na geomembrana.

Na Figura 3.19 se observa a sequência do ensaio de resistência à tração sobre uma geomembrana de PVC de 1,0 mm de espessura.

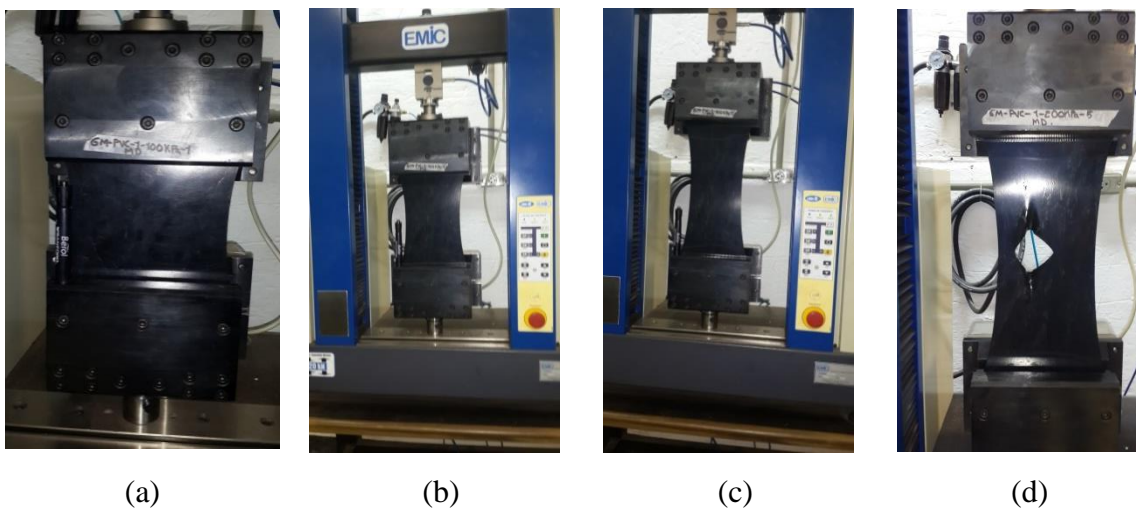


Figura 3.19. Seqüência do ensaio de resistência à tração: (a) Montagem da amostra, (b) Início do ensaio, (c) Durante o ensaio, (d) Ruptura da geomembrana no ensaio.

3.4.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.

Para a análise dos diferentes resultados obtidos, ensaios de danos e de resistência à tração, foram feitos 24 ensaios de dano para cada nível de tensão, sendo feitas 5 tensões, e igual número de ensaios para medir a variação na resistência à tração da geomembrana.

Com o fim comparativo, além dos ensaios para medir a variação, também foram feitos dez ensaios de tração em geomembranas virgens. A continuação é feita uma descrição do procedimento realizado para as duas etapas da análise estatística.

3.4.6.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE DANO

O objetivo de realizar esta análise é determinar a variação do nível de água em cada tensão aplicada e se o mesmo apresenta repetitividade em todos os ensaios para uma mesma tensão. Esta análise é uma parte complementar a outros resultados obtidos dos ensaios.

Em primeiro lugar foram tomados os dados últimos da variação do nível de água, ou seja, o valor onde a deformação da bolsa de aplicação de carga se estabilizou. Tendo em conta esse valor e a área da célula do sistema ar-água e a altura da caixa superior, foi possível encontrar a deformação da camada da brita junto à geomembrana sob a tensão desejada. Uma vez tendo esse valor para cada um dos 24 ensaios, foi realizado o agrupamento em cinco classes e calculada as suas frequências (por tensão), assim como as características dos dados (média, mediana, valor máximo, valor mínimo, moda, variância, desvio padrão, coeficiente de variação e medidas de forma). Com os valores do volume, foi possível estabelecer a repetitividade dos ensaios e a variação da deformação que se tem de uma carga para a outra e estabelecer assim a influência da carga.

A estatística descritiva dos dados foi encontrada levando-se em conta o fato de os dados pertencerem a uma amostra de uma população infinita. Se fala de uma população infinita já que não é possível ensaiar todas as geomembranas existentes, fato pelo qual são usadas amostras que representam dita população. Para a realização desta análise foi usado uma planilha eletrônica.

3.4.6.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.

Para a análise estatísticas dos dados foi usada uma quantidade de 24 amostras por tensão aplicada que, para um total de 5 tensões aplicadas, somam uma quantidade total de cento e vinte amostras.

Os dados de cada tensão foram agrupados em 5 classes e estabelecida sua frequência, como foi feito para a análise dos dados do ensaio de dano, e calculadas suas características. Para o caso das amostras virgens foram feitos dez ensaios para determinar o valor padrão da resistência à tração assim como do valor da deformação da geomembrana em seu estado original.

Com os dados obtidos, procurou-se uma distribuição que os representasse e foi feita uma comparação da mudança do valor da resistência, da deformação e dos módulos secantes a 5% e 10% de deformação, além disso foi utilizada uma análise Anova para determinar se a direção de fabricação tem influência sobre o valor da resistência, ou seja, se existe uma diferença entre os valores encontrados para a direção *MD* e *CD*. Como análise complementar, também foi realizada a comparação entre os resultados obtidos nas diferentes tensões para determinar a variabilidade entre elas.

Baseando-se no que foi explicado anteriormente, o procedimento adotado foi o estabelecido por Santos (2011):

Em primeiro lugar foi determinado o valor médio da resistência à tração da geomembrana virgem (\bar{F}_0) e assim ter a medida de referência. Com o valor de referência \bar{F}_0 e adotando-se a distribuição de *Student* foi determinado o intervalo de confiança e com nível de confiança de 98% (para materiais industriais). O motivo da escolha deste tipo de distribuição é devido ao fato de que o tamanho da amostra é menor a trinta dados ($n < 30$) e, além disso, é uma distribuição muito utilizada para a inferência estatística, particularmente quando o valor do desvio padrão é desconhecido. Para o intervalo de confiança foi utilizada a Equação 3.1.

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde: t = variável aleatória da distribuição de *Student*, \bar{X} = média amostral, μ = média populacional, S = desvio padrão amostral, n = número de amostras não pertencentes à população.

Uma vez calculado o intervalo de confiança, foram determinados os valores médios da resistência à tração para as amostras com danos (\bar{F}_{100} , \bar{F}_{200} , \bar{F}_{300} , \bar{F}_{500} , \bar{F}_{1000}). Com os valores obtidos da resistência, foi verificado se os mesmos encontravam-se dentro do intervalo de confiança estabelecido pela resistência média à tração das amostras virgens. Já que o intervalo de confiança representa o trecho onde pode-se encontrar a média populacional da resistência à tração e a partir dele é possível determinar se a variação é ou não importante \bar{F}_i comparada a \bar{F}_0 . Se \bar{F}_i encontra-se dentro do intervalo o fator de redução será de 1, já que a mudança no valor da resistência à tração não é alta. Por outro lado, se o valor de \bar{F}_i não se encontra dentro do intervalo de confiança, o cálculo do fator de redução é feito com base no valor de \bar{F}_0 e \bar{F}_i . ($FR = \bar{F}_i / \bar{F}_0$). O mesmo procedimento foi aplicado para as outras características obtidas do ensaio de resistência à tração como a deformação e os módulos secantes, ou seja, se determinou um

intervalo de confiança a partir do valor médio das geomembranas virgens para essas propriedades e verificou-se se os valores médios das geomembranas danificadas estavam dentro deste intervalo ou não, para posteriormente achar-se um fator de redução próprio da deformação e módulo secante.

A avaliação das outras características do ensaio de resistência à tração visa estabelecer se existe ou não um acréscimo na rigidez do material estudado. A Figura 3.20 apresenta a metodologia da análise estatística realizada na pesquisa.

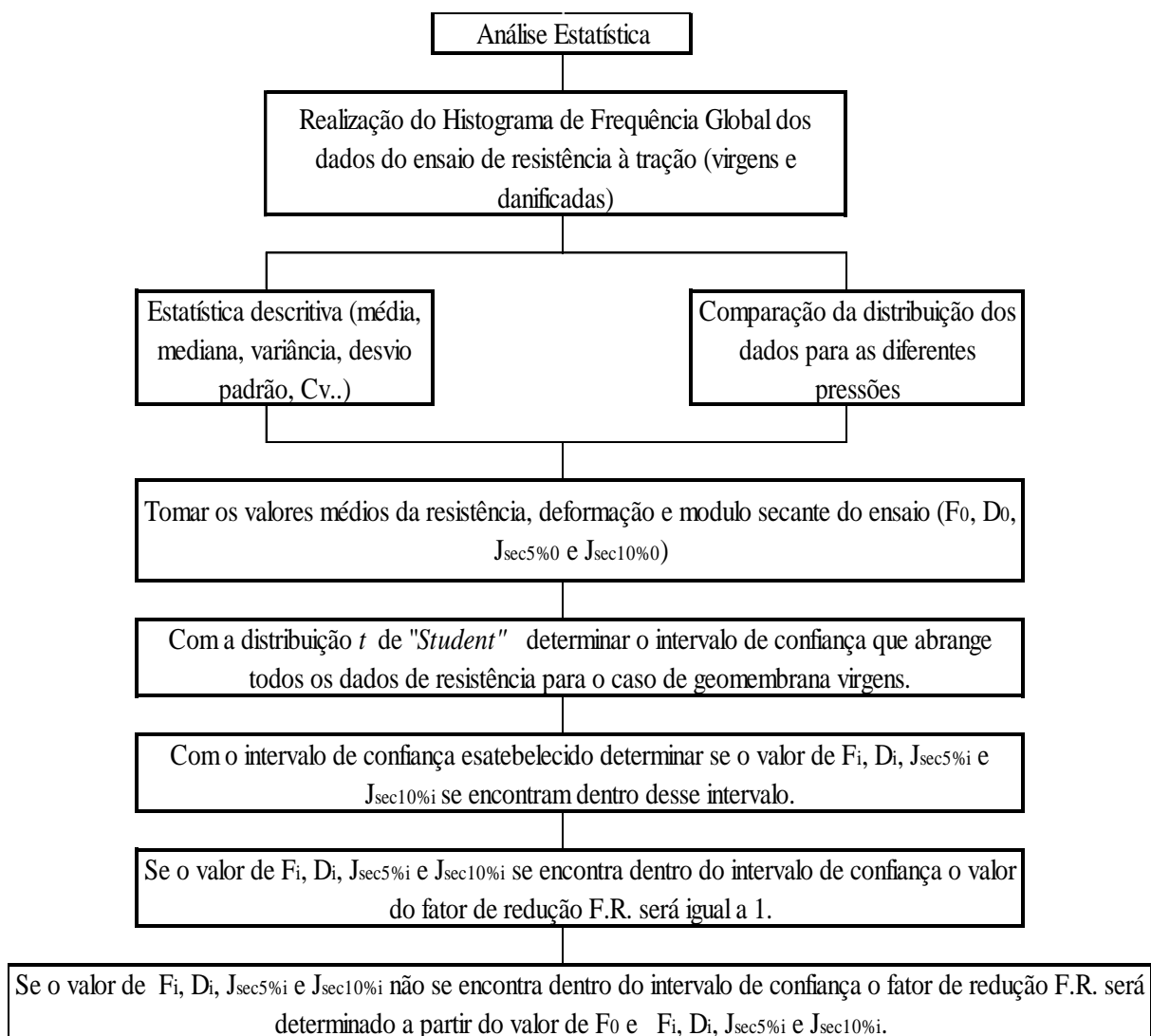


Figura 3.20 Metodologia da análise estatística feita na pesquisa.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. INTRODUÇÃO

Para a avaliação da variação da resistência à tração da geomembrana devida a danos, em primeiro lugar foram feitos ensaios de dano mecânico num equipamento de média escala, escolhido pelas características próprias dos materiais empregados na realização dos ensaios (areia e brita 3) e, em segundo lugar, foram feitos ensaios de resistência à tração das geomembranas tanto virgens como danificadas. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do ensaio de dano assim como a análise realizada com base nesses resultados e, além disso, também é apresentada a análise estatística feita para verificar a repetitividade dos ensaios de dano. De forma complementar, também são apresentados os resultados das granulometrias dos materiais empregados antes e após da realização dos ensaios de dano mecânico para verificar se os materiais sofreram modificações nas suas granulometrias. Por último são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração assim como as análises estatísticas realizadas para geomembranas virgens e danificadas.

4.2. ENSAIO DE DANO EM EQUIPAMENTO DE MÉDIA ESCALA.

A seguir são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de dano mecânico no equipamento de média escala utilizado na pesquisa. O tempo de cada teste foi de uma hora, já que num tempo aproximado a quinze minutos as deformações da configuração utilizada se estabilizavam. Isso também foi observado por Ruiz-Gómez (2014).

4.2.1. VARIAÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA E DEFORMAÇÃO.

Com o intuito de avaliar a repetitividade dos ensaios de dano mecânico, foram analisadas as variações do nível de água assim como da deformação da configuração empregada sob vários níveis de tensão.

Para a tensão de 100kPa, na Figura 4.1 e na Figura 4.2 é possível observar as mudanças do nível de água nos 24 ensaios feitos, onde também é possível notar que o tempo médio para a estabilização do nível de água, de uma maneira geral, foi de 15 minutos (900 segundos).

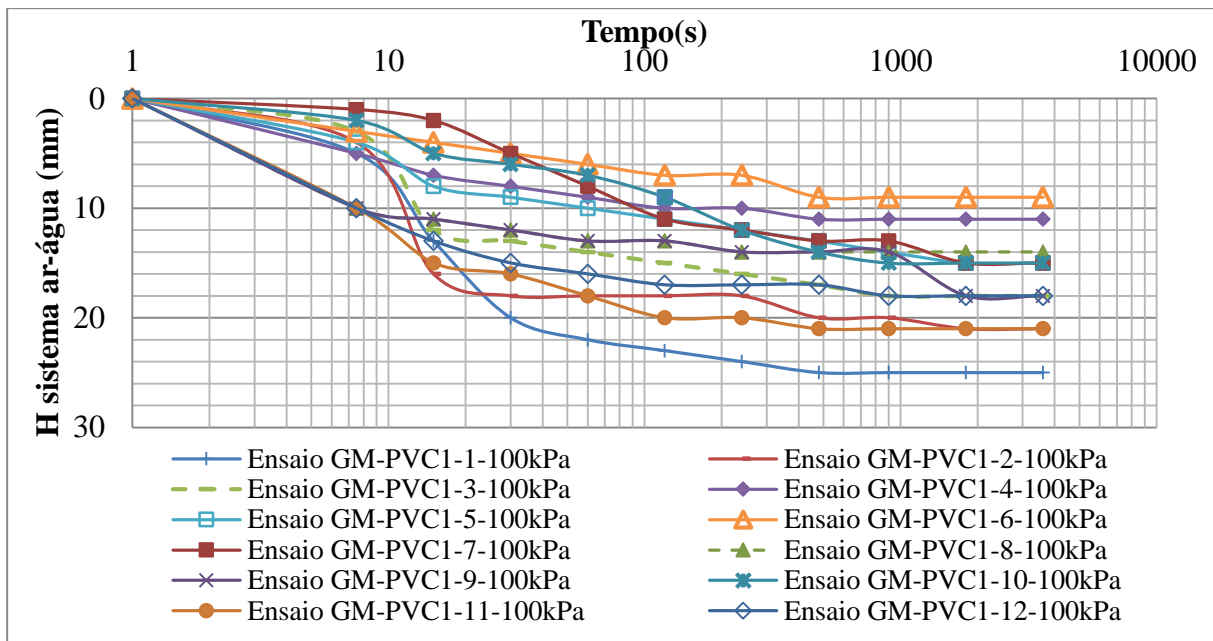


Figura 4.1. Variação do nível de água para a tensão de 100 kPa, ensaios 1 a 12.

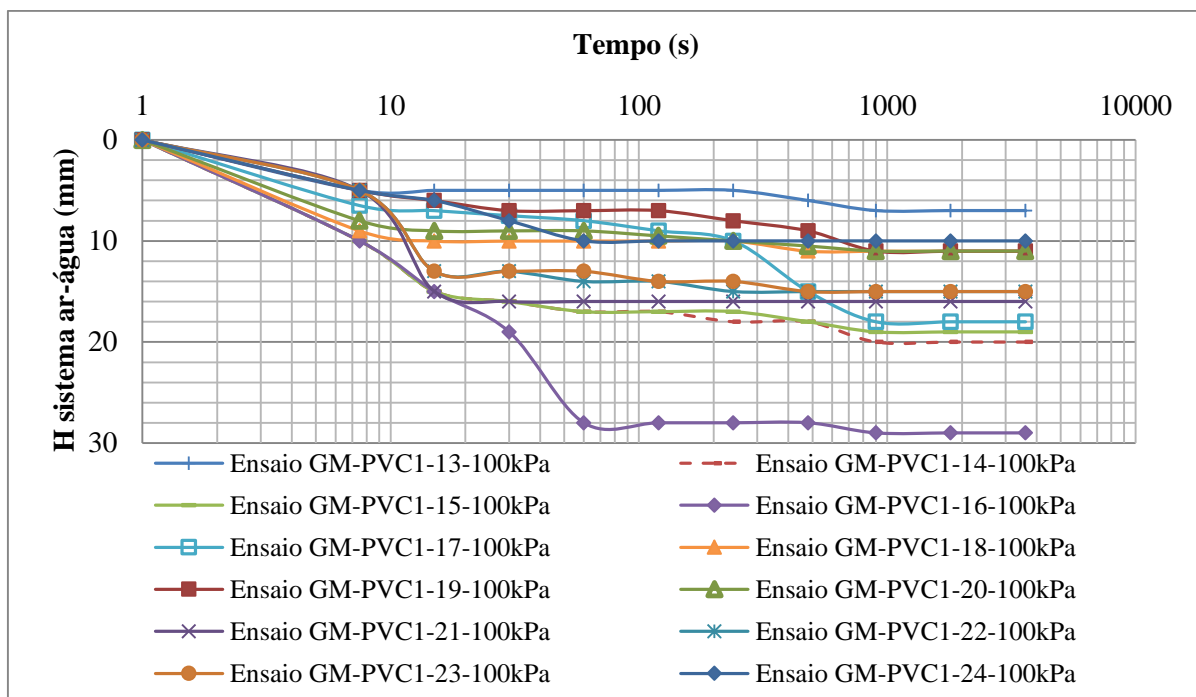


Figura 4.2. Variação do nível de água para a tensão de 100 kPa, ensaios 13 a 24.

Também foi possível observar que a variação média do nível de água é de 16 mm aproximadamente, e possuiu um valor máximo de 29 mm. A variação do nível de água ao longo de cada ensaio é devido à quebra dos grãos no contato o que resulta num novo rearranjo das partículas. As características das medidas centrais e tendência deste conjunto de dados, em termos de deformação, se apresentam na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Características estatísticas da variação da deformação para tensão de 100 kPa.

Tensão (kPa)	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Moda	Variância	Desv. Padrão	CV
100	2,94	5,35	1,29	2,77	2,77	0,91	0,96	0,33

Unidades em %

Para uma melhor compreensão dos dados obtidos no ensaio, foi preciso quantificar esse tipo de medidas de deformação; tendo em conta a área da célula do sistema ar-água foi possível estabelecer a quantidade de volume de água necessária para preencher a bolsa de aplicação de tensão para um nível de tensão determinado e junto com a área da caixa da célula de ensaio é possível obter a medida de deformação da geomembrana e a brita juntas. A Figura 4.3 mostra a distribuição de frequências da deformação o ensaio de dano de 100 kPa, nota-se que a predominância (83% dos ensaios) do ensaio é manter uma deformação inferior a 3,73% e seu valor médio foi de 2,94%.

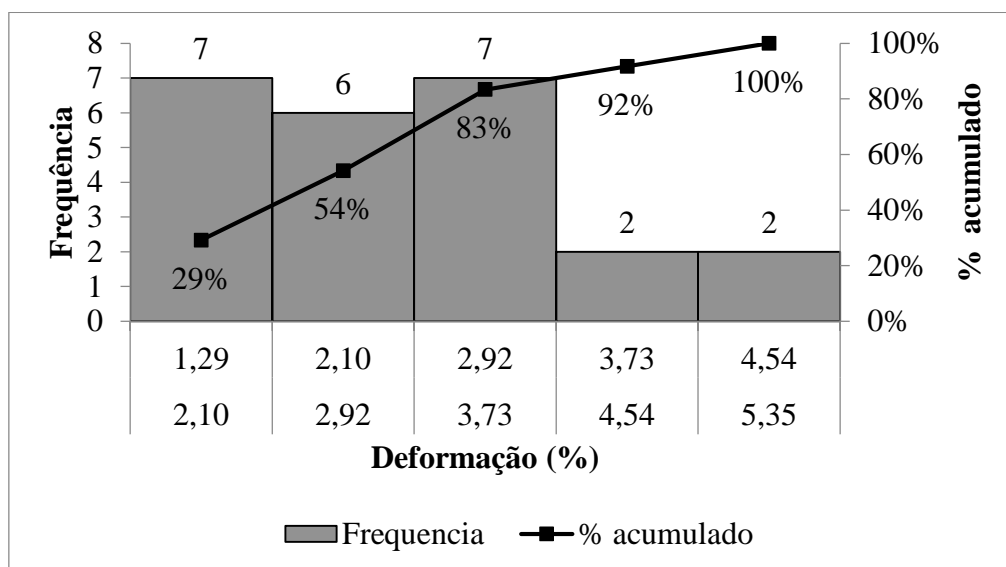


Figura 4.3. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 100 kPa.

Entre os 24 ensaios feitos os dados guardaram um coeficiente de variação de 32,51%, que devido às características dos materiais empregados e a sua granulometria é um valor acertado. Outra característica dos dados obtidos é que a média, a mediana e a moda (medidas centrais) apresentam valores semelhantes o que indica que os ensaios têm uma boa repetitividade, além de ajusta-se a uma distribuição normal.

Para o nível de tensão de 200 kPa, o tempo médio necessário para a estabilização das deformações (refletidas no nível de água no sistema ar-água) foi de 10 minutos e seu valor

médio de variação do nível de água, foi de 15,42 mm (Figura 4.4 e Figura 4.5). Na Tabela 4.2 é apresentada a estatística descritiva para a deformação da configuração empregada. As variações maiores podem ser produto da quebra da brita que permite o deslocamento das partículas e um novo arranjo, o maior valor se apresentou para a amostra 19.

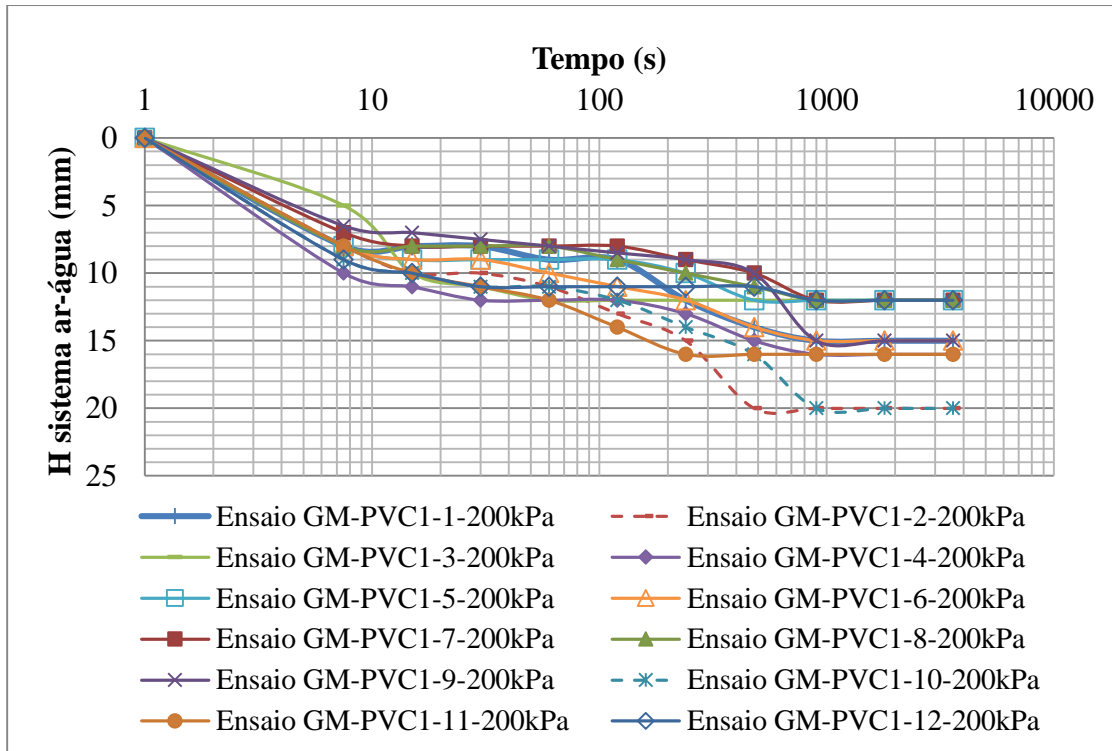


Figura 4.4. Variação do nível de água para a tensão de 200 kPa, ensaios 1 até 12.

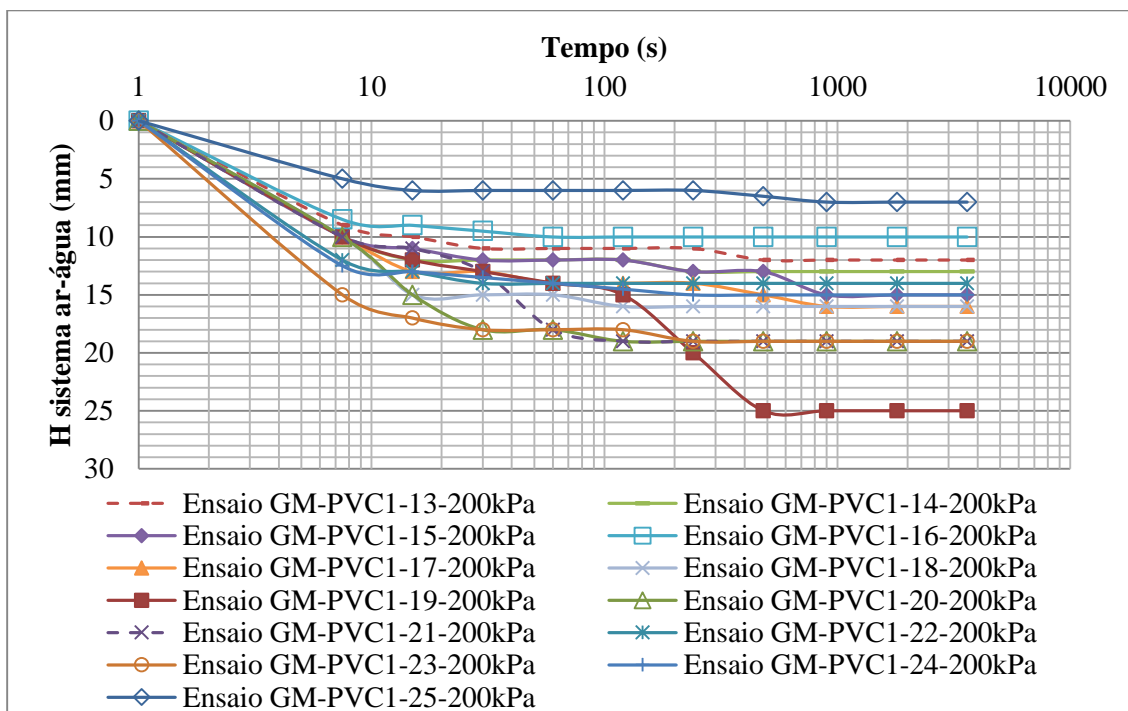


Figura 4.5. Variação do nível de água para a tensão de 200 kPa, ensaios 13 até 25.

Tabela 4.2. Características estatísticas da variação da deformação para uma tensão de 200 kPa.

Tensão (kPa)	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Moda	Variância	Desv. Padrão	CV
200	2,85	4,61	1,85	2,77	2,22	0,42	0,65	0,23

Unidades em %

Assim como no valor de tensão anteriormente mostrado, os resultados da altura de água no sistema ar-água foram convertidos em deformação da configuração ensaiada. A Figura 4.6 mostra a distribuição de frequências da deformação neste ensaio, no qual é possível observar que a deformação variou de 1,85% a 3,51%, o qual representa aproximadamente 88% dos valores dos ensaios realizados e o valor médio apresentado é de 2,85%. Também é preciso estabelecer que levando em conta o coeficiente de variação (com um valor de 23%), que apresenta o conjunto de dados dos 25 ensaios realizados é possível concluir que o ensaio, a este nível de tensão, apresenta uma repetitividade. Isso determinou-se já que o valor do coeficiente de variação é aceitável dadas as condições e os materiais empregados no ensaio.

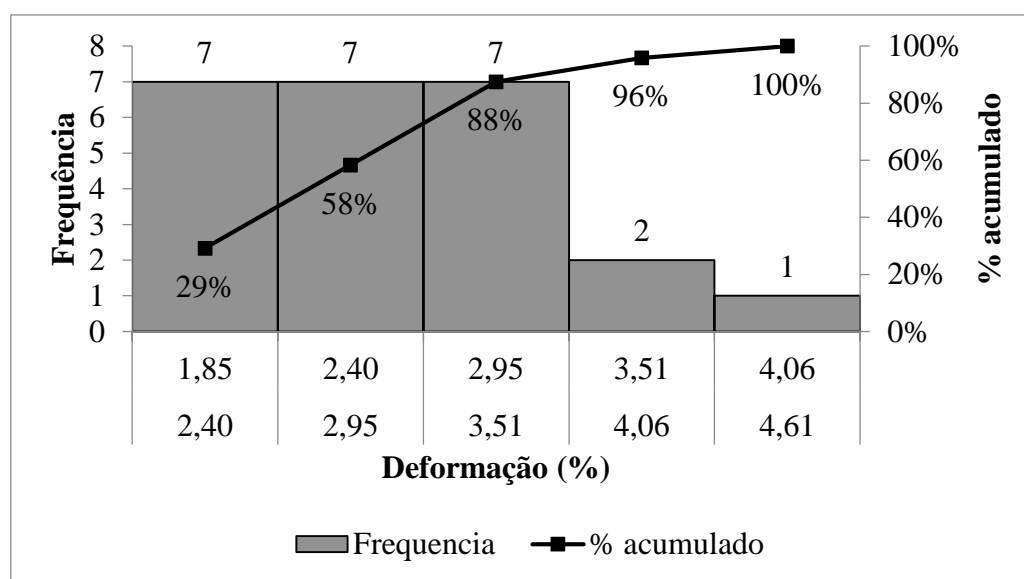


Figura 4.6. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 200 kPa.

No nível de tensão de 300 kPa, o tempo médio necessário para a estabilização do sistema ar-água foi de 10 minutos, o qual corresponde a um nível de água médio de 14 mm (Figura 4.7 e Figura 4.8). Tendo como valores máximos e mínimos 22 mm e 8,5 mm, respectivamente. As características deste conjunto de dados para a deformação são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Características estatísticas da variação da deformação para uma tensão de 300 kPa.

Tensão (kPa)	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Moda	Variância	Desv. Padrão	CV
300	2,58	4,06	1,57	2,49	2,22	0,45	0,67	0,26

Unidades em %

A Figura 4.9 mostra a distribuição de frequências dos dados obtidos para a deformação, se observa que a variação do ensaio se encontra entre 1,57 % a 3,07%.

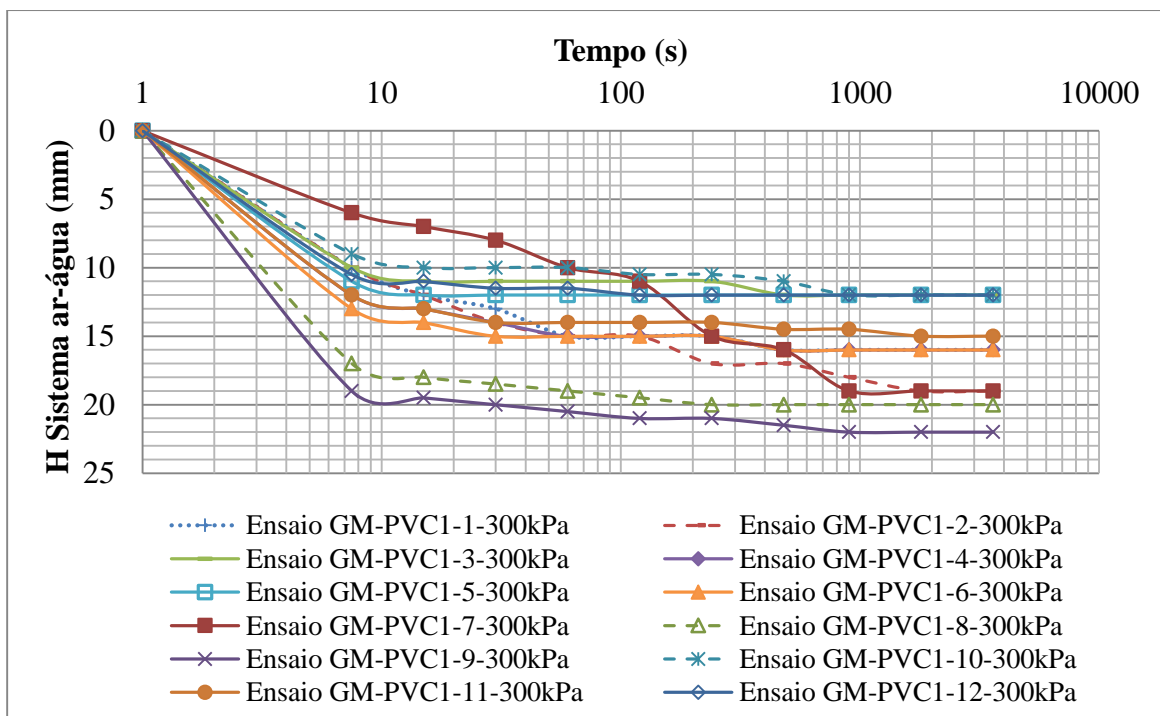


Figura 4.7. Variação do nível de água para a tensão de 300 kPa, ensaios 1 até 12.

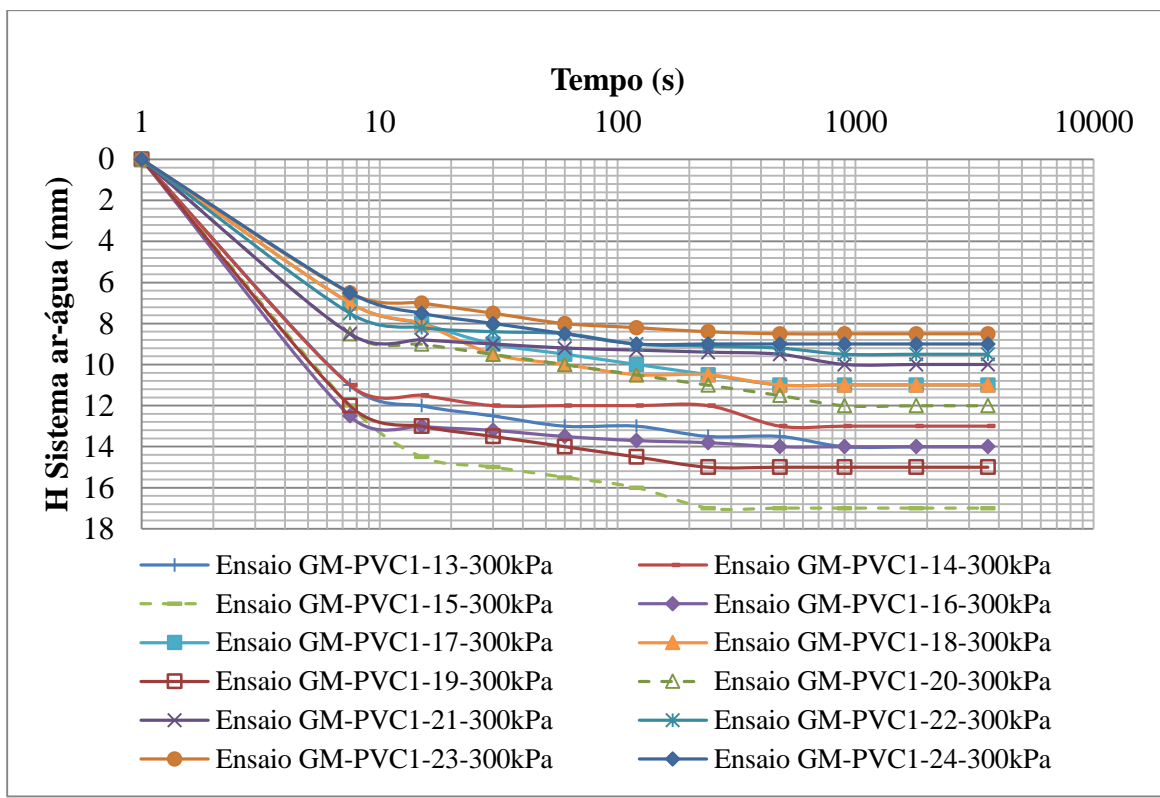


Figura 4.8. Variação do nível de água para a tensão de 300 kPa, ensaios 13 até 24.

