

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TUBOS
GEOTÊXTEIS PARA CONFINAMENTO DE
REJEITO FINO DE MINERAÇÃO POR MEIO DE
MODELAGEM NUMÉRICA**

Vitor Lara Silva

Belo Horizonte

2019

Vitor Lara Silva

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TUBOS
GEOTÊXTEIS PARA CONFINAMENTO DE
REJEITO FINO DE MINERAÇÃO POR MEIO DE
MODELAGEM NUMÉRICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Maria das Graças Gardoni Almeida

Coorientadora: Profa. Dra. Karla Cristina Araújo Pimentel Maia

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

| | |
|-------|---|
| S586a | <p>Silva, Vitor Lara.</p> <p>Análise do comportamento de tubos geotêxteis para confinamento de rejeito fino de mineração por meio de modelagem numérica [recurso eletrônico] / Vitor Lara Silva. - 2019.</p> <p>1 recurso online (168 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Maria das Graças Gardoni Almeida. Coorientadora: Karla Cristina Araújo Pimentel Maia.</p> <p>Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 158-168.</p> <p>Bibliografia: f. 150-157. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Mecânica do solo - Teses. 2. Tubos - Teses. 3. Geotêxteis - Teses. 4. Resíduos - Teses. 5. Análise numérica - Teses. 6. Deformações e tensões - Teses. I. Gardoni, Maria das Graças A. II. Maia, Karla Cristina Araújo Pimentel . III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 624.13(043)</p> |
|-------|---|



FOLHA DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS PARA
CONFINAMENTO DE REJEITO FINO DE MINERAÇÃO POR MEIO
DE MODELAGEM NUMÉRICA**

VITOR LARA SILVA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 28 de junho de 2019, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Maria das Graças Gardoni Almeida - Orientadora
UFMG


Prof. Karla Cristina Araujo Pimentel Maia - Coorientadora
UFMG


Prof. Gustavo Ferreira Simoes
UFMG


Prof. Gregorio Luis Silva Araujo
UNB

Belo Horizonte, 28 de junho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos. Finalizar uma dissertação de mestrado não é tão simples como aparenta ser. Durante essa caminhada, mudanças de hábitos e rotinas, desafios, cansaço, todas as dificuldades foram superadas para que o trabalho fosse concluído. Me vem em mente tudo o que foi proveitoso e vivido, com auxílio de todos aqueles que de alguma maneira, contribuíram para o trabalho.

Agradeço aos meus pais, José Maria e Yara Lara, por tudo que sou hoje. Por me propiciarem a agir com dignidade e respeito, dedicando o carinho, amor e apoio durante toda a vida. As minhas irmãs, meu cunhado e a recém chegada Thata, pela paciência e cumplicidade durante essa jornada. A todos os meus amigos e familiares, por entenderem meus momentos de ausência durante a realização desse trabalho.

À minha orientadora Maria das Graças Gardoni, por me aceitar e acreditar no meu potencial para o desenvolvimento de um trabalho técnico científico. Além de ser uma mulher guerreira e batalhadora, dedicou-se a transmitir uma das maiores virtudes que podemos ter: o conhecimento. Agradeço os incentivos, os questionamentos, e a coragem passada para que este momento tão esperado chegasse.

À Karla Maia por conceder gentilmente seu conhecimento e profissionalismo, capazes de concretizar as ideias de maneira simples e objetiva. Sempre aberta e disposta a trocar ideias. Foi um grande satisfação tê-la em minha orientação. Obrigado pelo companheirismo e dedicação.

Ao Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia (DETG) da UFMG, e professores: Maria das Graças Gardoni, Karla Maia, Gustavo Simões, Lúcio Villar, Leise de Oliveira e a professora já aposentada, Terezinha Espósito, por todo o conhecimento transmitido durante o curso. Princípios e fundamentos que levarei por toda a minha vida. Agradeço à Katia Souza, Larissa, Maristela e todos os demais funcionários pelo apoio e convívio.

Agradeço aos colegas de mestrado Fernanda, Domingos, Michelle, Daniela, Laís, Ana Halabi, Wesley, e a todos que ingressaram e/ou cursaram alguma disciplina em comum pelos incentivos e compartilhamento de conhecimentos durante a formação geotécnica. Obrigado por tornarem

o ambiente acadêmico prazeroso. Agradeço ainda ao Flavio pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas e amigos da GEOESTAVEL, pelo apoio desde a época de estagiário onde fora despertado meu interesse na área de Geotecnia. Agradeço a todos pelos ensinamentos. Aos diretores Ney e Leo por acreditarem em mim. Em especial à Regina Moretti pelo conhecimento impar demonstrado durante a vida profissional.

Aos colegas e amigos da POTAMOS, pelos ensinamentos, apoio, oportunidade de trabalho e por entenderem os momentos em que estive ausente. Em especial à Andrea Portes pela paciência e conselhos que contribuíram diretamente para a formação do meu caráter e profissionalismo; e ao Albano por dividir seu conhecimento técnico de maneira tão clara, além de fornecer o computador para a realização das modelagens numéricas, muito obrigado!

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES) da UFMG, por disponibilizar a licença do software Abaqus 6.14, em nome do professor Rodrigo Caldas. Agradeço ao professor Lucas Grilo, à Mariana Alcântara e ao Luiz pelos conselhos fundamentais para a realização das modelagens numéricas.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a elaboração dessa dissertação.

Grato!

"A simplicidade é o último degrau da sabedoria"

Kahlil Gibran

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original"

Albert Einstein

RESUMO

O rejeito de mineração é um resíduo gerado do processo de beneficiamento do minério e deve ser disposto de forma segura com menor impacto ao meio ambiente. A tecnologia mais comum para disposição desse material é por meio de barragens, alternativa que, cada vez mais encontra dificuldades no licenciamento e operação devido à legislação recente. Como nova tecnologia de disposição, destaca-se o confinamento desse material em tubos geotêxteis. Inicialmente os tubos geotêxteis foram utilizados em aplicações marinhas para proteção costeiras. Posteriormente foram utilizados no desaguamento de resíduos, lamas, lodo em tratamento de esgoto e recentemente, no desaguamento de rejeitos de mineração. As tensões geradas durante o processo de disposição hidráulica do material nos tubos geotêxteis é determinante para a estabilidade e segurança da estrutura durante a etapa de preenchimento desses. Ademais, a determinação da forma do tubo geotêxtil visando o empilhamento para otimizar o espaço e aumentar a capacidade de armazenamento de rejeitos é fundamental. A presente pesquisa abrangeu uma avaliação das tensões resultantes e da forma do tubo constituído por geotêxtil tecido durante o seu enchimento por meio de métodos analíticos e da modelagem numérica. A metodologia baseou-se na definição das propriedades dos materiais, geotêxtil tecido e rejeito de mineração de ouro, a partir de ensaios de laboratório e dados existentes na literatura, estudo de campo reportado na literatura como forma de comparar e validar os resultados das análises numéricas, desenvolvimento de algoritmo numérico para aplicação dos métodos analíticos selecionados. A modelagem numérica foi desenvolvida por meio do programa computacional Abaqus versão 6.14, sendo feita análise paramétrica para verificar a influência da pressão de enchimento, do módulo de elasticidade do geotêxtil tecido, de quais elementos do programa de elementos finitos utilizado seriam mais representativos do comportamento do tubo geotêxtil nas condições de campo e a adequabilidade da utilização do programa para as simulações. O algoritmo desenvolvido no trabalho para solução dos métodos analíticos indicou resultados coerentes com os existentes na literatura bem como com os resultados obtidos a partir do estudo de campo. A modelagem numérica também foi capaz de representar o comportamento do tubo geotêxtil durante o seu enchimento, reportado na literatura, bem como os resultados existentes do estudo de campo. Observou-se que a escolha do elemento finito a ser utilizado na análise numérica é determinante para a simulação do comportamento tensão x deformação no tubo geotêxtil. A pressão de enchimento influencia na forma da seção transversal e tensões geradas durante o processo de enchimento.

ABSTRACT

Mining tailings are waste generated in the ore beneficiation process and it should be disposed safely with small impact to the environment. The most common technology for disposal of this tailings is through dams, but, this alternative is encountering increasingly difficulties in licensing and operation because of the recent laws. As a new disposal alternative stands out the use of geotextile tubes to confine this material. Initially, the geotextile tubes were used in marine applications such as coastal protection. Later, they were used in the dewatering of waste, slurries and sludges. Recently, it has been applied in the dewatering of mine tailings. The tensions generated during the hydraulic disposal of the material in the geotextile tubes are determinant for the stability and security of the structure during the filling process. In addition, the determination of the shape of the geosynthetic tube aiming the stacking to optimize the space and increase the storage capacity of mine tailings is fundamental. The research covered an evaluation of the tensions and the shape during the filling of a geotextile tube by analytical methods and numerical modeling. The material inside the tube were gold tailing. The methodology was based on the definition of the properties of the materials, woven geotextile and gold tailing, through laboratory tests and existing data from the literature, existing field study from the literature to perform a retroanalysis, development of a numerical algorithm to apply on the selected analytical methods. Also, it was developed a numerical modeling using the software Abaqus version 6.14 and parametric analysis to verify the influence of the filling pressure, elastic modulus of the geotextile tube, the finite element that were more representative of the field condition during the numerical modeling and the suitability of the use of the program for simulations. The numerical algorithm developed in the work to solve the analytical methods indicated results consistent with those in the literature as well as with the results obtained from the field condition. The numerical modeling was also able to represent the behavior of the geotextile tube during the filling, the existing experiment from the literature as well as the existing data from the field study. It was noticed that the choice of the type of the finite element used in numerical analysis is determinant for the behavior of the tensions and strain in the geotextile tube. The filling pressure and the elastic modulus influence the behavior of the cross section shape and tensions generated in the geotextile tube during the filling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1.1 – Evolução da produção de minério de ferro nos estados de MG e PA. Detalhe para queda em 2009 devido à crise econômica. | 25 |
| Figura 2.1 – Características típicas de tubos geotêxteis..... | 30 |
| Figura 2.2 – Estágios do processo de desaguamento em tubos geotêxteis..... | 31 |
| Figura 2.3 – Tubo geotêxtil durante o processo de desaguamento | 33 |
| Figura 2.4 – Rejeitos desaguados | 33 |
| Figura 2.5 – Sistema de bombeamento múltiplo..... | 34 |
| Figura 2.6 – Processo de cobertura do empilhamento de tubos..... | 35 |
| Figura 2.7: Empilhamento típico em forma de pirâmide visto de cima: primeira camada (azul), segunda camada (vermelha), terceira camada (verde) quarta camada (laranja) | 36 |
| Figura 2.8 – Quinta camada de tubos geotêxteis desaguados..... | 36 |
| Figura 2.9 – Localização das barreiras feitas com tubos geotêxteis | 37 |
| Figura 2.10 Barreira construída com tubos empilhados. Notar altura em relação ao homem (adaptado de TenCate, 2018) | 37 |
| Figura 2.11 – Fluxo normal ao plano pelo geotêxtil | 41 |
| Figura 2.12 – Fluxo pelo geotêxtil | 41 |
| Figura 2.13 – Amostras de diferentes tamanhos utilizadas para definir a propriedade de resistência a tração – Medidas em milímetro..... | 43 |
| Figura 2.14 – Resultados de ensaios de tração em faixa larga de geossintéticos: (a) geotêxtil não tecido, (b) geotêxtil tecido, (c) e (d) geogrelha | 44 |
| Figura 2.15 – Definição dos módulos de rigidez: (a) inicial; (b) deslocado; (c) secante ... | 45 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 2.16: Formas da seção transversal do tubo: falsa elipse (a), elipse perfeita (b) e seção circular de máximo enchimento (c) | 47 |
| Figura 2.17: Vários parâmetros associados com os tubos geotêxteis..... | 47 |
| Figura 2.18: Localização das tensões geradas em tubos geotêxteis ([T]_c: Tensão circunferencial, [T]_a: Tensão axial e [T]_p: Tensão no bocal de enchimento) | 49 |
| Figura 2.19 – (a) Distribuição da tensão circunferencial ao redor do tubo geotêxtil preenchido (b) tensão circunferencial aproximada em termos de [T]_{max}]_c..... | 49 |
| Figura 2.20 – Máxima tensão axial no tubo geotêxtil..... | 50 |
| Figura 2.21 - Análise das tensões geradas. (a) tensão gerada dependente da pressão de enchimento; (b) tensão gerada dependente da pressão de enchimento e do peso específico do material; (c) tensão gerada dependente do peso específico do material..... | 52 |
| Figura 2.22 – Vista da seção transversal do tubo geossintético – convenções e notações | 53 |
| Figura 2.23 – (a) Seção transversal do tubo geossintético em fundação rígida; (b) elemento infinitesimal do tubo geossintético | 55 |
| Figura 2.24 – (a) Diagrama para metade da seção; (b) diagrama para ponto infinitesimal | 57 |
| Figura 2.25 – Modos de falha de tubos geotêxteis (externo)..... | 59 |
| Figura 2.26 – Modos de falha de tubos geotêxteis (interno) | 60 |
| Figura 2.27 – Ações para controle do deslizamento | 60 |
| Figura 2.28 – (a) variação do teor de umidade no tubo geotêxtil; (b) distribuição das partículas no tubo geotêxtil..... | 64 |
| Figura 2.32 - Exemplo de configuração 3D obtida | 65 |
| Figura 2.33 – Tensões ao longo dos eixos do tubo geossintético | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.34 - Representação dos nós do tubo modelado | 67 |
| Figura 2.35 - Malha de elementos finitos para o modelo de empilhamento | 68 |
| Figura 2.36 – Modelo desenvolvido por Brink, 2014. | 72 |
| Figura 2.37 – Modelo geométrico definido | 75 |
| Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia da pesquisa | 79 |
| Figura 3.2 – Layout do empilhamento de protótipos em grandes dimensões executado em campo | 81 |
| Figura 3.3 – Monitoramento dos deslocamentos verticais feitos por meio da mira a laser e régua em pórtico | 82 |
| Figura 3.4 – Variação da forma do tubo durante o enchimento | 82 |
| Figura 3.5 – Tela com os dados de entrada (retângulo vermelho) e dados de saída (demais informações da figura) em html – eixos em metros. | 84 |
| Figura 3.6 – Variação da tensão ao longo da seção transversal para $\frac{1}{4}$ do tubo e metade do tubo | 90 |
| Figura 3.7 – Variação da tensão ao longo da seção transversal para $\frac{1}{4}$ do tubo e tubo inteiro | 90 |
| Figura 3.8 – Geometria do tubo (a) tubo geotêxtil completa (posição do eixo de simetria modelado destacado em laranja); (b) $\frac{1}{4}$ do tubo geotêxtil modelado | 91 |
| Figura 3.9 – Geometria do tubo geotêxtil modelada na condição vazia (estado inicial do modelo) | 91 |
| Figura 3.10 – Borda do tubo modelada $R = 0,025m$ | 92 |
| Figura 3.11 – Elemento S4R com integral reduzida | 93 |
| Figura 3.12 – Esquema de “hourglass” | 94 |

| | |
|--|------------|
| Figura 3.13 – Elemento de Membrana M3D4R..... | 94 |
| Figura 3.14 Elemento finito com três nós | 95 |
| Figura 3.15 – Elemento C3D8R com integral reduzida | 95 |
| Figura 3.16- Malha de elementos finitos do tubo geotêxtil | 97 |
| Figura 3.17 – Malha do elemento semicircular..... | 97 |
| Figura 3.18 – Detalhe da malha do vértice com elemento S3 | 97 |
| Figura 3.19 – Modelo final da modelagem numérica | 98 |
| Figura 3.20 – Condições de contorno aplicadas e superfície da fundação particionada . | 99 |
| Figura 3.21 – Esquema da distribuição da pressão hidrostática..... | 100 |
| Figura 3.22 – Carregamentos aplicados no modelo. Pressão interna em setas rosa e gravidade em seta amarela | 101 |
| Figura 4.1 – Parâmetros geométricos da seção transversal do tubo geossintético | 104 |
| Figura 4.2 – Forma do tubo geotêxtil com aplicação da pressão hidrostática de 14,22 kPa | 107 |
| Figura 4.3 – Esquema de aplicação de pressões. Estágio 1: início do bombeamento; Estágio 2: tubo na seção de referência; Estágio 3: tubo com pressão de bombeamento | 108 |
| Figura 4.4 – Forma do tubo geotêxtil para a metodologia de: (a) Plaut e Suherman; (b) Guo..... | 109 |
| Figura 4.6– Geometria metodologia dePlaut e Suherman..... | 111 |
| Figura 4.7 – Geometria para metodologia de Guo. | 111 |
| Figura 4.7 – Variação da altura da seção com a pressão de enchimento – Plaut e Suherman | 112 |

| | |
|---|------------|
| Figura 4.8 – Variação da tensão circunferencial com a pressão de enchimento – Plaut e Suherman | 113 |
| Figura 4.9 – Variação da largura com a pressão de enchimento – Plaut e Suherman... | 113 |
| Figura 4.10 – Variação da área com a pressão de enchimento – Plaut e Suherman..... | 113 |
| Figura 4.11 – Modelo físico estudado em laboratório | 114 |
| Figura 4.12 – Seções transversais em função da pressão de enchimento | 115 |
| Figura 4.13 – Comparação da tensão circunferencial (experimento de laboratório com método analítico) | 116 |
| Figura 4.14 – Variação da altura da seção transversal com a espessura do geossintético | 117 |
| Figura 4.15 – Seção transversal obtida por meio do software Abaqus (e=1,5 mm) | 117 |
| Figura 4.16 – Pontos de referência na seção transversal para avaliar as tensões | 118 |
| Figura 4.17 – Identificação dos pontos de referência no modelo numérico | 118 |
| Figura 4.18 – Variação das tensões ao longo da metade da seção do tubo – Seção transversal..... | 119 |
| Figura 4.19 – Variação das tensões ao longo da metade da seção do tubo – Seção longitudinal | 120 |
| Figura 4.20 – Seção transversal do tubo para pressão hidrostática correspondente a H=1,0m - (vermelho), H = 1,5m - (verde) e dimensões de campo em amarelo | 122 |
| Figura 4.21 – Resultado da modelagem numérica com os pontos de referência – malha de elementos finitos..... | 123 |
| Figura 4.22 – Deslocamentos verticais no tubo geotêxtil (medidas em metros)..... | 123 |

| | |
|--|------------|
| Figura 4.23 – Resultado da análise numérica com o tubo geotêxtil inteiro após preenchimento e tubo em ensaio de campo | 125 |
| Figura 4.24 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção transversal..... | 126 |
| Figura 4.25 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção longitudinal | 127 |
| Figura 4.26 – Extremidade onde o tubo geotêxtil dobra..... | 127 |
| Figura 4.27 – Seção do tubo geotêxtil para altura de coluna de rejeito $H = 3,5m$, $P = 50kPa$ | 128 |
| Figura 4.28 – Seção do tubo geotêxtil para altura de coluna de rejeito $H = 7,0m$, $P = 100kPa$ | 128 |
| Figura 4.29 – Resultado para $H = 3,5m$, $P = 50kPa$ | 128 |
| Figura 4.30 – Resultado para $H = 7,0m$, $P = 100kPa$ | 128 |
| Figura 4.31 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção transversal para altura de coluna de rejeito $H = 3,5m - 50kPa$ | 129 |
| Figura 4.32 Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção longitudinal para altura de coluna de rejeito $H = 3,5m - 50kPa$ | 130 |
| Figura 4.33 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção transversal para altura de coluna de rejeito $H = 7,0m - 100kPa$ | 131 |
| Figura 4.34 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção longitudinal para altura de coluna de rejeito $H = 7,0m - 100kPa$ | 131 |
| Figura 4.36 – Tensões ao longo da seção transversal para as pressões de $21 kPa$ ($H = 1,5 m$), $50kPa$ ($H = 3,5 m$) e $100kPa$ ($H = 7,0 m$)..... | 132 |
| Figura 4.37 – Variação da forma do tubo para $P = 2,85kPa$ a $11,40kPa$ | 133 |
| Figura 4.38 – Faixa de variação ampla..... | 134 |

| | |
|---|------------|
| Figura 4.39 – Variação da altura da seção transversal do tubo geotêxtil com a altura . | 134 |
| Figura 4.40 – Comparação da seção transversal com pressão hidrostática e pressão hidrostática + pressão uniforme..... | 135 |
| Figura 4.41 – Seção transversal do tubo com aplicação de pressão uniforme com 21,33 kPa | 136 |
| Figura 4.42 – Comparação da forma da seção transversal do elemento de Membrana e elemento de Casca..... | 137 |
| Figura 4.43 – Comparação da tensão ao longo da seção transversal do elemento de Membrana e elemento de Casca..... | 137 |
| Figura 4.44 – Comparação do elemento de casca x elemento de membrana: (a) tensão circunferencial; (b) tensão axial | 138 |
| Figura 4.45 – Variação da altura em função da variação do módulo de elasticidade (a) seção transversal; (b) altura | 139 |
| Figura 4.46 – Variação da tensão circunferencial com o módulo de elasticidade | 140 |
| Figura 4.47 – Comparação da forma do tubo geotêxtil obtida por meio da modelagem numérica e método analítico..... | 141 |
| Figura 4.49 – Variação da altura do tubo com a pressão interna..... | 142 |
| Figura 4.50 – Comparação da variação da altura do tubo geotêxtil: método analítico e modelagem numérica E = 0,30GPa e 1,60GPa..... | 143 |
| Figura 4.51 – Tensão circunferencial pela variação da pressão..... | 143 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|------------|
| Tabela 2.1 – Propriedades físicas e normas aplicáveis a ensaios com geotêxteis e produtos assemelhados | 38 |
| Tabela 2.2: Relação aproximada dos parâmetros de engenharia e geométricos dos tubos geotêxteis..... | 48 |
| Tabela 2.4 – Vantagens e limitações dos métodos analíticos | 58 |
| Tabela 2.5 - Propriedades dos materiais de enchimento e da fundação..... | 69 |
| Tabela 2.6 - Módulos de elasticidade do solo de fundação | 70 |
| Tabela 2.7 - Propriedades dos solos | 73 |
| Tabela 2.8 - Propriedades dos tubos geotêxteis | 74 |
| Tabela 2.9 - Parâmetros dos materiais de fundação e de enchimento | 74 |
| Tabela 3.1 – Características do geotêxtil utilizado | 80 |
| Tabela 3.2 – Resultados do teste de convergência | 96 |
| Tabela 3.3 – Propriedades dos polímeros..... | 102 |
| Tabela 4.1 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ | 105 |
| Tabela 4.2 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 9,81\text{kN/m}^3$ | 105 |
| Tabela 4.3 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 14\text{kN/m}^3$ | 105 |
| Tabela 4.4 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 12\text{kN/m}^3$ | 106 |
| Tabela 4.5 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 10\text{kN/m}^3$ | 106 |
| Tabela 4.6 – Comparação dos parâmetros encontrados em campo e nos métodos analíticos | 109 |

Tabela 4.7 – Coeficientes de redução para solicitações mecânicas em dimensionamento de estruturas com geossintéticos 145

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$[T]_a$ = Tensão axial

$[T]_c$ = Tensão circunferencial

$[T]_p$ = Tensão no bocal do enchimento

$[T_{max}]_a$ = Tensão circunferencial máxima

$[T_{max}]_c$ = Tensão circunferencial máxima

A = Área da seção transversal

A_0 = Área da seção totalmente preenchida

A_{elipse} = Área da elipse

$A_{falsa\ elipse}$ = Área da falsa elipse

A_p = Taxa de desaguamento ou fator de qualidade do floculante

B = Base do tubo geotêxtil

b = Contato com a fundação

C = Circunferência

CPs = Corpos de Prova

C_v = Teor de sólidos volumétrico

C_w = Teor de sólidos gravimétrico

D = Diâmetro Teórico do tubo geotêxtil

d_{GTx} = Espessura nominal do geotêxtil

D_T = Diâmetro teórico do tubo

E = Módulo de Elasticidade

ED = Eficiência do desaguamento

EF = Eficiência à filtração

g = Gravidade

G_s = Densidade real dos grãos

H = Altura do tubo geotêxtil

h_T = Altura do tubo geotêxtil preenchido

k_n = Permeabilidade normal ao plano;

k_p = Permeabilidade no plano;

L = Comprimento

L_T = Comprimento do tubo geotêxtil

M_s = Massa total de sólidos

M_T = Massa total do rejeito

n = Porosidade

n_{in} = Porosidade do material de entrada

n_{t-1} e n_t = Porosidade da lama no começo e no final do intervalo, respectivamente

n_x = Porosidade média da lama contida durante o intervalo de tempo avaliado

$p(x)$ = Pressão hidrostática

p_o = Pressão de Enchimento no tubo geotêxtil

PP = porcentagem de piping

PPA = Porcentagem de área aberta

PS_{final} = Teor de sólidos final

$PS_{inicial}$ = Teor de sólidos inicial

P_w = Pressão de água no tubo geotêxtil

Q = Fator da pressão de bombeamento

q = Fator empírico aplicado na fase de desaguamento

Q_{in} = Vazão de entrada no tubo

$Q_{out,d}$ = Taxa de desaguamento durante o desaguamento

$Q_{out,f}$ = Taxa de desaguamento durante o enchimento

S = Perímetro

S = Ponto infinitesimal do geossintético

S = Teor de Sólidos

T = Tensão Circunferencial

t_G = Espessura do geotêxtil.

$TS_{inicial}$ = Sólidos totais inicial

TSS_{final} = Sólidos totais suspensos após a filtração

V_s = Volume total de sólidos

V_T = Volume total do rejeito

V_t = Volume do tubo geotêxtil

$V_{T(t-1)}$ e $V_{T(t)}$ = Volume do tubo no começo e no final do intervalo de tempo, respectivamente

W = Largura do tubo geotêxtil

W = Largura do corpo de prova

W = Distância entre as laterais da elipse

w = Teor de sólidos

w_0 = teor de umidade inicial do material bombeado

w_f = teor de umidade final do material bombeado

W_f = massa de sólidos seca final

W_i = Massa de sólidos seca inicial da lama

x = Coordenada x

y = Coordenada y

γ = peso específico

Δ_{HT} = Variação da altura do tubo geotêxtil no intervalo de tempo avaliado

Δt = Intervalo de tempo

η_{GTX} = Porosidade do geotêxtil

θ = Transmissividade;

θ = Ângulo entre a direção tangente no ponto $S(x,y)$ e eixo x

ρ_A = gramatura

ρ_f = massa específica da fibra ou do filamento que constitui o geotêxtil

ρ_w = massa específica da água

σ'_v = Tensão vertical efetiva

ϕ = Razão de preenchimento do tubo

Ψ = Permissividade;

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 25 |
| 1.1 | OBJETIVOS DO TRABALHO..... | 27 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA | 27 |
| 1.3 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 28 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 29 |
| 2.1 | ALTERNATIVA DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS EM TUBOS GEOTÊXTEIS..... | 29 |
| 2.2 | EXEMPLOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO EM TUBOS GEOTÊXTEIS..... | 32 |
| 2.3 | PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS DOS GEOSSINTÉTICOS | 38 |
| 2.3.1 | <i>Propriedades físicas</i> | 39 |
| 2.3.2 | <i>Propriedades hidráulicas</i> | 40 |
| 2.3.3 | <i>Propriedades mecânicas</i> | 42 |
| 2.4 | SOLICITAÇÕES MECÂNICAS E DEFORMAÇÕES | 46 |
| 2.4.1 | <i>Forma dos tubos geotêxteis</i> | 46 |
| 2.4.2 | <i>Tensões geradas aos tubos geotêxteis</i> | 48 |
| 2.4.3 | <i>Avaliação dos Métodos Analíticos</i> | 58 |
| 2.4.4 | <i>Estados Limites de Projeto</i> | 59 |
| 2.5 | PRINCÍPIOS DE FILTRAÇÃO E DESAGUAMENTO EM TUBOS GEOTÊXTEIS. | 61 |
| 2.5.1 | <i>Formação do “Filter Cake”</i> | 63 |
| 2.6 | MODELAGEM NUMÉRICA | 64 |
| 2.6.1 | <i>Modelagem Numérica em tubos geotêxteis</i> | 64 |
| 3 | METODOLOGIA DA PESQUISA | 79 |
| 3.1 | PROPRIEDADES DO GEOTÊXTIL..... | 79 |

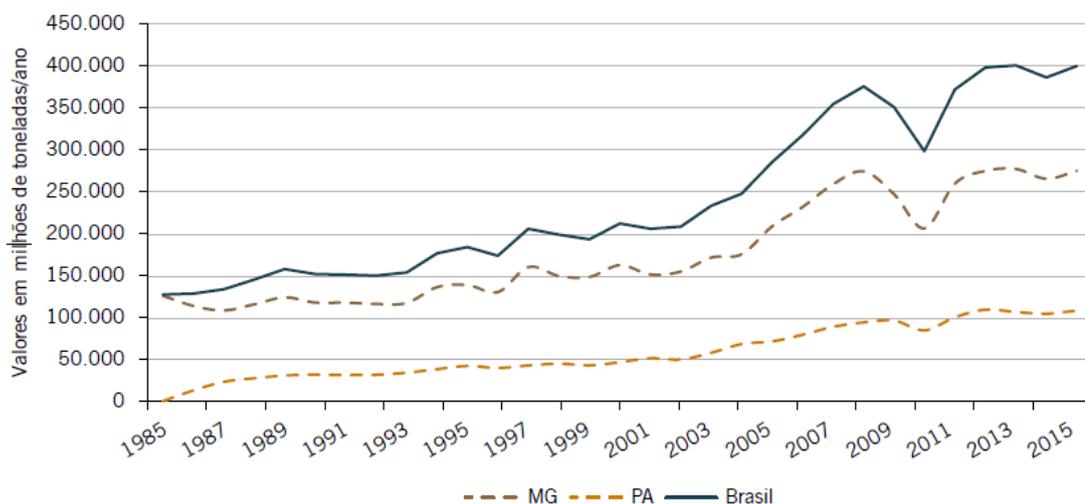
| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2 | ESTUDO DE CAMPO - PROTÓTIPO EM GRANDE ESCALA | 80 |
| 3.3 | MÉTODOS ANALÍTICOS..... | 83 |
| 3.3.1 | <i>Plaut e Suherman (1998)</i> | 85 |
| 3.3.2 | <i>Guo (2014)</i> | 87 |
| 3.4 | MODELAGEM NUMÉRICA | 88 |
| 3.4.1 | <i>Análise não linear</i> | 89 |
| 3.4.2 | <i>Geometria do modelo</i> | 89 |
| 3.4.3 | <i>Malha de elementos finitos</i> | 92 |
| 3.4.4 | <i>Condições de contorno</i> | 98 |
| 3.4.5 | <i>Contato</i> | 99 |
| 3.4.6 | <i>Carregamento</i> | 100 |
| 3.4.7 | <i>Descrição dos materiais</i> | 101 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 104 |
| 4.1 | MÉTODOS ANALÍTICOS..... | 104 |
| 4.1.1 | <i>Validação do algoritmo desenvolvido no trabalho</i> | 104 |
| 4.1.2 | <i>Retroanálise do trabalho de campo</i> | 106 |
| 4.1.3 | <i>Análise paramétrica</i> | 110 |
| 4.2 | MODELAGEM NUMÉRICA | 114 |
| 4.2.1 | <i>Validação da modelagem numérica</i> | 114 |
| 4.2.2 | <i>Retroanálise dos Ensaios de Campo de Freitas Silva (2017)</i> | 120 |
| 4.2.3 | <i>Análise paramétrica</i> | 127 |
| 4.2.4 | <i>Comparação método analítico x modelagem numérica</i> | 140 |
| 4.2.5 | <i>Fatores de segurança para o dimensionamento</i> | 144 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 147 |
| 5.1 | CONCLUSÕES | 147 |
| 5.2 | RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 149 |
| 5.3 | RECOMENDAÇÕES UTILIZANDO O SOFTWARE ABAQUS | 150 |

1 INTRODUÇÃO

A produção de rejeitos de mineração em polpa é consequência inerente ao processo de beneficiamento a úmido de minérios, sendo gerada em paralelo ao produto de interesse econômico. O aumento da taxa de produção de minério desde a última década, que apontou um crescimento (**Figura 1.1**) de 400 bilhões de toneladas no ano de 2015 no Brasil (IBRAM, 2016). Isso ocasionou uma mudança de diretrizes nas mineradoras de modo a se minimizar os impactos ambientais e os custos associados aos processos de disposição e contenção desse material (Portes, 2013).

Figura 1.1 – Evolução da produção de minério de ferro nos estados de MG e PA. Detalhe para queda em 2009 devido à crise econômica.



Fonte: IBRAM, 2016.

A disposição de rejeitos de mineração em barragens é a alternativa mais comum para contenção e armazenamento desse material. É importante ressaltar que o aumento da taxa de produção de rejeitos condiciona a construção de estruturas, cada vez maiores, e com consequências graves à jusante no caso de rompimento dessas estruturas.

O aprimoramento da gestão de segurança e o uso de novas tecnologias alternativas de disposição de rejeitos, tais como disposição subaérea, rejeito espessado, disposição em pasta, filtração de rejeitos e empilhamento drenado, são possíveis soluções para a redução de riscos (Ávila, 2017). Além disso, acrescenta-se também como alternativa viável a disposição de rejeitos em tubos geotêxteis.

Essas tecnologias, relacionadas ao desaguamento do rejeito no local de disposição ou na planta de beneficiamento, objetivam torná-lo um material com menor quantidade de água e maior resistência ao cisalhamento, além de promover a recuperação da água para reuso nos processos da mina. O comportamento dessas diferentes metodologias para desaguamento de rejeitos de mineração é objeto de estudo e comparação de diversos autores (Boccamino, 2007; Peixoto, 2012; Portes, 2013; Van Dursen, 2016; Ávila 2017; Freitas Silva 2017).

Entre as alternativas para confinamento e disposição final de rejeitos de mineração a disposição desse material em tubos geotêxteis é o foco desta dissertação. Os tubos geotêxteis, também, são tubos constituídos de geotêxteis tecidos e não tecidos com diâmetros, variando desde um a muitos metros, e tendo comprimento teórico infinito (Cantré, 2002).

Atualmente, a utilização de tubos geotêxteis, com a função de desaguamento, já apresenta estudos e práticas bastante consolidadas para disposição de lodos de estação de tratamento de esgoto e materiais dragados (Fowler *et al.*, 1996; Gaffney *et al.*, 1999; Lawson, 2008). No entanto, a opção de confinamento de rejeitos de mineração em tubos geotêxteis, porém, ainda não é comum na engenharia aplicada à mineração devido à falta de metodologias para seu enchimento e disposição e de compreensão quanto ao seu comportamento quando empilhado. Sendo assim, estudos vêm sendo realizados para o entendimento do desempenho dessa aplicação.

Estudos realizados por Martins (2006) e Freitas Silva (2017) indicam um bom desempenho desses sistemas com tubos geotêxteis para o desaguamento de rejeitos. Como alternativa de disposição de rejeitos foram utilizados tubos com 10m a 18m de circunferência e 42m a 65m de comprimento (Newman, 2004; Trainer, 2009; Wilke, 2015; TenCate, 2018). Visando a complementar os resultados obtidos com o uso desses sistemas, é importante a compreensão do desempenho dos tubos durante o enchimento e disposição final.

Durante o processo de disposição hidráulica e desaguamento dos rejeitos no tubo geotêxtil, as tensões geradas no tubo são determinantes para a avaliação do desempenho da estrutura, pois é nesse estágio que essa grandeza apresenta maior valor (Leshchinsky *et al.*, 1996). Além disso, a forma do tubo geotêxtil após o preenchimento e desaguamento influencia diretamente na estabilidade e segurança da estrutura quando o objetivo é o empilhamento dos tubos.

O propósito do trabalho consistiu na avaliação dos métodos analíticos existentes para a determinação da tensão gerada e da forma do tubo geotêxtil, bem como a realização de

modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos para a avaliação do comportamento mecânico do tubo durante o processo de enchimento.

1.1 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo geral a análise, por meio de modelagem numérica, do comportamento mecânico de um tubo geotêxtil durante o seu enchimento com rejeito de mineração de ouro, verificando a forma e as tensões geradas no tubo ao longo desse processo.

Para tanto, os objetivos específicos deste trabalho são descritos a seguir:

- Avaliar a aplicabilidade e resultados das simulações numéricas, utilizando um programa computacional por meio da comparação com os resultados de métodos de cálculo analíticos e de ensaios de campo disponíveis;
- Avaliar os elementos disponíveis no software para simulação do geossintético nessa aplicação (casca e membrana), indicando as vantagens e limitações;
- Comparar os resultados de análises efetuadas em tubos geotêxteis usando métodos analíticos e modelagem numérica;
- Verificar a influência da pressão de enchimento durante o bombeamento na forma e nas tensões geradas no tubo.

1.2 Justificativa

Atualmente, o processo de disposição de rejeitos em tubos geossintéticos não possui uma metodologia consolidada em relação ao seu enchimento e empilhamento, existindo ainda uma carência em relação a resultados, principalmente, do desempenho em longo prazo (Cantré, 2002). Portanto, o estudo do desempenho mecânico de tubos geotêxteis ao longo do seu preenchimento com rejeito é fundamental para o entendimento do sistema como um todo.

Como justificativa para a elaboração do trabalho podem ainda ser apresentadas:

- Dificuldade no licenciamento de novas barragens com alteamento para montante ou alteamentos alteração para montante de estruturas existentes (MINAS GERAIS, 2016; MINAS GERAIS, 2019);
- A disposição de rejeitos em tubos geotêxteis é uma alternativa à disposição de rejeitos em barragens caso ocorra o esgotamento dessa estrutura;
- Aumento da produção de rejeitos devido ao crescimento da exploração mineral e de jazidas com baixo teor mineral;
- Espaços para construção de barragens, cada vez mais, escassos, resultando a necessidade de alternativas de disposição de rejeitos em áreas reduzidas;
- Redução de impactos ambientais, sociais e econômicos à jusante da estrutura, caso ocorra uma falha no sistema de disposição de rejeitos;
- Oportunidade de recuperação de água para utilização na planta de beneficiamento;
- Redução da necessidade de tratamentos químicos;
- Contribuição acadêmica para a compreensão do desempenho da disposição de rejeitos de mineração em sistemas fechados de geossintéticos.

1.3 Estrutura da dissertação

Além deste capítulo introdutório, intitulado 1, outros quatro capítulos compõem este trabalho. No Capítulo 2, será apresentada a revisão da literatura que fundamentou o desenvolvimento da pesquisa, correspondente às propriedades e comportamentos dos geossintéticos em geral, alternativa de disposição de rejeitos em tubos geotêxteis, solicitações mecânicas e deformações nos tubos, princípios de filtração e desaguamento em tubos geotêxteis, modelagem numérica e modelos constitutivos. A metodologia desta pesquisa, apresentada no capítulo 3, contempla o estudo de campo existente e a descrição dos métodos analíticos aplicados ao trabalho e da modelagem numérica desenvolvida. No capítulo 4, são apresentados os resultados e discussões obtidos com a aplicação da metodologia abordada no capítulo 3, incluindo retroanálise e análise paramétrica, tanto para os métodos analíticos quanto para a modelagem numérica. Por fim, as conclusões e recomendações para pesquisas futuras são apresentadas no capítulo 5.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo abordará aspectos referentes à alternativa de disposição de rejeitos em tubos geotêxteis, aos geossintéticos, às solicitações mecânicas e deformações em tubos geotêxteis, ao detalhamento da opção de disposição em tubos geotêxteis e das propriedades relevantes na análise da disposição por esse sistema, aos aspectos gerais sobre modelagem numérica e modelos constitutivos.

2.1 Alternativa da disposição de rejeitos em tubos geotêxteis

Os tubos geotêxteis são tubos lineares feitos de geossintéticos que possuem a função de conter um material sólido no seu interior e liberar o fluido através dos poros de sua malha. Historicamente, o sistema de contenção por tubos geotêxteis vem sendo utilizado em estruturas de aplicações hidráulicas e marinhas (Lawson, 2008). Nas últimas duas décadas, seu uso tem aumentado consideravelmente com a finalidade de desaguamento de diferentes tipos de lamas, materiais dragados, sedimentos, resíduos industriais e lodos ambientais (Cantré, 2002; Cantré e Saathoff, 2011; Khachan e Bhatia, 2017). Com a função de desaguamento, os tubos geotêxteis foram primeiramente utilizados para desaguar lodo de esgoto municipal (Fowler *et al.* 1996). Estudos demonstram ainda boa capacidade de desaguar materiais com alto teor de umidade (Aydilek e Edil 2002; Kutay e Aydilek 2005; Liao e Bhatia 2005).

Além dessas aplicações, essa tecnologia pode ainda se apresentar como uma alternativa para o desaguamento de rejeitos de mineração, pois gera menos impactos ambientais quando comparado com acondicionamento de materiais em barragens e pode ser mais eficiente do que tecnologias de desaguamento mecânicas (Zhu e Beech, 2015). O desaguamento de rejeito de mineração utilizando tubos geotêxteis teve seu primeiro uso em 2004 (Newman, 2004), demonstrando, dessa maneira, ser uma tecnologia recente.

Esses tubos são geralmente constituídos por geotêxteis tecidos ou não-tecidos, mas podem também ser formados por uma camada dupla desses dois materiais, dependendo da aplicabilidade e limitações do sistema. O resultado da combinação de dois tipos de geossintéticos faz com que a estrutura apresente o atributo positivo dos dois componentes (Koerner, 2016). Quando especificados desta maneira, o geossintético interno é do tipo não

tecido e tem a função de filtração, enquanto o geossintético externo é do tipo tecido e possui a função de resistência mecânica (Pilarczyk, 2000; Moo-Young e Tucker, 2002).

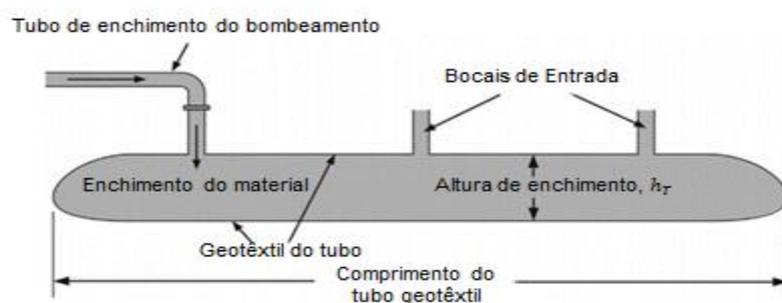
É viável ressaltar que, para Lawson (2008), a camada de geossintético deve possuir três propriedades (mecânica, hidráulica e durabilidade), que são fundamentais e críticas no desempenho de tubos geotêxteis preenchidos:

- Resistência à tração e rigidez necessárias para resistir aos esforços mecânicos;
- Propriedades hidráulicas necessárias para reter os sólidos e liberar os fluidos;
- Durabilidade e se manter estável durante toda a vida útil projetada.

As suas dimensões são variadas e pré-fabricadas dependendo da necessidade do empreendimento, sendo estes os fatores que influenciam na geometria, além de estarem relacionados ao tipo e quantidade de material, a disponibilidade de espaço na área de implantação do sistema de disposição e a geometria final do empilhamento. Nesse contexto, Freitas Silva (2017) analisou um empilhamento de tubos geotêxteis e verificou boa eficácia no desaguamento de rejeitos de mineração de ouro, bem como observou que a forma final dos tubos influenciou na estabilidade externa do sistema.

O processo do desaguamento, então, inicia-se durante a disposição hidráulica dos rejeitos por meio de bombeamento da polpa com alto teor de umidade para dentro dos tubos. Ao decorrer do enchimento do geotêxtil, a função de filtração e drenagem permite a passagem de fluido, enquanto as partículas sólidas são retidas de dentro da bolsa. A **Figura 2.1** apresenta o esquema típico de um tubo geotêxtil.

Figura 2.1 – Características típicas de tubos geotêxteis



Fonte: Modelo modificado de Koener, 2016

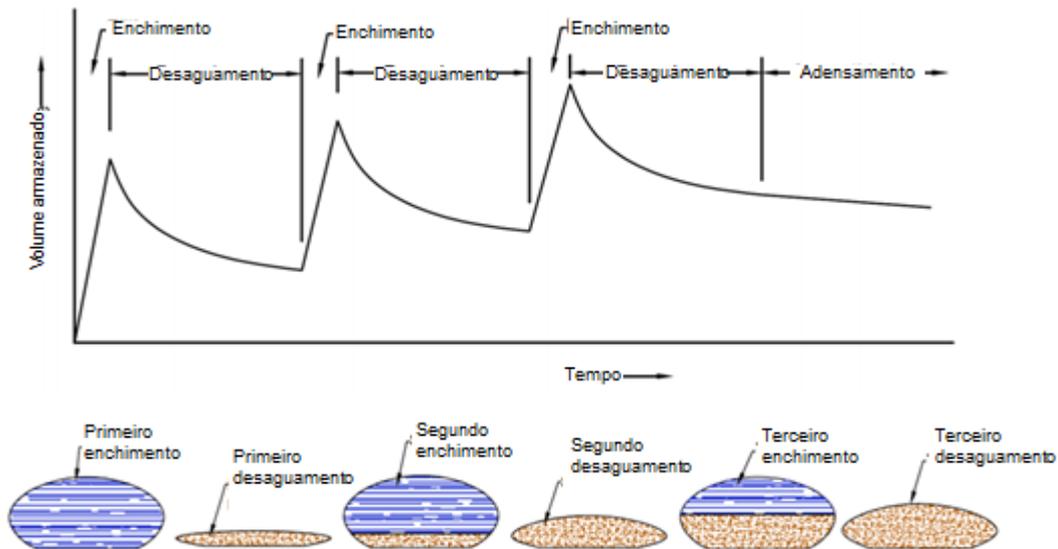
Com o processo, a consistência do material bombeado muda do estado líquido/semi-líquido para o semi-líquido/sólido, resultando em uma significativa redução do seu volume. O líquido desaguado pode ainda ser reaproveitado no circuito fechado do empreendimento ou lançado no meio ambiente, dependendo das suas condições. Depois de desaguado, o material pode permanecer contido nas bolsas e ser armazenado de modo empilhado, transportado ou reutilizado no processo industrial.

