



**BARREIRAS DE CONTENÇÃO DE IMPACTO COM TUBOS
DE GEOTÊXTEIS**

FLÁVIO DA SILVA ORNELAS

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**G.TD - 198/24
JUNHO / 2024**

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

**BARREIRAS DE CONTENÇÃO DE IMPACTO COM TUBOS
DE GEOTÊXTEIS**

FLÁVIO DA SILVA ORNELAS, MSc.

ORIENTADOR: RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc.

**CO-ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO,
Ph.D.**

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD - 198/24

BRASÍLIA / DF: JUNHO / 2024

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

**BARREIRAS DE CONTENÇÃO DE IMPACTO COM TUBOS
DE GEOTÊXTEIS**

FLÁVIO DA SILVA ORNELAS, MSc.

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)**

**LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, PhD (UnB)
(CO-ORIENTADOR)**

**MARIANA RAMOS CHRUSCIAK, DSc (UFRR)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRUNO GUIMARÃES DELGADO, DSc (VALE SA / UFOP)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**ANDRÉ LUIS BRASIL CAVALCANTE, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 20 de JUNHO de 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

ORNELAS, FLAVIO DA SILVA

Barreiras de contenção de impacto com tubos de geotêxteis. [Distrito Federal] 2024. xx, 128 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2024) Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-------------------|---------------------------|
| 1. Tubo Geotêxtil | 2. Barreiras de contenção |
| 3. Impacto | 4. Fluxo de detritos |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ORNELAS, F. S. (2024). Barreiras de contenção de impacto com tubos de geotêxteis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-198/24, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Flávio da Silva Ornelas

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Barreiras de contenção de impacto com tubos geotêxteis.

GRAU / ANO: Doutor / 2024

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

Flávio da Silva Ornelas

206 Sul, Alameda 10, Lt. 31

77.020-526 – Palmas/TO – Brasil

DEDICATÓRIA

À Deus toda a glória honra!

Dedico este trabalho à minha esposa Aline Failde C. Ornelas e meus filhos Flávia e Felipe

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus pois, tudo vem d'Ele, apesar de muitas vezes querer ser eu o comandante, é n'Ele que confio e que têm o controle da minha vida!

À minha esposa Aline e meus filhos Flávia e Felipe, minha motivação e ancora no meio das tempestades!

Aos meus pais Waldemar (*in memoria*) e Fátima Ornelas e minha avó Maria Abadia.

Ao Professor Luís Fernando, além de orientador, colega de congressos, viagens de férias de experimentações gastronômicas, terapeuta de emoções e principalmente, um grande amigo, o qual um aluno de pós-graduação consegue conforto de um abraço sincero.

Ao Professor Rafael Cerqueira Silva, pela atenção, orientação e apoio para a pesquisa.

Ao Professor Ennio Palmeira pelo apoio e pelo insight que resultou nesta tese.

Aos professores da pós-graduação pela transmissão de conhecimentos tão preciosos e tão profundos que com muita satisfação, exigem grande dedicação.

Aos colegas de pós-graduação que me ajudaram nesta jornada, e no combate ao desanimo das dificuldades que atormentam ao longo do processo. Agradeço as consultorias do Renato Paulinelli, Marcus Vinícius Souza, Michael Vargas, Nelson Sanches, Flavio Vieira.

Agradeço aos colegas e alunos que ajudaram carregar os materiais e realizar os experimentos: Ricardo Soares, Breno, Jefferson Marcos, Anderson Pereira.

A UnB e o excelente programa de pós-graduação em Geotecnia.

Aos apoiadores e patrocinadores: Tewal Construtora e Incorporadora (Vilson Teo), IFTO - Campus Palmas, TCE-TO, SOMATEC Engenharia Clínica, SLOPEGEO GEOTECHNICS (Marcos Milhomem) e Rei do Aço (José Silvério).

A HUESKER pelos tubos de geotêxtil e todas as orientações utilizadas na pesquisa.

A ABMS Núcleo Norte: Rambo, Mariana Crusciak, Gabrieis e Ana C. Strava.

Ao IFTO - Campus Palmas, direção, professores e demais servidores que permitiram a oportunidade dessa conquista.

Aos colegas do Colegiado de Engenharia Civil do IFTO - Campus Palmas.

A todos que contribuíram e apoiaram direta ou indiretamente este trabalho.

A todos vocês,

MUITO OBRIGADO!

Filosofias que moveram esta tese:

“O começo é mais que a metade do todo!” Aristóteles

“É preciso estudar muito para saber pouco” Montesquieu

“Quem não sabe o que busca, não identifica o que acha” Imanuel Kant

“Se você está no caminho errado, voltar atrás significa progresso.” C.S Lewis

“Há mais pessoas que desistem, do que pessoas que fracassam!” Henry Ford

Filosofias elaboradas por quem chegou a estudar 17 horas por dia para chegar até aqui:

Previamente à concretização de uma inovação, verifica-se um extenso processo resiliente de tentativas e erros. Esse processo iterativo é fundamental para o desenvolvimento de soluções eficazes e confiáveis.

O insucesso é apenas uma oportunidade de recomeçar.

Não vamos agonizar, mas vamos organizar!

Confio em Deus, Ele controla tudo! Isaias 41:10

Os títulos não aumentam a importância das pessoas, o que aumenta com os títulos são as responsabilidades.

RESUMO

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Barreiras de contenção de impacto com tubos de geotêxteis.

Publicação G.TD-198/24, Pós-Graduação em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p. Data: 20 de junho de 2024.

Autor: Flávio da Silva Ornelas, MSc.

Orientador: Rafael Cerqueira Silva, DSc, Co-orientador: Luís Fernando Martins Ribeiro-PhD

A Engenharia Geotécnica busca constantemente o desenvolvimento de tecnologias, atualização e otimização de estruturas seguras para que eventos diversos não ceifem vidas ou causem grandes prejuízos ambientais e financeiros. Recentemente, rupturas trágicas de barragens de rejeito no Brasil, causaram mortes e grandes destruições, e a necessidade deste desenvolvimento tecnológico capaz de evitar danos as pessoas e ao meio ambiente.

Toda obra de engenharia tem risco, não alheio a esta possibilidade, barragens de rejeito brasileiras estão em situação de indefinição devido a nova legislação que exige inclusive o descomissionamento, uma atividade que envolve muitos problemas e onde o risco de falha é o principal. Uma barreira de contenção de impactos construída à jusante destas barragens pode ser eficaz na contenção do fluxo de detritos em caso de falha. Os tubos geotêxteis, em uma nova abordagem, são utilizados nesta pesquisa como uma opção de barreira de contenção de impacto que tem grandes vantagens na execução, nos custos e segurança. A tecnologia é versátil e pode trazer muitos benefícios como a reutilização de rejeitos ou preenchimento com materiais de baixo valor energético ou reaproveitados.

Nesta pesquisa foram experimentados tubos de geotêxtil como barreiras de contenção preenchidas com rejeito de mineração, livres de fixação e com atrito reduzido, experimentando impactos em modelos reduzidos para encontrar a resistência inercial. O fator de segurança para a estabilidade da estrutura, foi construído com equação que é a razão entre o peso próprio da estrutura de barramento e seu coeficiente de atrito estático e a pressão de impacto, onde os dados apresentaram correlação adequada o que sugere a viabilidade em suportar impactos e mitigar riscos. Por fim foram apresentados critérios de design de barreiras de contenção de tubos de geotêxtil e a viabilidade de uso em grandes escalas.

Palavras-chave: Tubo Geotêxtil, Barreiras, Impacto, Fluxo de detritos.

ABSTRACT

TITLE: Impact containment barriers with geotextile tubes

Author: Flávio da Silva Ornelas, MSc.

Advisor: Rafael Cerqueira Silva-DSc, Co-orientador: Luís Fernando Martins Ribeiro-PhD

Geotechnical engineering is constantly seeking to develop technologies, update and optimize safe structures so that various events do not claim lives or cause major environmental and financial damage. Recently, tragic tailings dam collapses in Brazil have caused deaths and major destruction, and the need for technological development to prevent damage to people and the environment.

Brazilian tailings dams are in a situation of uncertainty due to new legislation that even requires decommissioning, an activity that involves many problems and where the risk of failure is the main one. An impact containment barrier built downstream of these dams can be effective in containing the flow of debris in the event of failure. Geotextile tubes in a new approach, is used in this research as an impact containment barrier option that has major advantages in execution, cost and safety. The technology is versatile and can bring many benefits such as the reuse of tailings or filling with low-energy or reused materials.

In this research, geotextile tubes were tested as containment barriers filled with mining tailings, free of fixation and with reduced friction, experimenting with impacts in reduced models to find the inertial resistance. The safety factor for the stability of the structure was constructed using an equation which is the ratio between the self-weight of the dam structure and its coefficient of static friction and the impact pressure, where the data showed an adequate correlation which suggests that it is viable to withstand impacts and mitigate risks. Finally, design criteria for geotextile tube containment barriers and the feasibility of using them on a large scale were presented.

Keywords: Geotextile tube, Barriers, Impact, Debris flow.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1 HISTÓRICO DO USO DE TUBOS GEOTÊXTEIS EM OBRAS GEOTÉCNICAS	3
1.2 O CONTEXTO DAS BARRAGENS DE REJEITO NO BRASIL.....	3
1.3 RELEVÂNCIA DA PESQUISA	4
1.4 OBJETIVO DA PESQUISA	5
1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.5 ESCOPO DO TRABALHO	6
2. CONTEXTO DAS BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO BRASILEIRAS8	8
2.1 TUBOS DE GEOTÊXTEIS	9
2.1.1 APLICAÇÕES DE TUBOS DE GEOTÊXTIL.....	11
2.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO	14
2.1.3 ESTABILIDADE DO SISTEMA DE TUBO DE GEOTÊXTIL.....	20
2.1.4 ESTABILIDADE INTERNA	21
2.1.5 MATERIAL DE ENCHIMENTO E FILTRAÇÃO EM TUBO DE GEOTÊXTIL.....	25
2.2 MOVIMENTO DE MASSA DE FLUXO DE DETRITOS.....	26
2.2.1 ESTUDO DO IMPACTO DE FLUXO DE DETRITOS	29
2.2.2 ENERGIA DE IMPACTO EM ESTRUTURAS - ALTERNATIVA AO MÉTODO DA FORÇA	31
2.2.3 PRESSÃO DE IMPACTO DE FLUXO DE DETRITOS.....	33
2.3 HISTÓRICO DE ESTRUTURAS PARA MITIGAR IMPACTOS DE FLUXO DE DETRITOS	35
2.4 ESTRUTURAS DE MUROS DE ARRIMO E BARREIRAS DE IMPACTO... 37	37
2.4.1 FALHAS EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO E BARRAMENTOS	40
2.4.2 RESISTENCIA AO DESLIZAMENTO – ATRITO	41
2.4.3 MOVIMENTO DE CORPO, DISSIPACÃO DE ENERGIA E COLISÕES	44
2.5 MODELOS EXPERIMENTAIS	46
2.6 CANAIS IHDRÁULICOS FABRICADOS.....	51
3. CARACTERÍSTICAS DO ESTUDO EXPERIMENTAL	54
3.1 O FATOR DE SEGURANÇA.....	55

3.2	CANAL HIDRÁULICO	57
3.3	TUBO DE GEOTEXTIL E PREENCHIMENTO	61
3.3.1	CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO	62
3.4	PROGRAMA DE EXPERIMENTOS.....	64
3.5	BARREIRAS DE TUBO DE GEOTÊXTIL E FATOR DE FORMA	66
3.6	FATOR DE ESCALA DAS BARREIRAS DE TUBO GEOTÊXTIL	69
3.7	INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO	72
3.7.1	VELOCIDADE, VOLUME E MASSA	72
3.7.2	INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE PRESSÃO DE IMPACTO	73
3.7.3	PRESSÃO DE IMPACTO	74
4.	RESULTADOS DE EXPERIMENTOS COM BARREIRAS.....	78
4.1	ANÁLISE DE EXPERIMENTOS	78
4.1.1	- RESULTADOS DE EXPERIMENTOS - BTG 1	79
4.1.2	RESULTADOS DE EXPERIMENTOS - BTG 2.....	82
4.1.3	RESULTADOS DE EXPERIMENTOS - BTG 3.....	84
4.1.4	AMPLIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO.....	86
4.1.5	COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS BARREIRAS COM AS DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS.....	86
4.1.6	CORRELAÇÕES VELOCIDADE, VAZÃO, E IMPACTO COM A PRESSÃO DE IMPACTO DE ÁGUA E DE FLUXO DE DETRITOS.....	88
4.2	CRITÉRIOS DE DESING DE BARREIRAS DE CONTENÇÃO COM TUBOS DE GEOTEXTIL	90
4.3	VIABILIDADE E UTILIZAÇÃO DE BARREIRAS EM GRANDES ESCALAS	93
5.	CONCLUSÕES.....	95
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tubo geotêxtil em execução - Holanda 1962 - Tecate (2020).....	10
Figura 2.2 Aplicações hidráulicas e marítimas de tubos geotêxteis: (a) revestimentos (expostos ou submersos); (b) quebra-mares marítimos; (c) diques de proteção; (d) diques de contenção; (e) quebra-mares (traduzido e adaptado de LAWSON, 2008)	12
Figura 2.3 Colocação de preenchimento de terra dentro do dique de tubo geotêxtil no Projeto Incheon Bridge (Yee <i>et al.</i> ; 2008).....	14
Figura 2.4 Parâmetros fundamentais do tubo geotêxtil (LAWSON, 2008)	15
Figura 2.5 Parâmetros de engenharia importantes para tubos geotêxteis cheios (traduzido e adaptado de LAWSON, 2008)	16
Figura 2.6. Modos de estado limite para tubos de geotêxtil: (a) externos; b) interno (LAWSON, 2008)	18
Figura 2.7. Esquema típico de instalação do tapete de ancoragem (adaptado de FOLEY e WRIGHT, 2017).....	19
Figura 2.8 Tubo de geotêxtil sob tapete de ancoragem (CASTRO, 2020)	20
Figura 2.9 Seção transversal do tubo geotêxtil (Leshchinsky <i>et al.</i> , 1996).....	21
Figura 2.10. Localização das tensões geradas em tubos de geotêxtil (LAWSON, 2008).....	22
Figura 2.11 Opções de portas de enchimento do tubo geotêxtil	24
Figura 2.12. (a) Tensão circunferencial ao redor de um tubo geotêxtil preenchido em função da curvatura; (b) aproximação da distribuição em tensão circunferencial em termos de [Tmax] (Adaptado de LAWSON, 2008).....	25
Figura 2.13 (a) Túnel de desvio, França (Huebl e Fiebiger, 2005); (b) Check dams, Espanha (Corominas, 2013); (c) Debris racks, Colorado, USA (deWolfe <i>et al.</i> , 2008); (d) Barreiras tubulares, Japão (Ishikawa, 2008); (e) e (f) Barragem, BC, Canadá (Wieczorek <i>et al.</i> , 1997); (g) Barreira flexível, Japão (Volkwein et al (2011); (h) Túneis falsos (Corominas, 2013).	36
Figura 2.14. Barragem de CCR para contenção de rejeitos (VALINHAS e MOREIRA, 2020)	37
Figura 2.15. Coeficientes de atrito estático e cinético (JONES & CHILDERS, 1993)	43
Figura 2.16. Diagrama esquemático do conceito de fluxo equivalente onde a) é o fluxo natural e b) o fluxo equivalente (adaptado de HUNGR, 1995).....	51
Figura 2.17 Equipamento de simulação de deposição hidráulica-ESDH Ribeiro (2000).....	52
Figura 2.18. Canal de ondas elaborado por Girelli (2008).....	52
Figura 2.19 Canal de ondas elaborado por Tatto (2014).....	52
Figura 2.20 Canal elaborado por Jiang e Towhata (2012) para o estudo experimental de fluxo granular seco e do comportamento de impacto contra um muro de contenção rígido	53
Figura 3.1 Fluxograma sequencial das atividades realizadas.....	54
Figura 3.2. Parâmetros que compõe o experimento: W (peso próprio das barreiras), μ_e (coeficiente de Atrito), PI (pressão de impacto) e u (deslocamento)	56
Figura 3.3 Perspectiva 3D do canal e da rampa segmentada	58
Figura 3.4 Corte longitudinal do projeto do canal (dimensões em mm).....	59
Figura 3.5. Corte transversal do projeto do canal (dimensões em mm).....	59
Figura 3.6. Canal hidráulico, rampa segmentada e torre com a betoneira	60
Figura 3.7. Enrijecimento do fundo do canal e o suporte confeccionado em aço.....	61
Figura 3.8. Coleta do rejeito em pilhas depositadas e o transporte confinado em lona plástica.	62
Figura 3.9. Curva granulométrica do rejeito de mineração	63
Figura 3.10. Determinação da densidade real dos grãos	64
Figura 3.11. Tubo Geotêxtil com variação da altura em função do material de preenchimento	67

Figura 3.12 Colocação / retirada do tubo do canal e aplicação de vaselina e do filme de PVC	68
Figura 3.13. Obtenção do valor do coeficiente de atrito estático máximo pelo ângulo	69
Figura 3.15 Percurso do fluxo, marcos e cronometro	72
Figura 3.16 dinamômetros recebem o impacto (I), Arduíno coleta e transmite os dados (II), o laptop recebe as informações (3°) e o software registra em planilha (4°).	75
Figura 3.17 Gráfico de cargas das células A e B em função de tempo	76
Figura 3.18. Realização do ensaio com percurso do fluxo turbulento e da onda de impacto. .	77
Figura 3.19. Obtenção das medidas de deslocamento das barreiras	77
Figura 4.1. Regressão das relações Peso (W), Pressão de Impacto (PI) e Deslocamento (u) ..	80
Figura 4.2. Fator de Segurança x Deslocamento da BTG1	80
Figura 4.3. Configuração e o formato final da BTG 2.	82
Figura 4.4. Relação Peso (W), Pressão de Impacto (PI) e Deslocamento (u)	83
Figura 4.5. Fator de Segurança x Deslocamento da BTG2	84
Figura 4.6. Correlação Peso (W), Pressão de Impacto (PI) e Deslocamento	85
Figura 4.7 Fator de Segurança x Deslocamento da BTG3	85
Figura 4.8. Fita antiderrapante duplicada para incremento de μ_e	86
Figura 4.9. Deformações longitudinais no corpo e extremidades da BTG1 com maior impacto	87
Figura 4.10. Deformações nas extremidades da BTG1 ocorridos com menor impacto	87
Figura 4.11 Correlação da velocidade do fluxo de água (m/s), com a pressão de impacto (kPa)	89
Figura 4.12. Correlação da vazão do fluxo de água (cm ³ /s) com a pressão de impacto (kPa). 90	
Figura 4.13 Correlação entre vazão (cm ³ /s), densidade (g/cm ³) e pressão de impacto (kPa) ..	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relações aproximadas entre parâmetros fundamentais e de engenharia de tubos de geotêxtil (traduzido e adaptado de LAWSON, 2008)	16
Tabela 2. Corpos de prova de Tubos de geotêxtil	61
Tabela 3. Resumo de resultados dos ensaios teor de umidade e granulometria do rejeito	63
Tabela 4 Comparação das relações aproximadas entre parâmetros fundamentais e de engenharia de tubos de geotêxtil conforme Lawson (2008)	66
Tabela 5 Relações adotadas entre os modelos e o protótipo	70
Tabela 6. Parâmetros da barreira e fluxo e escalas do modelo	70

LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.