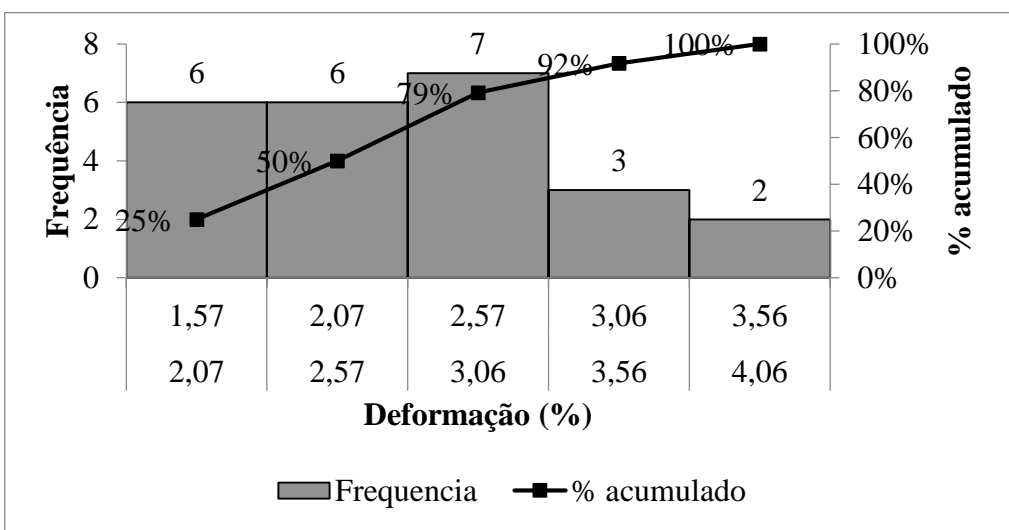


Figura 4.9. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 300 kPa.

No intervalo mencionado com anterioridade se encontra 79% dos dados obtidos no ensaio de dano para uma tensão de 300 kPa e uma média de 2,58%. Com respeito a suas medidas de tendência central elas mantem uma semelhança, as quais junto ao valor de coeficiente de variação (26%) indicam que existe repetitividade no ensaio e ajuste a uma distribuição normal.

Na tensão de 500 kPa, a variação média do nível de água foi de 16,33 mm e o tempo médio de estabilização foi de 9 minutos (Figura 4.10 e Figura 4.11). A Tabela 4.4 apresenta as características dos dados obtidos para a deformação nos ensaios de dano a este nível de tensão.

Tabela 4.4. Características estatísticas da variação da deformação para uma tensão de 500 kPa.

Tensão (kPa)	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Moda	Variância	Desv. Padrão	CV
500	3,01	4,43	2,03	2,91	2,77	0,37	0,61	0,20

Unidades em %

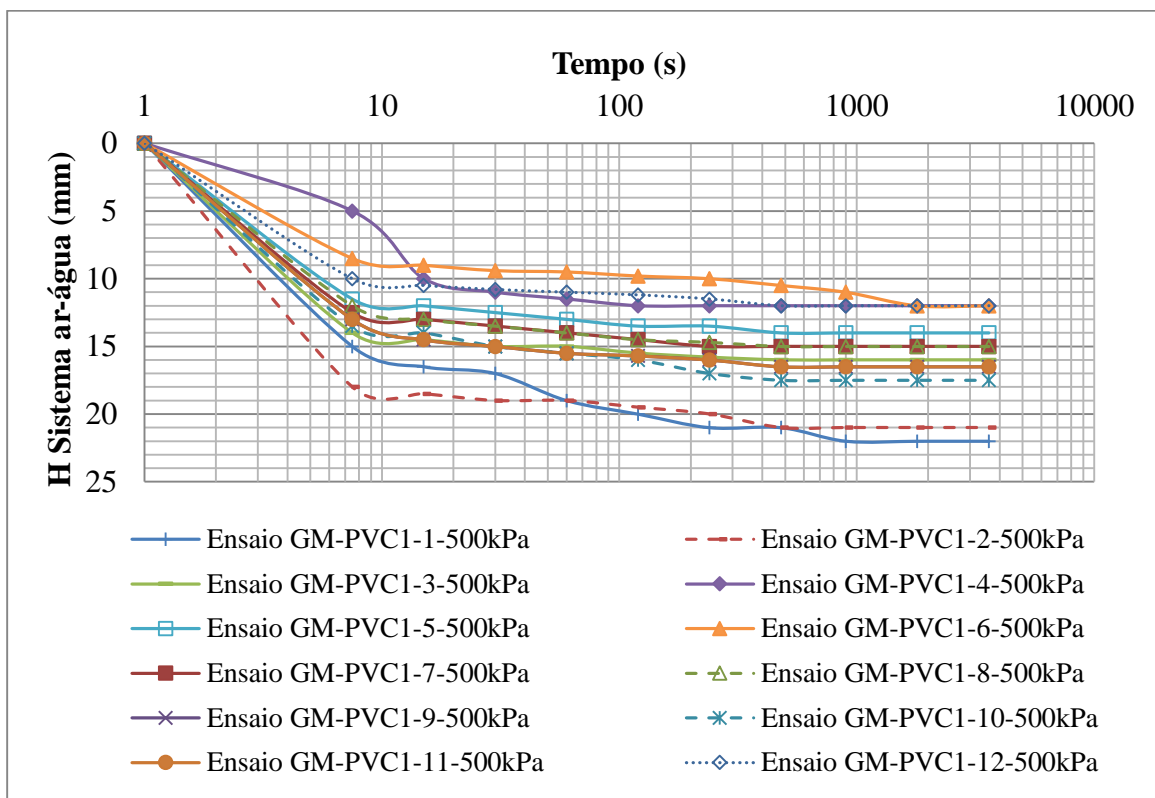


Figura 4.10. Variação do nível de água para a tensão de 500 kPa, ensaios 1 até 12.

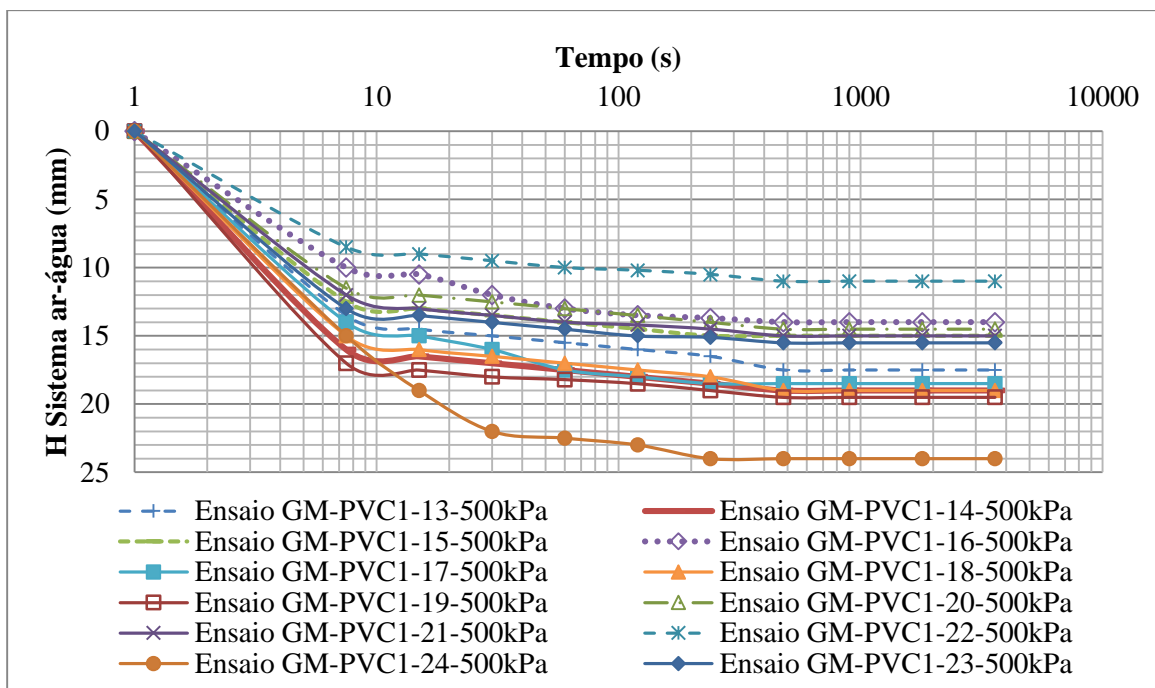


Figura 4.11. Variação do nível de água para a tensão de 500 kPa, ensaios 13 até 24.

Na Figura 4.12 é possível observar a distribuição de frequências para a deformação no ensaio (deformação última no ensaio). A variação da deformação nos 24 ensaios foi de 2,03% a 3,47% e dentro desta faixa encontram-se 75% dos dados obtidos para o nível de tensão de 500 kPa. O valor do coeficiente de variação (20%) mostra que existiu repetitividade no ensaio. A média para este nível de tensão é de 3,01%.

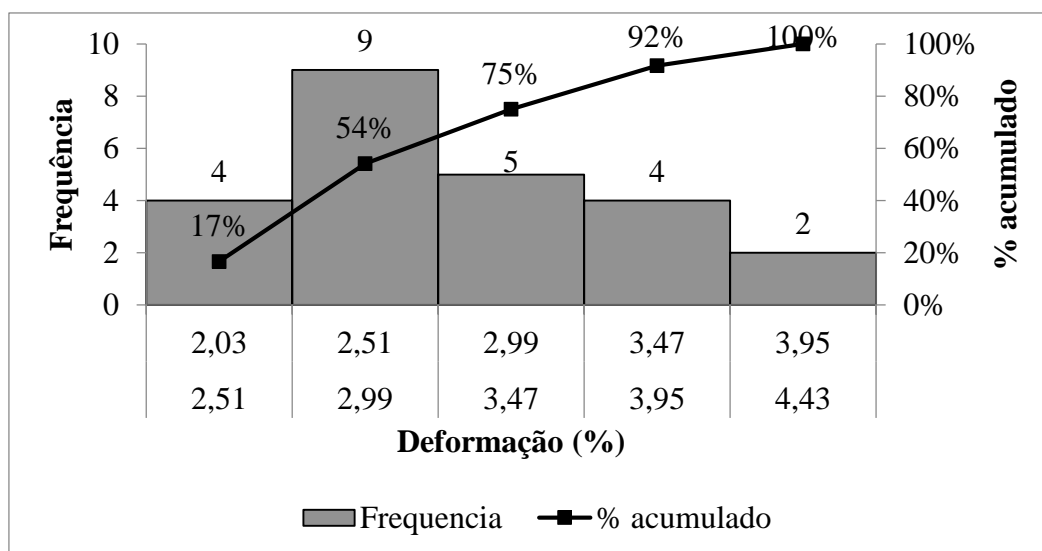


Figura 4.12. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 500 kPa.

No caso da tensão de 1000 kPa na Figura 4.13 e na Figura 4.14 se encontram a variação da altura de água no sistema ar-água vs o tempo em que ocorre. Nelas é possível observar que o tempo médio para a estabilização do sistema é de 12 minutos, aproximadamente, e que o nível de água médio observado foi de 44,50 mm. Os valores extremos desta variação no nível são 25 mm e 52 mm, dados que correspondem ao mínimo e máximo valor obtido, respectivamente. Os dados das deformações encontradas são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Características estatísticas da variação da deformação para uma tensão de 1000 kPa.

Tensão (kPa)	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Moda	Variância	Desv. Padrão	CV
1000	8,21	15,32	4,61	8,31	9,04	3,88	1,97	0,24

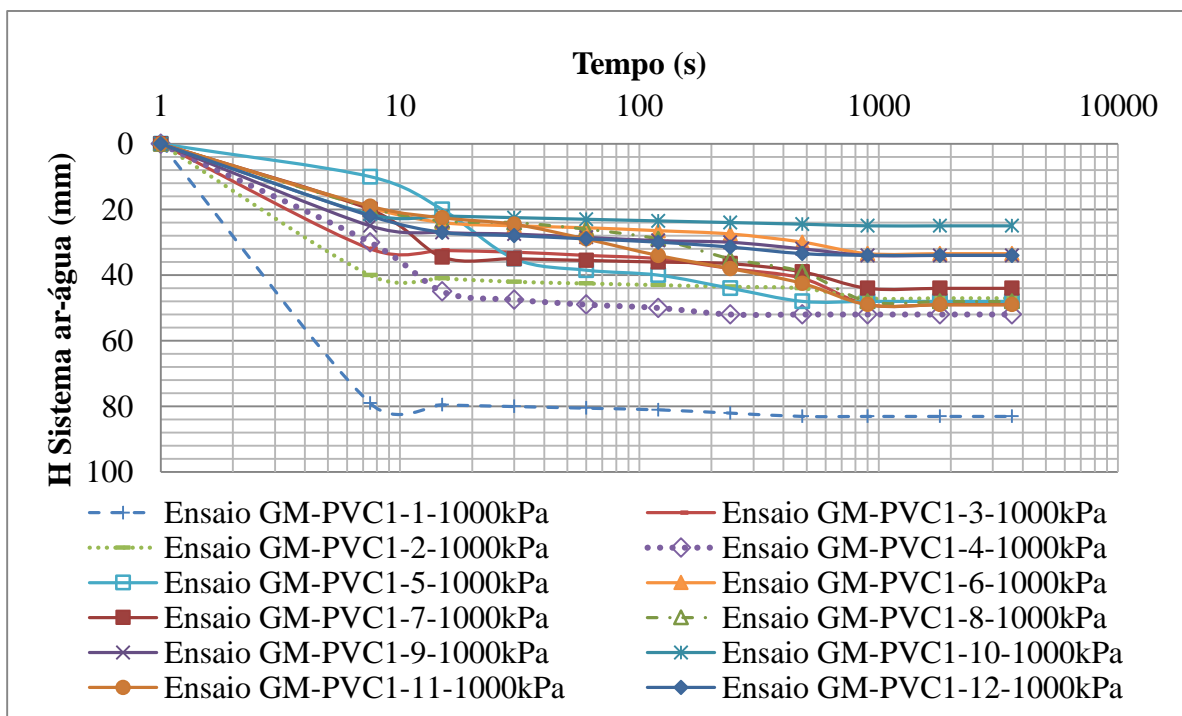


Figura 4.13. Variação do nível de água para a tensão de 1000 kPa, ensaios 1 até 12.

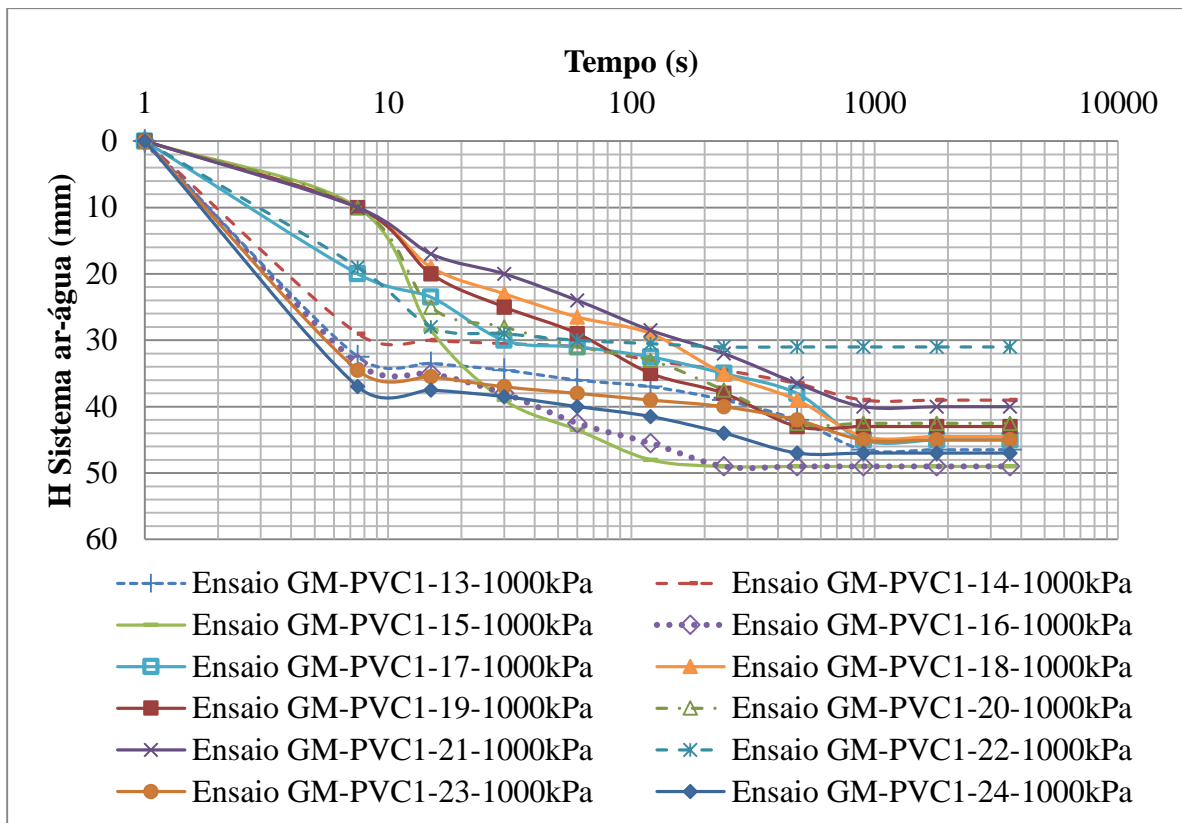


Figura 4.14 Variação do nível de água para a tensão de 1000 kPa, ensaios 13 até 24.

O valor extremo na variação do nível de água de 80 mm apresentado foi descartado para que não influenciasse na análise estatística realizada.

Na Figura 4.15 observa-se que a variação, em termos de deformação, encontrou-se entre 4,61% a 11,04%, o que representa um 96% dos dados, os quais possuem um coeficiente de variação igual a 16%, que pode ser considerado um valor aceitável para este tipo de ensaio levando-se em consideração os materiais utilizados. Com base nisso, é possível afirmar que o ensaio apresentou uma repetitividade. A média de deformação obtida para este nível de tensão é de 8,21%.

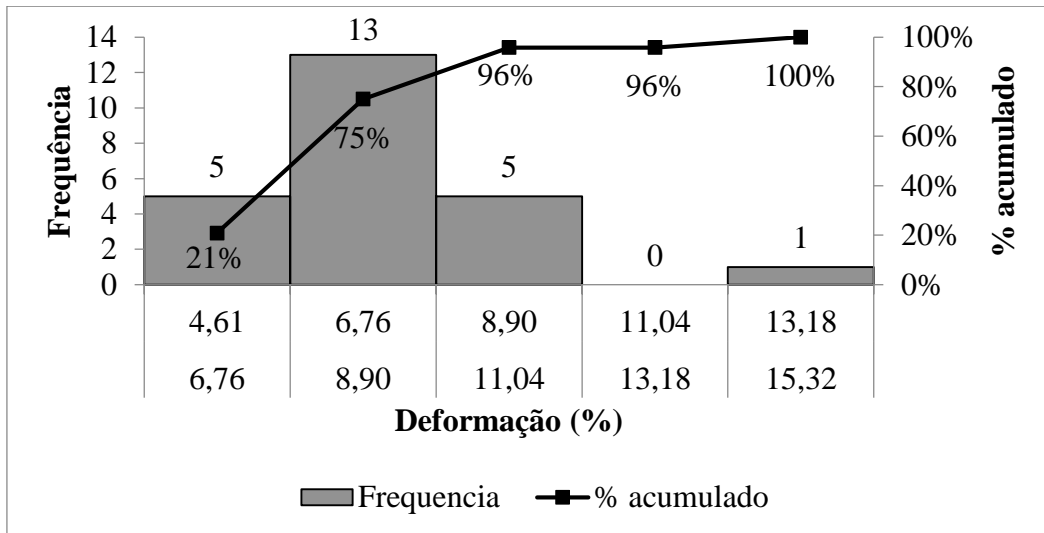


Figura 4.15. Distribuição de frequência da deformação para tensão de 1000 kPa.

Por último é preciso ressaltar que se encontram valores extremos na variação dos níveis de água dentro de uma mesma tensão devido à quebra de grãos que se apresenta e gera assim um novo arranjo das partículas dentro da caixa superior.

Em termos de deformação a variação que se obteve, como se apresenta na Figura 4.16, resulta nula comparadas entre as tensões de 100, 200, 300 e 500 kPa pois todas elas mantêm um valor de aproximado de 2,8% de deformação média; o único valor que se apresenta diferente é o obtido na tensão de 1000 kPa pois tem uma deformação média de 8,2%. A Tabela 4.6 apresenta os resultados resumos desta análise.

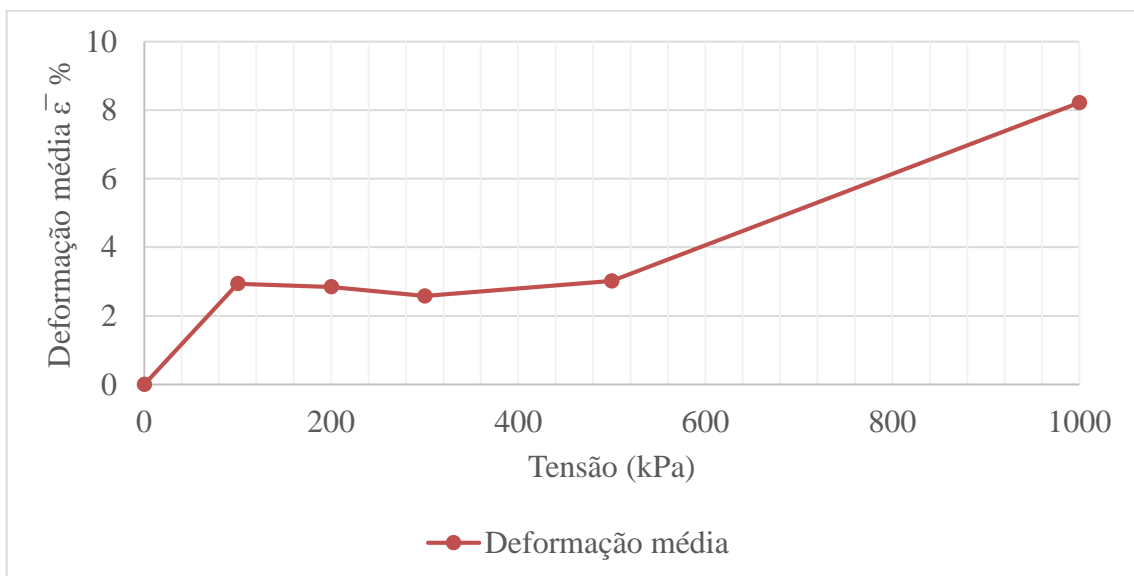


Figura 4.16. Valor da deformação média obtido nos ensaios de dano para as tensões de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa.

Tabela 4.6. Resumo das deformações médias obtidas no ensaio de dano a tensões de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa.

Característica	Tensão (kPa)				
	100	200	300	500	1000
Média	2,9	2,8	2,6	3,0	8,2
Mínimo	1,3	1,8	1,6	2,0	4,6
Máximo	5,4	4,6	4,1	4,4	15,3
Variância	0,912	0,418	0,450	0,372	3,884
Desvio Padrão	0,96	0,65	0,67	0,61	1,97
CV	32,51%	22,71%	26,02%	20,24%	23,99%

A partir da Tabela 4.6 podemos concluir que a deformação aumento com a tensão aplicada, assim também os dados se mostram menos dispersos com o aumento da carga aplicada. O aumento da deformação com a tensão poder ser devido à quebra de grãos no contato.

4.2.2. VARIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS GRANULARES

Depois de realizado cada ensaio para cada uma das tensões aplicadas foi executado um ensaio de granulometria para os materiais granulares usados (areia e brita 3), o qual visou determinar a influência da tensão sobre a distribuição granulométrica dos materiais, assim como o índice de quebra dos seus grãos.

4.2.2.1. COMPARAÇÃO DA GRANULOMETRIA DA AREIA APÓS O ENSAIO DE DANO

Para o caso da areia utilizada, visando simular uma camada drenante para gases ou nível freático presente no solo de fundação, não se apresentou nenhuma mudança na sua granulometria. Isso é devido à compactação empregada, pois aquele valor não permite que se gerem maiores deformações na geomembrana produto de um recalque ou deformação da camada de areia, além disso, na configuração usada ela ficou protegida pela geomembrana. A Tabela 4.7 mostra o resumo dos resultados da granulometria feita antes e após realizados o ensaio de dano, o D_{50} para antes e após o ensaio é igual a 1,6 mm.

Tabela 4.7. Resumo dos resultados da granulometria da areia feita antes e após dos ensaios de dano de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa.

Tamanho (mm)		Porcentagem que Passa, Antes (%)	Porcentagem que Passa, Depois (%)	Coef. Uniformidade		Coef. Curvatura	
				Antes	Depois	Antes	Depois
4"	100	100	100	1,38	1,42	1,0	1,1
3"	79	100	100				
2"	50	100	100				
1 1/2"	38	100	100				
1"	25	100	100				
3/4"	19	100	100				
3/8"	9,5	100	100				
#4	4,8	100	100				
#10	2	85,3	84,9				
#16	1,2	6,6	7,0				
#30	0,6	0,07	0,15				
#40	0,42	0,01	0,02				
#60	0,25	0,00	0,00				
#100	0,15	0,00	0,00				
#200	0,075	0,00	0,00				
Fundo	0,01	0,00	0,00				
Peso Total	1040 g	100	100				

4.2.2.2.COMPARAÇÃO DA GRANULOMETRIA DA BRITA APÓS O ENSAIO DE DANO

Ao contrário da areia, a brita 3 apresentou mudanças na sua granulometria devido à tensão aplicada diretamente sobre ela. O ensaio de granulometria foi feito para cada nível de tensão e com eles foi possível obter o índice de quebra de grãos (B_g) determinado por Marsal (1967). A seguir são apresentados os resultados obtidos por cada nível de tensão.

Para a tensão de 100 kPa, como se observa na Figura 4.17, a granulometria obtida após o ensaio de dano apresenta uma pequena diferença. O índice de quebra de grão (B_g) obtido foi de 13,95% e se caracteriza pela presença de partículas de natureza fina, ou seja, de menor tamanho às que apresentava a granulometria original.

A obtenção do material de natureza mais fina é devido à angularidade da brita usada como camada drenante superior, já que ao se encontrar sob tensão e devido ao contato entre partículas da mesma natureza gera atrito e por tanto quebra das arestas.

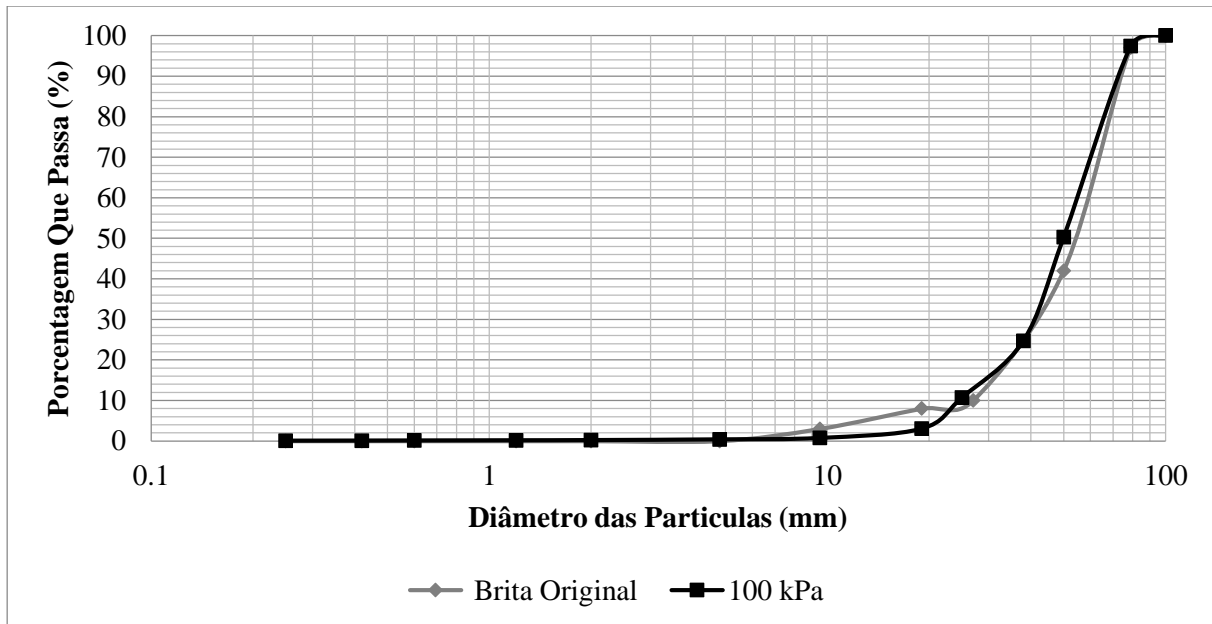


Figura 4.17. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 100 kPa.

A presença deste material fino pode criar uma pequena camada que proteja a geomembrana dos danos, mas cabe ressaltar que a quantidade obtida neste estágio de tensão não é suficiente, nem influenciar nas propriedades hidráulicas da camada drenante como já foi estabelecido por Reddy (1998). Na Figura 4.18 se apresentam quebras características dos grãos neste nível de tensão e a Figura 4.19 o material obtido.



Figura 4.18 Quebra de grãos após o ensaio de dano tensão de 100 kPa.

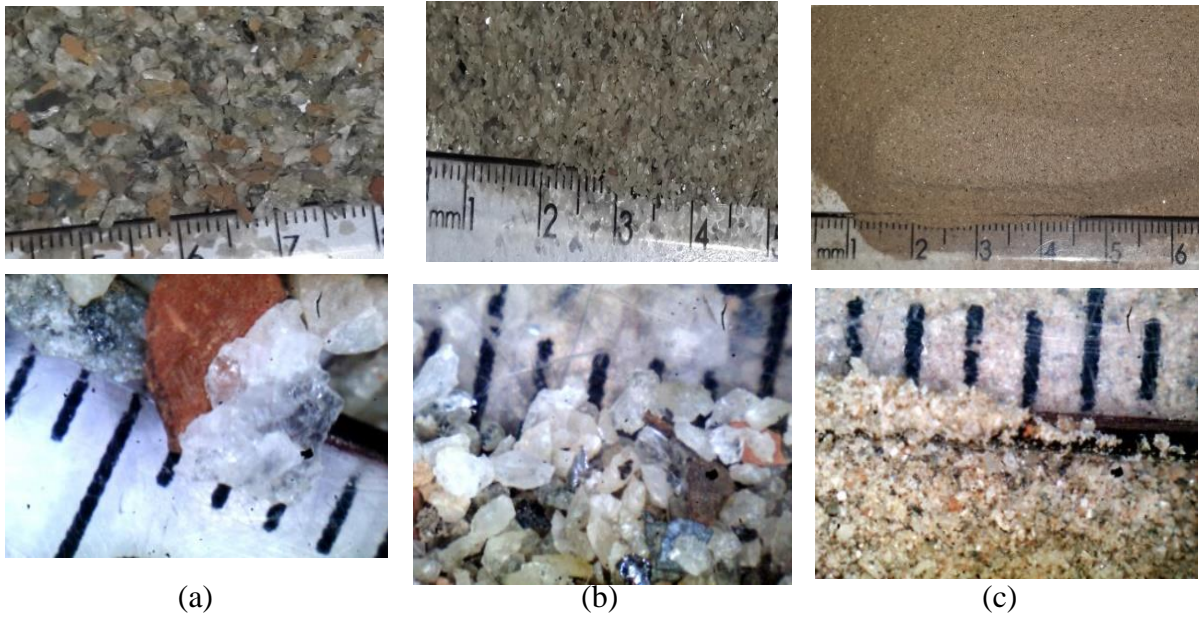


Figura 4.19. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) peneira #30 e (c) peneira #60.

Quando a tensão foi aumentada para 200 kPa, verificou-se que o índice de quebra de grãos obtido foi de 16,9%. Na Figura 4.20 observa-se a presença do material fino na nova granulometria obtida após o ensaio. É preciso ressaltar que a comparação é feita com a granulometria original da brita 3, já que para começar o ensaio de dano a uma tensão de 200 kPa, a brita empregada manteve as características da brita utilizada antes do ensaio de 100 kPa.

Ainda sendo, ligeiramente maior que o índice de quebra de grãos apresentado para uma tensão de 100 kPa, a mudança obtida não tem uma variação perceptível. Assim como no ensaio de 100 kPa, o material obtido é principalmente mais fino devido à quebras das arestas da brita.

Na Figura 4.21 se observa a quebra característica de grãos ocorrida durante o ensaio de dano, assim como na Figura 4.22 se observa em detalhe o material derivado da quebra de grãos.

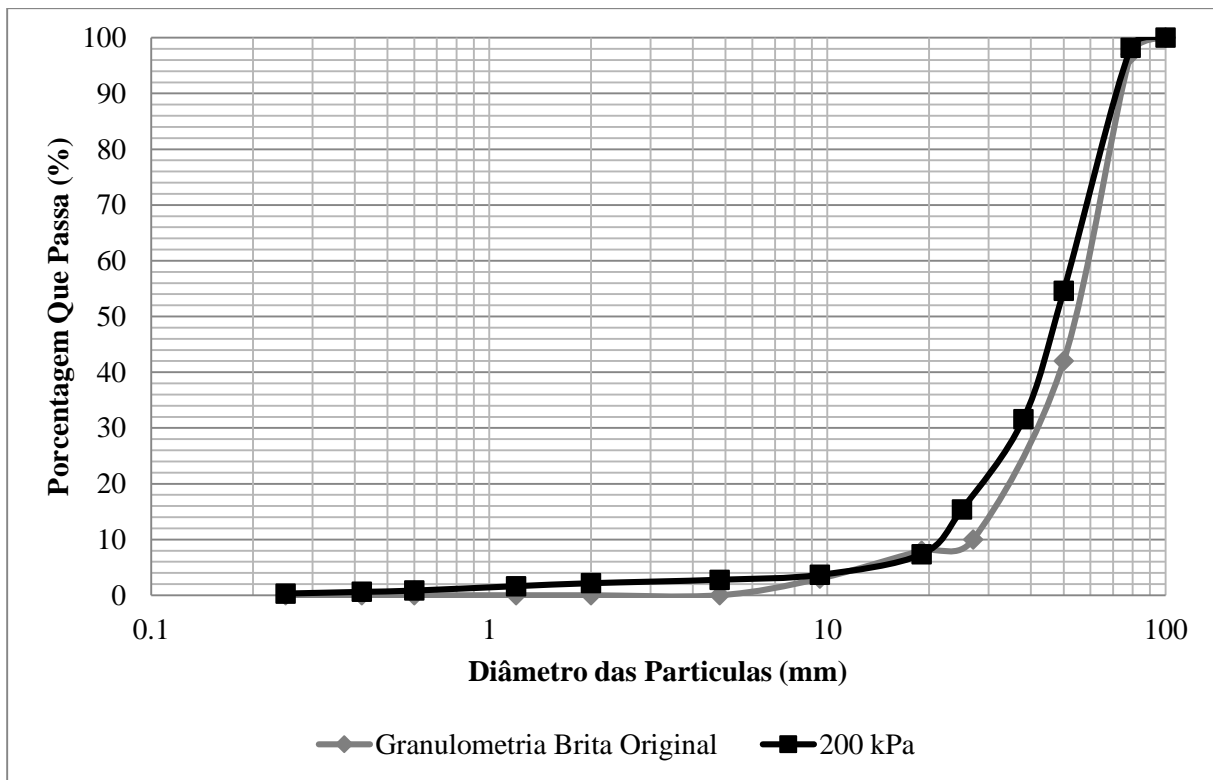


Figura 4.20. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 200 kPa.



Figura 4.21. Quebra de arestas e da brita durante o ensaio a uma tensão de 200 kPa.