O processo completo de desaguamento consiste em três etapas:

1. Bombeamento de rejeitos para dentro da bolsa citado anteriormente;
2. Desaguamento, que consiste na drenagem do excesso de água livre do tubo geotêxtil e condução deste a uma redução significativa de volume;
3. Adensamento, que envolve a drenagem e dissipação do excesso de poropressão dos poros do solo com posterior ressecamento do rejeito.

Os processos de bombeamento (1) e desaguamento (2) podem ser repetidos em vários ciclos com o intuito de conter o máximo de volume dentro da bolsa têxtil. A **Figura 2.2** mostra esses vários estágios do processo de desaguamento.

Figura 2.2 – Estágios do processo de desaguamento em tubos geotêxteis



Fonte: adaptado de Ratnayesuraj e Bathia, 2018.

Durante o primeiro ciclo de enchimento, geralmente o tubo geossintético é preenchido até a altura máxima de projeto, quando o bombeamento é interrompido. O desaguamento do solo começa assim que o processo de enchimento é interrompido e, após um certo grau de desaguamento, o tubo pode ser preenchido novamente. Com a saída de fluido do tubo geotêxtil, o volume é reduzido e a concentração de sólidos do material é aumentada (Wilke 2015).

Para Adams (2016), em produções moderadas, o uso de geossintéticos para desaguamento e acondicionamento de rejeitos pode ter um bom custo-benefício, bem como outras vantagens se comparado com maneiras convencionas de contenção de rejeitos, como o controle de erosão, redução do potencial de liquefação e fácil reabilitação.

2.2 Exemplos de disposição de rejeitos de mineração em tubos geotêxteis

Conforme já citado nas seções anteriores, o uso de tubos geotêxteis teve início nas décadas de 50 e 60 para a contenção costeira e, posteriormente, na década de 90, para desaguamento e acondicionamento de lamas e sedimentos finos. O uso pioneiro para o desaguamento de rejeitos de mineração foi citado por Newman *et al.* (2004).

Um exemplo de seu uso foi a operação Stratoni, localizada na península Chalkidiki, no norte da Grécia, compreendendo as minas Madem Lakkos e Mavres Petres. Nesse caso, as minas tiveram a disposição de rejeitos de chumbo, zinco e prata compartilhada em tubos geotêxteis e barragens. Durante o planejamento da mina, no ano de 1999, percebeu-se que a produção estava praticamente o dobro da projetada e que, por isso, a vida útil da barragem iria se esgotar no ano de 2003 (Newman *et al.*, 2004).

Devido ao tempo e aos custos envolvidos, as alternativas usuais de disposição de rejeitos não seriam viáveis para implantação na mina. Dessa maneira, foram realizados ensaios de bolsa suspensa e, em grande escala, no local para viabilizar o uso de tubos geotêxteis como forma de disposição dos rejeitos. Esses ensaios indicaram um bom desempenho no desaguamento. Para ilustrar, a **Figura 2.3** apresenta o tubo geotêxtil utilizado durante o processo de desaguamento, que possuía comprimento de 60 m e diâmetro de 14,7 m, e apresentou bom comportamento sem a necessidade de reparos.

Figura 2.3 – Tubo geotêxtil durante o processo de desaguamento



Fonte: Newman *et al.*, 2004.

Após dez dias do desaguamento e sem a adição da polpa de rejeitos, a bolsa foi aberta e inspecionada. O material presente no tubo possuía um teor de sólidos de 65%, ao passo que o material de entrada possuía 7% de teor de sólidos. A **Figura 2.4** apresenta a bolsa aberta após o desaguamento, sendo possível observar que o material apresenta-se bem consolidado.

Figura 2.4 – Rejeitos desaguados



Fonte: Newman *et al.*, 2004.

Após os testes e avaliações, o complexo minerário iniciou o acondicionamento de rejeitos em tubos para aproximadamente um terço da produção, permitindo o aumento da vida útil das barragens existentes. Trainer (2009) descreve o caso da mina de North River, localizada na cidade de Berry, no Alabama, onde houve problemas no ano de 2007. Na época, a operação da mina foi quase interrompida para a disposição de rejeitos gerados, de aproximadamente 5.670 m³ por dia, devido às novas restrições regulamentares e ao planejamento da mina. Porém, a mina necessitava da continuação do processamento de carvão para atender às demandas dos clientes, pois os métodos convencionais de armazenamento em barragens ou disposição em minas subterrâneas não estavam disponíveis. Sendo assim, a alternativa de disposição do material em tubos geotêxteis foi utilizada.

Após um bom desempenho de testes em grande escala, o sistema foi implementado por meio de um empilhamento em forma de pirâmide com quatro camadas de tubos. A operação era de 24 horas com capacidade de bombear 6,5m³ por minuto. O sistema de bombeamento utilizado para enchimento dos tubos é apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Sistema de bombeamento múltiplo



Fonte: Trainer, 2009.

Por fim, um total de 240 tubos foram utilizados, confinando e desaguando um total de 182.880m³ de rejeitos. Uma vez que todos os tubos estavam totalmente preenchidos, o empilhamento foi coberto por solo com posterior aplicação de hidrossemeadura (**Figura 2.6**),

estando o sistema de disposição estável e sem apresentar nenhum problema durante a operação de fechamento.

Figura 2.6 – Processo de cobertura do empilhamento de tubos



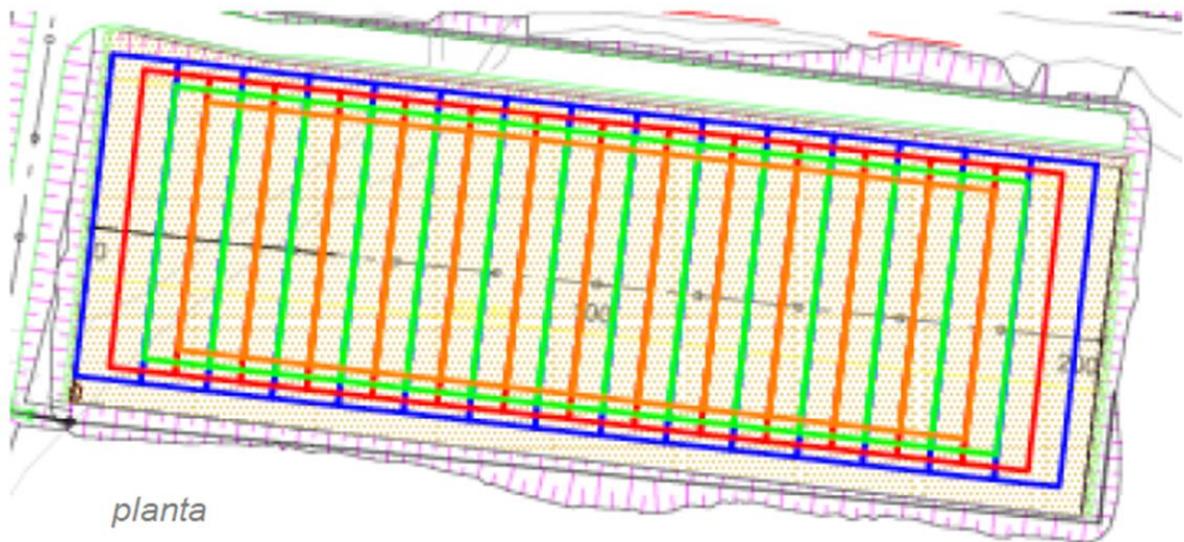
Fonte: Trainer, 2009.

Wilke *et al.* (2015) descrevem um estudo de caso da utilização de tubos geotêxteis na maior mina a céu aberto de níquel e zinco da Europa com vida útil estimada em 46 anos. Localizada na Finlândia, a mina de Talvivaara produz anualmente 10 milhões de toneladas de minério, gerando, em paralelo, grandes quantidades de rejeito de gesso. Em 2012, ocorreu um vazamento em uma das lagoas de gesso e, como medida de emergência, o rejeito foi bombeado para dentro da cava. Como solução de extração do rejeito depositado no local, utilizou-se a dragagem e a disposição dos resíduos em tubos geotêxteis. Devido ao sucesso dos testes de desaguentos subsequentes, o processo passou a ser empregado como alternativa de disposição para todo o rejeito de gesso gerado posteriormente.

As dimensões iniciais variaram de pequenos tubos com armazenamento de 30m³ para tubos com 65 m de comprimento com capacidade de armazenar um volume de 1600m³ por unidade. Na Figura 2.7 é possível verificar a implantação do sistema em planta.

No intuito de se colocar a camada superior de tubos em cima da camada inferior de maneira segura, os tubos de cima foram reduzidos em pelo menos 5m de forma a evitar o deslizamento dessas unidades. O sistema de desaguentamento por meio de tubos geotêxteis foi, então, implementado com sucesso na Mina de Talvivaara na Finlândia. Na Figura 2.8 apresenta-se uma imagem do empilhamento.

Figura 2.7: Empilhamento típico em forma de pirâmide visto de cima: primeira camada (azul), segunda camada (vermelha), terceira camada (verde) quarta camada (laranja)



Fonte: adaptado de Wilke *et al.*, 2015.

Figura 2.8 – Quinta camada de tubos geotêxteis desaguados



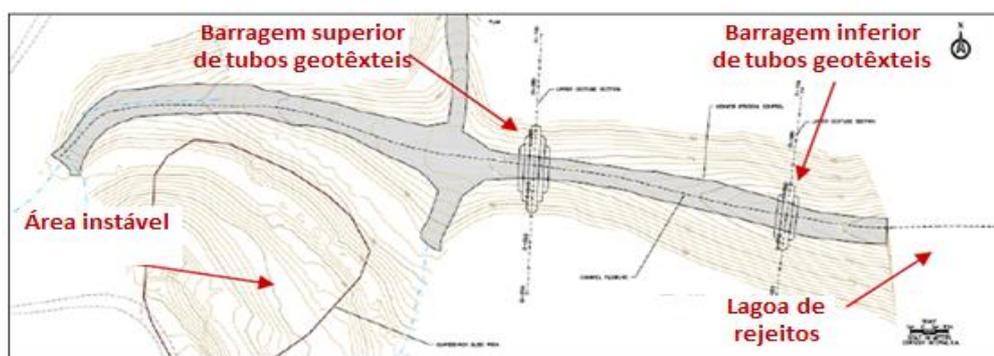
Fonte: Wilke *et al.*, 2015.

Em outra situação, Tencate (2018) cita o caso da mina de *El Mochito*, Honduras, onde rejeitos foram desaguados dentro de tubos geotêxteis. No local, encontra-se uma grande lagoa de rejeitos que contém lama contaminada, acima da qual se encontram várias áreas instáveis,

conhecida como “*Guard Shack Slide*”, que possuem o potencial de escoar um grande volume de detritos em eventos de forte precipitação.

Para evitar que o volume do material escoado atingisse a lagoa, causando uma ruptura catastrófica com lançamento de rejeitos contaminados à jusante, foi necessária a construção de barreiras à montante da estrutura. A solução por meio de duas barreiras de tubos geotêxteis com rejeitos desaguados foi selecionada para o tratamento do problema. A **Figura 2.9** mostra a localização dos barramentos.

Figura 2.9 – Localização das barreiras feitas com tubos geotêxteis



Fonte: Adaptado de TenCate, 2018.

Os empilhamentos foram construídos na geometria de uma pirâmide com arranjo 2 - 1 e 3 - 2 - 1 (**Figura 2.10**), com tubos de 10 m, 12 m e 14 m de circunferência. Devido à necessidade de drenagem e a não necessidade de acúmulo de água atrás do barramento, foi construído, ainda, um sistema de drenagem com tubos sob a estrutura.

Figura 2.10 Barreira construída com tubos empilhados. Notar altura em relação ao homem (adaptado de TenCate, 2018)



Fonte: adaptado de TenCate, 2018.

2.3 Propriedades fundamentais dos geossintéticos

Este item apresenta as propriedades que são consideradas para se realizar o dimensionamento de estruturas, utilizando geossintéticos como material de construção. A **Tabela 2.1** mostra as propriedades, normas e observações em relação aos ensaios para obtenção das mesmas.

Tabela 2.1 – Propriedades físicas e normas aplicáveis a ensaios com geotêxteis e produtos assemelhados

| Propriedade | Norma | Observações |
|--|--|---|
| Físicas | | |
| Espessura nominal | ABNT NBR ISO 9863, ASTM D5199 | Medida sob carga de 2kPa, que pode variar para outros geossintéticos. |
| Massa por unidade de área | ABNT NBR ISO 9864, ASTM D5261 | Corpos de prova com 100cm ² . |
| Porosidade | - | Determinação analítica. |
| Mecânicas | | |
| Compressibilidade | ABNT NBR ISO 25619 | Tensões usuais, de 10 a 200kPa. |
| Resistência a tração: - Faixa larga - Faixa restrita ou grab | ABNT NBR ISO ASTM D 4595 ASTM D 4632 | Dimensões dos CPs (C x L), mm. 100mm x 150mm, área de tração 25mm x 25mm. |
| Resistência a punção: - Estático (CBR) - Dinâmico | ABNT NBR ISO 12236 ABNT NBR ISO 13433 | Pistão com diâmetro de 50 mm. Cone com 500g, altura de queda 500mm. |
| Resistência ao rasgo | ASTM D4533 | - |
| Resistência ao estouro | ASTM D 3786 | - |
| Fluência | ABNT NBR 15226 | Tempos de ensaio podem variar de 1.000 a 10.000 horas de duração. |
| Hidráulicas | | |
| Permissividade | ABNT NBR ISO 11058, ASTM D4491 | Fluxo na direção normal ao geossintético. |
| Transmissividade | ABNT NBR ISO 12958 ASTM D 4716 | Fluxo através do plano do geossintético. |
| Abertura de filtração | ABNT NBR ISO 12956, AFNOR G 38 017 | Peneiramento por lavagem de solo bem graduado segundo diferentes procedimentos. |
| Abertura aparente de filtração | ASTM D 4751 | Peneiramento a seco com esferas de vidro. |

Fonte: adaptado de Vertematti, 2015.

2.3.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas são características que auxiliam na identificação e caracterização dos produtos geossintéticos e na seleção adequada do material para uso em obras geotécnicas e de meio ambiente. Entre elas, são de interesse a gramatura, a espessura nominal, a porosidade e a porcentagem de área aberta.

A gramatura (ρ_A) é a propriedade dada pela massa dividida pela área, expressa em gramas por metro quadrado (g/m^2), sendo diretamente associada ao peso, custo e à resistência mecânica do geossintético. Os valores típicos variam de 150 a 750 g/m^2 , embora alguns geotêxteis tenham alcançado valores superiores a 2.000 g/m^2 (Koerner, 2005).

Quanto à espessura nominal (d_{GTX}), esta é a medida da distância entre as superfícies superior e inferior do geotêxtil, quando este está submetido a uma tensão vertical de 2kPa. Os geotêxteis não tecidos e geocompostos apresentam grande variação de espessura, uma vez sujeitos a uma faixa de variação de tensões.

A porosidade (η_{GTX}), de maneira similar à definição na mecânica dos solos, corresponde à razão entre volume de vazios ou poros, e o volume total de uma amostra. Para o caso dos geotêxteis, esse parâmetro é obtido de forma indireta pela equação:

$$n_{\text{GTX}} = \left(1 - \frac{\rho_A}{d_{\text{GTX}} \rho_f \rho_w} \right) \times 100\% \quad \text{Equação (2.1)}$$

Em que,

η_{GTX} = porosidade (%);

d_{GTX} = espessura nominal (cm);

ρ_f = massa específica da fibra ou do filamento que constitui o geotêxtil (g/cm^3);

ρ_w = massa específica da água (g/cm^3).

A porcentagem de área aberta (PPA) é a área dos espaços vazios, resultantes do processo de tecelagem entre os elementos longitudinais (urdume) e os transversais (trama). (Vertematti, 2015).

2.3.2 Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas são especialmente importantes para aplicações as quais o geotêxtil terá função de drenagem e filtração. Exercendo a função de filtro, a estrutura deve permitir a passagem de fluido e, em contrapartida, reter as partículas sólidas do solo, enquanto, na função de dreno, deve deixar o líquido escoar livremente entre os poros. Durante o desaguamento do tubo geotêxtil, então, o geotêxtil retém o rejeito bombeado e permite a passagem do líquido para o exterior da bolsa.

Na função de filtração, o geotêxtil deve atender aos critérios de permeabilidade, à retenção e colmatação. Além disso, o solo precisa se auto-sustentar, ser internamente estável, evitando que partículas menores migrem por entre os vazios da estrutura.

A permeabilidade normal ou permissividade representa a capacidade de fluxo através do plano do geossintético. Ela é representada pelo coeficiente de permeabilidade normal ao plano dividido pela espessura do material, conforme Equação (2.2):

$$\psi = \frac{k_n}{t_G} \quad \text{Equação (2.2)}$$

Em que,

Ψ = Permissividade (s^{-1});

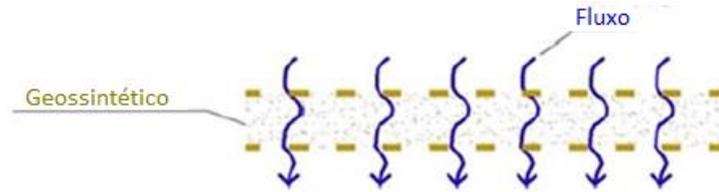
k_n = permeabilidade normal ao plano (m/s);

t_G = espessura do geotêxtil (m).

Palmeira e Gardoni (2002) citam que a permeabilidade normal ao plano pode ser reduzida em até dez vezes, variando a tensão normal entre 0 e 200 kPa. A espessura, que também é dependente da tensão normal, é inversamente proporcional à permissividade. Dessa forma, quanto maior a espessura, menor será a permissividade, caso a estrutura e a porosidade sejam idênticas para um mesmo geossintético (GOURC, 1982 apud GARDONI 2000). Considerando a possibilidade do empilhamento de tubos geotêxteis para acondicionamento de rejeitos de mineração, a influência da tensão normal, devido ao peso próprio do rejeito e tubos adjacentes, deve ser considerada no dimensionamento de estruturas.

As normas ASTM D4491 e ABNT NBR ISO 11058 avaliam métodos experimentais para determinar a permeabilidade e permissividade. A Figura 2.11 apresenta um esquema do fluxo normal ao plano pelo geotêxtil.

Figura 2.11 – Fluxo normal ao plano pelo geotêxtil



Fonte: Koerner, 2016.

Quando o fluxo ocorre no plano do geotêxtil, a propriedade envolvida é a transmissividade ou permeabilidade planar, que é a permeabilidade no plano vezes a espessura do geossintético, conforme Equação (2.3).

$$\theta = k_p t_G \quad \text{Equação (2.3)}$$

Em que,

θ = transmissividade (m^2/s);

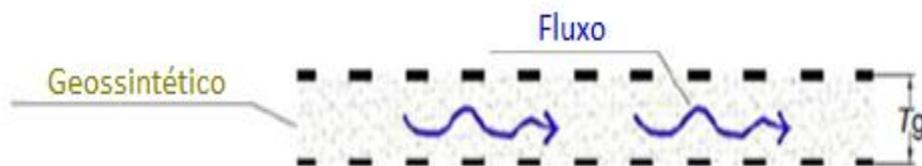
k_p = permeabilidade no plano (m/s);

t_G = espessura do geotêxtil (m).

Assim como na permissividade, a transmissividade é dependente da espessura do geotêxtil sendo, portanto, dependente da tensão normal aplicada durante a obra.

As normas ASTM D4716 e ABNT NBR ISO 12958 avaliam métodos para determinar a transmissividade, esquematicamente, apresentada na **Figura 2.12**.

Figura 2.12 – Fluxo pelo geotêxtil



Fonte: Koerner, 2016.

A abertura de filtração O_{95} é um parâmetro fundamental para o dimensionamento e escolha do geotêxtil para o desempenho, como filtro nos sistemas de tubos geotêxteis e é definido pela abertura equivalente ao maior diâmetro da partícula que pode atravessar o geotêxtil.

Para a determinação desse parâmetro, são utilizados métodos experimentais que são classificados em duas categorias principais: métodos de peneiramento, que são capazes de determinar a abertura de filtração, podendo ser a seco, molhado ou hidrodinâmico; e métodos que envolvem a intrusão de mercúrio, fluxo capilar “*bubble point*”, análise de imagem e abordagem probabilística que, além de determinarem a abertura de filtração, também fornecem a distribuição de poros.

2.3.3 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas que serão discutidas neste tópico, geralmente, são utilizadas como propriedades índice, além de auxiliar no dimensionamento das estruturas. Elas indicam a resistência à tração do geotêxtil mobilizada em carregamentos estáticos e dinâmicos aplicadas em obras de engenharia e na prevenção de danos devido à instalação. Os parâmetros de maior interesse são a compressibilidade, a resistência à tração, ao puncionamento e ao rasgamento.

A compressibilidade é definida pela variação da espessura do geotêxtil a partir da aplicação de uma tensão normal. Devido a essa variação, durante o dimensionamento para o projeto de uma dada estrutura, recomenda-se a realização de ensaios com as tensões confinantes que serão encontradas em campo.

A resistência à tração pode ser considerada como a propriedade mecânica de maior importância no dimensionamento. Para o caso de tubos geotêxteis, ela é fundamental devido a tensões axiais e circunferenciais que atingem seu valor máximo durante o processo de enchimento. Essa propriedade depende do tipo de polímero constituinte, estrutura, processo de fabricação, dentre outros fatores (Aguilar, 2003). Ao invés de expressar a resistência à tração, por meio de tensões, é convencional utilizar força por unidade de comprimento ao longo do geossintético (kN/m) (FHWA, 1998).

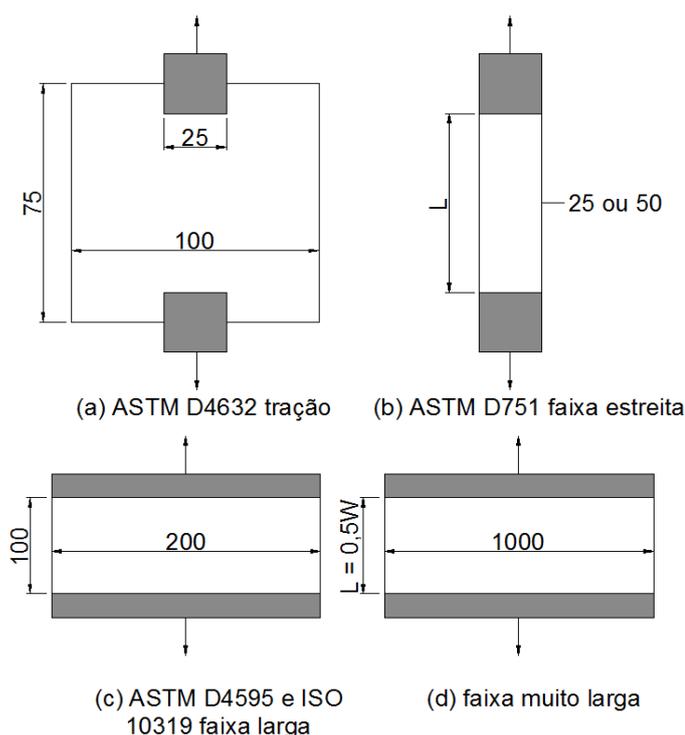
O “*grab test*” (**Figura 2.13a**) é utilizado para controle de qualidade dos produtos (Palmeira, 1999 *apud* Mendes, 2006), enquanto o ensaio de faixa larga “*Wide-width tensile test*” é usado para definir a resistência última (**Figura 2.13c**). O ensaio de faixa larga possui

dimensões maiores que os demais ensaios para diminuir o efeito da “estricção”, que é o fenômeno de estrangulamento da largura efetiva da amostra devido às solicitações aplicadas.

Os geotêxteis, geralmente, possuem diferentes resistências nos dois sentidos (longitudinal e transversal), portanto, é necessário conduzir os testes nas duas direções principais dos filamentos. Na **Figura 2.17**, “W” representa a largura do corpo de prova e “L” simboliza o comprimento do corpo de prova.

De maneira geral, o ensaio de resistência à tração consiste em prender uma amostra em formato de tira por um par de garras metálicas na máquina universal e tracioná-la até a ruptura. O valor da força por área no alongamento máximo é a resistência do geossintético, e, a partir dos valores registrados de carregamento e suas deformações durante a extensão, é concebida a curva tensão *versus* deformação.

Figura 2.13 – Amostras de diferentes tamanhos utilizadas para definir a propriedade de resistência a tração – Medidas em milímetro



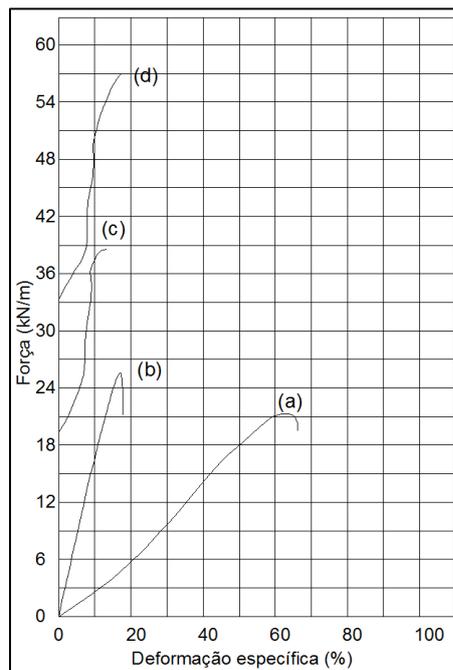
Fonte: adaptado de Koerner, 2005.

Quatro são os valores definidos a partir da curva do ensaio de resistência à tração descritos a seguir:

1. Resistência à tração máxima, definida como a resistência do geotêxtil;
2. Deformação na ruptura, definida como o alongamento máximo do corpo de prova;
3. Trabalho realizado, obtido a partir da área abaixo do gráfico tensão x deformação;
4. Módulo de Elasticidade, definido no gráfico, como força por unidade de comprimento x deformação.

Os geotêxteis fabricados por diferentes métodos de produção possuem diferentes comportamentos quando solicitados no ensaio à tração. Conforme pode ser observado na **Figura 2.14**, os geotêxteis tecidos são mais rígidos e possuem um maior módulo de rigidez, enquanto os geotêxteis não-tecidos são mais deformáveis e apresentam menores módulos de rigidez.

Figura 2.14 – Resultados de ensaios de tração em faixa larga de geossintéticos: (a) geotêxtil não tecido, (b) geotêxtil tecido, (c) e (d) geogrelha

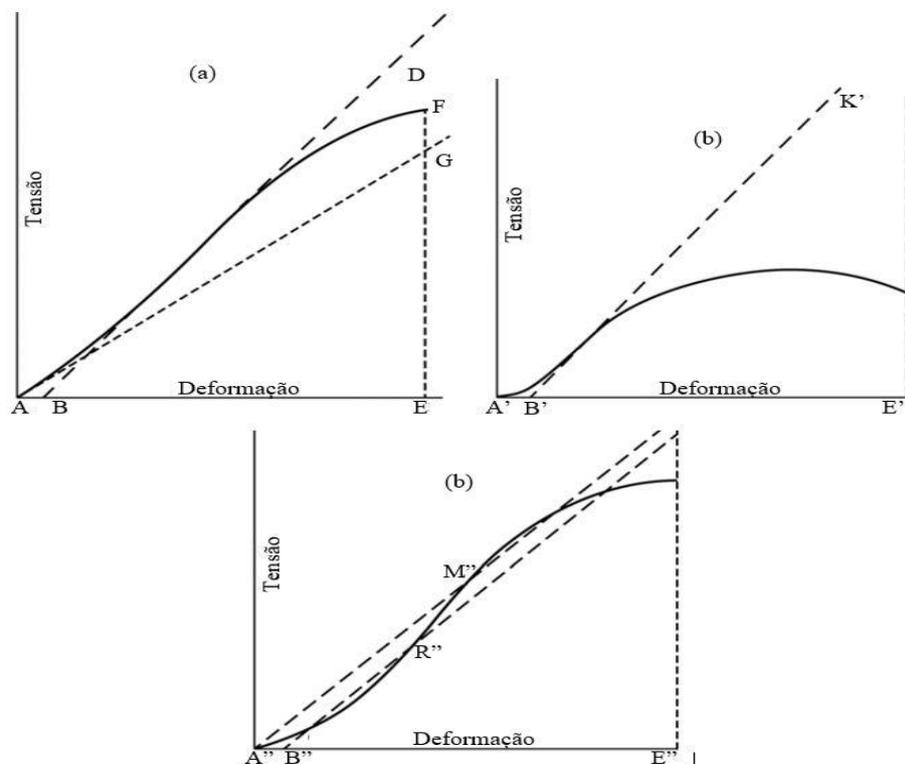


Fonte: adaptado de Vertematti, 2015.

O módulo de elasticidade ou módulo de rigidez pode ser determinado por diferentes métodos a partir da inclinação da curva força por unidade de comprimento x deformação, sendo eles:

- Módulo de rigidez inicial, definido pela inclinação inicial da curva força por unidade de comprimento x deformação (reta AG da Figura 2.15a) e estabelecido dividindo-se a força pela deformação em um determinado ponto da reta.
- Módulo de rigidez deslocado, determinado pela inclinação da curva força por unidade de comprimento x deformação deslocada no eixo x (reta BD da Figura 2.15a), onde ocorre um trecho de comportamento linear após uma região não linear. Caso a curva não apresente nenhuma região linear, traça-se uma linha tangente ao ponto de maior inclinação (reta B'K' da Figura 2.15b). O módulo é estabelecido dividindo-se a força pela deformação em um mesmo ponto da reta, sendo que B e B' possuem deformação 0%.
- Módulo secante, estabelecido pela inclinação da curva tensão x deformação, geralmente, em 10% (reta A''M'' da Figura 2.15c) ou a partir de outra deformação diferente de 10% (reta Q''R'' da Figura 2.15c) e estabelecido dividindo-se a força por um determinado ponto de deformação específico da reta.

Figura 2.15 – Definição dos módulos de rigidez: (a) inicial; (b) deslocado; (c) secante



Fonte: adaptado de ASTM, 2017.

2.4 Solicitações mecânicas e deformações

2.4.1 Forma dos tubos geotêxteis

De acordo com Lawson (2008), as deformações em estruturas de tubos geotêxteis podem ocorrer devido à deformação da fundação abaixo do tubo ou do material contido nele. A primeira situação ocorre por causa das características de compressibilidade do material de fundação, enquanto as deformações da segunda situação podem ser devidas aos seguintes fatores:

- Preenchimento incompleto do tubo geotêxtil;
- Liquefação do material contido;
- Adensamento do material contido;
- Contínua deformação do geossintético ao longo do tempo.

Durante o processo de enchimento e desaguamento, vários outros fatores também contribuem para que ocorram deformações e variações na forma do tubo, podendo ser citados o peso específico do material de preenchimento, a pressão de enchimento, a quantidade de material no interior do tubo e o adensamento. Essas características fazem com que o sistema adquira diferentes formas para o tubo durante e após enchimento.

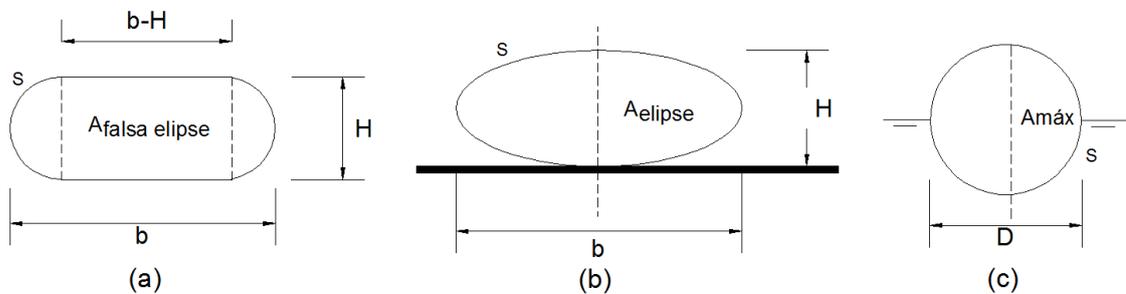
Para se quantificar os parâmetros geométricos da seção dos tubos geossintéticos, diversos autores apresentam suas formulações matemáticas (Leshchinsky e Leshchinsky, 1996; Pilarczyk, 2000; Lawson, 2008) e métodos analíticos complexos. Uma vez que a forma do tubo geossintético está diretamente ligada às tensões geradas, os métodos que descrevem as tensões atuantes no geossintético em conjunto com a geometria serão apresentados no item subsequente.

A forma da seção transversal do tubo geotêxtil, quando cheio, é considerada com frequência nos formatos elíptico, falsa elipse (ou elipse achatada) e retangular. Pilarczyk, (2000) afirma que, dificilmente, a seção assume a forma circular. Isso, porque materiais mais deformáveis, provavelmente, tendem a formas que se aproximam da falsa elipse, enquanto materiais mais finos, com adensamento lento propendem a assumir uma forma mais achatada.

Tubos grandes com baixas taxas de enchimento tendem a ser mais retangulares. A Figura 2.16 apresenta as possíveis formas descritas acima.

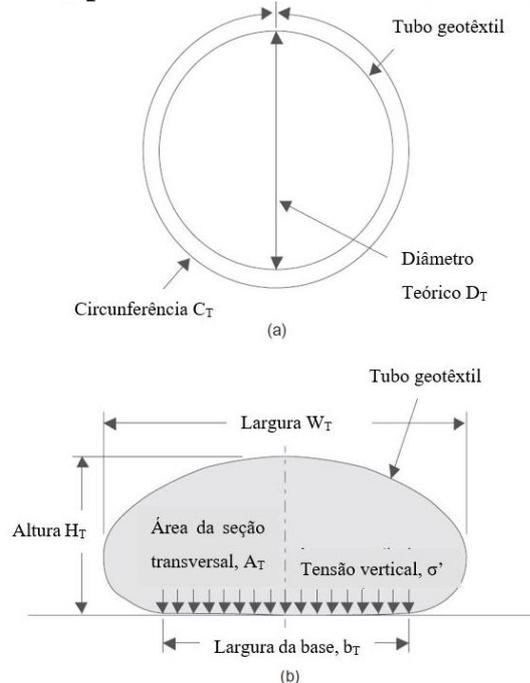
A concepção da forma da seção transversal do tubo é apresentada na literatura, geralmente, em função da altura (H) e da largura (W ou B) do tubo. Outra maneira comumente encontrada é indicando as relações entre a seção transversal e a área do elemento considerado. Na Europa, Oriente Médio e Ásia essas relações apresentam-se em função do diâmetro teórico “ D ”, ao passo que na América do Norte e do Sul, mostram-se de acordo com a circunferência “ C ” (Lawson, 2006), conforme Figura 2.17.

Figura 2.16: Formas da seção transversal do tubo: falsa elipse (a), elipse perfeita (b) e seção circular de máximo enchimento (c)



Fonte: adaptado de PILARZICK, 2000.

Figura 2.17: Vários parâmetros associados com os tubos geotêxteis



Fonte: Lawson, 2008

Outra suposição existente é apresentada por Lawson (2008), conforme a **Tabela 2.2**, a qual são mostradas as relações entre os parâmetros fundamentais para tubos geotêxteis indicados na **Figura 2.17a** e os parâmetros de engenharia importantes para estes tubos mostrados na **Figura 2.17b**.

Tabela 2.2: Relação aproximada dos parâmetros de engenharia e geométricos dos tubos geotêxteis

| Parâmetros de engenharia | Relação em termos do diâmetro teórico D | Relação em termos do perímetro S |
|---|---|----------------------------------|
| Altura máxima do tubo preenchido, H | $H \approx 0,55D$ | $H \approx 0,18S$ |
| Largura do tubo preenchido, W | $W \approx 1,5 D$ | $W \approx 0,5S$ |
| Base de contato, B | $B \approx D$ | $B \approx 0,3S$ |
| Área da seção transversal, A | $A \approx 0,6 D^2$ | $A \approx 0,06 S^2$ |
| Tensão vertical média na base σ'_v | $\sigma'_v \approx 0,7\gamma D$ | $\sigma'_v \approx 0,22\gamma S$ |

σ'_v = tensão vertical efetiva (kPa);

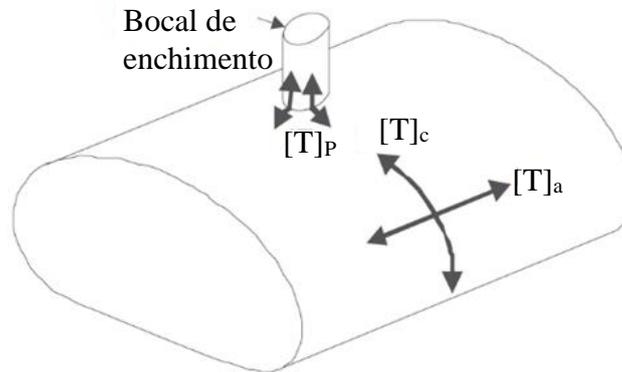
γ = peso específico do material (kN/m²).

Fonte: adaptado de Lawson, 2008.

2.4.2 Tensões geradas aos tubos geotêxteis

Quando o processo de bombeamento de material é iniciado, ao longo do enchimento do tubo geotêxtil são geradas tensões na superfície do geotêxtil na direção circunferencial [T]_c, no sentido axial do tubo [T]_a e no bocal de enchimento [T]_p (LAWSON, 2008), estas são mostradas na **Figura 2.18**. Para o caso de fundação deformável, maiores tensões circunferenciais são geradas. Caso a estrutura esteja submetida a solicitações, as tensões circunferenciais tendem a ser menores (PLAUT E SUHERMAN, 1998).

Figura 2.18: Localização das tensões geradas em tubos geotêxteis ([T]_c: Tensão circunferencial, [T]_a: Tensão axial e [T]_p: Tensão no bocal de enchimento)

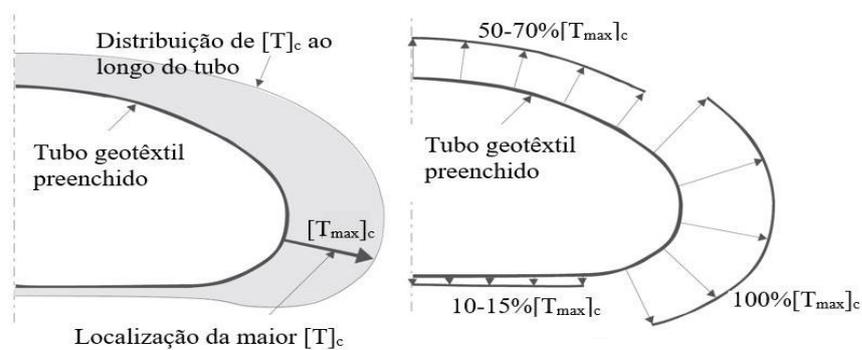


Fonte: Lawson, 2008.

Para Lawson (2008), a magnitude da tensão circunferencial, ao longo da superfície de um tubo geotêxtil preenchido, é função da curvatura do geotêxtil com a maior tensão $[T_{\max}]_c$ coincidindo com o local da maior curvatura. Isso ocorre nos lados do tubo preenchido, como ilustrado na **Figura 2.19a**. Ao redor do restante do tubo, a tensão circunferencial é menor, especialmente na base em contato com a fundação, onde a tensão circunferencial é baixa, uma vez que nesse local a superfície é horizontal.

Ainda conforme Lawson (2008), a **Figura 2.19b** mostra, aproximadamente, a distribuição da tensão circunferencial ao longo do tubo geotêxtil expressa em termos de porcentagem da máxima tensão circunferencial $[T_{\max}]_c$. Ao se dimensionar um tubo geotêxtil, é importante observar a magnitude dessa tensão, bem como o seu local de atuação, tendo em vista a existência de costuras na manta de geossintético.

Figura 2.19 – (a) Distribuição da tensão circunferencial ao redor do tubo geotêxtil preenchido (b) tensão circunferencial aproximada em termos de $[T_{\max}]_c$

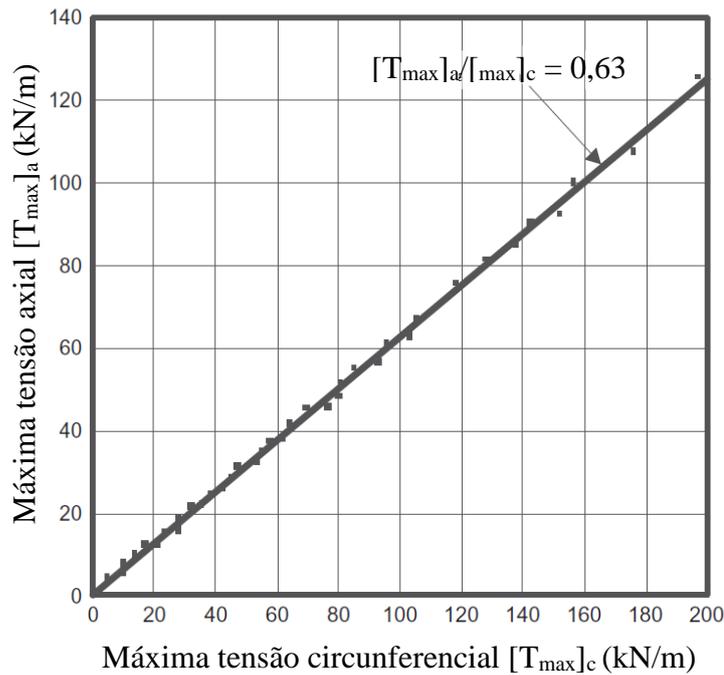


Fonte: adaptado de Lawson, 2008.

A tensão axial gerada ao longo do comprimento do tubo é também função da pressão de enchimento e da altura deste. A **Figura 2.20** mostra a máxima tensão axial $[T_{\max}]_a$ relacionada à tensão circunferencial $[T_{\max}]_c$, utilizando o processo de Palmerton (2002).

Segundo o mesmo autor, uma relação de $[T_{\max}]_a = 0,63 [T_{\max}]_c$ é um bom ajuste para essa relação.

Figura 2.20 – Máxima tensão axial no tubo geotêxtil



Fonte: Palmerton, 2002.

O processo de determinação preciso das tensões atuantes no geotêxtil é complexo devido ao efeito da geometria do tubo e das propriedades do material de preenchimento, que variam com o tempo (Lawson, 2008). Para essa determinação, são assumidas diferentes hipóteses por diversos autores, como (Liu, 1981; Plaut e Suherman, 1998; Kazimierowicz, 1994; Leshchinsky e Leshchinsky, 1996 e Palmerton, 2002; Guo *et al.*, 2014), que criaram métodos analíticos para a determinação das tensões e geometria do tubo geossintético. Geralmente, são utilizadas a teoria das membranas e a mecânica do contínuo nas formulações.

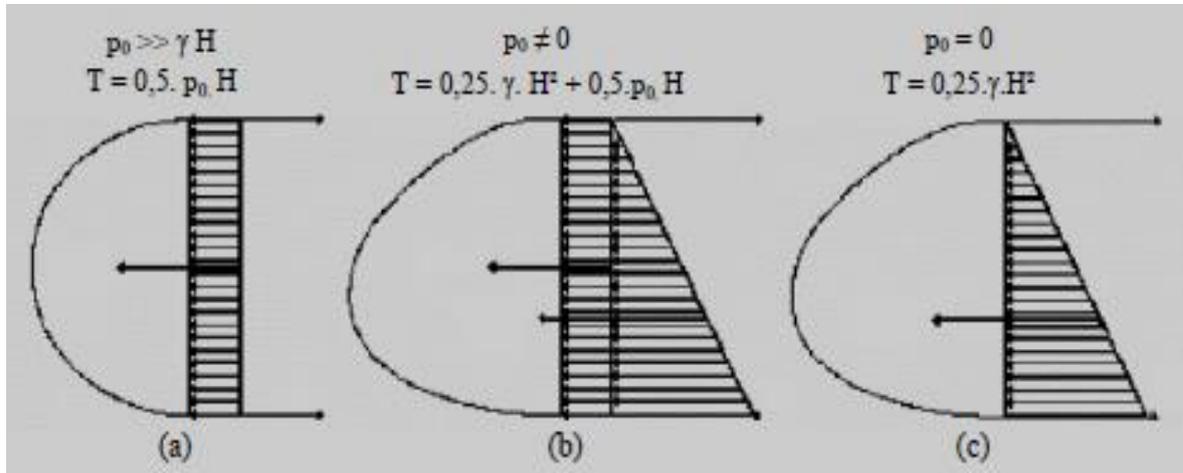
Em relação ao atrito entre a estrutura e a fundação, Saathoff *et al.* (2007) afirmam que, na prática, ele conduz a uma redução nas tensões ao longo da porção do geotêxtil em contato com o solo.

Além disso, Kazimierowicz (1994) descreve que, para o dimensionamento de estruturas com tubos geotêxteis, é necessário um bom conhecimento das forças atuantes no material, assim como, a forma da seção transversal do tubo. Dessa maneira, o autor desenvolveu metodologia para determinação dessas variáveis, trabalhando com uma análise simples da deformação de uma casca cilíndrica preenchida por um material de peso específico conhecido. Para esse caso, as tensões geradas no geotêxtil são dependentes da altura do tubo e da pressão hidrostática atuante. A seguir são descritas as premissas consideradas:

- Existe apenas estado de tensão na membrana do geossintético;
- É considerado estado plano de deformação;
- Não há carregamentos concentrados atuando na estrutura;
- O peso do geossintético é desprezível;
- O tubo é preenchido com um material de peso específico conhecido;
- Não há atrito entre o tubo geossintético e a fundação.