%	Porcentagem
°C	Grau <i>Celsius</i>
σ'_v	Tensão vertical média na base
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associao Brasileira de Normas Técnicas
A	rea
a	Acelerao de partículas
a	Acelerao do movimento
A_b	área de Contato da Base
A_o	área de Contato das Ombreiras
A_p	área de Projeo do Paramento
ANM	Agência Nacional de Minerao
A_T	rea de seo transversal
b_T	Largura do contato de base
CCR	concreto compactado com rolo
cm	centímetro
D	Máxima deflexão da barreira
DCE	declaraes de condies de estabilidade
D_T	Diâmetro teórico
E	Energia Cinética
E	Módulo de elasticidade
F	Força
F_{imp}	Força de impacto
FS	Fator de Segurança
g	Acelerao da Gravidade

h	Altura
H_T	Altura máxima de enchimento
I	Impulso
ICOLD	Comissão Internacional de Grandes Barragens
IFTO	Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Tocantis
kgf	Quilograma força
kPa	Quilo Pascal
L	Circunferência do Tubo (Lawson, 2008) (
L	Distância Horizontal (Kang & Kim, 2015)
L	Comprimento característico
M	Massa efetiva do fluxo de detritos
M	Massa
m	Corpo de massa
m	metro
mm	milímetro
MEL	Nível máximo de energia
MPa	Mega Pascal
N	Newton
N	Força Normal
p_0	Pressão de bombeamento
P_t	Pressão Média de Impacto
PI	Pressão de Impacto
PNSB	Plano Nacional de Segurança de Barragens
Q_p	Vazão de Pico
Q	Vazão pico
r	Raio de curvatura
S	Inclinação Local

SEL	Nível de energia de serviço
SIGBM	Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração
T	Tempo
TC	circunferência teórica
TCE-TO	Tribunal de contas do Estado do Tocantins
T	Duração de impacto do fluxo
[T] a	tensão axial
[Tmax]a	tensão axial máxima
Tmax	Tensão Máxima
[Tmax] c	tensão circunferencial máxima
[T] p	tensão de conexão da porta
UnB	Universidade de Brasília
u	Deslocamento
V	Volume estimado
v	Velocidade do fluxo
V_{DF}	Volume do fluxo de detritos
W:	Força Peso
W_T	Largura preenchida
Φ	Ângulo de atrito
ϕ	Diâmetro
ΔP_{tot}	Teorema do impulso-momento
ΔH	Perda da altura da fôrma têxtil por consolidação do preenchimento
ΔH	Diferença em Altura
δ	Peso específico dos grãos constituintes do material de preenchimento
h_0	Umidade inicial do material de preenchimento
h_f	Umidade final do material de preenchimento
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico seco máximo

γ_s	Peso específico das partículas sólidas
γ	densidade da lama
ρ^{df}	Densidade média do material
ρ	Densidade de massa da estrutura
ρ	Densidade do fluxo
ν	Razão de Poisson
μ_e	Coefficiente de Atrito Estático máximo
μ	Coefficiente de atrito
μ_k	Coefficiente de atrito cinético

CAPÍTULO 1

Introdução

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Tecnologias para segurança estão sempre em desenvolvimento e em atualização para que eventos diversos não ceifem vidas ou causem grandes prejuízos ambientais e financeiros. Recentemente, rupturas trágicas de barragens de rejeitos no Brasil e no mundo, causaram mortes e grandes destruições.

Toda as obras de engenharia têm riscos, não alheio a estas possibilidades, barragens de rejeito brasileiras antigas, estão em situações de adversidades devido à idade, técnicas de construção e de controle e ainda uma indefinição devido a alteração legislação do Plano nacional de segurança de barragens -PNSB da Lei Federal 13.540 e as resoluções da Agência Nacional de Mineração – ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022, e alterações conforme resolução nº 130/2023, que exigia descomissionamento e atualmente exige a descaracterização de barragens construídas pelo método à montante ou método declarado desconhecido o que é uma obra de alto risco.

Para o tratamento dos riscos associados a estas estruturas, restam as opções de evitar, assumir, remover, reduzir ou ampliar, alterar a probabilidade ou alterar as consequências. Dentro dessas possibilidades a alteração das consequências abre caminhos para outras opções que antes inviáveis, com o novo cenário de riscos, se tornaram viáveis.

Novas estruturas como barragens para contenção de impactos podem ser capazes de minimizar consequências e mitigar os problemas de uma possível falha. Atualmente a engenharia têm buscado soluções para problemas complexos e de alto custo de execução. Algumas opções de estruturas a jusante destas barragens de rejeito, estão sendo aplicadas como uma barragem de concreto compactado com rolo - CCR descrita por Valinhas e Moreira (2020), ou barragens de terra ou enrocamento e outras soluções atípicas, como o uso de estacas metálicas para a construção de estruturas provisórias de proteção contra possíveis rupturas de barragens de rejeito em processo de descaracterização, descrito por Viel (2022). Os tubos

geotêxteis despontam como uma nova opção com enorme potencial de benefícios na execução, custos e segurança.

Os tubos geotêxteis surgiram como uma tecnologia para resolver vários problemas complexos e lentamente ganharam o seu devido espaço. Estudados e utilizados a mais de meio século, a Europa e a Ásia e mais recente as Américas, empregam estes materiais como estruturas para contenções, quebra-mares, em desaguamentos para o saneamento ou mineração e principalmente como obras costeiras para proteção e recuperação ou expansão de áreas e ainda, podem ser utilizados como linhas de defesa contra tsunamis e contra ressacas marinhas, conforme descrito pelos autores Lawson (2008) e Palmeira (2018).

Os Tubos de Geotêxtil são compostos por bolsas de geotêxtil preenchidos com materiais dragáveis que se consolidam e assim formam estruturas de gravidade flexíveis (ou de baixa rigidez), que podem ser utilizados em diversas finalidades.

A versatilidade desta tecnologia é principalmente pela fácil execução em locais difíceis de serem utilizados outras estruturas ou mesmo de baixa capacidade de suporte da fundação. Mesmo em locais de características ruins para grandes estruturas, os tubos de geotêxtil são utilizados com sucesso para receber impactos de ondas, ampliação de áreas, diques de proteção, sistemas de confinamento e desague. Baseado nestas particularidades e com uma nova abordagem, os tubos de geotêxteis podem ser utilizados como barreiras para retardar ou barrar materiais e impactos causados por uma ruptura de barragem de acumulação diversa ou por um movimento de massa como fluxo de detritos. Essa nova utilização possível pode ser determinada como estrutura para contenção de impacto.

A tecnologia de contenção com tubo geotêxtil pode trazer muitos benefícios como a reutilização de rejeitos ou preenchimento com materiais de baixo valor energético ao mesmo tempo que pode evitar problemas construtivos e ambientais e ainda ser resistente a eventos que outras estruturas não suportariam como no caso de um transbordamento.

Nesta tese, dentre as opções de uso dos tubos geotêxtil, foi avaliada sua aplicação como barreiras de impacto. Por meio de modelo físico em escala reduzida foram simuladas condições de trabalho, visando a proposição de método de análise para o uso de tubo de geotêxtil como barreira de impacto de rejeito.

1.1 HISTÓRICO DO USO DE TUBOS GEOTÊXTEIS EM OBRAS GEOTÉCNICAS

Os tubos geotêxteis são utilizados em diversas aplicações de engenharia civil e geotécnica, como sistemas de drenagem e reforço do solo. São fabricados a partir de fibras sintéticas, como poliéster ou polipropileno e podem ser encontrados em diferentes resistências e espessuras, dependendo do uso específico. São largamente utilizados em obras hidráulicas no mundo e suas finalidades têm se expandindo com pesquisas que tem demonstrado sua viabilidade como o de Kim et. al, (2005), que experimentou estes como barreiras para inundações. O resultado é que os dispositivos podem ser barreiras eficazes contra fluidos em algumas condições. No Brasil a tecnologia dos tubos geotêxteis demorou a ser utilizada, possivelmente pelo desconhecimento das características do material, tipos de usos, técnicas de execução, custos e paradigmas quanto a resistência às intempéries e a durabilidade. Os principais usos ainda são o desaguamento de lodos, mas já começam a utilizar também como quebra mares e diques de contenção.

Soluções para problemas regionais são grandes oportunidades para verificação da viabilidade de tecnologias de sucesso conhecido.

1.2 O CONTEXTO DAS BARRAGENS DE REJEITO NO BRASIL

Recentemente as rupturas das barragens de rejeito ocorridas nos municípios de Mariana e Brumadinho, no estado de Minas Gerais, e construídas pelo método de alteamento a montante, causaram mortes, destruições, comoção mundial e mudanças severas em relação a forma de tratar estas estruturas. Profissionais, empresas e até o governo se mobilizaram para encontrar as soluções e evitar novos acidentes. As declarações de condições de estabilidade (DCE) já não são mais os únicos indicadores de desempenho para garantir que não haja rupturas desastrosas, principalmente por não existir um conceito de exatidão e apesar dos cálculos determinísticos as incertezas são incorporadas em margens de segurança.

A proibição de barragens de rejeito executadas a montante no Brasil foi estabelecida pela Lei Federal nº 13.540, de 18 de dezembro de 2017. Essa lei alterou a Política Nacional de Segurança de Barragens-PNSB (Lei nº 12.334/2010) com a proibição da construção ou alteamento de barragens de rejeitos pelo método a montante, que é considerado menos seguro em comparação com as outras técnicas de construção (alteamento de centro ou de jusante). A

legislação foi uma resposta aos desastres sociais e ambientais ocorridos em Mariana e Brumadinho, nos anos de 2015 e 2019, respectivamente.

O Governo Federal e a ANM (Agência Nacional de Mineração) agiram de forma mais intensa e após as restrições das barragens de alteamento a montante, ainda determinaram que as barragens construídas desta forma, fossem descaracterizadas. Segundo a ANM (2020), o descomissionamento é encerramento das operações com a remoção das infraestruturas associadas, tais como, mas não se limitando, a espigotes, tubulações, exceto aquelas destinadas à garantia da segurança da estrutura. Barragem descaracterizada: é uma estrutura que não recebe, de forma permanente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos provenientes de suas atividades e que deixa de possuir ou de exercer a função de barragem. É a etapa inicial da descaracterização confirmando que a barragem já não é mais utilizada podendo ser desativada ou descaracterizada.

O processo de descaracterização de uma barragem, mesmo que construída com boa técnica e qualidade, já é suficientemente uma atividade com muitos riscos associados. O processo consiste eliminar a característica de alteamento a montante, reintegrando ao terreno natural e reabilitar o local original, no entanto, estas atividades são extremamente complexas pelo próprio desmanche seguro, os custos e o planejamento de outro local para armazenamento. Segundo o relatório SIGBM público da ANM (2023), no Brasil ainda restavam 65 barragens construídas pelo método de montante, atualmente em 2024 esse número já reduziu para 57 e a situação é preocupante, porque muitas barragens são antigas, com poucos sistemas de monitoramento ou informações sobre suas características e fatores que não podem contribuir para um descomissionamento seguro. Uma das consequências que ocorreu no início destes processos, foi uma sobrecarga na defesa civil e os conflitos com a população dos municípios afetados.

1.3 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A possibilidade de eventuais rupturas de estruturas de barragens de acumulação, não pode ser desprezada em nenhuma hipótese. Os meios técnico e científico então buscam soluções para que possam ser mitigados os impactos desta eventualidade. Recentemente, empresas do setor de mineração utilizaram como uma das soluções possíveis, a construção de outras barragens para receber o impacto e acumular o volume de rejeitos para o caso da ocorrência da

falha, o que demonstra que em virtude de todas as incertezas, deve ser realizado uma estrutura complementar para minimizar os danos potenciais associados. A construção de uma nova barragem a jusante de outra em muitos casos, pode não ser realizada por questões como disponibilidade de área, licenças ambientais etc. O custo elevado para execução de estruturas que teoricamente seriam temporárias e que não são possíveis de serem integradas ao ambiente de forma definitiva, é menos preocupante que os danos causados ao meio ambiente, estruturas e a população a jusante. No entanto, há espaço para soluções que possam atender de forma mais ampla estas necessidades.

Empresas da indústria da mineração que possuem barragens de rejeito alteadas a montante com alto dano potencial associado, atualmente constituíram setores de trabalho e pesquisa, específicos em estruturas de mitigação de riscos. Muitas pesquisas ainda são necessárias sobre o desempenho destas barreiras de contenção e proteção, juntamente com informações que possam contribuir para a execução, segurança, qualidade e o desempenho final.

Esta pesquisa concede parte do conhecimento de premissas para determinação da utilização de tubos de geotêxtil como barreiras para contenção de impacto de fluxo de detritos de uma ruptura potencial de barragens de rejeito de mineração. As premissas foram embasadas nas utilizadas em estruturas convencionais de gravidade e com a utilização de experimentos que simulam os impactos de fluxos em uma barreira em escala reduzida. Esta pesquisa também realizou a execução de canal hidráulico e equipamento capaz de fornecer resposta as rápidas solicitações das ondas de impacto em fluxo turbulento para estabelecer uma estimativa da pressão de impacto fundamental, que é o principal carregamento utilizado para o dimensionamento de estruturas resistentes a este.

1.4 OBJETIVO DA PESQUISA

Esta pesquisa busca avaliar o comportamento de tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração e utilizados como uma barreira de contenção de impacto, em um modelo físico que simula, em condições de laboratório, o comportamento da estrutura submetida à impactos de fluxos em experimentos que tentam simular condições próximas as reais.

1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos pretendidos por esta pesquisa são:

- ✓ Construção de Canal Hidráulico e elementos de geração de energia potencial e transformação em energia cinética;
- ✓ Verificação de geometrias e do comportamento do modelo físico e o pré-dimensionamento para estabelecer parâmetros construtivos em função de massa, altura e base da estrutura;
- ✓ Avaliação do desempenho das barreiras de tubo de geotêxtil para contenção de impacto de fluxo de detritos em condição de corpo livre;
- ✓ Determinar a efetividade do sistema para mitigar a pressão de impacto causada por fluxo de detritos com a constituição e cálculo do Fator de Segurança.

1.5 ESCOPO DO TRABALHO

Essa tese foi estruturada em 5 Capítulos e um apêndice. O Capítulo 1 apresenta o contexto geral dos riscos de falhas em barragens de rejeito de mineração construídas pelo método de montante e uma apresentação de uma solução possível com tubos de geotêxteis. O objetivo desta tese é apresentado neste capítulo, juntamente com o escopo.

No Capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica dos tubos geotêxteis e apresentado uma solução para contenção de fluxo de detritos com barreira de concreto compactado com rolo. Também é apresentado os fluxos de detritos e um modelo para determinar pressão de impacto. Uma breve revisão de estruturas de contenção por gravidade, e subsídios sobre atrito e colisões. Complementa o capítulo informações de modelos reduzidos e canais hidráulicos.

A metodologia do trabalho é apresentada no Capítulo 3, com uma compilação das informações de estruturas de contenção de gravidade é elaborado o arranjo experimental e uma equação do fator de segurança da barreira. Apresentado o canal hidráulico, os tubos de geotêxtil e material de preenchimento, instrumentação e coleta de dados são detalhados.

Os resultados e análises são descritos no Capítulo 4, com a apresentação da avaliação de cada barreira de tubo geotêxtil. O comportamento em termos de deslocamentos e deformações é analisado e apresentado. Os resultados da variação do atrito e densidade do fluxo

também são descritos. Complementa o Capítulo os critérios de design e a viabilidade do uso em grandes escalas.

O Capítulo 5 relata as conclusões oriundas das avaliações realizadas nesta tese e sugestões para pesquisas futuras.

O Apêndice apresenta detalhes de ensaios de caracterizações de materiais, da construção do canal hidráulico e do geotêxtil fornecido. Fotos de procedimentos, planilhas e gráficos de cargas e as planilhas de compilação de dados de cada barreira.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2. CONTEXTO DAS BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO BRASILEIRAS

Rupturas de barragens de rejeito são um exemplo de fluxo de detritos de grande proporção e destruição. Registros históricos apresentados pela Comissão Internacional de Grandes Barragens – ICOLD (2014), mostram aproximadamente 200 acidentes com estas estruturas no último século, onde em vários casos houve grande destruição e mortos. Pode ser destacado três dois eventos relevantes:

- A inundação de Buffalo Creek em 1972, West Virginia no USA onde a inundação de lama de carvão, causou 125 fatalidades e 1.121 feridos.
- A catástrofe do Val di Stava em 1985 em Stava, Itália, com 268 mortes.

Eventos recentes de rupturas das barragens de rejeito de mineração no Brasil foram também catastróficos, como o caso de Fundão em Mariana-MG, em 2015 com 19 mortos e grande dano ambiental e a barragem B1 do Córrego do Feijão, em 2019 no município de Brumadinho-MG, com 270 mortos, ambos em Minas Gerais.

As rupturas destas grandes estruturas têm surpreendido todos os mecanismos de defesa e causado muitas mortes e grandes danos em comunidades próximas, ao meio ambiente, estruturas públicas e empresas. A proibição de barragens de rejeito executadas a montante no Brasil, foi estabelecida pela Lei Federal nº 13.540, de 18 de dezembro de 2017. Essa lei alterou a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010) para proibir a construção ou alteamento de barragens de rejeitos pelo método a montante, que é considerado menos seguro em comparação com outras técnicas de construção (centro e jusante). A legislação foi uma resposta aos desastres ambientais e sociais ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), causados pelo rompimento de barragens de rejeito construídas pelo método a montante.