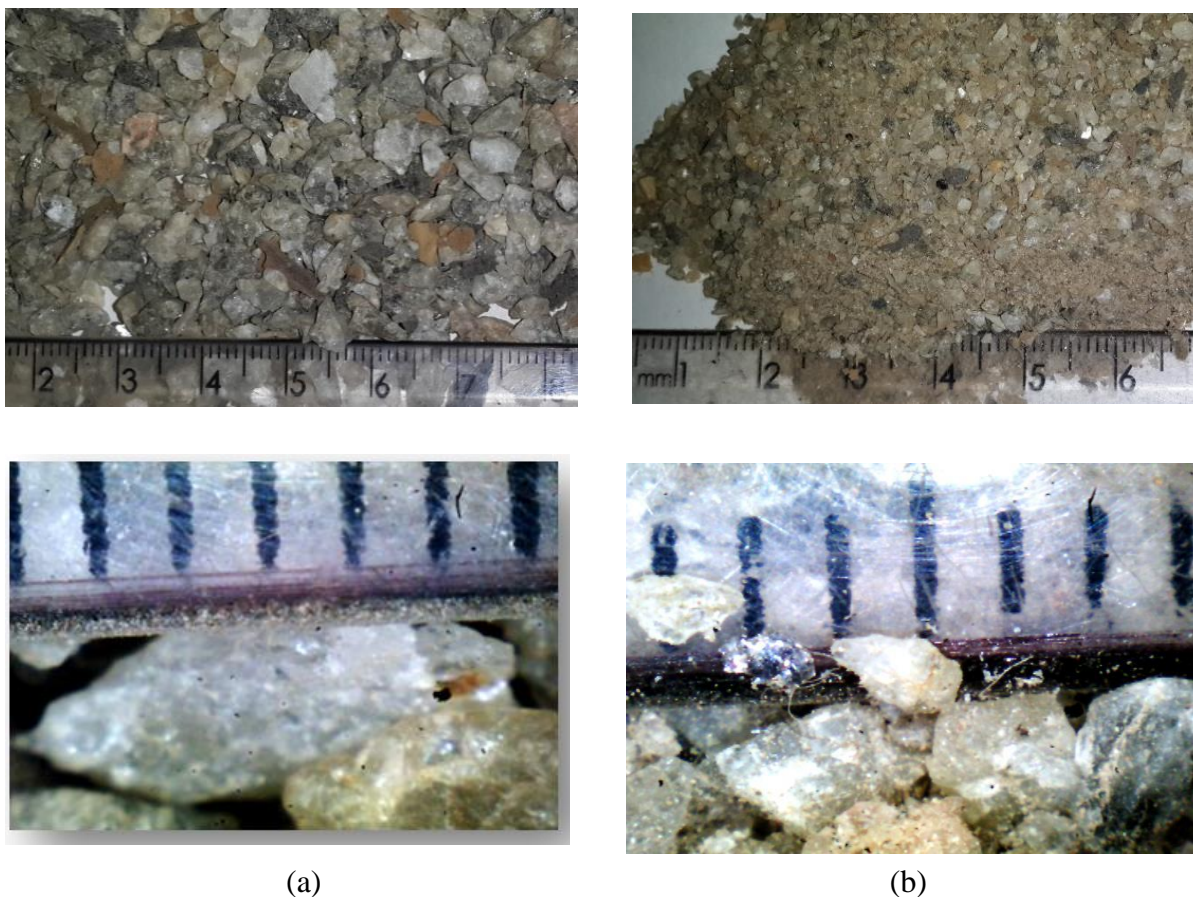


Figura 4.22. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) passa peneira #10.

Assim como o ocorrido para a tensão de 200 kPa, na tensão de 300 kPa foi mantida a granulometria da brita original no início do ensaio para efeitos de comparação. Os resultados podem ser observados na Figura 4.23. Com os resultados, foi obtido um índice de quebra de grãos igual a um valor de 24,79%.

O valor de B_g apresenta um acréscimo quando comparado aos valores anteriormente apresentados e mostra as mesmas características de quebra de grãos (quebra nos contatos das partículas) que junto aos pontos fracos ou linhas de fratura da brita facilitam a mudança na granulometria sob uma condição de tensão de 300 kPa.

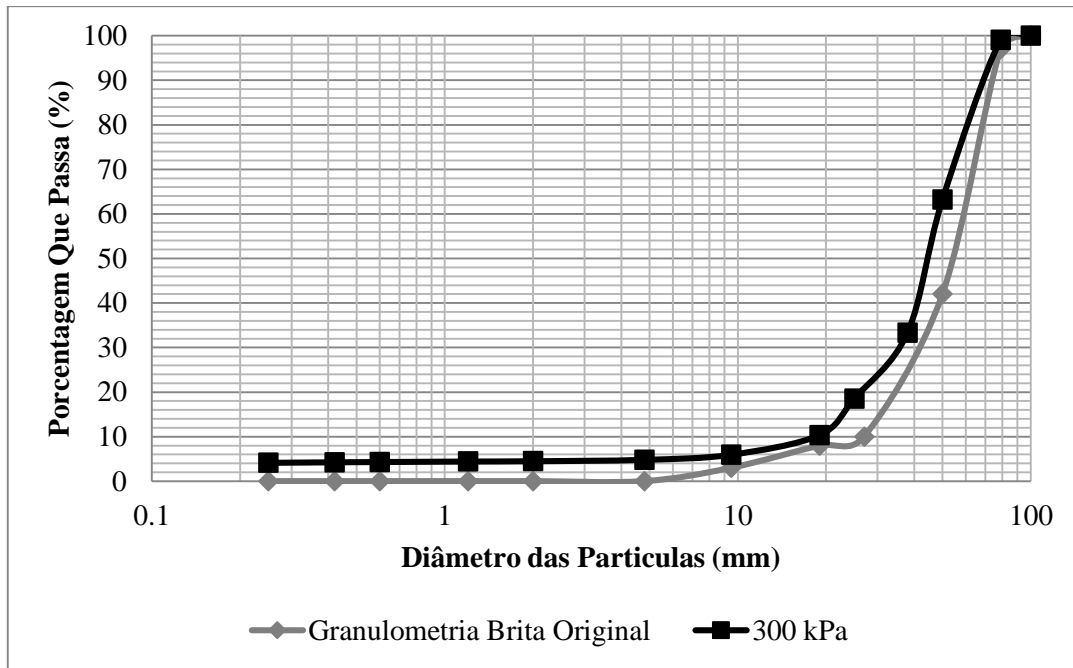


Figura 4.23. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 300 kPa.

Por outro lado, o material fino derivado da quebra de grãos sofre um acréscimo na sua quantidade quando comparado aos valores obtidos nos ensaios anteriores, embora esse tipo de acréscimo ainda não seja suficiente para criar uma influência na condutividade hidráulica da camada drenante simulada. A Figura 4.27 mostra o material obtido da quebra de grãos e estudado na granulometria.

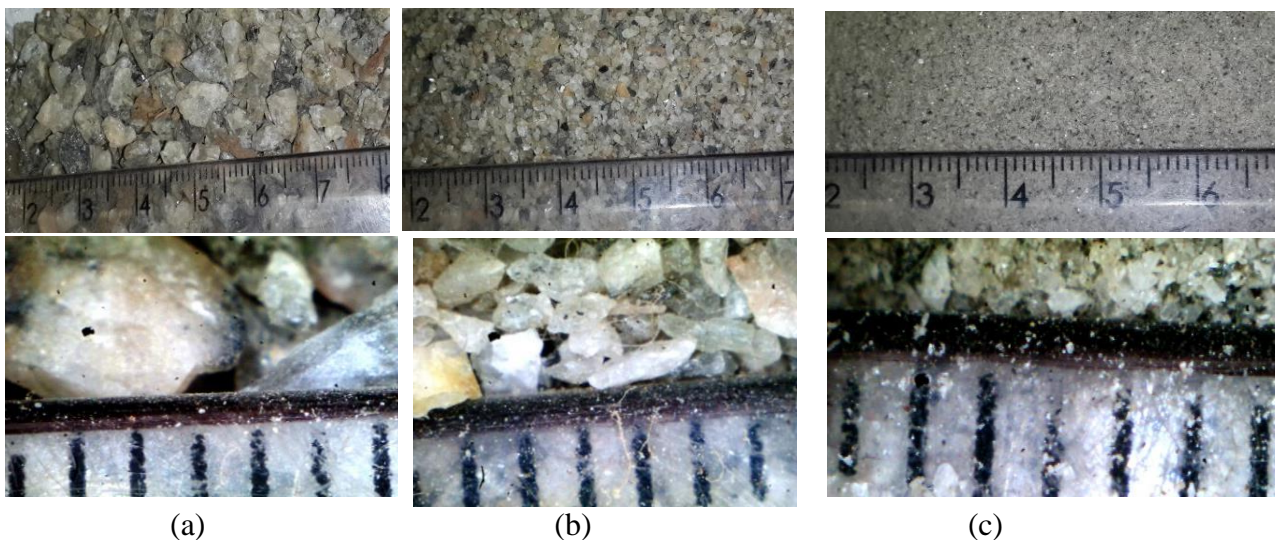


Figura 4.24. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) peneira #30 e (c) peneira #60.

No caso da tensão de 500 kPa, o valor de índice de quebra de grãos obtido foi de 28,59%, valor alto quando comparado às primeiras tensões, mas só um pouco maior com respeito ao valor da tensão de 300 kPa. Isso pode ser devido a que as tensões aplicadas durante os ensaios de dano vão eliminando com o tempo as linhas de fraqueza das partículas. A Figura 4.25 mostra a granulometria da brita antes e depois de realizado o ensaio de dano.

Com respeito à granulometria original, observou-se uma mudança alta caracterizada pelo acréscimo de material fino na granulometria final que, mesmo sendo representativo, não gera problemas na condutividade da camada drenante simulada ou de alguma maneira cria uma camada que forneça (falando do material mais fino gerado) proteção à geomembrana. A Figura 4.26 mostra a granulometria obtida após feito o ensaio de dano.

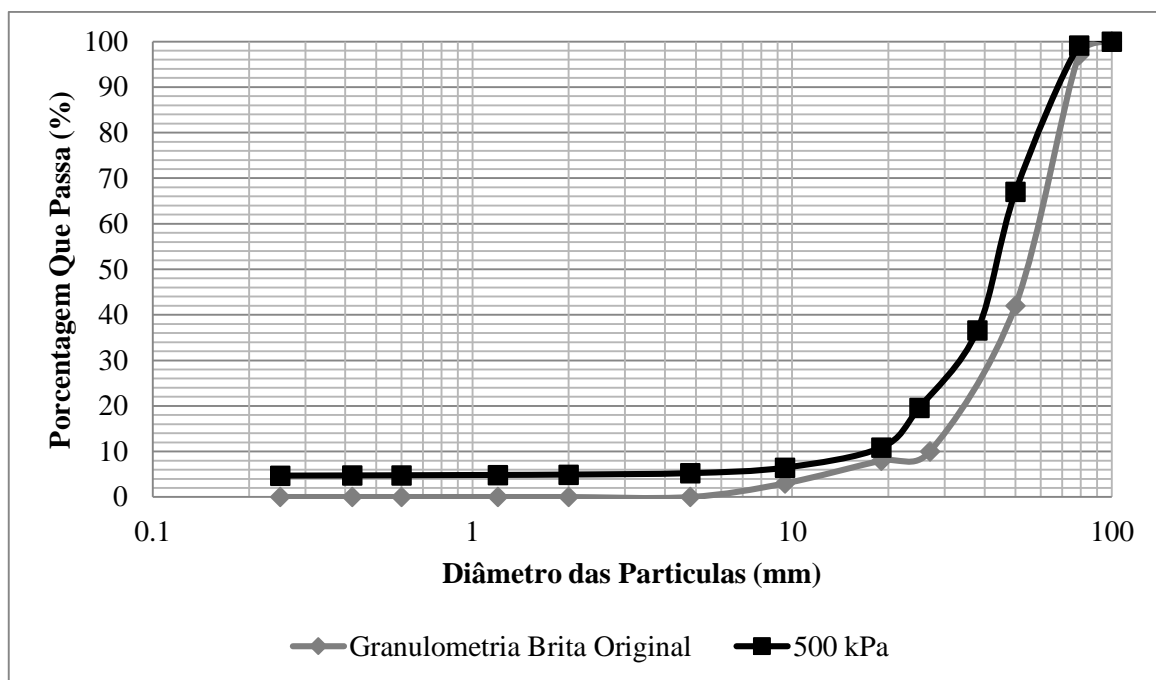


Figura 4.25. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 500 kPa.

Além da presença de partículas mais finas, se apresenta um aumento no porcentagem que passa um determinado tamanho de peneira. Isso se deve à quebra das arestas da brita utilizada no ensaio, que fornece um arredondamento das mesmas partículas.

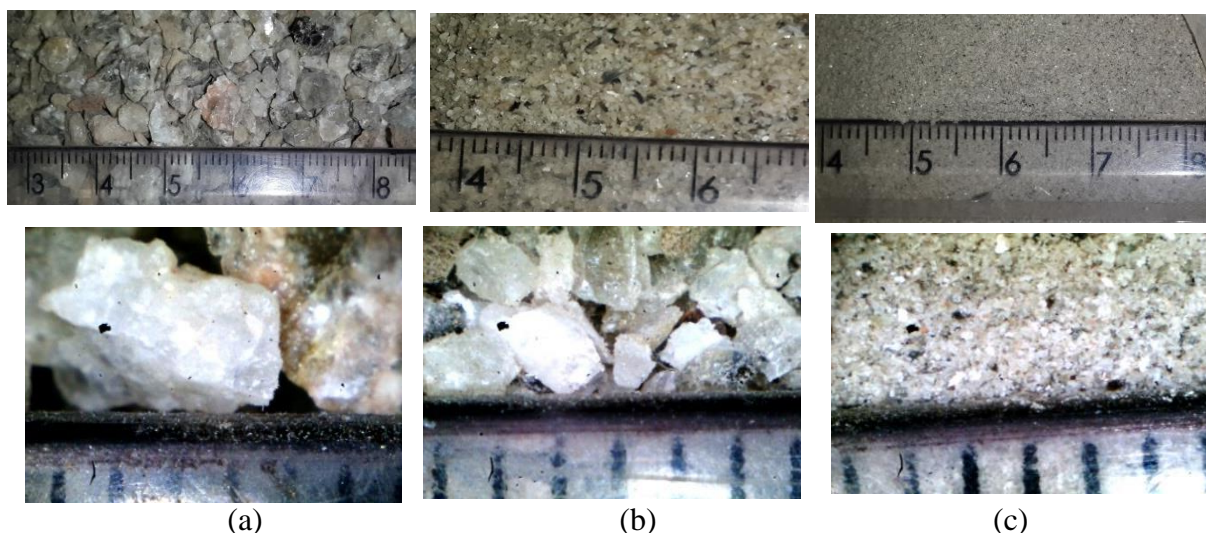


Figura 4.26. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) peneira #30 e (c) peneira #60.

Quando foram aplicados os 1000 kPa (tensão máxima permitida pelo compressor), o índice de quebra de grãos foi de 30,17%. Trata-se de um valor bastante alto com respeito à granulometria original. A tensão utilizada para este ensaio é capaz de produzir uma mudança importante na granulometria da brita e uma quantidade maior quando comparado às outras tensões. Embora a quantidade de material fino devido ao desgaste das arestas ou da ruptura por meio das linhas de fraqueza da brita seja maior, ainda não constitui um problema para a condutividade hidráulica da camada drenante, mas começa a gerar uma camada de espessura que pudesse redistribuir as tensões aplicadas sobre a geomembrana, esta camada era possível de observar uma vez retirada o material granular sobre a geomembrana. A Figura 4.27 apresenta a comparação entre as duas granulometrias (original e a obtida na tensão de 1000 kPa).

Assim como nos casos anteriores, a mudança na granulometria foi característica pela presença de material fino e aumento no porcentagem que passa determinada peneira (arredondamento do material). Para a tensão de 1000 kPa foi encontrado que o 12% do material analisado é mais fino (tamanhos de partículas menores à peneira $\frac{3}{4}$ "), valor alto comparado com os outros ensaios que só atingem o valor máximo do 4%. Este material é proveniente do quebra das arestas da brita usada no ensaio. Na Figura 4.28 se observa a quebra da brita devido à tensão.

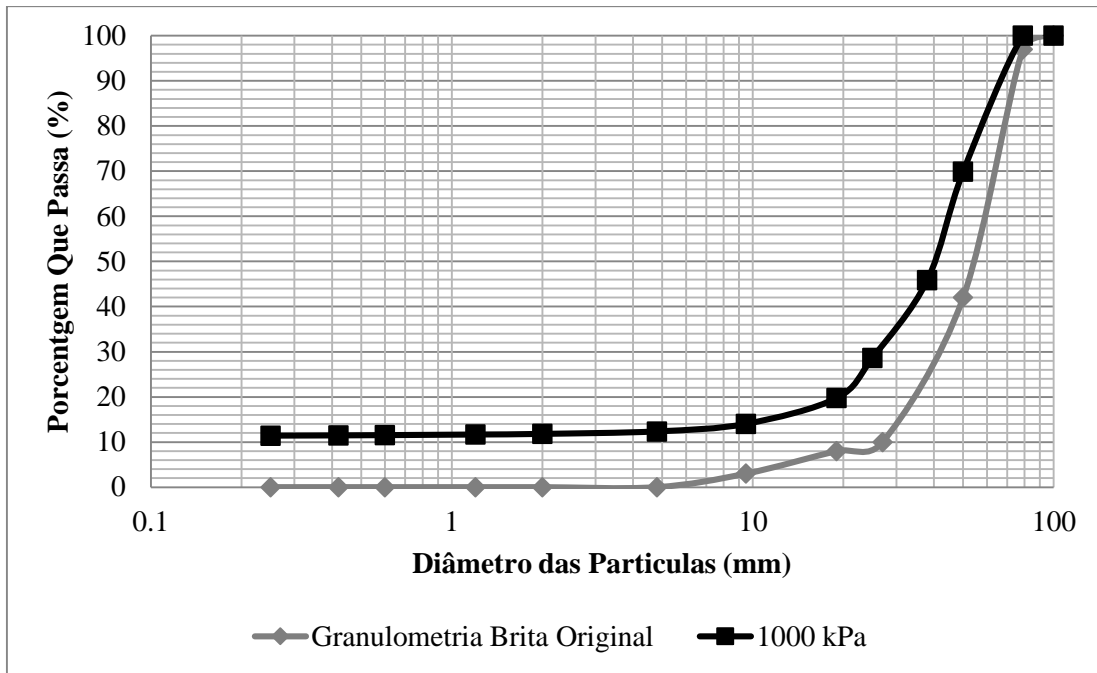


Figura 4.27. Granulometria da brita 3 antes e após o ensaio de dano para uma tensão de 1000 kPa.



Figura 4.28. Quebra de grãos característicos para uma tensão de 1000 kPa.

Na Figura 4.29 se observa o tamanho do material fino obtido devido ao desgaste a quebra da brita durante o ensaio.

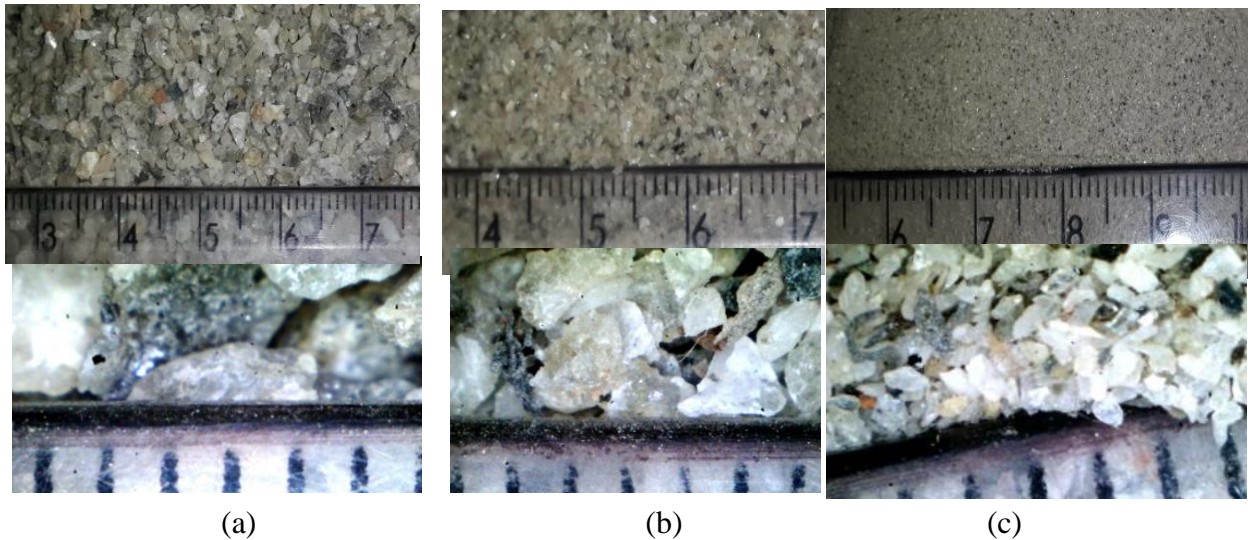


Figura 4.29. Material derivado da quebra dos grãos, material retido na (a) peneira #10, (b) peneira #30 e (c) peneira #60.

Na Figura 4.30 se observa a variação do C_u , C_c e D_{50} com a tensão aplicada. O comportamento está caracterizado por um leve aumento no valor de C_u e C_c o qual muda de taxa a partir da tensão de 500 kPa, ou seja, a carga aplicada sobre a camada de brita gera mudanças na uniformidade do material, que passa de ser um material uniforme a um não tão uniforme, mas que ainda mantém essa característica. Essa influência se observa na mudança na sua graduação passando de um material bem gradado a um má gradado.

Por outro lado o D_{50} diminui com o aumento da tensão. Isso confirma o apresentado pelas fatores antes analisados, além disso, também mostra que o tamanho de partícula médio da camada diminui ao longo do ensaio de dano e por isso o tamanho de partícula que fornece dano à geomembrana também diminui.

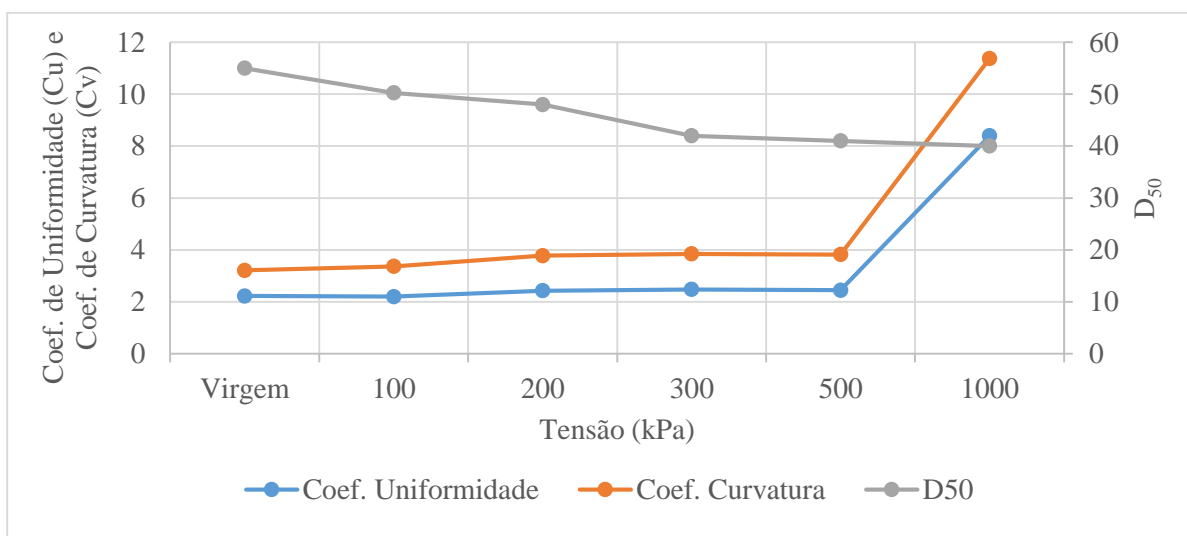


Figura 4.30. Variação do C_u , C_c , e D_{50} com a tensão aplicada.

4.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE DEFORMAÇÕES E GRANULOMETRIAS DAS DIFERENTES TENSÕES.

Neste item se apresenta a comparação entre os diferentes resultados obtidos nos ensaios de dano com o objetivo de relacioná-los.

Como se pode observar na Figura 4.31, a tendência dos dados da deformação é permanecer sem alteração para as primeiras tensões (não se apresenta uma variação entre os valores obtidos entre as 3 primeiras tensões). No entanto, com o incremento do valor da tensão aplicada, a deformação aumenta a partir de 500 kPa. Isso indica que o material não apresenta uma densificação diferencial com relação à tensão aplicada. A única tensão que apresenta uma diferença importante na deformação é a de 1000 kPa e visivelmente também na densificação da camada drenante. O que é explicado se deve ao fato de que, quanto maior é a tensão aplicada, menores são os vazios existentes entre as partículas de brita.

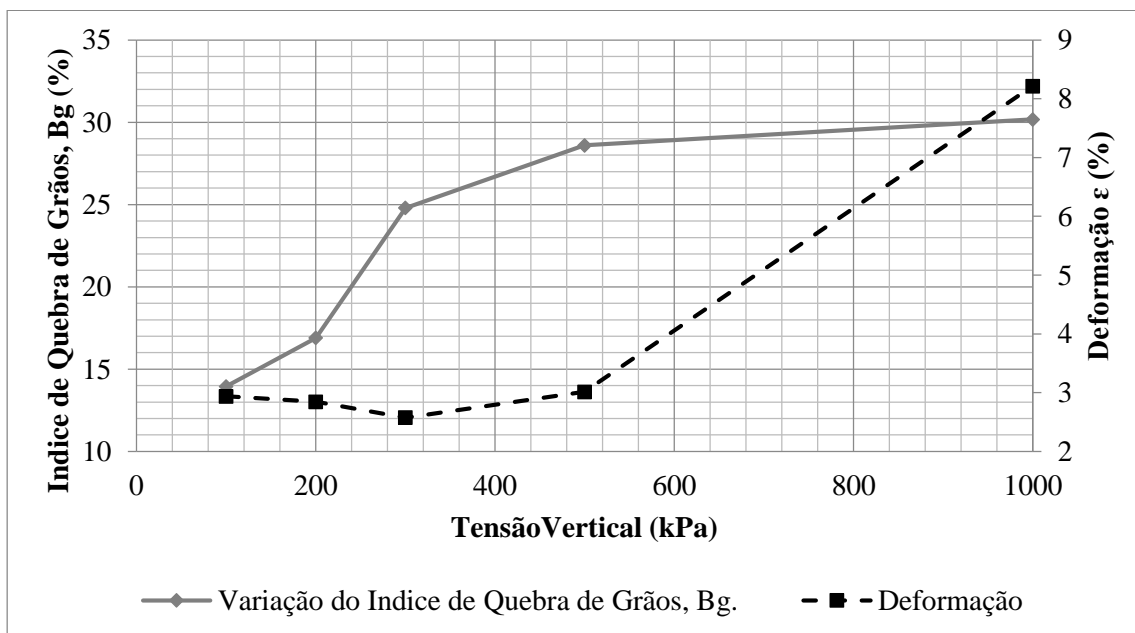


Figura 4.31. Tendência da variação da deformação e índice de quebra de grãos (B_g) nos ensaios de 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa.

Por outro lado, observa-se que o índice de quebra de grãos (B_g) apresenta um acréscimo com o aumento da tensão de compressão (Figura 4.31), mas esse acréscimo tende a apresentar uma diminuição em sua taxa de incremento entre as tensões de 500 e 1000 kPa devido à eliminação de pontos fracos da brita nas outras tensões. Além disso, também é possível observar que existe uma relação entre o aumento da deformação e a quebra de grãos a qual se apresenta mais

acentuadamente entre as tensões de 300 kPa até 1000 kPa. Está claro que o índice de quebra de grãos influencia a deformação da configuração empregada mas, não é o único fator que se encontra presente nesta característica. Também está presente a densificação do material, esses dois fatores só se apresentam com maior força a partir da tensão de 300 kPa. Isso se pode observar na Figura 4.32.

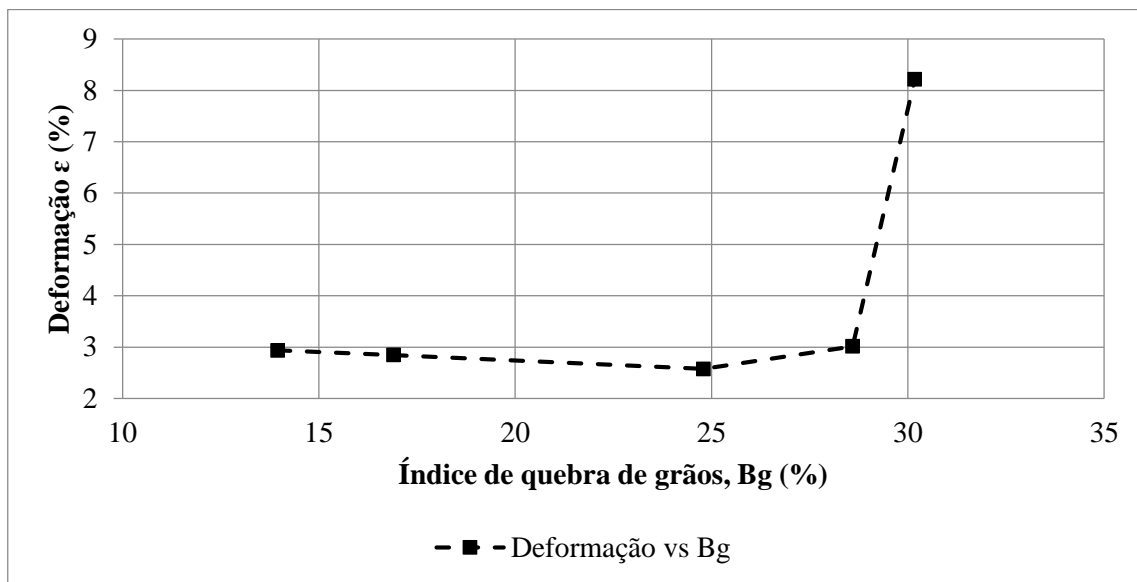
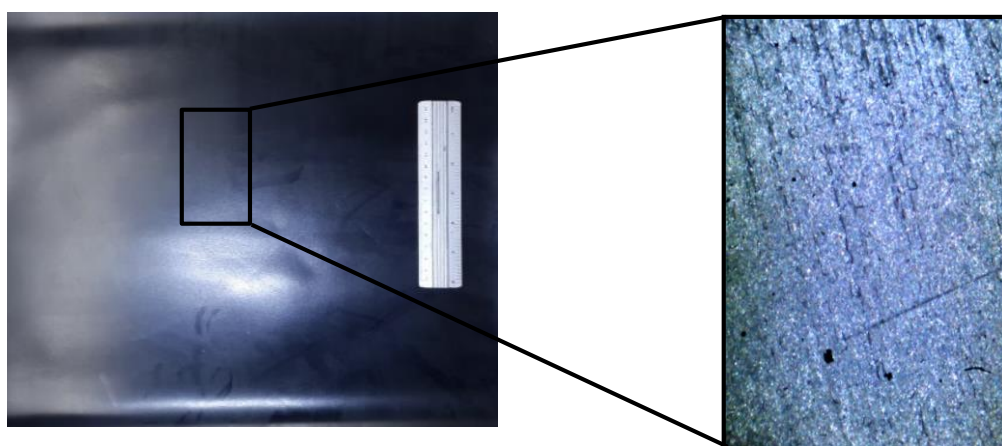


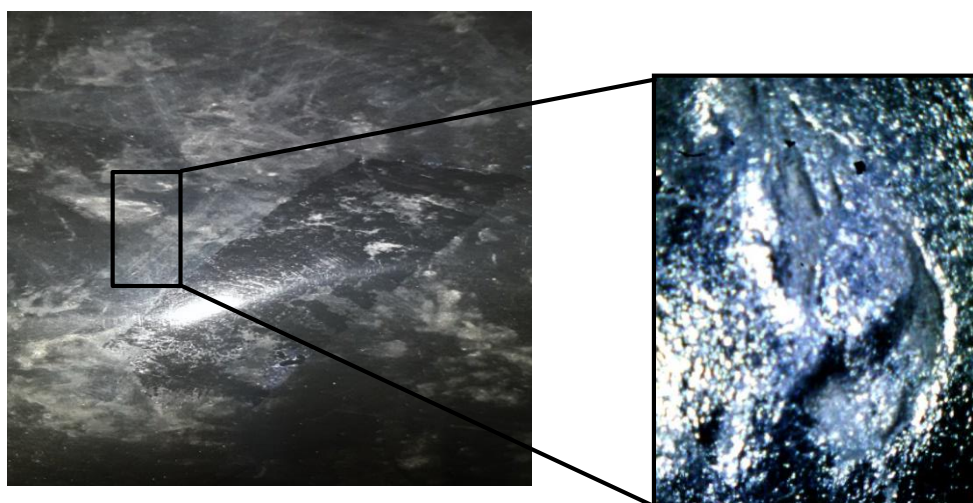
Figura 4.32. Deformação vs índice de quebra de grãos.

4.3.INSPEÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS APÓS ENSAIO DE DANO

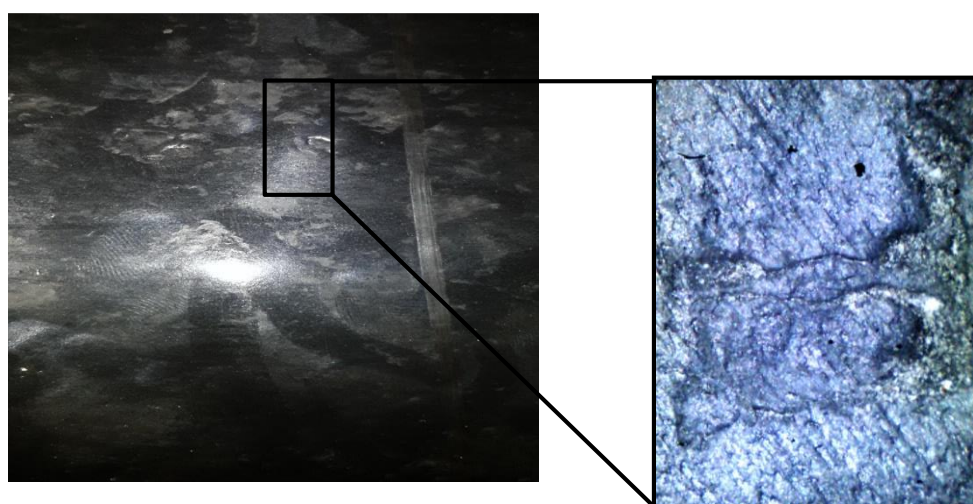
A inspeção visual foi executada antes e depois os ensaios de dano, assim como para as geomembranas virgens antes do ensaio de resistência à tração. Antes da realização dos ensaios não se observou nenhum tipo de dano, ou seja, nenhum furo, deformação indesejada ou arranhões. Por outro lado, após realizado o ensaio de dano, as geomembranas apresentaram modificações na sua integridade. Esses tipos de modificações estiveram caracterizados por entalhes e arranhões de pouca profundidade gerados pelo material granular pertencente à areia de granulometria grossa, camada inferior e deformações indesejadas (indentações com entalhes profundos) geradas pelo material granular da brita 3 (camada superior) que, sob as condições de tensão usadas, geraram mudança na espessura da geomembrana em alguns pontos. Em menor escala foram observados arranhões devido à movimentação das partículas de brita durante a aplicação da tensão de maneira a atingir-se um melhor arranjo, assim como às partículas obtidas do desgaste do mesmo material. A Figura 4.33 e a Figura 4.34 mostram os danos característicos sofridos pelas geomembranas durante o ensaio.