Segundo o autor, para a determinação da tensão gerada no tubo geotêxtil, três casos são propostos a partir da pressão interna: **caso A**, o qual a pressão de enchimento é muito maior que a relação peso específico e altura, ou seja, o peso do material não é significativo frente à solicitação; **caso B**, o qual a tensão atuante é dependente da pressão de enchimento e do peso do material; e **caso C**, o qual a tensão atuante é dependente apenas do peso do material e o tubo é plenamente preenchido. Os três casos são ilustrados na **Figura 2.21**.

Figura 2.21 - Análise das tensões geradas. (a) tensão gerada dependente da pressão de enchimento; (b) tensão gerada dependente da pressão de enchimento e do peso específico do material; (c) tensão gerada dependente do peso específico do material



Fonte: adaptado de Kazimierowicz, 1994.

p_0 = pressão de enchimento
 T = Força aplicada no geossintético

Para o caso A, a forma tende a ser circular, uma vez que não há influência do peso específico do material, enquanto que, para os outros dois casos, a forma tende a ser mais achatada. Para todos os cenários, a tensão é considerada constante ao longo do geossintético, porque a tensão não depende da curvatura.

Leshchinsky e Leshchinsky (1996) apresentam, além da estimativa da variação da altura do tubo devido ao adensamento citada anteriormente, uma equação diferencial não linear, que deve ser resolvida numericamente para determinar a geometria do tubo. A formulação para um tubo geossintético preenchido por material com alto teor de umidade é baseada no equilíbrio de uma casca flexível e sua solução resulta nas tensões circunferenciais e geometria da seção transversal do tubo. Essa formulação é citada também em outros artigos (Liu, 1981; Kazimierowicz, 1994; Carrol, 1994). São assumidas as seguintes premissas:

- O problema é bidimensional (estado plano de deformação), ou seja, o comprimento do tubo é longo o suficiente, para que a seção central seja representativa do todo;
- A perda de pressão devido à drenagem durante o enchimento é ignorada; pois a pressão de enchimento é a base da análise;
- O geossintético é uma casca fina, flexível e possui peso desprezível;

- O material de enchimento é um fluido o qual se considera a pressão hidrostática atuando internamente;
- Não há tensão cisalhante entre o material e o geossintético.

A Figura 2.22 apresenta a geometria e os parâmetros do tubo considerados na análise, os quais “h” é a altura do tubo no eixo central, “W” é a largura máxima, “b” é a largura em contato com a fundação, “p₀” é a pressão de enchimento e “γ” o peso específico médio do material. O tubo é considerado preenchido somente com um material e a pressão hidrostática no ponto O é $p(x) = p_0 + \gamma x$.

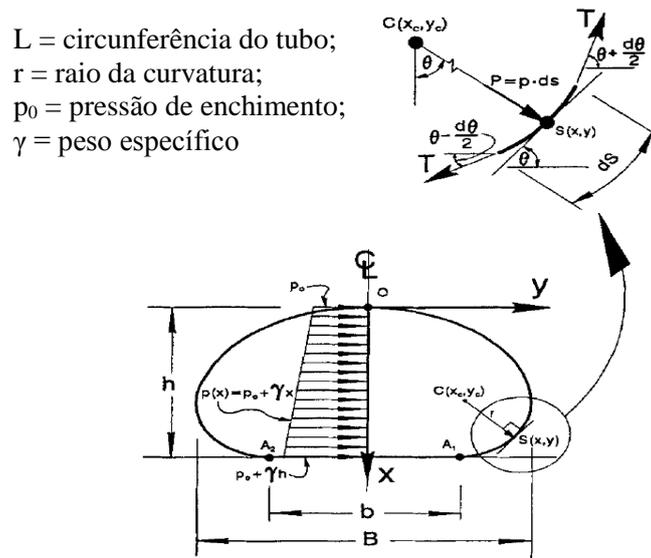
A geometria do tubo geossintético é definida a partir de uma função dependente de:

$$y = f(x | T, p_0, h, \gamma) \quad \text{Equação (2.4)}$$

Em que,

- T = tensão circunferencial (kN/m);
- p₀ = pressão de enchimento (kPa);
- h = altura da tubo (m);
- γ = peso específico do material (kN/m³).

Figura 2.22 – Vista da seção transversal do tubo geossintético – convenções e notações



Fonte: adaptado de Leshchinsky e Leshchinsky, 1996.

A geometria da “casca” é definida, então, mediante um ponto S (x, y) com raio de curvatura “r”. O centro da curvatura é C (x_c, y_c) e tanto o valor “r” quanto o de “C” variam em função de y (x). Considera-se que as forças atuam num arco de comprimento infinitesimal “ds” no geossintético em S, conforme Figura 2.22. Assumindo que o problema é 2D e não há tensão cisalhante entre o material de preenchimento e o geotêxtil, a tensão T é constante ao longo da circunferência. Ao combinar as equações de equilíbrio de força, tanto na direção x quanto na direção y, tem-se a relação seguinte:

$$r(x) = T / p(x) \quad \text{Equação (2.5)}$$

Em que,

$$p(x) = p_0 + \gamma x;$$

T = Tensão axial

A Equação (2.5) é válida para qualquer ponto ao longo de A1OA2. Para simplificar a análise, é assumido que o valor de T, calculado na Equação (2.5), é suportado apenas pelo geossintético e nenhuma porção dessa variável é transferida para a fundação. Contando ainda com a definição de p(x), o autor chega na equação diferencial não linear a seguir:

$$Ty'' - (P_0 + \gamma x)[1 + (y')^2]^{3/2} = 0 \quad \text{Equação (2.6)}$$

Onde:

$$y' = \frac{dy}{dx}$$

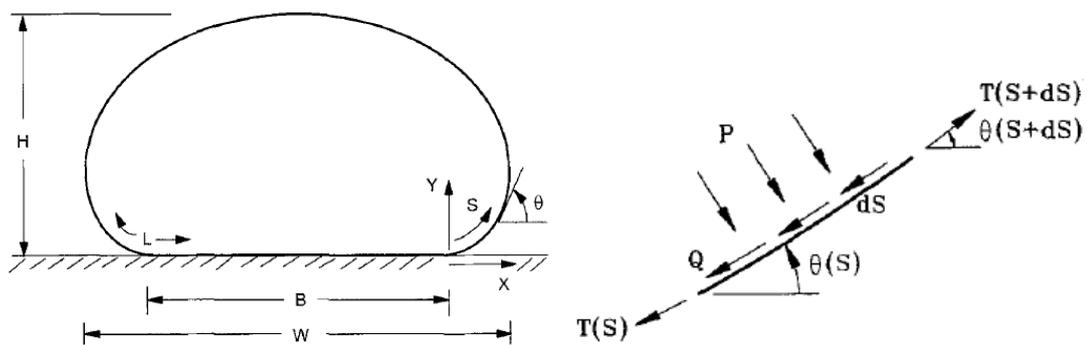
$$y'' = \frac{d^2y}{dx^2}$$

Essa solução relaciona a geometria do tubo y(x), a tensão circunferencial T, a pressão de enchimento p₀, o peso específico do material γ e a altura do tubo h. Desde que uma das variáveis seja conhecida (geralmente γ e p₀), as outras incógnitas podem ser determinadas. Plaut e Suherman (1998) também apresentam metodologia para a determinação geometria em conjunto das tensões geradas no geossintético. As premissas assumidas pelos autores são descritas a seguir:

- O geossintético é inextensível e de peso desprezível;
- O tubo geossintético está apoiado em uma fundação rígida;
- O tubo geossintético está submetido a uma pressão hidrostática interna;
- O tubo é longo o suficiente, para que a análise seja bidimensional, representativa de toda a estrutura.

Com base na seção transversal apresentada na **Figura 2.23a**, um elemento infinitesimal de S a $S + dS$ na faixa de $0 < S < L - B$ é mostrado na **Figura 2.23b**. O arco da elipse é S , a pressão interna é P , a força tangencial por área é Q e a tensão circunferencial por largura perpendicular à seção transversal é T_c . Os parâmetros geométricos apresentados são: altura (H), distância entre os vértices (W), perímetro da elipse (L), largura do contato do tubo com a fundação (B), coordenada horizontal (X), coordenada vertical (Y), ângulo de inclinação entre a horizontal e tangente do tubo (θ).

Figura 2.23 – (a) Seção transversal do tubo geossintético em fundação rígida; (b) elemento infinitesimal do tubo geossintético



Fonte: Plaut e Suherman, 1998.

O equilíbrio de forças nas direções normal (Equação (2.7)) e tangencial (Equação (2.8)) leva a:

$$P = T \frac{d\theta}{dS} \quad \text{Equação (2.7)}$$

$$Q = \frac{dT}{dS} \quad \text{Equação (2.8)}$$

Ademais, a partir de considerações geométricas tem-se:

$$\frac{dX}{dS} = \cos\theta \quad \text{Equação (2.9)}$$

$$\frac{dY}{dS} = \sin\theta \quad \text{Equação (2.10)}$$

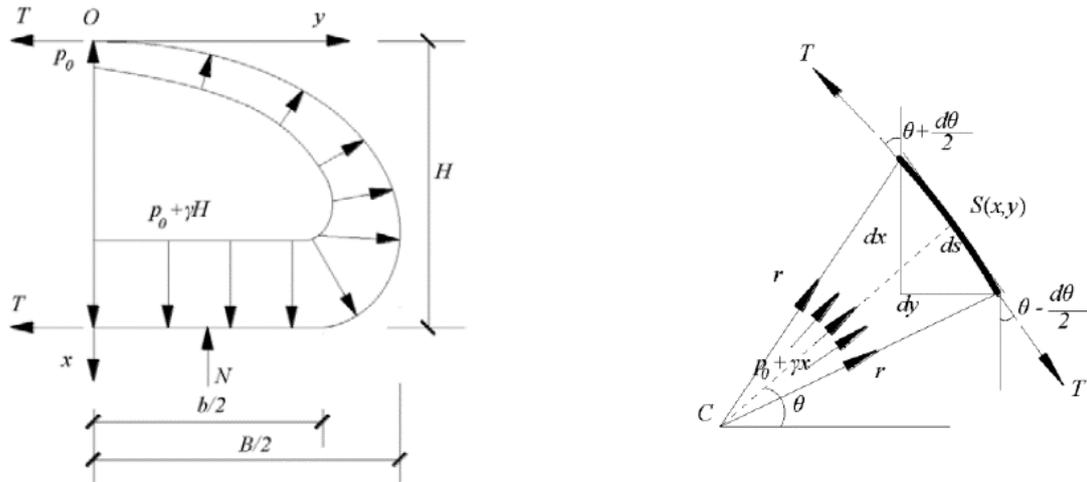
A partir da resolução de equações por meio de integrais elípticas, é possível determinar a geometria da seção transversal, bem como a tensão da circunferência do tubo geossintético. O detalhamento da solução desse método analítico será apresentado no item de metodologia dessa dissertação.

Guo (2012) e Guo *et al.* (2014) apresentam solução analítica para determinar a tensão e a forma da seção transversal de um tubo geossintético. As premissas adotadas, descritas a seguir, foram obtidas por meio da derivação de soluções fechadas:

- O geossintético é suficientemente longo, para que seja considerado um problema de estado plano de deformação (2D);
- O geossintético é uma casca fina e flexível, a qual o peso próprio e sua extensão pode ser desprezada;
- O atrito entre o material, o geossintético, a fundação e o geossintético são desprezados;
- A tensão ao longo do geossintético é constante;
- O material é preenchido somente com um material e não há esforços externos atuando na estrutura.

Assim como em outras soluções descritas, por simplificação, apenas metade da seção do tubo geossintético é apresentado conforme **Figura 2.24a**. Considera-se o tubo preenchido com apenas um material de peso específico γ . A coordenada x está na direção vertical e a coordenada y está na direção horizontal. O tubo possui largura B , altura H e contato com a fundação b . A tensão circunferencial ao longo do tubo geotêxtil é T . Uma curva infinitesimal de comprimento ds no ponto $S(x,y)$ pode ser tratada como um arco com o centro no ponto aleatório C e raio r , conforme é mostrado na **Figura 2.24b**.

Figura 2.24 – (a) Diagrama para metade da seção; (b) diagrama para ponto infinitesimal



Fonte: Guo, 2014.

Um diagrama de corpo livre partindo do ponto O para o ponto $S(x,y)$ da seção transversal é utilizado para o equilíbrio de forças apresentado na **Figura 2.24b**. O ângulo entre a tangente do ponto $S(x,y)$ e o eixo x é denominado θ . A pressão hidrostática, atuando internamente no ponto $S(x,y)$, é $p_0 + \gamma x$, onde p_0 é a pressão de enchimento.

Ao se realizar o equilíbrio de forças atuando na direção horizontal, envolvendo a pressão hidrostática e as tensões indicadas na Figura 2.24a, encontram-se as expressões apresentadas na Equação (2.11) e na Equação (2.12). Pode ser observado que a tensão gerada no tubo geossintético é relacionada com a altura da seção transversal, a pressão de enchimento e o peso específico do material de preenchimento.

$$T = (p_0 H + \frac{1}{2} \gamma H^2) / 2 \quad \text{Equação (2.11)}$$

$$T - T \sin \theta = \int_0^S (p_0 + \gamma x) ds \sin \theta = \int_0^S (p_0 + \gamma x) dx = p_0 x + \frac{1}{2} \gamma x^2 \quad \text{Equação (2.12)}$$

A partir da solução dessas equações, a tensão, assim como a geometria da seção transversal do tubo geossintético, podem ser determinadas. O detalhamento da solução desse método analítico será apresentada no item de metodologia desta dissertação.

2.4.3 Avaliação dos Métodos Analíticos

Dentre os métodos analíticos apresentados, observa-se, a partir dos dados de referência bibliográfica, que estes são representativos da seção transversal do tubo geossintético, ou seja, a análise é realizada bidimensionalmente (2D). Ademais, devido à complexidade do processo de desaguamento, para simplificação, as análises consideram o geossintético como impermeável, o material como um fluido e a perda de pressão, por causa da drenagem durante o enchimento, não é considerada.

Em relação ao equilíbrio de forças e tensões geradas, conclui-se que os métodos analíticos desprezam o atrito entre material, geossintético, fundação e geossintético para facilitar os cálculos, sendo a tensão atuante constante ao longo de toda a superfície do tubo. A pressão interna ocorre devido ao peso específico do material, hidrostática, sendo considerada a existência de apenas um tipo de material. Ademais, não são levados em conta esforços externos na estrutura. O geossintético tem peso próprio desconsiderado e não se deforma.

Uma vez que o formato geométrico da seção transversal do tubo depende da pressão de enchimento, peso específico do material e altura alcançada, a resolução das equações é iterativa e solucionada por meio da criação de uma rotina, a qual uma variação da pressão, em um determinado ponto do geossintético, faz com que esse ponto desloque-se até que o equilíbrio seja alcançado.

Dentre as vantagens e limitações observadas dos métodos analíticos, destacam-se as apresentadas na **Tabela 2.3**:

Tabela 2.3 – Vantagens e limitações dos métodos analíticos

| Vantagens | Limitações |
|--|--|
| Aplicação simples. | O atrito entre o geossintético, material e fundação é desprezado. |
| Ideal para avaliação preliminar do projeto. | Considera-se tensão constante ao longo de toda a superfície do geossintético. |
| Curto tempo de resolução se comparado à modelagem numérica. | Não se considera o desaguamento durante o processo de enchimento do tubo geossintético. |
| Bons resultados são obtidos quando comparados a casos reais. | Não simula o processo de adensamento durante o procedimento de enchimento do tubo geossintético. |

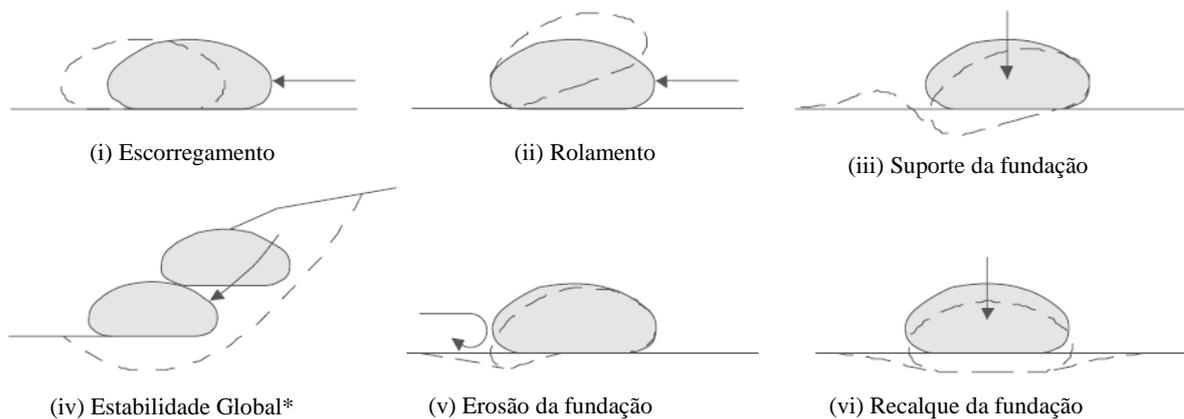
| | |
|--|---|
| Como simplificação, podem ser utilizados para geossintéticos permeáveis. | Necessidade de resolução de equações complexas. |
| Podem ser utilizados quando não há um software complexo para dimensionamento preliminar. | |

2.4.4 Estados Limites de Projeto

Para avaliação de modos de falha possíveis para os tubos geotêxteis, nota-se que estes funcionam como uma unidade de massa gravitacional. Lawson (2008) apresenta vários modos de ruptura que devem ser analisados e que podem ser divididos em: a) modos de falha externos, que afetam o desempenho da estrutura do tubo geotêxtil como um todo; e b) modos de falha internos, que interferem no desempenho da estrutura de cada tubo geotêxtil. Na Figura 2.25 e na Figura 2.26, são apresentados os modos de falha externos e internos. Um fator de segurança global ou parcial pode ser aplicado na avaliação da ruptura.

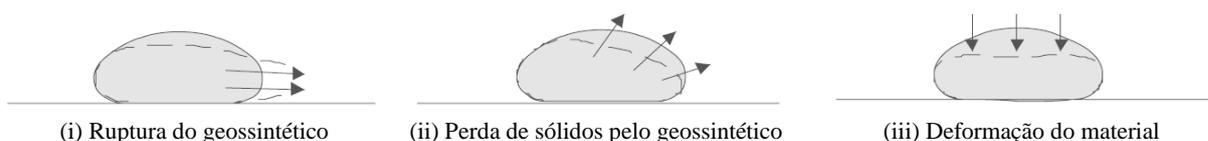
Os tubos são considerados estruturas estáveis, quanto ao escorregamento e ao rolamento, Figura 2.25 (i) e (ii), quando a relação entre a base de contato e a altura é aproximadamente 1,5 ($B/H \approx 1,5$). Já, quando o diâmetro teórico é $D < 2m$ devem ser avaliadas a estabilidade, o escorregamento e rolamento (Lawson, 2008).

Figura 2.25 – Modos de falha de tubos geotêxteis (externo)



Fonte: adaptado de Lawson, 2008.

Figura 2.26 – Modos de falha de tubos geotêxteis (interno)

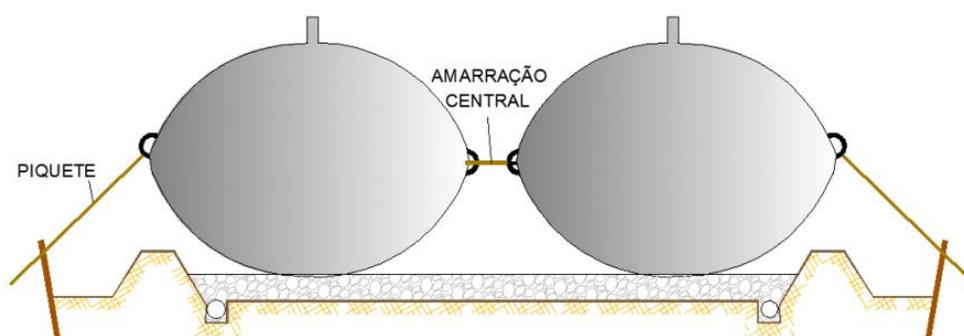


Fonte: adaptado de Lawson, 2008.

Os modos de falha de escorregamento e rolamento foram descritos por Freitas Silva (2017), sendo observada a instabilização de um tubo empilhado ao se iniciar o preenchimento com rejeitos de mineração de ouro. Nesse caso, o tubo possuía diâmetro teórico igual a $D = 1,4$ m. Como solução, o bombeamento foi paralisado, aguardado o desaguamento, e ajustes na superfície foram realizados para minimizar os efeitos de esforços resultantes no tubo.

Vertematti (2015) apresenta ações que podem combater o rolamento dos tubos, como fixação entre os próprios tubos geotêxteis por meio de piquetes e amarrações (**Figura 2.27**). Wilke (2015) indica que, para a camada final de um empilhamento de tubos, é indicado que o tubo geotêxtil possua dimensões menores a fim de se evitar o escorregamento.

Figura 2.27 – Ações para controle do deslizamento



Fonte: Freitas Silva, 2017.

No caso de solos moles e compressíveis, a capacidade de suporte e adensamento da fundação (**Figura 2.25** (iii) e (vi)) devem ser avaliadas para se verificar esse efeito no desempenho do sistema de disposição. Recalques diferenciais podem instabilizar a estrutura levando-a ao colapso.

A erosão sob os tubos geotêxteis (**Figura 2.25** (iv)) pode ocorrer durante o enchimento e desaguamento, uma vez que uma grande quantidade de água é expulsa deste, podendo causar o rolamento e instabilização da estrutura. No caso de empilhamento de bolsas, também é necessário o estudo da estabilidade global, conforme a **Figura 2.25** (v).

Em relação aos modos de falha internos, devem ser observadas as tensões atuantes no geotêxtil **Figura 2.26** (i)), levando em consideração as solicitações que acontecem durante e após operação, detalhadas no item 2.4.2, para a escolha do material.

Durante o processo de dimensionamento do geotêxtil, as propriedades hidráulicas são estudadas seguindo critérios de filtração, drenagem, permeabilidade e colmatção. Caso o critério de filtração não esteja adequado, ocorrerá falha do sistema devido à passagem do material pelas aberturas do geossintético, conforme indica a **Figura 2.26**(ii).

A deformação do material de preenchimento, indicada na **Figura 2.26**(iii), ocorre principalmente devido ao preenchimento incompleto do tubo, ao processo de adensamento do material contido e à contínua deformação do geossintético ao longo do tempo.

2.5 Princípios de filtração e desaguamento em tubos geotêxteis.

Materiais e resíduos que possuem um alto teor de umidade, partículas orgânicas e contaminantes obtiveram sucesso no desaguamento utilizando tubos geotêxteis, reduzindo consideravelmente o teor de umidade dos materiais (Castro, 2005; Martin, 2006; Freitas Silva, 2017). Tratando-se de lamas e rejeitos finos de mineração, os quais a quantidade de água é elevada, é comum especificar o componente de sólidos da lama em termos de teor de sólidos, uma vez que, nessa condição, valores de teor de umidade superiores a 2000% são encontrados.

Para tanto, quando o volume de água é grande em relação ao volume de sólidos, é comum mensurar essa concentração em termos de teor de sólidos gravimétricos e teor de sólidos volumétricos. O teor de sólidos gravimétrico (C_w ou S) expressa a relação entre a massa de sólidos e a massa total de lama, ou rejeitos, em termos percentuais (Equação (2.13)). Outra forma de representar essa grandeza está relacionada ao teor de umidade, indicado na mesma equação. Para este trabalho, o conceito em relação ao peso, ou seja, teor de sólidos gravimétrico, será utilizado.

$$Cw \text{ ou } S = \frac{M_S}{M_T} 100\% = \frac{1}{1 + w} \quad \text{Equação (2.13)}$$

Em que,

M_S = Massa total de sólidos (g);

M_T = Massa total do rejeito (g);

w = teor de umidade (%).

O teor de sólidos volumétrico (C_v) expressa a relação entre o volume de sólidos presentes na massa e o volume total desta massa, em termos percentuais (Equação (2.14)).

$$Cv \text{ ou } C = \frac{V_S}{V_T} 100\% \quad \text{Equação (2.14)}$$

Em que,

V_S = Volume total de sólidos (m³);

V_T = Volume total do rejeito (m³);

Quando aplicado na função de filtração, o geossintético deve drenar o fluido pelos vazios da estrutura e reter as partículas sólidas do lado interno. Vários trabalhos já foram elaborados em relação aos critérios de filtração (Giroud, 1982; CFGG, 1986; LaFleur *et al.*, 1992; LaFleur *et al.*, 1996). Conforme dito anteriormente, três critérios primários são considerado no projeto de filtros geotêxteis, sendo eles a retenção, permeabilidade e colmatação.

Basicamente, a maioria dos critérios de filtro são baseados na relação entre a distribuição granulométrica do solo e a estrutura dos poros do geotêxtil, geralmente, originadas de critérios de filtros granulares com certas modificações. Entretanto, existem diferenças quando se compara o uso de geotêxteis em critérios de filtro e uso deste em tubos para aplicações em desaguamento (Moo-Young *et al.*, 2002; Maurer, 2009; Cantré e Saathoff, 2011b).

Em razão da pressão de enchimento durante a disposição hidráulica no tubo geotêxtil, um estado de pressão de filtração existe, pelo menos temporariamente. Sendo assim, permeabilidade é o critério dominante e deve ser suficiente para não ocorrer excesso de poropressão do lado interno do tubo, ao contrário do que acontece em filtros geotêxteis, em que o critério de retenção é dominante em relação ao de permeabilidade, uma vez que não há o desenvolvimento do excesso de poropressão devido à pressão de enchimento (Maurer, 2009).

Para esses casos, a eficiência de filtração pode ser utilizada como um índice para a capacidade de retenção do solo, enquanto a eficiência de desaguamento é um bom indicador para a capacidade de desaguamento (Moo-Young *et al.*, 2002).

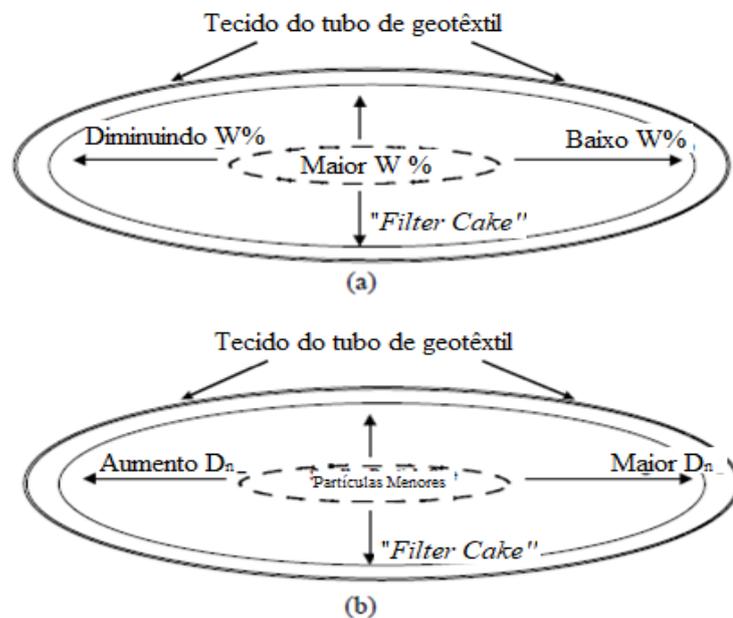
2.5.1 Formação do “Filter Cake”

O *filter cake* é uma camada de material que se forma próximo ao geossintético, ficando praticamente impermeável. À medida que uma lama com alto teor de umidade e material suspenso é bombeada para dentro do tubo geotêxtil, o *filter cake* pode ser formado devido à segregação, ao deslocamento e à compressão das partículas (Cantré e Saathoff, 2011). Embora a abertura de filtração possa afetar a perda inicial de partículas (Grzelak *et al.*, 2011), a formação do *filter cake* controla o desempenho do tubo na sequência.

Segundo Moo-Young *et al.* (2002) e Castro (2005,) a quantidade de sólidos em suspensão durante a filtração ou TSS (*Total Suspended Solids*) é alta no início do processo, mas diminui, sensivelmente, assim que se forma o *filter cake*. Sendo assim, a experiência mostra que, no processo de desaguamento, a perda inicial de finos através do geossintético para rapidamente e a água drenada torna-se mais limpa. Depois de formado, o *filter cake* governa o efeito da filtração, e o geotêxtil age como uma camada de suporte (Cantré e Saathoff, 2011). Além disso, Grzelak (2009) conclui que entender o processo de sedimentação e estrutura do *filter cake* são críticos para o desempenho do desaguamento.

A Figura 2.28 esquematiza como ocorre a variação do teor de umidade e distribuição das partículas no interior de um tubo geotêxtil. Como pode ser observado, o tamanho das partículas (D_n) aumenta e o teor de umidade (W) diminui em função da distância a partir do centro do tubo para o seu exterior (Gaffney *at. Al*, 1999, Moo-Young *et al.*, 2002).

Figura 2.28 – (a) variação do teor de umidade no tubo geotêxtil; (b) distribuição das partículas no tubo geotêxtil



Fonte: adaptado de Moo-Young *et al.*, 2002.

2.6 Modelagem numérica

A modelagem numérica é uma simulação matemática de um processo físico real cujo objetivo principal é encontrar soluções aproximadas para problemas complexos, utilizando ferramentas numéricas e computacionais. Esta tem capacidade de resolver simultaneamente equações altamente não lineares, as quais o cálculo à mão é inviável. Ademais, é possível resolver problemas complexos e prever o comportamento do que está sendo estudado.

Nesse sentido, será apresentado, neste item, uma breve revisão das modelagens numéricas existentes que simularam tubos geossintéticos, apontando vantagens, limitações e uma avaliação geral dos estudos.

2.6.1 Modelagem Numérica em tubos geotêxteis

Neste item, serão descritos alguns estudos realizados com a utilização de modelagem numérica em tubos geotêxteis. Ademais, apresentar-se-à as dificuldades e limitações dos modelos desenvolvidos e os principais resultados obtidos.

2.6.1.1 Modelagens numéricas existentes

Estudos com modelagem numéricas em tubos geotêxteis vêm sendo realizados adotando-se premissas e simplificações nos modelos, de modo a tornar possível a representação do comportamento. Brink (2014) diz que a modelagem numérica auxilia, com precisão, na previsão do comportamento do tubo geossintético em termos de projeto, sendo uma ferramenta importante no dimensionamento de estruturas.

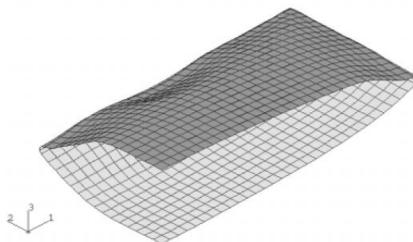
Os trabalhos existentes estão diretamente relacionados à geometria da seção transversal e distribuição de tensões no tubo geossintético. Alguns programas comerciais, como o ABAQUS, FLAC, PLAXIS e Phase2/RS2, vêm sendo utilizados para esse tipo de estudo. O software ABAQUS, por exemplo, foi utilizado para modelagem 3D quanto para modelagem 2D. Já os demais, foram utilizados para modelagem 2D.

Na sequência, são descritos, resumidamente, os trabalhos já desenvolvidos para modelagem numérica em tubos geotêxteis.

Seay (1998) estudou o comportamento dos tubos geotêxteis por meio do software de elementos finitos ABAQUS. No referente trabalho, foram investigadas duas geometrias distintas dos tubos em três dimensões (3D) sobre fundações elásticas com diferentes módulos de rigidez. As análises foram do tipo não linear, permitindo grandes deslocamentos e grandes deformações, além de possibilitar a compreensão do comportamento do tubo durante toda a fase de enchimento.

Para simulação da fundação elástica, utilizou-se o elemento de mola (SPRING1) com diferentes constantes elásticas, enquanto para o geossintético, usou-se o elemento de casca (S4R). O carregamento foi feito a partir de uma forma inicial plana e por meio de incrementos de pressão hidrostática até que fosse alcançado o equilíbrio do sistema com a pressão desejada. A **Figura 2.29** ilustra o modelo desenvolvido pela autora.

Figura 2.29 - Exemplo de configuração 3D obtida



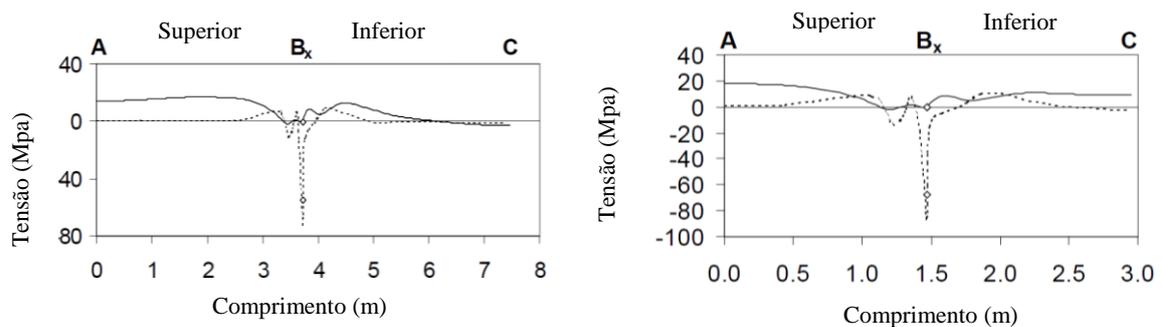
Fonte: (Seay, 1998).

As principais premissas utilizadas para o tubo geotêxtil foram: o geossintético é um material impermeável, o modelo é simétrico nas duas direções principais, o peso específico da lama é 50% maior do que o da água, a mola possui rigidez constante e funciona apenas à compressão.

O geossintético simulado para representar o tubo possui 3 mm de espessura, comportamento linear elástico com módulo de Young igual a 7,0346 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,45 e densidade de 75,0 kg/m³.

Os principais resultados obtidos nesse trabalho foram o formato tridimensional do tubo, o contato entre este e a fundação elástica, as tensões na superfície ao longo do eixo do geossintético (**Figura 2.30**) e a relação linear entre a altura final do tubo e a pressão aplicada.

Figura 2.30 – Tensões ao longo dos eixos do tubo geossintético

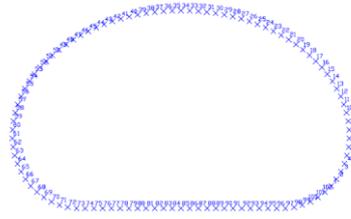


Fonte: Seay,1998.

Houng (2001) utilizou o software de diferenças finitas Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) para modelar, em duas dimensões (2D), a aplicabilidade de tubos geotêxteis em proteção contra enchentes. Para a análise, foi avaliado um tubo sobre um solo argiloso e sobre um solo arenoso.

A geomembrana do tubo simulado foi representada por elementos de barra cujo comportamento tensão x deformação obedecia à lei de Hooke, ou seja, linear elástico. A pressão hidrostática da água foi considerada constante e aplicada nos nós dos elementos de barra do tubo. Além disso, foram testados distintos módulos de elasticidade e espessuras. A **Figura 2.31** apresenta a geometria desenvolvida pelo autor para as análises.

Figura 2.31 - Representação dos nós do tubo modelado



Fonte: Hounng, 2001.

Como resultado, o autor verificou a aplicabilidade da estrutura para proteção de enchentes. Em relação ao tubo geossintético, observou-se que as tensões geradas neste sobre uma fundação mais flexível são superiores às geradas em relação a uma fundação rígida.

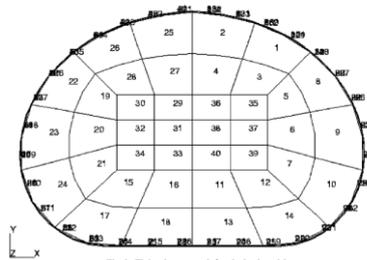
Assim como Seay (1998), Cantré (2002) utilizou o software de elementos finitos ABAQUS para simular o comportamento dos tubos geotêxteis em duas dimensões (2D) sob condições de carregamento e desaguamento. Dois modelos foram apresentados no trabalho: o primeiro simulou o empilhamento dos tubos, enquanto o segundo simulou o adensamento após determinada condição de carregamento inicial.

Para o primeiro modelo de empilhamento (3-2-1), as propriedades do material de enchimento foram exclusivamente mecânicas, ou seja, o desaguamento do tubo já havia ocorrido. O modelo constitutivo utilizado para o solo de enchimento foi o de Mohr-Coulomb e a parametrização do modelo foi realizada pela variação do módulo de elasticidade da análise. Entre a fundação e o tubo geotêxtil foi considerado coeficiente de atrito igual a $\mu=0,5$.

Tanto o material de preenchimento quanto o geossintético foram simulados com elemento sólido de deformação plana (CPE8), enquanto que, para o geossintético, foi utilizado elemento de barra (B22) para cálculo das tensões. O solo possuía módulo de elasticidade variável e um peso específico seco (ρ_d) de $1,8\text{g/cm}^3$. O tubo tinha espessura de $3,5\text{mm}$, módulo de elasticidade de 7GPa , coeficiente de Poisson $0,4$, momento de inércia de 10^{-4} m^4 e densidade de 400 kg/m^3 .

Com relação ao segundo modelo, utilizou-se elemento de deformação plana e poropressão (CPE8RP) para o material de preenchimento e elemento de barra (B22) para o geossintético. Para esse caso, o módulo de elasticidade do geotêxtil foi menor para permitir maiores deformações. Além disso, foi assumido ainda coeficiente de Poisson de $0,3$. A **Figura 2.32** ilustra a malha de elementos finitos utilizada pelo autor para a análise do empilhamento.

Figura 2.32 - Malha de elementos finitos para o modelo de empilhamento



Fonte: Cantré, 2002.

Como resultado, obtiveram-se as tensões e deformações nos pontos estudados no modelo. Ademais, verificou-se ainda que a maior tensão atuante no geossintético ocorre durante o processo de enchimento do tubo, confirmando o mencionado por Leshchinsky *et al.* (1996).

No trabalho de Kim (2003), realizou-se a modelagem numérica de tubos por meio do software de diferenças finitas FLAC em duas dimensões (2D). Sendo assim, quatro configurações e tipos de tubos foram estudados com finalidade de avaliar a aplicação dessa estrutura no combate de enchentes, assim como afirmado por Houngh (2001). Devido ao fato de que a avaliação do enchimento de tubos envolve deformações e interações geométricas altamente não lineares, utilizou-se a opção de dupla-precisão e o modo de grandes deformações das simulações no FLAC.

Para simular o geossintético nas modelagens numéricas, o autor adotou elementos de barra, ao mesmo tempo que, na fundação, foram utilizadas grelhas. Para o carregamento interno e externo ao tubo, usou-se pressão hidrostática. Essa pressão foi convertida para carregamentos pontuais aplicados em cada nó dos elementos de barra do tubo. Como a avaliação envolve grandes deformações, devido às características flexíveis do tubo, várias sub-rotinas tiveram que ser implementadas no software, fazendo com que o incremento e atualização de carregamento fossem feitos dependendo da variação da forma do tubo.

O geossintético simulado era fabricado de PVC (Policloreto de Polivinila) com módulo de elasticidade linear elástico de 0,12GPa. Para a observação, a espessura do material foi de 0,508mm, enquanto que o momento de inércia foi de $1,09 \times 10^{-11} \text{ m}^4$. Para o solo (areia siltosa) de fundação, utilizaram-se o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb e as seguintes propriedades: densidade seca $1,600 \text{ g/m}^3$, ângulo de atrito interno 36° , ângulo de dilatação 7° ,

coeficiente de Poisson 0,292, módulo volumétrico 16 MPa, módulo cisalhante 7,7 MPa, porosidade 0,4 e permeabilidade 0,02 mm/s.

Os resultados da modelagem numérica foram comparados com resultados experimentais, demonstrando que a forma da seção transversal indica melhores respostas quando comparadas a outros casos de tubos na função estudada. Ademais, a pressão hidrostática interna respondeu bem aos resultados experimentais.

Dando sequência no trabalho desenvolvido por Cantré (2002), Zhang e Tan (2006) empregaram o programa computacional de elementos finitos ABAQUS para complementar o modelo de empilhamento criado, incluindo as propriedades da fundação. O objetivo do estudo foi explorar a máxima tensão e as deformações dos tubos geotêxteis para fundações com propriedades variadas e analisar a estabilidade hidráulica e geotécnica destes tubos.

Assim como em outros trabalhos, o tubo foi modelado com elementos de barra de dois nós (B22) e modelo constitutivo linear elástico. As principais propriedades do elemento utilizado foram: densidade de 400 kg/m³, módulo de elasticidade de 7 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,4, área da seção do elemento de barra igual a 10⁻³ m² e momento de inércia igual a 10⁻¹⁰ m⁴.

Para material de enchimento e solo de fundação, considerou-se comportamento elastoplástico e critério de ruptura de Mohr-Coulomb. O elemento utilizado na modelagem foi deformação plana de quatro nós (CPE4). As principais propriedades usadas para os solos são mostradas na **Tabela 2.4**.

Tabela 2.4 - Propriedades dos materiais de enchimento e da fundação

| Propriedade | Solo de enchimento | Fundação |
|--------------------------------|--------------------|----------|
| Densidade (kg/m ³) | 1800 | 1600 |
| Módulo de Elasticidade (Pa) | 100000 | 20000 |
| Coefficiente de Poisson | 0,3 | 0,292 |
| Ângulo de atrito | 20° | 36° |
| Ângulo de dilatação | 0° | 7° |

Fonte: modificado de Zhang e Tan, 2006.

Considerou-se, ainda, no contato entre o geotêxtil e a fundação, um coeficiente de atrito igual a $\mu = 0,5$. Para simular o empilhamento de um tubo, aplicou-se uma carga linear de 12 kN atuante na parte superior direita da circunferência.

Comparando os resultados com o estudo realizado por Cantré (2002), os autores concluíram que o módulo de elasticidade da fundação pode influenciar no comportamento das tensões no geossintético. Em relação à estabilidade hidráulica e geotécnica, percebeu-se que as formulações estudadas no trabalho podem ser aplicadas no dimensionamento de tubos.

Guo (2012) utilizou o software de diferenças finitas FLAC (2D) para a modelagem de um tubo geotêxtil sobre uma fundação deformável para comparar duas soluções comumente adotadas na literatura para esse tipo de condição: *Winkler Foundation* e *e-logp*. Os resultados obtidos foram usados para validação do método analítico desenvolvido no trabalho.

Para a fundação do modelo, escolheu-se o módulo de elasticidade variável ao longo da camada, conforme Tabela 2.5. Na mesma tabela, é apresentado ainda o módulo volumétrico e módulo cisalhante para o solo. O material possui peso específico de 18kN/m³ e coeficiente de Poisson igual a 0,35, índice de compressão igual a 0,35 e módulos de elasticidade cisalhante e volumétrico variáveis entre 9 camadas, conforme Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Módulos de elasticidade do solo de fundação

| Camada | Módulo de Elasticidade E (kPa) | Módulo volumétrico K (kPa) | Módulo cisalhante G (kPa) |
|--------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1 | 65.59 | 72.87 | 24.29 |
| 2 | 163.96 | 182.18 | 60.73 |
| 3 | 229.55 | 255.06 | 85.02 |
| 4 | 295.14 | 327.93 | 109.31 |
| 5 | 360.72 | 400.80 | 133.60 |
| 6 | 426.31 | 473.67 | 157.89 |
| 7 | 491.89 | 546.55 | 182.18 |
| 8 | 557.48 | 619.42 | 206.47 |
| 9 | 623.06 | 692.29 | 230.76 |

Fonte: modificado de Guo, 2012.

O tubo de geossintético foi considerado impermeável e modelado com elementos de barra com perímetro de 9 m, espessura de 0,3 mm, momento de inércia do elemento de barra

de $2,025 \times 10^{-12} \text{ m}^4$ e módulo de elasticidade de 7,032 GPa. Para o material de enchimento considerou-se peso específico igual a 12 kN/m^3 .

A partir dos parâmetros apresentados, o tubo foi modelado em diferentes condições iniciais de pressão de enchimento sobre a fundação deformável. O resultado numérico foi comparado com o método analítico desenvolvido, aplicando a *Winkler Foundation* e *e-logp*. Diante dos resultados, Guo (2012) concluiu que, quando há altos valores de reação na fundação, no método *Winkler Foundation*, o solo de fundação pode ser considerado rígido e os recalques são menores se comparadas ao resultado da simulação numérica. Isto ocorre, uma vez que essa metodologia não considera a distribuição não uniforme do carregamento no solo.

O autor conclui, ainda, que o método *e-logp* possui vantagens em relação ao *Winkler Foundation*, como obtenção de parâmetros em laboratório, a deformação do solo é não linear e ocorre a variação da distribuição de carregamento no solo. Os recalques para esse método são similares aos encontrados na simulação numérica.

O comportamento do adensamento de solos depositados hidraulicamente foi estudado por Brink (2014) por meio dos softwares de elementos finitos ABAQUS (Dassault Systèmes, 2013) e PLAXIS. Inicialmente, o modelo foi validado por intermédio de análises unidimensionais e a partir dos resultados, assim se elevou a complexidade dos modelos para um tubo geotêxtil preenchido com solo fino e uma simulação de material depositado hidraulicamente em um reservatório.

Para o estudo de adensamento do material de preenchimento do tubo geossintético, algumas premissas foram consideradas nas análises:

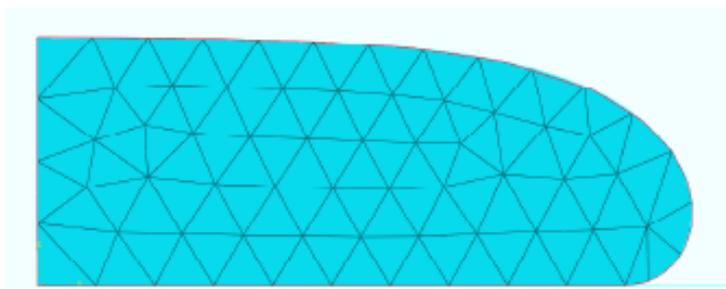
- Material de enchimento é considerado fluido com resistência ao cisalhamento igual a zero;
- O enchimento ocorre de forma instantânea, ou seja, não há adensamento durante o processo de enchimento;
- O peso específico do geossintético foi desconsiderado;
- O geossintético não experimenta esforços de momento e não há atrito com o material de enchimento;
- O tubo é longo o suficiente, para que o estado plano de deformações seja representativo.