As recentes rupturas de barragens de rejeito, levaram empresas a criar sistemas de barramentos e barreiras provisórias ou definitivas para evitar e mitigar riscos. A Lei 14066/2010 no artigo 2º, descreve que: “para os efeitos desta Lei, são estabelecidas as seguintes definições:

I – barragem: qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

A partir desta Lei, uma estrutura prevista para conter o fluxo, pode ser chamada de barragem, entretanto, pelos critérios de estabilidade ou de falhas possíveis foi definido nesta tese que a melhor designação é de barreira de contenção de impacto, pela finalidade que pode ser eventual e provisória.

Estruturas de contenção de cargas estáticas do tipo muro de arrimo e de gravidade, são algumas das soluções que tem se apresentado para barramentos e barreiras utilizadas para mitigar falhas potenciais. Os dimensionamentos destas são elaboradas com as capacidades resistentes da estrutura obtidas pela relação do peso próprio e atrito do contato com o solo de fundação e em razão de uma contraposição aos empuxos e tensões geradas. No entanto, para estas estruturas a execução não é rápida, tem alto custo, necessitam de fundação competente e ainda, podem ampliar riscos de falha quando executadas próximas as barragens de rejeito, podem causar sismos induzidos o que pode ser gatilho para fenômenos desestabilizantes como a liquefação. Uma estrutura de gravidade, flexível, adaptável em qualquer fundação, sem uso de grandes equipamentos, ambientalmente amigável e com rápida e fácil execução é a perfeita combinação para uma solução de muitos cenários possíveis para mitigar riscos.

2.1 TUBOS DE GEOTÊXTEIS

Geossintéticos são materiais com grandes potenciais, os materiais sintéticos e têxteis foram introduzidos na melhora de solos e obras de engenharia a mais de meio século e seus usos são ampliados a cada pesquisa realizada.

Em 1950 surgiram as primeiras aplicações de geotêxteis tecidos como elementos de filtro para proteção contra erosão, em obras hidráulicas. Na Holanda, foram inicialmente utilizados sacos de areia, produzidos com tecidos de náilon em obras hidráulicas. Logo a seguir em 31 de maio de 1953, ocorreu um desastre natural, ocasionado por fortes ventos e pela ação de ondas com rompimento de inúmeros diques, inundando diversas áreas e matando 1850 pessoas. Foi então desenvolvido o projeto delta, que, para a recuperação daquelas defensas, empregou 10 milhões de metros quadrados de tecidos. (VERTEMATTI & CASTRO, 2015)

Os tubos geotêxteis têm sido utilizados para desaguamento por sedimentação e evaporação e a compressão mecânica, também, como barreiras e contenções costeiras e para diversas finalidades. Uma nova abordagem pode ser a utilização dessa tecnologia para barreiras de contenção para o impacto de fluxos de detritos, para o caso de uma ruptura de uma barragem de rejeitos ou até algum movimento de massa natural o que começa a ser difundido e discutido nos meios técnicos como uma solução de grande viabilidade. Estes materiais se destacam por proporcionar uma série de benefícios técnicos, operacionais e econômicos.

Esta pesquisa verificou a possibilidades do uso e os benefícios da tecnologia dos tubos de geotêxteis, com simulações de uma barreira em condições similares e em modelo físico. A seguir é feito um resumo dos aspectos mais relevantes para esta pesquisa.

Os tubos geotêxteis foram criados na Holanda na década de 60 para resolverem os problemas com avanços do mar e ressacas marinhas. De acordo com a fabricante Tecate (2020), a histórica inundação do Mar do Norte de 1953, causou uma enchente catastrófica e destruiu a costa da Holanda, deixando um rastro de quase 2.000 mortos. Os holandeses começaram imediatamente a trabalhar no desenvolvimento de técnicas e produtos inovadores de construção de diques que seriam fortes o suficiente para resistir às maiores forças da natureza. A figura 2.1, apresenta o tubo geotêxtil em processo de execução em 1962 na Holanda.



Figura 2.1. Tubo geotêxtil em execução - Holanda (Tencate-Geosynthetics, 1962)

O princípio do uso empírico de tubos geotêxteis é descrito por Lawson (2008), quando na década de 1960 começaram a ser usados em estruturas hidráulicas e marítimas. Os tubos eram de pequeno diâmetro teórico (inferior a 2 m) e provaram ser de uso limitado devido à sua

instabilidade, principalmente em ambientes hidráulicos. Os tubos utilizavam um revestimento interno impermeável à pele do geotêxtil tecido para pressurizar o tubo com água antes da introdução do preenchimento de areia.

Durante a década de 1980, os tubos geotêxteis de grande diâmetro foram desenvolvidos usando geotêxteis resistentes e tecidos como revestimento do tubo (e sem revestimento interno impermeável). A principal vantagem desses tubos posteriores é que uma grande massa encapsulada, uma estrutura tubular, pode ser projetada diretamente para atender a muitos requisitos de estabilidade hidráulica e marítima. Além disso, durante o final dos anos 80, geotêxteis não tecidos pesados foram desenvolvidos para tubos geotêxteis de pequeno diâmetro teórico (menos de 1,5 m). Hoje, tubos de geotêxtil variando em diâmetros teóricos de 1,0 m a 6,0 m são usados em muitas aplicações hidráulicas e marítimas em todo o mundo.

Durante a execução no processo de enchimento, a água passa através do geotêxtil, enquanto os sólidos ficam retidos dentro do tubo. O material dentro do tubo de geotêxtil vai se consolidando, enrijecendo a estrutura e incrementando suas propriedades mecânicas e hidráulicas, permitindo a obtenção de estruturas maciças, capazes de resistir a abrasão, cortes e puncionamento, além de tolerar a degradação biológica e química gerada no meio natural. Ortiz *et al.* (2003), descreveram que os projetos de estruturas de defesa costeira apresentam uma nova possibilidade na execução de tubos de geotêxteis, os quais podem ser preenchidos por solos formando estruturas sólidas, estáveis, flexíveis e adaptadas às configurações do terreno. Assim, é possível proteger e recuperar costas que apresentam problemas de erosão, entre outras aplicações.

2.1.1 APLICAÇÕES DE TUBOS DE GEOTÊXTIL

Os tubos geotêxteis são usados para uma variedade de aplicações hidráulicas e marítimas onde são necessárias estruturas do tipo barreira de gravidade de massa. Essas aplicações são descritas e explicadas por Lawson (2008) e na Figura 2.2, são apresentadas aplicações hidráulicas e marítimas de tubos geotêxteis: (a) revestimentos (expostos ou submersos); (b) quebra-mares marítimos; (c) diques de proteção; (d) diques de contenção; (e) quebra-mares.

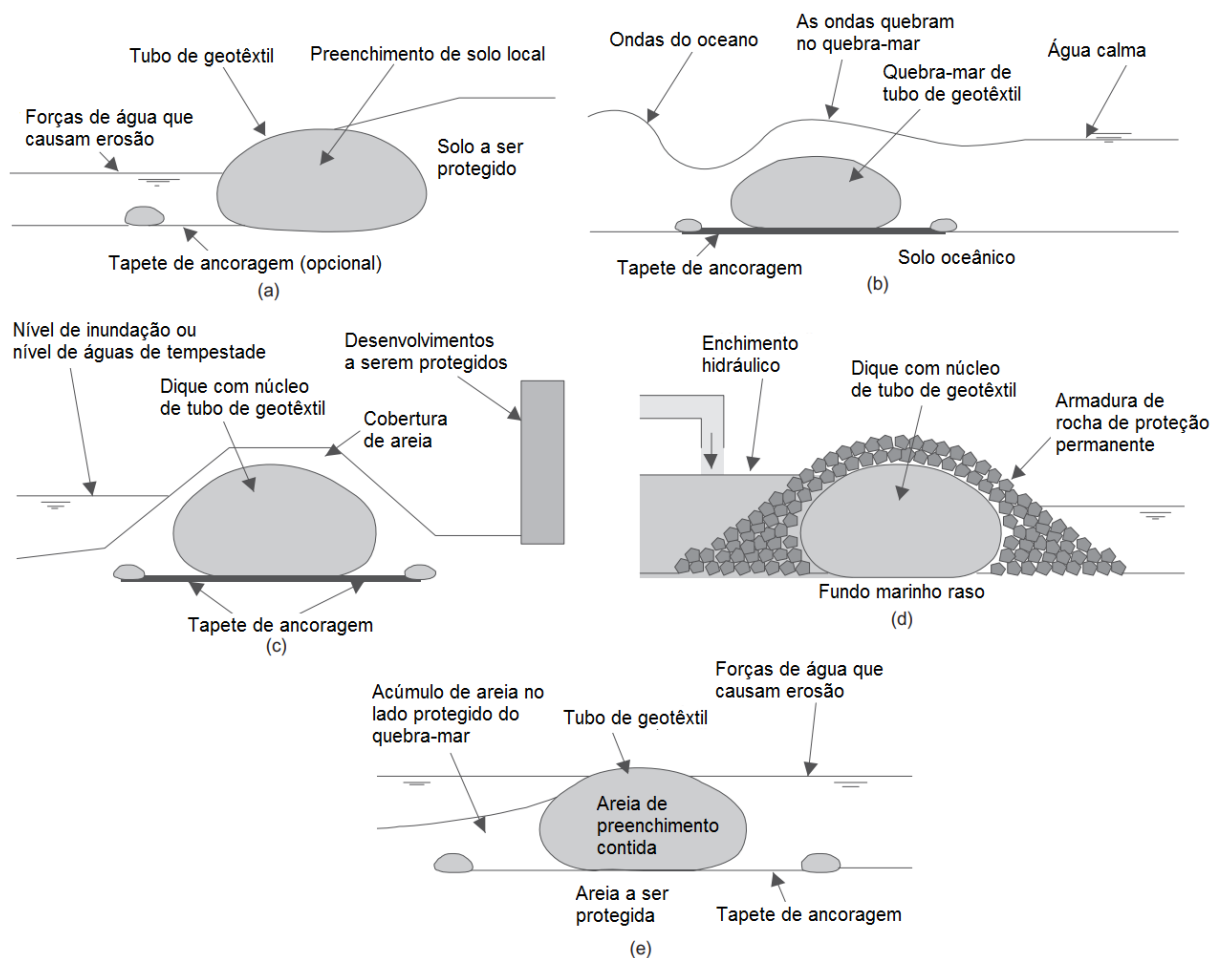


Figura 2.2 Aplicações hidráulicas e marítimas de tubos geotêxteis: (a) revestimentos (expostos ou submersos); (b) quebra-mares marítimos; (c) diques de proteção; (d) diques de contenção; (e) quebra-mares (traduzido e adaptado de LAWSON, 2008)

Tubos geotêxteis são usados para estruturas de revestimento (Figura 2.2a), onde seu preenchimento contido é usado para fornecer estabilidade de massa e gravidade. Eles são usados para revestimentos submersos e expostos. Para revestimentos submersos, o tubo geotêxtil é coberto por solo local e é necessário fornecer proteção somente quando a cobertura do solo é erodida durante períodos de atividade intermitente de tempestades. Passada a tempestade, o revestimento volta a ser coberto por terra, naturalmente ou por enchimento de manutenção. Para revestimentos expostos, o tubo geotêxtil é exposto durante toda a vida útil do projeto. Os revestimentos também são construídos usando tubos geotêxteis de múltiplas alturas, escalonados horizontalmente para alcançar a estabilidade necessária (LAWSON, 2008).

Para evitar a erosão do solo de fundação nas proximidades do tubo geotêxtil, é prática comum instalar um sistema de proteção contra erosão também conhecido por tapete de ancoragem. Lawson (2008), explica que este tapete geralmente consiste em uma camada de

filtro geotêxtil que passa por baixo do tubo geotêxtil e é ancorada na extremidade por um tubo geotêxtil menor e preenchido.

Tubos geotêxteis são usados para quebra-mares marinhos, para evitar a erosão de litorais costeiros. Conforme Lawson (2008), o tubo de geotêxtil preenchido fica localizado a uma certa distância da costa, a fim de dissipar as forças das ondas antes que elas possam atingir a costa. Mais uma vez, os sistemas de proteção contra erosão são usados abaixo do quebra-mar de tubo geotêxtil para garantir que a erosão local não prejudique a estrutura do quebra-mar. Em muitos casos, o tubo geotêxtil é deixado exposto, o que conseqüentemente afeta sua vida útil.

Tubos geotêxteis são usados para diques de proteção onde evitam danos causados por inundações e tempestades a estruturas e edificações, também podem ser usados para obras de formação de rios, lagos ou córregos. Lawson (2008), explica que onde estes diques são construídos, é comum cobrir o tubo geotêxtil com solo local. O funcionamento é intermitentemente durante os períodos de tempestade ou inundação, quando a cobertura do solo é erodida. A cobertura do solo oferece vantagens ao núcleo do tubo geotêxtil como a estética da aparência natural do meio ambiente, impedir danos devido ao vandalismo e proteger o tubo geotêxtil da exposição prolongada à luz solar direta (degradação UV).

Núcleos de diques de contenção têm sido muito utilizado em recuperação de área onde a profundidade da água é relativamente rasa e a outra lateral é preenchida hidráulicamente ou a seco formando ilhas ou recuperando áreas inundadas. Um exemplo deste tipo de obra é a ilha artificial que foi construída para fornecer uma plataforma de construção sobre áreas rasas para a grande ponte de Incheon conectando a cidade de Songdo na Zona Econômica Livre de Incheon ao Aeroporto Internacional de Incheon, localizado na Ilha Yongjong na Coreia do Sul, conforme exposto por Yee *et al.* (2008). A figura 2.3 apresenta a obra já com a colocação de preenchimento de terra dentro do dique de tubo geotêxtil no Projeto Incheon Bridge.



Figura 2.3 Colocação de preenchimento de terra dentro do dique de tubo geotêxtil no Projeto Incheon Bridge (Yee *et al.*; 2008)

Lawson (2008) cita que a vantagem dessa abordagem é que o mesmo aterro hidráulico utilizado na recuperação também pode ser utilizado no interior dos tubos geotêxteis para os diques de contenção, evitando assim a necessidade de importação de enrocamento para os diques. Os diques de contenção construídos com tubos geotêxteis oferecem uma alternativa econômica a outras formas de construção, como paredes de estacas pranchas, especialmente onde a fundação é de solo mole. Onde as forças da água exigirem e onde a longevidade for necessária, a proteção com rochas pode ser colocada ao redor do núcleo do tubo geotêxtil.

2.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Por muitos anos os tubos geotêxteis tiveram suas aplicações principalmente em obras hidráulicas de proteção costeira ou de desaguamento de lodos. A tecnologia ganhou bastante visibilidade quando começou a ser utilizada como solução para outros problemas. À medida que as utilidades e os tipos de carregamentos e atribuições crescem, condições de contorno novas são acrescentadas a estas estruturas.

Conforme descrito por Pilarczyk (2000), tem havido uma necessidade crescente, nos últimos anos, em obter informações confiáveis sobre a metodologia de projeto e os critérios de estabilidade de revestimentos expostos a ondas e ação atual. Esta necessidade decorre em parte de um aumento no número e tamanho das aplicações que devem ser realizadas de acordo com as normas de segurança e, em parte, da construção de estruturas em locais específicos onde estão expostas a ondas mais severas e ataques atuais (ilhas artificiais, quebra-mares, diques

fluviais e marítimos, cursos de água e canais de entrada com maior intensidade e carregamento devido à navegação etc.).

A geometria da estrutura é o primeiro item a ser observado, aliada com o seu uso e atribuição. O fator de forma dos tubos de geotêxtil podem ser previstas de acordo com as necessidades. A seção transversal pode ser mais circular ou mais achatada. Em seu trabalho Lawson (2008), especificou as variações de forma aproximadas onde, os tubos de geotêxtil são normalmente descritos em termos de parâmetros fundamentais, como o diâmetro teórico - D_T ou circunferência teórica – C_T . E embora essas duas propriedades representem os parâmetros fundamentais dos tubos de geotêxtil, elas não são de interesse direto quando se trata dos parâmetros de engenharia para aplicações hidráulicas e marítimas, onde o tubo de geotêxtil em sua condição de preenchimento é de primordial importância. Os parâmetros fundamentais do tubo geotêxtil são mostrados na Figura 2.4.

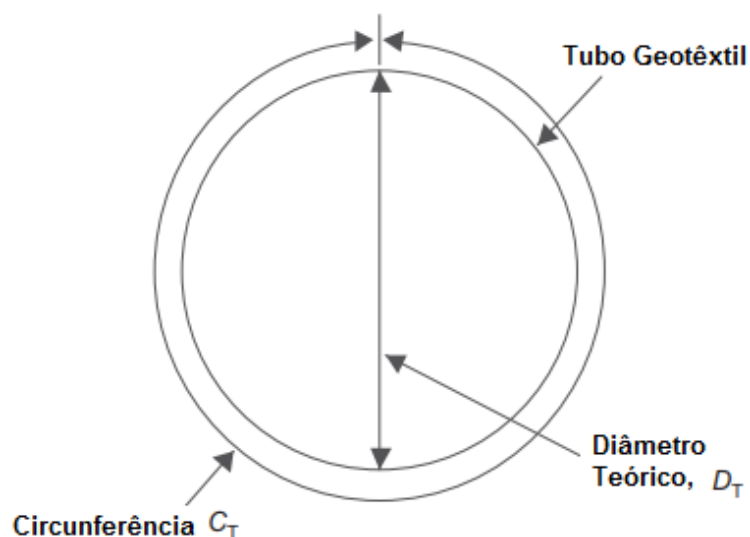


Figura 2.4 Parâmetros fundamentais do tubo geotêxtil (LAWSON, 2008)

Os parâmetros de engenharia fundamentais para tubos geotêxteis cheios, podem ser observados na Figura 2.5. Uma lista as relações aproximadas entre os parâmetros de diâmetro e circunferência teóricos (Figura 2.4) e os parâmetros de engenharia de importância para tubos geotêxteis cheios (Figura 2.5), pode ser observada na Tabela 1. As relações são aplicáveis aos tubos de geotêxtil que têm uma deformação máxima $< 15\%$, demonstram baixa fluência não confinada e são preenchidos até a capacidade máxima com material do tipo areia. Além disso, supõe-se também que a fundação sob o tubo seja uma superfície plana e sólida (LAWSON, 2008).