(a)

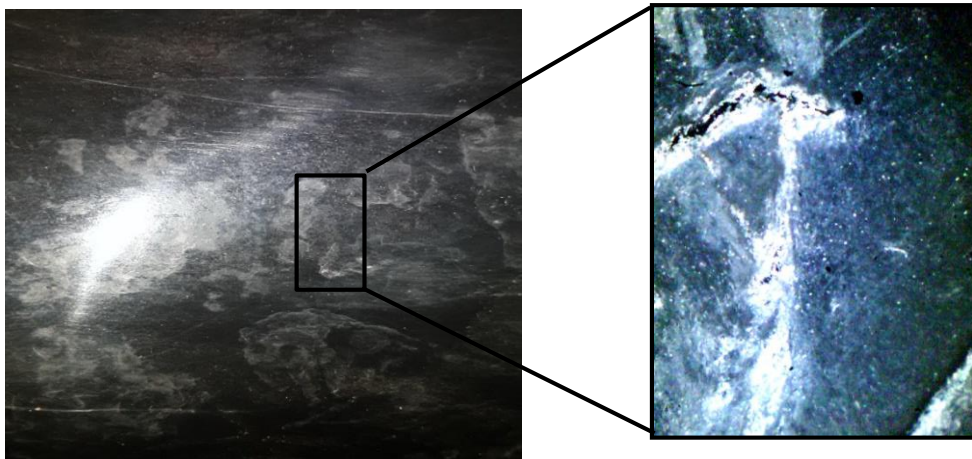


(b)

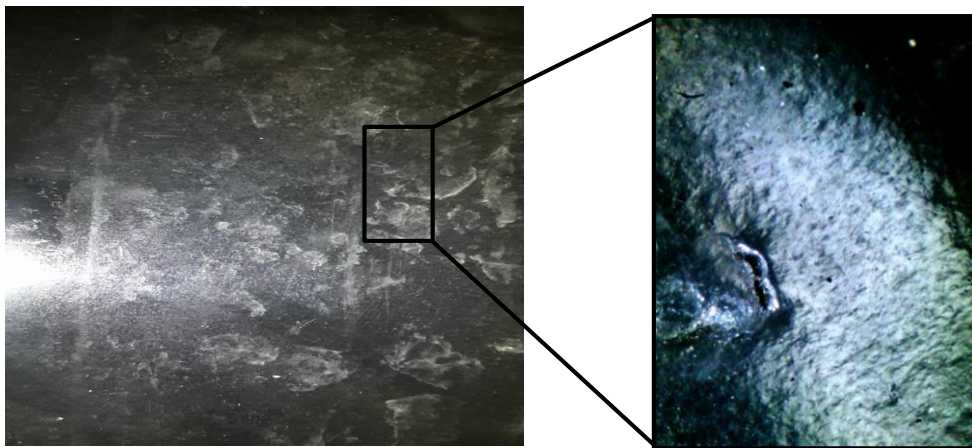


(c)

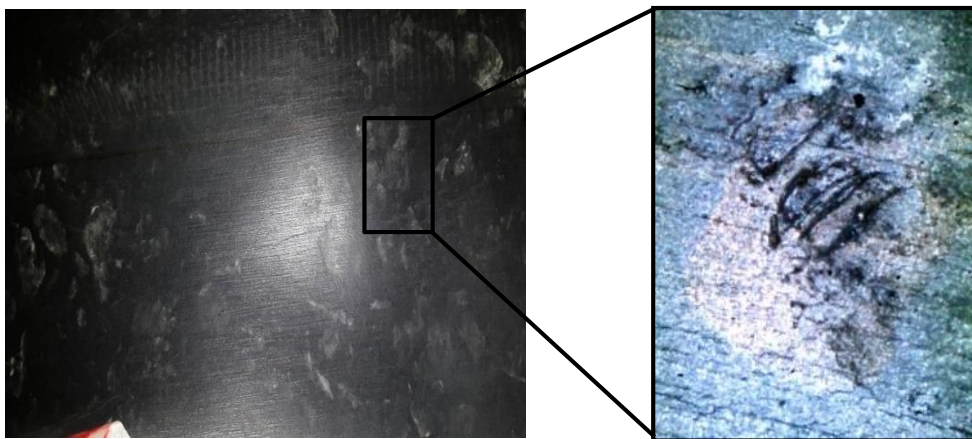
Figura 4.33. Danos em geomembranas com zoom 50x: (a) Geomembrana, (b) Tensão de 100kPa e (c) Tensão de 200 kPa.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.34. Danos em geomembranas com zoom 50x: (a) Tensão de 300kPa, (b) Tensão de 500kPa e (c) Tensão de 1000kPa.

4.4. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM FAIXA LARGA.

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração realizados nas amostras virgens e nas submetidas ao ensaio de dano. Conforme já foi explicado no Capítulo III, os ensaios foram realizados em duas direções *MD* e *CD*. Para as amostras virgens foram realizados dez ensaios de tração os quais representam a medida padrão da resistência real que apresentava a geomembrana sem dano. Para o caso das amostras danificadas foram feitos vinte e quatro ensaios para cada tensão aplicada. Primeiramente, serão mostrados os resultados obtidos e a análise feita das geomembranas virgens seguidos dos resultados e da análise para as geomembranas danificadas, para 3 características: resistência à tração, alongamento na ruptura e módulos secantes a 5% e 10%.

4.4.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA E ANÁLISE PARA GEOMEMBRANAS VIRGENS

Conforme já comentado, foram realizados ensaios em geomembranas virgens para estabelecer uma medida padrão da resistência que apresentava a geomembrana usada na pesquisa. Os resultados obtidos foram submetidos a uma análise estatística descritiva para se estabelecerem as características próprias do conjunto de dados.

Na Figura 4.36 se observa a variação da carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ) durante o ensaio de resistência à tração das dez amostras de geomembranas virgens.

Os valores das resistências apresentam-se entre 7,9 kN/m e 7,4 kN/m, com um valor médio de 7,63 kN/m e coeficiente de variação de 2,3%. Com respeito aos valores da resistência obtida, eles se encontram longe do valor médio de 14 kN/m representativo deste tipo de material e que se encontra na literatura (Koerner, 2005 e Nascimento, 2007). Isso pode ser devido à influência da garra usada no ensaio de tração, o que pode ter levado à uma redução no valor de resistência que apresenta a geomembrana de PVC (Figura 4.35).



(a)



(b)

Figura 4.35. Ruptura da geomembrana pela garra (a) Geomembrana danificada, (b) Geomembrana Virgem.

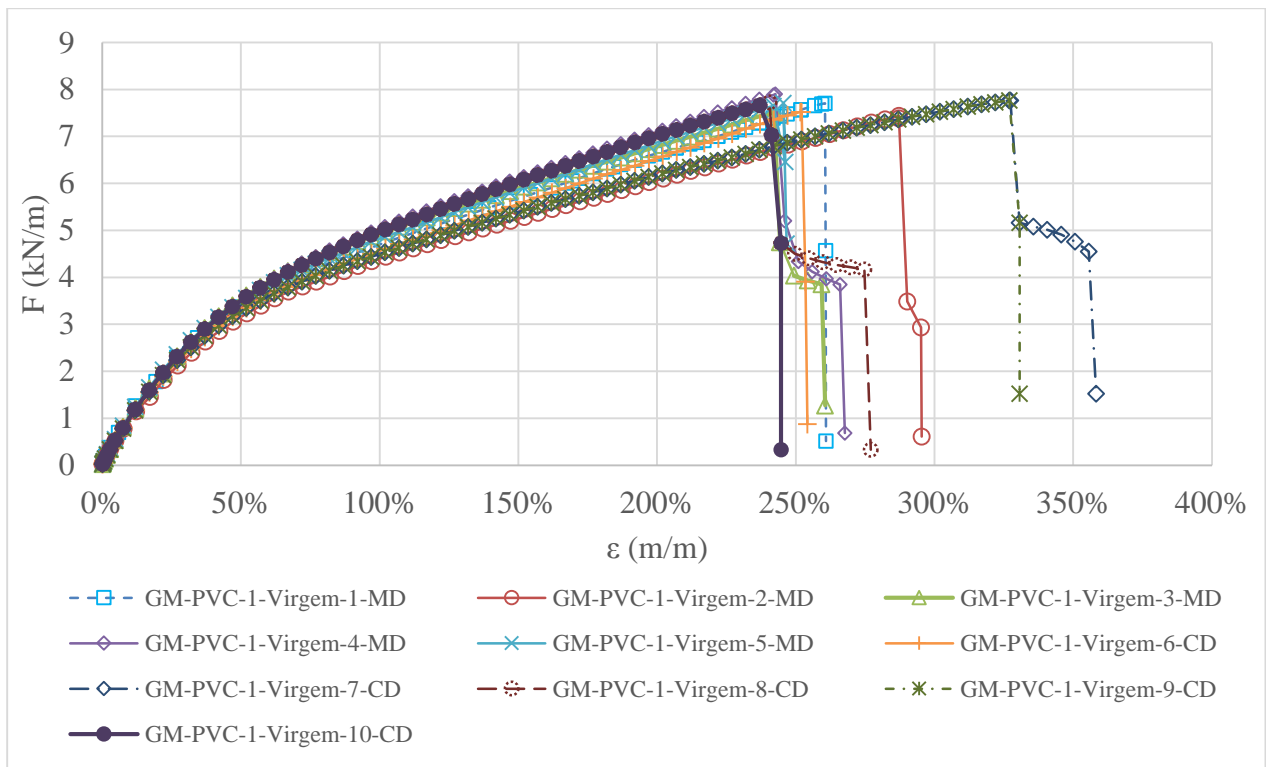


Figura 4.36. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas virgens de PVC de 1 mm de espessura.

Tendo em vista o coeficiente de variação dos dados obtidos, pode-se concluir que eles se encontram muito próximos um do outro, uma vez que o valor de 2,3% é um valor que representa repetitividade no ensaio, além de ser um valor aceito para este tipo de ensaios como se pode

encontrar na literatura perto de 2,27 % (Santos, 2011 e Silva *et al.*, 2015). Os valores obtidos desses ensaios encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Estatística descritiva dos resultados para ensaios em geomembranas virgens de PVC.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média (kN/m)	7,63
Máximo (kN/m)	7,90
Mínimo (kN/m)	7,43
Mediana (kN/m)	7,61
Variância (kN/m)²	0,030
Desvio Padrão (kN/m)	0,173
Coefficiente de Variação	0,023

Como observado na Figura 4.37, o 70% dos resultados obtidos para a resistência à tração se encontram entre 7,67 kN/m e 7,90 kN/m, e representam 7 das 10 amostras ensaiadas, o que indica uma boa representatividade e repetitividade dos ensaios. O valor médio encontrado para as geomembranas virgens é de 7,63 kN/m.

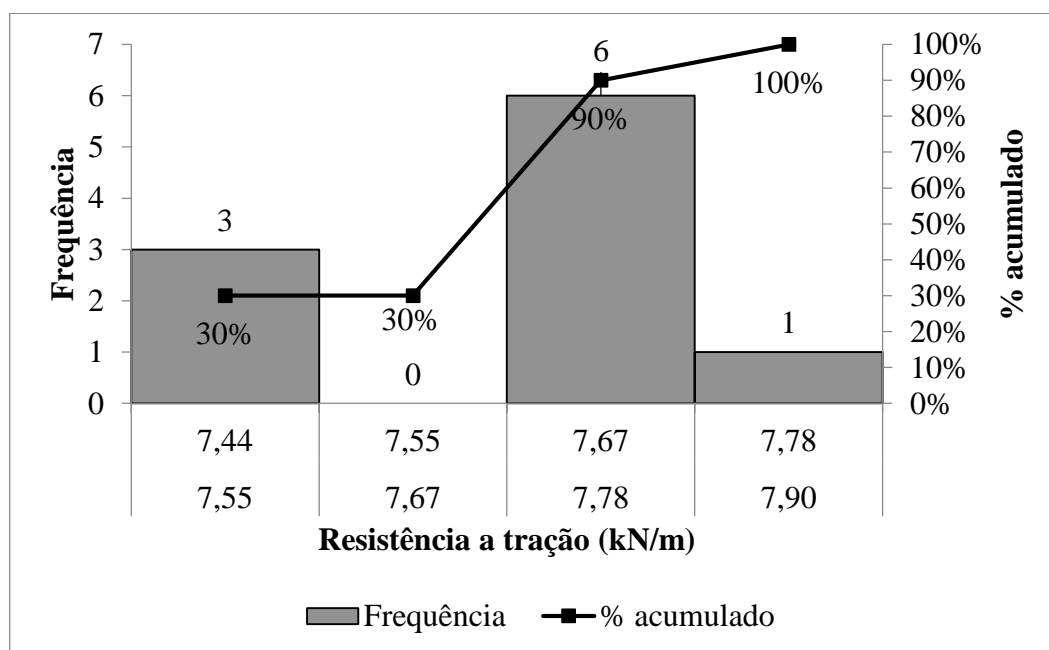


Figura 4.37. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC virgens.

Os anteriores dados de resistência se ajustam a uma distribuição de normal. Por outro lado as amostras ensaiadas na direção MD comparadas com aquelas ensaiadas na direção CD não apresentam diferença no valor obtido na resistência à tração, o qual foi comprovado por meio de uma análise Anova.

Por sua vez, para o alongamento das geomembranas, observar que as mesmas encontravam-se dentro de uma faixa compreendida entre 246.67% e 358.29% e com uma média representativa de 286%. Os anteriores valores concordam com o encontrado na literatura para este tipo de material, segundo o Koerner (2005), Nascimento (2007) e Ruiz-Gómez (2014) (valores entre 210% e 325%). A estatística descritiva dos resultados é apresentada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Estatística descritiva para o alongamento no ensaio de resistência à tração em geomembrana de PVC virgens.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	286%
Máxima	358%
Mínimo	247%
Mediana	272%
Moda	358%
Variância	17%
Desvio Padrão	41%
Coefficiente de variação	0,14

O 80% dos dados obtidos são encontrados dentro de uma faixa compreendida entre 246,67% e 302,48%, com um coeficiente de variação de 14,2% valor aceito para as características do material usado na pesquisa. O valor é aceitável levando em conta os resultados encontrados na literatura por exemplo 11,82 % (Santos, 2011) e por encontrar-se muito perto do valor para as geomembranas virgens. Também é possível observar que só o 20% dos dados se encontram afastados da média obtida, ou seja, só dois valores apresentam magnitudes fora do normal.

A Figura 4.38 apresenta a distribuição de frequência dos dados obtidos no ensaio e ao igual que para a resistência foi feito de maneira global com fins comparativos.

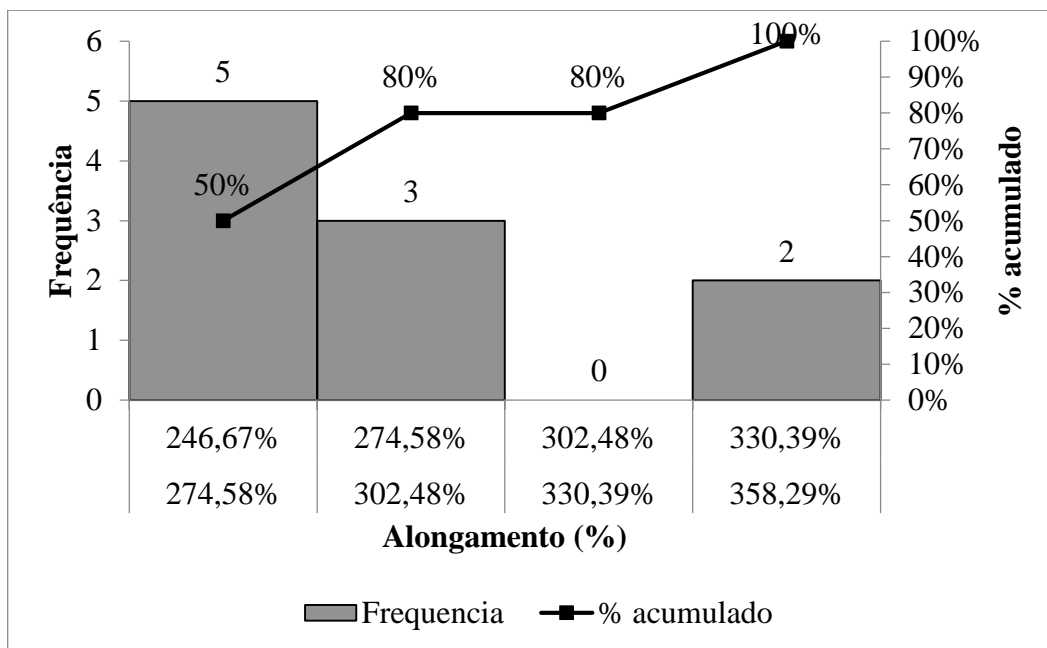


Figura 4.38. Distribuição de frequência para o alongamento do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC virgens.

Para o módulo secante foram realizadas duas análises uma para o módulo secante a 5% e outra a 10% com o objetivo de determinar a rigidez que a norma e alguns autores recomendam. Para o caso do módulo secante a 5% foi encontrado que este estava compreendido entre os valores 5,4 kN/m e 6,14 kN/m, com uma média representativa de 5,6 kN/m para um coeficiente de variação de 4,4%. Os dados desses parâmetros encontram-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Estatística descritiva para os resultados do módulo secante a 5% da geomembrana de PVC virgem (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	5,6
Máxima	6,1
Mínimo	5,4
Mediana	5,6
Variância	0,061
Desvio Padrão	0,25
Coefficiente de variação	0,044

Analisando-se a distribuição de frequência é possível verificar que 80% dos dados se encontram na faixa entre 5,36 kN/m e 5,75 kN/m e só dois dos dados obtidos se acham fora desta faixa o que indica mais uma vez a repetitividade do ensaio (Figura 4.39).

Para o módulo secante a 10% observou-se que o mesmo estava entre os valores de 4,83 kN/m e 5,42 kN/m com um coeficiente de variação de 4,2%. Esses resultados estão próximos aos apresentados para o caso do módulo secante a 5%. A média representativa para módulo secante a 10% é de 5,09kN/m, valor menor ao que apresenta o módulo secante a 10%. As características deste conjunto de dados são apresentadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11. Estatística descritiva para os resultados do módulo secante a 10% da geomembrana de PVC virgem (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	5,09
Máxima	5,42
Mínimo	4,83
Mediana	5,04
Variância	0,046
Desvio Padrão	0,214
Coeficiente de variação	0,042

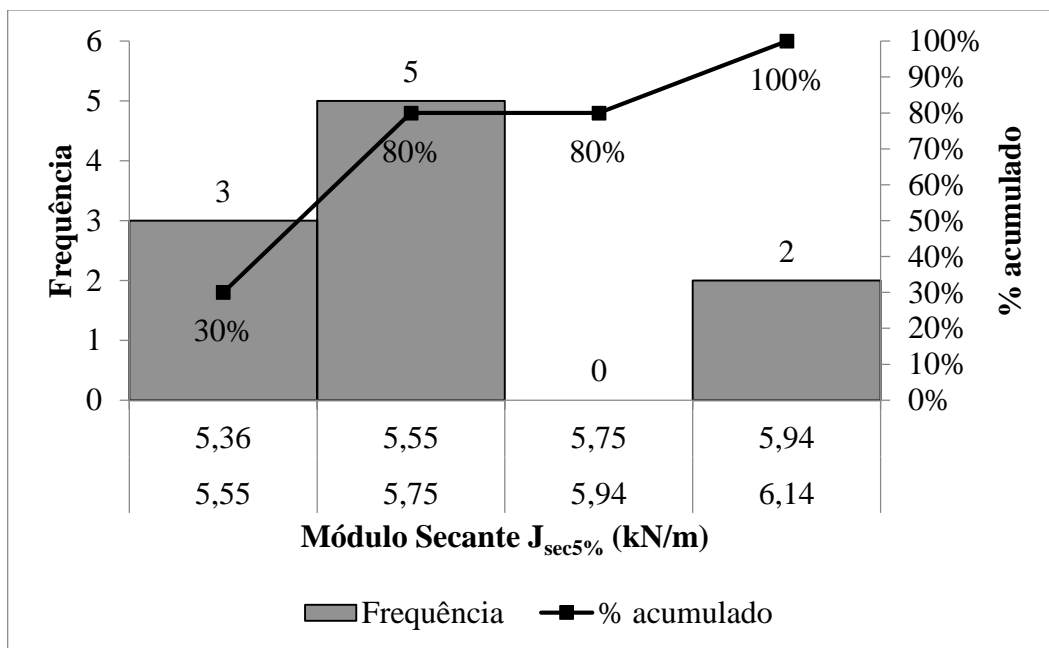


Figura 4.39. Distribuição de frequência para o módulo secante ao 5% da geomembrana de PVC virgem.

A Figura 4.40 apresenta a distribuição de frequências do módulo secante a 10%. Pode ser notado que 80% dos valores estão em apenas uma, compreendida entre os valores de 4,83 kN/m e 5,27 kN/m, o que mostra repetitividade de ensaio.

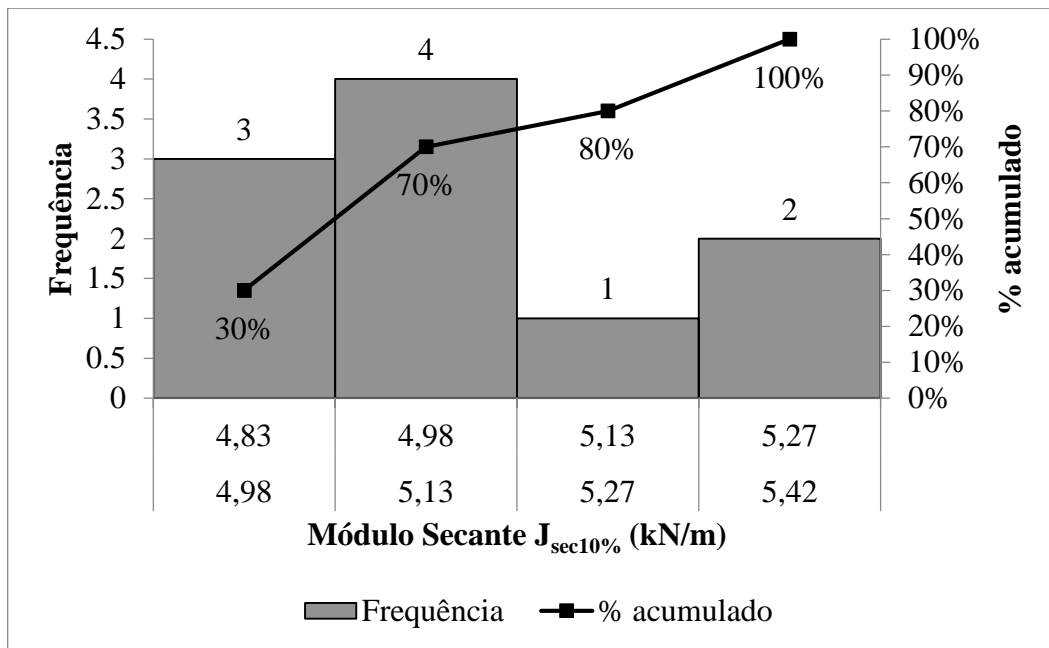


Figura 4.40. Distribuição de frequência para o módulo secante a 10% da geomembrana de PVC virgem.

As distribuições antes apresentadas com relação aos módulos secantes se ajustam a uma distribuição normal como se observa nas mesmas distribuições e a tabelas com a estatística descritiva dos módulos a 5 e 10%. De igual maneira a direção de fabricação (*MD* e *CD*)

4.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ANÁLISE PARA GEOMEMBRANAS DANIFICADAS: RESISTÊNCIA

A seguir são apresentados os resultados e as análises obtidos a partir dos ensaios de resistência à tração para geomembranas.

Para a tensão de 100 kPa, os valores de resistência à tração se encontraram entre 7,05 kN/m e 8,73 kN/m, com uma média de 7,95 kN/m e um coeficiente de variação de 6,4%. Com base nesses resultados, pode-se observar que existe um ligeiro aumento na resistência da geomembrana comparado com o valor obtido para as geomembranas virgens. O valor do coeficiente de variação é relativamente baixo (perto da literatura em torno de 5,64%), e assim também é possível reafirmar que os ensaios de dano feitos apresentam uma repetitividade. A estatística descritiva se apresenta na Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Estatística descritiva dos dados do ensaio de resistência à tração para geomembrana de PVC após ensaio de dano a 100 kPa (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	7,95
Máximo	8,73
Mínimo	7,05
Mediana	8,00
Variância	0,261
Desvio Padrão	0,511
Coefficiente de Variação	0,064

Com respeito à distribuição que os dados apresentam, na Figura 4.41 é possível observar que os dados obtidos encontram-se uniformemente distribuídos ao longo de todas as classes, além de se ajustar a uma distribuição normal.

Para definir se existe um acréscimo ou redução de rigidez do material devido aos danos relacionados ao ensaio, será necessário observar os resultados do ensaio de resistência para as demais tensões assim como o alongamento e o módulo secante obtidos.

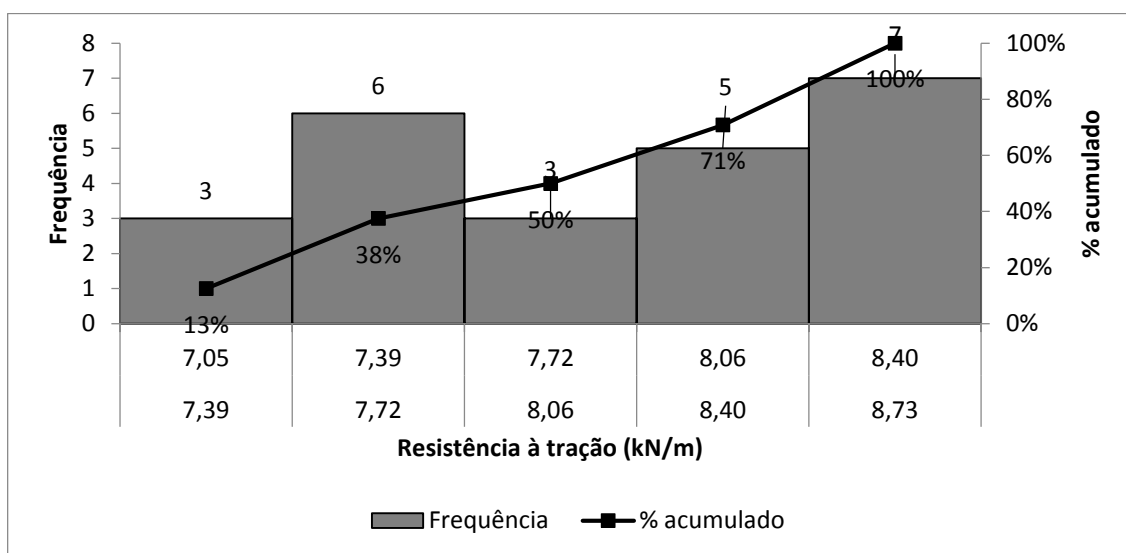


Figura 4.41. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 100 kPa.

Para a tensão de 200 kPa, a resistência média obtida foi de 8,12 kN/m com um coeficiente de variação de 9,9% (se apresenta maior ao encontrado na literatura). Esse valor é maior do que os obtidos nos casos anteriormente apresentados, o que indica que a variação na resistência

devido à aplicação da tensão é maior que para o caso anterior (tensão de 100 kPa), no entanto os resultados mantêm semelhança (não são muito diferentes) entre eles e a repetitividade dos ensaios de dano também é corroborada pelo seu coeficiente de variação. A Tabela 4.13 mostra os dados característicos deste conjunto de resultados.

Tabela 4.13. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	8,12
Máximo	9,50
Mínimo	5,72
Mediana	8,18
Variância	0,646
Desvio Padrão	0,804
Coefficiente de Variação	0,099

Na distribuição dos dados (Figura 4.42), se observa que se ajusta a uma distribuição normal. O valor da resistência com respeito às geomembranas virgens é maior, mas não com respeito as amostras após uma tensão de 100 kPa.

Por sua vez, para a tensão de 300 kPa, o valor médio da resistência foi de 8,38 kN/m o que apresenta um claro acréscimo do 10% aproximadamente comparado com o valor obtido para geomembranas virgens. Este conjunto de resultados se acha dentro dos valores de resistência de 6,96 kN/m e 9,51 kN/m e apresenta um coeficiente de variação de 7,9%. Este valor ainda quando alto com respeito ao obtida nas geomembranas virgens representa a repetitividade no ensaio de resistência e de dano. Os valores da estatística descritiva encontram-se apresentados na Tabela 4.14.

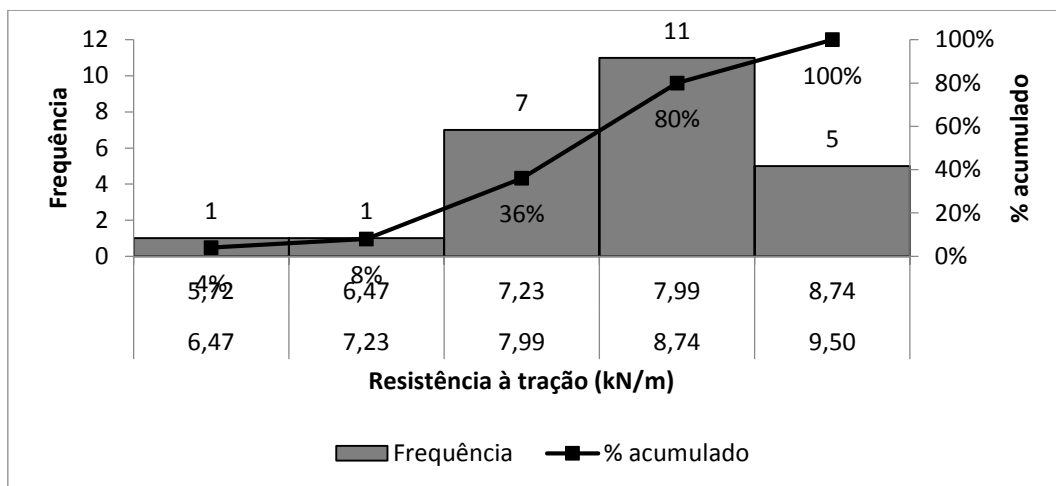


Figura 4.42. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa.

Tabela 4.14. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	8,38
Máximo	9,51
Mínimo	6,96
Mediana	8,33
Variância	0,442
Desvio Padrão	0,665
Coefficiente de Variação	0,079

Na distribuição de frequências é possível observar um acréscimo na resistência da geomembrana. Os dados se ajustam a uma distribuição normal. A Figura 4.43 mostra o mencionado anteriormente.

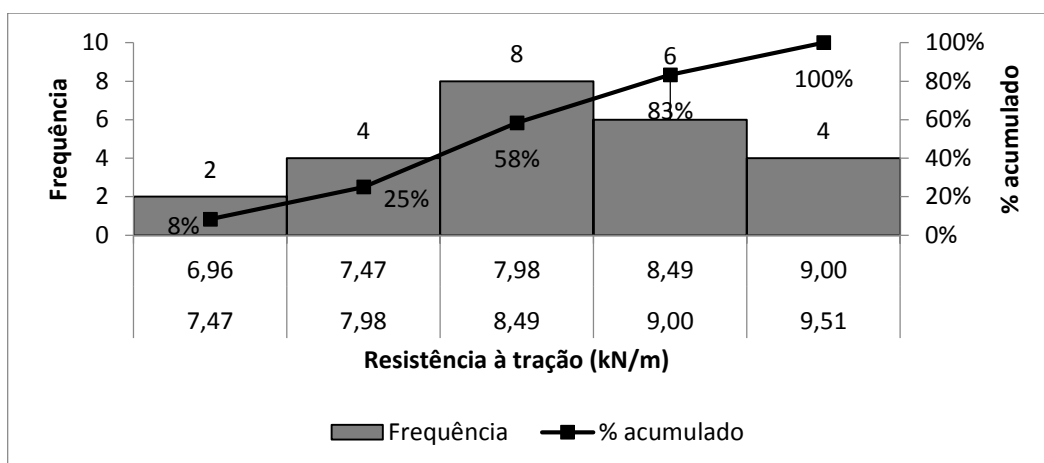


Figura 4.43. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa.

Para 500 kPa de tensão aplicada, o valor médio da resistência foi de 8,65 kN/m, e obtiveram-se valores extremos de 10,16 kN/m e 7,26 kN/m e um coeficiente de variação de 7,9%, valor similar ao obtido na anterior tensão e que não se encontra longe dos apresentados nas tensões de 100 e 200 kPa. A Tabela 4.15 mostra a estatística descritiva dos resultados obtidos nesta tensão.

Comparando-se o valor da resistência média à tração obtida com o valor das geomembranas virgens, há um acréscimo de 13,34%, mantendo assim a tendência de leve incremento apresentada nas outras tensões.

Tabela 4.15. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	8,65
Máximo	10,16
Mínimo	7,26
Mediana	8,78
Variância	0,467
Desvio Padrão	0,683
Coefficiente de Variação	0,079

A distribuição de frequências para esse caso (Figura 4.44) se ajusta a uma distribuição normal. Pode-se observar que, comparando-se com os demais valores obtidos para outras tensões aplicadas, o acréscimo observado é maior às outras.

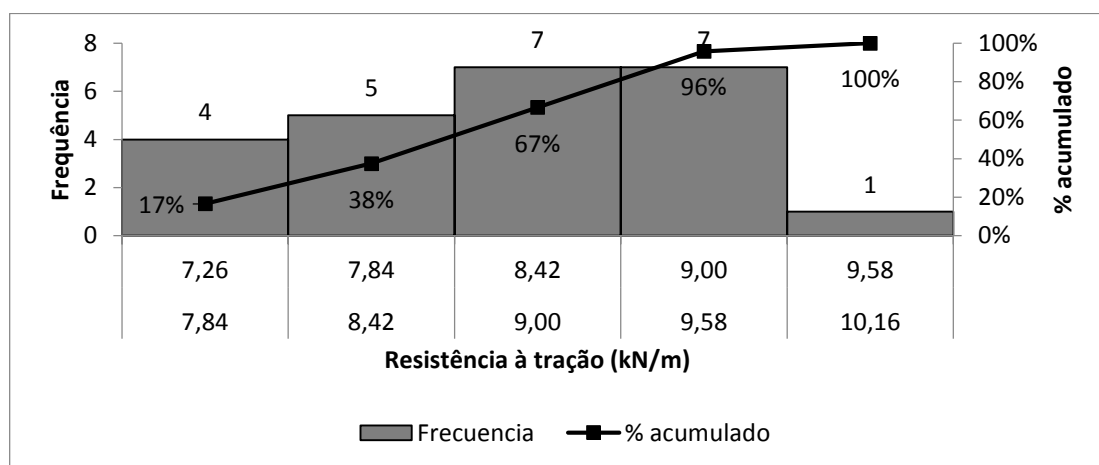


Figura 4.44. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa.

Por fim, para o maior valor de tensão aplicado (1000 kPa), os valores obtidos estavam em um intervalo entre os valores de 10,78 kN/m e 7,95 kN/m, com um valor médio de 9,52 kN/m. Este valor apresenta um acréscimo da resistência alto quando se comparando aos demais resultados e confirma a tendência de aumento nesta característica

Com relação à distribuição dos resultados das amostras ensaiadas, elas apresentam um coeficiente de variação de 9,3%, o maior obtido se comparado às demais tensões trabalhadas, no entanto mantém uniformidade no dano observado e repetitividade nos dois ensaios realizados (resistência à tração e dano). A Tabela 4.16 apresenta a estatística descritiva do conjunto de dados obtidos no ensaio de resistência à tração após uma aplicação de tensão de 1000 kPa.

Tabela 4.16. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	9,52
Máximo	10,78
Mínimo	7,95
Mediana	9,28
Variância	0,785
Desvio Padrão	0,886
Coefficiente de Variação	0,093

A Figura 4.45 mostra a distribuição de frequência da resistência à tração das geomembranas sob uma tensão de 1000 kPa. É possível observar o ganho de resistência das amostras após o ensaio de dano quando se comparando aos valores obtidos para as geomembranas virgens e com as amostras com dano após a aplicação dos outros valores de tensão.

Ao igual que as outras distribuições, os dados obtidos para a tensão de 1000 kPa se ajustam a uma distribuição normal.

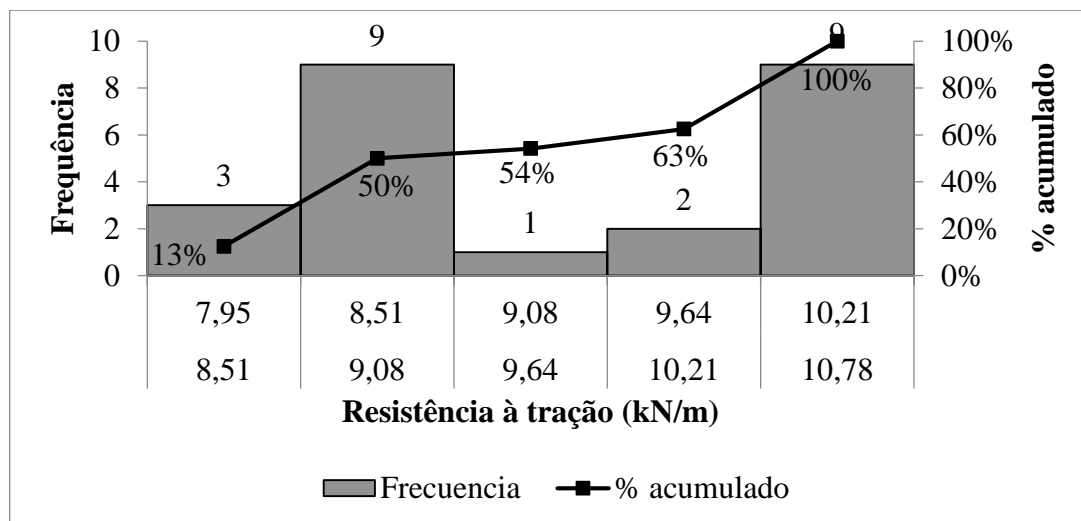


Figura 4.45. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa.

A Tabela 4.17 mostra o resumo dos resultados da resistência média obtida nos ensaios a tração. De maneira geral se observa que existe um aumento na resistência produto da tensão aplicada e esse aumento se apresenta com maior claridade na tensão de 1000 kPa. Isso pode ser possível devido à densificação do material e aos valores do índice de quebra de grãos presentes em cada um dos ensaios realizados, os quais permitiram uma mudança na granulometria e características da camada drenante superior que gerou uma melhor distribuição das tensões aplicadas assim como a perda de arestas pelo arredondamento do material evitando assim o puncionamento da geomembrana e sim uma compressão que permitisse o rearranjo das cadeias poliméricas.

Tabela 4.17. Resumo valores médios das resistências obtidas para as geomembranas virgens, após 100, 200, 300, 500 e 1000 kPa, unidades em kN/m.