A geometria inicial do modelo do tubo, após o enchimento, foi feita mediante formulação analítica (Leshchinsky *et al.*, 1996). Para tal, considerou-se como parâmetros de entrada: perímetro da circunferência de 15 m, pressão de enchimento de 0 kPa e peso específico do material de 14,76kN/m³.

Para o modelo do ABAQUS, utilizou-se três partes: o solo de preenchimento, o geossintético e a fundação rígida. O geotêxtil foi definido com elementos de treliça (*truss elements*) do tipo T2D3. Esse elemento não permite que momentos sejam aplicados no geotêxtil. A área da seção transversal foi de 0,001 m²/m, o módulo de elasticidade de 1.100 MPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,49 (propriedades elásticas correlacionadas ao polietileno).

Para o solo de enchimento considerou-se modelo constitutivo Modified Cam Clay e malha de elementos finitos triangulares do tipo CPE6MP. A fundação era rígida e modelada com elementos rígidos do tipo R2D2. O modelo final é apresentado na **Figura 2.33**.

Figura 2.33 – Modelo desenvolvido por Brink, 2014.



Fonte: modificado de Brink, 2014.

O autor verificou que a principal limitação do programa utilizado para a análise do adensamento de solos hidraulicamente depositados é a relação entre a tensão efetiva inicial e a tensão de pré-adensamento do solo, que devem ser especificados inicialmente no modelo. Quando a tensão de pré-adensamento é significativamente menor que a tensão efetiva inicial, os resultados obtidos são instáveis.

Kim *et al.* (2014) avaliaram o comportamento de empilhamentos de tubos geotêxteis em diferentes condições de arranjo e carregamento por recurso do software de elementos finitos PLAXIS 2D. O foco do estudo foi avaliar a estabilidade das estruturas submetidas à erosão costeira (*scouring*).

Na simulação do geossintético, utilizou-se modelo constitutivo linear elástico, enquanto que, para o solo de fundação, foi usado modelo elásto-plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Para o geotêxtil, adotou-se espessura igual a 3 mm e módulo de elasticidade de $7,0346 \times 10^9$ Pa. As propriedades empregadas nas simulações estão indicadas na Tabela 2.6 e na Tabela 2.7.

Tanto o solo de fundação quanto o material de preenchimento e o geotêxtil foram modelados com elementos triangulares de quinze nós. Ademais, considerou-se ainda elementos de interface para simular o deslizamento entre o solo e o geotêxtil. Após a realização das simulações, o autor concluiu que a erosão sobre os tubos tem efeito significativo na deformação e estabilidade dos tubos geotêxteis. Sendo assim, foi indicado ainda que melhorias na fundação e reforços nos tubos geotêxteis podem aprimorar o sistema como um todo.

Tabela 2.6 - Propriedades dos solos

| Tipo do Solo | γ_{unsat} (KN * m ³) | γ_{sat} (KN * m ³) | K (m/dia) | E (kPa) | ν | c (kPa) | ϕ (°) | ψ (°) |
|------------------------|--|--|-----------|---------|-------|-----------|------------|------------|
| Enchimento dos tubos | 16,5 | 17,5 | 0,3456 | 18 | 0,4 | 5 | 30 | 0 |
| Enchimento da barragem | 16 | 18 | 0,3456 | 20 | 0,4 | 9 | 30 | 0 |
| Areia siltosa | 15 | 17,5 | 0,864 | 6 | 0,4 | 5 | 25 | 0 |
| Areia | 16,5 | 18 | 0,864 | 30 | 0,35 | 0 | 35 | 0 |
| Silte | 16 | 18 | 0,0432 | 15 | 0,38 | 30 | 10 | 0 |
| Pedregulho | 17 | 19 | 2.592 | 35 | 0,35 | 0 | 38 | 0 |
| Argila | 16 | 18 | 0,0432 | 15 | 0,38 | 30 | 10 | 0 |
| Solo intemperizado | 17 | 19 | 0,3456 | 60 | 0,32 | 22 | 30 | 0 |
| Rocha intemperizada | 19 | 20 | 0,0432 | 360 | 0,3 | 35 | 32 | 0 |
| Rocha para leito | 19 | 21 | 1 | 120 | 0,35 | 0 | 38 | 0 |
| Riprap | | 21 | 2.592 | 350 | 0,3 | 0 | 38 | 0 |

Fonte: modificado de Kim *et al.*, 2014.

Tabela 2.7 - Propriedades dos tubos geotêxteis

| Tubo | Modelo constitutivo | Diâmetro teórico (m) | Altura final do tubo (m) | Rigidez normal (EA) (kN/m) | Resistência a tração (kN/m) | Permeabilidade (cm/s) |
|--------|---------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Tubo 1 | Linear Elástico | 4,0 | 2,20 | 21,104 | 200 | 1 x 10 ⁻⁴ |
| Tubo 2 | Linear Elástico | 4,0 | 2,20 | 21,104 | 200 | 1 x 10 ⁻⁴ |
| Tubo 3 | Linear Elástico | 2,0 | 1,10 | 21,104 | 200 | 1 x 10 ⁻⁴ |

Fonte: modificado de Kim *et al.*, 2014.

O programa computacional de elementos finitos Phase2 foi empregado por Mendonça (2016) para avaliar o comportamento de tubos geotêxteis destinados ao confinamento de rejeitos sobre diferentes pressões de enchimento e tipos de materiais de geossintético. Entre as premissas consideradas no trabalho, levou-se em conta a fundação flexível, peso desprezível do tubo e comprimento muito superior à seção transversal, permitindo, assim, a análise em duas dimensões (2D).

Para condição inicial do tubo geossintético, o autor usou metodologia analítica para determinação da forma da seção transversal do tubo. A partir de então, foi realizado estudo paramétrico com a variação da pressão de enchimento, propriedades dos materiais do tubo e fundação.

Para a simulação, o tubo foi considerado elástico, os materiais do solo seguiram modelo elasto-plástico e critério de Mohr Coulomb. A malha de elementos finitos foi estabelecida com 8.000 elementos triangulares de 6 nós, conforme **Figura 2.34**. Os tipos de materiais, as propriedades e condições de carregamento inicial da fundação e do rejeito estão indicados na **Tabela 2.8**.

Tabela 2.8 - Parâmetros dos materiais de fundação e de enchimento

| Parâmetro | Fundação | Rejeito |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Condição inicial | <i>Field Stress & Body Force</i> | <i>Field Stress & Body Force</i> |
| Modelo constitutivo | Elástico | Elástico |
| Peso específico (kN/m ³) | 27 | 18 |
| Critério de ruptura | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb |

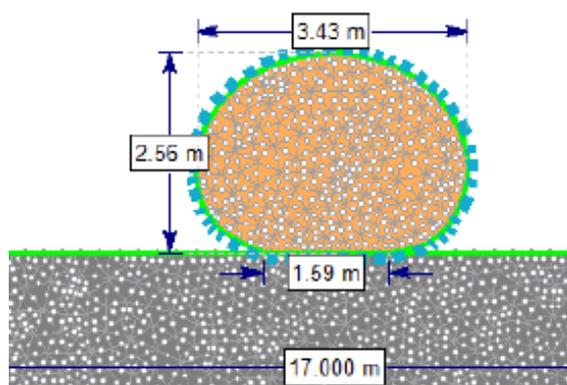
| Parâmetro | Fundação | Rejeito |
|-------------------------|------------|------------|
| Coefficiente de Poisson | 0,3 | 0,3 |
| Módulo de elasticidade | 30.000 kPa | 10.000 kPa |
| Ângulo de atrito | 35° | 30° |
| Coesão | 10 kPa | 0 kPa |

Fonte: adaptado de Mendonça, 2016.

As principais conclusões referentes à modelagem numérica obtidas por Mendonça (2016) foram:

- O tubo geotêxtil tende a ter uma forma circular sob altas pressões de enchimento;
- A influência da fundação sobre as solicitações mecânicas no geotêxtil é pequena;
- As propriedades do material de enchimento (rejeito, no caso específico do referente trabalho) exercem grande influência nas análises numéricas;
- As tensões ao longo do perímetro do tubo tendem a ser mais uniformes para tubos com formas mais circulares.

Figura 2.34 – Modelo geométrico definido



Fonte: Mendonça, 2016.

2.6.1.3 Avaliação das modelagens numéricas

Modelar numericamente o comportamento de tubos geotêxteis não é um procedimento simples devido à maneira complexa com que o processo de enchimento e desaguamento ocorrem (Cantré, 2002; Lawson, 2008; Guo, 2012; Brink, 2014). Na modelagem numérica de tubos geotêxteis, as variáveis são muitas, complexas e nem sempre bem definidas. Isso, porque as propriedades geotécnicas do material de enchimento são específicas para cada caso, dependendo do tipo e característica do material bombeado. O tempo do processo de adensamento pode demorar dias, meses ou semanas, dependendo diretamente das propriedades do material de enchimento. Após o processo de enchimento, há registros de queda na altura da seção transversal do tubo geotêxtil da ordem de 40% a 50% (Shin e Oh, 2003).

A complexidade do comportamento mecânico e hidráulico do solo e do material disposto no tubo geotêxtil durante o enchimento, adensamento e carregamento é citada por Cantré (2002). Sendo assim, para a etapa de enchimento, é possível considerar o material de preenchimento como fluido. Entretanto, essa condição não pode ser assumida para o processo de adensamento e carregamento, por causa do desaguamento e dissipação de poropressões.

Guo (2012) cita que o processo de desaguamento em tubos geotêxteis é um processo complexo e, de um modo geral, de difícil concepção, além de envolver pelo menos a etapa de filtração e adensamento. Em relação à etapa de filtração, esta é caracterizada pela rápida dissipação de água e passagem de finos pelo tubo geotêxtil. Nessa etapa, a velocidade com que a lama passa pelo geossintético depende da função das propriedades do solo, das propriedades do geossintético e do gradiente hidráulico. Após determinado tempo, ocorre a formação do *Filter Cake*.

A etapa de adensamento envolve a dissipação do excesso de poropressão devido ao peso próprio do solo e à pressão de confinamento oriunda do tubo geotêxtil. É importante destacar que não há uma separação clara entre as duas etapas e estas podem existir simultaneamente durante a transição da etapa de drenagem para a etapa de adensamento.

Tal complexidade pode ser constatada ainda nos métodos analíticos existentes na literatura para representação do processo de adensamento, sendo estes poucos: Leshchinsky et al. (1996) e Shin e Oh (2004). Nesses métodos, é assumido, dentro das limitações, adensamento em apenas uma direção, largura do tubo constante, material saturado, material uniforme durante

o processo, tensão efetiva nula no momento da disposição, poropressão e densidade uniforme ao decorrer do processo.

Em termos de tensões, Lawson (2008) cita que a análise das tensões geradas nos tubos é complicada por causa da geometria do tubo. Ademais, o material de enchimento do tubo geotêxtil apresenta-se, inicialmente, em um estado líquido, isto é, com ausência de resistência ao cisalhamento, e, depois, transforma-se para o estado sólido com resistência ao cisalhamento interna. Essa mudança de fase do material contido, a quantidade de material de enchimento, a pressão de bombeamento aplicada e o tempo o qual ocorre a mudança de fase afetam a magnitude das tensões geradas nos tubos geotêxteis.

Apesar das limitações existentes, conforme apresentado no item anterior, modelagens numéricas vêm sendo realizadas com o intuito de representar e prever o comportamento de tubos geotêxteis. Analisando as modelagens numéricas em tubos geotêxteis existentes na literatura descritas no item anterior 2.6.1.1, observa-se que os estudos de modelagem são feitos por meio de simplificações. Dentre as premissas assumidas nas modelagens numéricas, basicamente, podem ser citadas:

- Geossintético impermeável;
- O material de enchimento comporta-se como um fluido durante a etapa de enchimento, sendo assumido um carregamento hidrostático no interior do tubo;
- O material de enchimento se comporta como um solo na etapa de adensamento, sendo considerado preenchimento instantâneo;
- O tubo é longo o suficiente para ser considerado o estado plano de deformações (2D);
- O geossintético é considerado ou não com peso específico desprezível e atrito nulo ou não com o material de enchimento e fundação.

Entre os softwares utilizados, lista-se o FLAC, ABAQUS, RS2 e PLAXIS. Todos representaram o tubo geossintético em análises 2D, enquanto o software ABAQUS foi utilizado para análises 2D e 3D. É importante mencionar que existe apenas uma modelagem numérica em três dimensões na literatura, ao passo que modelagens numéricas em duas dimensões são mais enriquecidos os estudos.

A fundação adotada nos estudos realizados foi rígida e flexível. Essa última foi considerada a partir de uma constante elástica do tipo mola, ou seja, com comportamento linear elástico e também foi levada em conta com propriedades de deformabilidade do solo. Em relação ao modelo constitutivo utilizado, destaca-se que, em todas as análises, o geossintético foi considerado como linear elástico, apesar do seu comportamento ser termo-visco-elastoplástico (Perkins, 2000).

Essencialmente, foram utilizados, para solução do problema, os métodos de elementos finitos e método de diferenças finitas. Além disso, empregaram-se elementos do tipo casca, barra, treliça, mola, triangulares, deformação plana e sólido plano. Como carregamento, observa-se que a maioria dos trabalhos supõe que o mesmo acontece sendo aplicada uma pressão hidrostática internamente ao tubo geotêxtil, considerando material de enchimento como fluido. Essa simplificação torna-se viável durante a fase de enchimento conforme Guo (2012).

Entre os estudos realizados e descritos acima, constata-se que estes estão relacionados unicamente ao processo de enchimento ou unicamente ao processo pós-enchimento, ou seja, ao processo de adensamento. Por fim, não foram identificados trabalhos que abordassem os dois processos de maneira conjunta.

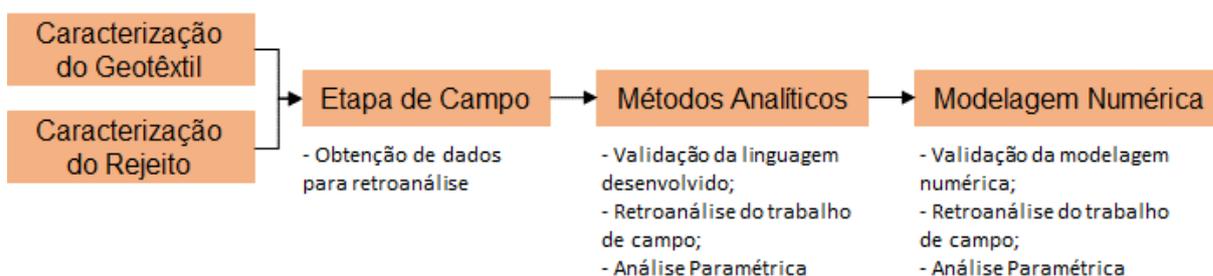
3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este capítulo apresenta a metodologia da pesquisa em relação aos métodos e materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho. O estudo foi realizado com base nos resultados obtidos no estudo de campo realizado por Freitas Silva (2017). Para tanto, obteve-se os parâmetros do geotêxtil, que foi utilizado para fabricação do tubo geotêxtil, bem como os parâmetros do rejeito, que se usou para disposição hidráulica.

A partir dos dados levantados, primeiramente, adotaram-se métodos analíticos para a realização da retroanálise de campo. Posteriormente, o mesmo foi feito para a modelagem numérica por meio do software de elementos finitos Abaqus versão 6.14.

A seguir é apresentado um fluxograma da metodologia adotada (**Figura 3.1**) e a descrição de cada uma das etapas desenvolvidas. É importante ressaltar que a etapa de campo e a caracterização do material foi realizada em 2017 (Freitas Silva, 2017).

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: (Freitas Silva, 2017).

3.1 Propriedades do geotêxtil

O estudo de campo foi desenvolvido com geotêxteis tecidos obtidos diretamente a partir do fabricante. Para o presente trabalho, os dados de caracterização e propriedades do geotêxtil foram adquiridos por intermédio de dados existentes na literatura e informações do fabricante do material.

O geossintético utilizado no trabalho corresponde a um geotêxtil tecido fabricado com fios de polipropileno de alta resistência, que possui uma rede estável a qual os fios mantêm sua

posição. De acordo com o fabricante, o tubo geotêxtil é inerte à degradação biológica e resiste a substâncias químicas alcalinas e ácidos encontrados naturalmente.

Na **Tabela 3.1** são apresentadas as propriedades fornecidas pelo fabricante para o geotêxtil tecido utilizado na fabricação dos tubos geotêxteis. Destaca-se que os ensaios de caracterização do geossintético executados por Freitas Silva (2017) ficaram semelhante à fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.1 – Características do geotêxtil utilizado

| Propriedade | Norma | Valor | Freitas Silva (2017) |
|-----------------------------------|-------------|-------------------|----------------------|
| Peso – típico | ASTM D-5261 | 556 g/m | 554 g/m |
| Espessura – Típica | ASTM D-5199 | 1,80 mm | 1,77 mm |
| Tensão a faixa larga | ASTM D-4595 | 78,8 x 109,4 kN/m | - |
| Alongamento a faixa larga | ASTM D-4595 | 20 x 20 % | - |
| Puncionamento | ASTM D-6241 | 8,900 N | - |
| Abertura de poro aparente | ASTM D-4751 | 0,43 mm | - |
| Permeabilidade | ASTM D-4491 | 813 l/min/m | - |
| Resistência a raios UV – 500hs | ASTM D-4355 | 80 % | - |
| Resistência da costura de fábrica | ASTM D-4884 | 70 kN/m | - |
| Abertura do poro O ₅₀ | ASTM D-6767 | 115 micron | - |
| Abertura do poro O ₉₅ | ASTM D-6767 | 368 micron | - |

Fonte: TenCate, 2018.

3.2 Estudo de campo - protótipo em grande escala

Freitas Silva (2017) avaliou o desaguamento de rejeitos de ouro a partir de tubos geotêxteis, os quais, de grande dimensão, foram realizados ensaios em campo, especificamente, na Mineração Fazenda Brasileiro - Bahia. Para a avaliação, um empilhamento de bolsas têxteis foi construída em um formato 9:4:1 a partir da base da estrutura, conforme **Figura 3.2**.

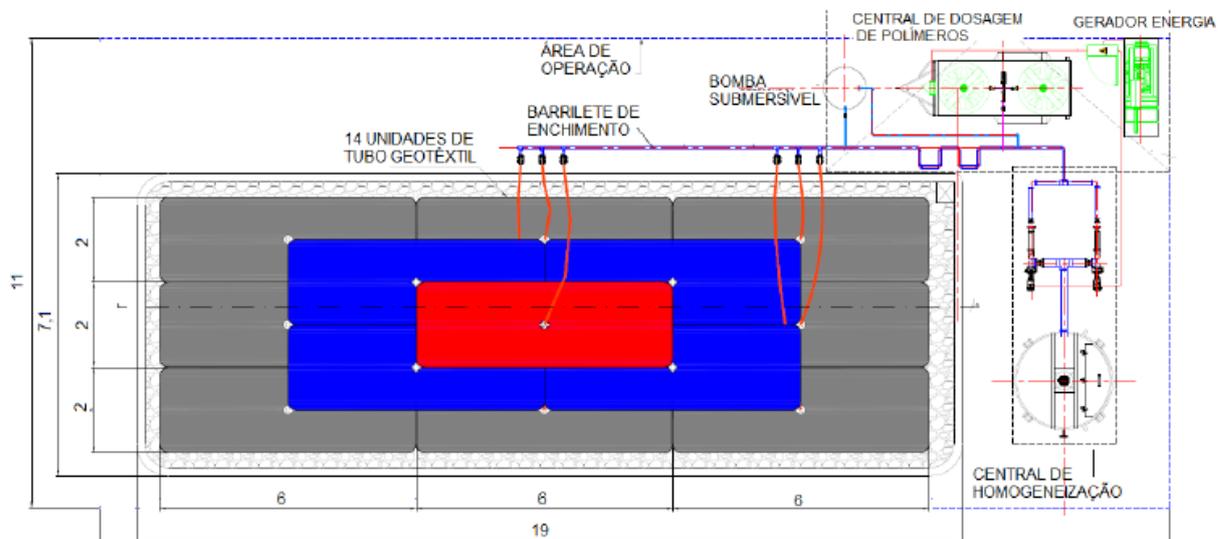
O sistema era composto por tanque de homogeneização de rejeitos, tanque de homogeneização de polímeros, sistema de bombas para bombeamento dos materiais e sistema de chicanas para garantir a mistura do rejeito e do polímero.

Com o objetivo de monitorar a forma e as deformações que aconteceriam no tubo geotêxtil durante a operação de bombeamento de rejeitos, instalaram-se elementos de monitoramento, incluindo controle topográfico a laser, régua em pórtico com escala vertical e

horizontal para obtenção de medidas diretas, mira a laser e captura de imagens sequenciais do enchimento (Freitas Silva, 2017).

A régua possuía dimensões de 8,0 m de comprimento e 3,0 m de altura e permitia o monitoramento da estrutura durante todo o processo de enchimento dos tubos. Já a mira a laser e a câmera, eram fixadas em um tripé, posicionadas em local fixo próximo à estrutura. A **Tabela 3.2** apresenta o esquema de monitoramento utilizado.

Figura 3.2 – Layout do empilhamento de protótipos em grandes dimensões executado em campo



Fonte: Freitas Silva, 2017.

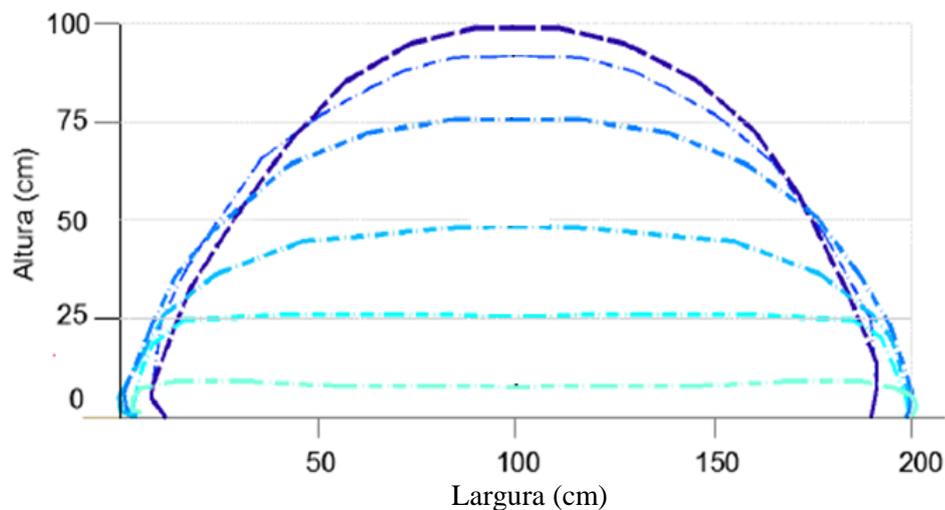
Figura 3.3 – Monitoramento dos deslocamentos verticais feitos por meio da mira a laser e régua em pórtico



Fonte: Freitas Silva, 2017.

A partir dos dados obtidos por meio da mira laser, da régua em pórtico e da sobreposição de imagens durante o processo de bombeamento, foi possível realizar o estudo da evolução da forma do tubo por intermédio das imagens obtidas. Na Figura 3.4, é apresentada a variação da forma, altura e largura ao longo das etapas de enchimento de um dos tubos localizado no inferior do empilhamento, que será estudada nesta pesquisa.

Figura 3.4 – Variação da forma do tubo durante o enchimento



Fonte: adaptado de Freitas Silva, 2017.

Foi possível observar que, nas três primeiras leituras apresentadas em azul mais claro, o tubo aproxima-se de uma seção transversal retangular, enquanto nas leituras subsequentes, a partir da metade da altura final, o tubo assemelha-se a uma forma de elipse e, por fim, - parece com uma circunferência. As dimensões finais de um tubo geotêxtil, após o enchimento, foram de 1,00 m para altura e de 1,67 m para largura.

Entre os dados obtidos na pesquisa de Freitas Silva (2017), serão utilizados aqueles da forma da seção transversal do tubo geotêxtil, a fim de se comparar com os resultados da modelagem numérica. Em relação à tensão gerada, esta não foi obtida para a etapa de campo. Dessa maneira, buscou-se comparar a tensão encontrada no método analítico à tensão obtida na modelagem numérica.

3.3 Métodos analíticos

As informações de variação da forma da seção transversal, colhidas no estudo de campo de Freitas Silva (2017), foram usadas na aplicação dos métodos analíticos apresentados no item 2.4 para a análise de forma e tensões geradas em tubos geotêxteis. Para comparar os resultados encontrados em campo por Freitas Silva (2017) com os resultados dos métodos analíticos, optou-se por utilizar os métodos de Plaut e Suherman (1998) e de Guo (2014).

O método de Plaut e Suherman (1998) é reconhecido mundialmente, além de ser convencionalmente utilizado em obras de engenharia envolvendo tubos. Além disso, esse método foi desenvolvido pelo fabricante dos tubos utilizados em campo (GeoTube Simulator – TenCate).

Já o método de Guo (2014), é o método analítico mais atual para a determinação da forma e tensões geradas em tubos geossintéticos. Apesar de esses métodos estarem relacionados a tubos geossintéticos impermeáveis, a solução pode ser aplicada a tubos geossintéticos permeáveis (Guo, 2012).

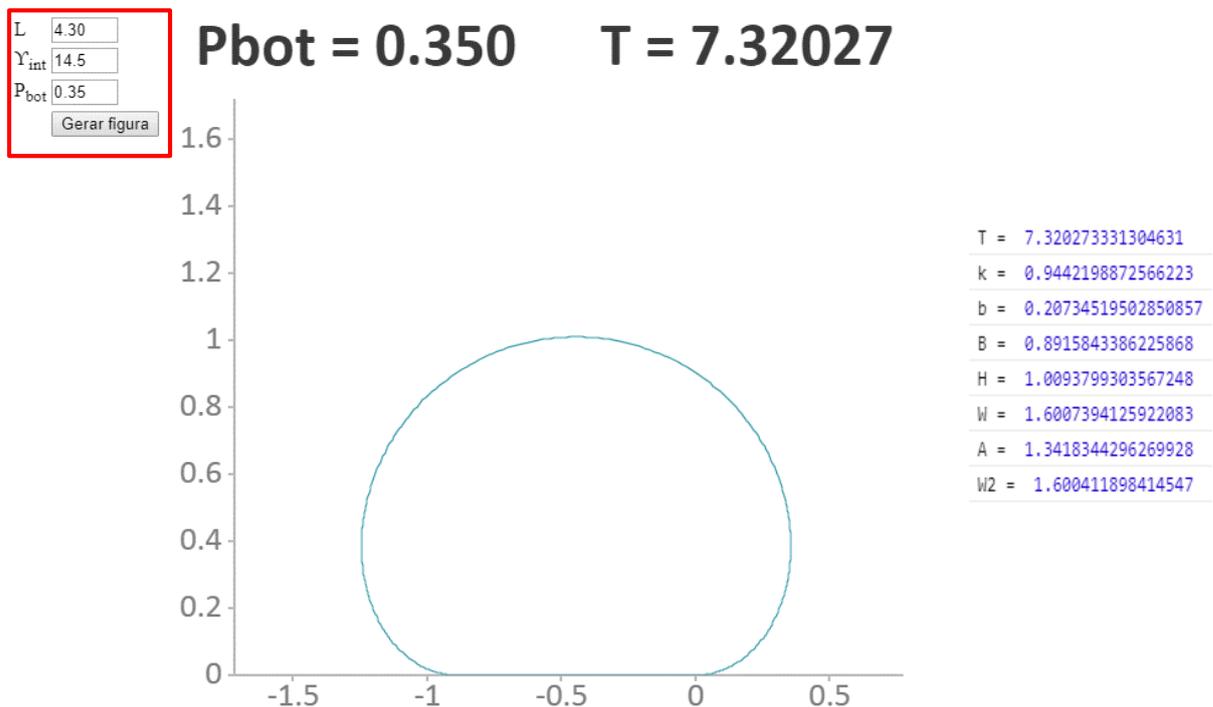
Quanto aos cálculos por esse métodos, uma vez que estes são baseados em integrais elípticas de primeira e segunda ordem, derivadas e equações diferenciais ordinárias, as quais são iterativas e apresentam elevado grau de complexidade, as equações e formulações foram desenvolvidas com o auxílio do NotePAD ++, utilizando as linguagens de programação Java e Html. No Apêndice A e B, são apresentados os códigos desenvolvidos neste trabalho.

A Figura 3.5 apresenta como exemplo a tela de entrada de dados em html para o método analítico de Plaut e Suherman (1998). Para cada método analítico, diferentes variáveis de entrada são consideradas. Na imagem, estão apresentados os dados iniciais para essa metodologia, que são o perímetro do tubo, o peso específico do material e a pressão na base do tubo normalizada pelas duas primeiras variáveis. Após executar o algoritmo, o programa fornece a pressão de entrada considerada, a tensão circunferencial atuante no material (números maiores, em negrito sendo P_{bot} adimensional e T em kN/m) e a forma resultante do tubo geotêxtil (em azul claro), conforme mostra a Figura 3.5.

A partir dos algoritmos desenvolvidos para cada método analítico (Plaut e Suherman e Guo), foi possível realizar a retroanálise da condição existente em campo e análise paramétrica.

Na sequência são apresentados os processos de cálculo dessa metodologia, Plaut e Suherman (1998), e da metodologia de Guo (2014).

Figura 3.5 – Tela com os dados de entrada (retângulo vermelho) e dados de saída (demais informações da figura) em html – eixos em metros.



Em que,

$$P_{bot} = \text{pressão de entrada adimensional} - P_{bot} = \frac{\text{Pressão interna (kPa)}}{L(m) \times \gamma(kN/m^3)}$$

$$L = \text{Perímetro (m)}$$

γ_{int} = Peso específico do material (kN/m³)

T = Tensão Circunferencial (kN/m)

k = parâmetro adimensional utilizado para calcular o “t”

t = Parâmetro adimensional utilizado para calcular a Tensão - $t = \frac{T \text{ (kN/m)}}{\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)} \times L^2 \text{ (m}^2\text{)}}$

b = Parâmetro adimensional utilizado para calcular os parâmetros geométricos

B = Largura em contato com a fundação (m)

H = Altura do tubo geotêxtil (m)

W = Largura do tubo geotêxtil (m)

A = Área da seção transversão do tubo geogêxtil (m)

W2 p= arâmetro para convergência de “W” (m)

3.3.1 Plaut e Suherman (1998)

Conforme apresentado no item 2.4, o método de Plaut e Suherman (1998) é baseado na utilização de integrais elípticas para a determinação da forma do tubo, tomando como base a pressão na base da estrutura, o peso específico do material de preenchimento e o perímetro do tubo.

A solução é baseada na pressão na base do tubo, P_{bot}, e pode ser escrita em termos de integrais elípticas ou a partir de algumas fórmulas aproximadas. Toma-se como partida o cálculo das variáveis adimensionais “k” e “t”, conforme Equação (3.1):

$$k = \frac{2\sqrt{t}}{P_{bot}} \quad \text{Equação (3.1)}$$

Em que,

P_{bot} = pressão de entrada adimensional – $P_{bot} = \frac{\text{Pressão interna (kPa)}}{L \text{ (m)} \times \gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}}$

k = parâmetro adimensional utilizado para calcular o “t”

t = Parâmetro adimensional utilizado para calcular a Tensão - $t = \frac{T \text{ (kN/m)}}{\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)} \times L^2 \text{ (m}^2\text{)}}$

A variável “t” é um parâmetro adimensional utilizado para se obter a tensão circunferencial e pode ser computado na equação acima pela solução de “k” na equação:

$$1[K(k) - E(k)]P_{bot} = 1 \quad \text{Equação (3.2)}$$

As variáveis $K(k)$ e $E(k)$ são integrais elípticas completas de primeira e segunda ordem, respectivamente. Nessa formulação, para a solução existir, é necessário que $0 < k^2 < 1$, para que “ t ” seja menor que $(p_{bot})^2/4$ e, conseqüentemente, a tensão “ T ” satisfazer a condição:

$$0 < T < \frac{p_{bot}^2}{4\gamma_{int}} = \frac{\gamma_{int}H_{int}^2}{4} \quad \text{Equação (3.3)}$$

Em que,

P_{bot} = pressão de entrada adimensional – $P_{bot} = \frac{\text{Pressão interna (kPa)}}{L(m) \times \gamma(kN/m^3)}$;
 γ_{int} = Peso específico do material (kN/m^3);
 H_{int} = Altura da coluna da pressão hidrostática (m).

A integral elíptica foi criada para resolução de problemas de comprimento de arco, sendo que a de primeira ordem é expressa pela Equação (3.4), e a de segunda ordem é apresentada pela Equação (3.5).

$$K(k) = \int_0^{\varphi} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \text{sen}^2 \theta}} \quad \text{Equação (3.4)}$$

$$E(k) = \int_0^{\varphi} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \text{sen}^2 \theta} d\theta} \quad \text{Equação (3.5)}$$

Em que “ k ”, nas equações, é um parâmetro relacionado à geometria da elipse e θ é o ângulo entre a direção tangente em um ponto do arco e a horizontal.

Nas primeiras tentativas de cálculo, os resultados não convergiram. Essa resposta poderia ser esperada, uma vez que a integral é um método de aproximação e, como muitos cálculos são realizados, os erros podem se acumular, chegando a resultados incoerentes. Dessa maneira, ajustes no código foram sendo feitos, alterando-se a precisão dos cálculos, para que os resultados ficassem mais precisos e representativos da situação encontrada.

Outra dificuldade encontrada nos cálculos realizados com esse método analítico está relacionada aos resultados obtidos quando a pressão na base do tubo, P_{bot} , possuía valores de entrada baixos. Isso, porque valores de pressão baixos levam o “ k ” da Equação (3.1) aproximar-se da unidade e, conseqüentemente, as funções integrais possuem resultados insatisfatórios.

Como valores muito baixos não foram usados, não se observaram erros relacionados a essa limitação.

3.3.2 Guo (2014)

O método proposto por Guo (2014) permite o dimensionamento preliminar de tubos geotêxteis com base em soluções fechadas. Para simplificar as análises, relações entre os parâmetros geométricos e pressão de enchimento são estabelecidas, utilizando soluções analíticas.

Assim como o método de Plaut e Suherman, as equações possuem integrais elípticas de primeira e segunda ordem que foram solucionadas por meio de programação de computador, utilizando-se o NodePad ++. Nessa solução, são considerados como dados de entrada o peso específico do material, a pressão de enchimento e a altura ou perímetro do tubo.

A solução parte da determinação da tensão T a partir da Equação (2.11) e do fator de pressão de enchimento Q , utilizando a equação seguir:

$$Q = 1 + p_0^2/2\gamma T \quad \text{Equação (3.6)}$$

Em que,

p_0 = é a pressão de enchimento (kPa)

γ = peso específico do material (kN/m³)

T = tensão atuante no tubo geotêxtil (kN/m)

Q = fator de pressão de enchimento (adimensional)

Em seguida, calcula-se o $\text{sen}\theta$ por intermédio da equação:

$$\text{sen } \theta = 1 - \left(p_0 x + \frac{1}{2} \gamma x^2 \right) / T \quad \text{Equação (3.7)}$$

Em que,

θ = ângulo entre a tangente do tubo geotêxtil e a horizontal (°).

A partir dessa última variável, a forma do tubo pode ser determinada utilizando a Equação (3.8) e a Equação (3.9) calculadas por meio de linguagem computacional ou outro método capaz de realizar os cálculos. As variáveis x e y indicadas na **Figura 2.24** nas equações determinam as coordenadas dos pontos que formam a seção transversal do tubo geotêxtil.

$$x = \frac{1}{\gamma} [-p_0^2 + 2\gamma T (1 - \text{sen}\theta)] \quad \text{Equação (3.8)}$$

$$y = -\sqrt{\frac{T}{2\gamma}} \int \left(\sqrt{Q - \text{sen}\theta} - \frac{Q}{\sqrt{Q - \text{sen}\theta}} \right) d\theta \quad \text{Equação (3.9)}$$

Caso o perímetro do tubo geotêxtil seja tomado como dado de entrada, a altura pode ser definida com uma iteração: assume-se que $H_t = L/\pi$ como parâmetro de entrada para calcular o perímetro teste L_t . Se a L_t é diferente de L , então, é preciso modificar o valor de H_t e repetir o processo de cálculo até que a diferença entre L_t e L seja inferior a 10^{-6} (Guo, 2014).

3.4 Modelagem numérica

Nessa seção, são apresentados os aspectos mais importantes para o desenvolvimento do modelo de elementos finitos por meio da utilização do software Abaqus 6.14 (Dassault Systemes, 2014). Dessa forma, os itens seguintes descrevem a metodologia usada durante a elaboração do modelo, fases de cálculo e resultados que auxiliaram na definição do modelo, incluindo a discretização da malha, modelagem da interface entre as estruturas, condições de contorno, aspectos do carregamento e modelos constitutivos, que descrevem a relação entre a tensão e deformação dos materiais. Para tal, utilizou-se a licença do Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES) da Universidade Federal de Minas Gerais.

Para o estudo, foi empregado o sistema internacional de unidades o qual o comprimento é expresso em metro (m), a massa em quilograma (kg), o tempo em segundo. As unidades secundárias ou derivadas também são baseadas nas unidades fundamentais, como a unidade de força expressa em Newton (N kg.m/s²).

3.4.1 Análise não linear

A modelagem numérica realizada foi do tipo não linear, a qual considerou-se grandes deformações e deslocamentos, não linearidade do material, não linearidade das condições de contorno e não linearidade no contato dos elementos. Visto que o tubo geotêxtil varia bastante em relação à sua forma inicial, esse tipo de análise é a mais adequada para implementar no modelo estudado. Isso, porque Kim (2003) menciona que a análise do enchimento de um tubo geotêxtil envolve deformação geométrica altamente não linear.

Nesse tipo de análise, a cada incremento de carregamento, o equilíbrio das equações é realizado com base na configuração atual do modelo, ou seja, não se considera a condição original do problema. Dessa maneira, o modelo é atualizado a cada incremento de carregamento realizado. Este deve ser mantido pequeno, para que não ocorram problemas de convergência.

Para facilitar os cálculos, o software Abaqus dispõe de uma opção de incremento automático o qual o próprio programa define a magnitude deste. Quando o incremento é muito pequeno ou muito grande, podendo levar a um tempo excessivo de execução, problemas de convergência ou número excessivo de iterações, o software realiza o ajuste do tamanho do acréscimo para refinar o cálculo, (Dassault Systemes, 2014).

3.4.2 Geometria do modelo

Para criar a geometria do modelo a ser utilizado nas análises numéricas, buscou-se representar as dimensões dos tubos geotêxteis existentes em campo no experimento de Freitas Silva (2017), isto é, Diâmetro = 4,3 m e dimensões aproximadas de 2,15 m de largura x 6,0 m de comprimento.

Visando simplificar o modelo, devido ao demasiado tempo para solução da modelagem numérica do tubo completo (aproximadamente 24 horas), somente um quarto do tubo geotêxtil foi modelado. Dessa forma, o modelo possui dimensões iguais a 1,035m de largura por 2,96 m de comprimento, conforme apresentado na **Figura 3.8**. Com o intuito de verificar se os resultados da modelagem, de apenas um quarto do tubo, seriam iguais aos resultados da condição completa, realizou-se a simulação do modelo com $\frac{1}{4}$ da geometria do tubo geotêxtil e com a metade da geometria do tubo.

Na **Figura 3.6** e **Figura 3.7**, são apresentadas as variações das tensões ao longo da seção transversal do tubo geotêxtil resultante da simulação. Ainda, mostra-se a geometria de um quarto do modelo do tubo com pontos de referência para facilitar a compreensão dos resultados apresentados.

Figura 3.6 – Variação da tensão ao longo da seção transversal para 1/4 do tubo e metade do tubo

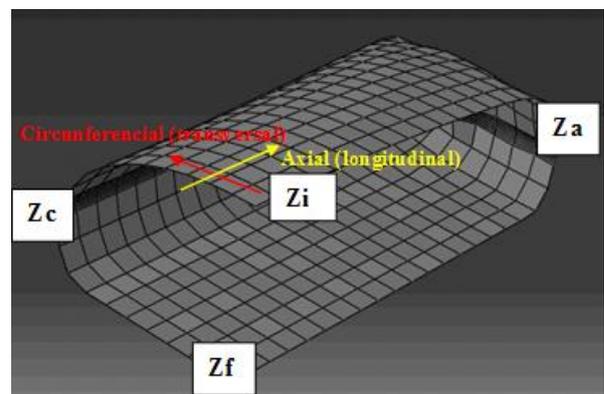
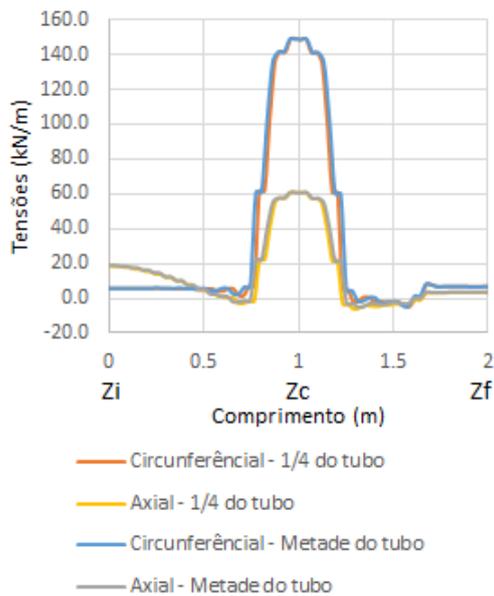
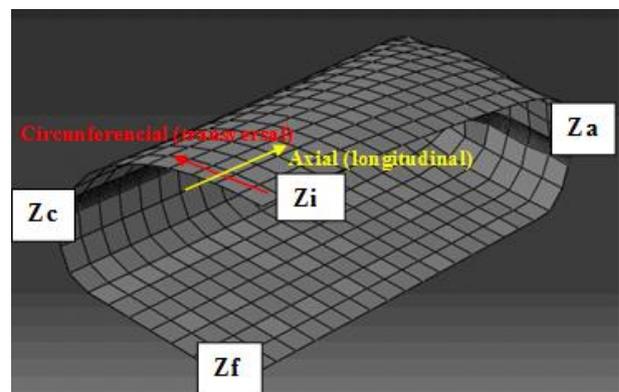
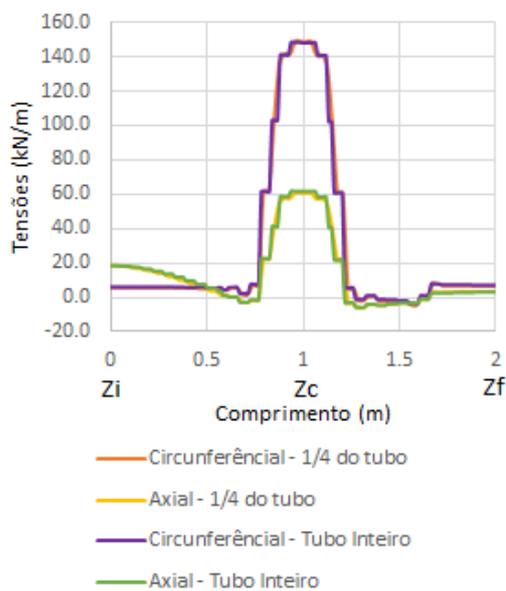
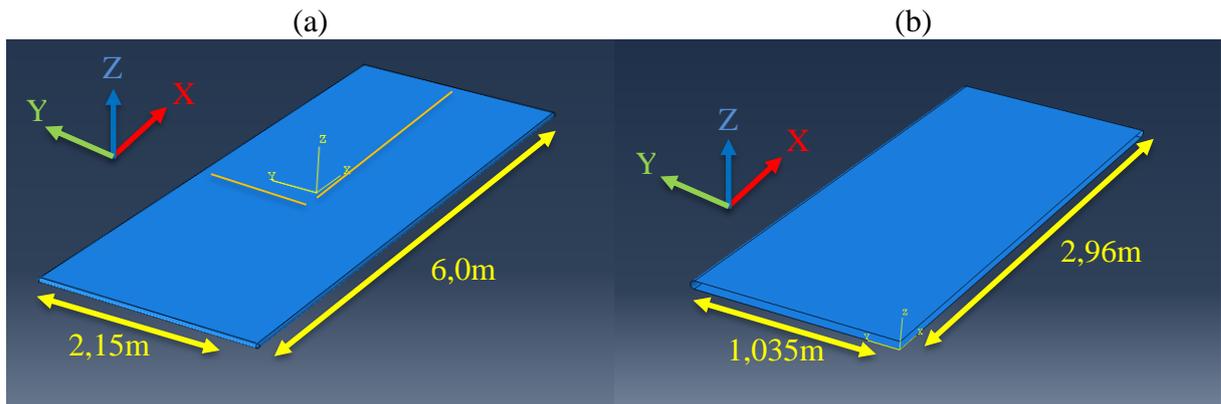


Figura 3.7 – Variação da tensão ao longo da seção transversal para 1/4 do tubo e tubo inteiro



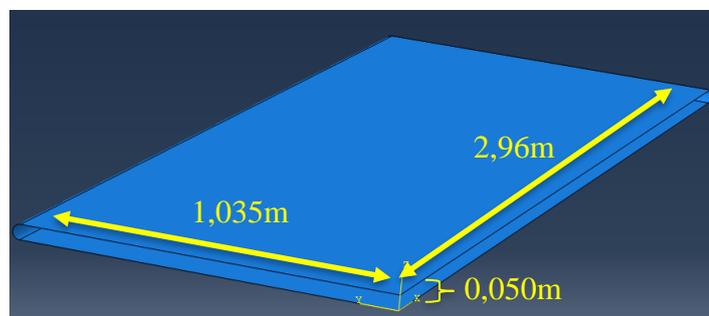
As dimensões do tubo completo estão representadas na **Figura 3.8a**, e as dimensões da geometria modelada na **Figura 3.8b**, onde foi considerada a simetria nos eixos da estrutura. Além disso, observa-se que o eixo X do software está na direção de maior comprimento, o eixo Y na direção de menor comprimento e o eixo Z na direção da altura.