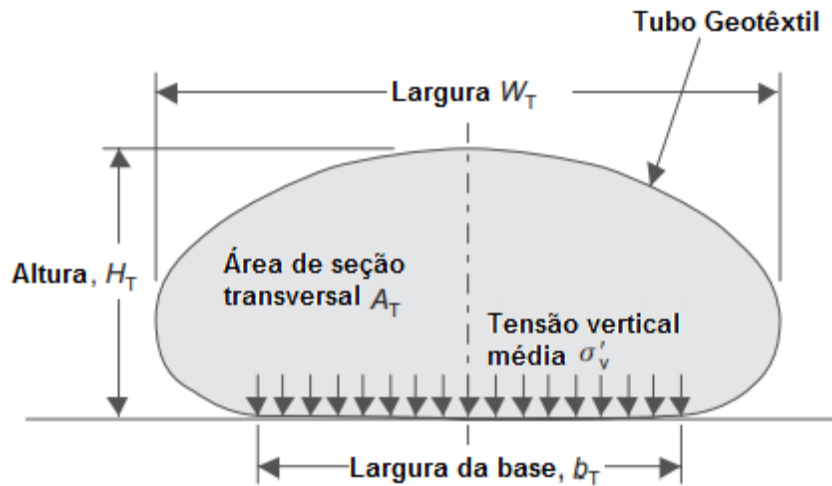


Figura 2.5 Parâmetros de engenharia importantes para tubos geotêxteis cheios (traduzido e adaptado de LAWSON, 2008)

Tabela 1. Relações aproximadas entre parâmetros fundamentais e de engenharia de tubos de geotêxtil (traduzido e adaptado de LAWSON, 2008)

Parâmetro de engenharia	Em termos de diâmetro teórico, D_T	Em termos de circunferência, C_T
Altura máxima de enchimento, H_T	$H_T \approx 0,55 D_T$	$H_T \approx 0,18 C_T$
Largura preenchida, W_T	$W_T \approx 1,5 D_T$	$W_T \approx 0,5 C_T$
Largura do contato de base, b_T	$b_T \approx D_T$	$b_T \approx 0,3 C_T$
Área de seção transversal, A_T	$A_T \approx 0,6 D_T^2$	$A_T \approx 0,06 C_T^2$
Tensão vertical média na base, σ'_v	$\sigma'_v \approx 0,7 \gamma D_T$	$\sigma'_v \approx 0,22 \gamma C_T$

Nota: γ = densidade aparente do tubo geotêxtil cheio

Vertematti e Castro (2015), explicam que se o material de enchimento for argiloso e o geossintético permeável, deve-se prever sua consolidação pela perda gradual de umidade, resultando numa redução ou perda de altura. A variação da altura (ΔH) pode ser estimada através da fórmula:

$$\Delta H = H\delta \frac{h_0 - h_f}{1 + h_0 \cdot \delta} \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:

ΔH : Perda da altura da fôrma têxtil por consolidação do preenchimento;

H : Altura inicial de projeto da fôrma têxtil, logo ao término do enchimento (não consolidado);

δ : Peso específico dos grãos constituintes do material de preenchimento;

h_0 : Umidade inicial do material de preenchimento;

hf: Umidade final do material de preenchimento.

Os modos do estado limite externos dos tubos de geotêxtil a serem avaliados, de acordo com Lawson (2008), são: resistência ao deslizamento, resistência ao tombamento, resistência ao rolamento, estabilidade global, resistência ao desgaste e assentamento da fundação. Os tubos de geotêxtil se comportam como unidades de estrutura de gravidade e, portanto, uma abordagem de projeto convencional, seguindo procedimentos padrão de avaliação dos possíveis modos de falha ou deformação, podem ser empregados para chegar a uma solução segura. A Figura 2.6, lista os vários modos de estado limite que devem ser avaliados: eles são divididos em modos externos (afetando o desempenho geral da estrutura do tubo geotêxtil) e modos internos (afetando o desempenho de estrutura interna dos tubos geotêxteis individuais).

Os tubos geotêxteis são unidades muito estáveis, com altas relações de largura de contato da base e altura: por exemplo, da Tabela 2, $b_T / H_T \approx 1.5$. Os tubos de geotêxtil devem ser verificados quanto à estabilidade de deslizamento e tombamento, especialmente se forem de pequeno diâmetro teórico, ou seja, $D_T < 2$ m. Relações para avaliar a estabilidade de tubos de geotêxtil sob uma variedade de condições hidráulicas são fornecidas por Pilarczyk (2000) e CUR (2006).

Conforme Lawson (2008), a estabilidade do rolamento, Figura 2.6 (III), pode ser importante se a fundação for muito macia e o tubo geotêxtil for grande. No entanto, a experiência mostrou que a distribuição do peso dos tubos de geotêxtil em fundação de solos moles é muito eficiente. A estabilidade global precisa ser levada em consideração somente quando vários tubos de geotêxtil são usados (Figura 2.6 (IV)). Um fator global de segurança ou um fator parcial de abordagem de segurança podem ser aplicados ao avaliar os vários modos de estado limite.

A análise de estabilidade deve levar em consideração as alterações no nível da água externa e no nível da água subterrânea na estrutura do tubo geotêxtil. Além disso, os potenciais planos fracos entre tubos geotêxteis adjacentes devem ser avaliados. A erosão da fundação em torno das bordas dos tubos de geotêxtil (Figura 2.6 (V)) pode levar ao solapamento e ao tombamento do tubo de geotêxtil. A erosão pode ocorrer durante o processo de enchimento ou durante a vida útil do tubo (LAWSON, 2008).

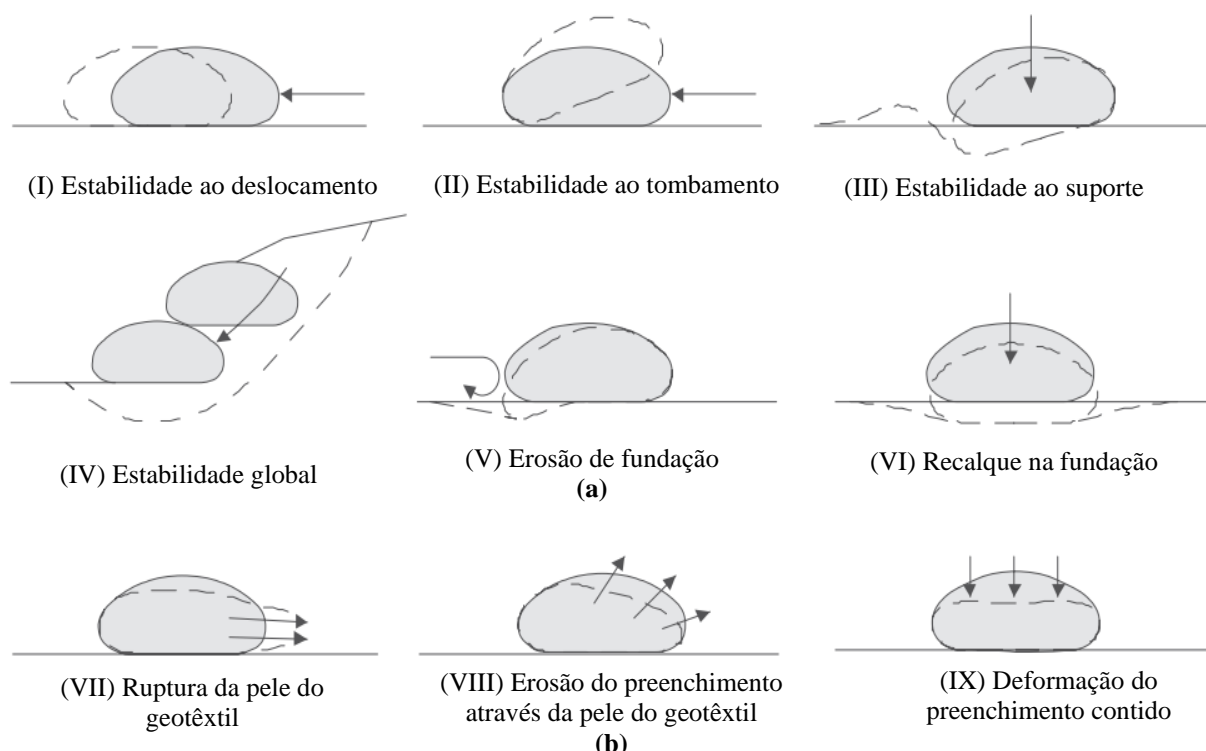


Figura 2.6. Modos de estado limite para tubos de geotêxtil: (a) externos; b) interno (LAWSON, 2008)

Durante o preenchimento, uma grande quantidade de água é expelida através da pele do geotêxtil e isso pode causar erosão e prejudicar o tubo geotêxtil, se não forem tomadas medidas para evitar isso. Para evitar o desgaste da fundação durante o enchimento, é prática comum instalar primeiro uma camada de geotêxtil ou geomembrana abaixo do tubo de geotêxtil antes da colocação e enchimento do tubo. Este procedimento é muito importante no caso de instalação de tubos geotêxteis de altura múltipla, a fim de impedir o enchimento da água dos tubos superiores, causando erosão e instabilidade dos tubos inferiores na estrutura. (LAWSON, 2008)

Tubos de geotêxtil construídos em fundações compressíveis e onde são necessários para atender a requisitos específicos de altura para estruturas hidráulicas (por exemplo, quebra-mares), uma avaliação do efeito do assentamento da fundação deve ser realizada como é descrito por Pilarczyk (2000) e Lawson (2008).

Os sistemas de proteção contra erosão da fundação nas proximidades do tubo geotêxtil é um aspecto importante, e ainda, conforme descrito por Pilarczyk (1996), uma proteção contra a abrasão com utilização de geotêxtil não tecido. As erosões hidráulicas são causadas por “vortex” de correntes marinhas quando passam por estruturas e portanto, é prática comum instalar sob os quebra-mares feitos com esta tecnologia para garantir que a erosão local não

prejudique estas estruturas, conforme descrito por Pilarczyk (1996) Lawson (2008) e Foley e Wright (2017). Esta proteção geralmente consiste em uma camada do material de filtro do geotêxtil que passa por baixo do tubo de geotêxtil e é ancorada na extremidade por tubos de geotêxtil menores ou de diâmetro pequeno (tubos de ancoragem), fixados longitudinalmente a cada extremidade. Deve se estender na frente e atrás do tubo, geralmente 1 a 2 vezes a largura da unidade preenchida, que após a implantação é preenchido com areia. Os tubos de ancoragem cheios de areia mantêm o sistema no fundo e o seguram no lugar.

No Brasil, o nome mais conhecido no meio técnico para esse sistema de proteção, foi apontado como tapete de ancoragem. O conjunto tapete e tubos de ancoragem, fornece uma base estável e evita a erosão da sub-base do tubo geotêxtil. Mesmo em obras que não sejam marinhas, mas, em locais de solos muito moles, tal elemento seja necessário para garantir a estabilidade. Pilarczyk (1996), descreveu que geralmente, o geotêxtil do filtro (contra a abrasão) e o tubo plano são totalmente implantados flutuando e mantendo-os em posição antes de iniciar a operação de enchimento. O geotêxtil do filtro geralmente é fornecido com pequenos tubos nas bordas quando cheio de areia mantém o tapete de ancoragem no lugar. Um tubo de geotêxtil é então implantado no topo do tapete de ancoragem e preenchido. A Figura 2.7. apresenta o esquema típico de instalação do tapete de ancoragem.

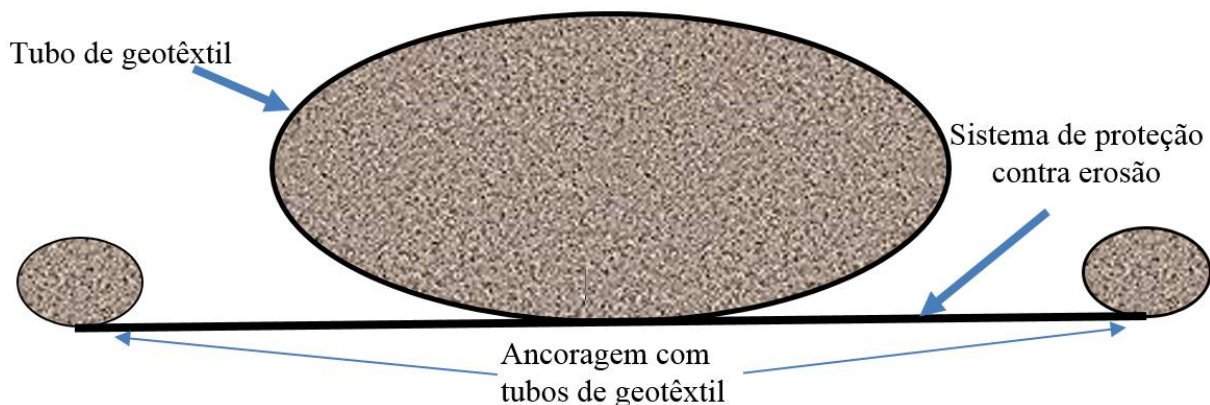


Figura 2.7. Esquema típico de instalação do tapete de ancoragem (adaptado de FOLEY e WRIGHT, 2017)

O tubo de geotêxtil sob tapete de ancoragem é largamente utilizado em obras que necessitam proteger a fundação do tubo contra erosão e posterior solapamento e portanto muito comum a utilização em áreas costeiras como no exemplo descrito por Castro (2020), no sistema de proteção do farol de East Point – Massachusetts-USA que se encontrava em condições de risco, teve o problema solucionado com a utilização de 200m de estrutura em tubos isolados

cada seção constituída de 3 elementos: tapete de ancoragem, colchão de areia e tubo de geotêxtil. A Figura 2.8 apresenta o tubo de geotêxtil sob tapete de ancoragem.



Figura 2.8 Tubo de geotêxtil sob tapete de ancoragem (CASTRO, 2020)

2.1.3 ESTABILIDADE DO SISTEMA DE TUBO DE GEOTÊXTEL

A estabilidade de um tubo isolado sobre fundações rígidas ou flexíveis, utilizando diferentes tipos de material de preenchimento foi investigado por vários pesquisadores, podendo ser citado os primeiros que o idealizaram: Liu, G.S. e Silvester, R. (1977), Kazimirowicz (1994) Pilarczyk, (1996) e Leshchinsky *et al.* (1996). Os estudos dos autores, consideram o tubo como uma geomembrana em duas dimensões-2D (deformação plana), a perda de pressão devido à drenagem através do tubo durante o enchimento é ignorada, a parede do tubo é modelada como fina e flexível e têm peso insignificante, nenhuma tensão de cisalhamento se desenvolve entre o material de preenchimento e o geossintético e o atrito entre o tubo e a fundação eram desprezados. Na Figura 2.9 são apresentadas as considerações e a geometria adotada nas análises realizadas por Leshchinsky *et al.* (1996).

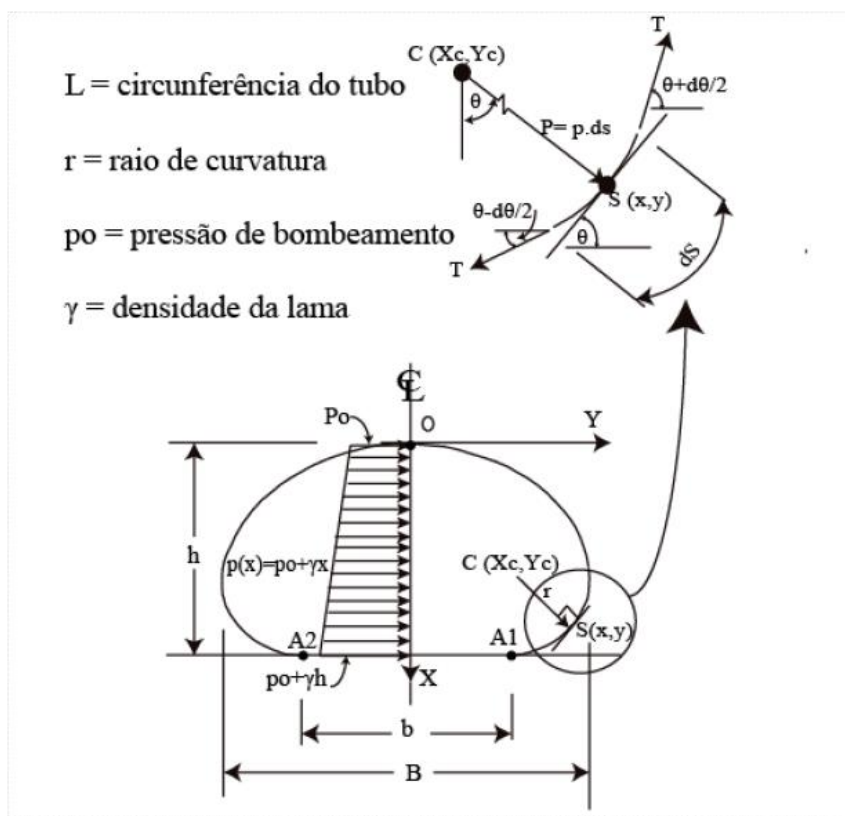


Figura 2.9 Seção transversal do tubo geotêxtil (Leshchinsky *et al.*, 1996)

Estudos de estabilidade foram realizados em simulações numéricas como o desenvolvido por Kim *et al.* (2013) onde a partir de uma análise em elementos finitos, foi possível avaliar as consequências que podem surgir a partir de problemas potenciais. Os autores ainda comentam que vários métodos alternativos de construção estão sendo estudados, incluindo modificações no solo, técnicas como cama de cascalho e construção de base rebaixada, que são mostradas para ajudar a melhorar a estabilidade geral e global dos tubos geotêxteis.

O atrito entre tubos empilhados é outro aspecto relevante. É relatado por fabricantes que os tubos estão adquirindo maior atrito o que permite maior estabilidade no empilhamento e para os profissionais quando na necessidade de andar por sobre estes.