CARÁCTERÍSTICA	TENSÃO (kPa)					
	Virgem	100	200	300	500	1000
Média	7,6	8,0	8,1	8,4	8,7	9,5
Máximo	7,9	8,7	9,5	9,5	10,2	10,8
Mínimo	7,4	7,1	5,7	7,0	7,3	7,9
Variância	0,030	0,261	0,646	0,442	0,467	0,785
Desvio padrão	0,17	0,51	0,80	0,67	0,68	0,89
Coefficiente de variação	0,023	0,064	0,099	0,079	0,079	0,093
Acréscimo com respeito à geomembrana virgem	0,0%	4,2%	6,4%	9,8%	13,4%	24,7%

4.4.3. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ANÁLISE PARA GEOMEMBRANAS DANIFICADAS: ALONGAMENTO.

Complementarmente à análise da resistência à tração obtida nas amostras danificadas foi preciso realizar também uma análise de outras características entre elas o alongamento apresentado na ruptura no ensaio. Isso teve o objetivo de verificar qual foi a influência do dano ocorrido sobre nesta característica.

Para a primeira tensão aplicada (100 kPa), verificou-se que a porcentagem de alongamento médio foi 252% e que o intervalo que abrange os valores de alongamento nesta tensão está entre os valores de 286% e 227,59% e apresenta um coeficiente de variação de 6,3%. A Tabela 4.18 apresenta os dados da estatística descritiva do conjunto de resultados.

Quando comparado ao valor obtido pela geomembrana virgem, o valor médio da porcentagem de alongamento obtido nesta tensão foi levemente menor.

Tabela 4.18. Estatística descritiva dos resultados de alongamento em geomembranas de PVC após aplicação da tensão de 100 kPa.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	252%
Máximo	286%
Mínimo	228%
Mediana	249%
Variância	3%
Desvio Padrão	16%
Coeficiente de Variação	0,0634

Na Figura 4.46 se observa a distribuição de frequência da porcentagem de alongamento para a tensão de 100 kPa. Nela podemos ver que a distribuição normal se ajusta aos dados obtidos e comparando com as geomembranas virgens não apresenta uma diferença, o que se observa com certeza é a tendência a diminuir seu valor tendo em conta que seus dados se encontram em maior parte ao lado esquerdo.

Para o valor de segunda tensão aplicado (200 kPa), os valores de alongamento se encontraram entre 289,49% e 209,31% com um valor médio de 254%. Este valor médio da porcentagem de

alongamento é menor ao apresentado pela geomembrana virgem, mas é igual ao obtido na tensão de 100 kPa. Assim, é possível dizer que houve uma diminuição do valor da percentagem de alongamento, mas este não é elevado com respeito ao valor padrão (geomembrana virgem) nem com a anterior tensão.

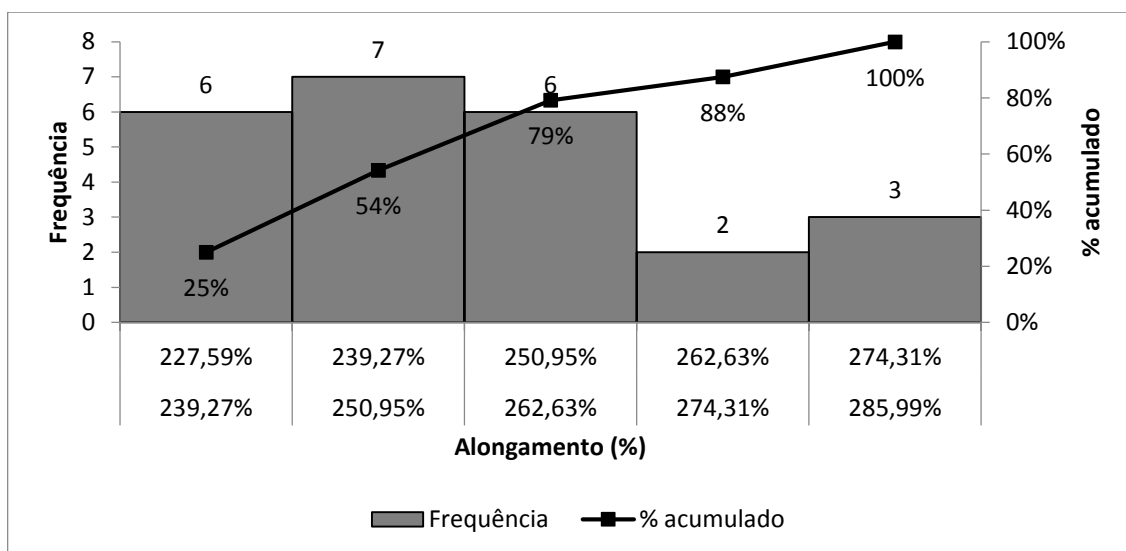


Figura 4.46. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 100 kPa, alongamento.

Os dados obtidos neste ensaio apresentam um CV de 9%, valor maior quando comparado aos anteriores, mas que se mantém dentro do aceitável para esta característica (levando em conta os valores de CV achados por Santos 12,55 % (2011)). A Tabela 4.19 mostra a estatística descritiva do conjunto de dados.

Tabela 4.19. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de alongamento em geomembranas de PVC após aplicação da tensão de 200 kPa.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	254%
Máximo	289%
Mínimo	209%
Mediana	260%
Variância	5%
Desvio Padrão	23%
Coefficiente de Variação	0,090

A distribuição de frequências (Figura 4.47) também evidencia o mencionado anteriormente: a distribuição dos dados referentes às geomembranas após aplicação das duas primeiras tensões

é similar, mas a tensão de 200 kPa apresenta uma maior dispersão dos dados com relação à anterior tensão. Na distribuição, que se ajusta a uma normal, se observa uma diminuição no valor além de ser uma transição entre a anterior e seguinte tensão.

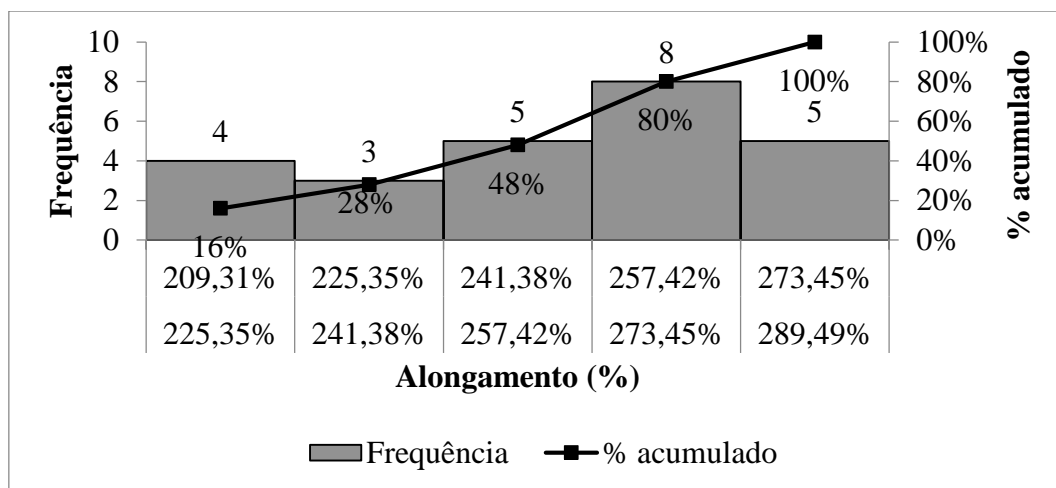


Figura 4.47. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa, alongamento.

Para a tensão de 300 kPa, a porcentagem de alongamento diminui bastante quando comparado ao valor padrão estabelecido a partir das geomembranas virgens. O valor da porcentagem média de alongamento é de 240%, o qual se encontra dentro de um intervalo estabelecido entre os valores de 274% e 200,15% e que apresenta um valor de CV de 9,4%. Os dados são dispersos com respeito à média amostral, mas mantem um valor aceitável para esta característica. A Tabela 4.20 mostra características da estatística descritiva do conjunto de dados.

O 96% dos resultados se encontra com uma porcentagem de alongamento menor a 272% o que claramente evidencia uma diminuição desta característica com respeito às demais tensões e o valor padrão estabelecido pela geomembranas virgens. Na Figura 4.48 se observa o anteriormente dito.

Os dados se ajustam a uma distribuição normal.

Tabela 4.20. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de alongamento em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, alongamento.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	240%
Máximo	274%
Mínimo	200%
Mediana	245%
Variância	5%
Desvio Padrão	23%
Coefficiente de Variação	0,094

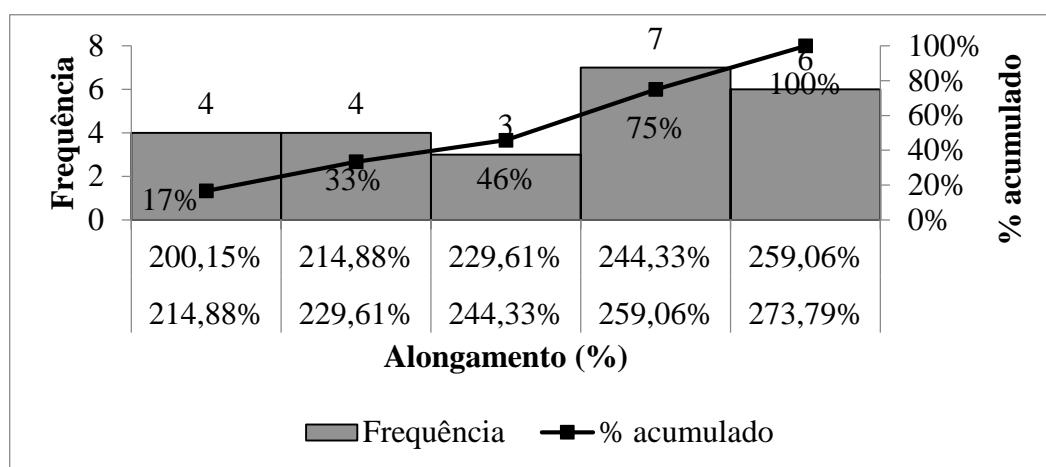


Figura 4.48. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, alongamento.

Quando o valor de tensão aplicada passou a ser 500 kPa, pode-se observar que a porcentagem de alongamento médio apresentado pela geomembrana após a aplicação desse nível de tensão foi de 242% compreendida entre os valores extremos 292% e 167,65% e possuía um coeficiente de variação de 14%. Cabe salientar que o CV foi o maior encontrado e pode-se concluir que o dano tem maior influência na dispersão dos resultados no alongamento que com respeito à resistência à tração para este caso. A Tabela 4.21 mostra a estatística descritiva dos dados obtidos.

O valor médio obtido é menor que o apresentado pela geomembrana virgem, assim com respeito às anteriores tensões aplicadas (perto dos 40% e 10% para as tensões de 100 kPa e 200 kPa respectivamente). Embora apresente uma redução do alongamento com respeito à medida padrão, a mesma não é considerável.

Tabela 4.21. Estatística descritiva dos resultados de em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 300 kPa.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	242%
Máximo	292%
Mínimo	168%
Mediana	254%
Variância	11%
Desvio Padrão	34%
Coefficiente de Variação	0,140

Outra maneira de observar o anteriormente dito é por meio da distribuição de frequência, a qual se pode analisar na Figura 4.49, aí 92% dos dados se acham sob uma porcentagem de alongamento de 272% com uma tendência clara à diminuição desta característica, mas não elevada já que ainda comparada com as geomembranas virgens e com as danificadas após tensões de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa todas elas compartilham classes onde se apresentam a maioria dos seus dados.

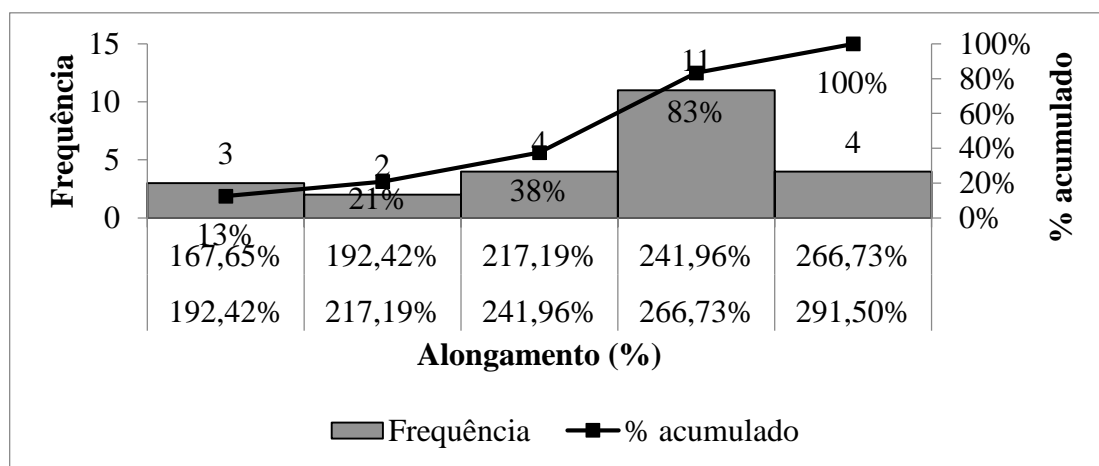


Figura 4.49. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, alongamento.

Para as geomembranas após a aplicação de uma tensão de 1000 kPa a porcentagem de alongamento médio foi de 157% com um CV de 9,3%. O valor do alongamento é muito menor ao que apresenta a geomembrana virgem (129%) e ao valor apresentado pelas outras tensões. Observando-se esse valor nota um aumento na rigidez da geomembrana devido à aplicação da tensão. O valor de CV é maior ao apresentado pela geomembrana sem dano, mas guarda uma

concordância com os valores de coeficiente de variação pelas outras tensões aplicadas. Valores característicos deste conjunto se apresenta na Tabela 4.22.

Tabela 4.22. Estatística descritiva dos resultados de alongamento em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 1000 kPa.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	157%
Máximo	180%
Mínimo	128%
Mediana	160%
Variância	78%
Desvio Padrão	89%
Coeficiente de Variação	0,093

Na Figura 4.50 pode-se observar claramente a diferença na distribuição dos resultados para a tensão de 1000 kPa comparada com as demais tensões e a medida padrão. Todos os valores encontrados no ensaio de 1000 kPa se encontram sob o valor de 180,39% até um valor de 128,19%, valor que só é atingido por três resultados da geomembranas após a aplicação da tensão de 500 kPa. Tendo em conta os resultados obtidos é possível concluir que a geomembrana passou por um processo de aumento de rigidez devido à tensão aplicada. Também é possível estabelecer que o grau de alteração, ou seja, o ganho de rigidez por parte do material é influenciado pelo nível de tensão que se aplica sobre o mesmo.

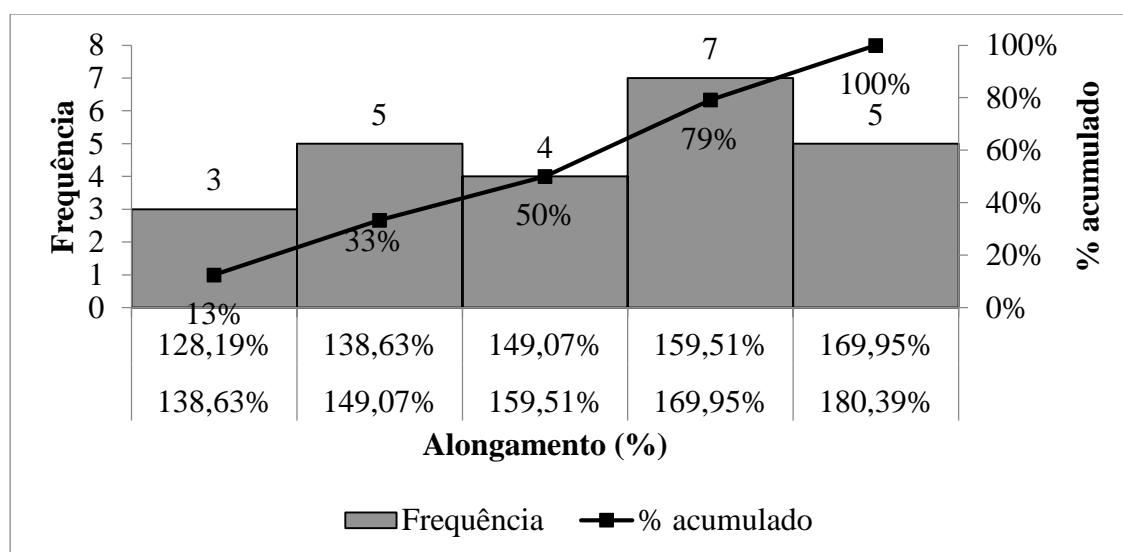


Figura 4.50. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após aplicada a tensão de 1000 kPa, alongamento.

4.4.4. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E ANÁLISE PARA GEOMEMBRANAS DANIFICADAS: MÓDULO SECANTE

Para dar maior clareza à conclusão anteriormente mostrada, acréscimo na rigidez do material, foi realizada uma análise da variação do módulo secante levando em consideração os valores usados e recomendados na literatura de deformação para tal valor (ASTM D4885 e Koerner 2005) de 5% e 10%. Isso foi realizado para todas as tensões aplicadas.

Para a tensão de 100 kPa, o valor médio do módulo secante a 5% obtido neste nível de tensão é de 5,5 kN/m que, comparado com o valor padrão da geomembrana virgem, apresenta-se um pouco menor, razão pela qual é possível dizer que não existe variação do módulo a este nível de tensão nesta percentagem. A Tabela 4.23 mostra a estatística descritiva do conjunto de dados.

Tabela 4.23. Estatística descritiva dos resultados do módulo secante $J_{sec5\%}$ a partir do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 100 kPa, (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	5,47
Máximo	6,00
Mínimo	4,64
Mediana	5,56
Variância	0,085
Desvio Padrão	0,292
Coefficiente de Variação	0,053

Por outro lado, o módulo secante a 10% de deformação mostrou-se novamente menor ao valor para a geomembrana virgem (5,01 kN/m) assim como ao valor do módulo a 5% para a mesma tensão. Ainda quando foram menores os valores encontrados, eles não apresentam uma diferença alta em relação aos valores obtidos nas geomembranas virgens, razão pela qual é possível concluir que para a tensão de 100 kPa com relação aos módulos secantes a 5% e 10% não existe uma variação alta.

A Tabela 4.24 mostra os dados estatísticos do conjunto de resultados obtido para o módulo secante a 10%.

Tabela 4.24. Estatística descritiva dos resultados do módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m) a partir do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após aplicação de tensão de 100 kPa.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	5,012
Máximo	5,423
Mínimo	4,373
Mediana	5,067
Variância	0,051
Desvio Padrão	0,225
Coefficiente de Variação	0,045

Outra maneira de observar o anteriormente dito é por meio da distribuição de frequência para as porcentagens do módulo secante. As Figura 4.51 e Figura 4.52 mostram que entre o 54% e 50% de seus dados se encontram nos mesmos valores que os obtidos nas geomembranas virgens. Isso confirma o resultado de que a variação dos módulos secantes para esse nível de tensão não é visível.

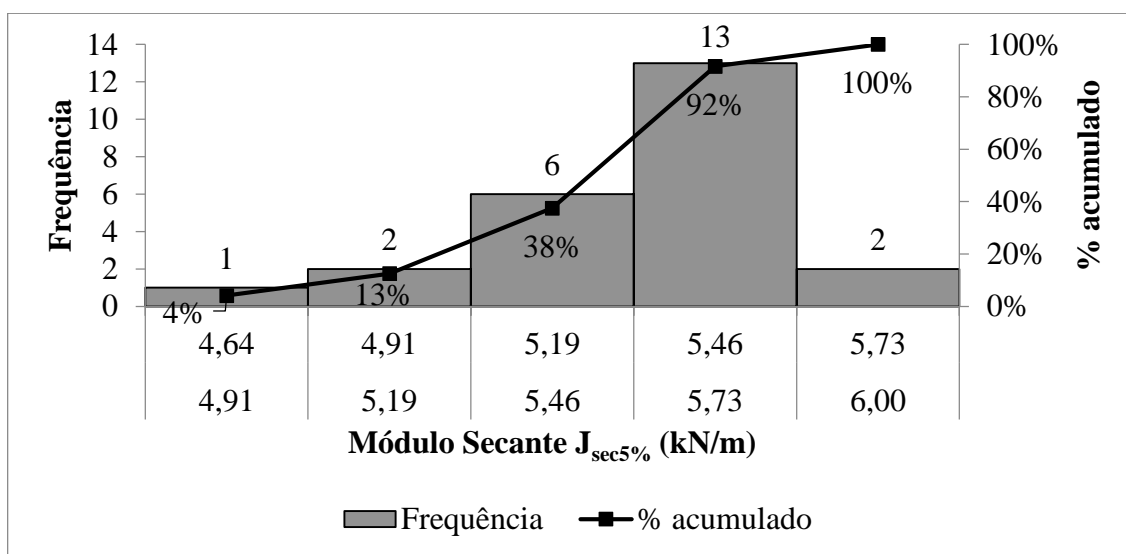


Figura 4.51. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 100 kPa, módulo secante a 5%.

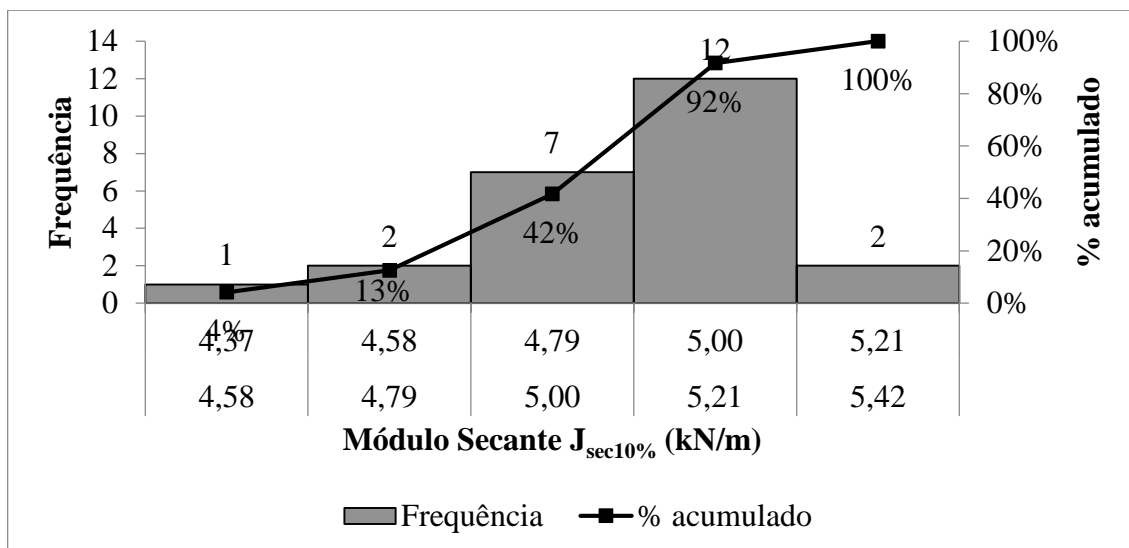


Figura 4.52. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 100 kPa, módulo secante a 10%.

Para a tensão de 200 kPa, o valor médio do módulo secante a 5% de deformação é de 5,7 kN/m e encontra-se no intervalo compreendido entre os valores 7,08 kN/m e 4,6 kN/m. Comparando-se esse valor médio aos valores da anterior tensão e ao apresentado pela geomembrana virgem verifica-se que ele é maior. No entanto, embora seja maior, a variação do módulo a 5% não é considerável.

Para o módulo secante a 10%, o valor encontrado foi de 5,2 kN/m. Da mesma forma que ocorreu para o módulo a 5%, houve um acréscimo na sua magnitude com respeito às outras tensões e a medida padrão, mas esse aumento não é considerável. A estatística descritiva se observa na Tabela 4.25 e na Tabela 4.26.

Tabela 4.25. Estatística descritiva dos resultados de módulo secante $J_{sec5\%}$ (kN/m) a partir do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 200 kPa.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	5,66
Máximo	6,44
Mínimo	4,58
Mediana	5,75
Variância	0,273
Desvio Padrão	0,523
Coefficiente de Variação	0,092

Tabela 4.26. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 200 kPa, módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	5,20
Máximo	6,27
Mínimo	4,36
Mediana	5,22
Variância	0,199
Desvio Padrão	0,446
Coefficiente de Variação	0,086

As Figura 4.53 e Figura 4.54 mostram que existe um acréscimo nesta característica, ainda assim sua variação não é considerável como se observa nelas. As duas percentagens mantem similitude com os valores da geomembranas virgens. Os dados dos dois parâmetros se ajustam a uma distribuição normal.

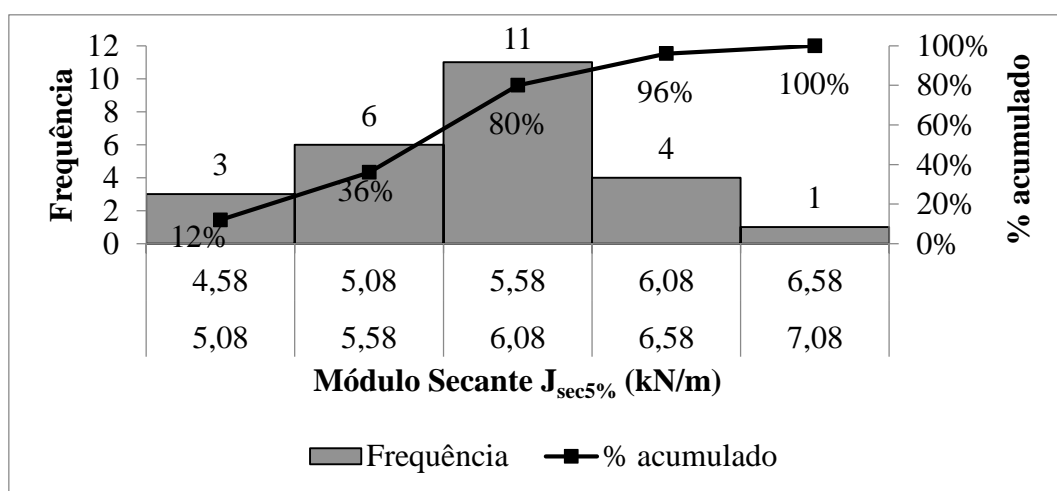


Figura 4.53. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa, módulo secante a 5%.

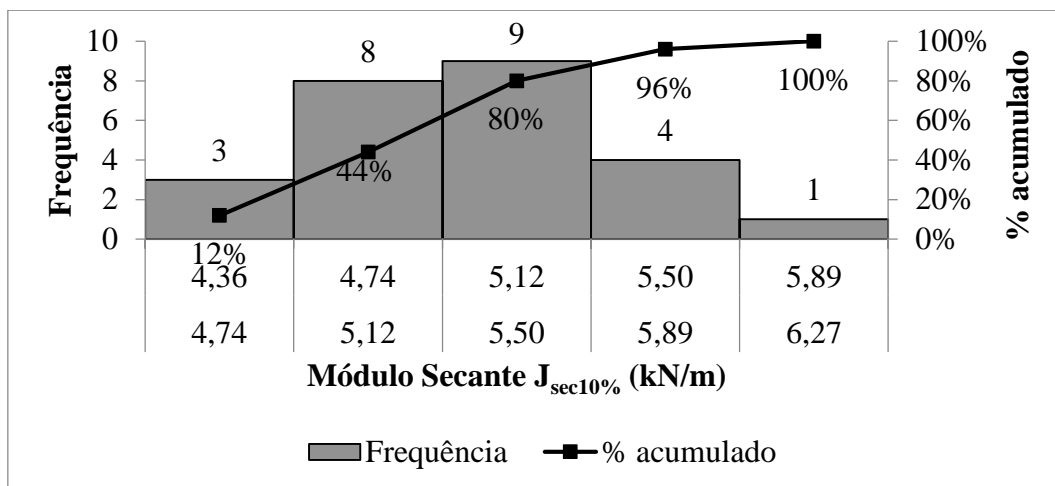


Figura 4.54. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 200 kPa, módulo secante a 10%.

A Tabela 4.27 e a Tabela 4.28 mostram a estatística descritiva dos resultados para os módulos a 5% e a 10%, respectivamente, para a tensão de 300 kPa. O valor encontrado para o módulo secante a 5% é de 6,6 kN/m, valor representativamente maior ao obtido pelas amostras padrão que apresentaram um valor de 5,6 kN/m. Por sua vez, para o módulo secante a 10% de deformação, o valor obtido foi de 5,9 kN/m, valor maior do que o valor obtido para as geomembranas virgens. Quando comparado ao valor do módulo secante a 5%, é menor e não apresentou a mesma variação observada para o módulo a 5% com a medida padrão.

Os coeficientes de variação mostrados pelos dois módulos para o mesmo nível de tensão aplicada foram próximos, porém houve um pequeno aumento se é comparado com as amostras virgens.

Tabela 4.27. Estatística descritiva dos resultados de módulo secante $J_{sec5\%}$ (kN/m) a partir do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após a aplicação da tensão de 300 kPa.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	6,55
Máximo	7,36
Mínimo	6,14
Mediana	6,44
Variância	0,123
Desvio Padrão	0,351
Coefficiente de Variação	0,054

Tabela 4.28. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	5,91
Máximo	6,54
Mínimo	5,58
Mediana	5,86
Variância	0,081
Desvio Padrão	0,285
Coefficiente de Variação	0,048

Se observamos a distribuições destas duas características é possível ver que 100% dos dados se encontram numa classe de valor ainda mais alto que os resultados obtidos para esta mesma característica na geomembrana virgem.

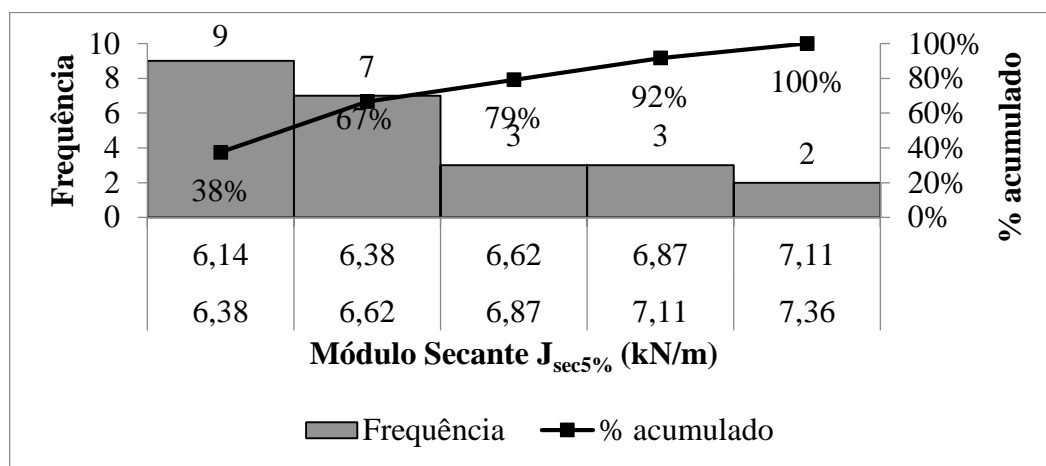


Figura 4.55. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, módulo secante a 5%.

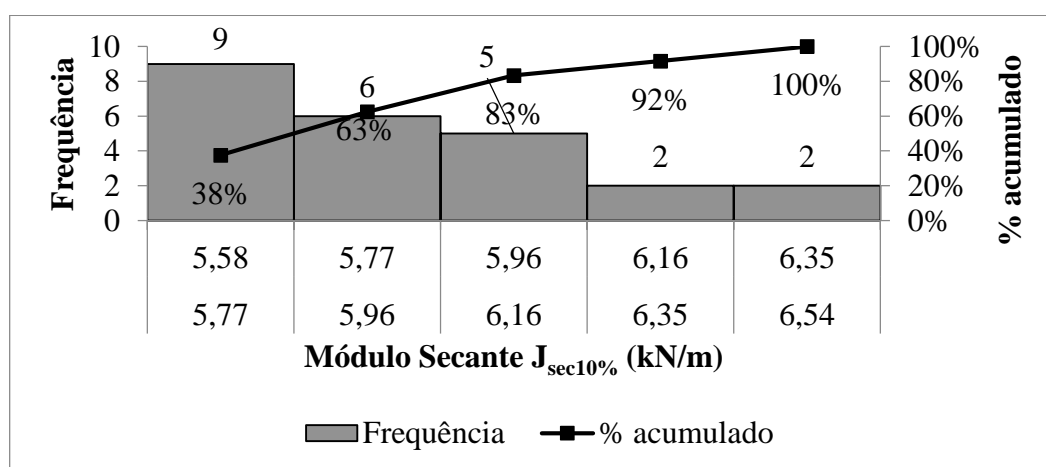


Figura 4.56. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 300 kPa, módulo secante a 10%.

Os módulos secantes a 5% e a 10% para a tensão de 500 kPa mantêm a tendência de apresentar um acréscimo no valor obtido (7,2 kN/m e 6,2 kN/m, respectivamente). Ambos apresentaram uma maior variação para tais características do que as anteriores tensões com respeito à geomembrana virgem. Outra característica que chama a atenção são os valores dos coeficientes de variação que para 5% e 10 % de deformação foram de 27,8% e 20,2%, respectivamente. A magnitude foi um pouco alta com relação aos valores apresentados pelas demais tensões utilizadas. A Tabela 4.29 e a Tabela 4.30 mostram a estatística descritiva para os dois módulos secantes.

Tabela 4.29. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, módulo secante $J_{sec5\%}$ (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	7,15
Máximo	12,58
Mínimo	5,90
Mediana	6,41
Variância	3,943
Desvio Padrão	1,986
Coefficiente de Variação	0,278

Tabela 4.30. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	6,24
Máximo	9,63
Mínimo	5,36
Mediana	5,77
Variância	1,591
Desvio Padrão	1,261
Coefficiente de Variação	0,202

Na distribuição de frequências, a Figura 4.57 e a Figura 4.58 se observam que ainda quando as tendências dos módulos em estudo sejam superiores existem resultados que se encontram na mesma classe que os resultados das tensões anteriores. Os dados se ajustam a uma distribuição normal.

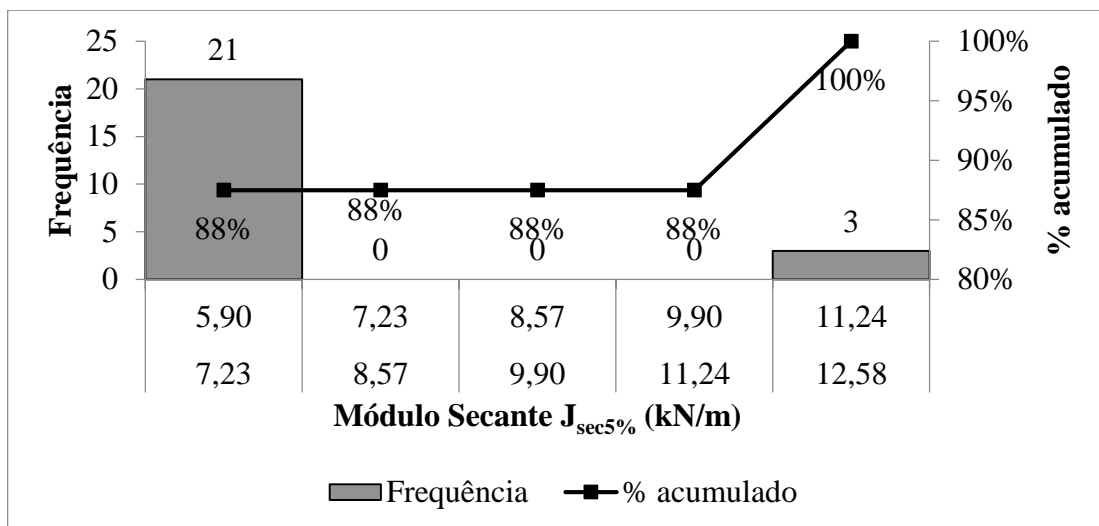


Figura 4.57. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, módulo secante a 5%.