Figura 3.8 – Geometria do tubo (a) tubo geotêxtil completa (posição do eixo de simetria modelado destacado em laranja); (b) ¼ do tubo geotêxtil modelado



Seay (1998) realizou testes na geometria de um tubo geotêxtil no software Abaqus focando na forma das extremidades e superfícies superiores e inferiores para verificar a convergência do modelo. Entre as condições estudadas, a que melhor se adequou e teve a convergência dos resultados foi a separação das superfícies superior e inferior com extremidade semicircular de diâmetro de 0,042 m com tubo vazio. Para este trabalho, será utilizado um diâmetro de 0,050 m, conforme **Figura 3.9**.

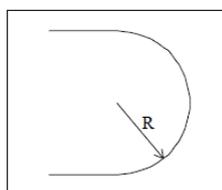
Figura 3.9 – Geometria do tubo geotêxtil modelada na condição vazia (estado inicial do modelo).



A distância entre a porção inferior e superior do tubo corresponde a 0,050 m. Na **Figura 3.9**, é mostrada ainda a geometria de um quarto do tubo, que foi avaliada. Observa-se que o ponto 0,0,0 do eixo de coordenadas está localizado no centro do tubo na parte inferior.

Conforme pode ser verificado na **Figura 3.9**, nas bordas que não estão localizadas no eixo de simetria foram implementadas seções transversais semicirculares com raio de 0,025m (**Figura 3.10**). Observa-se, nas imagens, que as superfícies inferior e superior ficaram afastadas com uma distância de um diâmetro do semicírculo das extremidades.

Figura 3.10 – Borda do tubo modelada $R = 0,025m$



3.4.3 Malha de elementos finitos

Para realização das modelagens numéricas, selecionaram-se dois tipos de elementos disponíveis no software Abaqus: Casca e Membrana. A diferença principal entre os dois elementos é a rotação existente nos nós da malha. Enquanto o elemento de casca permite a rotação, o de membrana não possui esse grau de liberdade, ou seja, não tem rigidez à flexão.

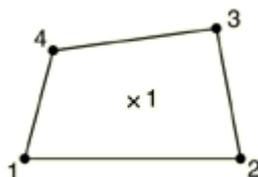
O software Abaqus dispõe de diferentes tipos de elementos de casca denominados elementos de casca em geral, elementos convencionais, elementos contínuos, elementos de casca grossos e elementos de casca finos. Cada um destes possui uma grande quantidade de características, como elementos para modelagem de geometrias em 3D, elementos axissimétricos, elementos para transferência de calor, elementos com deslocamento/temperatura acoplados, entre outros.

Os elementos de casca são utilizados para modelar estruturas as quais uma das dimensões, usualmente a espessura, é consideravelmente menor que as outras dimensões. Uma vez que o geossintético contém essa característica, isto é, tem uma das dimensões (espessura) menor do que as outras, esse elemento foi selecionado. Este permite movimentos translacionais (deslocamento das direções x, y e z) e movimentos rotacionais (rotação no sentido xy, xz e yz).

Durante o bombeamento de rejeitos para o tubo geotêxtil, é possível que ocorra enrugamento ou dobras na superfície do material, especialmente no início da operação, quando a forma do tubo é um retângulo achatado ou nas extremidades do tubo geotêxtil distante da porção central. Essa condição pode gerar uma rigidez no material, que é considerada pelo elemento de casca. Como será visto posteriormente nesta seção, o elemento de membrana não possui rigidez à flexão, sendo mais representativo do comportamento do geotêxtil. Entre os elementos de casca, foi selecionado o S4R, que permite ainda deformação cisalhante.

Na **Figura 3.11**, é apresentado um elemento de casca convencional S4R. A espessura do elemento é definida mediante à utilização do módulo “*Shell Section*” no software Abaqus, em que é estabelecida a dimensão dessa grandeza. Observa-se, ainda, na **Figura 3.11**, que esse tipo de elemento possui 4 nós com 6 graus de liberdade em cada nó (deslocamentos e rotações segundo as direções X, Y e Z) e o ponto central x1 para integração reduzida. A integral reduzida consiste em transformar (reduzir) o elemento para apenas um ponto de integração, simplificando o cálculo.

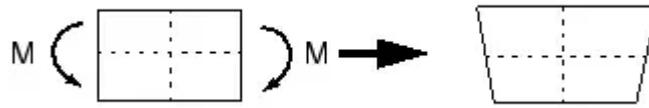
Figura 3.11 – Elemento S4R com integral reduzida



Adotou-se para este tipo de elemento integração reduzida em um único ponto de Gauss “R” na descrição de S4R. Além de acelerar o tempo de processamento, a integral reduzida também previne que ocorra “*hourglass*”, inconsistência a qual a malha modifica-se com energia nula, ou seja, sem tensão e deformação. Ao se reduzir o elemento para um único ponto de integração, essa inconsistência é superada.

Na **Figura 3.12**, é mostrado o esquema de “*hourglassing*” em conjunto com o elemento com integral reduzida. Observa-se que, após aplicação do carregamento, a linha pontilhada não alterou de comprimento e o ângulo entre estas não foi modificado, indicando que a tensão no elemento ficou nula. É importante mencionar que o software Abaqus possui controle automático para verificar essa ocorrência e evitá-la. A existência de “*hourglass*” na análise pode invalidar os resultados e deve sempre ser minimizada.

Figura 3.12 – Esquema de “hourglass”



O elemento de membrana, assim como o de casca, é usado em modelos os quais uma dimensão (espessura) é consideravelmente menor do que as outras dimensões. Esse elemento é do tipo de superfície e transmite força apenas na direção do plano (não há momentos), ou seja, não possui rigidez à flexão. O elemento permite movimentos translacionais (deslocamento na direção x, y e z) e não possui grau de liberdade para rotação. Estudos e modelagem numéricas existentes com geossintéticos e tubos geossintéticos, em sua maioria, consideram o geossintético, descartando a rigidez a flexão (Thamasebipoor *et al.*, 2012; Hamad *et al.*, 2014; Brink, 2014; Górnaiak *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2016) ou levam em conta essa variável com baixo valor de rigidez à flexão (Kim, 2003; Shin *et al.*, 2016).

Seay (1998) utilizou, para o geossintético, rigidez à flexão em sua modelagem numérica, e Cantré (2002) comenta que a representação da forma do tubo geotêxtil não foi a ideal devido a essa consideração. Sun *et al.* (2017) consideram que, em modelagens numéricas que utilizam elementos de barra com rigidez à flexão, há limitação para o modelo. Dessa maneira, acredita-se que o elemento de membrana seja o mais representativo para as modelagens numéricas dos casos estudados.

Na Figura 3.13, há um elemento de membrana. Para o trabalho, foi selecionado o elemento M3D4R que possui quatro nós, integração reduzida e é capaz de modelar um modelo de três dimensões.

Figura 3.13 – Elemento de Membrana M3D4R

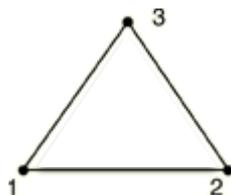


Fonte: Dassault Systèmes, 2014.

Ao executar o software utilizando o elemento de casca, foi identificado um problema no vértice do modelo, o qual a geometria era curva, podendo gerar problemas de convergência. O

ângulo entre o nó do elemento e a força normal era superior a 10° e foi recomendado o refinamento da malha (Dassault Systèmes, 2014). Dessa maneira, elementos com três nós foram utilizados nesta região (Figura 3.14). Para a modelagem com elemento de casca foi selecionado o elemento S3 foi selecionado enquanto que para o elemento membrana, o elemento M3D3 foi selecionado.

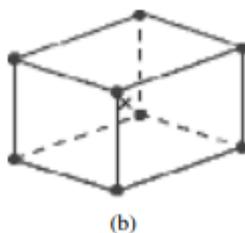
Figura 3.14 Elemento finito com três nós



Fonte: Dassault Systèmes, 2014.

Para representar a fundação rígida, escolheu-se o elemento sólido C3D8R que, conforme apresentado na **Figura 3.15**, possui 8 nós com três graus de liberdade (deslocamentos segundo as direções X, Y e Z), também com integral reduzida e controle de “*hourglassing*”.

Figura 3.15 – Elemento C3D8R com integral reduzida



Fonte: Dassault Systèmes, 2014.

Após definição dos elementos, testes de convergência para verificar a influência do tamanho da malha na precisão da forma e tensões geradas no modelo numérico foram realizados. Ademais, quanto maior o refinamento da malha, maior o tempo de processamento do software.

No software Abaqus 6.14, a malha de elementos finitos é gerada automaticamente. O programa conta ainda com o controle da malha e definição do número de elementos desejados. Além disso, pode-se optar por gerar a malha indicando regiões em que a geometria será mais ou menos refinada, além de outras facilidades.

Para o estudo de convergência, levou-se em consideração um quarto do tubo geotêxtil com o mesmo tamanho de malha, tanto para a superfície superior quanto para a superfície inferior. A discretização da malha foi feita a partir de linhas de referência, localizadas nas extremidades das bordas do modelo. Para os elementos finitos quadrados, as dimensões variaram de 0,08m a 0,04m nos dois eixos de referência do modelo. Dessa maneira, para o primeiro caso, por exemplo, a malha possuía 37 x 13 elementos, totalizando em 494 elementos. Para o segundo caso o modelo possuía 645 elementos e para os demais, conforme **Tabela 3.2**. Já os vértices semi-circulares, foram definidos com intervalo de 0,01, resultando em 8 elementos na divisão.

Variou-se, assim, as dimensões da malha, aplicando um carregamento hidrostático para simular o bombeamento de rejeitos em relação ao interior do tubo geotêxtil. Ao final da análise, foram registradas as tensões na direção circunferencial (X) e na direção axial (Y), bem como os deslocamentos verticais no ponto mais alto da superfície superior. A discretização da malha com 0,08m apresentou problemas de convergência e seus resultados não foram mostrados. Na **Tabela 3.2**, são apresentados os resultados do estudo de convergência.

Tabela 3.2 – Resultados do teste de convergência

| Divisão (m) | Número de elementos | Altura máxima do tubo na direção Z (m) | Tensão na direção circunferencial (X) (MPa) | Tensão na direção axial (Y) (MPa) |
|-------------|---------------------|--|---|-----------------------------------|
| 0,07 | 645 | 0,9957 | 10,1 | 3,23 |
| 0,06 | 900 | 0,9955 | 12,6 | 3,20 |
| 0,05 | 1260 | 0,9953 | 10,1 | 3,26 |
| 0,04 | 2025 | 0,9967 | 9,7 | 3,24 |

Observa-se que não houve grande diferença na ordem de grandeza das variáveis, principalmente relacionada à altura máxima alcançada na seção transversal do tubo geotêxtil. Visando a reduzir o tempo de processamento de dados, foi adotada nesse trabalho a malha com divisão de 0,07. A partir dos testes de convergência, definiu-se, então, a malha que melhor ajustou à geometria estudada do tubo geotêxtil. Na **Figura 3.16** e **Figura 3.18** são abordados os elementos geométricos com a discretização da malha de elementos finitos para o tubo geotêxtil.

Figura 3.16- Malha de elementos finitos do tubo geotêxtil

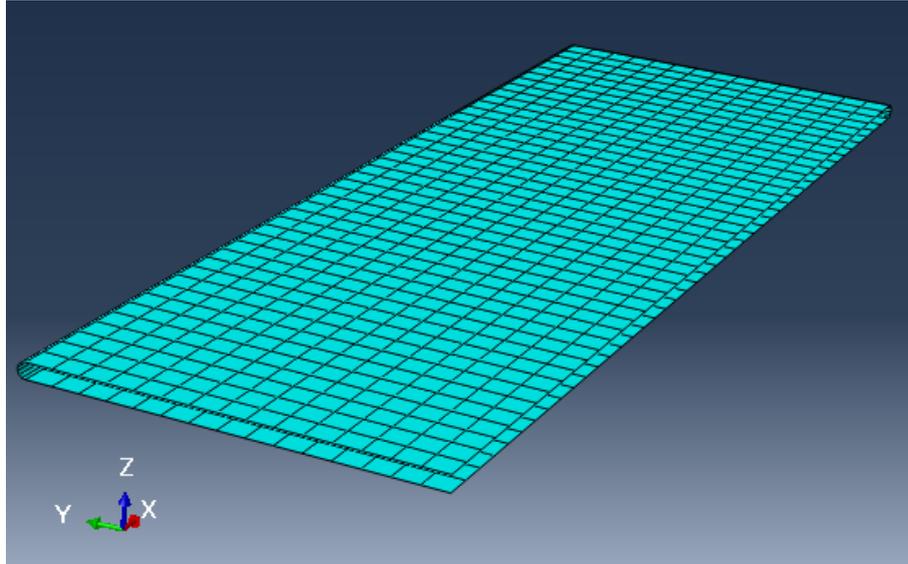


Figura 3.17 – Malha do elemento semicircular

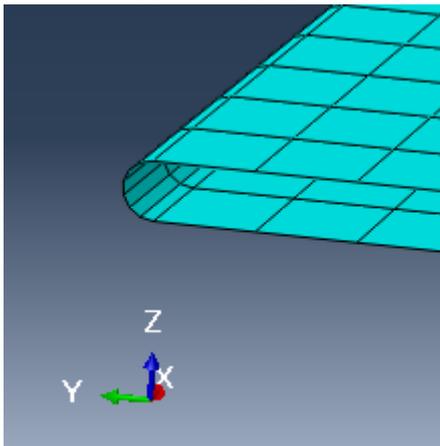
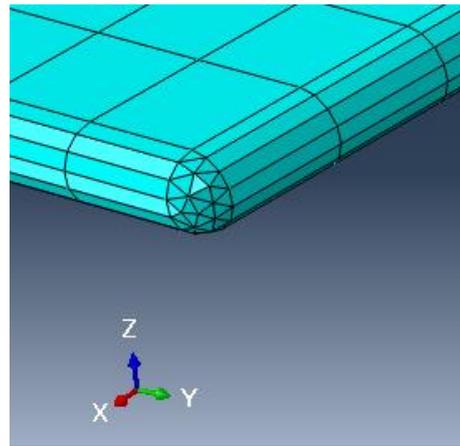
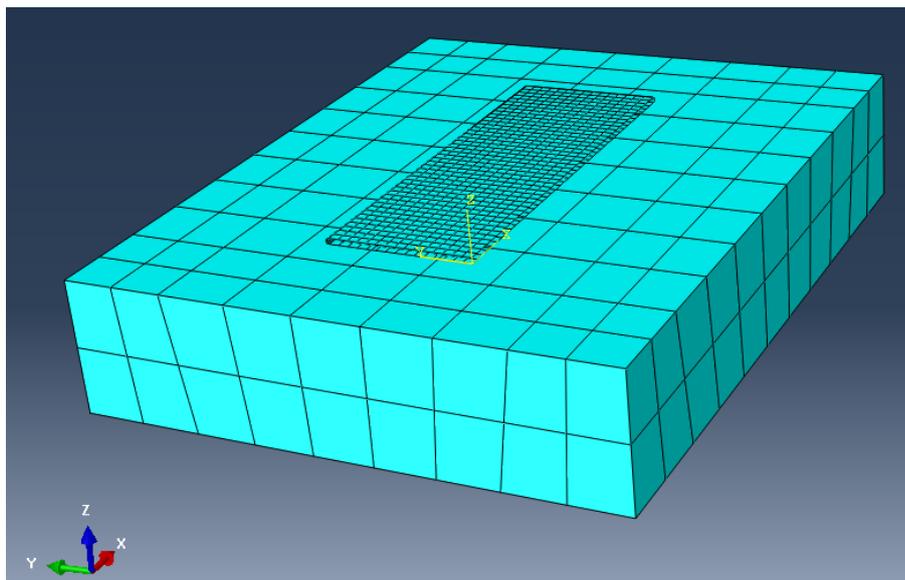


Figura 3.18 – Detalhe da malha do vértice com elemento S3



A fundação, por ser rígida e não ter deslocamentos ou deformações, foi construída com uma malha grosseira com divisões de 0,5m. O modelo final completo é apresentado **Figura 3.19**.

Figura 3.19 – Modelo final da modelagem numérica



Na avaliação do número de tentativas para realizar as iterações durante a etapa de incrementos, foi, inicialmente, utilizado o padrão do Abaqus, que possui tentativas máximas de 05 unidades. Após a conclusão das análises e verificação dos resultados, esse parâmetro foi alterado para 20 unidades, atendendo, assim, à demanda exigida para a resolução do modelo.

3.4.4 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas na fundação do modelo foram as seguintes:

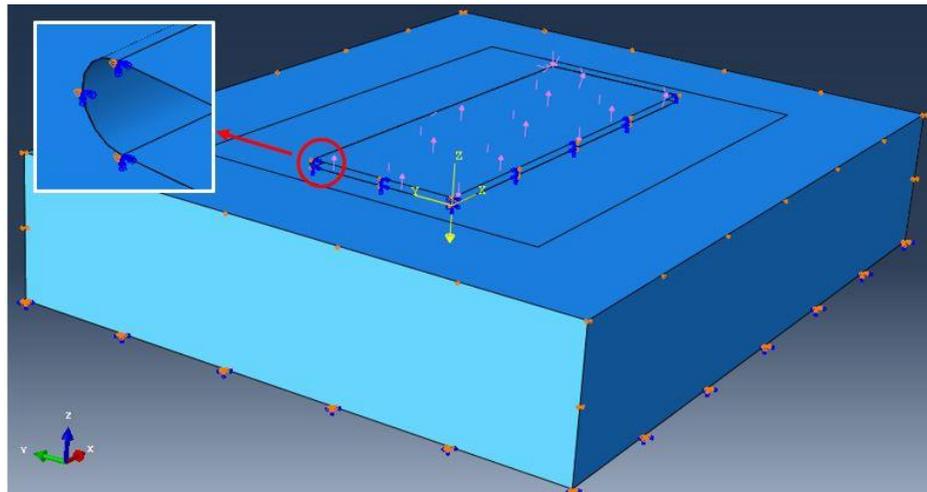
- A base da fundação foi engastada, não permitindo deslocamentos ou rotação em nenhum dos sentidos;
- As laterais da fundação possuíram restrição na direção X ao longo da lateral do eixo Y e restrição na direção Y ao longo da lateral do eixo X.

A fim de obter a geometria do tubo geotêxtil representado por apenas um quarto de sua dimensão, aplicaram-se ainda condições de contorno nos eixos para garantir a condição de simetria. O software Abaqus possibilita a aplicação dessa condição de simetria por padrão ou a restrição pode ser feita manualmente para cada condição de contorno (Direção X, Y e Z) aplicada nos eixos, limitando os movimentos de translação e rotação.

No eixo X do tubo geotêxtil, foi levado em consideração que os nós da malha não poderiam se deslocar no sentido de Y, nem girar ao longo dos eixos X e Z. Os nós da malha, ao longo do eixo Y, não se deslocam na direção X, nem giram ao longo dos eixos Y e Z. Na

Figura 3.20, há representação das condições de contorno aplicadas ao modelo numérico.

Figura 3.20 – Condições de contorno aplicadas e superfície da fundação particionada



3.4.5 Contato

A interface entre o tubo geotêxtil e a fundação rígida foi feita a partir do módulo de interação do software Abaqus, o qual permite a identificação de contato entre duas superfícies ou nós. Para a definição dessa área compartilhada, é exigido que uma das superfícies seja a mestra e a outra escrava.

Segundo Dassault Systèmes (2014), a superfície mestra deve ser aquela que possui maior dimensão entre as duas superfícies, a mais rígida e a que apresente a malha mais grosseira. Dessa maneira, a superfície da fundação foi definida como mestra, uma vez que esta apresenta essas três características, enquanto a superfície inferior do tubo geotêxtil foi definida como escrava.

Conforme pode ser observada na **Figura 3.20**, a superfície de fundação foi particionada, ou seja, ela foi dividida em uma parte menor. Dessa forma, reduziu o seu tamanho, logo, o contato entre as superfícies mestra e escrava é menor, fazendo com que o tempo de processamento do modelo também seja menor.

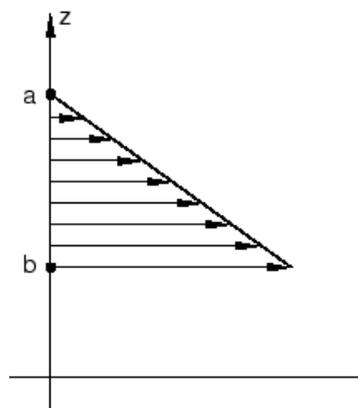
O tipo de interação entre as duas áreas é “superfície-superfície”. Na direção normal à interface, foi permitida a separação após o contato das superfícies, quando tracionada e impedida a penetração da superfície escrava na mestra, quando comprimidas (*Hard Contact*), ou seja, a fundação foi definida como rígida. Já na direção tangencial, foi adotado coeficiente de atrito igual a 0, tendo o mesmo princípio e premissa da maioria dos modelos analíticos estudados. Adotou-se ainda um coeficiente de 0,2 para o atrito, para que a condição da modelagem numérica fosse mais real à existente em campo.

3.4.6 Carregamento

Para a aplicação do carregamento, seguindo as premissas dos modelos analíticos e o encontrado em campo, uma pressão hidrostática foi aplicada internamente ao tubo geotêxtil, visando a modelar o bombeamento de rejeitos, como fluido com alto teor de umidade (baixo teor de sólidos). A ordem de grandeza dessa variável está ligada ao peso específico do rejeito, que é igual a 1,45g/cm³.

Para definir a pressão hidrostática no Abaqus, é necessário definir a coordenada Z onde está atuando a pressão 0 (ponto a - **Figura 3.21**) e o nível o qual opera a pressão hidrostática máxima (ponto b - **Figura 3.21**) ao longo da superfície de carregamento. No caso desta pesquisa, o ponto de maior elevação está localizado no eixo Z. Desta maneira o eixo de coordenada Z foi definido para ocorrer o carregamento. Sendo assim, considerou-se ainda como carregamento a aplicação da gravidade em todo o modelo numérico com magnitude da aceleração da gravidade negativa de -9,807 m/s² no eixo de coordenada Z.

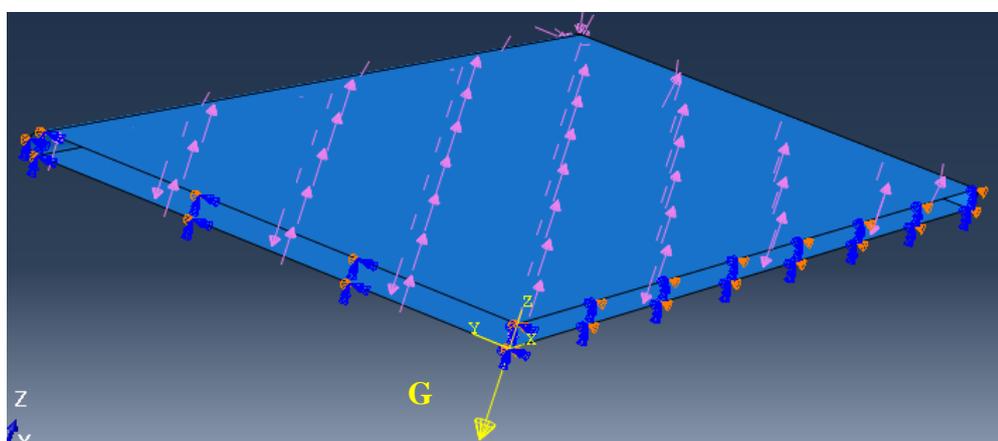
Figura 3.21 – Esquema da distribuição da pressão hidrostática



Fonte: Dassault Systèmes, 2014.

Dependendo da magnitude da pressão interna empregada, o comportamento do carregamento pode ser governado pela aplicação de uma pressão interna uniforme dentro do tubo (Kazimierowicz, 1994), suprimindo a pressão hidrostática, conforme descrito no item 2.4. Dessa forma, foi realizada uma avaliação com aplicação de pressão interna uniforme dentro do tubo geotêxtil em conjunto com outra pressão, agora hidrostática ou novamente pressão interna uniforme, porém isoladamente. Esse carregamento é aplicado uniformemente em toda a superfície. Na **Figura 3.22**, pode-se observar os carregamentos aplicados no modelo.

Figura 3.22 – Carregamentos aplicados no modelo. Pressão interna em setas rosa e gravidade em seta amarela



3.4.7 Descrição dos materiais

A escolha das propriedades dos materiais que serviram como dados de entrada para o programa Abaqus, foi feita com base em ensaios de laboratório e dados encontrados na literatura. Para o tubo geotêxtil, são necessários os parâmetros de módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, massa específica e espessura do material. Sendo assim, Kim (2003) cita que o módulo de elasticidade varia dependendo do tamanho da amostra e da metodologia de ensaio.

Para a fundação, apenas foram adotados parâmetros para ocupar os campos obrigatórios solicitados pelo software, uma vez que estes não influenciam diretamente nos resultados para essa análise, tendo em vista o tipo de fundação adotada correspondente à fundação rígida.

O módulo de elasticidade do geotêxtil tecido de polipropileno foi definido a partir da curva tensão x deformação fornecida pelo fabricante do tubo. O valor obtido corresponde a 1,6GPa, que está próximo à faixa de valores encontrados para esse polímero (1,14GPa a

1,55GPa), conforme apresentado na Tabela 3.3. Contudo, a qualidade da curva fornecida pelo fabricante não estava apropriada e, dessa maneira, buscaram-se outros valores na literatura para definição do módulo de elasticidade.

Tabela 3.3 – Propriedades dos polímeros

| Polímero | Massa específica (kg/m³) | Coefficiente de Poisson | Módulo de Elasticidade (GPa) |
|---------------------------------------|--|--------------------------------|-------------------------------------|
| Polietileno tereftalato (PET) | 940 | 0,33 | 2,76 a 4,14 |
| Polipropileno (PP) | 905 | 0,40 | 1,14 a 1,55 |
| Polietileno de baixa densidade (LDPE) | 925 | 0,33 a 0,40 | 0,172 a 0,282 |
| Polietileno de alta densidade (HDPE) | 959 | 0,46 | 1,08 |
| Policloreto de vinila (PVC) | 1300 a 1580 | 0,38 | 2,41 a 4,14 |

Fonte: Budinski e Budinski, 2001.

Benjamim (2006) realizou ensaios de resistência à tração de faixa larga para um geotêxtil tecido de polipropileno. Como resultado, foi determinado o módulo de elasticidade igual a 0,15 GPa. Já Carvalho e Santos (2007), realizaram estudo sobre a caracterização do polipropileno, chegando ao valor de 0,33 GPa para o módulo de elasticidade. Uma vez que a variabilidade do módulo de elasticidade é elevada, foi realizada retroanálise do trabalho de Freitas Silva (2017), sendo o valor de 0,30 GPa o que mais se adequou às condições encontradas em campo. Sendo assim, variou-se ainda esse parâmetro dentro da faixa encontrada na literatura, 0,16 GPa a 1,6GPa, para verificar a influência deste nos resultados.

A definição do coeficiente do Poisson também foi tomada com base em estudos existentes na literatura relacionados ao geotêxtil tecido, bem como trabalhos associados ao polímero utilizado na fabricação do geossintético. Carvalho e Santos (2007) fizeram estudos para caracterização do polipropileno (PP), chegando a um coeficiente de Poisson de 0,41. Já Budinski e Budinski (2001), indicam o valor de 0,40 para o coeficiente de Poisson, conforme apresenta a **Tabela 3.3**.

Por não existirem muitos estudos para a definição do coeficiente de Poisson para geossintéticos, foram adotados resultados relacionados ao polímero de fabricação do geotêxtil, nesse caso, o polipropileno (PP). Sendo assim, foi realizada análise de sensibilidade a fim de se verificar a influência dessa propriedade nos resultados do modelo. A variação do coeficiente de Poisson não apresentou grande influência nos resultados obtidos e, portanto, o valor de 0,40,

conforme Budinski e Budinski (2001), foi adotado nesta pesquisa. A massa específica do geossintético geralmente não é apresentada no catálogo dos fabricantes existentes no mercado. Dessa maneira, como o polímero de fabricação do geotêxtil influencia no comportamento do material, foi adotada massa específica igual a 905 kg/m^3 , tabela apresentada na **Tabela 3.3**.

Freitas Silva (2017) realizou ensaios de caracterização do geotêxtil utilizado no trabalho de campo, os quais foi realizada a disposição de rejeitos de mineração de ouro em tubos geotêxteis. A espessura do geotêxtil encontrada nos ensaios de caracterização é da ordem de 1,8mm, a mesma informada no catálogo do fabricante. Dessa forma, para o desenvolvimento da modelagem numérica, adaptou-se essa espessura ao geotêxtil.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Métodos analíticos

Neste item serão apresentados os resultados obtidos nos métodos analíticos. Primeiramente, realizaram-se testes na codificação desenvolvida para verificar sua validade e, a partir de então, eles foram aplicados nas comparações de campo e no estudo paramétrico.

4.1.1 Validação do algoritmo desenvolvido no trabalho

A partir da metodologia e procedimentos apresentados no item 3.3 e dos algoritmos desenvolvidos para cálculo dos métodos analíticos, fez-se comparação dos resultados adquiridos dos cálculos com estudos existentes na literatura realizados por Liu (1981), Silvester (1986), Kazimierowicz (1994), Leshchinsky (1996), Guo (2012). Conforme mencionado anteriormente, adotaram-se as metodologias de Plaut e Suherman (1998) e Guo (2014).

Para compreensão dos resultados, apresentar-se-à a seção com os parâmetros geométricos do tubo (Figura 4.1), onde “h” é a altura, “B” é o comprimento em contato com a fundação e “W” a largura. Ademais, são discutidos ainda nesse item parâmetros relacionados aos métodos analíticos a saber:

γ = peso específico do material (kN/m^3);

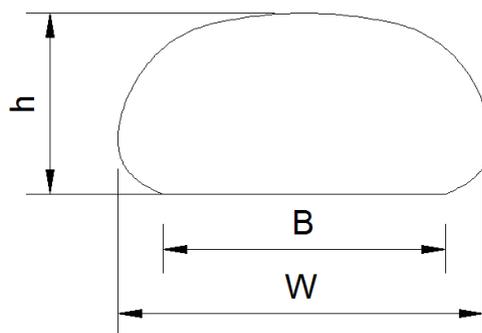
L = perímetro do tubo geossintético (m);

P = pressão interna (kPa);

área = área da seção transversal;

T = tensão circunferencial.

Figura 4.1 – Parâmetros geométricos da seção transversal do tubo geossintético



Os resultados obtidos por meio da algoritmo desenvolvido neste trabalho ficaram muito similares aos encontrados em estudos anteriores, conforme é apresentado nas **Tabela 4.1** a **Tabela 4.5**. Nas referidas tabelas, o valor destacado em cinza refere-se ao obtido a partir do algoritmo desenvolvido no trabalho pela metodologia de Plaut e Suherman (Pesquisa 1) e Guo (Pesquisa 2). Em branco, encontram-se os dados de entrada e resultados obtidos na literatura.

Tabela 4.1 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 20\text{kN/m}^3$

| Parâmetros de entrada | | | | Parâmetros de saída | | | | |
|-----------------------|------|---------|--------------------|---------------------|------|------|------------------------|----------|
| Número | L(m) | P (kPa) | Fonte | h(m) | B(m) | W(m) | Área (m ²) | T (kN/m) |
| 1 | 3,6 | 44,6 | Silvester (1986) | 1,00 | 0,48 | 1,27 | 1,05 | 17,5 |
| 1 | 3,6 | 44,6 | Leshchinsky (1996) | 1,00 | 0,46 | 1,27 | 1,04 | 17,4 |
| 1 | 3,6 | 44,6 | Pesquisa (1) | 0,98 | 0,44 | 1,27 | 1,00 | 17,49 |
| 1 | 3,6 | 44,6 | Pesquisa (2) | 0,98 | 0,44 | 1,24 | 1,00 | 17,10 |
| 2 | 3,6 | 18,1 | Silvester (1986) | 0,70 | 0,94 | 1,45 | 0,89 | 4,2 |
| 2 | 3,6 | 18,1 | Leshchinsky (1996) | 0,75 | 0,95 | 1,42 | 0,90 | 4,2 |
| 2 | 3,6 | 18,1 | Pesquisa (1) | 0,74 | 0,93 | 1,40 | 0,87 | 4,19 |
| 2 | 3,6 | 18,1 | Pesquisa (2) | 0,75 | 0,90 | 1,39 | 0,88 | 4,53 |

Pesquisa (1): metodologia de Plaut e Suherman (1998).

Pesquisa (2): metodologia de Guo (2014).

Tabela 4.2 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 9,81\text{kN/m}^3$

| Parâmetros de entrada | | | | Parâmetros de saída | | | | |
|-----------------------|------|---------|--------------------|---------------------|------|------|------------------------|----------|
| Número | L(m) | P (kPa) | Fonte | h(m) | B(m) | W(m) | Área (m ²) | T (kN/m) |
| 3 | 0,93 | 3,86 | Liu | 0,23 | 0,18 | 0,34 | - | - |
| 3 | 0,93 | 3,86 | Leshchinsky (1996) | 0,23 | 0,16 | 0,34 | - | - |
| 3 | 0,93 | 3,86 | Pesquisa (1) | 0,23 | 0,16 | 0,33 | 0,06 | 0,32 |
| 3 | 0,93 | 3,86 | Pesquisa (2) | 0,23 | 0,16 | 0,33 | 0,06 | 0,33 |

Pesquisa (1): metodologia de Plaut e Suherman (1998).

Pesquisa (2): metodologia de Guo (2014).

Tabela 4.3 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 14\text{kN/m}^3$

| Parâmetros de entrada | | | | Parâmetros de saída | | | | |
|-----------------------|------|---------|----------------------|---------------------|------|------|------------------------|----------|
| Número | L(m) | P (kPa) | Fonte | h(m) | B(m) | W(m) | Área (m ²) | T (kN/m) |
| 4 | 3,6 | 20,4 | Kazimierowicz (1994) | 0,90 | 0,64 | - | - | 6,8 |
| 4 | 3,6 | 20,4 | Leshchinsky (1996) | 0,90 | 0,64 | - | - | 6,9 |
| 4 | 3,6 | 20,4 | Pesquisa (1) | 0,89 | 0,65 | 1,30 | 0,96 | 6,43 |
| 4 | 3,6 | 20,4 | Pesquisa (2) | 0,88 | 0,66 | 1,31 | 0,96 | 6,31 |

Pesquisa (1): metodologia de Plaut e Suherman (1998).

Pesquisa (2): metodologia de Guo (2014).

Tabela 4.4 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 12\text{kN/m}^3$

| Parâmetros de entrada | | | | Parâmetros de saída | | | | |
|-----------------------|------|---------|--------------------|---------------------|------|------|------------------------|----------|
| Número | L(m) | P (kPa) | Fonte | h(m) | B(m) | W(m) | Área (m ²) | T (kN/m) |
| 5 | 9,0 | 20,4 | Leshchinsky (1996) | 2,5 | - | 3,20 | 6,45 | 61,7 |
| 5 | 9,0 | 20,4 | Pesquisa (1) | 2,44 | 1,15 | 3,12 | 6,25 | 61,21 |
| 5 | 9,0 | 20,4 | Pesquisa (2) | 2,43 | 1,17 | 3,13 | 6,25 | 59,74 |

Pesquisa (1): metodologia de Plaut e Suherman (1998).

Pesquisa (2): metodologia de Guo (2014).

Tabela 4.5 – Valores calculados para peso específico do material igual a $\gamma = 10\text{kN/m}^3$

| Parâmetros de entrada | | | | Parâmetros de saída | | | | |
|-----------------------|------|---------|--------------|---------------------|------|------|------------------------|--|
| Número | L(m) | P (kPa) | Fonte | h(m) | B(m) | W(m) | Área (m ²) | T (kN/m) |
| 6* | 4,0 | 2,89 | Guo (2012) | 0,28 | 1,64 | 1,80 | - | 0,16 |
| 6* | 4,0 | 2,89 | Pesquisa (1) | 0,27 | 1,71 | 1,86 | 0,48 | 0,20 |
| 6 | 4,0 | 11,74 | Guo (2012) | 0,87 | 0,90 | 1,50 | - | 2,74 ^A 3,35 ^B |
| 7 | 4,0 | 11,74 | Pesquisa (1) | 0,88 | 0,93 | 1,52 | 1,12 | 3,34 |
| 7 | 4,0 | 11,74 | Pesquisa (2) | 0,88 | 0,93 | 1,52 | 1,12 | 3,37 |

Pesquisa (1): metodologia de Plaut e Suherman (1998).

Pesquisa (2): metodologia de Guo (2014).

*O método de Guo 2014 não foi aplicado no caso por problemas de convergência a baixas pressões.

^Aresultado de laboratório (extensômetros);

^Bresultado do método analítico.

As comparações apresentadas foram realizadas a partir de resultados de variados estudos existentes na literatura com diferentes parâmetros de entrada (pressão interna, peso específico e perímetro). Os resultados próximos mostrados nas tabelas anteriores (linhas brancas x linhas cinzas) indicam que o algoritmo numérico desenvolvido nesse trabalho leva a uma correta geometria associada e a uma correta tensão circunferencial (com uma pequena e aceitável margem de erro devido às aproximações). Tendo em vista a conformidade entre as previsões e os valores encontrados, os métodos analíticos serão utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

4.1.2 Retroanálise do trabalho de campo

A partir do estudo de campo, o qual tubos geotêxteis foram preenchidos hidráulicamente com rejeito de mineração de ouro, descrito no item 3.2, uma retroanálise foi realizada por meio

dos métodos analíticos com o intuito de representar a forma da seção transversal e as tensões geradas *in situ*.

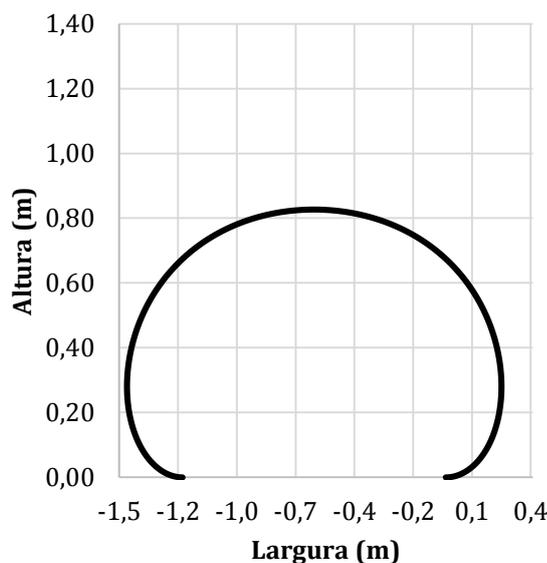
Para a retroanálise, aplicando-se os métodos analíticos, fixou-se o perímetro do tubo geossintético $L = 4,3 \text{ m}$ e o peso específico do material $14,5 \text{ kN/m}^3$. A partir de então, a pressão interna foi sendo ajustada até que fossem encontradas as geometrias da seção transversal coletadas no estudo de campo, altura máxima de $1,00\text{m}$ e largura de $1,67\text{m}$. Obteve-se assim, a pressão atuante em campo no momento da disposição hidráulica.

Primeiramente, foi considerado como pressão interna a pressão hidrostática do rejeito bombeado, sendo aplicada inteiramente na seção do tubo, ou seja, com pressão crescente à medida que a profundidade aumenta. A pressão interna foi calculada a partir do peso específico do rejeito bombeado e altura final do tubo após bombeamento:

$$\text{Pressão} = \gamma \times H = 14,22\text{kN/m}^3 \times 1,00\text{m} = 14,22\text{kPa}$$

A forma final da seção transversal do tubo geotêxtil, depois da aplicação da pressão hidrostática encontrada no resultado do método analítico é apresentada na Figura 4.2. Conforme pode ser observado, a altura do tubo geotêxtil foi de aproximadamente $0,80\text{m}$, isto é, somente a pressão hidrostática, devido ao peso próprio do material ($14,22\text{kPa}$), não é suficiente para alcançar a altura de $1,00$. Dessa maneira, acredita-se que, em campo, estava sendo aplicada uma pressão interna no tubo, além da pressão hidrostática.

Figura 4.2 – Forma do tubo geotêxtil com aplicação da pressão hidrostática de $14,22 \text{ kPa}$

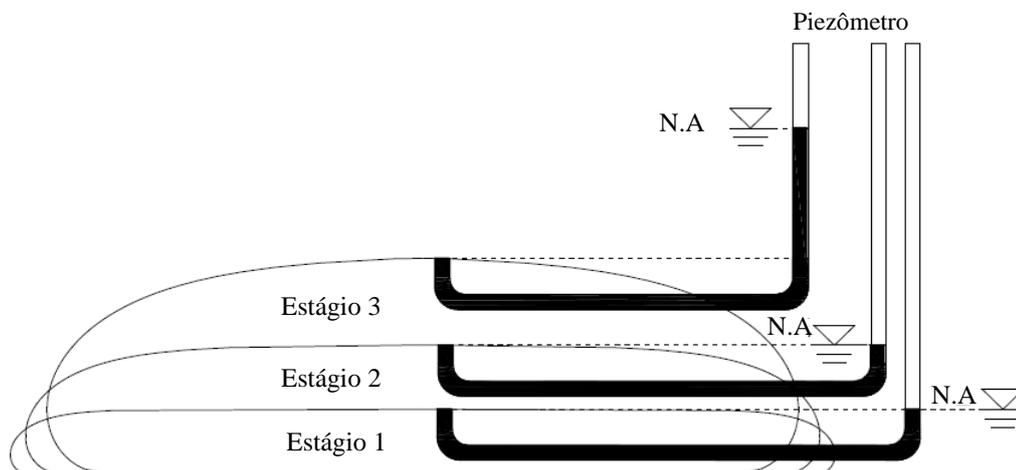


Quando o tubo geotêxtil é preenchido com rejeito sob pressão hidrostática por causa do peso próprio do material, é necessária uma pressão extra, para que uma maior altura seja alcançada. A diferença entre a pressão hidrostática e o excesso de pressão interna no tubo é a pressão de bombeamento, segundo Guo (2012).

A seção descrita acima, encontrada a partir do método analítico considerando apenas a pressão hidrostática devido ao peso próprio do material (Figura 4.2), é a seção de referência. Em outras palavras, a seção de referência é a maior altura que o tubo pode alcançar sem aplicação de pressão interna extra (Guo, 2012). Durante o início do bombeamento, não existe influência desse excesso de pressão, apenas influência da pressão hidrostática.

O desenho esquemático, de como ocorrem as pressões no interior do tubo geotêxtil à medida que ela aumenta, é apresentado na Figura 4.3. No primeiro tubo, o processo ainda está no início do bombeamento e a pressão de enchimento não tem influência na forma do tubo. A partir de certo ponto, é alcançada a altura máxima sem influência da pressão interna (Seção de referência – tubo 2). No tubo 3, observa-se pressão interna, além da hidrostática, sendo aplicada no tubo geotêxtil.

Figura 4.3 – Esquema de aplicação de pressões. Estágio 1: início do bombeamento; Estágio 2: tubo na seção de referência; Estágio 3: tubo com pressão de bombeamento



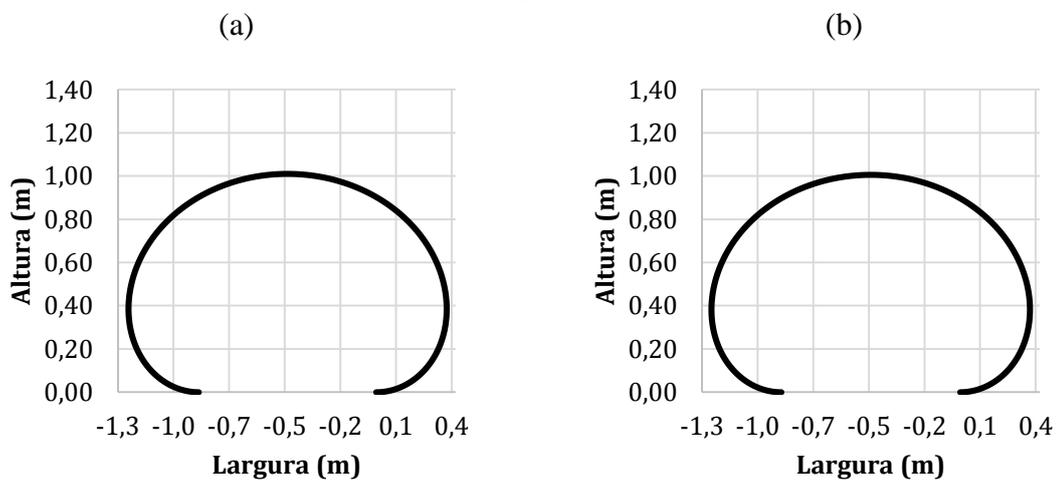
Fonte: Modificado de Guo, 2012.

Visto que a altura obtida para o tubo geossintético foi de aproximadamente 0,80 m e a altura alcançada em campo foi de 1,00 m, buscou-se determinar o excesso de pressão existente em campo capaz de elevar a altura para 1,00m. Para determinação desse excesso de pressão,

variou-se essa grandeza, enquanto que a altura era observada até alcançar a altura de campo. Para tanto, foram comparados os valores da altura H para cada pressão de enchimento aplicada.