2.1.4 ESTABILIDADE INTERNA

Os modos de estabilidade interna a serem avaliados conforme exposto por Lawson (2008) são: resistência à ruptura da pele do geotêxtil, resistência hidráulica da pele do geotêxtil e deformação do preenchimento contido. Durante o processo de enchimento e durante toda a vida útil dos tubos de geotêxtil preenchidos, são geradas tensões em três locais da unidade de

tubo: em torno da circunferência do tubo de geotêxtil $[T]_c$; ao longo do comprimento ou eixo do tubo geotêxtil $[T]_a$; e nas conexões dos orifícios de enchimento com o tubo geotêxtil $[T]_p$. A Figura 2.10. apresenta a localização das tensões geradas nos tubos de geotêxtil

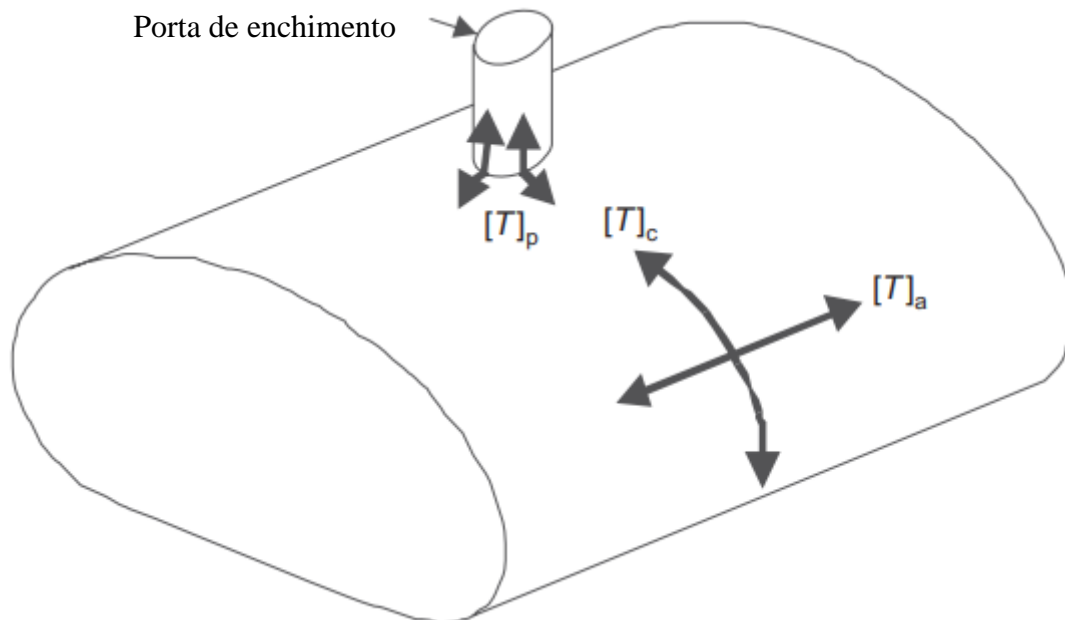


Figura 2.10. Localização das tensões geradas em tubos de geotêxtil (LAWSON, 2008)

A análise das tensões geradas nos tubos de geotêxtil é complexa, devido ao efeito da geometria do tubo. Além disso, é desejável que o preenchimento dos tubos de geotêxtil se iniciem com um líquido, ou seja, sem resistência ao cisalhamento e, em seguida, durante um tempo relativamente curto, reverter para um sólido e já com força de cisalhamento, caminho comumente oposto ao estudado na área de geotecnia. Essa mudança na fase do preenchimento contido, a quantidade de pressão de enchimento e bombeamento aplicada e o tempo durante o qual o preenchimento contido muda na fase afetam as magnitudes das tensões geradas nos tubos de geotêxtil. Para estruturas hidráulicas e marinhas em que o preenchimento contido consiste em material arenoso, o tempo necessário para mudar para um material sólido é muito curto (diferentemente dos preenchimentos mais finos) e, portanto, os métodos de análise baseados na suposição de um preenchimento resistente ao cisalhamento são mais apropriados para esse tipo de aplicação (LAWSON, 2008).

Normalmente, para definir as tensões nos tubos de geotêxtil é determinada primeiro a tensão circunferencial $[T]_c$, depois a tensão axial $[T]_a$ e, finalmente, a tensão de conexão da porta $[T]_p$. Os métodos da teoria das membranas foram propostos por pesquisadores, tais quais,

Liu (1981), Kazimierowicz (1994), Leschinsky *et al.* (1996), Plaut e Suherman (1998), Palmerton (2002), tendo em comum que sua principal característica é que o preenchimento contido é assumido como um líquido sem resistência interna ao cisalhamento. O procedimento de preenchimento pode ser modelado junto com a forma de preenchimento resultante. Embora esses métodos pareçam determinar razoavelmente bem a forma preenchida dos tubos de geotêxtil, eles não determinam muito bem a tensão circunferencial na pele do geotêxtil quando a areia é usada como preenchimento confinado. A razão para isso é que o preenchimento de areia reverte para uma fase sólida com relativa rapidez, uma vez que o material entra no tubo geotêxtil, com as tensões subseqüentes atuando na pele do geotêxtil de maneira distinta daquela encontrada na fase líquida.

Castro e Vertematti (2015), acrescentam que o problema é bidimensional, ou seja, é suficientemente longa para que todas as suas seções transversais sejam idênticas, em termos de geometria de materiais. Portanto, a perda de pressão pela drenagem através das paredes do tubo, durante o preenchimento, e uma eventual segregação de materiais são desprezadas, tomando-se por base a pressão de entrada do material de preenchimento.

A magnitude da tensão de conexão do orifício $[T]_p$, é uma função da pressão de enchimento, da altura do tubo geotêxtil e da forma do orifício de enchimento. As concentrações de tensão presentes nos orifícios de enchimento durante o enchimento de tubos geotêxteis e estimaram que podem ser de duas a três vezes as tensões circunferenciais no topo do tubo geotêxtil. Existem técnicas para reduzir as magnitudes dessas concentrações de tensões (LAWSON, 2008).

Otimizações realizadas por fabricantes como acréscimos de camadas de pele no local, portas duplas reforçadas e utilização de materiais rígidos para suportar pressões de enchimento garantiram as soluções para esta questão conforme pode ser observado na Figura 2.11. Solucionado a pressão na porta do tubo geotêxtil, os fabricantes indicam para o enchimento bomba-draga, bomba-manual ou alguma mais adequada ao material a ser transportado para dentro do tubo. O tipo de bomba vai influenciar também no tempo de preenchimento e no volume de água de transporte.



Figura 2.11 Opções de portas de enchimento do tubo geotêxtil

Conforme exposto por Lawson (2008), a magnitude da tensão circunferencial ao redor de um tubo geotêxtil preenchido é uma função da curvatura da pele do geotêxtil, com a tensão máxima $[Tmax]_c$ coincidindo com a localização de maior curvatura. Isso ocorre nas laterais dos tubos geotêxteis cheios (Figura 2.12 a).

Em outros lugares ao redor do tubo geotêxtil preenchido, a tensão circunferencial é mais baixa, especialmente na base do tubo geotêxtil, onde a tensão circunferencial é muito baixa porque a pele do geotêxtil é essencialmente plana neste local. A Figura 2.12 b, mostra uma aproximação da distribuição em tensão circunferencial ao redor de um tubo geotêxtil expresso como uma porcentagem da tensão circunferencial máxima $[Tmax]_c$. Ao projetar um tubo geotêxtil, deve-se ter em mente a magnitude da tensão circunferencial e sua localização ao costurar folhas de geotêxtil para formar o tubo geotêxtil resultante.

As tensões axiais geradas ao longo do comprimento dos tubos de geotêxtil preenchidos são uma função da pressão de enchimento e da altura do tubo. A Figura 2.12 mostra a tensão axial máxima $[Tmax]_a$, expressa em termos da tensão circunferencial máxima $[Tmax]_c$ usando o procedimento de Palmerton (2002). Uma relação de $[Tmax]_a = 0,63 [Tmax]_c$ sugeriria um ajuste muito bom.

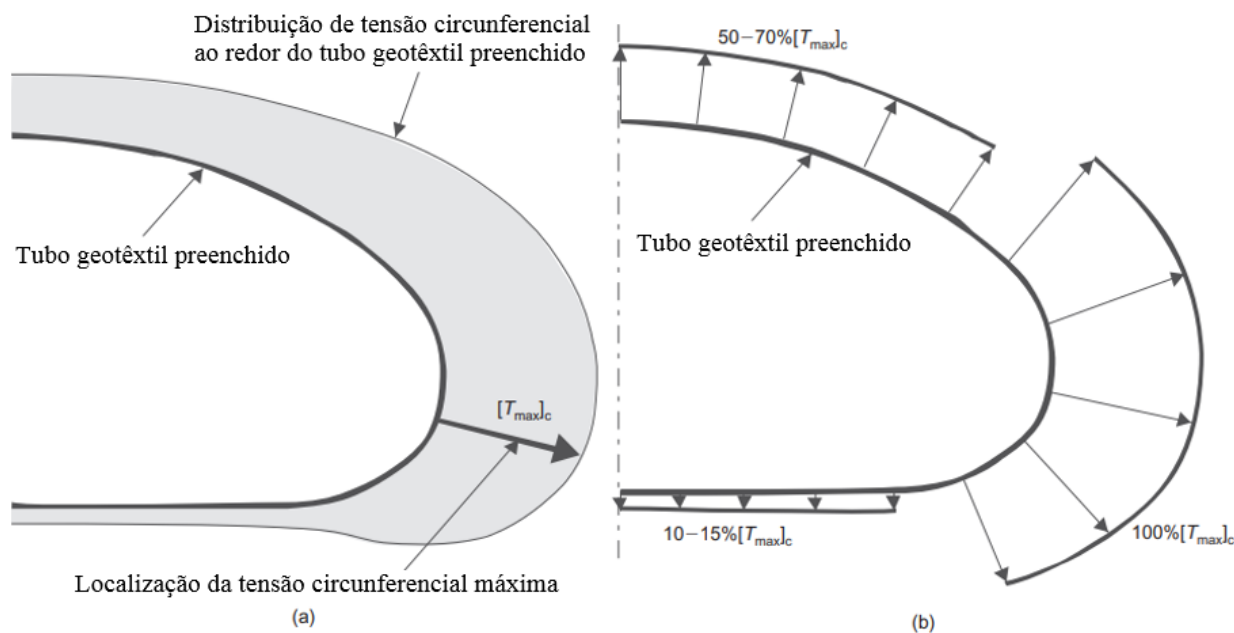


Figura 2.12. (a) Tensão circunferencial ao redor de um tubo geotêxtil preenchido em função da curvatura; (b) aproximação da distribuição em tensão circunferencial em termos de $[T_{max}]_c$ (Adaptado de LAWSON, 2008)

Alguns fabricantes resolveram estes problemas da tenção axial utilizando banda de alívio de pressão localizada nas regiões de tensão axial máxima, entre as vantagens está a possibilidade de a equipe de trabalho de enchimento do tubo ficar ciente de um acúmulo de pressão no tubo devido ao enchimento excessivo ao mesmo tempo que ajuda a aliviar a pressão.

2.1.5 MATERIAL DE ENCHIMENTO E FILTRAÇÃO EM TUBO DE GEOTÊXTEL

Os tubos de geotêxteis são fabricados com geotêxteis permeáveis e devem obedecer às condições de filtro. No caso de tubos de geotêxteis para obras executadas em regiões costeiras, o geotêxtil tecido é mais comum porque geralmente são preenchidos com a areia dragada do mar ou praia, que é o material mais próximo disponível. Já em obras de desaguamento de materiais que contêm partículas menores é mais usual o geotêxtil não tecido e ou mesmo o geocomposto.

A disponibilidade e economicidade dos materiais, seguem os princípios que os materiais empregados em obras de terra podem ser os do próprio local ou emprestado de outro mais próximos com características e qualidades desejáveis. O manual de critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas Eletrobrás (2003), apresenta condições de materiais a serem empregados. Os materiais provenientes de escavação, com possibilidade de aplicação direta na barragem, são em geral os mais econômicos, estes serão os primeiros a serem considerados para a seção

transversal da barragem. Os materiais de empréstimo a serem considerados, terão preferência pela sua localização, sendo em princípio, os mais próximos da barragem os que deverão apresentar maiores vantagens. Serão levados em conta ainda a posição das jazidas, etapa de exploração e cota em relação à barragem.

Para aplicações hidráulicas e marítimas de tubos de geotêxtil, o tipo de preenchimento usado é areia ou uma porcentagem significativa de areia. As razões para isso são que esse tipo de preenchimento pode ser colocado em uma boa densidade por meios hidráulicos; possui boa resistência ao cisalhamento interno; e, uma vez colocado, não passará por uma consolidação adicional, o que alteraria significativamente a forma preenchida do tubo geotêxtil. Uma vez preenchido, o tubo geotêxtil se comporta como uma unidade de gravidade e pode ser projetado de acordo (LAWSON, 2008).

Para materiais de enchimento diferentes de areia, deve ser realizada verificação da melhor forma de adoção do tubo geotêxtil. Como exemplo pode ser citada a explicação de Castro e Vertemarti (2004), os quais relatam que em casos extremos, onde se exige alta tenacidade e o material de preenchimento é constituído de misturas contendo argilas muito finas, pode ser necessário o emprego de geocompostos resistentes, fabricados com a união de geotêxteis tecidos e não tecidos. Tais autores explicam ainda que, como o material dragado pode variar muito de granulometria e a perda de carga aumenta à medida que fica preenchido, recomenda-se a utilização de válvulas de alívio como controle adicional da pressão interna. Os autores ainda revelam as diferenças dimensionais relacionadas com o tipo de material de preenchimento

Estruturas de mitigação de riscos são um custo extra para a indústria de mineração, torna-se então fundamental o menor custo e a utilização de rejeito de mineração de descarte, inerte e próximo a estrutura da barragem de contenção de impacto, sendo a utilização de tubos geotêxteis uma solução, aparente promissora.

2.2 MOVIMENTO DE MASSA DE FLUXO DE DETRITOS

Vários autores descreveram o fluxo de detritos de acordo com as origens deste, para compreender, caracterizar materiais e condições físicas de seus mecanismos de atuação durante um evento, entre eles: Costa (1984), Chen (1999), Hungr (2001), Iverson (2001), Dias (2006), Press *et al.* (2006), Ornelas (2017), Grau Sacoto e Nunes (2018), e Takahashi T. (2019).

O fluxo de detritos causado pela ruptura da barragem de rejeitos de Mariana-MG, Brasil, foi registrado por Ornelas (2017) onde foi possível expressar o contexto geral que o fluxo de detritos, pode ser de origem natural ou antrópica e descrito como um fenômeno que ocorre devido uma massa de material acumulado e estático como neve, solo saturado ou lama, instabiliza de modo brusco e movimenta-se de forma rápida e impetuosa, fluindo em uma encosta ou canal de uma bacia de drenagem ou vale. A massa de fluxo de detritos pode arrancar e mover árvores, rochas, destruir estruturas e edificações. À medida que se desenvolve, carregar estes como materiais inertes e constituintes.

Chen (1999), descreveu que o fluxo de detritos é um fluxo gravitacional de solo, rocha e/ou água, iniciado por um deslizamento. Este processo se caracteriza por ter um início, transporte e deposição de todos estes materiais, cujas consequências não são só causadas pelo volume e velocidade dos materiais transportados, senão por sua inesperada ocorrência. Já para Hungr (2001), os fluxos de detritos são fluxos que variam suas propriedades cinemáticas de muito rápidos a extremamente rápidos de detritos não plásticos sobre uma encosta inclinada. Iverson (2001), apresentou o conceito de que os fluxos de detritos são massas formadas por misturas de água, sedimentos finos, rocha e detritos originados nas encostas que correm à jusante em canais naturais para se depositarem em vales ou zonas abertas de baixo gradiente. As fortes interações entre fase sólida e líquida influenciam o comportamento destes fluxos e diferenciam este evento de outros similares como avalanches de rochas e enchentes.

Grau Sacoto (2017), descreve que os fluxos de detritos são movimentos que deslocam grandes massas, compostas por solo, rocha, árvores, lama e que ocorrem com elevadas velocidades, resultando em grande poder de destruição e, infelizmente, perdas humanas e econômicas consideráveis. Segundo Nunes e Sayão (2014), os fluxos de detritos são os mais catastróficos e difíceis de prever. Estudos indicam que, de 2002 a 2012, 90 mil mortes foram provocadas por movimentos de massa, em sua maioria do tipo fluxo de detritos.

Quando ocorre a falha de uma barragem de rejeitos, o resultado adverso da ruptura pode ser a expulsão e conseqüente deslocamento vale abaixo, de material que pode se comportar como um fluxo de detritos. Estes materiais constituintes deste fluxo são o rejeito de mineração acumulado e destroços da barragem, saturados com água em mistura homogênea com detritos variados, em que a percentagem de materiais grosseiros (areias e cascalhos) é elevada (em geral

mais de 50%) e materiais finos (siltes e argilas) em suspensão turbulenta e comportamento próximo de um fluido não newtoniano (ORNELAS, 2017).

Os fluxos de detritos geralmente apresentam trajetória com três zonas bem definidas e com declividades distintas: zona de iniciação, transporte e deposição. A zona de iniciação é onde se origina o movimento, que pode ser causado por uma ruptura localizada na parte alta da encosta. A zona de transporte é caracterizada pela maior erosão de material e onde o volume do fluxo de detritos se incrementa. A zona de deposição é caracterizada pela diminuição da velocidade do movimento, além da diminuição da declividade da encosta (GRAU SACOTO & NUNES, 2018).

O estudo dos fluxos de detritos é muito complexo devido às características intrínsecas deste tipo de movimento. Apesar do crescente conhecimento do fenômeno, ainda é um enorme desafio determinar e/ou estimar os diferentes parâmetros de fluxos de detritos, dimensionar estruturas de deflexão e proteção e definir áreas de ocorrência para delimitação das áreas de risco. A seleção de medidas de mitigação e convivência e dimensionamento de estruturas para fluxos de detritos têm favorecido o desenvolvimento de métodos empíricos e analíticos, baseados em observações e registros de dados de fluxos de detritos ocorridos. Alguns parâmetros importantes podem ser estimados com acurácia por meio de investigações de campo e análises de fluxos de detritos que ocorreram no passado, tais como volume total, magnitude do evento, composição dos sedimentos e chuvas deflagradoras. No entanto, outros fatores de determinação mais complexa, como a vazão, velocidade e força de impacto do fluxo de detritos, exigem o uso de alternativas indiretas tais como as expressões empíricas ou simulações numéricas (GRAU SACOTO & NUNES, 2018).

O impacto dos detritos rompidos, induzem elevadas pressões nas estruturas no momento do impacto. Assim é possível estimar os fatores de segurança e projetar estruturas que possam suportar tais esforços adicionais. Definir a pressão de impacto por modelo é de muita discussão no meio acadêmico. Alguns pesquisadores conseguiram formular modelos dinâmicos principalmente para fluxos granulares e para avalanches de neve, no entanto, mesmo com materiais com parâmetros e propriedades melhor definidas, conseguiram obter velocidades ou outras propriedades (massa, volume, atrito, etc.) que resultam em dados próximos a realidade.

O fluxo de detritos com comportamento não newtoniano em condição turbulenta pela movimentação dinâmica e o volume mobilizado, irá exercer pressões em várias direções e sentidos, ao ponto de conseguirem transportar blocos de rochas mais pesados que a maioria dos materiais constituintes. Por conta desta característica, os detritos envolvidos nestes fluxos podem ter dimensões muito variadas, desde partículas como argilas, até grandes blocos de rocha, formando uma mistura densa que serve de sustentáculo ao transporte em suspensão de outros elementos maiores e geram vários mecanismos de impacto. Segundo Costa (1984), a grande mobilidade dos fluxos de detritos está ligada à presença de argilas na mistura água-solo, pois a argila reduz a permeabilidade aumentando a poropressão e assim a mobilidade da massa.