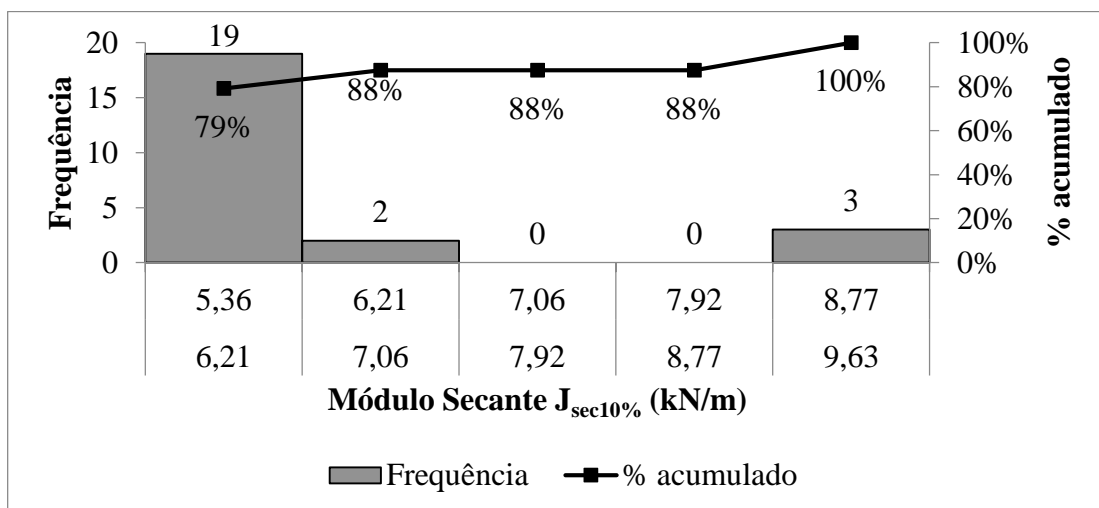


Figura 4.58. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 500 kPa, módulo secante a 10%.

Para 1000 kPa aplicados, observa-se um aumento nos módulos secantes a 5% e a 10% (12,3 kN/m e 9,7 kN/m, respectivamente) quando comparados aos valores referentes às tensões anteriores e à medida padrão. Esses valores mostraram um $CV_{5\%}$ de 5,7% e $CV_{10\%}$ de 5,7%, valores aceitos e em concordância com os valores já obtidos nas outras tensões (exceto na tensão de 500kPa). A Tabela 4.31 e a Tabela 4.32 mostram a estatística descritiva.

Tabela 4.31. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa, módulo secante $J_{sec5\%}$ (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	12,29
Máximo	14,00
Mínimo	11,12
Mediana	12,05
Variância	0,486
Desvio Padrão	0,697
Coefficiente de Variação	0,057

Tabela 4.32. Estatística descritiva dos resultados do ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa, módulo secante $J_{sec10\%}$ (kN/m).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Média	9,66
Máximo	10,98
Mínimo	8,64
Mediana	9,58
Variância	0,301
Desvio Padrão	0,549
Coefficiente de Variação	0,057

A distribuição de frequência mostrou concordância com o anteriormente dito, nas Figura 4.59 e Figura 4.60 se observa que 100% dos dados se encontram numa claro aumento comparado aos valores das geomembranas virgens e apresentam uma distribuição normal.

Tendo em conta os valores e as distribuições apresentadas também pode-se concluir que o valor do módulo a 5% é sempre maior ao apresentado pelo módulo secante a 10%.

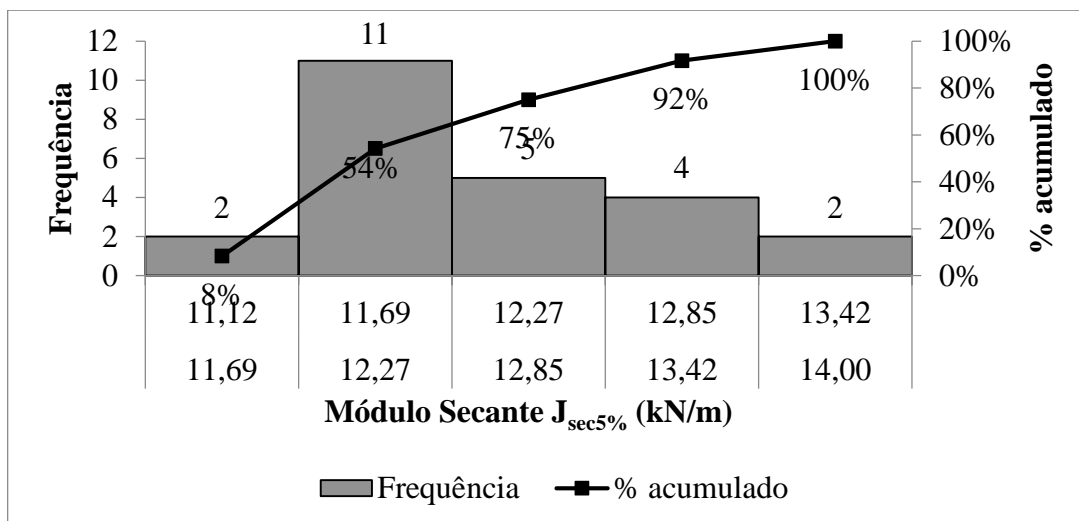


Figura 4.59. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa, módulo secante a 5%.

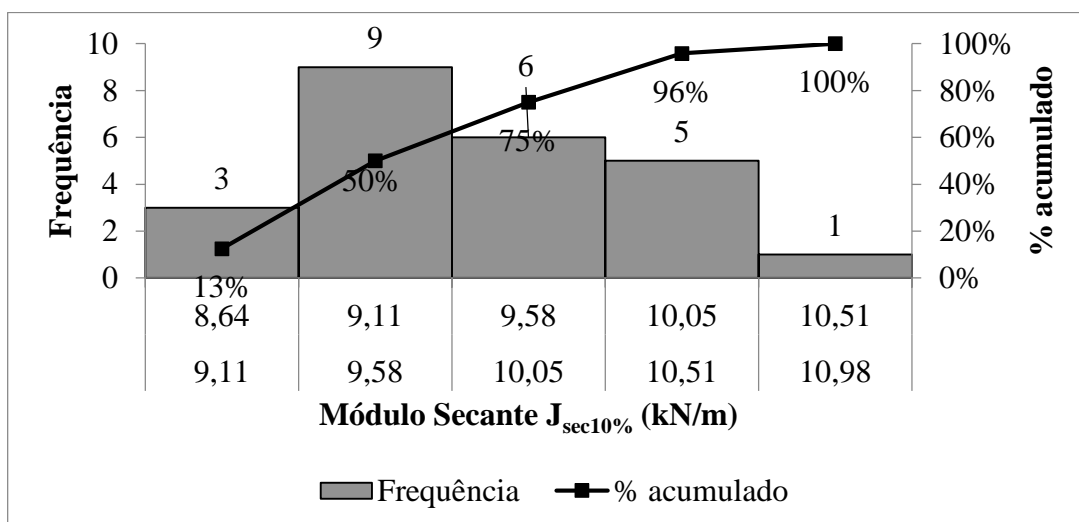


Figura 4.60. Distribuição de frequência da resistência à tração em geomembranas de PVC após tensão de 1000 kPa, módulo secante a 10%.

4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, DO ALONGAMENTO E DO MÓDULO SECANTE

Neste item, como já foi dito no capítulo 3, se realiza uma análise estatística dos dados obtidos nos ensaios de resistência à tração, com o objetivo de avaliar se houve variação na resistência, no alongamento e no módulo secante da geomembrana. Como última etapa, determinou-se o fator de redução para cada uma das características anteriormente mencionadas.

4.5.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A RESISTÊNCIA MÁXIMA

A partir da distribuição t de *Student*, se determinaram-se os valores do intervalo de confiança que foram comparados com os valores médios da resistência a diferentes tensões de dano. No caso da resistência à tração da geomembrana virgem o intervalo de confiança é o observado na Tabela 4.33.

Tabela 4.33. Dados base para o cálculo do intervalo de confiança (μ) para a geomembrana de PVC virgem com resistência média de 7,6 kN/m.

Média	7,6	
Cv	0,023	
t_{98%}	2,821	
n	10	
μ	7,478	7,787

Para um nível de confiança de 98% obteve-se que o intervalo de confiança está compreendido entre os valores de 7,478 kN/m e 7,787 kN/m. Uma vez tendo os valores limites do intervalo, estes foram então comparados com os valores médios da resistência à tração obtidos após o ensaio de dano com diferentes tensões. Caso o valor encontra-se dentro desse intervalo, toma-se o valor igual a um para determinar o fator de redução. Os valores médios das resistências das diferentes tensões aplicadas encontram-se fora do intervalo de confiança, como pode-se observar na Tabela 4.34. Conforme os resultados obtidos no item 4.4.2 deste capítulo e a análise realizada, os valores do fator de redução, que também se observam na Tabela 4.34, apresentam um acréscimo na resistência, ou seja, os valores de F.R. obtidos se encontram maiores a 1. A tendência presente nos resultados é que quanto maior tensão aplicada, maior é o fator de redução encontrado (a geomembrana apresenta maior resistência). Este comportamento pode-se observar na Figura 4.61.

Tabela 4.34. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança e fator de redução (F.R.). Unidades em kN/m.

Tensão	Valor da resistência	Dentro do Intervalo.	F.R.
F₀	7,63	Está	1
F₁₀₀	7,95	Não	1,04
F₂₀₀	8,12	Não	1,06
F₃₀₀	8,38	Não	1,10
F₅₀₀	8,65	Não	1,13
F₁₀₀₀	9,51	Não	1,25

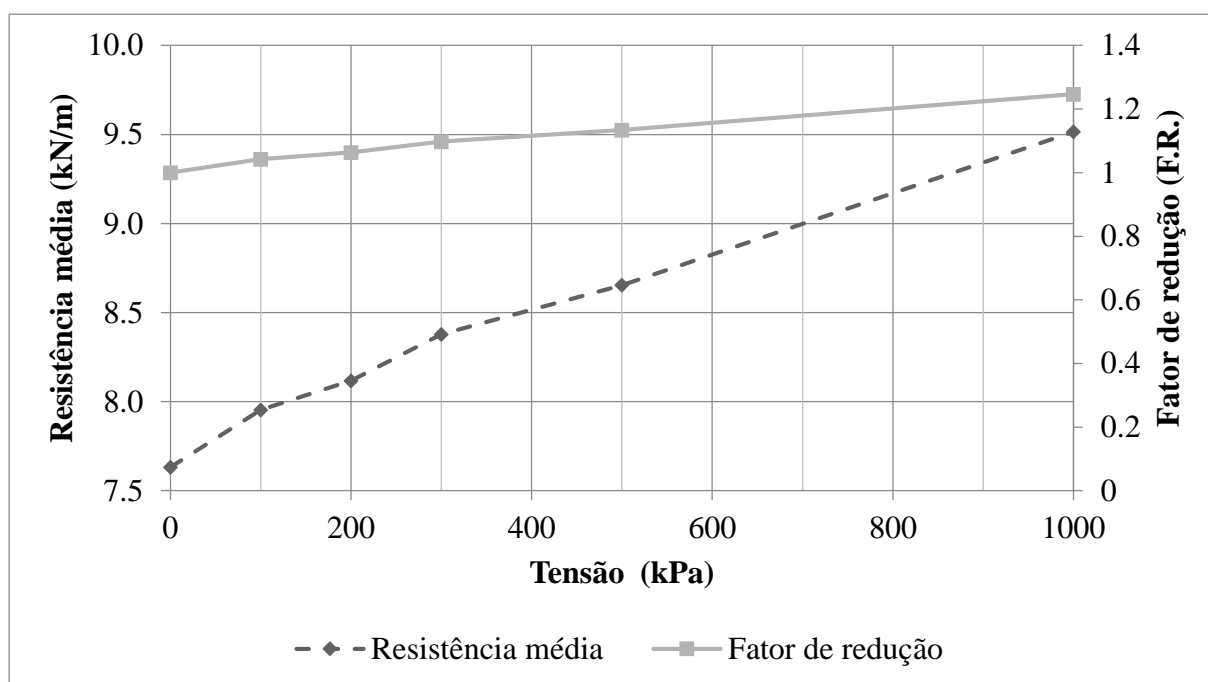


Figura 4.61. Comportamento da Resistência à Tração e o Fator de Redução com a tensão.

Se realizamos a mesma análise para cada tensão aplicada com o objetivo de determinar a variação entre tensões, é possível observar que a mudança da resistência de uma a outra tensão aplicada não é evidente, ou seja, o acréscimo no valor é pouco e pode pertencer ou encontrar-se dentro do intervalo de confiança das tensões adjacentes. O anterior se observa na Tabela 4.35. A análise Anova também foi realizado para cada nível de tensão, nela foi encontrado que a direção de tração da amostra se é influenciada apresentando-se um acréscimo maior na direção MD comparada com a direção CD.

Tabela 4.35. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança entre tensões para resistência (Está=encontra-se dentro do intervalo; Não= encontra-se fora do intervalo de confiança).

Parâmetro	Resistência à tração (kN/m)					
	Virgem	100 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	1000 kPa
Virgem	Está	Não	Não	Não	Não	Não
100 kPa	Não	Está	Está	Não	Não	Não
200 kPa	Não	Está	Está	Está	Não	Não
300 kPa	Não	Não	Está	Está	Está	Não
500 kPa	Não	Não	Não	Está	Está	Não
1000 kPa	Não	Não	Não	Não	Não	Está

4.5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PORCENTAGEM DE ALONGAMENTO

Ao contrário do apresentado pela resistência nas diferentes tensões aplicadas, a porcentagem de alongamento foi diminuindo seu valor conforme a tensão aplicada era aumentada. O procedimento seguido para a obtenção do intervalo de confiança foi o mesmo aplicado no item anterior. A Tabela 4.36 mostra o intervalo de confiança encontrado para esta propriedade para amostra virgem. Dentro deste intervalo estão as porcentagens de alongamento médio correspondentes às tensões de 100 e 200 kPa o que confirma o que foi analisado no item 4.4.3. deste capítulo, que existe uma diminuição na porcentagem de alongamento, mas este não é evidente, ou seja, a aplicação destes níveis de tensão não gera variação importante nesta característica.

As tensões de 300, 500 e 1000 kPa apresentam uma redução nesta propriedade como se observa na Tabela 4.37. Aqui é importante destacar que quanto maior o nível de tensão menor é o fator de redução para esta propriedade. A Figura 4.62 mostra a tendência do fator de redução com a tensão aplicada.

Tabela 4.36. Dados base para o cálculo do intervalo de confiança (μ) para a geomembrana de PVC virgem com porcentagem média de alongamento de 285,6%.

Média	285,60%	
Cv	14,24%	
t_{98%}	2,8214	
n	10	
μ	249,32%	321,87%

Tabela 4.37. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança e fator de redução (F.R.), porcentagem de alongamento. Unidades em %

Tensão	Valor do Alongamento	Dentro do Intervalo	F.R.
D₀	285,60	Está	1
D₁₀₀	252,13	Está	1
D₂₀₀	253,90	Está	1
D₃₀₀	240,01	Não	0,84
D₅₀₀	242,08	Não	0,85
D₁₀₀₀	156,96	Não	0,55

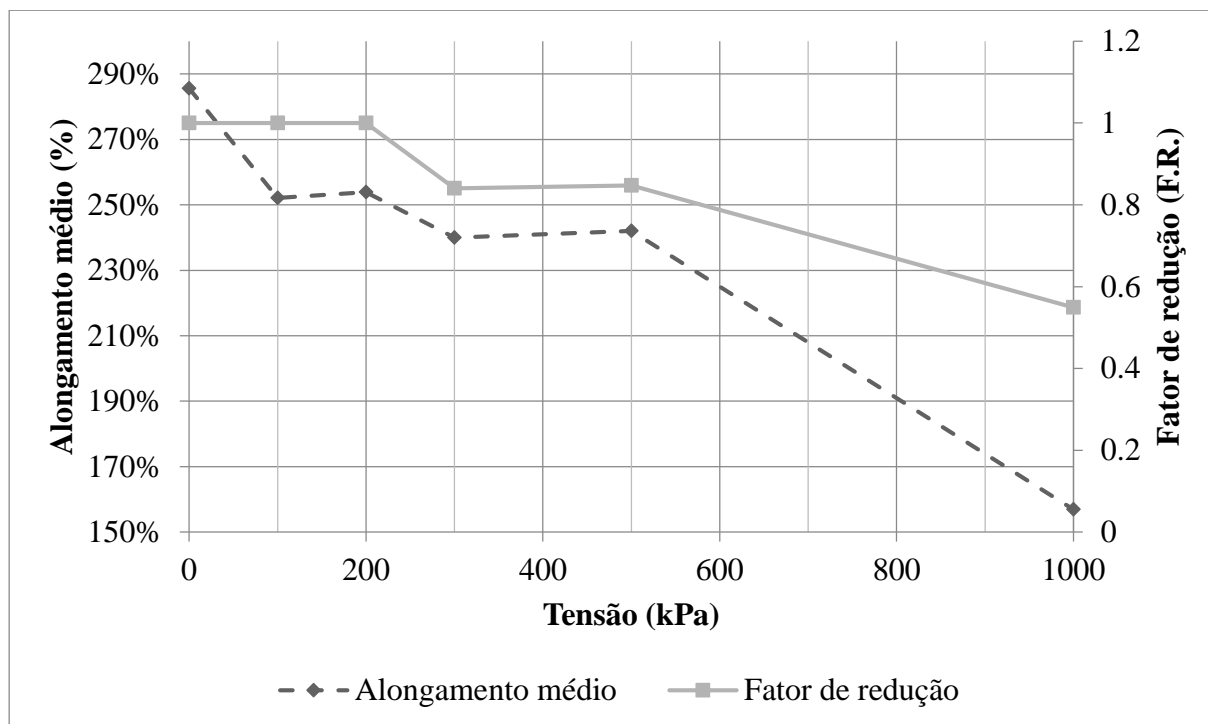


Figura 4.62. Comportamento da percentagem média do alongamento e o fator de redução com a tensão.

Para o caso entre tensões é possível observar que não existe uma diferença relevante, ou seja, a diminuição experimentalada é pouca comparada com a tensão anterior como se mostra na Tabela 4.38.

Tabela 4.38. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança entre tensões para alongamento (Está=encontra-se dentro do intervalo; Não= encontra-se fora do intervalo de confiança).

Parâmetro	Alongamento (%)					
	Virgem	100 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	1000 kPa
Virgem	Está	Não	Não	Não	Não	Não
100 kPa	Está	Está	Está	Não	Está	Não
200 kPa	Está	Está	Está	Não	Está	Não
300 kPa	Não	Não	Não	Está	Está	Não
500 kPa	Não	Não	Não	Está	Está	Não
1000 kPa	Não	Não	Não	Não	Não	Está

A análise Anova mostrou que não existe diferença alguma entre uma ou outra direção de tração, ou seja, os valores obtidos de alongamento de uma tensão estimada se apresentam iguais e é possível estabelecer que pertencem a uma mesma população.

4.5.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÓDULO SECANTE A 5% DE DEFORMAÇÃO

Para esta característica, o intervalo de confiança foi determinado entre os valores de 5,413 kN/m e 5,853 kN/m, como se mostra na Tabela 4.39. Com base nos valores observados, encontrou-se que os resultados obtidos para as tensões aplicadas de 100 e 200 kPa estão dentro do intervalo, ou seja, não se apresenta variação no módulo secante a 5% com respeito à geomembrana virgem.

Para as outras tensões aplicadas observa-se um acréscimo no módulo secante, o que claramente indica que o material objeto da pesquisa apresenta um aumento na sua rigidez causada pela aplicação de tensão no ensaio de dano mecânico. É possível concluir então que, sob as condições do ensaio, obteve-se o que seria o início de um envelhecimento físico ou um estado de precargamento da geomembrana influenciada pelo nível de tensão aplicada (Gardoni, 2015), ou um rearranjo das cadeias poliméricas da geomembrana que influenciam assim o ganho da resistência à tração e rigidez. Na Figura 4.63 se mostra uma comparação entre o comportamento do módulo médio secante e o fator de redução do mesmo.

Tabela 4.39. Dados base dos valores de deformação secante a 5% para o cálculo do intervalo de confiança (μ) para a geomembrana de PVC virgem.

Média	5,63	
Cv	0,04	
t_{98%}	2,82	
n	10	
μ	5,413	5,853

Tabela 4.40. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança e fator de redução (F.R.) dos valores de deformação secante a 5%.

Tensão	Valor do módulo	Dentro do Intervalo	F.R.
J_{sec5%0}	5,63	Está	1
J_{sec5%100}	5,47	Está	1
J_{sec5%200}	5,66	Está	1
J_{sec5%300}	6,55	Não	1,16
J_{sec5%500}	7,15	Não	1,27
J_{sec5%1000}	12,29	Não	2,18

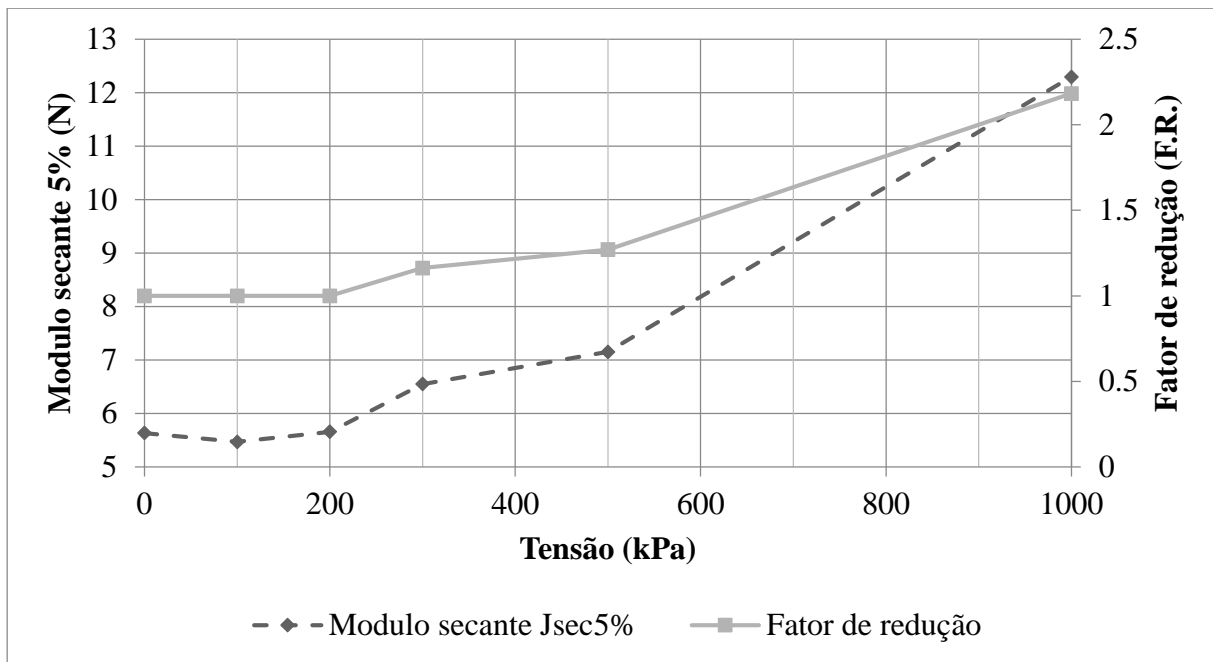


Figura 4.63. Comportamento do módulo secante a 5% e o fator de redução com a tensão.

Como já foi dito antes existe um ganho na rigidez do material empregado comparando cada nível de tensão com a geomembrana virgem, mas entre tensões aplicadas dito ganho é pequeno. O anterior é observado na Tabela 4.39.

No caso da análise Anova, ao igual que no parâmetro anterior não existe influencia no valor obtido por parte da direção de tração do elemento ensaido.

Tabela 4.41. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança entre tensões para módulo secante a 5% (Está=encontra-se dentro do intervalo; Não= encontra-se fora do intervalo de confiança).

Parâmetro	Módulo Secante 5% (N)					
	Virgem	100 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	1000 kPa
Virgem	Está	Está	Está	Não	Não	Não
100 kPa	Está	Está	Está	Não	Não	Não
200 kPa	Está	Está	Está	Não	Não	Não
300 kPa	Não	Está	Não	Está	Está	Não
500 kPa	Não	Está	Não	Não	Está	Não
1000 kPa	Não	Não	Não	Não	Não	Está

4.5.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÓDULO SECANTE A 10%

Para o módulo secante a 10% foi feita uma análise utilizando a mesma metodologia empregada no item anterior. Com base no intervalo calculado e mostrado na Tabela 4.42 pode-se observar que os valores obtidos para as tensões de 100 kPa e 200 kPa estão dentro do intervalo, assim como também foi observado para o módulo secante a 5%. Isso quer dizer que a variação obtida desta característica não é visível estatisticamente falando, já que o valor da média populacional está dentro do intervalo de confiança da média populacional para as amostras virgens.

Com respeito às demais tensões, elas se encontraram fora deste intervalo de confiança, razão pela qual a variação do módulo de rigidez a 10% é evidente para esses casos. Os módulos encontrados para as tensões apresentam não uma redução, mas sim um acréscimo no seu valor. Isso indica, assim como o obtido no item anterior, um aumento na rigidez do material devido à ação da carga imposta sobre a geomembrana. Na Figura 4.64 se observa este comportamento.

Tabela 4.42. Dados base para o cálculo do intervalo de confiança (μ) para a geomembrana de PVC virgem.

Média	5,09	
Cv	4,21%	
t_{98%}	2,8214	
n	10	
μ	4,89	5,27

Tabela 4.43. Determinação da presença dentro do intervalo de confiança e Fator de Redução (F.R.).

Tensão	Valor do Módulo	Dentro do Intervalo	F.R.
J_{sec10%0}	5,09	Está	1
J_{sec10%100}	5,01	Está	1
J_{sec10%200}	5,20	Está	1
J_{sec10%300}	5,91	Não	1,16
J_{sec10%500}	6,24	Não	1,23
J_{sec10%1000}	9,66	Não	1,90

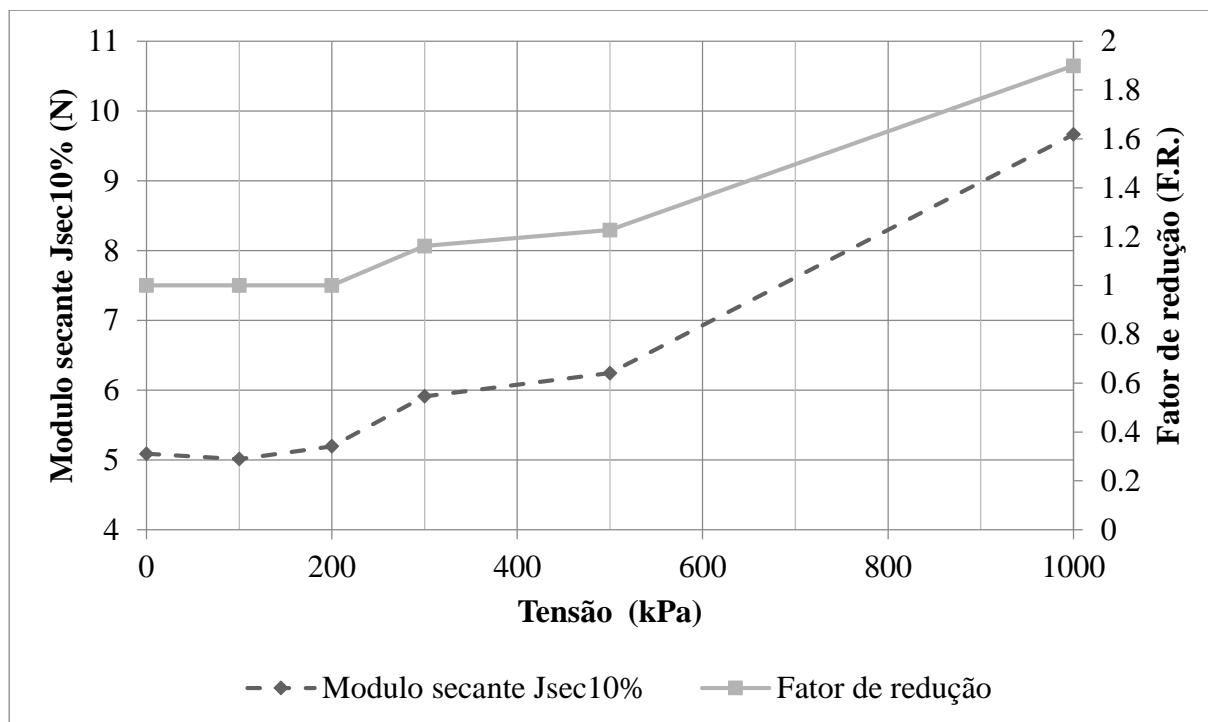


Figura 4.64. Comportamento do módulo secante a 10% e o fator de redução com a tensão.

Ao igual que nos itens anteriores foi feita a análise para determinar a variação entre tensões. Como se observa na Tabela 4.44 a diferença entre valores a distintas tensões aplicadas não é evidente, ou seja, o acréscimo ocorre dentro do intervalo de confiança da tensão anterior.

Tabela 4.44 Determinação da presença dentro do intervalo de confiança entre tensões para módulo secante a 10% (Está=encontra-se dentro do intervalo; Não= encontra-se fora do intervalo de confiança).

Parâmetro	Módulo Secante 10% (N)					
	Virgem	100 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	1000 kPa
Virgem	Está	Está	Está	Não	Não	Não
100 kPa	Está	Está	Está	Não	Não	Não
200 kPa	Está	Está	Está	Não	Não	Não
300 kPa	Não	Está	Não	Está	Está	Não
500 kPa	Não	Está	Não	Não	Está	Não
1000 kPa	Não	Não	Não	Não	Não	Está

Para a análise Anova se apresentou o mesmo comportamento que para o módulo secante a 5%.

As Tabela 4.45, Tabela 4.46, Tabela 4.47 e Tabela 4.48 apresentam o resumo dos resultados obtidos nesta análise de resultados.

Tabela 4.45 Resumo dos resultados obtidos na análise para o parâmetro de resistência à tração.

Parâmetro	Resistência à tração (kN/m)					
Característica	Virgem	100 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	1000 kPa
Média	7,6	8,0	8,1	8,4	8,7	9,5
Coefficiente de variação	0,023	0,064	0,099	0,079	0,079	0,093
Intervalo de confiança	7,48 até 7,79					
Estado	Dentro	Fora	Fora	Fora	Fora	Fora
Fator de Redução	1	1,04	1,06	1,1	1,13	1,24

Tabela 4.46 Resumo dos resultados obtidos na análise para o parâmetro de alongamento.

Parâmetro	Alongamento (%)					
Característica	Virgem	100 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	1000 kPa
Média	286%	252%	254%	240%	242%	157%
Coefficiente de variação	0,142	0,063	0,090	0,094	0,140	0,097
Intervalo de confiança	243% até 321%					
Estado	Dentro	Dentro	Dentro	Fora	Fora	Fora
Fator de Redução	1	1	1	0,84	0,85	0,54

Tabela 4.47 Resumo dos resultados obtidos na análise para o parâmetro do Módulo secante 5%.

Parâmetro	Módulo Secante 5% (N)					
Característica	Virgem	100 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	1000 kPa
Média	5,6	5,5	5,7	6,5	7,2	12,3
Coefficiente de variação	0,044	0,053	0,092	0,054	0,278	0,057
Intervalo de confiança	5,41 até 5,85					
Estado	Dentro	Dentro	Dentro	Fora	Fora	Fora
Fator de Redução	1	1	1	1,16	1,27	2,18

Tabela 4.48 Resumo dos resultados obtidos na análise para o parâmetro do Módulo secante 10%.

Parâmetro	Módulo Secante 10% (N)					
	Virgem	100 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	1000 kPa
Média	5,1	5,0	5,2	5,9	6,2	9,7
Coefficiente de variação	0,042	0,045	0,086	0,048	0,202	0,057
Intervalo de confiança	4,89 até 5,27					
Estado	Dentro	Dentro	Dentro	Fora	Fora	Fora
Fator de Redução	1	1	1	1,16	1,22	1,9

Das tabelas resumo é possível concluir que devido à aplicação de uma carga de caráter compressivo existe um aumento na resistência à tração comparada às geomembranas virgens. O aumento é maior se aumenta-se a carga aplicada. Este comportamento é mais visível na tensão de 1000 kPa, nas anteriores cargas não apresentam uma diferença marcada entre elas. Isso pode ser devido a que a densificação e as deformações se apresentam constantes para valores de tensão entre 100 e 500 kPa. A maior densificação do material da camada superior se cria uma melhor distribuição da carga aplicada que junto à rigidez de camada de areia (camada inferior) não permite a excessiva deformação da geomembrana e determina um estado de precarregamento que faz as cadeias poliméricas se arranjam.

Esse estado de precarregamento influencia o alongamento, o qual apresenta uma diminuição em seu valor comparada com as amostras virgens. O comportamento da resistência e do alongamento faz pensar numa possível aumento da rigidez da geomembrana devido à tensão aplicada. Para verificar isso foi realizado a análise estatística para o módulo secante a 5 e 10%. Desta análise foi achado que se apresenta um aumento no valor delas características analisadas. Para as primeiras tensões (100, 200, 300 e 500) o aumento é ligeiro e nulo com respeito às tensões de 100 e 200 kPa. Isso é devido a que a densificação do material superior se apresenta constante ou mantêm muito semelhantes nessas tensões. Se apresentam um valor realmente diferente na tensão de 1000 kPa onde se apresentam não só um valor top para o módulo secante mas também para a resistência e o alongamento.

De forma geral a tensão aplicada provoca a densificação do material sobrejacente que melhora a distribuição da carga aplicada e assim gera um precarregamento na geomembrana que faz um novo arranjo das cadeias poliméricas o que resulta num aumento não só da resistência mas também da rigidez da geomembrana.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1. CONCLUSÕES

A presente pesquisa procurou avaliar a variação na resistência à tração de geomembranas de PVC devido a danos fornecidos pela aplicação de cargas próprias da acumulação de rejeitos de mineração. Para tal fim foram utilizados dois equipamentos, o primeiro destinado a simular as cargas que se apresentam sobre a geomembrana levando em conta a configuração já estabelecida no capítulo 3 do presente trabalho. O segundo equipamento é a prensa de tração, onde é possível determinar o valor da resistência de um corpo de prova neste caso de uma geomembrana de PVC.

Levando em conta as características dos materiais utilizados, a metodologia usada se mostrou adequada para atingir o objetivo da presente pesquisa. Os resultados obtidos foram importantes para determinar a influência do nível de carga e da configuração usada na variação da resistência à tração da geomembrana.

Com relação ao equipamento de média escala para dano apresentam-se as seguintes conclusões:

O equipamento permitiu danificar as geomembranas de forma uniforme para cada nível de tensão utilizado. O tempo médio de estabilização do nível de água no reservatório foi de 10 minutos e o valor médio de altura da queda foi de 21,27 mm. Ainda quando os coeficientes de variação se apresentam um pouco altos, da ordem do 16% ao 32%, os ensaios mantêm uma repetitividade entre eles. Esse valor do coeficiente de variação é devido à característica própria dos materiais granulares usados durante os ensaios.

Levando o volume obtido no ensaio à deformação que apresentou o sistema podemos concluir que a deformação esteve constante para as tensões entre 100 e 500 kPa, a maior deformação se apresentou para a tensão de 1000 kPa. Isso foi devido à densificação do material sobrejacente a qual se apresenta constante até a tensão de 500 kPa e só com o valor de 1000 kPa se torna diferente e maior.

Para o caso do desgaste do material empregado, a camada subjacente não apresentou variações na sua granulometria, isso devido à proteção direta que forneceu a geomembrana ao material assim como ao tamanho de grãos usado para simular a camada drenante em contato entre a

geomembrana e o solo de fundação. Por outro lado, a brita 3 sim apresentou variações na sua granulometria devido ao tamanho das partículas do material e às tensões empregada em cada ensaio. Pode-se concluir que entre maior seja a tensão aplicada maior será a quebra do material sobrejacente.

O índice de quebra de grãos se encontra entre os valores de 13,95% e 30,17%, seu comportamento se encontra descrito por um acréscimo que se apresenta com maior intensidade entre as primeiras três tensões aplicadas, a taxa de crescimento começa diminuir a partir da tensão de 300 kPa .

Outro fator que permitiu concluir que os ensaios apresentam repetitividade é o fato que os danos sofridos pela geomembrana se apresentam de forma uniforme ao longo de todos os ensaios e consistentes em arranhões, entalhes e principalmente identações, inspeção que concorda com o encontrado pela Ruiz-Gómez (2014).

No ensaio de resistência à tração as geomembranas após submetidas ao ensaio de dano apresentaram um aumento no valor desta característica. A maior variação se apresentou para a tensão de 1000 kPa com um valor médio de 10,7 kN/m. Levando em conta as tensões entre 100 e 500 kPa, nelas os valores da resistência à tração se apresentam maiores à geomembrana virgem. Mas entre elas mantêm valores muito semelhantes, isso é devido a que a densificação do material sobrejacente se mostrou igual para as tensões menores a 500 kPa.

Este ganho de resistência à tração pode estar determinado pelo fato de que quanto maior seja a densificação do material sobrejacente melhor será a distribuição da tensão aplicada e se apresenta um precarregamento que realiza um novo arranjo das cadeias poliméricas do material.

Nesse contexto o fator de redução será maior que um para cada uma das tensões aplicadas durante o ensaio.

Caso contrário se apresenta para a característica do alongamento que sob as tensões aplicadas, a tendência seguida pelos resultados obtidos é apresentar uma diminuição no seu valor, tendo como resultado um fator de redução cada vez menor.