O cálculo da forma da seção transversal e da tensão gerada foram realizados pelas codificações das metodologias de Plaut e Suherman (1998) e Guo (2014), tal como descrito no item 3. Para ambos os casos, o excesso de pressão interna, além da pressão hidrostática, necessária para alcançar uma altura de 1,00 m foi de aproximadamente 7kPa, totalizando em uma pressão total de 21kPa. Os resultados encontrados são apresentados na Figura 4.4. Conforme pode ser observado, a forma dos tubos é muito semelhante.

Figura 4.4 – Forma do tubo geotêxtil para a metodologia de: (a) Plaut e Suherman; (b) Guo



Na

Tabela 4.6, apresenta-se a comparação dos parâmetros geométricos, da tensão circunferencial encontradas nos dois modelos e o no estudo de campo. Observa-se que os resultados obtidos são semelhantes, tendo apenas uma pequena margem de erro.

Tabela 4.6 – Comparação dos parâmetros encontrados em campo e nos métodos analíticos

| Estudo | Altura (m) | Largura (m) | Contato com fundação (m) | Área (m ²) | Tensão circunferencial (kN/m ²) |
|--------|------------|-------------|--------------------------|------------------------|---|
| Campo | 0,99 | 1,67 | - | - | - |

| | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|
| Plaut e Suherman | 1,00 | 1,60 | 0,89 | 1,34 | 7,32 |
| Guo | 1,00 | 1,60 | 0,90 | 1,33 | 7,18 |

Dessa maneira, pode-se afirmar que os modelos analíticos aplicados à utilização dos códigos de programação desenvolvidos neste trabalho são capazes de representar a forma da seção transversal, em relação à largura e à altura, durante o enchimento dos tubos geotêxteis em campo. No tocante à tensão circunferencial, como esse parâmetro não foi coletado em campo, a forma apresentou resultados semelhantes. Mediante a isso, acredita-se que, em campo, o geotêxtil estava sendo solicitado por uma tensão de aproximadamente 7,18 kN/m a 7,32 kN/m.

4.1.3 Análise paramétrica

A fim de verificar a influência da pressão de enchimento na forma da seção transversal e na tensão circunferencial dos tubos geossintéticos, realizou-se uma análise paramétrica variando a pressão de enchimento. Em relação ao peso específico do rejeito e o perímetro do tubo, estes eram mantidos constantes, dessa maneira, a pressão interna foi sendo alterada, o formato da seção transversal e a tensão circunferencial atuante foram registradas.

Nas Figura 4.5 e Figura 4.6, as geometrias alcançadas para o intervalo de pressão interna total de 5 kPa a 200 kPa foram mostradas. Assim, adotou-se esse intervalo, uma vez que, em campo, pode-se encontrar valores dessa magnitude e, para esse nível de pressão, o geotêxtil é solicitado com uma tensão superior a de resistência do material, que é de aproximadamente 109,4 kN/m. Para as duas primeiras pressões (5kPa e 10kPa), foi utilizada apenas a metodologia de Plaut e Suherman devido a problemas de convergência da metodologia de Guo.

Figura 4.5– Geometria metodologia dePlaut e Suherman.

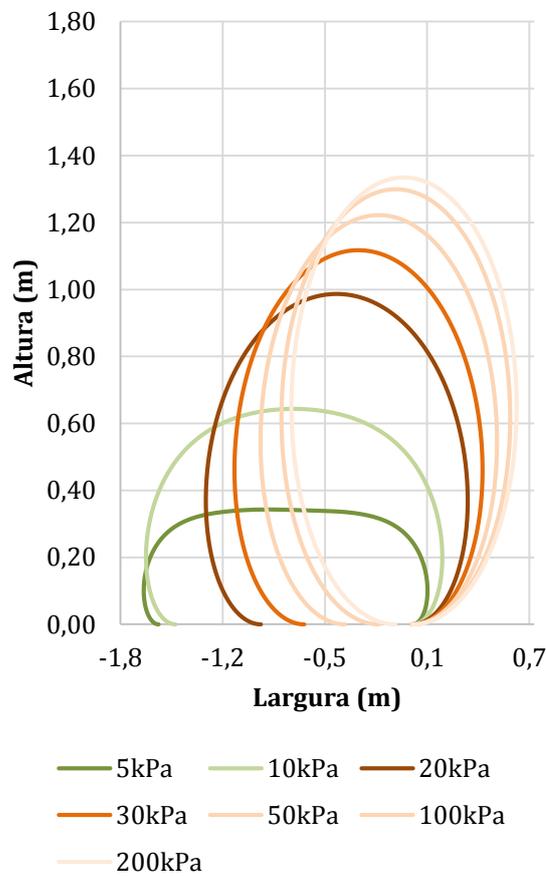
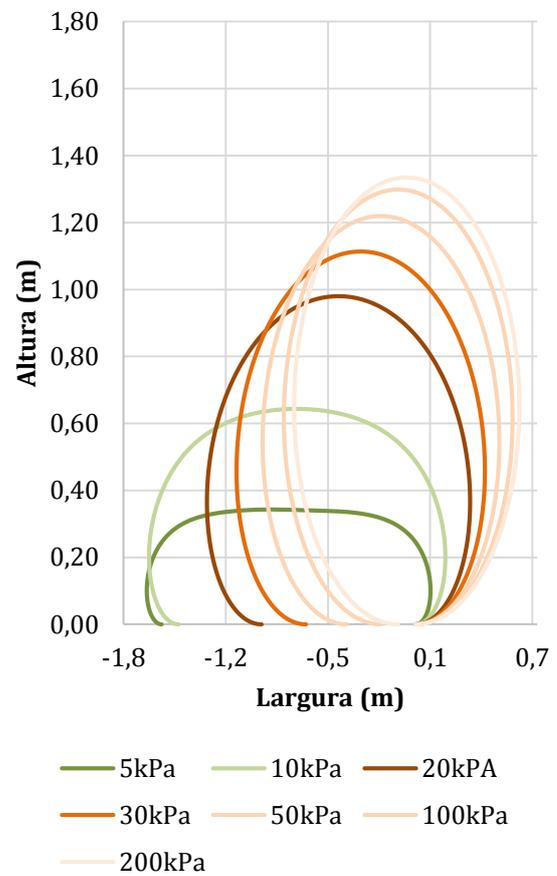


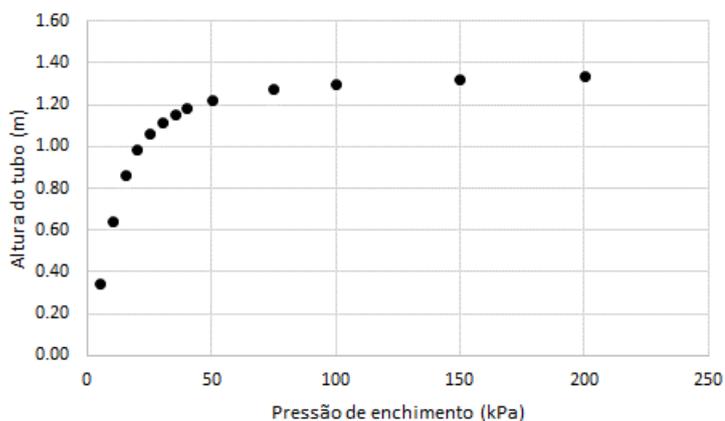
Figura 4.6 – Geometria para metodologia de Guo.



*5 kPa e 10 kPa foram feitas a partir de Plaut e Suherman.

Nas figuras anteriores, foram apresentados os efeitos da pressão de enchimento na geometria do tubo. Por conseguinte, observou-se que, em baixas pressões, um pequeno aumento na pressão leva a um significativo aumento na altura do tubo. Entretanto, além da pressão de aproximadamente 50kPa, o aumento da altura não é tão relevante, ou seja, a seção do tubo tende à forma de um círculo, enquanto sua largura é reduzida para compensar o aumento da altura. Esse comportamento é observado nas Figura 4.7 e Figura 4.9. Por não ser considerada a deformação nos métodos analíticos, a seção tende a um formato circular.

Figura 4.7 – Variação da altura da seção com a pressão de enchimento – Plaut e Suherman



Com o aumento da pressão de bombeamento, a tensão atuante no geossintético também cresce, assim como a resistência necessária para o tubo geossintético não romper e ficar dentro do limite de resistência do material (Figura 4.8). Dessarte, buscou-se também um ajuste por meio de equação, sendo a mais adequada a de comportamento linear.

A pressão de enchimento em linhas de dragagem e bombeamento podem chegar a valores de aproximadamente 300kPa (Plaut e Suherman, 1998). Para esses níveis, a tensão circunferencial solicitada supera 120 kN/m, cujo valor é maior do que a resistência garantida pelo fabricante. Dessa maneira, o controle inadequado em campo da pressão de bombeamento pode levar à ruptura do geotêxtil, comprometendo a segurança da estrutura. Conseqüentemente, para reduzir o risco de uma pressão de enchimento excessiva, a administração rigorosa das pressões de entrada é essencial.

Na Figura 4.9, a variação da largura da seção transversal do tubo geotêxtil com a pressão de enchimento foi apresentada. Dessa forma, observa-se que a largura diminuiu com o aumento da pressão, tendendo à linearidade à medida que a forma da seção transversal aproxima-se de um formato circular.

Figura 4.8 – Variação da tensão circunferencial com a pressão de enchimento – Plaut e Suherman

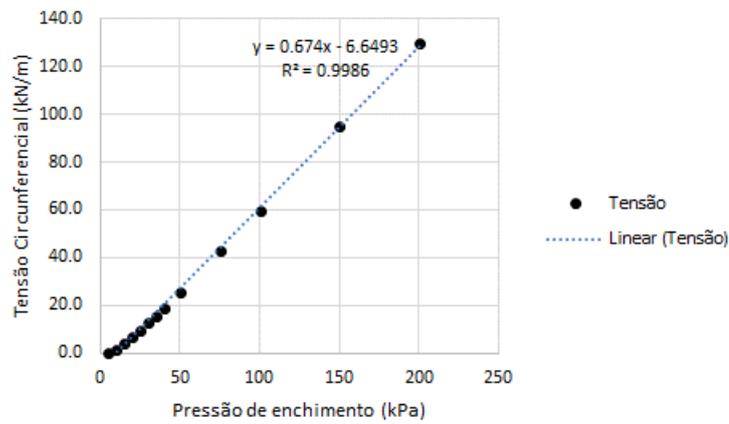
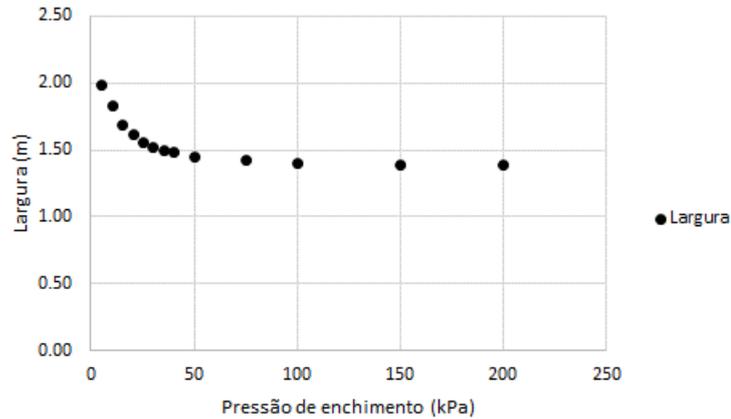
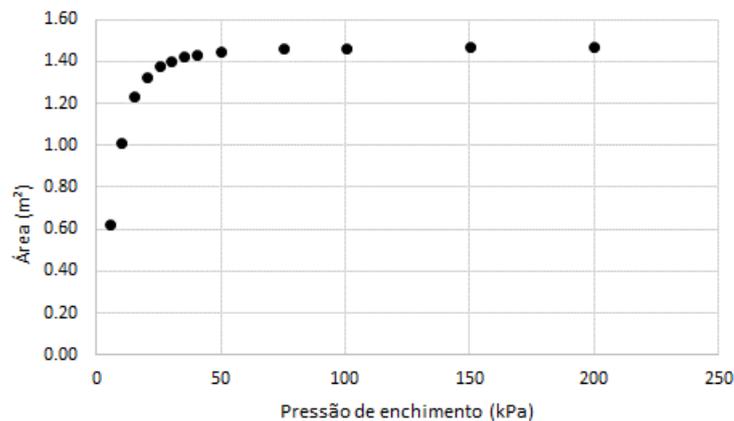


Figura 4.9 – Variação da largura com a pressão de enchimento – Plaut e Suherman



A variação da área da seção transversal do tubo geotêxtil é apresentada na Figura 4.10. Considera-se que o comportamento é semelhante ao da variação da altura, porém com maior sensibilidade em pressões mais baixas.

Figura 4.10 – Variação da área com a pressão de enchimento – Plaut e Suherman



4.2 Modelagem numérica

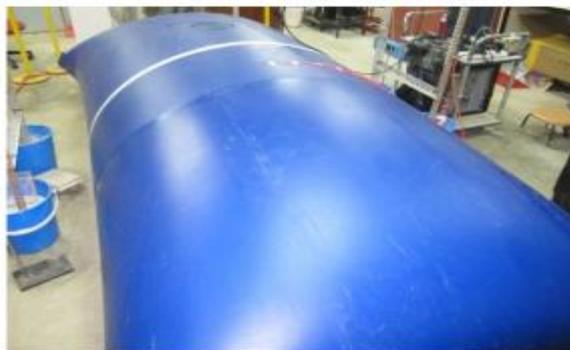
Nesta seção, são mostrados os resultados das modelagens numéricas que foram realizadas a partir da metodologia descrita no item 3.4. Primeiramente, realizou-se uma validação das análises, utilizando os resultados do estudo de Guo (2012) para comparação. Posteriormente, fez-se uma retroanálise do estudo de campo, a qual dispôs rejeito de mineração de ouro em tubos geossintéticos e, por fim, analisou-se parametricamente no intuito de se verificar a influência da pressão de enchimento na forma e nas tensões geradas no tubo geossintético.

4.2.1 Validação da modelagem numérica

Guo (2012) desenvolveu, em laboratório, testes em tubos geossintéticos impermeáveis constituídos de policloreto de vinila (PVC) com 0,6mm de espessura. As dimensões dos tubos corresponderam a 1,0; 1,5 e 2,0 m de largura e 2,0; 3,0 e 4,0 m de comprimento. Para a validação apresentada nesta pesquisa, foi selecionado o tubo de maior dimensão representado por 2,0 m de largura e 4,0m de comprimento.

A estrutura foi instrumentada e monitorada por sensores de deslocamento, extensômetros, piezômetros e laser, medida que possibilitou a realização de todas as medições relacionadas à geometria e às tensões geradas durante o enchimento do tubo geossintético. Com a instrumentação instalada, o desempenho do tubo geossintético sobre a pressão de enchimento foi avaliada. Na Figura 4.11, é apresentada a imagem do experimento. A maior altura alcançada foi de 0,87m, com um excesso de pressão interna de 3,21 kPa, resultando em uma pressão total de 11,50 kPa.

Figura 4.11 – Modelo físico estudado em laboratório

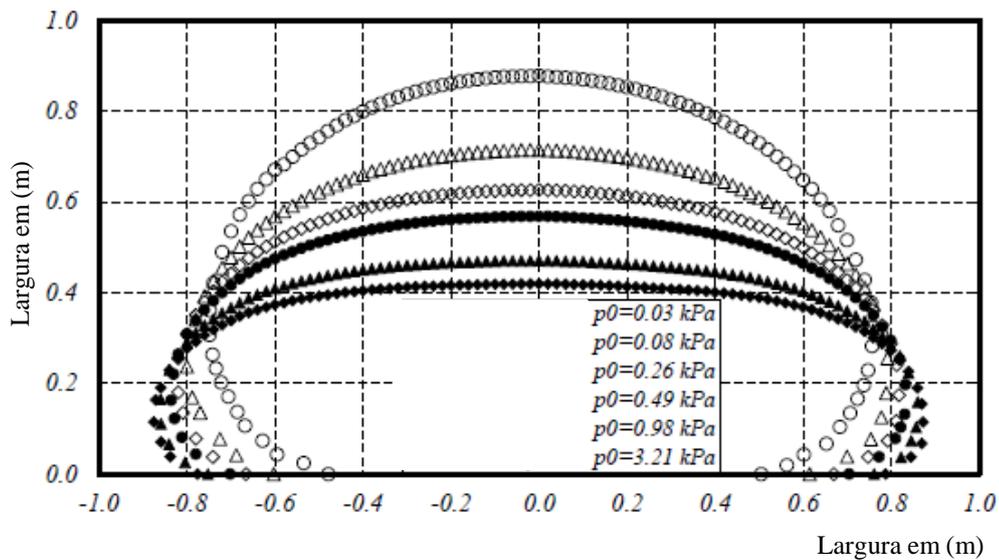


Fonte: Guo,2012 .

As seções transversais encontradas no experimento para diferentes pressões de enchimento são apresentadas na

Figura 4.12. Observa-se que, quanto maior a pressão aplicada, maior a altura alcançada na seção, tendendo a um formato circular, confirmando os resultados obtidos com os métodos analíticos descritos anteriormente.

Figura 4.12 – Seções transversais em função da pressão de enchimento



Fonte: Guo, 2012.

As tensões geradas, alcançadas por meio dos extensômetros, ficaram instáveis para esse experimento e um pouco abaixo do encontrado, utilizando-se o método analítico, conforme pode ser observado na

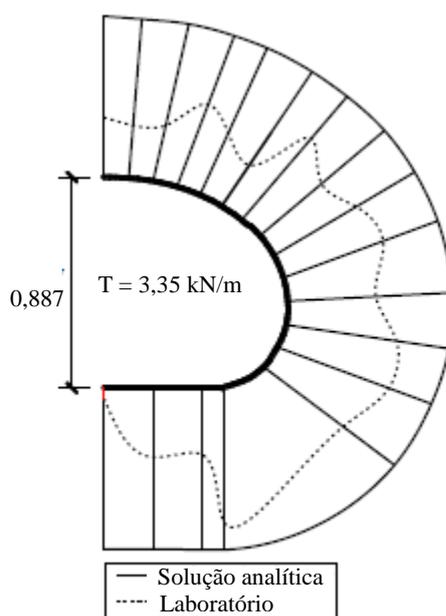
Figura 4.13. Já para os demais testes, apesar da variabilidade da tensão por causa das dificuldades da instalação dos extensômetros, as tensões foram semelhantes às encontradas no método analítico. Dessa maneira, para validação do modelo, buscou-se comparar o resultado da modelagem numérica com a tensão obtida no método analítico equivalente a 3.35kN/m.

A partir dos resultados adquiridos no laboratório, a modelagem numérica realizada nessa dissertação foi realizada por meio do software Abaqus, versão 6.14. Foram adotadas as mesmas dimensões do experimento, porém 1/4 da geometria – com dois eixos de simetria, sendo que, para o geossintético, foi utilizado módulo de elasticidade de 25MPa (Zanten, 1986),

coeficiente de Poisson de 0.38 (Budinski e Budinski, 2001) e massa específica de 1000kg/m^3 (Zanten, 1986).

Ao se impor a espessura do geossintético utilizado no experimento, 0.6mm, o software apresentou problemas de convergência, não sendo possível finalizar a modelagem numérica. Esse problema é reportado pelo próprio manual do programa, conforme descrito “*elementos finos tendem a possuir baixa estabilidade durante os incrementos*” (Dassault Systèmes, 2014).

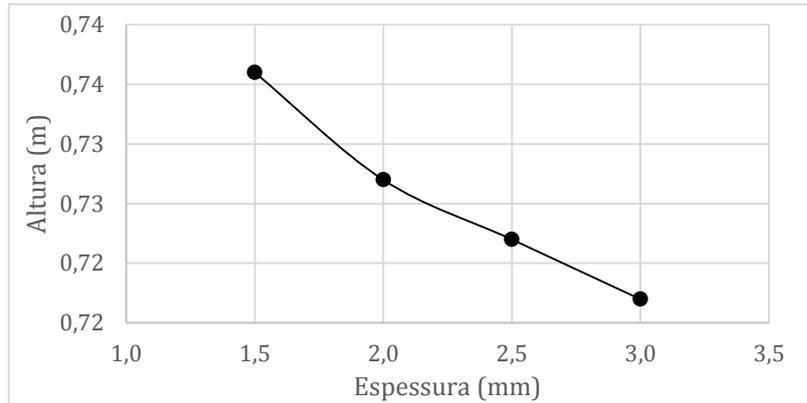
Figura 4.13 – Comparação da tensão circunferencial (experimento de laboratório com método analítico)



Fonte: Guo, 2012.

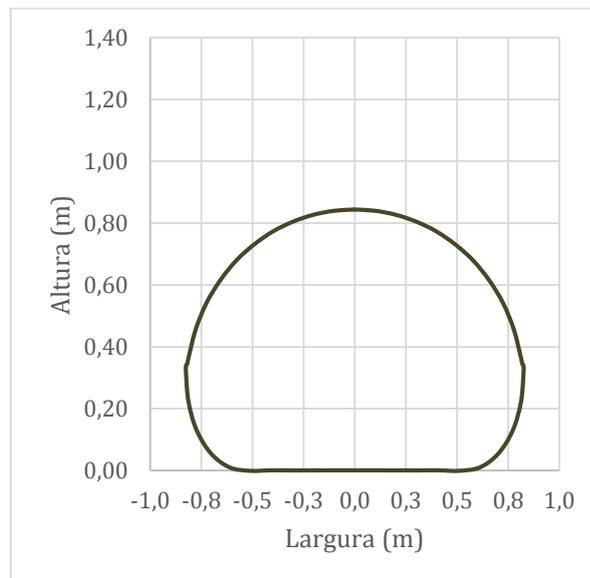
Destarte, variou-se a espessura do geossintético no software com o intuito de verificar sua influência nos resultados da modelagem numérica. Conforme pode ser analisado, na Figura 4.14, mantendo-se constante todas as variáveis, quanto menor é a espessura, maior a altura alcançada pelo tubo (aproximadamente 0.01m para cada 0.5mm de espessura). Sendo assim, buscou-se modelar uma espessura que apresentasse convergência numérica, $1,5\text{mm}$, uma vez que abaixo desse valor, a modelagem numérica não convergia. Extrapolou-se assim, de maneira linear, o resultado para a espessura do geossintético utilizado no laboratório ($0,6\text{mm}$).

Figura 4.14 – Variação da altura da seção transversal com a espessura do geossintético



Na Figura 4.15, pode-se visualizar a seção transversal do tubo geossintético encontrada na modelagem numérica. Observa-se que a altura alcançada foi de aproximadamente 0,83 m. Tendo em vista a variação aproximadamente linear da altura com a espessura do geossintético (Figura 4.14), pode-se concluir que, para a espessura do material (0,6 mm), a altura da seção transversal é de aproximadamente 0,85 m. Essa altura é bem próxima do valor encontrado no experimento realizado em laboratório, 0,87 m, o que indica que o modelo numérico representou adequadamente a forma final do tubo geossintético.

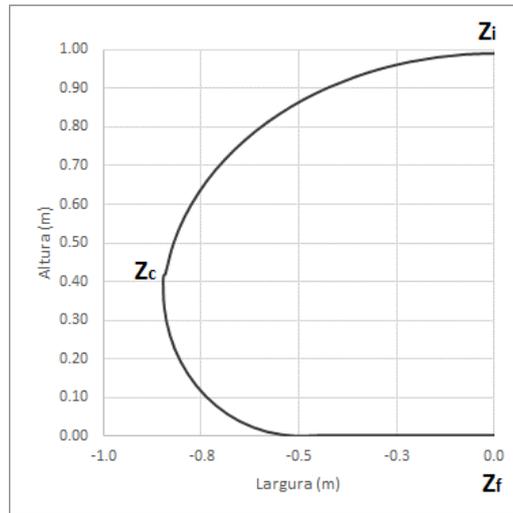
Figura 4.15 – Seção transversal obtida por meio do software Abaqus (e=1,5 mm)



Para avaliar as tensões no tubo, foram determinados dois pontos de referência, conforme apresentado no modelo criado (Figura 4.16 e Figura 4.17). O elemento Zi representa o ponto

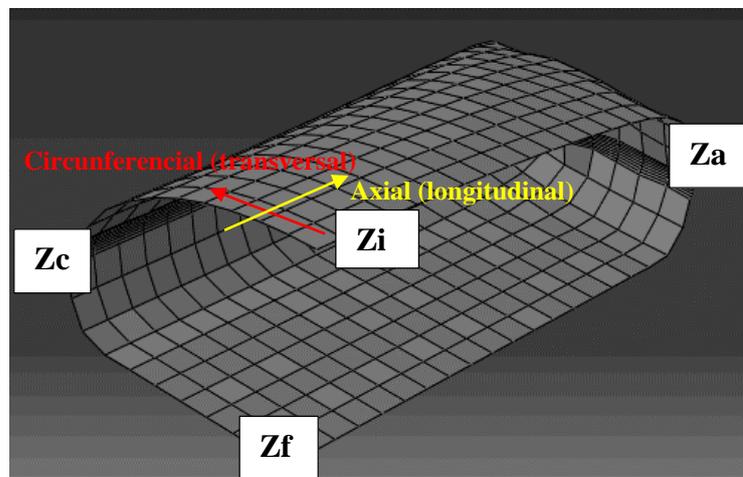
mais alto da seção e o elemento Zf representa o ponto mais baixo da seção. A avaliação foi feita partindo do ponto inicial Zi, percorrendo toda a seção, passando pelos pontos Zc (seção transversal - circunferencial), Za (seção longitudinal - axial) até o ponto final Zf.

Figura 4.16 – Pontos de referência na seção transversal para avaliar as tensões



Na Figura 4.17, ainda há o sentido das tensões circunferencial e axial para ficar mais claro a orientação destas. Em vermelho está a tensão circunferencial, que ocorre no sentido transversal ao tubo geossintético e em amarelo está a atenção axial, que acontece no sentido longitudinal ao tubo geossintético. Ambas as tensões foram obtidas ao longo dos eixos do tubo.

Figura 4.17 – Identificação dos pontos de referência no modelo numérico

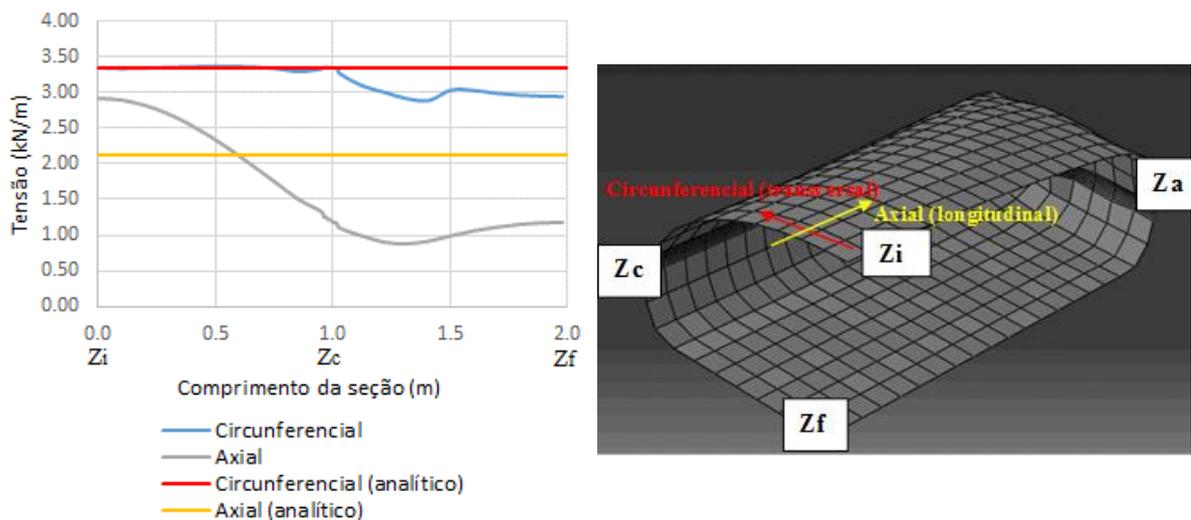


A variação da tensão ao longo da seção transversal (passando por Z_c) do geossintético é apresentada na

Figura 4.18. Por meio dela se observa que a tensão circunferencial (sentido transversal) no ponto de maior altura do tubo geossintético é equivalente a 3,34 kN/m, semelhante à tensão encontrada no método analítico indicada em vermelho (3,35kN/m). A partir do momento em que a seção passa pelo ponto de maior curvatura (Z_c), a tensão circunferencial na parte inferior do tubo geossintético fica ligeiramente menor em relação à parte superior, onde ocorre o contato com a fundação. De acordo com Lawson (2008), Figura 2.19, esperava-se que uma maior tensão circunferencial atuasse na extremidade do tubo, local onde é encontrada a sua maior curvatura. Esse comportamento não foi observado na modelagem numérica.

Em relação à tensão axial (sentido longitudinal) ao longo da seção transversal, analisa-se que esta tem menor magnitude que a tensão circunferencial. A tensão inicia na ordem de 3,0 kN/m e diminui ao longo da seção até o contato com a fundação, onde permanece mais estável. Calculou-se a tensão axial por meio da tensão circunferencial do método analítico a partir da relação de 0,63 de Palmerton (2002) apresentada na Figura 2.20 e em amarelo a seguir. A ordem de grandeza ficou semelhante à média dos valores encontrados na modelagem numérica.

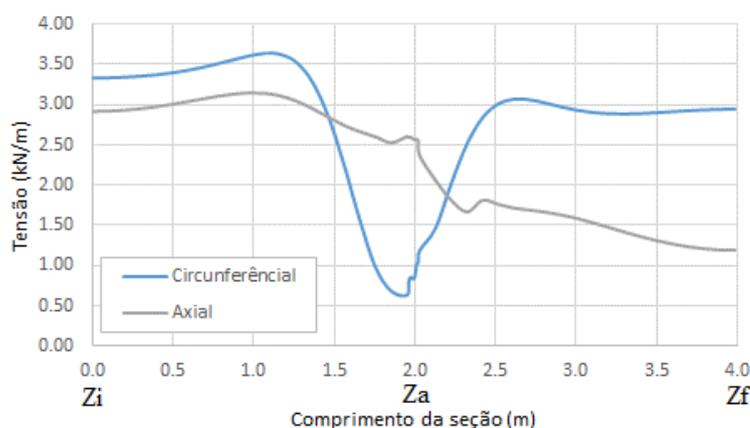
Figura 4.18 – Variação das tensões ao longo da metade da seção do tubo – Seção transversal



As tensões circunferencial e axial, ao longo da seção longitudinal do tubo geossintético (passando por Z_a)m são apresentadas na

Figura 4.19. A partir dela infere-se que esta possui comportamento diferente em relação à tensão ao longo da seção transversal. Para a região de curvatura, as tensões ficaram menores se comparadas à parte superior e à parte em contato com a fundação. Assim, nota-se ainda que a tensão varia longitudinalmente ao longo da superfície do geossintético.

Figura 4.19 – Variação das tensões ao longo da metade da seção do tubo – Seção longitudinal



A partir dos resultados, conclui-se que a determinação das tensões ao longo da seção longitudinal e próximo à extremidade do tubo geossintético (Z_a) é mais complexa do que a determinação das tensões ao longo da seção transversal, o que pode ser o motivo pelo qual os métodos analíticos adotam como simplificação a seção transversal, sendo como representativa do tubo geossintético. A região da extremidade apresenta dobras e a geometria é não linear, dificultando a convergência dos resultados.

4.2.2 Retroanálise dos Ensaios de Campo de Freitas Silva (2017)

A partir das dimensões do tubo geotêxtil adquiridas nos ensaios de campo de Freitas Silva (2017), descrito no item 3.2, foi realizada retroanálise da forma da seção transversal do tubo geotêxtil de maneira a obter-se as tensões geradas e pressão interna *in situ*. As dimensões

principais da seção transversal, medidas no ensaio de campo, foram a altura máxima da seção transversal de 1,00 m e a largura da seção transversal de 1,67m.

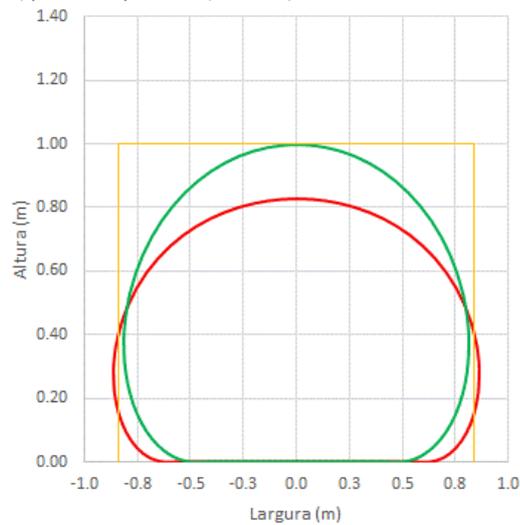
Após a definição da geometria, malha de elementos finitos, propriedade dos materiais e condições de contorno e carregamentos, aplicou-se um carregamento hidrostático, ou seja, com pressão crescente à medida que a profundidade é aumentada referente ao peso próprio do material. A altura máxima alcançada em campo correspondeu a 1,0 m de altura. A pressão considerada foi calculada, assim como na análise com métodos analíticos, a partir do peso específico do rejeito bombeado e da altura final do tubo após bombeamento, chegou-se ao valor de 14,22 kPa.

A altura final do tubo geotêxtil, após a aplicação dessa pressão hidrostática, é apresentada em vermelho na Figura 4.20. Sendo assim, observa-se que a altura máxima na seção analisada foi de 0,826 m, valor bem próximo ao alcançado na retroanálise analítica, em que foi encontrado 0,82 m. Entretanto, esses valores são inferiores ao mencionado no experimento *in situ*, isto é, representam a seção de referência do tubo geotêxtil. Sabe-se, então, que existia internamente no tubo um excesso de pressão, além da pressão hidrostática necessária para obter a seção de referência.

Com propósito de encontrar a pressão de bombeamento aplicada, modificou-se esse valor, enquanto as alturas e pressões internas aplicadas eram avaliadas, até se alcançar a elevação de 1,0 m no tubo geossintético. A seção em verde apresentada na Figura 4.20 mostra a forma do tubo com 1,0 m de altura. Para comparação, é mostrado ainda, em amarelo, as dimensões adquiridas em campo (1,0 m de altura e 1,67 m de largura).

Para essa condição, foi necessária a aplicação de uma pressão interna extra de aproximadamente 7 kPa, totalizando em 21,33 kPa, equivalente a 1,5m de coluna de rejeito de ouro ($P = 13,22 \text{ kN/m}^3 \times 1,50\text{m} = 21,33\text{kPa}$). Esse valor ficou bem próximo da pressão de enchimento do método analítico que foi de 21,23kPa.

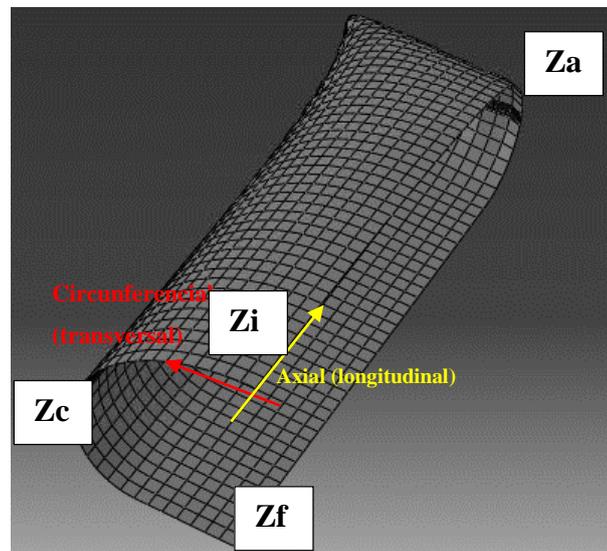
Figura 4.20 – Seção transversal do tubo para pressão hidrostática correspondente a $H=1,0\text{m}$ - (vermelho), $H = 1,5\text{m}$ - (verde) e dimensões de campo em amarelo



Em relação às medidas laterais (maior largura da seção transversal do tubo geotêxtil), pode-se afirmar que as dimensões da seção transversal do tubo geossintético obtidas a partir da modelagem numérica ficaram bem semelhantes em relação às dimensões encontradas no estudo de campo. Enquanto na primeira o tubo ficou com 1,63m de largura, em campo a medida foi de 1,67m.

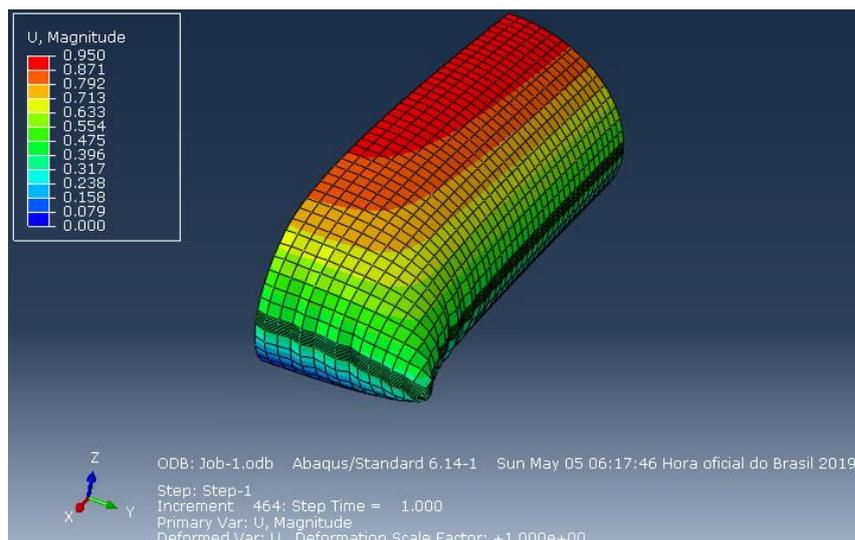
Na Figura 4.21, a malha de elementos finitos e a forma final do tubo geossintético apresentada correspondente à análise para pressão hidrostática equivalente a 1,5m de coluna de rejeito. Assim como no item 4.2.1, ainda é apresentado o sentido das tensões geradas no tubo geossintético, bem como pontos de referência (Z_i – ponto inicial, Z_c – ponto da extremidade do sentido transversal, Z_a – ponto da extremidade do sentido longitudinal, e Z_f – ponto final).

Figura 4.21 – Resultado da modelagem numérica com os pontos de referência – malha de elementos finitos



Os deslocamentos verticais do tubo geossintético são mostrados na Figura 4.22. Desse modo, é possível afirmar que os maiores deslocamento ocorrem na parte central e superior do tubo, destacado em vermelho na escala de cor. O deslocamento vertical máximo obtido foi da ordem de 0,95 m. Somando-se a distância inicial entre as superfícies de 0,05 m, chega-se à altura do ensaio de campo de 1,00 m.

Figura 4.22 – Deslocamentos verticais no tubo geotêxtil (medidas em metros).



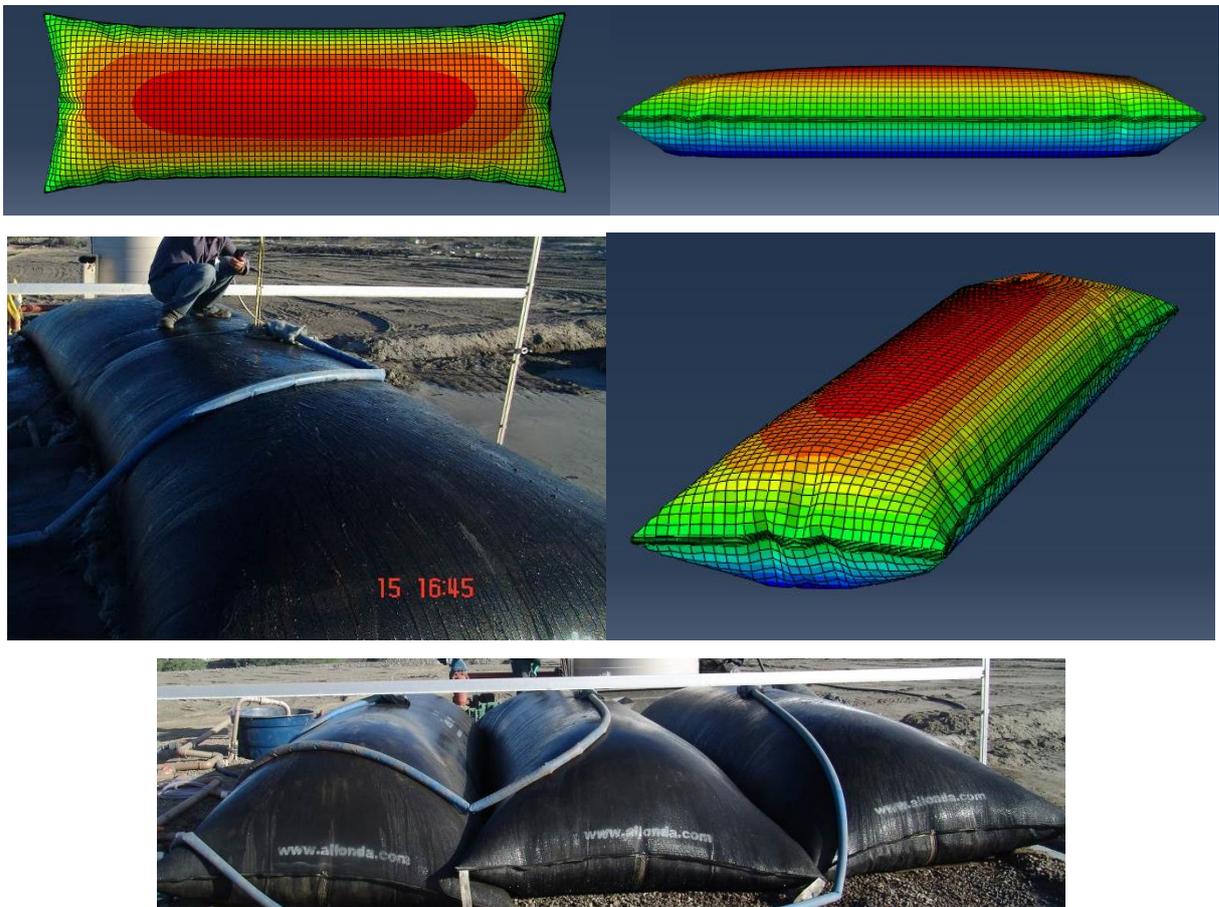
Foi realizada ainda uma simulação representando o tubo geossintético completo. O formato resultante é apresentado na Figura 4.23, onde se pode identificar que ficou similar à encontrada no modelo numérico com apenas um quarto do tubo. Apresentam-se ainda algumas imagens do trabalho de campo, indicando os formatos transversal e longitudinal aparentemente semelhantes aos encontrados na anmodelagem numérica. Para se ter uma maior precisão em relação ao formato, principalmente ao contato com afundação, são necessários novos instrumentos para um monitoramento assertivo da forma do tubo geotêxtil.

Diferentemente das tensões geradas no tubo geotêxtil encontradas a partir do modelo analítico, na modelagem numérica, as tensões não são assumidas constantes e são mais representativas da situação que ocorre em campo (Lawson, 2008).

Na Figura 4.24

Figura 4.24, são abordadas as tensões geradas nos sentidos transversal (circunferencial) e longitudinal (axial) no tubo geotêxtil ao longo da seção transversal, passando por Z_c do tubo geossintético. A tensão é apresentada a partir do ponto mais alto superfície superior (Z_i), percorrendo toda a extensão da seção, perpassando pela borda (Z_c) até alcançar a extremidade da superfície inferior (Z_f).

Figura 4.23 – Resultado da análise numérica com o tubo geotêxtil inteiro após preenchimento e tubo em ensaio de campo

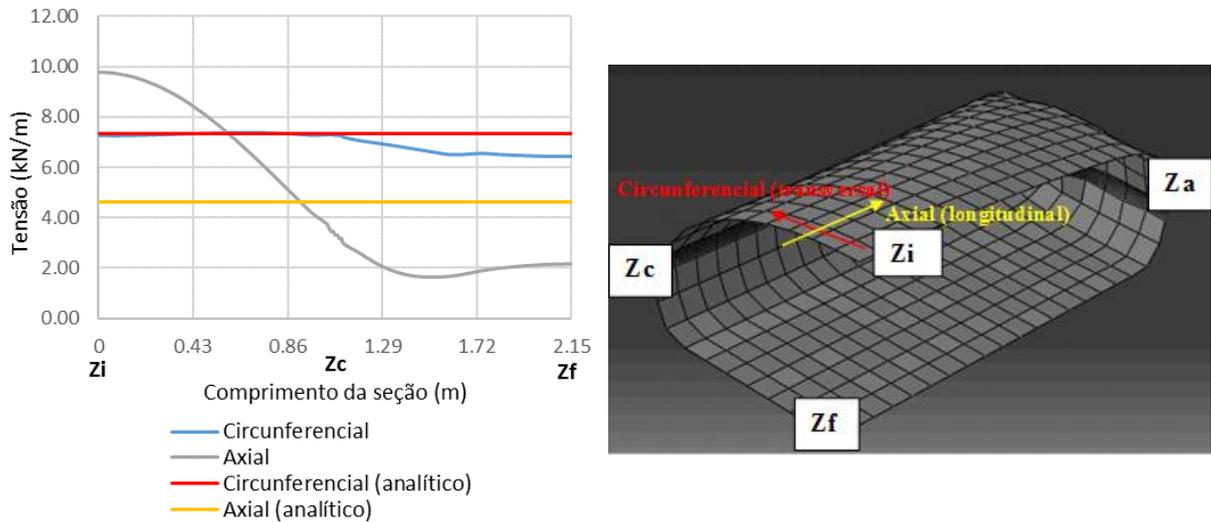


Na Figura 4.24, a linha azul representa a tensão circunferencial ao longo da seção transversal, enquanto a linha cinza simboliza a tensão axial ao longo da seção transversal. Por conseguinte, observa-se que a tensão circunferencial começa com o valor positivo (está sob tração) e possui menor magnitude quando entra em contato com a fundação. Ainda, é apresentada, em vermelho, a tensão correspondente ao método analítico (7,32 kN/m), que ficou bem próxima do valor encontrado na modelagem numérica (7,28 kN/m). Conforme mencionado anteriormente, essa é considerada constante ao longo da seção transversal do tubo geossintético.