O fluxo de detritos, ao encontrar uma obstrução irá gerar uma pressão de impacto, no entanto, impõe pressões em sentidos e direções que não a força frontal específica. O vetor da força normal a estrutura é o principal e talvez o parâmetro mais representativo para dimensionar uma estrutura de barramento.

2.2.1 ESTUDO DO IMPACTO DE FLUXO DE DETRITOS

Vários conceitos e interações podem ocorrer no processo de impacto de um fluido não newtoniano em uma estrutura. Unir conceitos em torno do processo e verificar ou validar se são adequados ao experimento representativo torna-se indispensável.

O comportamento de estruturas, a sua vulnerabilidade ou resiliência, frente a um movimento de massa, além de suas próprias características, depende de uma avaliação ao tipo de situação em que poderão se encontrar expostas. Conforme destacado por Godfrey *et al.* (2015), cada tipo de processo pode afetar diretamente o objeto físico por uma variedade de mecanismos de impacto (por exemplo, deslizamentos de terra: soterrar, impacto de colisão, pressão de terra, compressão ou torque, deformação plástica etc., para inundações: pressão estática / dinâmica, aumento capilar, flutuabilidade, reações químicas, limpeza etc.).

Em algumas falhas de barragens de rejeitos com a geração de um determinado movimento de massa semelhante a uma corrida ou fluxo de detritos, foi possível observar um conjunto destes mecanismos atuando em estruturas em Bento Rodrigues-MG conforme relatado

por Ornelas (2017). E para evitar que outro evento como este ocorra, é sugerido que uma única estrutura atue para mitigar os riscos e absorver e / ou evitar estes mecanismos.

As forças de impacto geradas pelos fluxos de detritos são difíceis de se estimar principalmente porque dependem de muitos fatores que são igualmente complexos de se obter. Diversas pesquisas desenvolvidas, tanto em laboratórios, com modelos em escala reduzida, quanto em campo, em grande escala, além dos estudos de eventos reais de fluxos de detritos, resultaram em diferentes modelos de forças de impacto de fluxos de detritos. Eles podem ser classificados em 4 categorias: I) hidráulicos, classificados em hidrostáticos e hidrodinâmicos; II) ondas de colisão; III) impacto de corpos sólidos; e IV) modelos empíricos (GRAU SACOTO & NUNES, 2018).

Simulações numéricas foram realizadas por Grau Sacoto e Nunes (2018), onde, os modelos hidrostáticos e empíricos não conseguem representar as pressões de impacto dos ensaios testes e ainda não foi possível realizar simulações de ondas de colisão ou impacto de corpos sólidos. Somente conseguiram resultados representativos de dois campos de testes por modelos hidrodinâmicos que estimaram a pressão de impacto em função da velocidade

Para desvendar a física do processo de impacto, com base na terceira lei de Newton que descreve que as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos, e segundo Robert Hooke que as forças deformantes são proporcionais às deformações elásticas produzidas. A partir destes conceitos iniciais há também os formulados por Newton para a colisão onde a interação, num curto intervalo de tempo, entre dois ou mais corpos que inicialmente encontram-se livres, produz uma configuração final, também envolvendo corpos livres. É importante enfatizar que por interação entendemos como a ação de forças internas que formam pares de forças do tipo ação e reação, têm uma intensidade bastante grande e conforme especificado, atuam por um tempo muito curto. No caso clássico, essas forças ocorrem via contato entre os corpos. Numa colisão clássica entre dois corpos, podemos classificá-la de acordo com a conservação (ou não) da energia cinética total dos corpos. Na colisão inelástica a energia cinética total não é conservada devido a deformação dos corpos e o consumo desta energia (BAUER *ET AL.* 2012).

A simplificação necessária e mais coerente a ser realizada, pode ser a comparação direta da força normal gerada no impacto do fluxo de detritos e a resposta inercial da estrutura com os tubos de geotêxtil com sua força peso e o consumo de energia cinética com a deslocamentos e deformação. Desta forma é possível ser determinado um fator de segurança de uma resposta eficiente ao impacto. Cabe salientar que pelo conjunto massa e rigidez do alvo, neste caso a barreira, pode haver a dispersão da energia cinética com pouca ou nenhuma deformação, deixando os esforços somente para o fluxo de detritos também conhecido neste experimento como projétil.

Em geral, é importante levar em consideração as características da estrutura de barreira e do projétil do fluxo de detritos, bem como a intensidade do impacto, ao avaliar um impacto potencial. O projétil de um corpo mole pode ser considerado corpo duro pela velocidade e aceleração e uma estrutura flexível pode ter comportamento rígido. Essa explicação é fundamentada pelo movimento de corpo livre. Este fato é explicado por Farias (2015), onde o movimento de corpo rígido ocorre mesmo em corpos deformáveis se estes não tiverem nenhum tipo de restrição (movimento de corpo livre). Em resumo, pode-se prever que a redução do atrito somado a velocidade do carregamento minimiza as deformações, caso a estrutura possa ter comportamento próximo de corpo rígido. Também uma barreira mais pesada terá uma maior resistência ao deslocamento e pode ser menos propenso a se mover sob um carregamento.

É possível que o movimento de corpo livre possa gerar deslocamentos não controláveis e deformações não desejadas, no entanto, a barreira mais pesada terá uma maior resistência ao deslocamento e pode ser menos propensa a se mover sob uma carga aplicada pré-determinada.

2.2.2 ENERGIA DE IMPACTO EM ESTRUTURAS - ALTERNATIVA AO MÉTODO DA FORÇA

As características do impacto do fluxo em uma estrutura, são importantes para prever as solicitações e desenvolver um sistema que resista a estas. É compreendido que o impacto, suas cargas e a reação da estrutura, são de grande relevância para a desenvolvimento de uma composição que busca mitigar mecanismos de destruição promovidos por um evento de fluxo de detritos.

A energia cinética do impacto de blocos e fluxo de detritos é dissipada com a absorção da energia pelo sistema da barreira com seus elementos. Conforme descrito por Grau Sacoto (2017), as barreiras dinâmicas podem ser dimensionadas considerando o estado limite último ou também chamado de estado MEL (Maximum Energy Level) e o estado de energia de serviço ou estado SEL (Service Energy Level). O estado MEL utiliza a capacidade máxima da barreira, o que significa maiores custos, porém uma manutenção reduzida. Em contraparte o estado SEL não considera a capacidade máxima da barreira, mas exige manutenção frequente. A abordagem tradicional do método da energia é relacionada à energia cinética do movimento, portanto:

$$E = \frac{1}{2} Mv^2 \quad \text{Eq. 2.2}$$

onde M é a massa efetiva do fluxo de detritos e v é a velocidade do fluxo.

Wenderler *et al.* (2008), inserem o conceito de massa efetiva e estabelecem que a massa varia entre 10 000 e 20 000kg, pois depende da vazão do fluxo e é expressa por:

$$M = \rho Q T \quad \text{Eq. 2.3}$$

sendo ρ = Densidade do fluxo (kg/m³); Q = Vazão pico (m³ /s); T = Duração de impacto do fluxo.

A duração de impacto do fluxo varia de 1 até 4 segundos para o caso de fluxo de detritos e de 0,2 até 0,5 segundos no caso de queda de blocos; embora outros autores reportem valores de até 12 segundos. Por outro lado, a vazão de pico dos fluxos de detritos depende do volume do material que potencialmente pode ser retido na barreira e é determinada por (Mizuyama *et al.*, 1992):

$$Q = 0,135 V_{DF} \quad \text{Eq. 2.4}$$

onde V_{DF} é o volume do fluxo de detritos, que pode variar entre 100 m³ e 1000 m³. A vazão de pico pode variar de 5 m³ / s até 30 m³ / s.

Luiz-Fonseca *et al.* (2011), apresentam uma relação baseada na premissa de que a energia deve ser transformada em força de impacto e, portanto, por meio da segunda lei de Newton, recomendam que a força de impacto seja determinada por:

$$F_{\text{imp}} = M \cdot a \quad \text{Eq. 2.5}$$

e a aceleração do movimento é dada por:

$$a = \frac{v^2}{D} \quad \text{Eq. 2.6}$$

onde D é a máxima deflexão da barreira, cujo valor pode variar entre 2 até 7m, em função do tipo de barreira e fabricante. Com as Equações 2.8 e 2.9, a força de impacto em termos da inércia cinética é dada por:

$$F_{\text{imp}} = 2 \frac{E}{D} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Importante comentar que observações in situ de fluxos de detritos na Suíça mostraram que a abordagem da energia apresenta limitações na modelagem, sendo uma delas a não consideração dos efeitos da força de arraste quando o fluxo galga a barreira.

2.2.3 PRESSÃO DE IMPACTO DE FLUXO DE DETRITOS

O fluxo de detritos é extremamente complexo, principalmente pelas características físicas dos materiais constituintes do fluxo, a forma e local onde ocorre o deslocamento, a vazão (profundidade) e velocidade para gerar o impacto. Pesquisadores diversos propuseram equações para determinar a pressão de impacto gerada por fluxos de detritos, como uma forma de estabelecer a vulnerabilidade de edificações, pode ser citado os exemplos de Rheinberger *et al.* (2013) na Suíça e Kang e Kim (2015) na Coreia. Os pesquisadores estudaram 6 tipos de fluxos de detritos, alguns de grande intensidade, e a soma de 157 edificações atingidas. A característica destas pesquisas tem em comum a intensidade do processo baseada em dados de volume, profundidade, velocidade e densidade média do material.

Em uma análise de modelos de vulnerabilidade de estruturas sujeitas a fluxo de detritos, foi realizada uma retroanálise do evento da ruptura da barragem de Fundão, Ornelas (2017) descreveu que os modelos apresentaram bom desempenho tendo sua utilização considerada satisfatória para utilização em gerenciamentos de riscos, constituindo uma forma possível de determinar as consequências tanto em eventos naturais de fluxo de detritos quanto nortear para o bom desempenho das obras da atividade de mineração. É destacado o modelo de Kang e Kim (2015), onde foi possível fazer análises específicas para cada um dos parâmetros de intensidade considerados como: velocidade, profundidade e pressão do impacto. Os parâmetros forneceram valores da vulnerabilidade física de edificações e ficaram próximos da observada, resultando no melhor desempenho de todos os modelos analisados. Na análise do modelo o parâmetro mais assertivo foi a profundidade visto que a velocidade e pressão de impacto podem ter interferências (outras edificações, árvores etc.) próximas a atingirem as edificações.

O modelo de Kang e Kim (2015), se destaca pela assertividade na determinação da previsão da pressão de impacto que pode ser alcançado com dados do modelo geométrico do terreno e densidades.

De acordo com, o índice de mobilidade (espaço total percorrido e sua inclinação) é a razão entre a distância horizontal L entre a área e a fonte e o limite distal do depósito para a diferença em altura ΔH e corresponde à mobilidade dos fluxos de massa conduzida por gravidade. Uma maior proporção $L/\Delta H$ corresponde a uma maior mobilidade do fluxo de detritos. O fluxo de detritos de volume V é um dos parâmetros mais importantes que afetam o potencial destrutivo das situações de perigo. Volume estimado (V (unitário) = A (área) \times h (altura)) representa a magnitude de cada evento de fluxo de detritos. As características físicas de fluxos de detritos, tais como vazão de pico, velocidade de fluxo, e pressão de impacto podem ser estimados empiricamente conforme os meios descritos a partir da vazão de pico. A vazão de pico Q_p pode ser avaliada pelas relações empíricas entre pico de descarga de um fluxo de detritos e o seu volume por:

$$Q_p = 0,1 \cdot V^{0,833} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Os autores explicam que é difícil estimar o volume de fluxo de detritos com precisão, porque depende de vários fatores, como a precipitação, área de captação, ângulo de inclinação, características topográficas e profundidade do fluxo. A velocidade v , é obtida por:

$$v = 2,1 \cdot Q_p^{0,33} \cdot S^{0,33} \quad \text{Eq. 2.9}$$

onde: S é a inclinação local, definida pela relação entre a alteração da elevação (Δh) para a distância horizontal (L), $S = \Delta h/L$, o qual pode ser calculado usando o contorno do fluxo de detritos sobreposto em imagens aéreas.

A pressão de impacto do fluxo de detritos consiste principalmente da sobrepressão dinâmica e pressão hidrostática. Estas forças dependem da descarga de pico, a velocidade, o volume, a razão de água-sedimento, e a distribuição de dimensões de grãos de detritos do fluxo. A pressão média de impacto pode ser obtida por:

$$P_t = \left(\frac{1}{2}\right) \rho_{df} g h + \rho_{df} v^2 \quad \text{Eq. 2.10}$$

onde ρ_{df} é a densidade média do material, v é a velocidade do fluxo, h é a profundidade de fluxo, e g é a aceleração da gravidade. O termo: $\left(\frac{1}{2}\right) \rho_{df} g h$, é o componente de pressão hidrostática média, e o outro termo: $\rho_{df} v^2$, é o componente de sobrepressão dinâmica.

2.3 HISTÓRICO DE ESTRUTURAS PARA MITIGAR IMPACTOS DE FLUXO DE DETRITOS

As técnicas ou medidas de mitigação ou convivência, constituem processos para reduzir o risco existente de uma condição do nível elevado para a condição aceitável. Conforme descrito por Nunes e Sayão (2014), medidas ativas focam diretamente na ameaça do evento, enquanto as passivas focam na redução do potencial de dano e são essenciais para a redução dos riscos, apesar de não atuarem diretamente no movimento como as medidas ativas. Uma compilação de obras executadas com medidas ativas para fluxos de detritos realizadas em locais diferentes no mundo é apresentada na Figura 2.13.

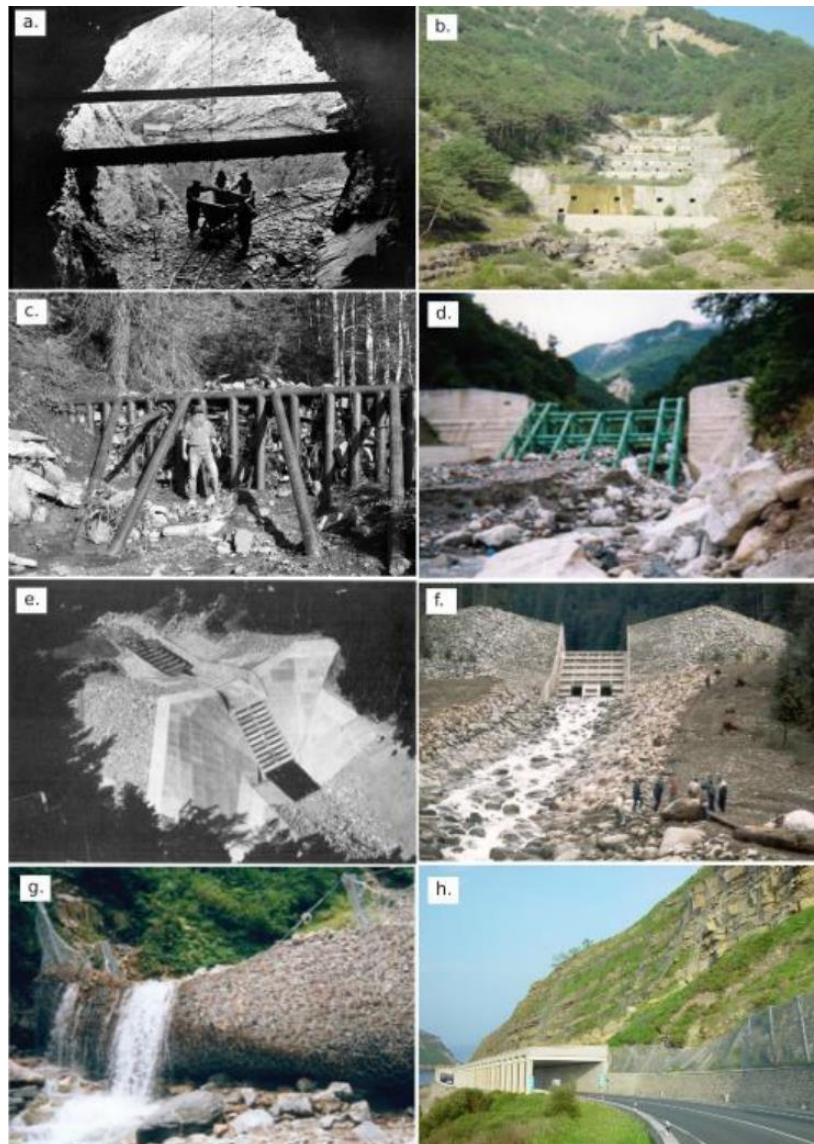


Figura 2.13 (a) Túnel de desvio, França (Huebl e Fiebiger, 2005); (b) Check dams, Espanha (Corominas, 2013); (c) Debris racks, Colorado, USA (deWolfe *et al.*, 2008); (d) Barreiras tubulares, Japão (Ishikawa, 2008); (e) e (f) Barragem, BC, Canadá (Wieczorek *et al.*, 1997); (g) Barreira flexível, Japão (Volkwein et al (2011)); (h) Túneis falsos (Corominas, 2013).

Devido a ruptura abrupta e catastrófica da barragem de rejeitos de Brumadinho-MG, empresas responsáveis por barragens com mesmas características, adotaram posturas mais conservadoras e buscaram soluções para mitigar os riscos de uma falha nestas estruturas.

Com o objetivo de proteger as comunidades e reduzir o impacto ao meio ambiente, a empresa Vale, está executando três obras de contenção em locais situados a jusante das barragens Sul Superior (Barão de Cocais); B3/B4 (comunidade de Macacos, em Nova Lima); e na região sob influência das barragens Forquilhas I, II e III e IV e Grupo (comunidade de São Gonçalo do Bação, em Itabirito). (VALE, 2019)

Conforme apresentado por Valinhas e Moreira (2020), na possibilidade da ruptura de algumas barragens de rejeitos na mina de Fábrica (forquilha I, II III e IV) em Minas Gerais, em caráter emergencial, o empreendedor optou por construir uma barragem de concreto compactado com rolo – CCR, para contenção de 100% de rejeitos, cerca de 65 milhões de m³. Os autores ainda relataram que a barragem antes de totalmente concluída estava apta para sua função, no entanto, por ser provisória ela será desfeita posteriormente a descaracterização das barragens de rejeitos. Apesar do custo elevado para o propósito da obra, a importância desta, em relação aos danos potenciais associados, a estabeleceu como solução. O mesmo empreendedor com a intenção de mitigar outras possíveis falhas, executou ainda: barreiras de telas metálicas e uma de blocos de granito e barragem de enrocamento à jusante de outras barragens de rejeitos. A figura 2.14. mostra a barragem de CCR para contenção de rejeitos em um potencial evento.