O anterior permite concluir que devido às cargas aplicadas e levando em conta a configuração simulada no ensaio (uma camada inferior que não permite deformações importantes na

geomembrana), se apresenta um aumento na rigidez do material que se faz mais visível com o aumento na magnitude da tensão aplicada, ou seja, se apresenta um processo de semelhante ao precarregamento da geomembrana de PVC. Este fato também foi encontrado pelo Reddy (1998) e a Gardoni (2015), ela conclui que o aumento da rigidez é devido não à modificação da estrutura da geomembrana, mas sim na configuração espacial do material (arranjo novo das cadeias poliméricas).

A conclusão anterior também é sustentada nos resultados da análise dos resultados dos módulos secantes a 5% e 10%, os quais mostram um aumento da sua magnitude conforme ao valor da tensão aplicada. Este aumento se torna evidente a partir da tensão de 300 kPa como se observa na análise do intervalo de confiança para as características da resistência, alongamento e modulo secante. Isso é devido ao fato que se apresenta os mesmos valores de deformação e densificação do material para tensões de até 500 kPa.

O aumento de rigidez e da resistência à tração devido a precarregamentos aplicados também é observado em geomembranas de PEAD.

Todos os resultados mostraram que os equipamentos utilizados apresentam um bom desempenho na simulação dos danos e posterior avaliação na variação da resistência à tração nas geomembranas, simulando condições que se apresentam no campo e podem influenciar nas características da geomembrana.

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com o objetivo de obter resultados mais precisos e avaliar outros fatores que podem influenciar o comportamento desta e outras características da geomembrana se realizam as seguintes sugestões:

- Realizar uma quantidade maior de ensaios de dano e resistência à tração em geomembranas que permita estabelecer com maior precisão os resultados obtidos.
- Variar a camada de apoio ou subjacente à geomembrana por material de natureza mais mole como, por exemplo, argila a diferentes níveis de compactação.
- Ensaiar a geomembrana com a proteção de um geotêxtil para determinar se existem danos importantes nela e se apresenta o mesmo comportamento de aumento de rigidez.

- Simular alturas de água para os ensaios de dano que visem simular a tensão que fornece a água utilizada para depositar os rejeitos de mineração.
- Someter as geomembranas a degradação química e posterior dano mecânico para determinar a variação da resistência sob influência de substâncias deste tipo.
- Adequar a escala da cor do papel filme para determinar a distribuição de tensões e tensão aplicada sobre a geomembrana, ou a colocação de uma célula de tensão que permita ter um maior controle dessa tensão.
- Realizar ensaios para diferentes espessuras e determinar assim a influência desta na variação da resistência à tração.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2013). Geossintéticos — Ensaio de puncionamento estático (punção CBR). NBR ISO 12236. ABNT, São Paulo, 7p

ABNT (2013). Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação da resistência à perfuração dinâmica (queda de cone) - Método de ensaio. ABNT NBR ISO 13433:2013, São Paulo, 5p.

Aguiar, P.R. & Vertematti, J.C.(2004). Introdução: Manual Brasileiro de Geossintéticos. Vertematti (Ed.), Editora Edgar Blucher Ltda. ABINT, São Paulo, SP, pp. 1-12.

ASTM (2010). Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness, ASTM D2240. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 13p.

ASTM (2012), Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics, ASTM D5199. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 4p.

ASTM (2012). Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, ASTM D882. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 11p.

ASTM (2013). Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer, ASTM D 1238. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 16p.

ASTM (2013). Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, ASTM D792. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 6p.

ASTM (2013). Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting, ASTM D1004. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 4p.

- ASTM (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D638. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 17p.
- ASTM (2015). Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembranes, ASTM D5994. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 4p.
- Bouazza, A., Zornberg, J.G. & Adam, D. (2002). Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. 7th International Conference on Geosynthetics, Nice - França, pp.445–507.
- 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, 7p.
- Bueno, B. & Vilar, O.M. (2004). Propriedades, Ensaio e Normas. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Vertematti (ed.), Editora Edgard Blucher Ltda, ABINT, São Paulo, SP, pp. 49-62.
- 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, DF, Brasil, 272 p.
- Costa, C. M., Lodi, P.C., Costa. Y.D. & Bueno, B.S. (2008). Avaliação de Recomendações Normativas sobre o Uso de Ensaio no Controle de Qualidade de Fabricação de Geossintéticos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 18, pp. 158-169.
- DOS SANTOS. Souza. L. (2015). Estudo da Durabilidade de Geomembranas Utilizadas como Barreiras de Fluxo em Barragens de Rejeito de Ouro. VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Brasília, 8p.
- GARDONI M. G. A. (2015). Desempenho de Longa Duração de Barreiras Poliméricas em Locais de Estocagem de Resíduos Contaminados. VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Brasília, 8p.

- Geroto, R.E. (2008). Desempenho de camadas de Proteção para Geomembranas. Dissertação de Mestrado-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 188p.
- Jacquelin, T., Bone, S.C., Marcotte, P.M. & Rollin, A. (2008). Recent Results in Geotechnical Leak Location in the Chilean Mining Industry. The First Panamerican Geosynthetics Conference & Exhibition, Cancun, México. Pp 1556-1562.
- Koerner, R. M. (2005). Designing with Geosynthetics, fifth Edition, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA, pp 430-611.
- K.R. Reddy, S.R. Bandi, J.J. Rohr, M. Finy and J. Siebken. (1996). Field evaluation of protective covers for landfill geomembrane liners under construction loading. Geosynthetics international s 1996, vol. 3, no. 6. Pp 679-700.
- K.R. Reddy and R.E. Saichek. (1998). Assessment of Damage to Geomembrane Liners by Shredded Scrap Tires. Geotechnical Testing Journal, Dec. pp. 307-316.
- K.R. Reddy and R.E. Saichek. (1998). Performance of protective cover systems for landfill geomembrane liners under long-term msw loading. Geosynthetics international s 1998, vol. 5, no. 3. Pp 287-307.
- Nascimento, M.T. (2002). Avaliação de Dano Mecânico em Geossintéticos em Obras de Disposição de Resíduos. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, 105 p.
- Palmeira, E.M. (2003). Notas de Aula de Ensaios em Geossintéticos, Propriedades de Filtração, Determinação da Abertura de Filtração de Geotêxteis. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 39p.
- Penna, N.F., Shinohara, D., Farias, J.B., Pinheiro, R. (2007). UHE Tucuruí - etapa de expansão controle tecnológico das obras de terra e enrocamento. Comitê Brasileiro de Barragens, XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, BELÉM – PA, 03 A 07 de junho de 2007,13p.

Rebelo, K.M.W. (2003). Resistência de interface entre Geomembranas e Solos através do Ensaio de Ring Shear. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 194 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.

RUIZ-GÓMEZ, C. (2014). Análise de Danos em Geomembranas por meio de Ensaios 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.

SANTOS, E.C.G. (2011). Avaliação Experimental de Muros Reforçados Executados com Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) e Solo Fino. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-069/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 214 p.

Silva, E. M., Santos, E.C.G., Palmeira, E. M. (2015). Fatores de Redução de Resistência de Geotêxtil Tecido Devido a Danos Mecânicos Causados por Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R). VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Brasília, 8p

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.

7. APÊNDICES

APÊNDICE A. GARRAS RECOMENDADAS SEGUNDO A NORMA ASTM D4885

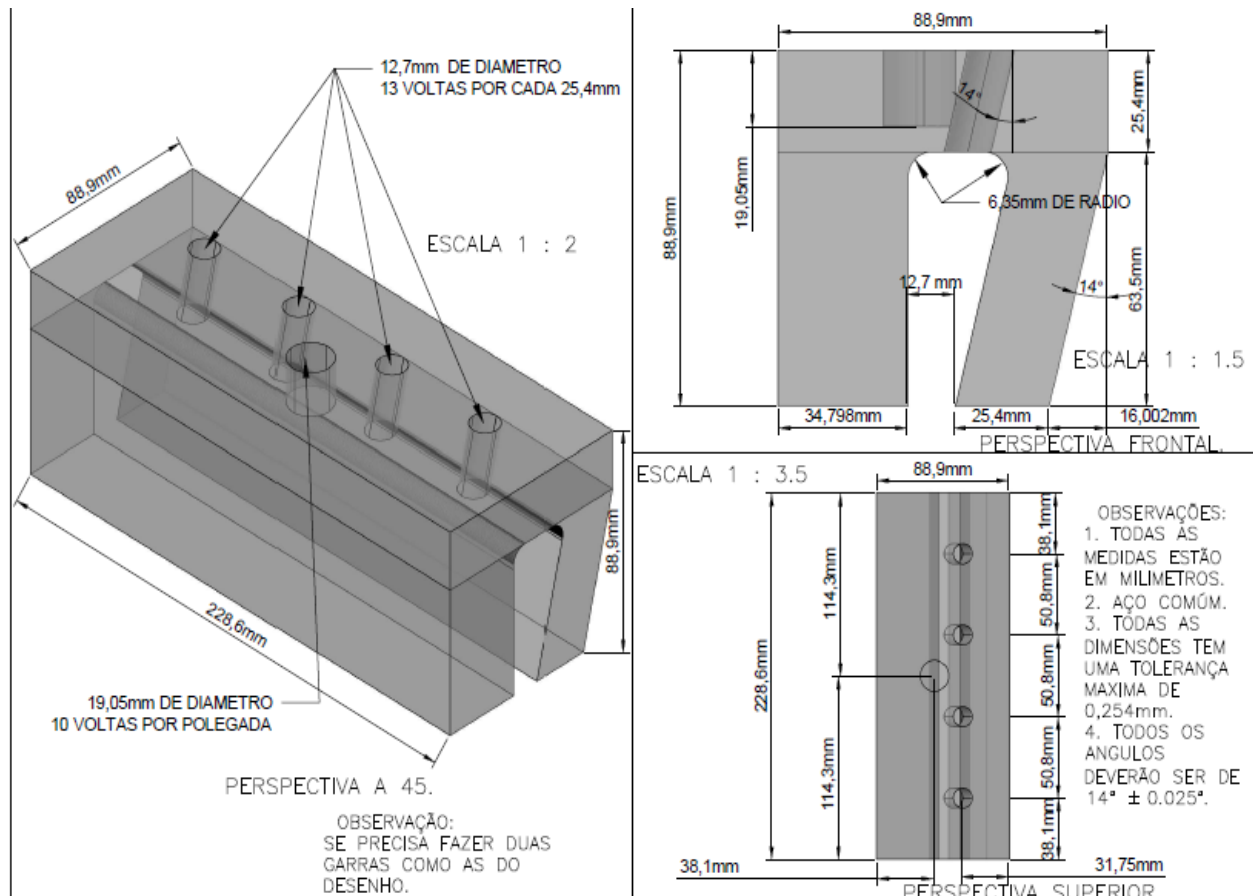


Figura A.0.1. Garra recomendada pela ASTM D4885, dimensões em mm.

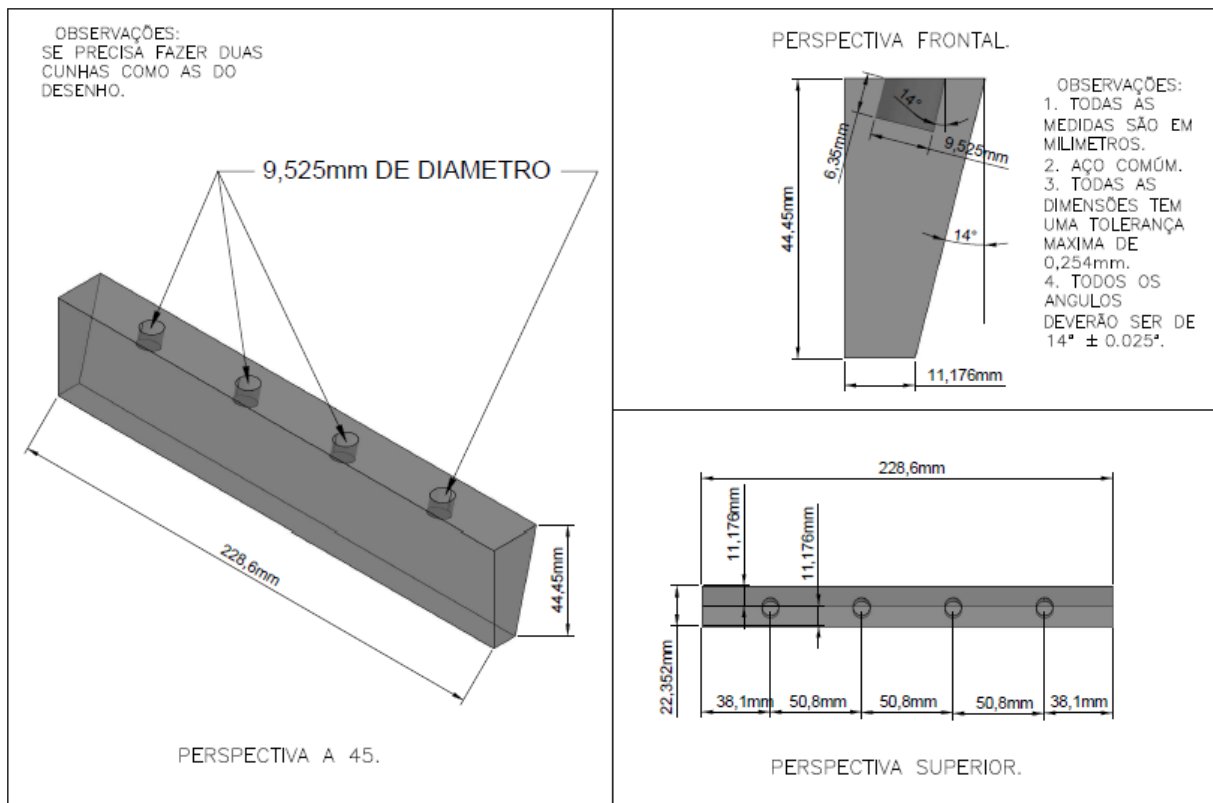


Figura A.0.2. Cunha da garra recomendada pela ASTM D4885, dimensões em mm.

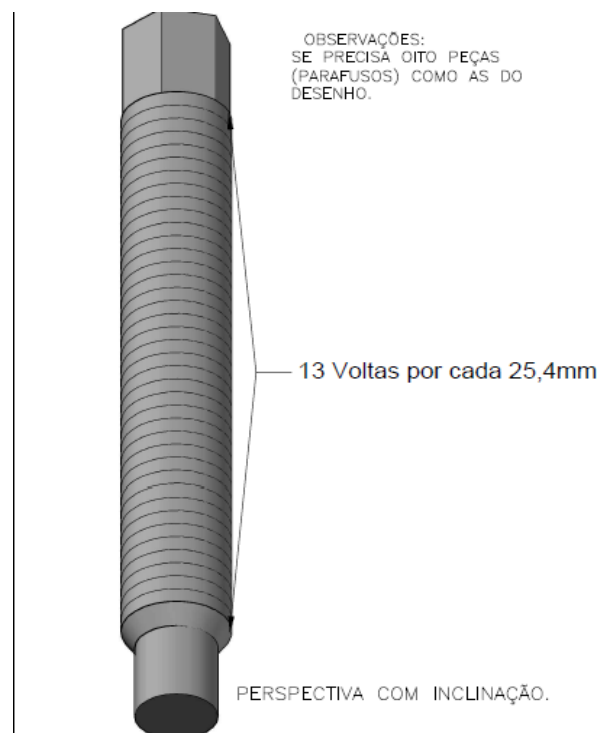


Figura A.0.3. Parafusos para fixar a cunha à garra recomendada pela ASTM D4885, dimensões em mm.

APÊNDICE B. GRÁFICOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO APÓS APLICADA TENSÕES DE 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 500 kPa E 1000 kPa.

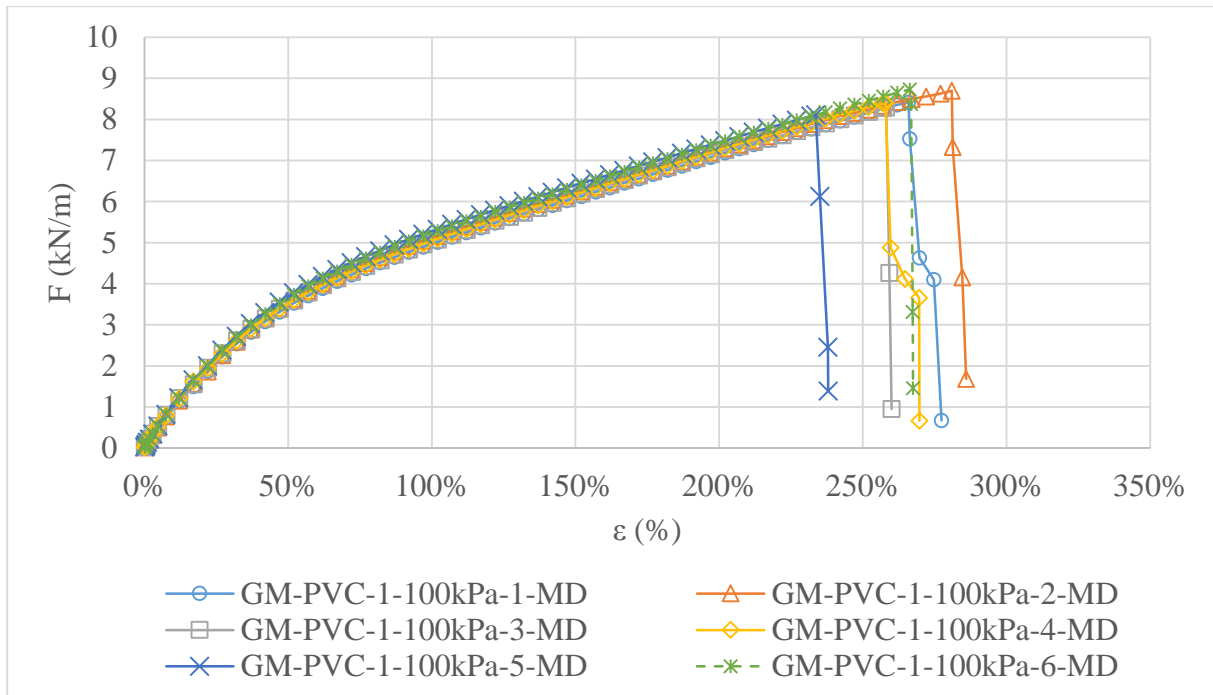


Figura B.0.1. Carga aplicada (F) vs alongamento (ε), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 100 kPa, ensaios 1 a 6.

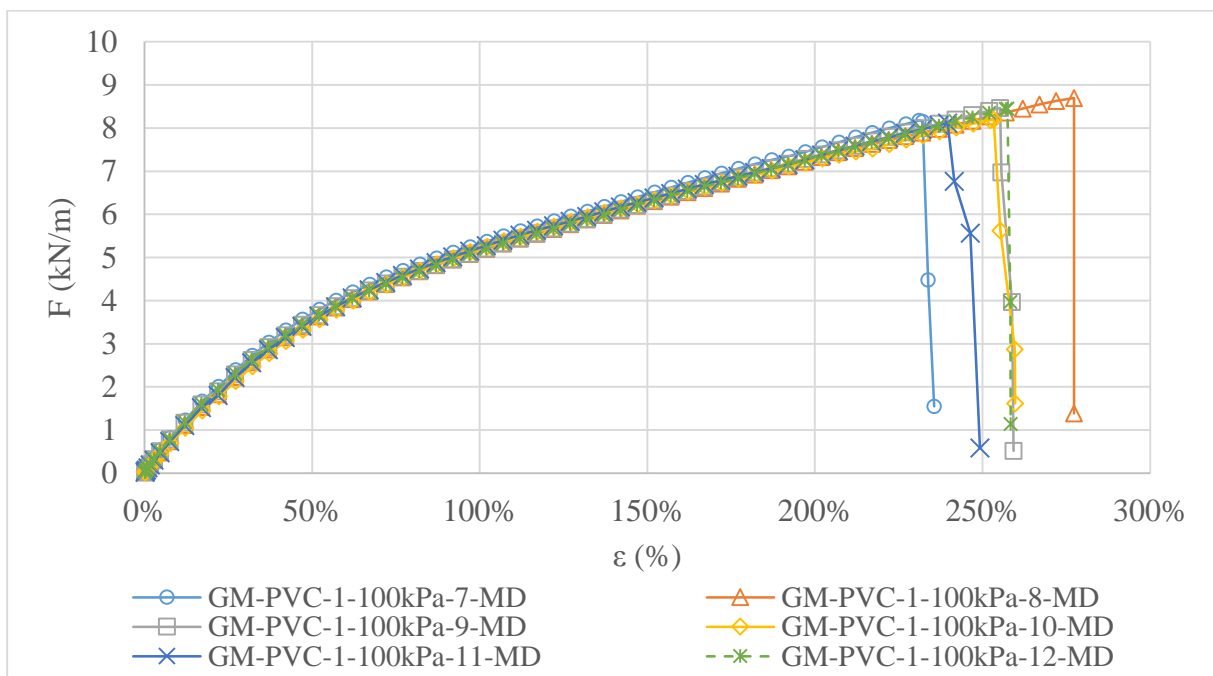


Figura B.0.2. Carga aplicada (F) vs alongamento (ε), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 100 kPa, ensaios 7 a 12.

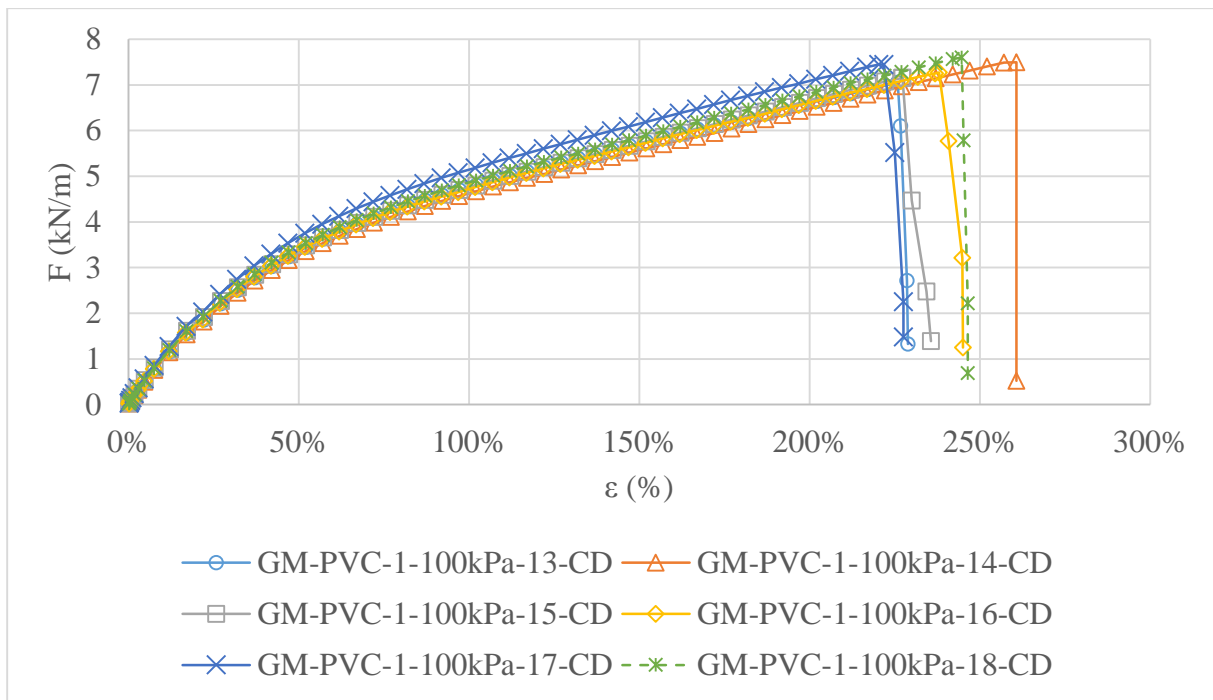


Figura B.0.3. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 100 kPa, ensaios 12 a 18.

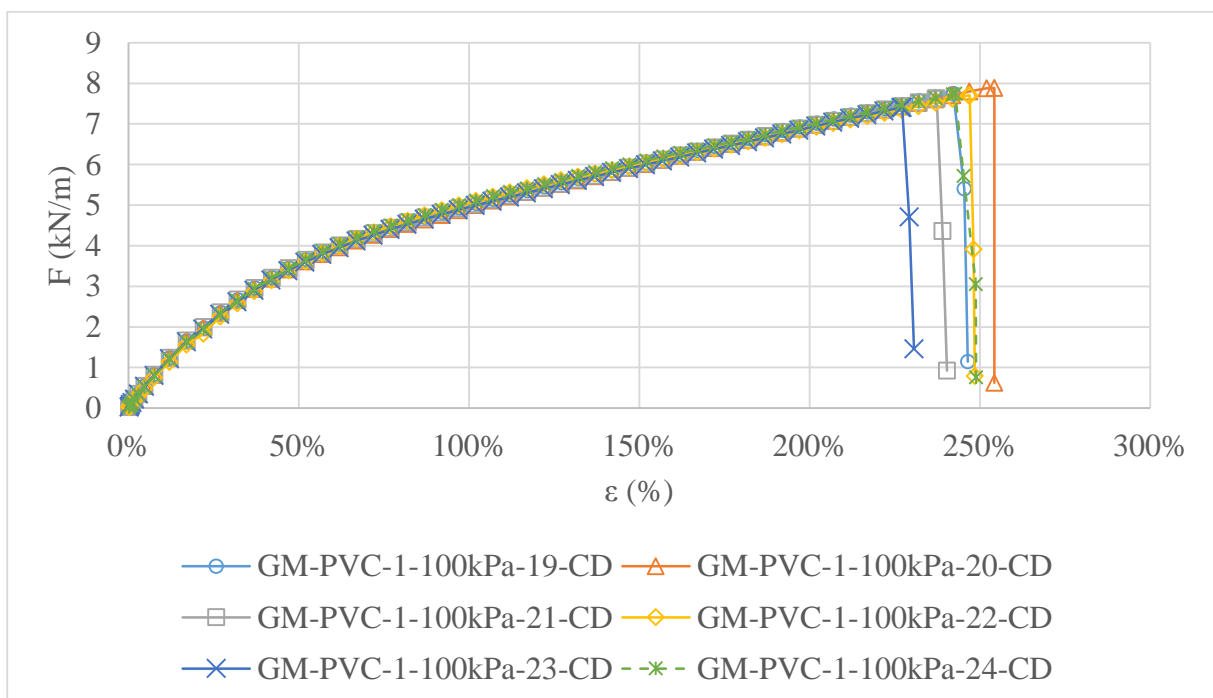


Figura B.0.4. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 100 kPa, ensaios 18 a 24.

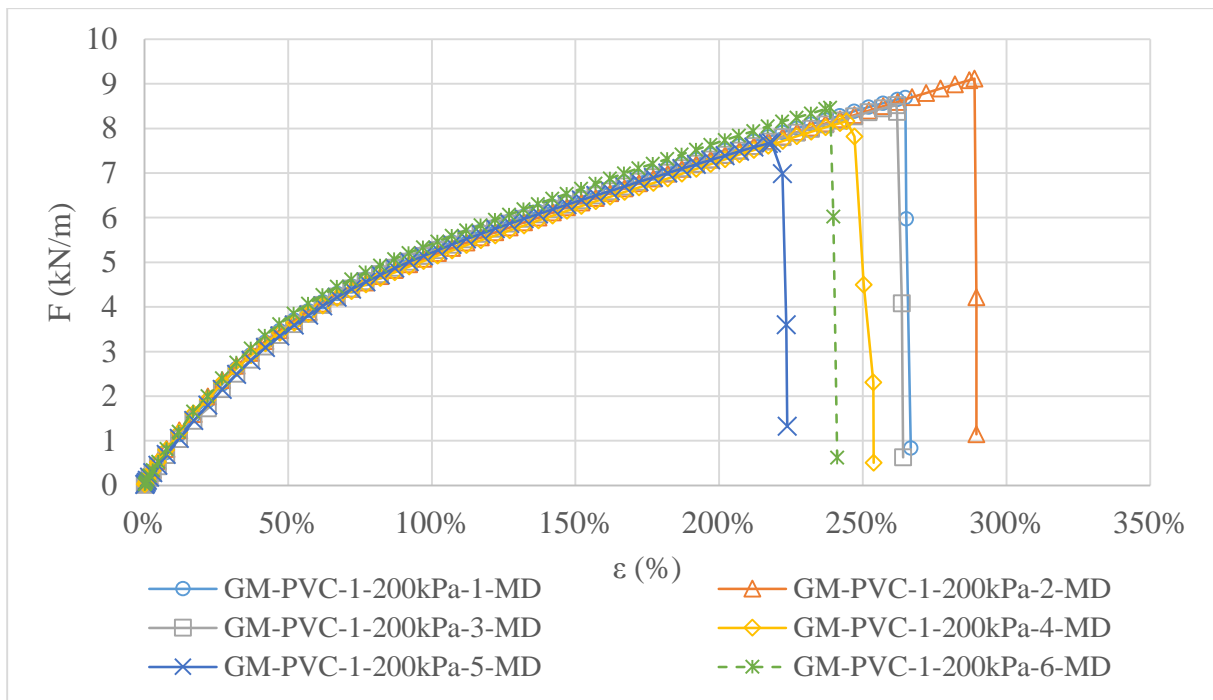


Figura B.0.5. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 200 kPa, ensaios 1 a 6.

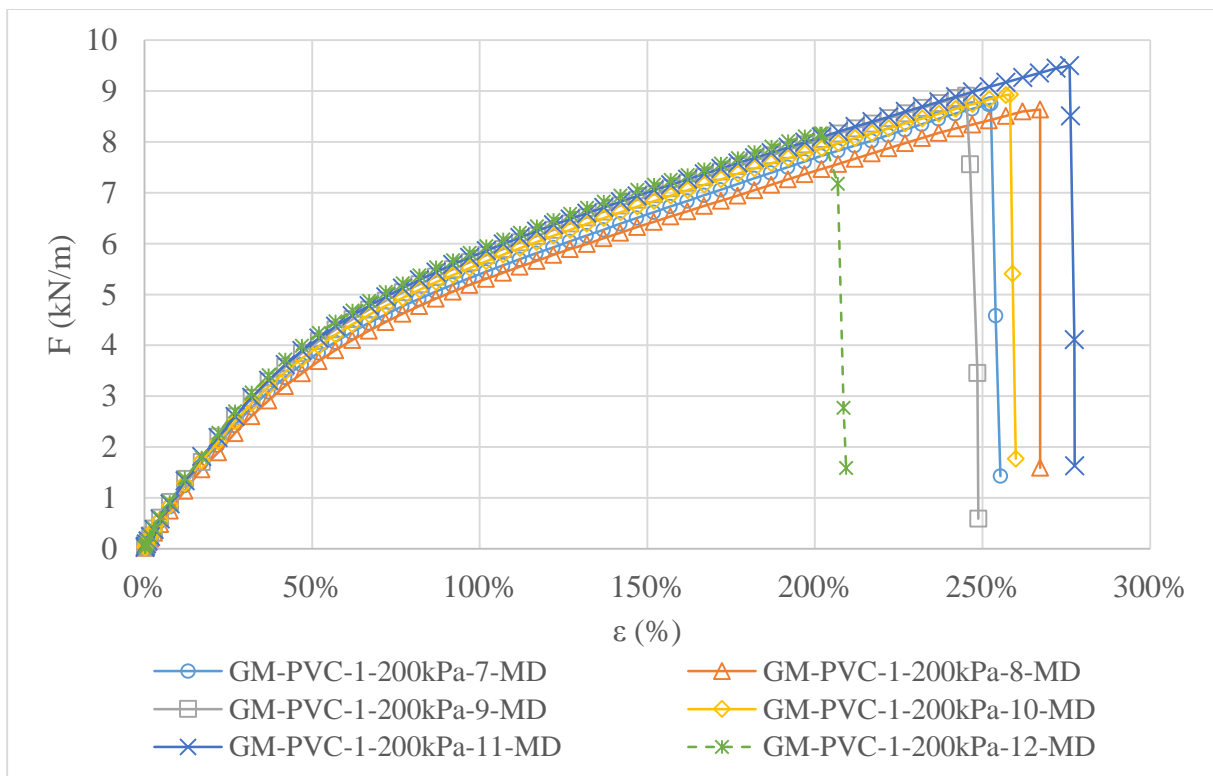


Figura B.0.6. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 200 kPa, ensaios 7 a 12.

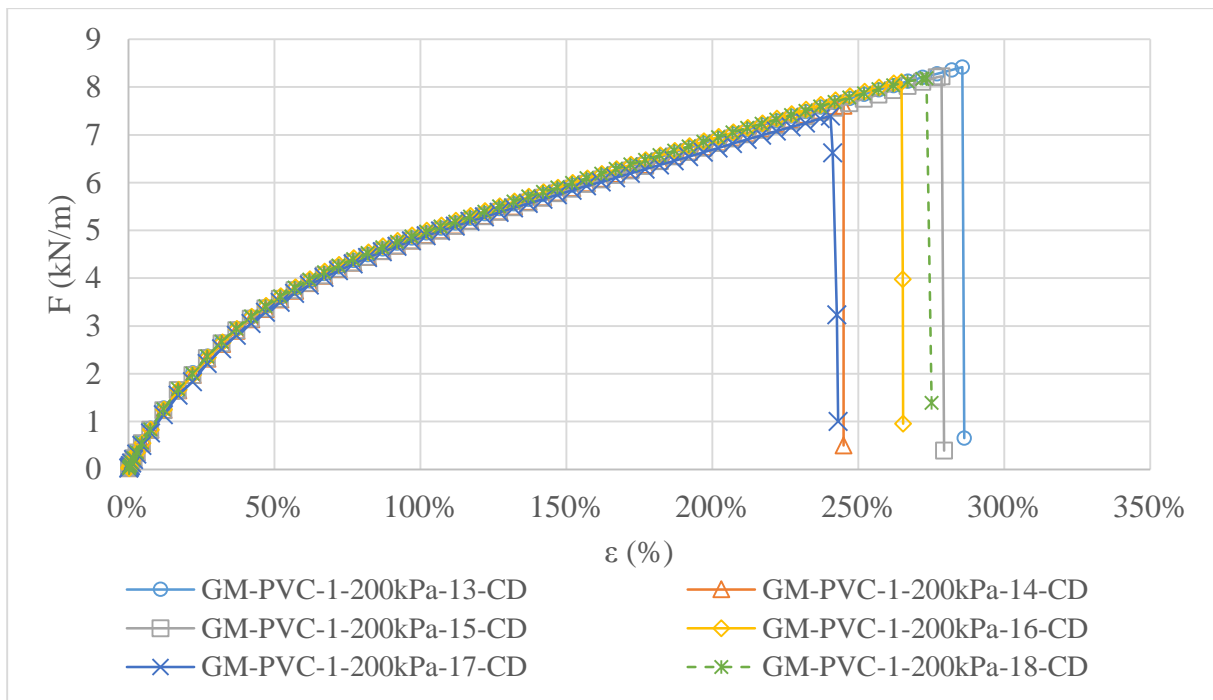


Figura B.0.7. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 200 kPa, ensaios 13 a 18.

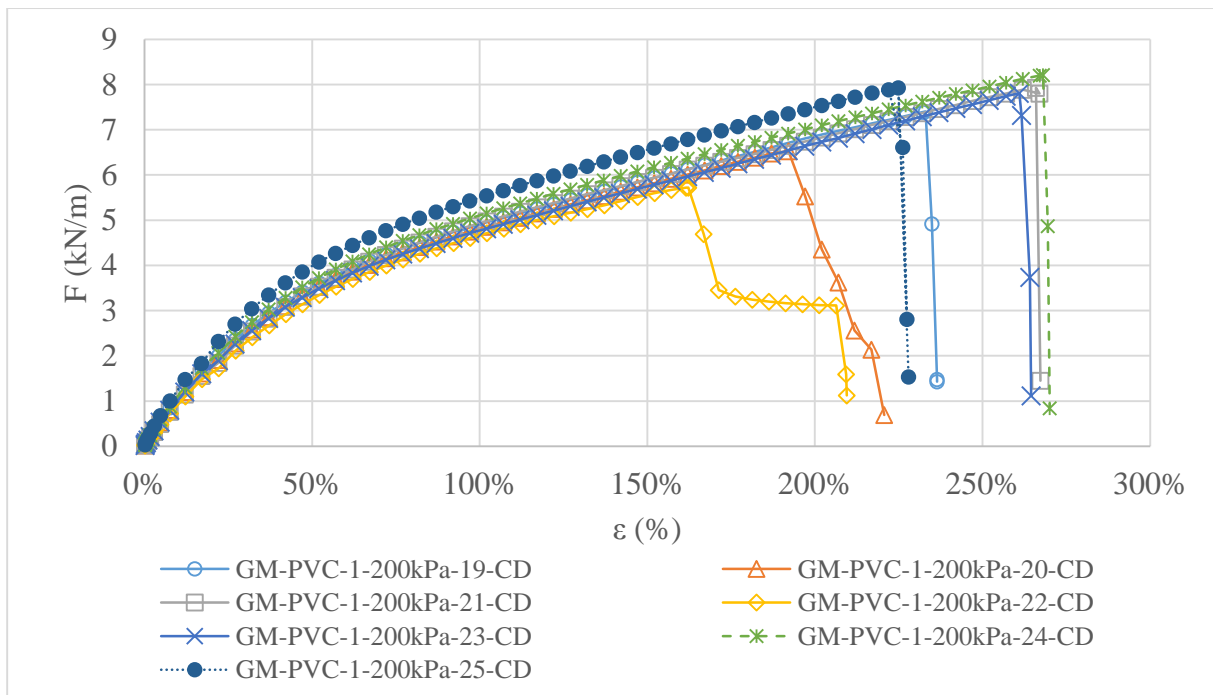


Figura B.0.8. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 200 kPa, ensaios 19 a 25.