A tensão axial, representada pela linha cinza, começa com valor de aproximadamente 10kN/m na parte superior do tubo geotêxtil, reduzindo sua quantidade até a região de contato com a fundação, assim permanece aproximadamente constante nessa região. Essa tensão obtida, por meio do método analítico e relação de Palmerton (2002), é representada pela linha amarela.

Por fim, identifica-se que a ordem de grandeza do método analítico (4,61 kN/m) é semelhante a da modelagem numérica (4,47 kN/m)

Figura 4.24 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção transversal



Na Figura 4.25 a linha azul representa a tensão no sentido circunferencial, enquanto a linha cinza simboliza a tensão axial ao longo da seção longitudinal. A tensão no sentido circunferencial tem comportamento semelhante à seção transversal na porção superior e inferior do tubo. Na extremidade, observa-se que a tensão fica maior e praticamente nula na região de maior curvatura. A tensão axial possui comportamento semelhante à tensão ao longo da seção transversal, porém, aumentando seu valor próximo à extremidade.

Na região da borda do tubo geotêxtil, é possível observar que este apresentou dobras e torção no modelo numérico e em campo (Figura 4.26). Essas imagens justificam o comportamento das tensões nessa região.

Figura 4.25 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção longitudinal

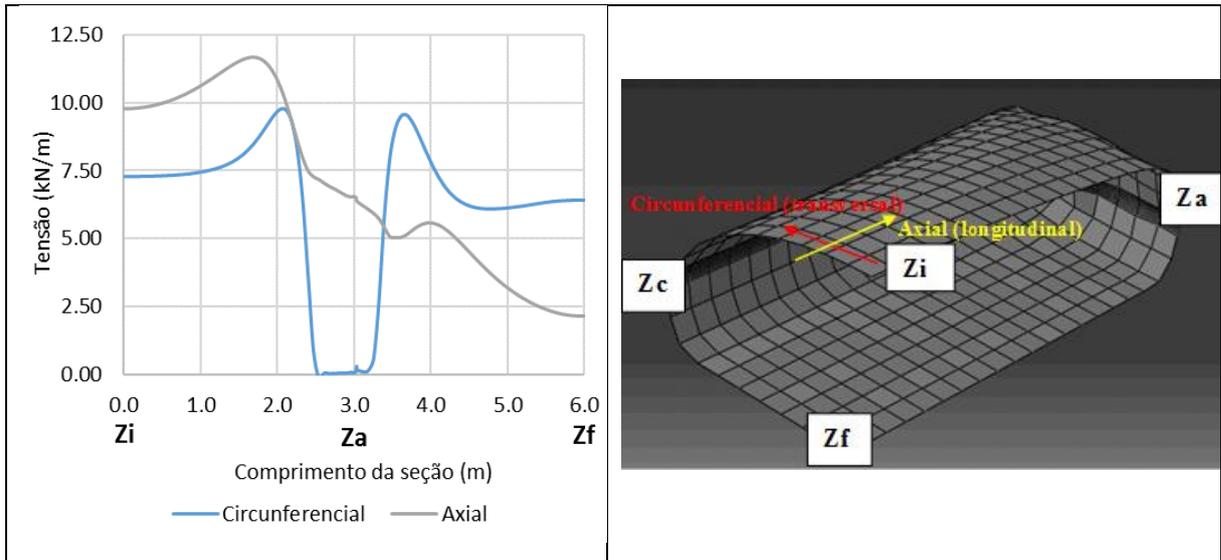


Figura 4.26 – Extremidade onde o tubo geotêxtil dobra



Para os dois eixos, esperava-se que a tensão circunferencial fosse maior que a axial, conforme apresentado por Lawson (2008). Acredita-se que, como a forma de seção circular do tubo geotêxtil não foi alcançada para este nível de pressão interna, a tensão circunferencial é menor que a axial.

4.2.3 Análise paramétrica

4.2.3.1 Variação da pressão de enchimento

A partir da modelagem numérica desenvolvida, foi realizada análise paramétrica variando a pressão de enchimento com o intuito de verificar a influência dessa variável na forma da seção transversal e na tensões geradas no tubo geossintético. Para tanto, a mesma geometria e premissas adotadas no estudo de retroanálise foram consideradas.

Primeiramente, aplicou-se pressão hidrostática internamente no tubo geossintético, extrapolando a pressão encontrada no item anterior. Assim, foram aplicadas pressões correspondentes a 50kPa e 100kPa, o que equivale a 3,5 m e 7,5 m de coluna de rejeito respectivamente. Para essas duas condições de pressão interna, o tubo geossintético chegou a uma altura de seção transversal de 1,26m e 1,43m, nessa ordem, conforme Figura 4.27 a Figura 4.30.

Figura 4.27 – Seção do tubo geotêxtil para altura de coluna de rejeito $H = 3,5\text{m}$, $P = 50\text{kPa}$

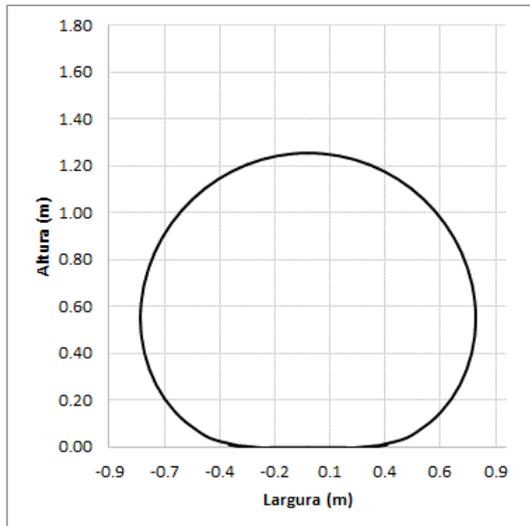


Figura 4.29 – Resultado para $H = 3,5\text{m}$, $P = 50\text{kPa}$

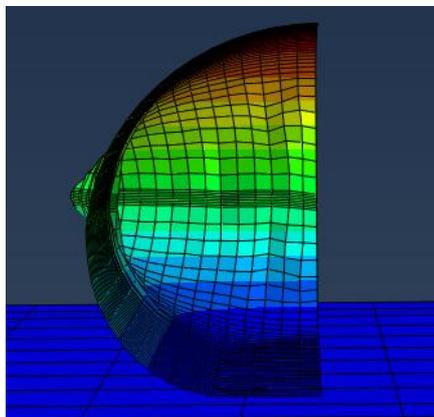


Figura 4.28 – Seção do tubo geotêxtil para altura de coluna de rejeito $H = 7,0\text{m}$, $P = 100\text{kPa}$

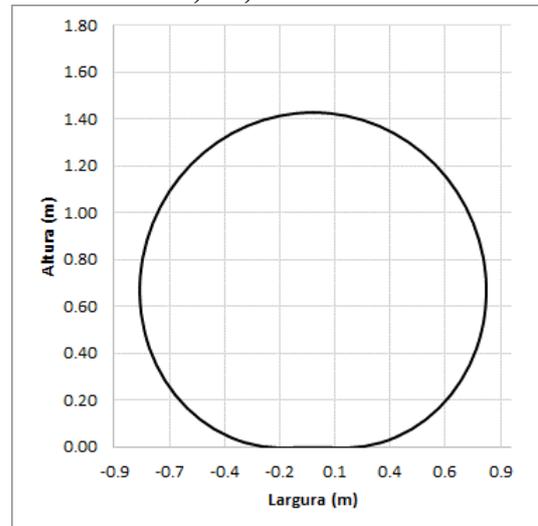
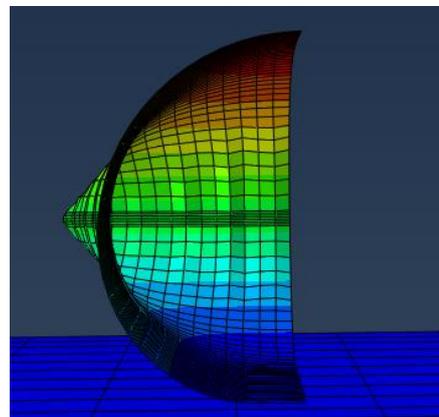


Figura 4.30 – Resultado para $H = 7,0\text{m}$, $P = 100\text{kPa}$



As duas primeiras figuras foram criadas a partir da modelagem numérica e as últimas apresentam o resultado do modelo. Dessarte, observa-se que o tubo tende a uma seção circular com o aumento da pressão interna, assim como esperado e evidenciado nos métodos analíticos, aproximando do diâmetro teórico de $D = 1,4\text{m}$.

Com relação às tensões, identifica-se nas Figura 4.31 a Figura 4.34 que a ordem de grandeza aumenta e é proporcional à pressão interna aplicada. Assim, pode-se notar ainda que a tensão circunferencial supera a axial na região superior do tubo geotêxtil, conforme esperado à medida que a pressão interna fica maior. Esse fato pode ser evidenciado ao se comparar a Figura 4.24, Figura 4.31 e Figura 4.33.

Figura 4.31 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção transversal para altura de coluna de rejeito $H = 3,5\text{m}$ - 50kPa

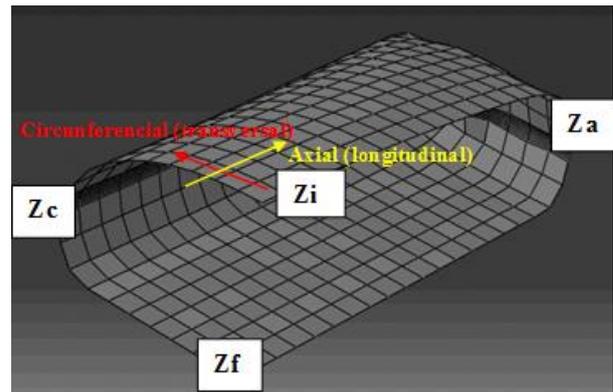
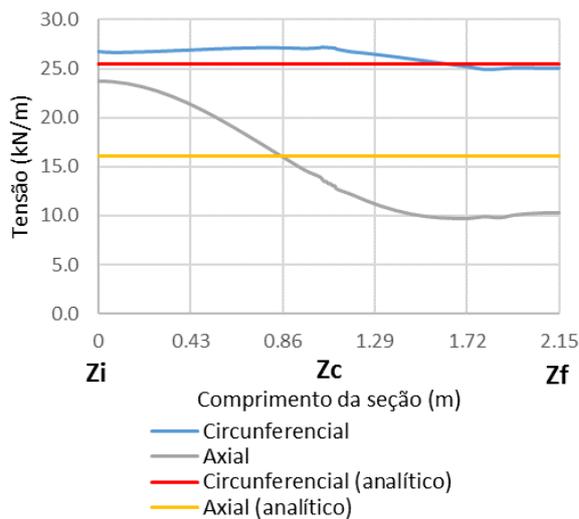
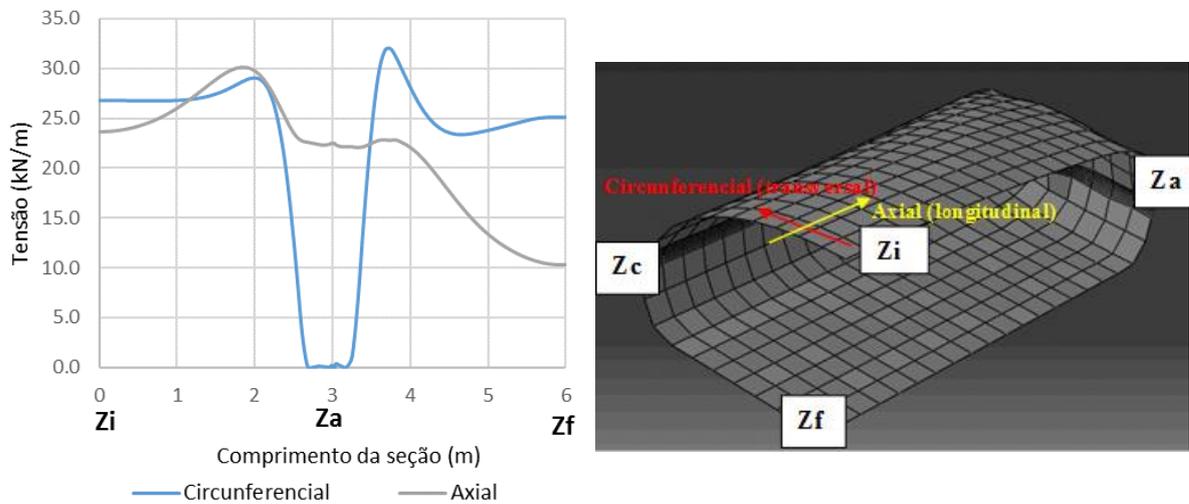


Figura 4.32 Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção longitudinal para altura de coluna de rejeito $H = 3,5\text{m} - 50\text{kPa}$



Para a simulação da tensão com carga $H = 7,0\text{m}$ (100kPa) é possível observar uma maior diferença entre o valor de tensão obtido na análise numérica e o adquirido no método analítico. Possivelmente, isso se deve à complexidade do modelo que considera as propriedades dos materiais, que são reconhecidas na simulação numérica, tais como o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, espessura do geotêxtil, massa específica do geotêxtil, ao contrário dos métodos analíticos, que não as consideram. Na modelagem numérica, essas propriedades influenciam nas tensões e deformações geradas, enquanto no método analítico não há deformação e a variação da tensão é constante.

Figura 4.33 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção transversal para altura de coluna de rejeito $H = 7,0\text{m} - 100\text{kPa}$

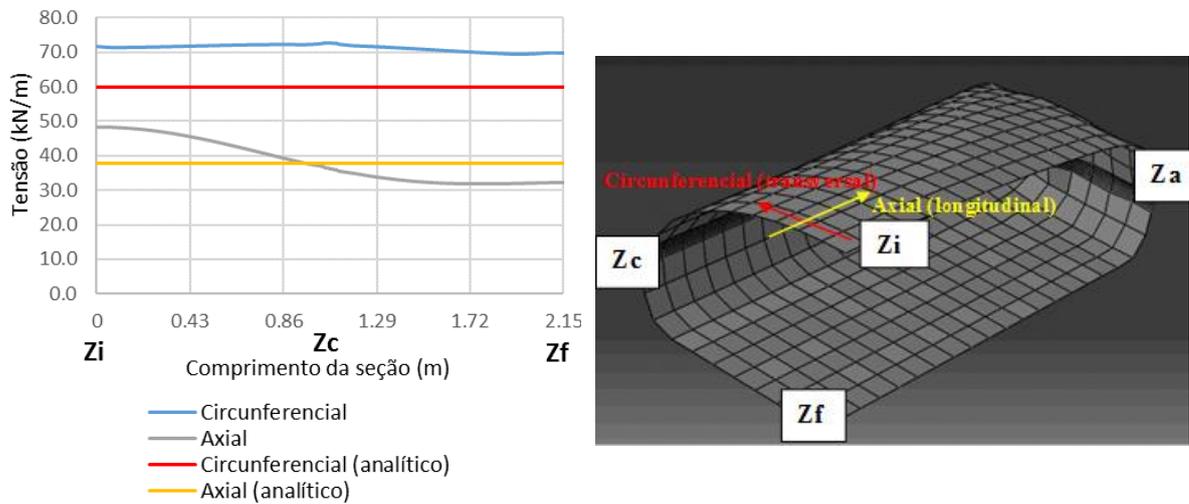
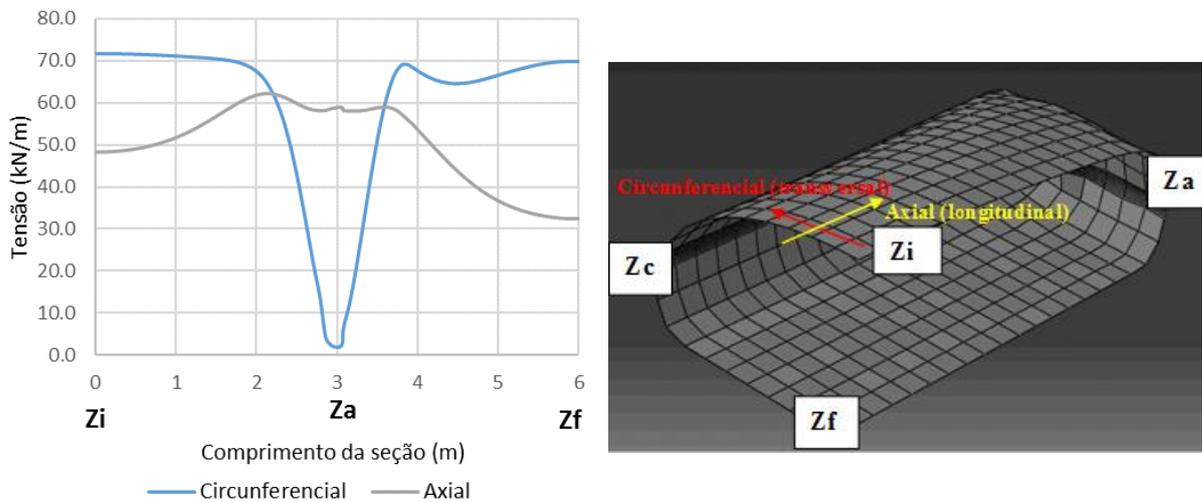


Figura 4.34 – Tensões geradas no tubo geotêxtil ao longo da seção longitudinal para altura de coluna de rejeito $H = 7,0\text{m} - 100\text{kPa}$

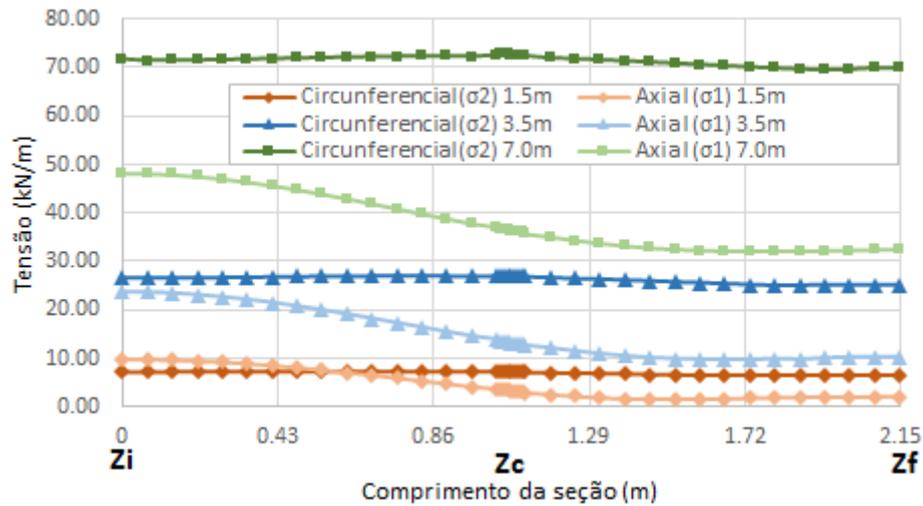


Para as tensões geradas ao longo da seção longitudinal, observa-se que o comportamento é semelhante ao encontrado para a condição de campo (21kPa). Isso, porque se nota que, na Figura 4.26, já apresentada, a forma do tubo geotêxtil, no local em que as tensões menores foram obtidas, apresenta dobras e torção.

Na Figura 4.35, são mostradas as tensões geradas ao longo da seção transversal para os três níveis de pressões apresentadas. A cor mais escura representa a tensão circunferencial, enquanto a cor mais clara simboliza a tensão axial. Dessa maneira, observa-se o aumento da

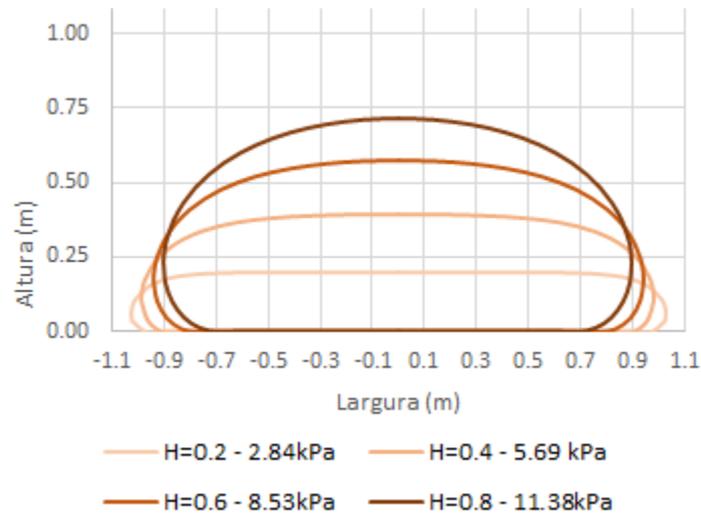
magnitude da tensão circunferencial e o aumento da diferença das tensões circunferencial e axial com o crescimento da pressão de enchimento. Ademais, a tensão circunferencial supera a axial a partir de determinada pressão, conforme esperado.

Figura 4.35 – Tensões ao longo da seção transversal para as pressões de 21 kPa (H = 1,5 m), 50kPa (H = 3,5 m) e 100kPa (H = 7,0 m)



A fim de se verificar o comportamento do tubo geotêxtil sob baixas pressões internas, ou seja, abaixo da pressão de 1,0 m de altura de rejeito encontrada em campo, simulou-se, por meio da modelagem numérica, o tubo geotêxtil a partir das mesmas premissas e geometria apresentadas, variando apenas as pressões no intervalo de 2 kPa a 14 kPa. Na Figura 4.36, são representadas as formas encontradas para essa faixa de valores. Dessasrte, analisa-se que, sob baixas pressões, a seção transversal do tubo tem forma retangular, tendendo à geometria de elipse e, posteriormente, circular com o aumento da pressão.

Figura 4.36 – Variação da forma do tubo para P = 2,85kPa a 11,40kPa



Na Figura 4.37, é mostrada a variação da forma do tubo geotêxtil contemplando uma faixa de variação de pressões mais ampla desde 2,85kPa a aproximadamente 150kPa. Com isso, o tubo passa de um formato retangular e tende ao formato circular. É possível notar, ainda, que, a partir da pressão de enchimento de, aproximadamente, 100kPa, a geometria da seção transversal supera o diâmetro teórico ($D > 1,40\text{m}$). Isso se deve ao fato de serem consideradas as deformações na modelagem numérica e estas serem mais evidentes sobre altas pressões por causado acúmulo de deformações.

A variação da altura da seção transversal do tubo geotêxtil com a pressão de enchimento é apresentada na Figura 4.38

Figura 4.38. Nessa figura, o comportamento linear para baixos níveis de tensão (até 25kPa) e, à medida que a pressão aumenta, torna-se curva e aumenta significativamente a partir de 150kPa de pressão interna.

Figura 4.37 – Faixa de variação ampla

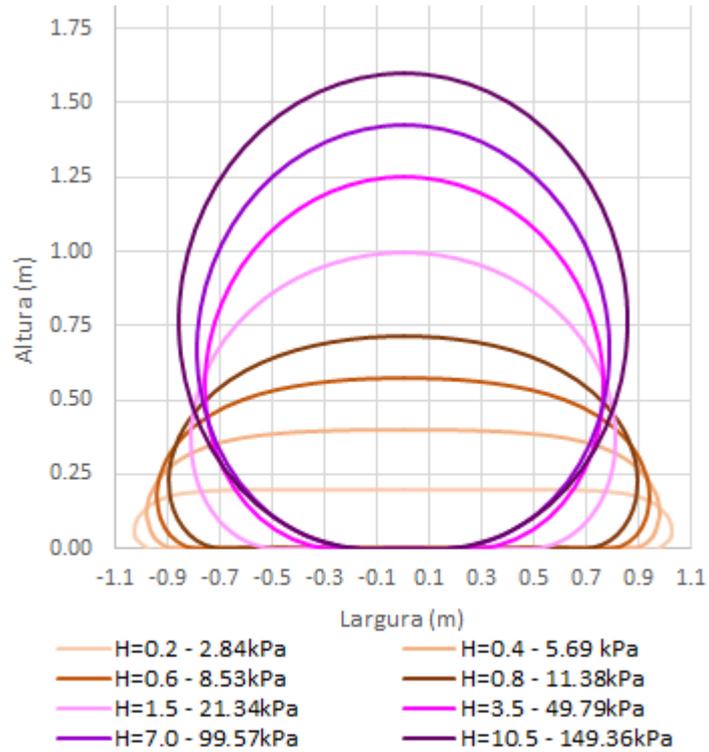
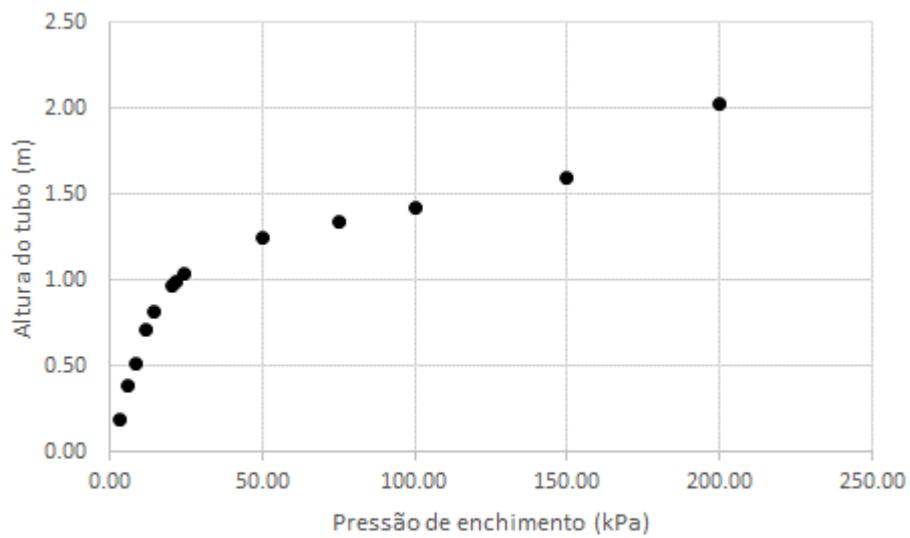


Figura 4.38 – Variação da altura da seção transversal do tubo geotêxtil com a altura



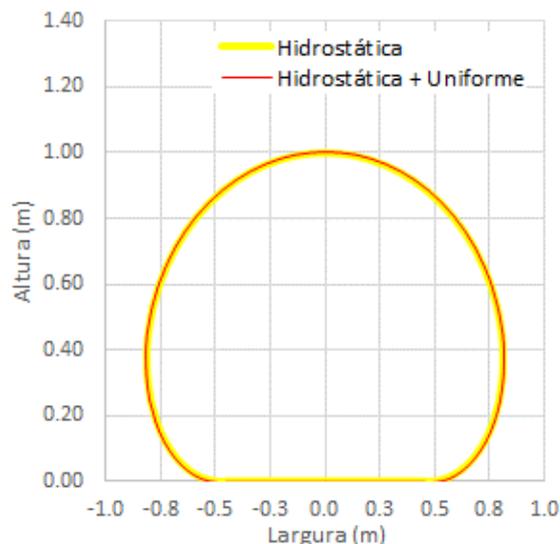
4.2.3.2 Variação da forma de aplicação da pressão interna

Algumas teorias consideram que, internamente ao tubo, é aplicada uma pressão hidrostática a partir de uma coluna de material com peso específico conhecido (Plaut e Suherman, 1998). Outras consideram que a pressão interna no tubo ocorre devido à pressão hidrostática mais uma pressão interna ao longo da superfície do geossintético (Guo, 2014). É importante mencionar que, quando a pressão interna uniforme é, muitas vezes, maior do que a pressão hidrostática, ela passa a dominar o comportamento do tubo geossintético (Kazimierowicz, 1994).

Visando a verificar a influência da aplicação de uma pressão interna uniforme em conjunto com a pressão hidrostática, foram simulados cenários em que a pressão interna aplicada fosse a soma da pressão hidrostática considerada a altura de coluna do rejeito no interior do tubo mais uma pressão interna uniforme ao longo da superfície do geossintético.

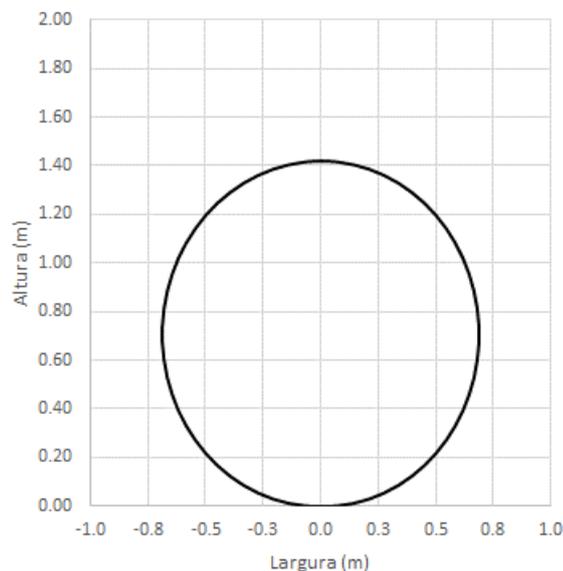
Para essa situação, foi aplicada pressão interna total de 21,4 kPa, correspondente a 14,2 kPa de pressão hidrostática somada a 7,1 kPa de pressão uniforme, visando a alcançar a condição obtida em campo. O valor dessa pressão é semelhante à necessária para alcançar 1,0 m de altura, aplicando apenas pressão hidrostática internamente ao tubo. Na Figura 4.39, é apresentada a forma do tubo geotêxtil considerando os dois tipos de carregamento. Observa-se que a forma do tubo geotêxtil para os dois casos é semelhante.

Figura 4.39 – Comparação da seção transversal com pressão hidrostática e pressão hidrostática + pressão uniforme



Avaliou-se por fim o comportamento do tubo geotêxtil sob somente uma pressão interna uniforme, descartando a pressão hidrostática. Observa-se, na Figura 4.40, que a forma tende a uma seção circular, mesmo para baixas pressões, o que não condiz com o resultado encontrado em campo e nos modelos analíticos. Dessa maneira, destaca-se a importância de se admitir a pressão hidrostática durante o dimensionamento do tubo geotêxtil, uma vez que apenas com a aplicação de uma pressão uniforme no tubo geotêxtil, de mesma ordem da pressão hidrostática (21,33 kPa), é possível levar o tubo ao diâmetro teórico com seção circular.

Figura 4.40 – Seção transversal do tubo com aplicação de pressão uniforme com 21,33 kPa

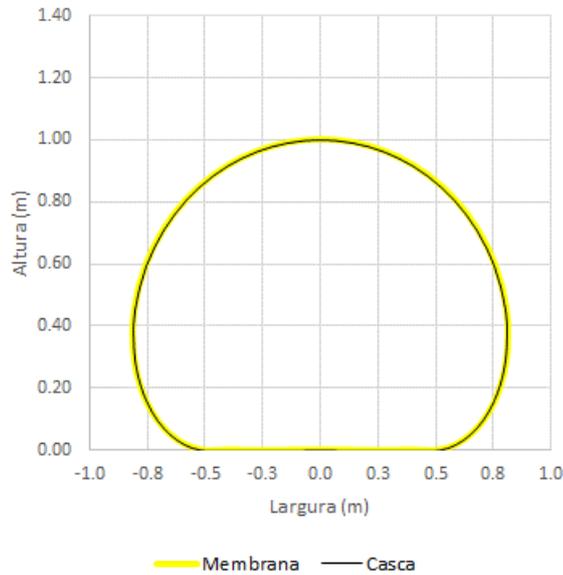


4.2.3.3 Varição do elemento finito

Neste item apresenta-se a modelagem numérica do tubo geotêxtil, utilizando o elemento de casca, diferentemente do elemento de membrana usado anteriormente. Esse elemento possui como característica a rigidez à flexão, ou seja, o momento de inércia I do geossintético é considerado no cálculo. Para essa simulação, foi empregada a mesma metodologia do item de retroanálise, com as condições de carregamento obtidas em campo, ou seja, seção transversal com altura máxima de 1,0m.

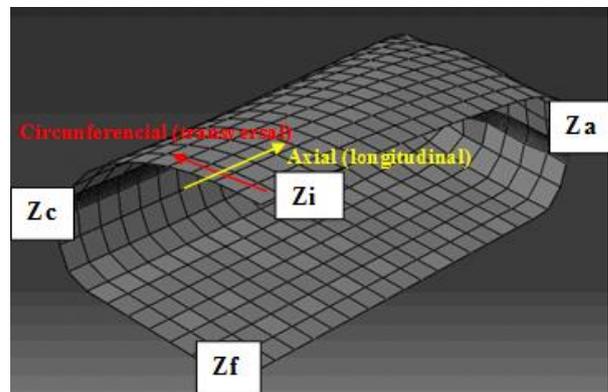
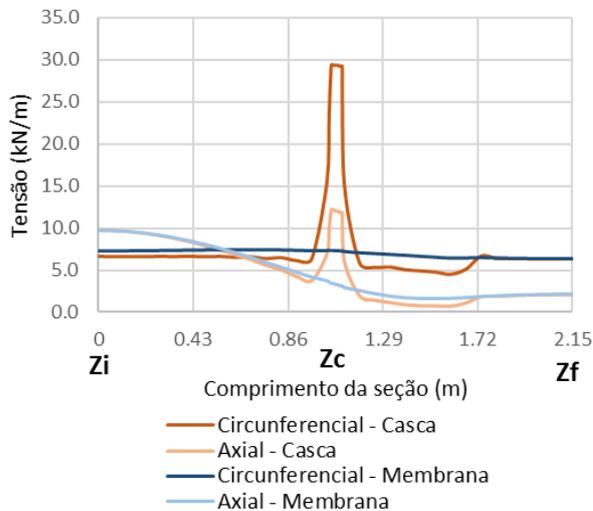
A Figura 4.41 apresenta a comparação da seção transversal do tubo geotêxtil para o elemento membrana e o elemento casca. Assim, observa-se que a forma entre os dois modelos é a mesma.

Figura 4.41 – Comparação da forma da seção transversal do elemento de Membrana e elemento de Casca



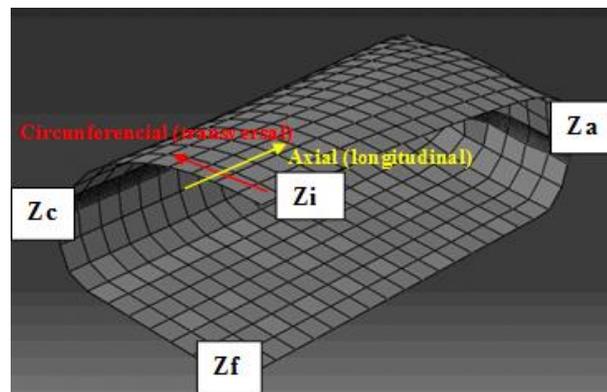
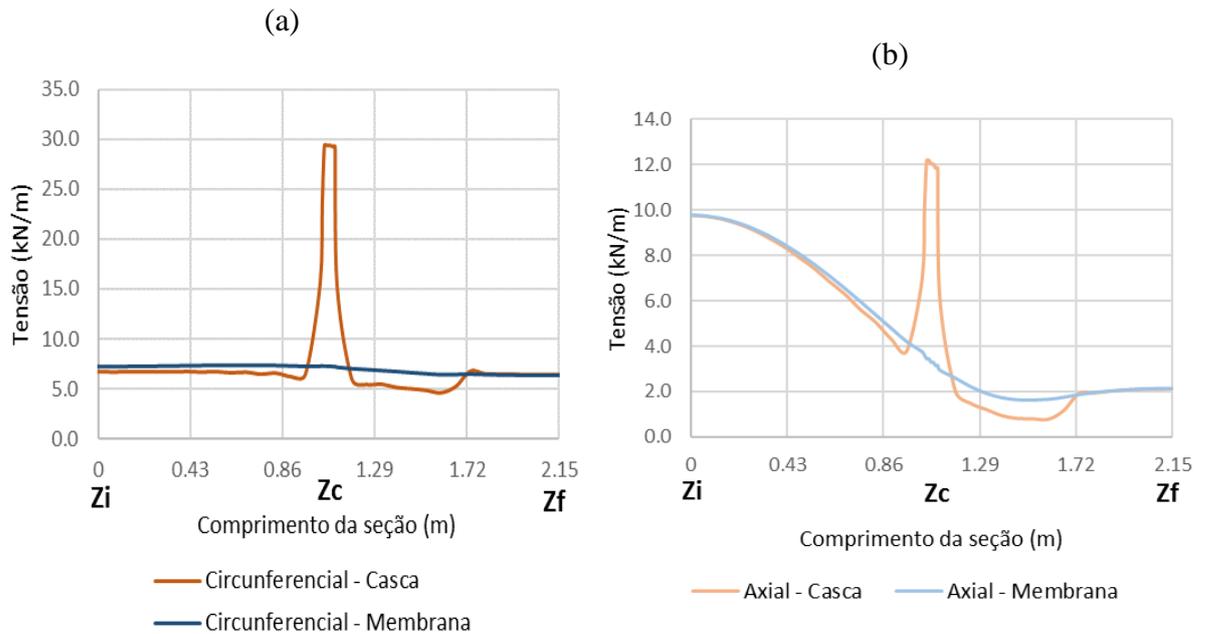
A comparação das tensões geradas ao longo da seção transversal do tubo geotêxtil é apresentada na Figura 4.42. Dessa forma, identifica-se que, diferentemente da simulação feita com o elemento de membrana, o elemento casca apresenta pico na extremidade do tubo. Isso ocorre devido ao elemento de casca possuir rigidez à flexão. Desconsiderando o pico, a magnitude das tensões ficou semelhante.

Figura 4.42 – Comparação da tensão ao longo da seção transversal do elemento de Membrana e elemento de Casca



Com o objetivo de facilitar a compreensão do resultado, as tensões circunferencial e axial foram separadas em dois gráficos, facilitando assim a visualização (Figura 4.43). Nota-se que a ordem de grandeza das tensões é similar com exceção da extremidade.

Figura 4.43 – Comparação do elemento de casca x elemento de membrana: (a) tensão circunferencial; (b) tensão axial



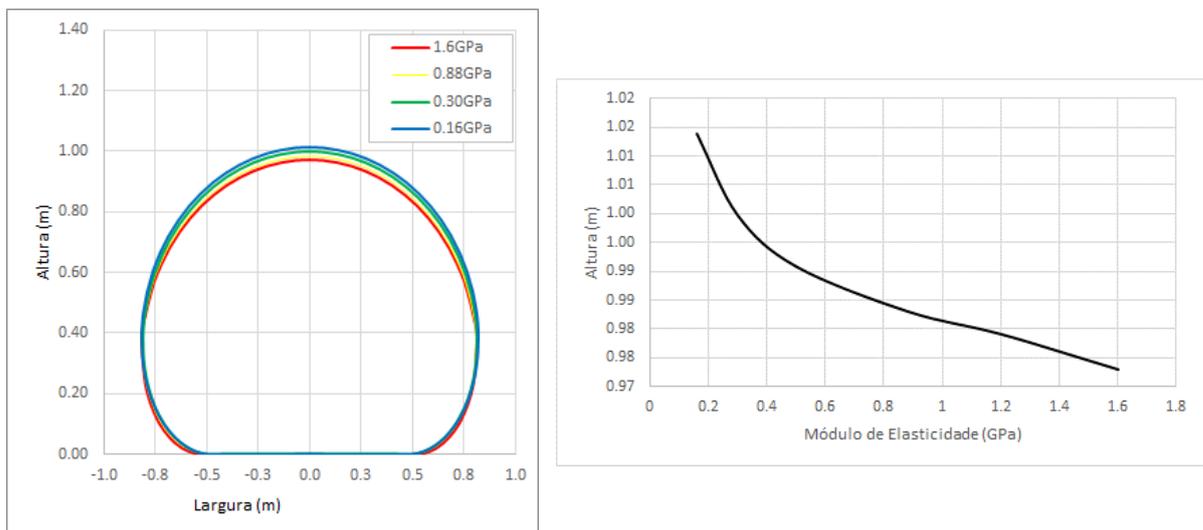
4.2.3.4 Variação do módulo de elasticidade

Neste item é apresentada a modelagem numérica do tubo geotêxtil, aplicando uma variação no módulo de elasticidade do geotêxtil tendo em vista à sua grande variabilidade. Assim como descrito no item anterior, nessa simulação foi utilizada a mesma metodologia da

retroanálise, com as condições de carregamento obtidas em campo, ou seja, seção transversal com altura máxima de 1,0m.

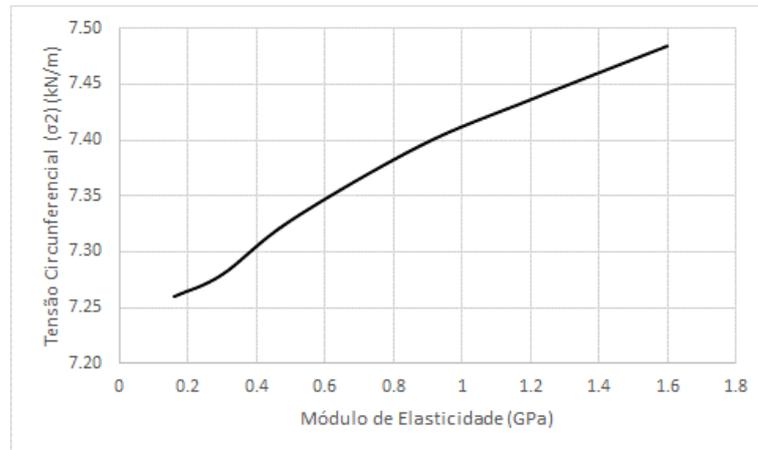
A variação da altura, assim como o formato da seção transversal do tubo geotêxtil em função do módulo de elasticidade, é apresentada na Figura 4.44. Desse modo, observa-se que quanto menor o módulo, maior a altura alcançada do tubo. Conforme apresentado anteriormente, o módulo de elasticidade representativo do estudo de campo foi o de 0.30 GPa, o qual determinou uma altura para o tubo geotêxtil de 1,0m (Figura 4.44b). Entretanto, a variação é pouco significativa, não sendo o Módulo de Elasticidade uma propriedade de grande relevância para a modelagem numérica estudada.

Figura 4.44 – Variação da altura em função da variação do módulo de elasticidade (a) seção transversal; (b) altura



Em relação às tensões geradas, tomou-se como referência a tensão circunferencial no ponto mais alto da seção transversal. Conforme pode ser observado na Figura 4.45, quanto maior o módulo de elasticidade, maior é a tensão circunferencial gerada no tubo geotêxtil. Sendo assim, identifica-se que o comportamento é aproximadamente linear.

Figura 4.45 – Variação da tensão circunferencial com o módulo de elasticidade



4.2.4 Comparação método analítico x modelagem numérica

Neste item são apresentadas as comparações dos resultados obtidos com o uso de métodos analíticos em relação aos resultados adquiridos por meio da modelagem numérica do processo de enchimento do tubo geotêxtil, que foram discutidos nos itens anteriores.

Em relação à pressão de enchimento existente em campo, durante a disposição hidráulica de rejeitos para dentro do tubo geotêxtil, observa-se que foi necessário, para alcançar as dimensões do experimento, uma pressão interna total de aproximadamente 21 kPa, tanto para o estudo realizado com os métodos analíticos quanto para a pesquisa feita por meio da modelagem numérica.

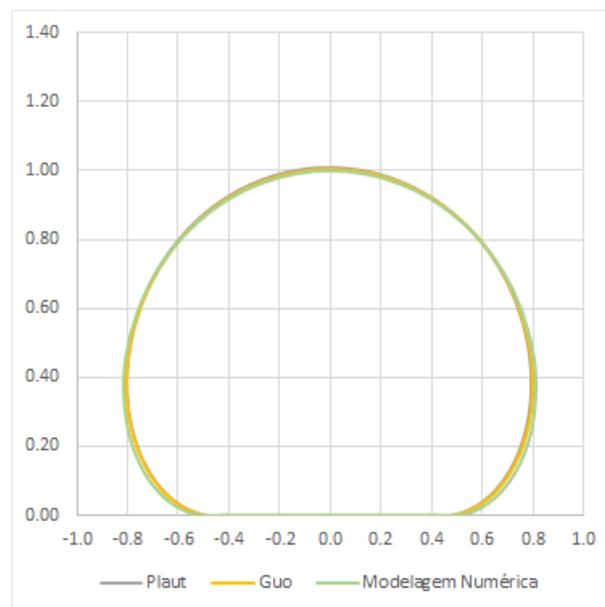
No item 2.6.1.2 desse trabalho, foram apresentadas as dificuldades existentes na modelagem do comportamento do tubo geotêxtil durante o processo de enchimento e de desaguamento. Nas simulações numéricas, as propriedades dos materiais foram fixadas e o módulo de elasticidade do material foi ajustado para se alcançar a forma final existente no experimento de campo.

Segundo Silva (2017), durante o processo de bombeamento em campo, a altura do tubo geotêxtil foi limitada a 1,0 m, visando a manter a estabilidade externa, evitando assim, rolamento e escorregamento do tubo. Dessa maneira, como essa variável não foi medida em campo, a pressão interna, devido ao bombeamento de rejeito, era de aproximadamente 21kPa, podendo ter sido bombeado com um valor superior a este por causa da paralisação do processo

na altura de 1,0m. Ademais, as dificuldades e incertezas do processo de enchimento e da propriedade módulo de elasticidade levam a um resultado próximo.

A forma da seção transversal do tubo, conforme descrito nos itens anteriores, alcançou valores bem próximos ao encontrado em campo, tanto para o resultado do método analítico quanto para a modelagem numérica. Na Figura 4.46, é apresentada a forma identificada para esses dois métodos. É possível observar a concordância entre as duas metodologias.