Figura 2.14. Barragem de CCR para contenção de rejeitos (VALINHAS e MOREIRA, 2020)

2.4 ESTRUTURAS DE MUROS DE ARRIMO E BARREIRAS DE IMPACTO

Nesta tese, o tubo de geotêxtil foi experimentado como uma estrutura de barreira, onde sua massa é o primeiro componente resistente ao impacto e as estruturas de gravidade são as referências próximas. No entanto, sua finalidade básica é a contenção de um impacto de fluxo de detritos e posteriormente, a reserva deste material do fluxo, total ou parcialmente de forma a mitigar danos potenciais a jusante. Pode ser previsto que a barreira absorva a energia cinética com determinação de um fator de segurança.

A Norma NBR 11682 (2009) descreve o grupo de estruturas número 4: Barreiras e estruturas de impacto. As barreiras e estruturas de impacto visam à desaceleração de blocos de rocha ou de massas de solo em movimento, podendo abranger os seguintes tipos:

1) Muros rígidos ou semi-rígidos de impacto: são estruturas metálicas ou de concreto armado associadas a uma área plana, atrás da face interna do muro, destinada ao amortecimento do impacto. A largura da área de amortecimento e a altura do muro devem ser determinadas por métodos numéricos que simulem a energia e a trajetória de blocos rochosos e de massas de terra em movimento.

2) Barreiras flexíveis: são constituídas de postes de aço, elas de aço, rede de anéis de aço, cabos de aço e dispositivos de frenagem. Servem para a desaceleração de blocos rochosos ou de massas de solo em movimento. O número de elementos, o posicionamento da barreira na encosta, a altura e o tipo de barreira devem ser dimensionados por métodos numéricos que simulem a energia, a trajetória de rolamento de blocos rochosos ou de massas de terreno em movimento. O sistema constituinte da barreira e todos os seus componentes deverão ser comprovados quanto à sua resistência, durabilidade, proteção anticorrosiva e desempenho.

3) Implantação de trincheiras de amortecimento: são posicionadas no pé da encosta e servem de área de impacto para queda e coleta de blocos rochosos e de massas de solo. A largura e a profundidade das trincheiras devem ser determinadas por métodos numéricos que simulem a energia e trajetória de rolamento de blocos rochosos em queda.

As estruturas de contenção flexíveis estão repercutindo seu sucesso e expandido seu uso como o caso dos gabiões e das geoformas. As principais características destas estruturas são: a permeabilidade e a flexibilidade, que permite que a estrutura se acomode a recalques diferenciais. Os gabiões tipo caixa são elementos prismáticos formados pela malha hexagonal de dupla torção com revestimento metálico ou revestimento polimérico de alto desempenho. Estes elementos apresentam dimensões variáveis e são divididos em células internas. Após montadas no local de instalação, as peças são conectadas e preenchidas com material adequado, de maneira a formar estruturas monolíticas, flexíveis e permeáveis. As estruturas em gabiões comportam-se como estruturas de contenção à gravidade, utilizadas em muros de contenção em obras no meio geotécnico, hidráulico e ambiental.

As geoformas eram conhecidas no Brasil até pouco tempo por muros de sacos de solo-cimento, onde são constituídos por camadas formadas por sacos de poliéster ou similares, preenchidos por uma mistura cimento-solo da ordem de 1:10 a 1:15 (em volume). No local de construção, os sacos de solo-cimento são arrumados em camadas posicionadas horizontalmente e, a seguir, cada camada do material é compactada de modo a reduzir o volume de vazios. O posicionamento dos sacos de uma camada é propositalmente desencontrado em relação à camada imediatamente inferior, de modo a garantir um maior intertravamento e, em consequência, uma maior densidade do muro. A compactação é em geral realizada manualmente com soquetes. As faces externas do muro podem receber uma proteção superficial de argamassa de concreto magro, para prevenir contra a ação erosiva de ventos e águas superficiais. Esta técnica tem se mostrado promissora devido ao baixo custo e pelo fato de não requerer mão de obra ou equipamentos especializados. Um muro de arrimo de solo-cimento com altura entre 2 e 5 metros têm custo da ordem de 60% do custo de um muro de igual altura executado em concreto armado (Marangon, 1992). Como vantagens adicionais, pode-se citar a facilidade de execução do muro com forma curva (adaptada à topografia local) e a adequabilidade do uso de solos residuais.

Fator de Segurança é amplamente usado na geotecnia como identificador do nível performance da estabilidade onde se é confrontado os esforços resistentes com os instabilizantes. Autores como Marchetti (2008), Das e Sobhan (2014), destacam que para estruturas de contenção estática do tipo muro de arrimo e de gravidade, são utilizadas as capacidades resistentes da estrutura obtidas pela relação do peso próprio e atrito do contato com o solo de fundação e em razão de uma contraposição aos empuxos e tensões geradas. As estruturas de muros de gravidade rígidos, normalmente são projetados com concreto ou com muros de alvenarias de pedras, são estáveis em função do seu peso, em geral exige fundação e ancoragem em rocha ou solo muito competente ou reforçado por questões de capacidade do terreno e das cargas concentradas. Outras estruturas como muros de semi-gravidade, flexão e contraforte oferecem soluções para maiores alturas e menores volumes, mas que precisam de armadura e fundações competentes.

No caso de estabilidade de muros de gravidade a NBR 11682 (2009), fornece requisitos para estabilidade de muros de arrimo e de muros de flexão, que deverão ser atendidos os seguintes fatores de segurança: 2,0 para tombamento, 1,5 para deslizamento e 3,0 para capacidade de carga da fundação. Nos casos de colúvios permanentemente saturados, o fator

de segurança mínimo a ser atingido após as obras de estabilização deverá ser $FS=1,15$, nas situações em que as poro-pressões e os parâmetros de resistência do solo possam ser estabelecidos com boa confiabilidade, a partir de retroanálises, ensaios de campo, de laboratório e instrumentação.

2.4.1 FALHAS EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO E BARRAMENTOS

Características normalmente verificadas em estabilidade de barramentos podem ser possíveis de ocorrerem numa barreira de contenção, deste modo, Assis et. al, (2003) explica que as principais falhas estruturais que podem ocorrer em barragens são: deslizamento pelo contato com a fundação; flutuação (pressão ascendente de água); tombamento; tensões admissíveis no concreto e fundação.

A primeira referência conhecida sobre as condições de estabilidade de muros de arrimo com formulação científica e matemática dessas condições, foi significativamente desenvolvida por Charles-Augustin de Coulomb em seu trabalho de 1776, "Ensaio sobre uma aplicação das regras de máximos e mínimos a alguns problemas de estática relativos à arquitetura". Coulomb aplicou os princípios da mecânica para determinar as condições de estabilidade para diversos problemas de engenharia, incluindo muros de arrimo. Ele introduziu o conceito de empuxos ativo e passivo e desenvolveu a teoria do equilíbrio limite, que ainda é a base para a análise de estabilidade de muros de arrimo modernos. As condições de estabilidade para muros de arrimo utilizadas em dimensionamento destas estruturas foram detalhadas por Marchetti (2008) e por Das e Sobhan (2014), são elas: segurança contra o tombamento, segurança contra o escorregamento, segurança contra a ruptura e deformação excessiva do terreno de fundação e a segurança contra a ruptura do conjunto muro-solo ou global.

A barreira de contenção com tubos de geotêxteis, pode ser considerado uma estrutura flexível e de gravidade e pode ser estável ao impacto em função da sua massa. Para as verificações de estabilidade destas estruturas, são aplicados os princípios da estática. Nesta condição, as verificações possíveis e que devem ser investigadas são: segurança ao tombamento, ao escorregamento, ruptura e deformação excessiva do terreno de fundação e segurança global.

2.4.2 RESISTENCIA AO DESLIZAMENTO – ATRITO

Em estruturas de contenção e barragens apoiadas sobre fundação direta em solo, o atrito entre os contatos estrutura e solo é relevante, tanto que são consideradas como parte das forças resistentes: as forças de adesão do contato solo/estrutura e o ângulo de atrito entre a base do muro de arrimo e o solo subjacente.

As leis que regem o comportamento da força de atrito são totalmente empíricas. Elas funcionam de modo aproximado e são, mesmo assim, muito úteis na vida prática, pois o fenômeno do atrito é muito complexo. Desta forma os autores Beer e Johnson (2005) explicam que a natureza das forças de atrito não é bem conhecida, mas geralmente se supõe que sejam devidas às irregularidades das superfícies em contato e, também, em certa medida, à atração molecular.

Um referencial é um conjunto de objetos que se mantêm imóveis, uns em relação aos outros. A descrição de movimento só é possível relativamente a um referencial. Dois referenciais distintos têm aceleração mútua se objetos imóveis num deles têm aceleração em relação ao outro. A aceleração de uma partícula medida em dois referenciais nessa situação não é a mesma. Por isso, se quisermos aplicar a segunda lei de Newton, $\vec{F} = m \times \vec{a}$, as forças nos dois referenciais não serão as mesmas: a diferença são forças inerciais. A força de interação entre duas superfícies sólidas paralela à superfície de contato é a força de atrito. Alguns autores designam estas forças por forças fictícias ou pseudo forças. Este ponto de vista considera que essa força não é real e resulta apenas de uma “tentativa” de aplicar a segunda lei de Newton, num referencial em que ela não se aplica. Isto leva-nos a distinguir dois tipos de referenciais. Nos referenciais inerciais todas as forças são “reais”, com origem nas interações físicas com outros corpos. Tendencialmente essas forças diminuem com o afastamento entre os corpos em interação. Nestes referenciais a segunda lei de Newton é válida: a resultante de todas as forças “reais” que atuam num corpo é o produto da sua massa pela sua aceleração. Os referenciais não inerciais são acelerados em relação aos inerciais. Nestes a segunda lei não é válida, na medida em que se a tentarmos aplicar, teremos de supor a existência de forças adicionais, fictícias, que não têm origem na interação física entre corpos. (LOPES DOS SANTOS, 2017)

De acordo com Jones e Childers (1993), A resistência friccional ao movimento relativo de dois objetos sólidos é geralmente proporcional à força que pressiona as superfícies juntas, bem como à rugosidade das superfícies. Uma vez que é a força perpendicular ou "normal" às superfícies que afeta a resistência ao atrito, essa força é normalmente chamada de "força normal" e designada por N. A força de resistência ao atrito pode então ser escrita como o modelo padrão de fricção:

$$f_{\text{atrito}} = \mu \cdot N \quad \text{Eq 2.11}$$

onde:

μ = coeficiente de atrito

N = Força Normal

É importante destacar alguns aspectos registrados pelos autores Serway e Jewett (2017), que relatam que a força de atrito estático obtida pelo coeficiente de atrito estático, deve ser utilizada em casos em que as superfícies estão prestes a se soltar e começar a escorregar. E que a força de atrito sobre um corpo é oposta ao seu movimento ou movimento eminente em relação à superfície.

Conforme Jones e Childers (1993), é presumido também que a força de atrito seja proporcional ao coeficiente de atrito. No entanto, a quantidade de força necessária para mover um objeto partindo do repouso é geralmente maior do que a força necessária para mantê-lo em movimento a uma velocidade constante depois de iniciado. Portanto, às vezes, dois coeficientes de atrito são citados para um determinado par de superfícies - um coeficiente de atrito estático e um coeficiente de atrito cinético. A expressão de força acima pode ser chamada de modelo padrão de fricção de superfície e depende de várias suposições sobre fricção. A Figura 2.15 explica os coeficientes de atrito estático e cinético.

A estrutura em repouso sobre o solo ou superfície específica às forças que agem nela são a normal e a gravitacional. Os autores Jones e Childers (1993), explicam que as forças de resistência ao atrito são tipicamente proporcionais à força que pressiona as superfícies juntas. Essa força que afetará a resistência ao atrito é a componente da força aplicada que atua perpendicularmente ou "normalmente" às superfícies que estão em contato e é normalmente chamada de força normal. Em muitas situações comuns, a força normal é apenas o peso do

objeto que está sobre uma superfície, mas se um objeto estiver inclinado ou tiver componentes de força aplicada perpendiculares à superfície, então não é igual ao peso. Neste sentido pode ser complementado com a exposição de Serway e Jewett (2017), que a massa é a propriedade de um corpo que especifica quanta resistência a mudanças em sua velocidade o corpo tem. Experiências mostram que quanto maior a massa de um corpo, menos ele acelera sob a ação de determinada força aplicada.

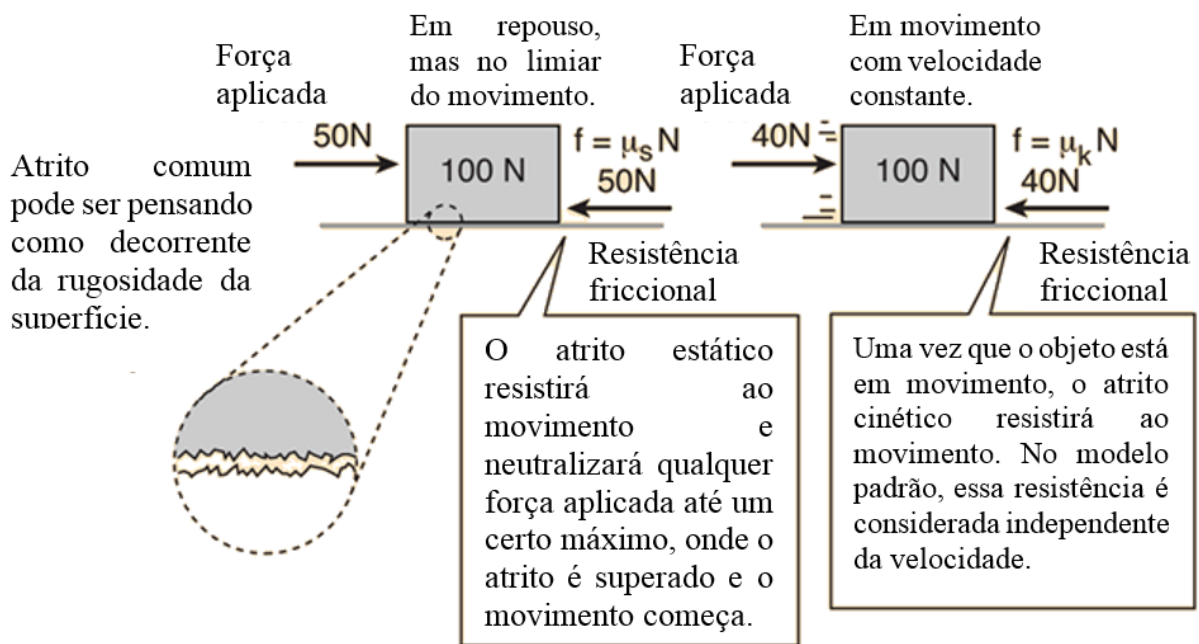


Figura 2.15. Coeficientes de atrito estático e cinético (JONES & CHILDERS, 1993)

Embora essa descrição geral do atrito ao qual Jones e Childers (1993), se referiram como o modelo padrão tenha utilidade prática, os autores relatam que não é de forma alguma uma descrição precisa do atrito. O atrito é de fato um fenômeno muito complexo que não pode ser representado por um modelo simples. Quase todas as afirmações simples sobre atrito podem ser combatidas com exemplos específicos em contrário. Superfícies mais ásperas possuem maior atrito. Aparenta-se bastante conservador como exemplo de dois pedaços de lixa grossa obviamente serão mais difíceis de mover um em relação ao outro do que dois pedaços de lixa fina. Mas se duas peças de metal plano forem progressivamente mais lisas, você chegará a um ponto em que a resistência ao movimento relativo aumenta. Se você os tornar muito planos e lisos e remover todos os contaminantes da superfície no vácuo, as superfícies lisas e planas realmente aderirão umas às outras fazendo o que é chamado de "solda a frio". Depois de atingir um certo grau de suavidade mecânica, a resistência ao atrito passa a depender da natureza das

forças moleculares na área de contato. Um contraexemplo facilmente observado para a ideia de que superfícies mais ásperas exibem mais atrito é o vidro fosco versus o vidro liso. As placas de vidro lisas em contato, exibem muito mais resistência ao movimento relativo do que o vidro com polimento mais áspero.

Os valores de coeficiente de atrito estático podem ser verificados na literatura (SERWAY & JEWETT, 2017), (BEER & JOHNSON, 2005), com valores aproximados para alguns tipos de superfícies e pode ser destacado alguns como a borracha com o concreto $\mu_e = 1,0$, vidro com vidro $\mu_e = 0,94$ μ_e metal com metal (lubrificado), = 0,15 e solo sobre solo o intervalo de $\mu_e = 0,2$ a 1,00.

2.4.3 MOVIMENTO DE CORPO, DISSIPACÃO DE ENERGIA E COLISÕES

O objetivo desta pesquisa é a contenção do fluxo, no entanto, se as barreiras conseguirem dissipar a energia cinética ao ponto de evitar grandes riscos e danos potenciais associados, poderá ser considerado de grande valia. Pode ser deduzido que as barreiras de tubo de geotêxteis preenchidas com solo são estruturas semirrígidas ou mesmo flexíveis para os níveis de tensões atuantes, no entanto, a rigidez de um corpo depende da velocidade de aplicação do carregamento, o que pode resultar em pouca ou nenhuma deformação da barreira.

Um sistema é, com mais frequência, uma partícula única, um conjunto de partículas ou uma região no espaço, e pode variar em tamanho e forma. Uma fronteira separa o sistema do ambiente. Se não houver forças externas ao sistema, o sistema é isolado. Se forças externas forem aplicadas no sistema, o sistema é não isolado.

Segundo as leis de conservação descritas por Jones e Childers (1993), se um sistema não interage com seu ambiente de forma alguma, certas propriedades mecânicas do sistema não podem mudar. Às vezes, eles são chamados de "constantes do movimento". Essas quantidades são ditas "conservadas" e as leis de conservação resultantes podem ser consideradas os princípios mais fundamentais da mecânica. Na mecânica, exemplos de quantidades conservadas são energia, momento e momento angular. As leis de conservação são exatas para um sistema isolado. Apresentadas como princípios da mecânica, essas leis de conservação têm implicações de longo alcance como simetrias da natureza que não vemos violadas. Servem como uma forte

restrição a qualquer teoria em qualquer ramo da ciência. Existem outros tipos de leis de conservação que governam o comportamento da natureza no domínio quântico.