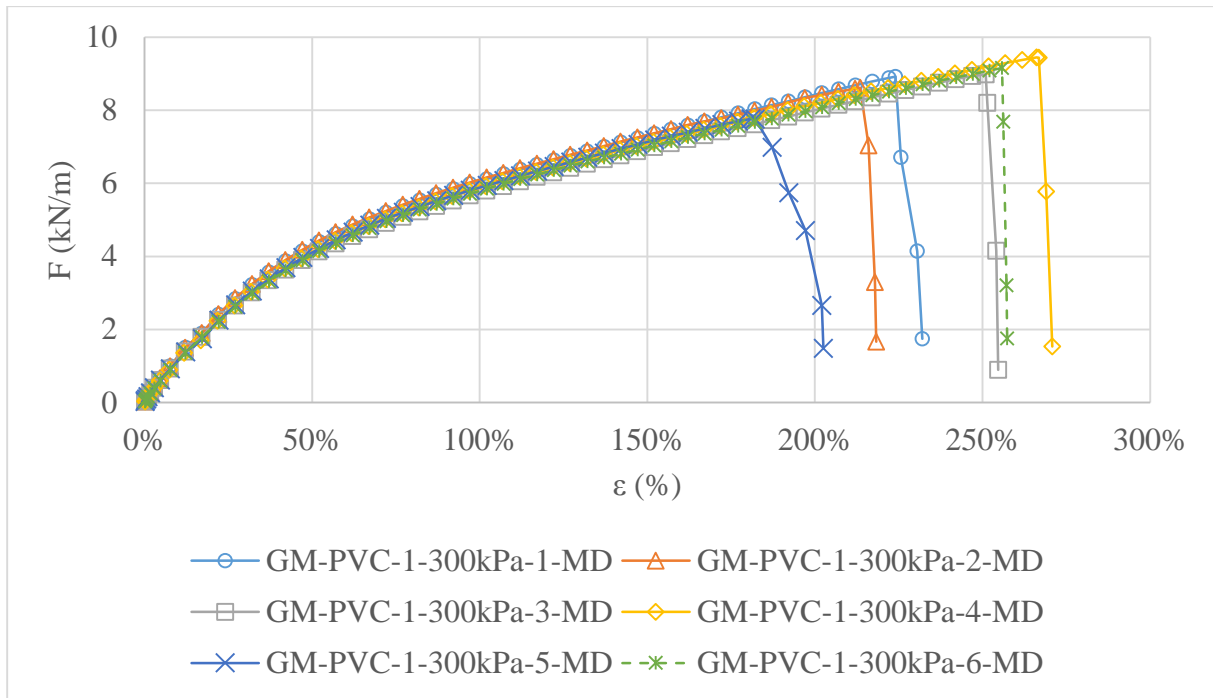


Figura B.0.9. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 300 kPa, ensaios 1 a 6.

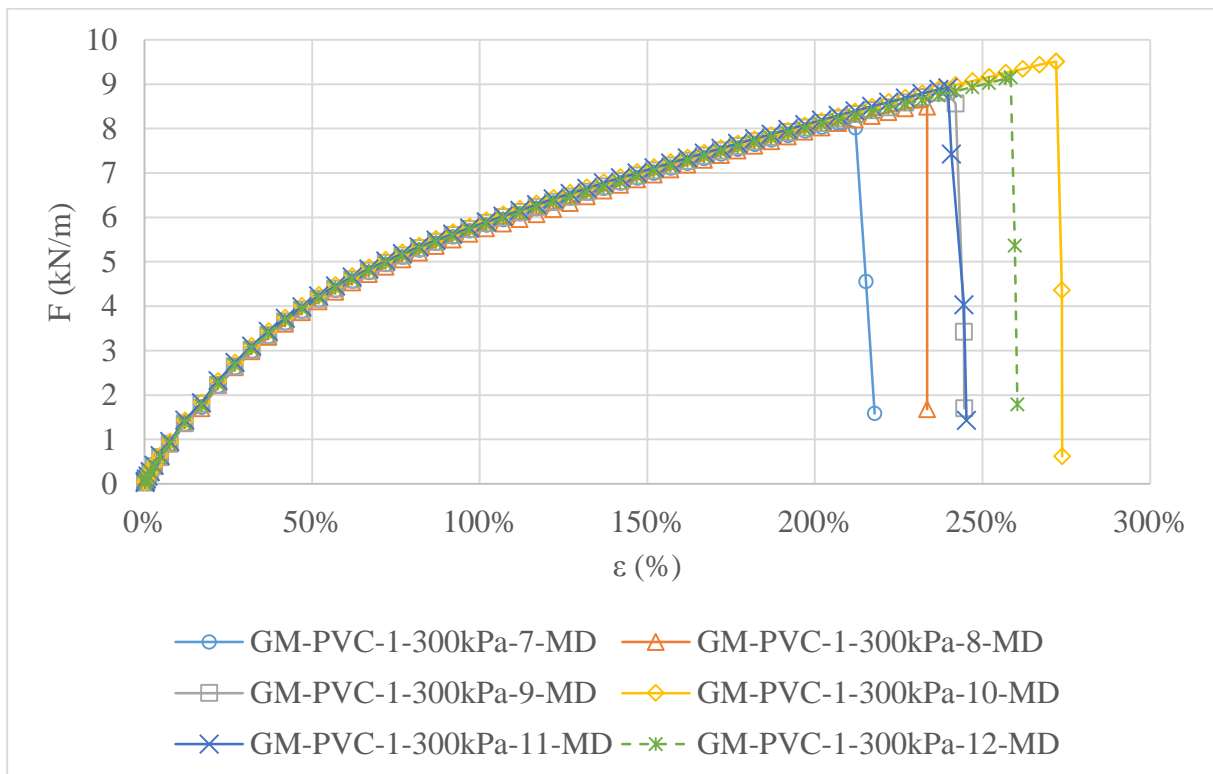


Figura B.0.10. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 300 kPa, ensaios 7 a 12.

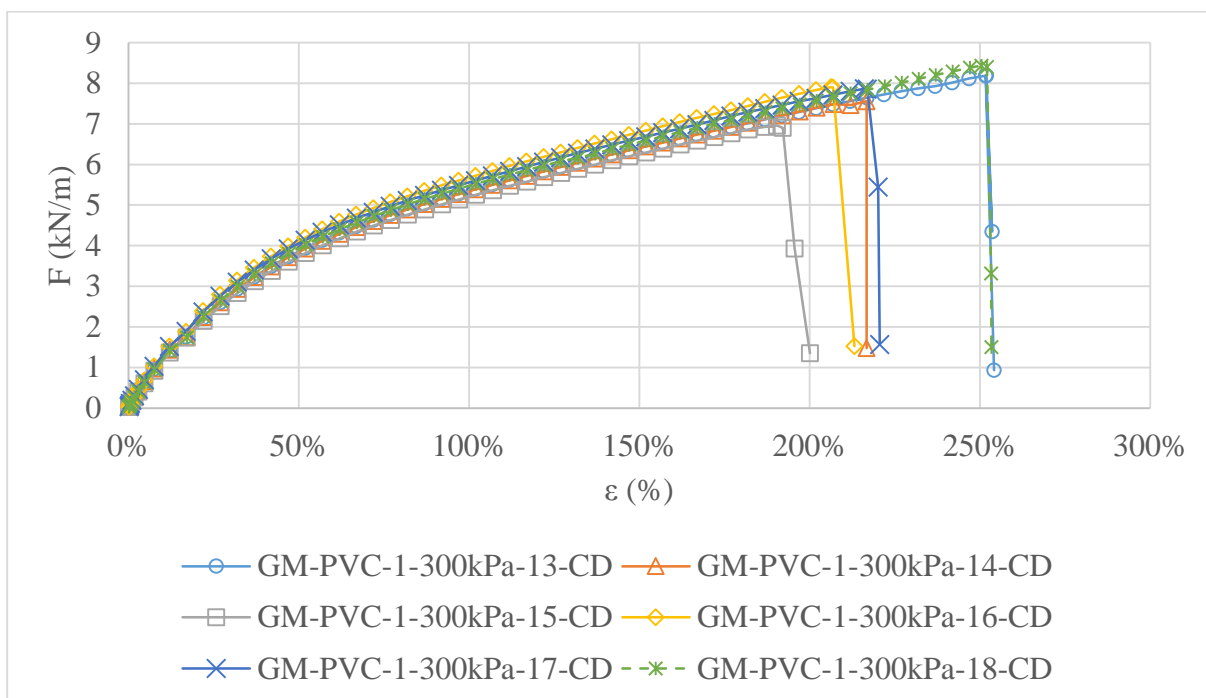


Figura B.0.11. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 300 kPa, ensaios 13 a 18.

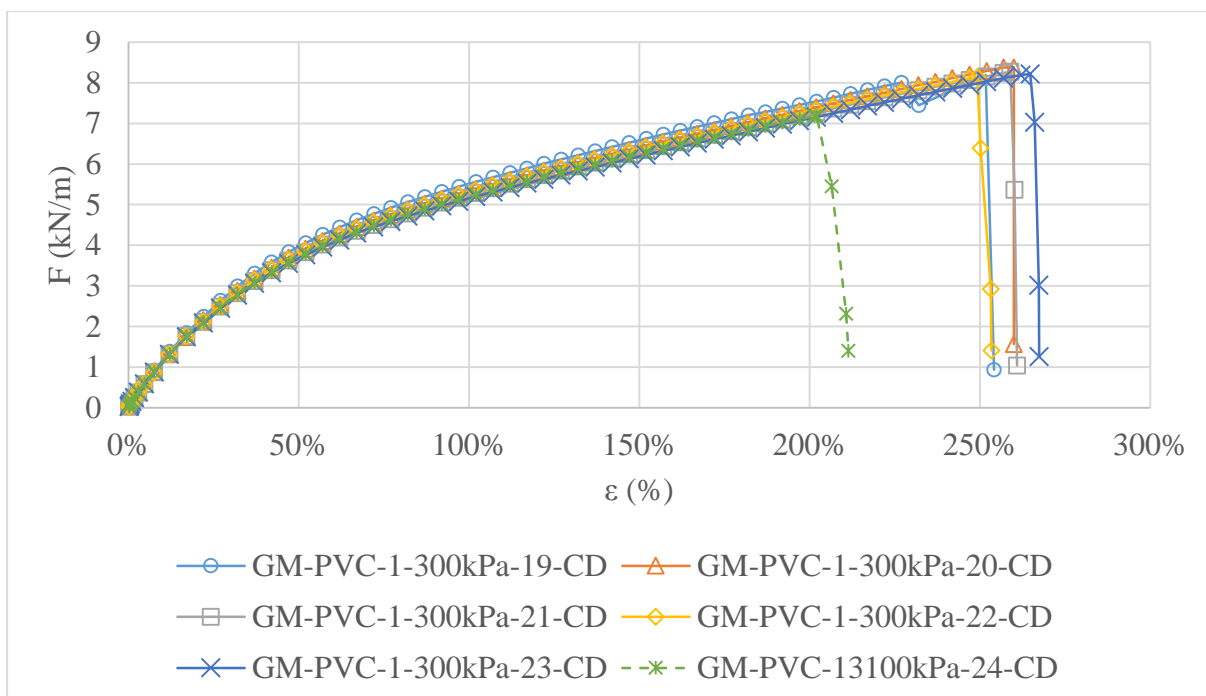


Figura B.0.12. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 300 kPa, ensaios 19 a 24.

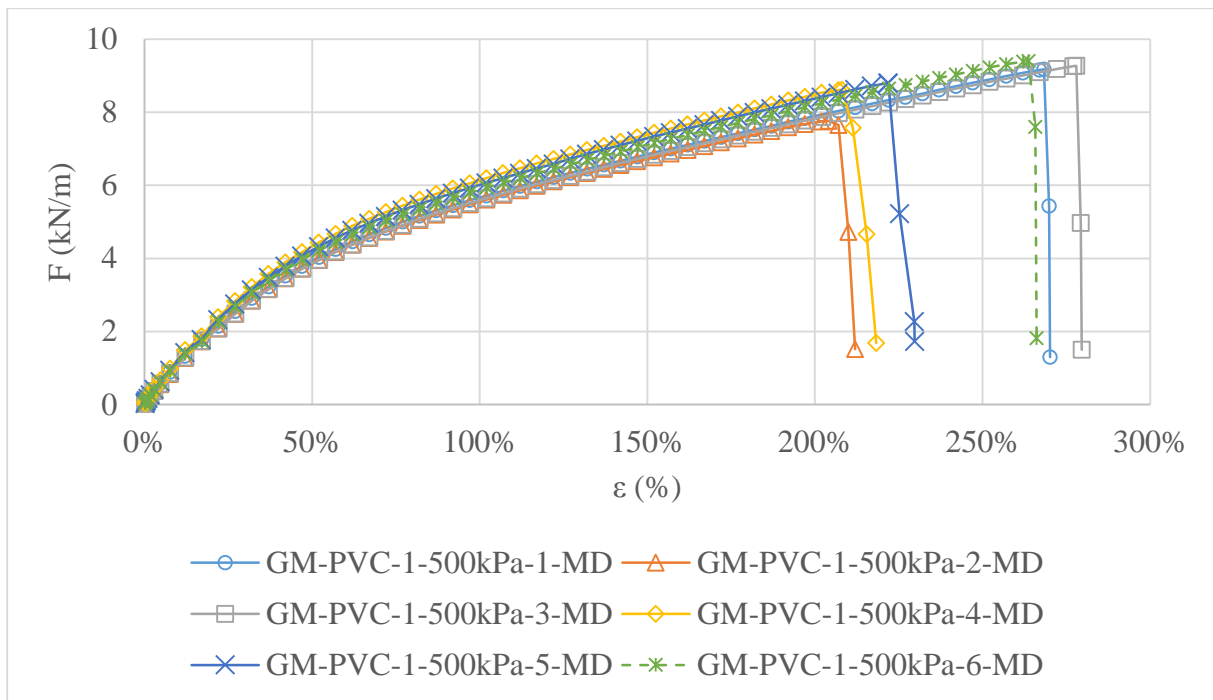


Figura B.0.13. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 500 kPa, ensaios 1 a 6.

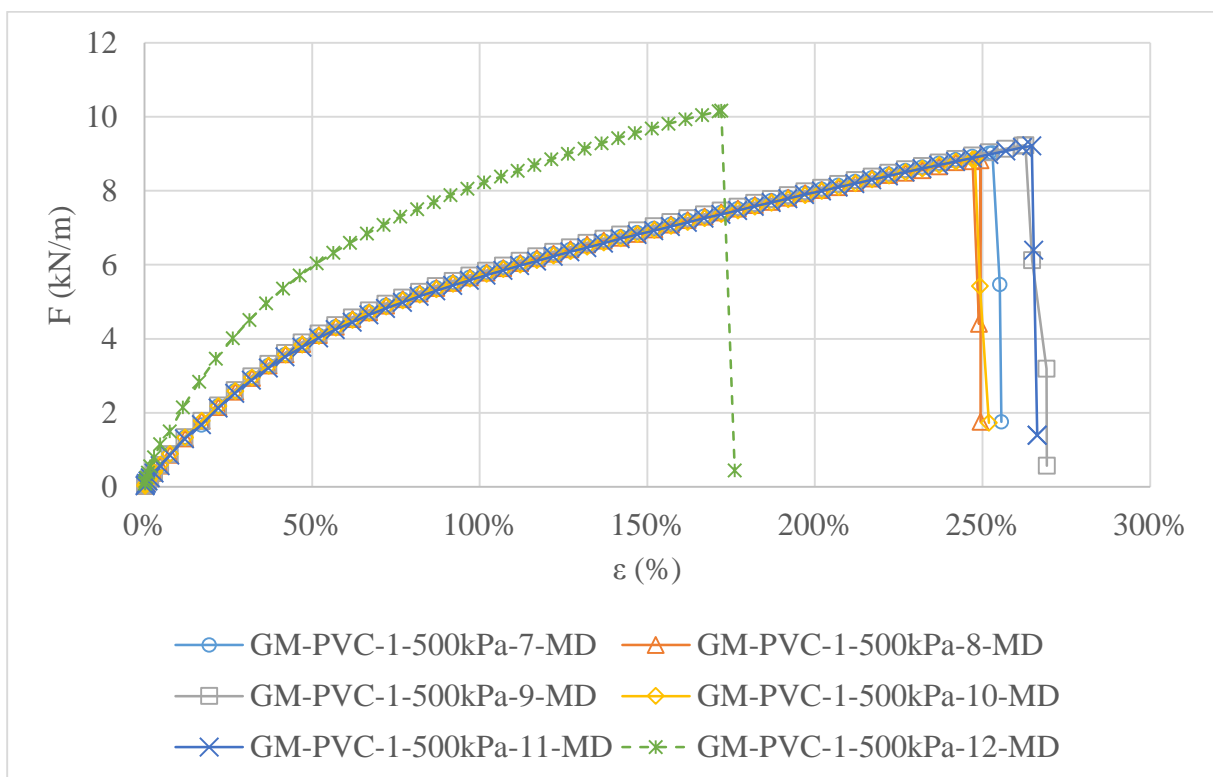


Figura B.0.14. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 500 kPa, ensaios 7 a 12.

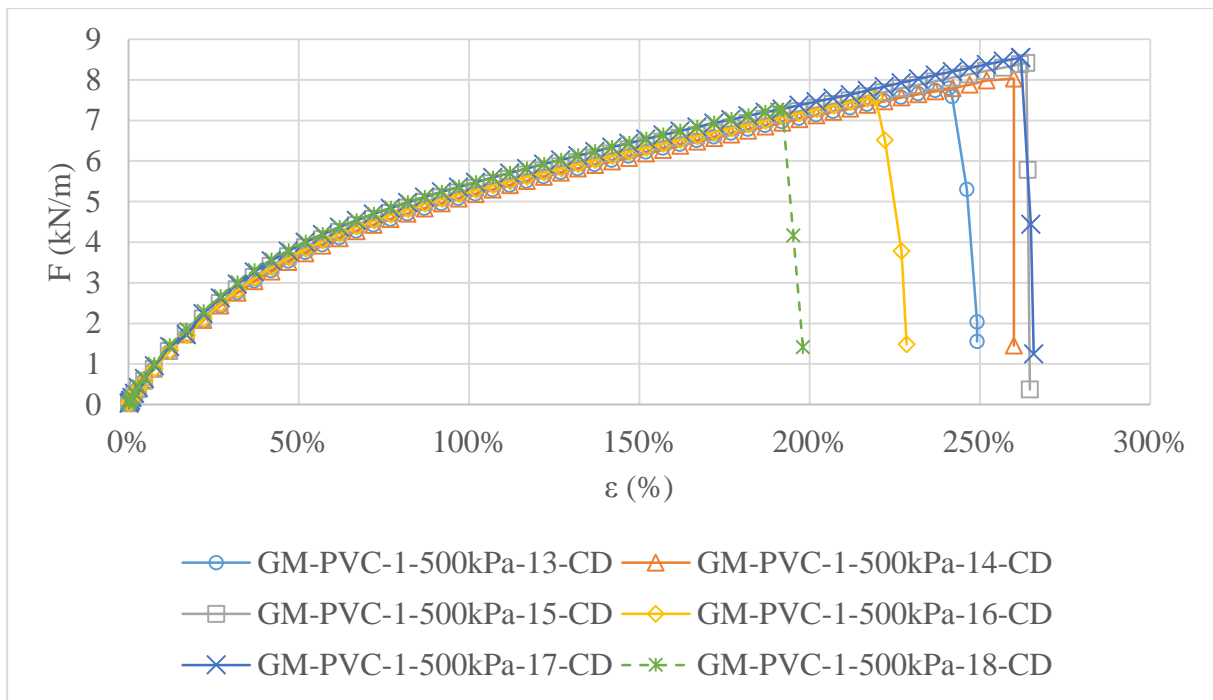


Figura B.0.15. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 500 kPa, ensaios 13 a 18.

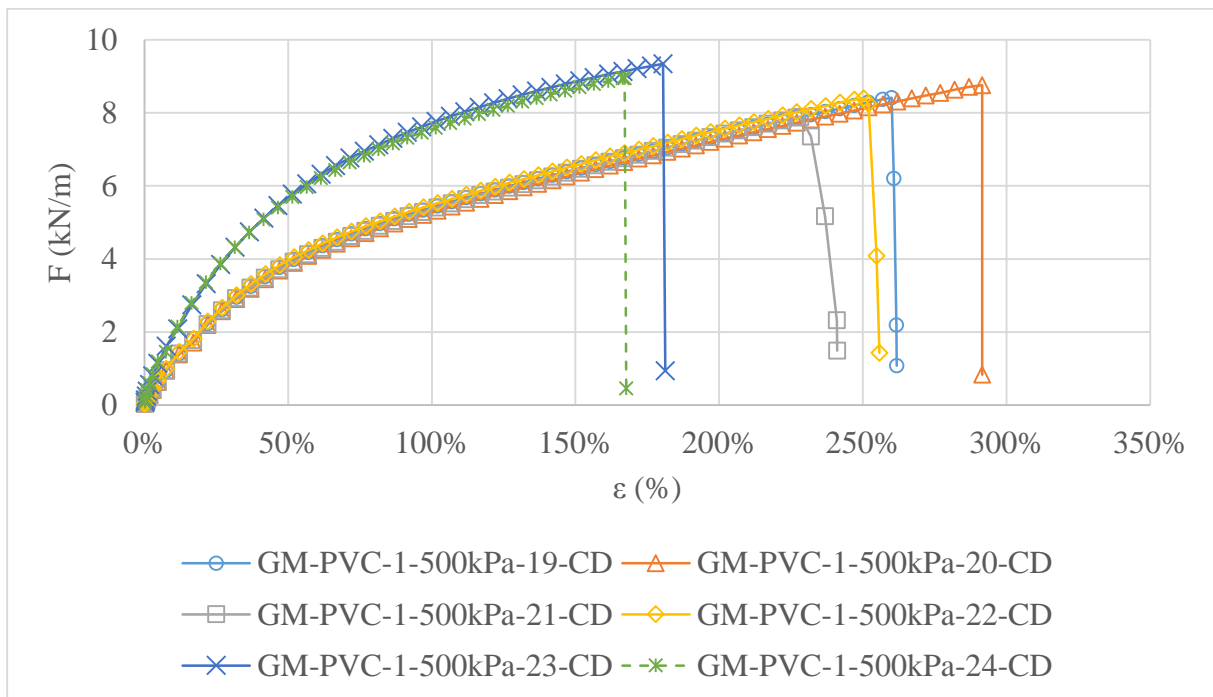


Figura B.0.16. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 500 kPa, ensaios 19 a 24.

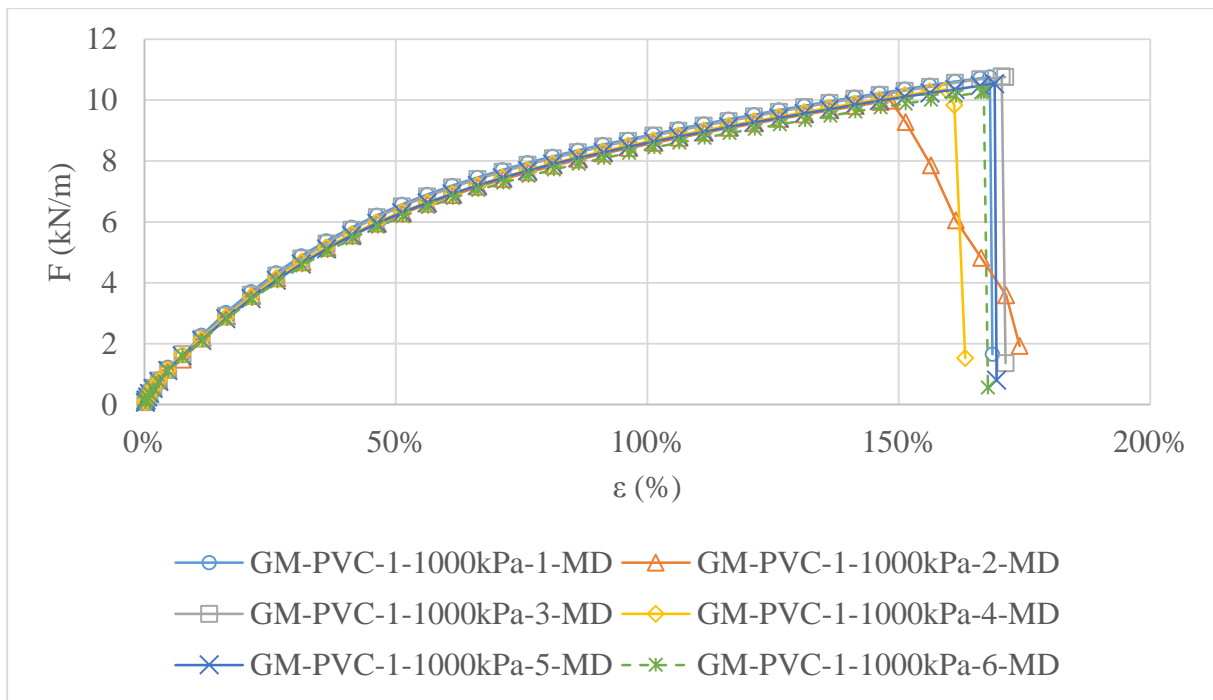


Figura B.0.17. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 1000 kPa, ensaios 1 a 6.

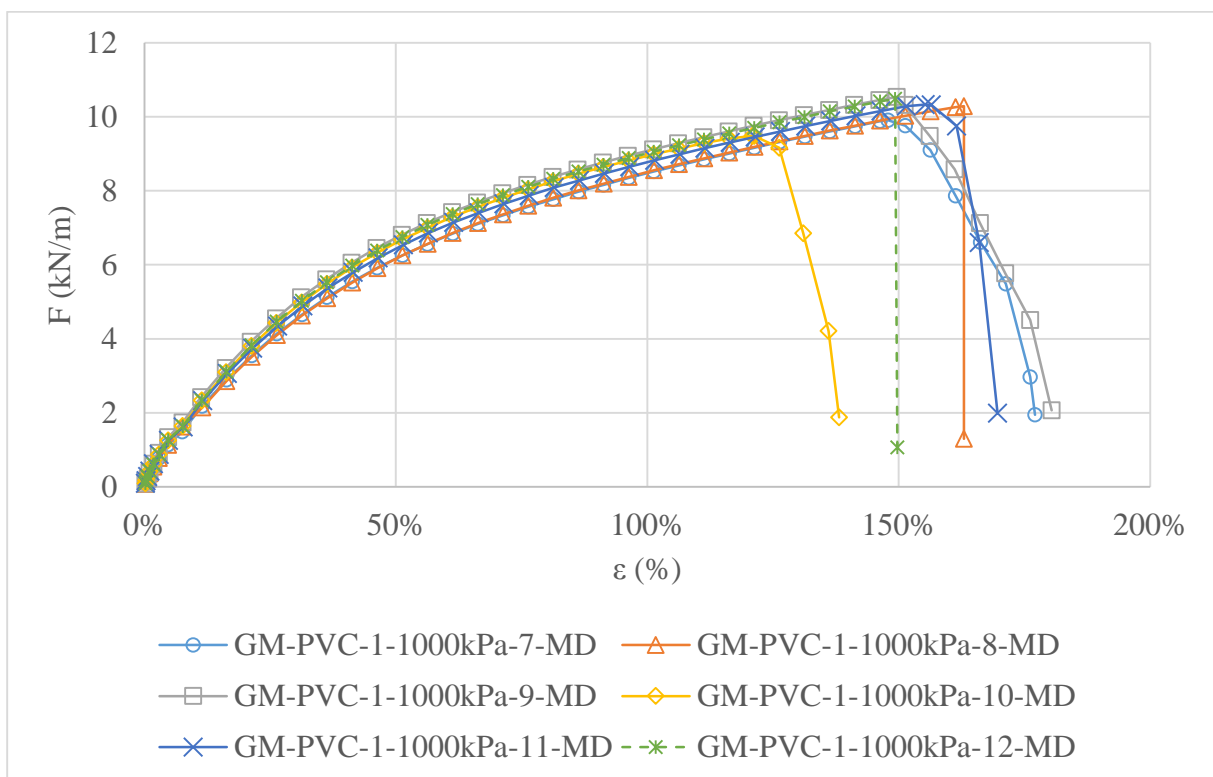


Figura B.0.18. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 1000 kPa, ensaios 7 a 12.

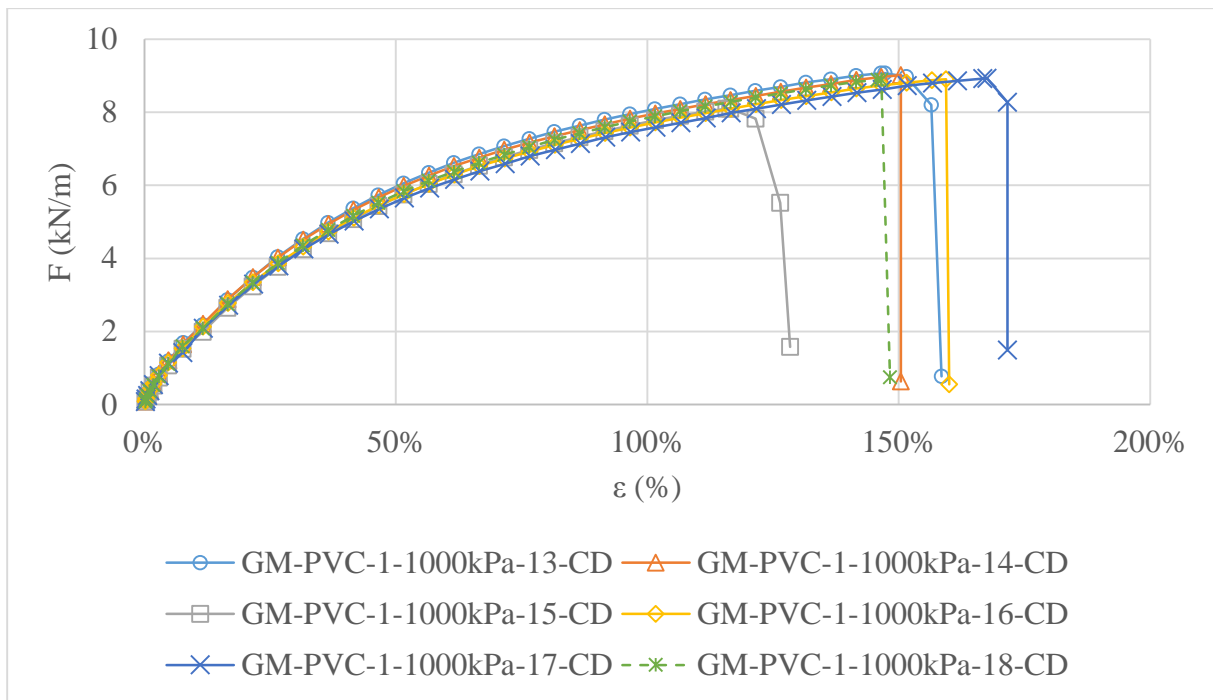


Figura B.0.19. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 1000 kPa, ensaios 13 a 18.

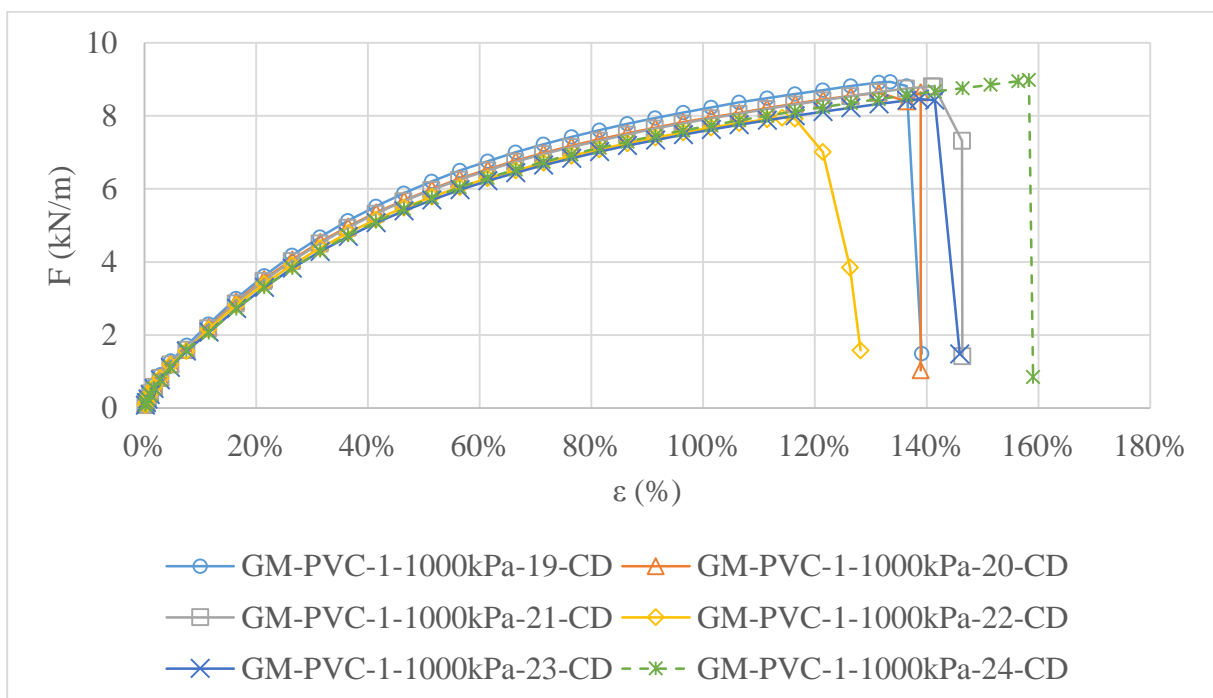


Figura B.0.20. Carga aplicada (F) vs alongamento (ϵ), ensaio de resistência à tração em geomembranas de PVC de 1mm de espessura danificadas após aplicação de tensão de 1000 kPa, ensaios 19 a 24.

APÊNDICE C. RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE GEOMEMBRANAS DE PVC, VIRGENS, A TENSÃO DE 100kPa, 200kPa, 300kPa, 500kPa E 1000kPa.

Tabela C.0.1. Resultados de resistência à tração de GM de PVC virgens e a níveis de tensão de 100kPa, 200kPa, 300kPa, 500kPa e 1000kPa.

NÚMERO DE ENSAIO	TENSÃO					
	Virgem	100 kPa	200 kPa	300 kPa	500 kPa	1000 kPa
1	7,708	8,423	8,694	8,921	9,1755	10,755
2	7,4365	8,6975	9,1145	8,613	7,7655	9,9785
3	7,511	8,2975	8,521	8,982	9,2705	10,7755
4	7,901	8,4025	8,162	9,443	8,616	10,3515
5	7,7145	8,118	7,674	7,7655	8,796	10,5345
6	7,5245	8,7315	8,4635	9,162	9,399	10,26
7	7,769	8,1755	8,7485	8,128	9,0265	9,904
8	7,7245	8,6975	8,633	8,494	8,823	10,287
9	7,769	8,467	8,901	8,8365	9,2295	10,5345
10	7,7245	8,199	8,9315	9,511	8,8535	9,484
11		8,1145	9,4975	8,921	9,216	10,328
12		8,4535	8,162	9,155	10,162	10,484
13		7,05	8,4195	8,1925	7,789	9,0735
14		7,491	7,606	7,555	8,0265	9,0195
15		7,1555	8,223	6,9555	8,416	8,094
16		7,267	8,1045	7,9075	7,5755	8,9045
17		7,447	7,389	7,8635	8,5485	8,9315
18		7,6025	8,1825	8,4365	7,2605	8,8905
19		7,7415	7,4025	8,0365	8,413	8,9315
20		7,884	6,5315	8,379	8,755	8,6435
21		7,6265	7,928	8,277	7,8875	8,806
22		7,7045	5,718	8,1415	8,396	7,9485
23		7,4095	7,8095	8,223	9,3415	8,457
24		7,745	8,2095	7,179	8,9515	8,979
25			7,9245			