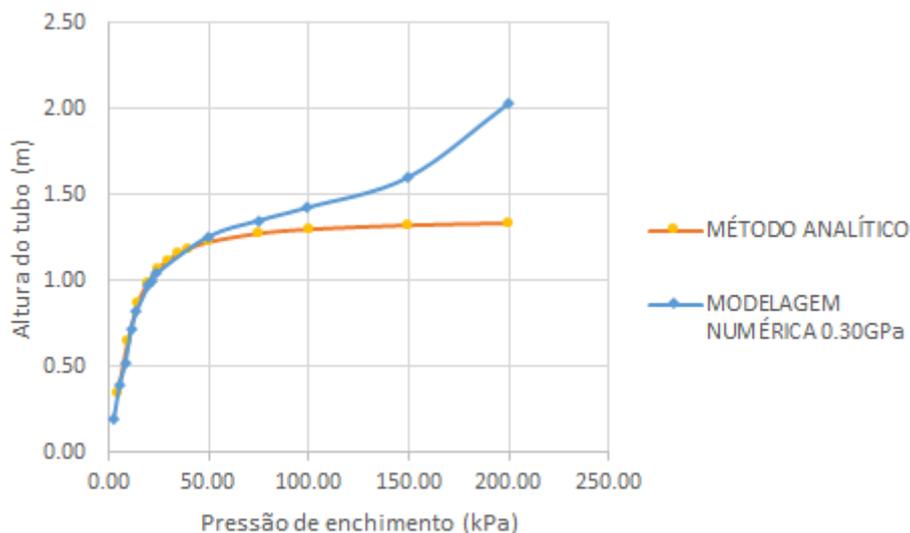
Figura 4.46 – Comparação da forma do tubo geotêxtil obtida por meio da modelagem numérica e método analítico



A variação da altura (ponto mais alto) do tubo geotêxtil preenchido com rejeitos de mineração em função da pressão de enchimento é indicada na Figura 4.47. Verifica-se que os valores são bem próximos até aproximadamente 50 kPa. A partir desse nível de tensão, a diferença aumenta significativamente com valores maiores obtidos na modelagem numérica quando comparados com os adquiridos nos métodos analíticos, ou seja, para o caso da modelagem numérica, o resultado não converge no diâmetro teórico.

Outro aspecto importante é que os valores de altura superiores ao diâmetro teórico do tubo geotêxtil ($H > 1,40\text{m}$) podem ocorrer no caso da modelagem numérica devido à deformação do material com a aplicação da carga. Esse comportamento não é observado nos métodos analíticos, pois nestes é admitido como premissa que o geossintético não se deforma.

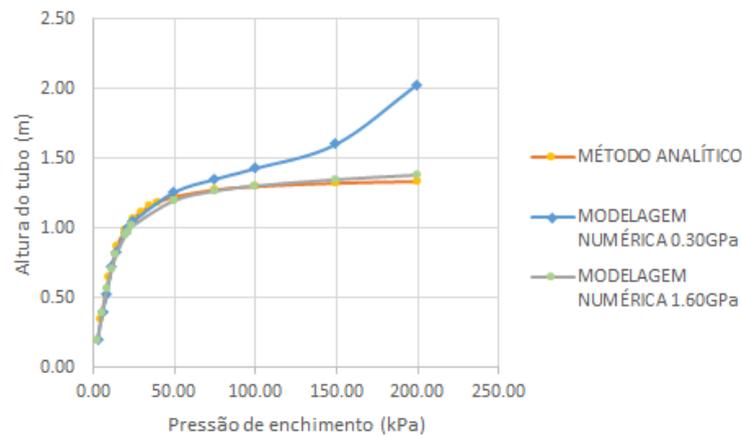
Figura 4.47 – Variação da altura do tubo com a pressão interna



Seay (1998) chegou à conclusão de que a altura varia linearmente com a pressão de enchimento em um tubo geotêxtil. Entretanto, no estudo realizado, foram considerados apenas valores baixos de pressão correspondentes ao início da curva, que é linear. Com o aumento da pressão de enchimento, o formato da curva é alterado, de acordo com a Figura 4.47, e pode variar de acordo com o módulo de elasticidade do material, conforme será demonstrado na sequência (Figura 4.48).

A fim de se comparar a modelagem numérica à propriedade do geossintético mais rígida, foi simulada a condição de campo do módulo de elasticidade com 1,60 GPa. Observa-se, na Figura 4.48, que quando módulo de elasticidade é maior, ou seja, a deformação do material é menor, o comportamento fica próximo do encontrado no método analítico, uma vez que neste método não é considerada a deformação. Mesmo assim, a simulação numérica começa a se deformar mais a partir de certa pressão de enchimento, dependendo das propriedades dos materiais.

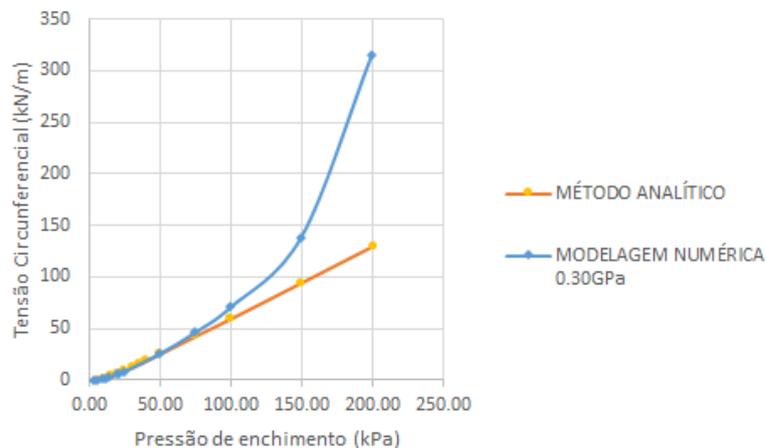
Figura 4.48 – Comparação da variação da altura do tubo geotêxtil: método analítico e modelagem numérica E = 0,30GPa e 1,60GPa



Conforme descrito nos itens anteriores para o método analítico, as tensões são consideradas constantes e, para a modelagem numérica, as tensões são variáveis conforme posição analisada. Devido a esse fato, para a comparação dos resultados, foi selecionada a tensão circunferencial gerada na modelagem numérica (localizada na parte superior do tubo geotêxtil) e a tensão circunferencial obtida no método analítico.

Assim, na Figura 4.49, são apresentadas as tensões circunferenciais no ponto mais alto do tubo geotêxtil geradas em função da variação da pressão interna no tubo geotêxtil adquiridas pelos dois métodos. Nota-se que, quando comparados os resultados da modelagem numérica e do método analítico até aproximadamente 75 kPa os valores são semelhantes. A partir desse nível de tensão, ocorre diferença entre os dois métodos por causa das propriedades do material e deformação do geossintético.

Figura 4.49 – Tensão circunferencial pela variação da pressão



4.2.5 Fatores de segurança para o dimensionamento

Visando ao dimensionamento do geossintético para a disposição hidráulica de rejeitos de mineração de ouro em tubos geossintético, este item avalia o Fator de Segurança da solicitação mecânica que ocorre durante o processo de enchimento.

As propriedades índice definidas a partir dos ensaios de resistência à tração de faixa larga pressupõem condições não correspondentes às condições de uso do geotêxtil *in-situ*. Portanto, é necessária a verificação do material quanto à sua durabilidade durante a vida útil da obra, que pode ser realizada a partir de ensaios modificados, ou, a maneira mais comum, a utilização de fatores de redução aos resultados encontrados (KORNER, 2016). Dessa forma, assegura-se um nível de durabilidade mínimo por meio da redução de resistência devido aos agentes degradadores em campo (MILAGRES, 2016).

Os valores de coeficientes de redução, portanto, consideram os danos que podem comprometer a resistência à tração do geotêxtil, dividindo esses em três grupos (KOERNER, 2016):

- Degradação por danos mecânicos, definida por alterações no material devido a esforços durante seu manuseio, instalação ou execução da obra;
- Fluência, determinada pelas deformações não elásticas do material ao longo do tempo;
- Degradação por danos químicos ou biológicos a partir de alterações nas cadeias poliméricas ou degradação por microorganismos.

Na Tabela 4.7 são mostradas as faixas típicas para os coeficientes de redução para diferentes aplicações, sendo necessárias considerações acerca do ambiente de obra antes da definição do valor aplicado (KOERNER, 2016).

Tabela 4.7 – Coeficientes de redução para solicitações mecânicas em dimensionamento de estruturas com geossintéticos

| Área | Faixa dos fatores de Redução | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------|------------------------------|
| | Danos de Instalação | Fluência* | Degradação Química/Biológica |
| Separação | 1,1 a 2,5 | 1,5 a 2,5 | 1,0 a 1,5 |
| Amortecimento | 1,1 a 2,0 | 1,2 a 1,5 | 1,0 a 2,0 |
| Estradas não-pavimentadas | 1,1 a 2,0 | 1,5 a 2,5 | 1,0 a 1,5 |
| Paredes | 1,1 a 2,0 | 2,0 a 4,0 | 1,0 a 1,5 |
| Taludes | 1,1 a 2,0 | 2,0 a 3,5 | 1,0 a 1,5 |
| Suporte e fundação | 1,1 a 2,0 | 2,0 a 4,0 | 1,0 a 1,5 |
| Estabilidade de taludes | 1,1 a 1,5 | 2,0 a 3,0 | 1,0 a 1,5 |
| Revestimento de pavimento | 1,1 a 1,5 | 1,0 a 2,0 | 1,0 a 1,5 |
| Ferrovias (filt./sep.) | 1,5 a 3,0 | 1,0 a 1,5 | 1,5 a 2,0 |
| Formas flexíveis | 1,1 a 1,5 | 1,5 a 3,0 | 1,0 a 1,5 |
| “Silt fences” | 1,1 a 1,5 | 1,5 a 2,5 | 1,0 a 1,5 |

* O valor mínimo da faixa refere-se a aplicações com tempo útil de serviço relativamente curtos e/ou situações as quais as deformações, por fluência, não são críticas para o funcionamento geral do sistema.

Fonte: Koerner, 2016.

A formulação da resistência à tração admissível, então, pode ser observada na Equação (4.1) de (KOERNER, 2016):

$$\alpha_{adm} = \alpha_{rup} \left(\frac{1}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_{CBD}} \right) \quad \text{Equação (4.1)}$$

Em que,

α_{adm} = resistência à tração admissível;

α_{rup} = resistência à tração de ruptura;

RF_{ID} = fator de redução para danos de instalação ($\geq 1,0$);

RF_{CR} = fator de redução para fluência ($\geq 1,0$) e;

RF_{CBD} = fator de redução para degradação química e biológica ($\geq 1,0$).

Diante dos valores abordados, foi feita comparação da resistência à tração do geotêxtil utilizado na pesquisa com a tensão desenvolvida em campo com objetivo de avaliar o Fator de Segurança que a estrutura estava submetida durante o enchimento. Primeiramente, foi avaliada a resistência à tração admissível do geossintético por meio dos coeficientes de redução.

Dentre os coeficientes, foram selecionados os valores de 1,5 para danos de instalação, 1,5 para fluência e 1,5 para degradação química/biológica (formas flexíveis). O maior valor para danos de instalação foi admitido visando à segurança do sistema. Para a fluência foi adotado o menor valor, uma vez que este depende do tempo de exposição do geossintético e a condição analisada ocorre apenas durante o processo de enchimento. Para a degradação química, considerou-se o maior valor, tendo em vista a presença de químicos no rejeito. Desse modo, a resistência admissível para o tubo geotêxtil é de:

$$\alpha_{adm} = 109,5 \left(\frac{1}{1,5 \times 1,5 \times 1,5} \right)$$
$$\alpha_{adm} = 32,44 \text{ kN/m}$$

A partir das tensões circunferenciais adquiridas com a modelagem numérica, 7,28 kN/m, e da solução do método analítico, 7,32 kN/m, para a condição de campo, os fatores de segurança foram calculados:

$$\text{Modelagem numérica: } FS = \frac{32,44}{7,28} = 4,45$$

$$\text{Método analítico: } FS = \frac{32,44}{7,32} = 4,32$$

Dessa maneira, pode-se afirmar, assim como visualizado em campo, que o geossintético, durante o bombeamento para alcançar 1,00m de altura, estava em condição segura e não chegou à ruptura durante o processo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste item, são apresentadas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao trabalho desenvolvido nesta dissertação.

5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou a análise do comportamento de tubos geotêxteis para o confinamento de rejeito de mineração ouro por meio de métodos analíticos e modelagem numérica. Como alguns dados do ensaio de campo não foram medidos e alguns parâmetros de entrada foram estimados, os resultados apresentados são aproximados, fazendo-se necessário comparar mais resultados de modelos numéricos com outras medições de campo de experimentos, de modo a validar o modelo e permitir simular condições adversas e hipotéticas de modo seguro.

O estudo demonstra ainda que o Abaqus, assim como toda modelagem numérica, possui limitações que restringem o real comportamento, envolvendo a disposição hidráulica de rejeitos de mineração em tubos geotêxteis.

As conclusões são apresentadas nos tópicos a seguir:

- Tanto a modelagem numérica quanto os métodos analíticos foram capazes de representar o comportamento em termos de forma e tensões do tubo geotêxtil utilizado em campo para a disposição hidráulica de rejeito de mineração de ouro durante o processo de enchimento;
- As formas da seção transversal adquiridas nos dois métodos foram coerentes com as obtidas em campo, tendo as dimensões altura e largura, similares às medidas encontradas durante o processo de enchimento;
- Em relação às tensões, pode-se observar que, mesmo utilizando diferentes metodologias de cálculos, método analítico e numérico, os valores são semelhantes. O método analítico assume tensão constante enquanto que o numérico a calcula variável ao longo da seção. Dessa forma, os resultados apresentados mostram-se coerentes, uma vez que os modelos foram comparados com estudos existentes na literatura, chegando a valores próximos;

- Nas extremidades do tubo geotêxtil, onde ocorrem dobras no geotêxtil e a forma não é constante, as tensões ficaram mais instáveis quando comparadas à tensão atuante na seção transversal representativa do tubo;
- A forma do tubo geotêxtil varia conforme a pressão interna é modificada, sendo diretamente proporcional à pressão de enchimento, com isso, apresenta linearidade no início da curva e variável a partir de determinado nível de pressão, dependendo do módulo de elasticidade do material;
- A tensão gerada no tubo geotêxtil varia linearmente com a pressão de enchimento no método analítico, e é linear no início da curva no método numérico. Este último, a partir de determinada tensão, apresenta valores maiores quando comparados ao método analítico. Este é um fato importante a ser considerado durante o dimensionamento de tubos com objetivo de não se causar ruptura dos tubos geotêxteis;
- A modelagem numérica é mais representativa do que os métodos analíticos quando estão sendo avaliadas as tensões geradas no tubo geotêxtil. Isso, porque enquanto o método analítico assume tensão constante, a modelagem numérica apresenta a variação da tensão na superfície do geotêxtil;
- Durante o enchimento do tubo geotêxtil, tensões menores são geradas, principalmente, durante o início do processo ao longo do tubo e nas extremidades. Esse fenômeno pode ser observado durante a modelagem numérica e o trabalho de campo, em que houve dobras do material nessa região;
- Devido às condições de contorno iniciais aplicadas às bordas do tubo geotêxtil, ocorreu concentração de tensões nessa região quando foi utilizado o elemento de casca, a qual os valores são de grande magnitude. Para o elemento de membrana, como este não possui rigidez à flexão, esse comportamento de pico de tensão não foi observado;
- Os fatores de segurança encontrados indicam que, em campo, o tubo geotêxtil estava submetido a tensões menores do que a resistência à tração do geotêxtil utilizado na fabricação do tubo. Essa constatação também foi observada em campo, uma vez que, durante o processo de bombeamento de rejeitos, o tubo permaneceu estável e não chegou à ruptura.

5.2 Recomendações para pesquisas futuras

Para dar sequência na pesquisa desenvolvida, enriquecer o trabalho realizado e os objetivos propostos, algumas sugestões para trabalhos futuros são indicados a seguir:

- Realizar estudo de campo com projeto de instrumentação mais preciso, incluindo o uso de extensômetros para medidas de deformação e posterior obtenção de tensões geradas durante o processo de enchimento;
- O trabalho com instrumentação deve ser realizado com critério, uma vez que o geossintético é um produto alternativo na engenharia, ainda carente de estudos nessa área e de difícil instrumentação;
- Realizar estudo de campo com projeto de instrumentação com obtenção de dados após o enchimento, ou seja, durante o adensamento;
- Comparar resultados de tensões adquiridos por meio da instrumentação com modelagem numérica;
- Realizar modelagem numérica com tubos geotêxteis considerando fundação flexível, a fim de se verificar a influência da fundação no comportamento da estrutura, alterando também as propriedades da superfície de contato;
- Realizar modelagem numérica levando em conta empilhamento dos tubos geotêxteis, além de verificar forma e tensões geradas no geossintético, incluindo a capacidade de suporte da fundação;
- Utilizar outros programas para modelagem numérica com a finalidade de comparar os resultados encontrados;
- Realizar modelagem numérica considerando processo de desaguamento e adensamento do rejeito;
- Desenvolver método analítico contemplando o desaguamento e/ou adensamento durante o processo de enchimento e do adensamento após o enchimento;
- Implementar, em software computacional, o processo de enchimento do tubo geotêxtil, contemplando o desaguamento e/ou adensamento durante o processo de enchimento e do adensamento após o enchimento.

5.3 Recomendações utilizando o software Abaqus

- Realizar análise em 2D considerando elemento de treliça (sem rigidez a flexão) e elemento de barra (com rigidez a flexão);
- Utilizar as opções do módulo interação, variando as propriedades de contato entre as superfícies e fundação;
- Considerar empilhamento de tubos geotêxteis em 2D, usando módulo de interação do software Abaqus;
- Usar módulo de poropressão do software Abaqus para representação da condição após o adensamento encontrada em campo, comparando os dados para validação numérica;
- Implementar no software condição do processo de desaguamento em conjunto com o processo de enchimento do tubo geotêxtil.

REFERÊNCIAS

- Adams, M. D. (2016) Gold Ore Processing. Project Development and Operations. Chapter 37 – Tailings Storage Facilities. Elsevier 2^o edition.
- Aguiar, V. R. 2003. Ensaio de Rampa para estudos da resistência de interfaces solo-geossintético. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ÁVILA, J. P. Relato sobre o tema 1: Inovações tecnológicas em métodos de disposição de rejeitos. XXXI – Seminário Nacional de Grandes Barragens – SNGM. Belo Horizonte/MG, 2017.
- Aydilek, A. H., and T. B. Edil. 2002. Filtration performance of woven geotextiles with wastewater treatment sludge. *Geosynthetics International* 9 (1):41–69. doi:10.1680/gein.9.0210
- Benjamim C. V. S. Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 2006. 326p.
- BRINK, N. R. Numerical Modeling of Consolidation Processes in Hydraulically Deposited Soils.** Tese de mestrado—Colorado, Estados Unidos: University of Colorado, 2014.
- BOCCAMINO G. D. Desenvolvimento de Geometria para Empilhamento de Rejeitos Desaguados de Minério de Ferro (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia – NUGEO. Ouro Preto, 2012. 110 p.
- Budinski K. G. e Budinski M. K. *Engineering Materials: Properties and Selection*. Appendix B. Prentice Hall; Edição: 7 (2 de agosto de 2001). 818p.
- Cantré, S. (2002). Geotextile tubes: analytical design aspects. *Geotextiles and Geomembranes*, 20, No. 5, 305–319.
- Cantré, S.; Saathoff, F. (2011)a. Design method for geotextile tubes considering strain – formulation and verification by laboratory tests using photogrammetry. *Journal Geotextiles and Geomembranes*, 29 (3), p. 201-210.
- Cantré, S. e Saathoff, F. (2011)b. Design parameters for geosynthetic dewatering tubes derived from pressure filtration tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 18, No. 3, 90–103

Carroll, R. R: Submerged geotextile flexible forms using noncircular cylindrical shapes. Geotech. Fabrics Rep., Industrial Fabrics Association International, St. Paul, Minn. 12, 4-15 (1994)

CARVALHO, M. P.; SANTOS, M. A. V. 2007. Caracterização da resina termoplástica de polipropileno Utilizada na fabricação de cadeiras plásticas. Cusco In: VIII Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, CD-ROM

CASTRO, N.P.B. Sistemas tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados, 2005, 103f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

CFGG - Comité Français des Geotextiles et Geomembranes (1986). Recommendations for the Use of Geotextiles in Drainage and Filtration Systems. Geotextile Manual, Institut Textile de France, BoulogneBillincourt, France, pp. 43–54.

DASSAULT SYSTÈMES. Abaqus/CAE Documentation, version 6.14. Providence, U.S.A., 2014. Disponível em: <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/>. Acesso em: 16 dez. 2018.

FHWA, 1998. Geosynthetic Design and Construction Guidelines. Federal Highway Administration Publication No. FHWA-HI-95-038. US Department of Transportation, Washington, D.C., USA, 484 pp

Fowler, J., Bagby, R. M. and Trainer, E. (1996). Dewatering sewage sludge with geotextile tubes. Proceedings of the 49th Canadian Geotechnical Conference, St John's, Canada.

FREITAS SILVA, L. C. Utilização de tubos geotêxteis para confinamento, desaguamento e empilhamento de rejeito de ouro (Dissertação de Mestrado). Departamento de Geotecnia e Transportes, UFMG. Belo Horizonte, 2017.

Gaffney, D.A., Martin, S.M., Maher, M.H., Bennert, T.A., 1999. Dewatering contaminated, fine-grained material using geotextiles. Geosynthetics '99. Boston, MA, pp. 1016–1031.

Giroud, J.P., 1996. Granular filters and geotextile filters. In: Proc. Geofilters'96, Montreal, Canada, pp. 565e680.

Górniak, J., Villard, P. and Delmas, P. (2016). Coupled discrete and finite-element modelling of geosynthetic tubes filled with granular material. *Geosynthetics International*, 23, No. 5, 362–380. [<http://dx.doi.org/10.1680/jgein.16.00003>].

Gourc, J. P. (1982). *Quelques Aspects du Comportement des Geotextiles en Mécanique des Sols*. These de Docteur ES-Sciences, L'Université Scientifique et Médicale et L'Institut National Poly Technique de Grenoble, Grenoble, France, 250 pp.

Grzelak, M.D., Maurer, B.W., Pullen, T.S., Bhatia, S.K., and Ramarao, B.V. (2011) A comparison of test methods adopted for assessing geotextile tube dewatering performance. *Proceedings of the Geo-Frontiers 2011 Conference*, March 13-16 2011, Dallas, TX, pp 2141-2151. ASCE.

Guo, W. (2012). *Geosynthetic Tubes and Mats: Experimental and Analytical Studies (Tese de Doutorado)*. School of Civil & Environmental Engineering. Nanyang Technological University. 388p.

Guo, W., Chu, J., Yan, S., & Nie, W. (2014). Analytical solutions for geosynthetic tube resting on rigid foundation. *Geomechanics and engineering*, 6(1), 65-77

Guo W. Chu J. Yan S.. (2016) Analytical and numerical studies on geosynthetic mattress resting on deformable foundation soil. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering <https://doi.org/10.3208/jgssp.IGS-16>;

Hamad F., Vermeer P. e Moormann Ch. (2014) *Geotextile-soil modeling using the material point method (MPM)*. Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, Germany;

HOUNG, T. C. TWO-DIMENSIONAL ANALYSIS OF WATER-FILLED GEOMEMBRANE TUBES USED AS TEMPORARY FLOOD-FIGHTING DEVICES. Tese de mestrado—Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, fev. 2001.

IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração). *Gestão e manejo de Rejeitos de Mineração*; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1º Ed. – Brasília: IBRAM, 2016. 128 p.

KAZIMIEROWICZ, K. (1994). Simple analysis of deformation of sand-sausages. In: 5th International Conference of Geotextile Geomembrane and related products. 1994, Singapore, p. 775-778.

KIM, H.-J.; WON, M.-S.; JAMIN, J. C. Finite-Element Analysis on the Stability of Geotextile Tube-Reinforced Embankments under Scouring. **International Journal of Geomechanics**, v. 15, n. 2, jun. 2014.

KIM, M. TWO-DIMENSIONAL ANALYSIS OF FOUR TYPES OF WATER-FILLED GEOMEMBRANE TUBES AS TEMPORARY FLOOD-FIGHTING DEVICES. Tese de doutorado—Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, fev. 2003.

Koerner, R. M. (2016). *Geotextiles – From Design to Applications*. Woodhead Publishing Series in Textiles: Numer 175.

Koerner, Robert M. (2005) *Designing with Geosynthetics - 5Th Edition Vol. 1* . Xlibris US.

Koerner, Robert M. (2016) *Designing with Geosynthetics - 6Th Edition Vol. 1* . Xlibris US. Edição do Kindle.

Kutay, M.E. & Aydilek, A.H. (2004). Retention performance of geotextile containers confining geomaterials. *Geosynthetics International*, 11, No. 2, 100-113.

Lafleur J., Eichenauer T., Werner G. (1996). Geotextile filter retention criteria for well graded cohesionless soils. Geofilters' 96 Conference, J Lafleur and A. L. Rollin (eds.) Montréal, Canadá, Pp. 429-438

Lafleur, J., Mlynarek, J., Rollin, A.L., (1992). Filter criteria for well graded cohesionless soils. First International. Conference on Geo-filters, Karlsruhe, Germany, pp. 97-106.

LAWSON, C. R. *Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering*. Geosynthetics International. v. 15, n. 6, p. 384-427, 2008.

LESHCHISNKY, D., *et al.*, 1996. *Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects*.

- Liao, K., and S. K. Bhatia. 2005 Geotextile Tube: Filtration Performance of Woven Geotextiles Under Pressure. Geosynthetics '05, IFAI Las Vegas, Nevada, 15 p
- LIU, G. S (1981). Design criteria of sand sausages for beach defences. In: 19th Congress of the International Association for Hydraulic Research. 1981, New Delhi, India. Subject B (b), Paper n° 6, p. 123-131.
- MARTINS, P. M. Utilização de tubos geotêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração. (Dissertação de Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006. 180p.
- Maurer, B. W. (2009). Flocculation and Filtration in the Geotextile Tube Environment. Master of Science. Graduate School of Syracuse University, NY. 159p.
- Mendes, M. J. A. (2006) Comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos submetidos à tração confinada. (Dissertação de mestrado) Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
- MENDONÇA, P. M. F. AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE CONFINAMENTO COM GEOTÊXTIL PARA REJEITOS DE MINERAÇÃO. Monografia de graduação—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- MILAGRES, B. V. (2016) Degradação de geotêxteis frente a elementos climáticos em ensaios de campo e Laboratório: realidade climática local. (Dissertação de mestrado). Programa de pós graduação em geotecnia da UFOP.
- MINAS GERAIS. (2016) DECRETO N° 46.993, DE 2 DE MAIO DE 2016. Institui a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem e dá outras providências.
- MINAS GERAIS (2019) LEI N° 23291, DE 25 DE FEVEREIRO DE 2019. Institui a Política Estadual de Segurança de Barragens.
- Moo-Young, H. K., Gaffney, D.A., Mo, X. Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile. Geotextiles and Geomembranes, v. 20, o. 289-303, 2002.
- MOO-YOUNG, H.K.; TUCKER, W.R (2002). Evaluation of vacuum filtration testing for geotextiles tubes. Geotextiles and Geomembranes, v.20, p. 191-212.

NEWMAN, P; HODGSON, M; ROSSELOT, E. The disposal of tailings and minewater sludge using geotextile dewatering techniques. *Minerals Engineering*, v. 17, n. 2, p 115-121. 2004.

Palmeira, E.M., Gardoni, M.G., 2002. Drainage and filtration properties of non-woven

Palmerton, J. B. (2002). Distinct element modelling of geosynthetic fabric containers. *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, Balkema, Vol. 3*, pp. 1021–1024.

PEIXOTO, C. L. P. Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia – NUGEO. Ouro Preto, 2012. 108 p.

Perkins, S. W. (2000). Constitutive modeling of geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 18, 273–292.

PILARZYCK, K. W. *Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering*. ISBN-9058093026. 2000. Balkema.

PLAUT, R. H.; SUHERMAN, S. (1998). Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes. *Acta Mechanica*, n° 3-4, p. 207-218.

PORTES A. M. C. (2013). Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta. Dissertação de mestrado, Curso de mestrado em geotecnia e transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 180p.

Ratnayesuraj, C. R. and Bhatia, S. K. (2018). Testing and analytical modeling of two-dimensional geotextile tube dewatering process. *Geosynthetics International*, 25, No. 2, 132–149. [<https://doi.org/10.1680/jgein.17.00038>]

Saathoff, F., Oumeraci, H., and Restall, S. (2007). "Australian and German experiences on the use of geotextile containers." *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 25(4-5), pp. 251-263.

Seay, P.A., 1998. Finite element analysis of geotextile tubes. M.S. Thesis. Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnical Institute and State University, Blacksburg, VA, 1998.

Shin, E. C., and Oh, Y. I. (2003). "Analysis of geotextile tube behaviour by large-scale field model tests." *Geosynthetics International*, Vol. 10(4), pp. 134-141.

Shin, E. C., and Oh, Y. I. (2004). "Consolidation process of geotextile tube filled with fine-grained materials." *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 14(2), pp. 150-158.

Shin, E. C., Kang, J. K., Kim, S. H., and Park, J. J. (2016). "Construction technology of environmental sustainable shore and harbor structures using stacked geotextile tube." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 2095–2102, DOI: 10.1007/s12205-015-0792-3.

Sun L., Yue C., Guo W. e Ren Y. (2017) Lateral stability analysis of wedged geomembrane tubes using PFC2D, *Marine Georesources & Geotechnology*, 35:5, 730-737, DOI: 10.1080/1064119X.2016.1236861

Tahmasebipoor *et al.* (2012). A parametric study of stability of geotextile-reinforced soil above an underground cavity. *Arabian Journal of geosciences*. DOI: 10.1007/s12517-010-0188-0

TENCATE, (2018). El Mochito Mine – Case Study. TenCate Geotube. Extraído de https://www.tencategeotube.com/media/a1c98ccb-742c-46b7-83ae-b41b9a70bbec/1N6_tA/TenCate%20Water%20and%20Environment/Documents/PDF/Case%20studies/CS%20EI%20Mochito%20Honduras_tcm28-43597.pdf. Acesso em: 10 jun. 2018

TRAINER, E. Disposal of Coal Mine Slurry Waste. In: *Bulletin G2009-02*. Ten Cate Geosynthetic North America, Geotube. Georgia, Estados Unidos das Américas, 2009.

VAN DEURSEN, C. M. Métodos de desaguamento e disposição de rejeito de bauxita: estudo de caso e avaliação econômica (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. São Paulo, 2016. 127 p.

VERTEMATTI, L.C. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Edgard Blucher, 2ª edição, São Paulo, 2015.

Wilke, M. Breytenbach, M. Reunanen, J. & Hilla, V-M. Efficient environmentally sustainable tailings treatment and storage by geosynthetic dewatering tubes: Working principles and Talvivaara case study, Vancouver 25-28 October, 2015. *Proc. intern. symp Tailings and Mine Waste 2015*

Zanten, R. Veldhuijzen Van (1986); "Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering"; A. A. Balkema (ISBN 90 6191 624 0).

ZHANG, W.; TAN, J. 2-D finite element analysis and stability calculation of geotextile tubes. **8ICG 8th International Geosynthetics Conference Proceedings**, 2006.

Zhu, M e Beech, J. (2015) Geotextile Tube Dewatering. *Geo-Strata – Geo Institute of ASCE*, 2015, Vol. 10, Issue 2, Pg. 26-28,30-32.

APÊNDICE A – Linguagem de programação – metodologia Plaut e Suherman

```
<!DOCTYPE html>
<html>
  <head>
    <meta charset="utf-8" />
    <title>Animação</title>
    <script type="text/javascript" src="jsgif/LZWEncoder.js"></script>
    <script type="text/javascript" src="jsgif/NeuQuant.js"></script>
    <script type="text/javascript" src="jsgif/GIFEncoder.js"></script>
    <script type="text/javascript" src="jsgif/b64.js"></script>
    <script type="text/javascript" src="canvasjs/dist/canvasjs.min.js"></script>
  </head>
  <body>
    <div style="position: fixed">
      <table>
        <tr>
          <td>L</td>
          <td><input type="text" name="L" id="L" value="4.30" style="width: 50px"
/></td>
        </tr>
        <tr>
          <td>&upsih;<sub>int</sub></td>
          <td><input type="text" name="Y" id="Y" value="14.5" style="width: 50px"
/></td>
        </tr>
        <tr>
          <td>P<sub>bot</sub></td>
          <td><input type="text" name="Pbot" id="Pbot" value="0.35" style="width: 50px"
/></td>
        </tr>
        <tr>
          <td></td>
          <td><input type="button" value="Gerar figura" onclick="makeFigure()" /></td>
        </tr>
      </table>
    </div>
    <div style="margin: 0 auto; max-width: 995px">
      <div id="chartContainer" style="height: 600px; width: 600px;margin: 0 auto"></div>
      <input id="download_but" type="button" onclick="download()" style="display:none"
value="Gerar GIF!" />
    </div>

    <script type="text/javascript">
      var encoder = null;

      window.onload = function () {
```

```

initGifEncoder();

let i = 0;
    let step = 0.02;
for(let Pbot = 0.2; Pbot <= 10; Pbot += step){
    if(Math.round(Pbot * 100) / 100 == 1) step *=10;
    //setTimeout(() => compute(Pbot), i++ * 250);
}
//setTimeout(() => document.getElementById('download_but').style.display =
'block', i * 250);
}

function $(id){
    return document.getElementById(id);
}

var L = $('L') ? parseFloat($('L').value) : 4.30;
var y_int = $('Y') ? parseFloat($('Y').value) : 14.5; // Peso específico = 14.5 kN/m^3

function makeFigure(){
    L = $('L') ? parseFloat($('L').value) : 4.30;
    y_int = $('Y') ? parseFloat($('Y').value) : 4.30; // Peso específico = 14.5 kN/m^3

    compute(parseFloat($('Pbot').value));
}

function renderGraph(points, title){
    var chart = new CanvasJS.Chart("chartContainer", {
        title:{
            text: title
        },
        axisY:{
            minimum: 0 * L,
            maximum: 0.40 * L,
            gridColor: "#fff"
        },
        axisX:{
            minimum: -0.40 * L,
            maximum: 0.18 * L
        },
        data: [//array of dataSeries
            {
                type: "line",
                markerType: "none",
                lineThickness: 1.2,
                dataPoints: points
            }
        ]
    });
}

```

```

    ]
  });

  chart.render();
  var ctx = document.getElementsByTagName('canvas')[0].getContext('2d');
  encoder.addFrame(ctx);
}

function integrate(f, start, end, h) {
  let total = 0;
  h = h || 0.01;
  for (let x = start; x < end; x += h) {
    var kx0 = f(x);
    var kx1 = f(x + 0.5 * h * kx0);
    var kx2 = f(x + 0.5 * h * kx1);
    var kx3 = f(x + h * kx2);
    total += h * (kx0 + 2*kx1 + 2*kx2 + kx3) / 6;
  }
  return total;
}

function round(n, precision){
  let k = Math.floor(Math.log10(n)) + 1;
  let m = Math.pow(10, precision - k);
  n = " + Math.round(n * m) / m;
  while(n.length <= precision){
    if(n.indexOf('.') == -1) n += '.';
    else n += '0';
  }
  return n;
}

function compute(Pbot){
  let ini = new Date();

  let F = function(angle_ini, angle_end, k){
    return integrate((theta) => {
      return 1 / Math.sqrt(1 - Math.pow(k*Math.sin(theta), 2))
    }, angle_ini, angle_end, 0.0002);
  };

  let E = function(angle_ini, angle_end, k){
    return integrate((theta) => {
      return Math.sqrt(1 - Math.pow(k*Math.sin(theta), 2))
    }, angle_ini, angle_end, 0.0002);
  };
}

```

```

// K(k) é Complete elliptic integral of the first kind:
https://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic_integral#Complete_elliptic_integral_of_the_first_kind
// E(k) é Complete elliptic integral of the second kind.
let K_complete = (k) => F(0, Math.PI/2, k);
let E_complete = (k) => E(0, Math.PI/2, k);

// calculamos iterativamente qual o valor de k.
let k = 0;
let start = 0;
let end = 1;
const goal = 0.5 / Pbot;
let current = 1;
do{
  k = (start + end) / 2;
  current = K_complete(k) - E_complete(k);
  if(current < goal){
    start = k;
  }else if(current > goal){
    end = k;
  }
}while((end - start) > 1e-7);

// A partir de k, obtemos t:
let t = Math.pow(k * Pbot / 2, 2);
let T = t * y_int * L * L;

// obtemos as outras variaveis:
let b = 1 - 2 * k * Math.sqrt(t) * K_complete(k);
let B = b * L;
let h = (1 - Math.sqrt(1 - k*k)) * Pbot;
let H = h * L;

k)) * Pbot;
let w = b + 2 * (E(0, Math.PI/4, k) - (1 - k*k/2) * F(0, Math.PI/4,
let W = w * L;

let a = Pbot * b;
let A = a * L * L;

console.log('T = ', T);
console.log('k = ', k);
console.log('b = ', b);
console.log('B = ', B);
console.log('H = ', H);
console.log('W = ', W);
console.log('A = ', A);

```

```

//
        let min_x = 9999;
        let max_x = -9999;

// criamos nosso vetor de x e y:
let points = [];
let lastE = E(0, 0, k);
let lastF = F(0, 0, k);
for(let phi = 0; phi < Math.PI; phi += 0.01){
    let x = (E(0, phi, k) - (1 - k*k/2) * F(0, phi, k)) * Pbot;
    let y = (1 - Math.sqrt(1 - Math.pow(k*Math.sin(phi), 2))) * Pbot;
    points.push({'x': x * L, 'y': y * L});

        if(x < min_x){
            min_x = x;
        }
        if(x > max_x){
            max_x = x;
        }
    }
    points.push(points[0]);

        console.log('W2 = ', (max_x - min_x) * L);

// Plotamos
renderGraph(points, "Pbot = " + round(Pbot, 4) + "    T = " + round(T, 6));

// debug
        console.log(new Date() - ini);
}

function initGifEncoder(){
    encoder = new GIFEncoder();
    encoder.setRepeat(0);
    encoder.setDelay(250);
    encoder.start();
}

function download(){
    encoder.finish();
    //encoder.download("animacao.gif");
    let binary_gif = encoder.stream().getData() //notice this is different from the as3gif
package!
    let data_url = 'data:image/gif;base64,'+encode64(binary_gif);
    document.body.innerHTML += '<a download="animacao.gif" href="' + data_url +
">animacao.gif</a>';

```

```
}  
</script>  
</body>  
</html>
```

APÊNDICE B – Linguagem de programação – metodologia Guo

```
<!DOCTYPE html>
<html>
  <head>
    <meta charset="utf-8" />
    <title>Animação</title>
    <script type="text/javascript" src="jsgif/LZWEncoder.js"></script>
    <script type="text/javascript" src="jsgif/NeuQuant.js"></script>
    <script type="text/javascript" src="jsgif/GIFEncoder.js"></script>
    <script type="text/javascript" src="jsgif/b64.js"></script>
    <script type="text/javascript" src="canvasjs/dist/canvasjs.min.js"></script>
  </head>
  <body>
    <div style="position: fixed">
      <table>
        <tr>
          <td>L</td>
          <td><input type="text" name="L" id="L" value="4.30" style="width: 50px"
/></td>
        </tr>
        <tr>
          <td>&upsih;<sub>int</sub></td>
          <td><input type="text" name="Y" id="Y" value="14.5" style="width: 50px"
/></td>
        </tr>
        <tr>
          <td>P<sub>0</sub></td>
          <td><input type="text" name="Pbot" id="Pbot" value="7" style="width: 50px" />
(P<sub>0</sub> = o que excede yH)</td>
        </tr>
        <tr>
          <td></td>
          <td><input type="button" value="Gerar figura" onclick="makeFigure()" /></td>
        </tr>
      </table>
    </div>
    <div style="margin: 0 auto; max-width: 995px">
      <div id="chartContainer" style="height: 600px; width: 600px;margin: 0 auto"></div>
      <input id="download_but" type="button" onclick="download()" style="display:none"
value="Gerar GIF!" />
    </div>

    <script type="text/javascript">
      var encoder = null;

      window.onload = function () {
```

```

initGifEncoder();

let i = 0;
    let step = 0.02;
for(let Pbot = 0.2; Pbot <= 10; Pbot += step){
    if(Math.round(Pbot * 100) / 100 == 1) step *=10;
    //setTimeout(() => compute(Pbot), i++ * 250);
}
//setTimeout(() => document.getElementById('download_but').style.display =
'block', i * 250);
}

function $(id){
    return document.getElementById(id);
}

var L = $('L') ? parseFloat($('L').value) : 4.30;
var y_int = $('Y') ? parseFloat($('Y').value) : 14.5; // Peso específico = 14.5 kN/m^3

function makeFigure(){
    L = $('L') ? parseFloat($('L').value) : 4.30;
    y_int = $('Y') ? parseFloat($('Y').value) : 4.30; // Peso específico = 14.5 kN/m^3

    compute(parseFloat($('Pbot').value), 0, 2 * Math.PI);
}

function renderGraph(points, title){
    var chart = new CanvasJS.Chart("chartContainer", {
        title:{
            text: title
        },
        axisY:{
            minimum: 0 * L,
            maximum: 0.40 * L,
            gridColor: "#fff"
        },
        axisX:{
            minimum: -0.18 * L,
            maximum: 0.40 * L
        },
        data: [//array of dataSeries
            {
                type: "line",
                markerType: "none",
                lineThickness: 1.2,
                dataPoints: points
            }
        ]
    });
}

```

```

    ]
  });

  chart.render();
  var ctx = document.getElementsByTagName('canvas')[0].getContext('2d');
  encoder.addFrame(ctx);
}

function integrate(f, start, end, h) {
  let total = 0;
  h = h || 0.01;
  for (let x = start; x < end; x += h) {
    var kx0 = f(x);
    var kx1 = f(x + 0.5 * h * kx0);
    var kx2 = f(x + 0.5 * h * kx1);
    var kx3 = f(x + h * kx2);
    total += h * (kx0 + 2*kx1 + 2*kx2 + kx3) / 6;
  }
  return total;
}

function round(n, precision){
  let k = Math.floor(Math.log10(n)) + 1;
  let m = Math.pow(10, precision - k);
  n = "" + Math.round(n * m) / m;
  while(n.length <= precision){
    if(n.indexOf('.') === -1) n += '.';
    else n += '0';
  }
  return n;
}

function compute(Pbot, t0, t1){
  let ini = new Date();

  let H_t = L / ((t0 + t1) / 2);
  let T = (Pbot * H_t + 1/2 * y_int * H_t * H_t) / 2
  let Q = 1 + Pbot * Pbot / (2 * y_int * T);

  //let L_t = Math.sqrt(2 * T / y_int) * (-Math.PI*Math.sqrt(Q) +
(Math.PI*(Q+1))/Math.sqrt(1 - Q + 2 * Math.sqrt(Q * (Q-1))));

  // criamos nosso vetor de x e y:
  let points = [];

  let y = 0;
  for(let theta = -Math.PI/2; theta < 2*Math.PI - Math.PI/2; theta += 0.01){

```

```

        let x = 1 / y_int * (-Pbot + Math.sqrt(Pbot*Pbot + 2 * y_int
* T * (1 - Math.sin(theta)))));
        let y = -Math.sqrt(T / (2*y_int)) * integrate(function(theta){
            return Math.sqrt(Q - Math.sin(theta)) - Q /
Math.sqrt(Q - Math.sin(theta));
        }, -Math.PI/2, theta, 0.001);

        points.push({'x': y, 'y': -x});
    }
    points.push(points[0]);

    let L_t = 0;
    let Y_max = 0;
    let Y_min = 0;
    let X_max = 0;
    let X_min = 0;
    for(let i = 1; i < points.length; i++){
        if(points[i].x > X_max){
            X_max = points[i].x;
        }
        if(points[i].x < X_min){
            X_min = points[i].x;
        }
        if(points[i].y > Y_max){
            Y_max = points[i].y;
        }
        if(points[i].y < Y_min){
            Y_min = points[i].y;
        }
        L_t += Math.sqrt(Math.pow(points[i].x - points[i-1].x, 2)
+ Math.pow(points[i-1].y - points[i].y, 2));
    }

    if((t1 - t0) > 1e-6){
        if(L_t < L){
            compute(Pbot, t0, (t0 + t1) / 2);
            return;
        }else if(L_t > L){
            compute(Pbot, (t0 + t1) / 2, t1);
            return;
        }
    }
    let H = Y_max - Y_min;
    let B = X_max - X_min;

    let i = points.length - 1;

```

```

        let b = Math.sqrt(Math.pow(points[i].x - points[i-1].x, 2) +
Math.pow(points[i-1].y - points[i].y, 2));

        let A = ((Pbot + y_int * H_t) / y_int)* b;

        console.log('A = ', A);
        console.log('L_t = ', L_t);
        console.log('b = ', b);
        console.log('B = ', B);
        console.log('H = ', H);

        for(let i = 0; i < points.length - 1; i++){
            points[i].y -= Y_min;
        }

// Plotamos
renderGraph(points, "Pbot = " + round(Pbot, 4) + "    T = " + round(T, 6));

// debug
        console.log(new Date() - ini);
    }

function initGifEncoder(){
    encoder = new GIFEncoder();
    encoder.setRepeat(0);
    encoder.setDelay(250);
    encoder.start();
}

function download(){
    encoder.finish();
    //encoder.download("animacao.gif");
    let binary_gif = encoder.stream().getData() //notice this is different from the as3gif
package!
    let data_url = 'data:image/gif;base64,'+encode64(binary_gif);
    document.body.innerHTML += '<a download="animacao.gif" href="' + data_url +
">animacao.gif</a>';
    }
</script>
</body>
</html>

```