A energia pode ser definida como a capacidade de realizar trabalho. Pode existir em uma variedade de formas e pode ser transformada de um tipo de energia para outro. No entanto, essas transformações de energia são limitadas por um princípio fundamental, o princípio da Conservação da Energia. Uma maneira de afirmar esse princípio é "A energia não pode ser criada nem destruída". Outra abordagem é dizer que a energia total de um sistema isolado permanece constante. Para a aplicação no experimento o resumo de Serway e Jewett (2017) expõe que uma força de atrito transforma energia cinética de um sistema em energia interna.

O conceito de momento descreve os corpos em movimento dentro de um sistema isolado ou não isolado que são modelos úteis para tratar de problemas que envolvem choques entre corpos. Neste sentido Serway e Jewett (2017), descrevem que o momento de um corpo se relaciona tanto com sua massa, quanto com sua velocidade. Este conceito nos leva a uma segunda lei da conservação, a da conservação do momento. Há três maneiras de se armazenar energia em um sistema: cinética, potencial e interna. Há apenas uma maneira de transferir momento para um sistema: pela aplicação de uma força sobre ele durante um intervalo de tempo. Os autores ainda expõem que, se forças externas forem aplicadas no sistema, o sistema não é isolado (momento). Nesse caso, a mudança no momento total do sistema é igual ao impulso no sistema, uma declaração conhecida como teorema do impulso-momento $\Delta \vec{P}_{tot} = \vec{I}$. Um exemplo pode ser uma bola de beisebol que é atingida por um bastão.

Em muitas situações físicas, devemos usar o que é chamado aproximação do impulso, onde consideramos que uma das forças exercidas sobre uma partícula age por um curto período, mas é muito maior que qualquer outra força presente, neste caso a força resultante é substituída por uma força única para encontrar o impulso sobre a partícula. Essa aproximação é especialmente útil a tratar de choques em que a duração é muito curta durante a colisão. Quando esta aproximação é feita, a força única é chamada de força impulsiva (SERWAY & JEWETT, 2017).

Serway e Jewett (2017), descrevem que o centro de massa de um sistema de partículas tendo massa M , move-se como uma partícula equivalente de massa M se moveria sob a

influência da força externa resultante sobre o sistema. O fenômeno previsto, onde o tubo de geotêxtil com solo granular se desloca em vez de se deformar sob uma carga aplicada rapidamente, pode ser explicado por uma combinação de fatores físicos onde se destaca como o principal a inércia do solo: quando a carga é aplicada rapidamente, o solo dentro do tubo de geotêxtil tem pouco tempo para se ajustar e redistribuir suas partículas para acomodar a carga. Como resultado, o solo dentro do tubo pode exibir uma certa inércia, onde as partículas não têm tempo suficiente para se mover e se ajustar para resistir à carga. Em vez disso, o solo permanece relativamente "solto" e pode se mover facilmente em resposta à carga aplicada e a estrutura inteira como o movimento de um corpo rígido.

Podemos determinar o movimento completo de um corpo rígido a partir do deslocamento de um único ponto. O movimento de corpo rígido ocorre mesmo em corpos deformáveis se estes não tiverem nenhum tipo de restrição (movimento de corpo livre). Para haver deformações na análise estática, o objeto precisa ter algum tipo de restrição de deslocamento; na análise dinâmica elas ocorrem sob acelerações diferentes aplicadas em pontos distintos do mesmo corpo (FARIAS, 2014).

2.5 MODELOS EXPERIMENTAIS

Pesquisas da engenharia geotécnica geralmente demandam avaliações laboratoriais ou estudo de campo em grande escala. Modelagens físicas são eficientes para descobrir valores, podem ser realizados vários ensaios ou séries de ajustes mais facilmente e sem maiores custos do que em obras reais, além de aplicações de cargas até o limite de materiais para avaliação de rupturas e sem que algum dano cause algum problema ou prejuízo. Modelos em escala reduzida podem obter muitas informações e dados análogos ao tamanho real e serem realizadas verificações para comprovações de resultados e ainda têm a vantagem de serem menos dispendiosos, não necessitarem de grandes áreas, volumes, equipamentos e licenças para serem construídos.

Conforme relatado por Ribeiro (2000), os modelos são usados para fornecer informações necessárias para complementar um projeto aumentando sua eficiência e precisão. Até mesmo em situações relativamente simples sob o ponto de vista hidráulico é impossível

prever a exata natureza do fenômeno sem conduzir as avaliações a partir de modelos físicos, sejam reduzidos ou na escala 1:1.

O modelo deve ser cauteloso principalmente para com as características geométricas de um modelo reduzido que necessitam ser adequadas às do protótipo. Neste sentido, Ribeiro (2000), resumiu o processo da teoria da semelhança de Hooke (1968), onde o processo da semelhança é uma aproximação direta que fornece uma base para geração de hipóteses e que pode revelar novas informações a respeito dos processos e tendências de comportamento, associados a conclusões qualitativas extraídas do sistema experimental aplicadas ao sistema de campo.

Analisar deformações em modelos físicos de estruturas sujeitas a impactos era uma grande limitação das engenharias até pouco tempo. Vários autores citam este problema e buscaram formular e corrigir divergências como os autores Oshiro e Alves (2004), que falam que um dos maiores problemas de modelos reduzidos é o fator de escala e a relação entre as estruturas e as taxas de deformações geradas por um grande impacto axial. O fato de que os efeitos da taxa de deformação não são propensos a escalonamento é um grande obstáculo para o uso de estruturas escalonadas sob carga de impacto.

Modelos experimentais são uma representação ou interpretação simplificada da realidade, uma interpretação de um fragmento de um sistema segundo uma estrutura de conceitos servindo como parâmetro de previsão do comportamento. A teoria da semelhança mecânica foi descrita por Isaac Newton como um conjunto de princípios a serem obedecidos a fim de projetar, construir, operar e interpretar os sistemas (modelos) a partir dos quais se deseja prever o comportamento de outros sistemas (protótipo).

Os modelos devem buscar seguir as semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica de acordo com o que se deseja simular.

- Semelhança Geométrica: modelo e protótipo só diferem na escala, devem ter o mesmo formato. Suas dimensões correspondentes deverão ser proporcionais;

- Semelhança Cinemática: as velocidades das partículas de fluido deverão manter uma relação constante, modelo e protótipo devem ter as mesmas escalas de comprimento e intervalos de tempo;
- Semelhança Dinâmica: dois sistemas são dinamicamente semelhantes quando as forças que agem em pontos homólogos deverão manter relações constantes.

Do ponto de vista da semelhança geométrica, os modelos físicos podem ser: geometricamente semelhantes, geometricamente distorcidos ou analógicos. Modelos geometricamente semelhantes são aqueles cuja geometria é determinada pela redução, segundo um mesmo fator, de todas as características geométricas do protótipo. Modelos analógicos foram descritos por Motta (1972), como aqueles que não apresentam semelhança geométrica com os respectivos protótipos e nos quais ocorrem fenômenos qualitativamente diferentes daqueles que devem ser previstos para o protótipo, mas as equações, que regem os fenômenos no protótipo e no modelo análogo, apresentam a mesma estrutura formal. Consideremos, por exemplo, um fenômeno puramente mecânico, em que a aplicação de uma certa força (F) a um corpo de massa (m) a este comunica uma aceleração na direção da força. O autor ainda explica que a tendência geral do progresso científico consiste em alargar cada vez mais a gama de aplicações do método analítico. Quando conhecemos perfeitamente a lei que rege um determinado fenômeno físico, podemos empregar tal método. Cabe reconhecer, porém, que este método comporta limitações. Em primeiro lugar, se a grandeza, cujos valores se querem prever, depende de mais de duas outras grandezas, o número de observações necessárias para estabelecer a lei de previsão pode ser muito elevado e exigir análise muito cuidadosa. Por outro lado, muitas vezes, as necessidades do desenvolvimento econômico nos obrigam a resolver problemas cujas leis gerais ainda não são plenamente conhecidas.

Os conceitos básicos usados na mecânica e descritos por Beer e Johnston (2006), são os de espaço, tempo, massa e força. Estes conceitos não podem ser exatamente definidos, são aceitos com base em nossa intuição e experiência e usados como quadro de referência para nosso estudo de mecânica. Ribeiro (2000), também descreveu que em sistemas mecânicos as grandezas fundamentais são o comprimento, a massa (M) e o tempo (T). Essas grandezas são consideradas fundamentais em vista da facilidade de percebê-las e quantificá-las. Pode-se assim, de forma simples, estabelecer relações entre estas grandezas fundamentais e descrever leis e grandezas mais complexas.

Existem vários métodos para prever o comportamento dos sistemas físicos. Os métodos analíticos se baseiam na utilização de leis gerais que permitem efetuar previsões dos valores das grandezas em função de outras que regem os fenômenos físicos. O método analítico apresenta algumas limitações em função do número de grandezas envolvidas e do número de observações necessárias para estabelecer as leis de previsão. Os métodos empíricos são baseados em observações a partir de sistemas construídos para estabelecer e prever o comportamento futuro relacionado às hipóteses formuladas e apoiadas em considerações de que o sistema e suas características não se alterarão. O último método refere-se ao método do modelo reduzido. Neste caso as observações são efetuadas em outros sistemas com comportamento semelhante, mas de menores dimensões. A vantagem da redução nas dimensões do sistema é permitir modificações ou controlar grandezas mais representativas do sistema a ser previsto.

Os modelos análogos são muito convenientes e efetivamente utilizados para a simulação de sistemas cujas características geométricas são tais que sua redução comportaria dificuldades de realização material ou desaparecimento da semelhança para as forças presentes. São muito utilizados, por exemplo, nos fenômenos de escoamento de fluidos em condutos de dimensões muito pequenas, por exemplo, escoamentos em meios porosos, nos quais os condutos construídos pelos interstícios entre os grãos não são redutíveis a escala, ou nos escoamentos de fluidos em organismos vivos, nos quais se depararia com a mesma dificuldade em relação aos vasos a considerar. Também se recorre a modelos analógicos para estudos em que as dimensões geométricas longitudinais são de ordem de grandeza muito diferente das dimensões geométricas transversais, acarretando inconveniência de redução segundo o mesmo fator e não se podendo recorrer à distorção por alguma razão intrínseca do problema.

O uso extensivo de modelos em pequena escala para investigar problemas de engenharia levanta muitas questões importantes que são resolvidas pela análise dimensional. A aplicação da análise dimensional a qualquer fenômeno particular é baseada na suposição de que certas variáveis, que são nomeadas, são as variáveis independentes do problema e que todas as variáveis, exceto essas e a variável dependente, são redundantes ou irrelevantes. Este passo inicial – a nomenclatura das variáveis – muitas vezes requer uma visão filosófica dos fenômenos naturais. O segundo passo na análise dimensional de um problema é a formação de um conjunto completo de produtos adimensionais das variáveis. A maioria das apresentações do assunto

demonstra que os expoentes de um produto adimensional são uma solução de um certo conjunto de equações algébricas lineares homogêneas. No entanto, não é suficiente apenas uma solução dessas equações, mas sim um sistema fundamental de soluções (LANGHAAR, 1962).

Em modelos de projéteis rígidos Langhaar (1962), descreve que a análise dimensional aplicada a problemas de tensão e deformação, para os fatores de escala em impactos de corpo rígido em movimento, a modificação local depende do tamanho, da massa e da velocidade do corpo. Por outro lado, o dano (flexão ou fratura) a alguma distância do ponto de colisão é praticamente independente do tamanho do corpo, embora dependa naturalmente da massa do corpo. Em qualquer caso, o fator de escala de comprimento para um modelo do corpo incidente pode ser considerado o mesmo que o fator de escala de comprimento para um modelo da estrutura. Então, em uma classe de sistemas geometricamente semelhantes, o tamanho da estrutura e o tamanho do corpo que colide são ambos determinados por um comprimento característico L . A tensão máxima em qualquer ponto da estrutura depende da massa m e da velocidade V do corpo incidente, do comprimento característico L , do módulo de elasticidade E , da razão de Poisson ν e da densidade de massa ρ da estrutura.

O fluxo de detritos em termos de modelagem reduzida utiliza a abordagem semiempírica. A parte empírica da abordagem é necessária porque requer a calibração de eventos anteriores e, a parte analítica utiliza diferentes soluções para avaliar as propriedades dos materiais e os mecanismos do movimento. Esta abordagem semiempírica é baseada no conceito de fluxo equivalente, definida por Hungr (1995) onde a heterogeneidade e complexidade dos materiais são reduzidas a um material hipotético governado por relações reológicas. Na Figura 2.16, observa-se a abordagem de fluxo equivalente aplicado a uma avalanche de rocha.

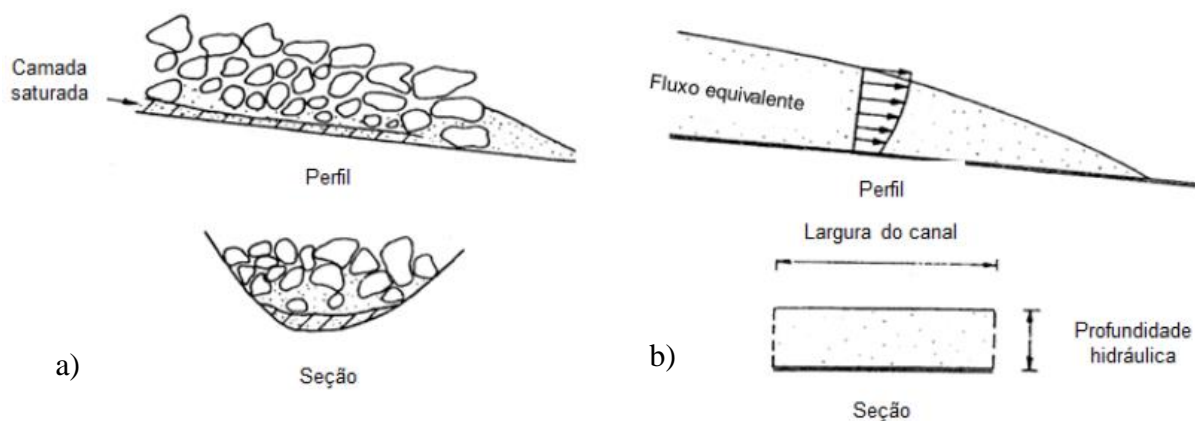


Figura 2.16. Diagrama esquemático do conceito de fluxo equivalente onde a) é o fluxo natural e b) o fluxo equivalente (adaptado de HUNGR, 1995).

O material em movimento e o material da base podem ser governados por reologias diferentes. No caso a reologia interna é assumida sempre como de atrito, governada pelo ângulo de atrito, e a reologia da base é uma combinação das reologias de atrito, turbulentas e viscosas (open reological kernel) que atuam na base do movimento. Isto permite uma abordagem mais real, visto que, geralmente os movimentos de massa consistem em um material mais rígido que flui sob um material que possui maior mobilidade. Logo, a reologia da base e seus parâmetros associados, são selecionados baseando-se na calibração empírica através da retroanálise de movimentos de massa acontecidos que representem o movimento em estudo. Portanto os parâmetros obtidos são considerados aparentes e não podem ser estimados em laboratório (HUNGR E MCDUGALL, 2009).

2.6 CANAIS HIDRÁULICOS FABRICADOS

Os canais hidráulicos são sistemas de condução de fluidos abertos para a atmosfera e usados para o transporte de fluidos. Foram pesquisados os canais hidráulicos fabricados em diversas pesquisas tanto para fluxos, ondas ou deposições hidráulicas. São destacados: O canal do equipamento de simulação de deposição hidráulica-ESDH projetado e construído por Ribeiro (2000) apresentado na Figura 2.17, o canal de ondas elaborado por Girelli (2008) e Tatto (2014) apresentados na Figura 2.18 e 2.19, e o canal elaborado por Jiang e Towhata (2012), para o estudo experimental de fluxo granular seco e do comportamento de impacto contra um muro de contenção rígido apresentado na Figura 2.20.



Figura 2.17 Equipamento de simulação de deposição hidráulica-ESDH Ribeiro (2000)

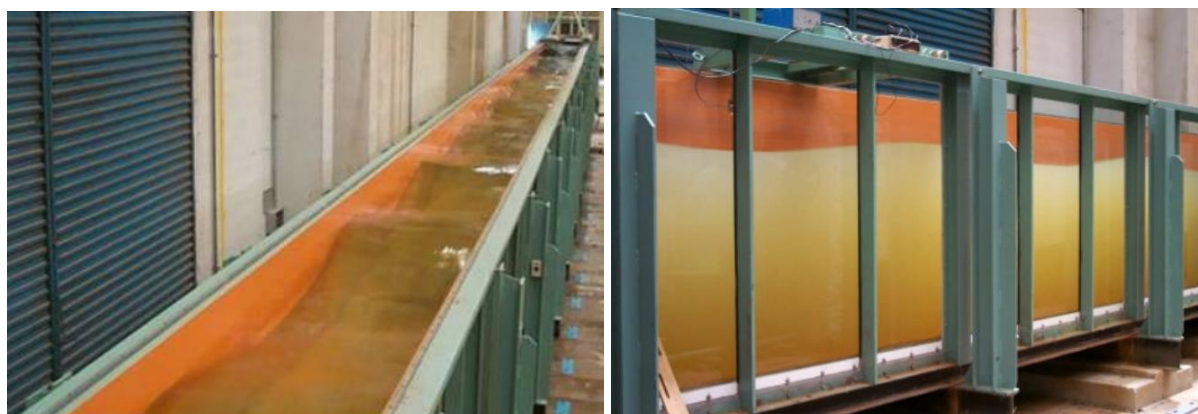


Figura 2.18. Canal de ondas elaborado por Girelli (2008)



Figura 2.19 Canal de ondas elaborado por Tatto (2014)



Figura 2.20 Canal elaborado por Jiang e Towhata (2012) para o estudo experimental de fluxo granular seco e do comportamento de impacto contra um muro de contenção rígido

Os canais têm em comum lateral translúcida para as análises e obtenções de dados. Outra similaridade é a largura de 1,0 m já as alturas variam entre 1,0 e 2,0 m. Os comprimentos variam muito como o canal de ondas de Girelli (2008), que tem 50,0 m de comprimento e os demais da ordem de 3,0 m. As estruturas analisadas embasaram o dimensionamento adequado para os experimentos de promoção e condução do fluxo de detritos e de instalação da barreira e dos instrumentos.

Materiais e Métodos de ensaio

3. CARACTERÍSTICAS DO ESTUDO EXPERIMENTAL

Objetivando a avaliação do desempenho de estrutura para contenção de impacto com tubo de geotêxtil preenchido com rejeito de mineração e determinar a efetividade do sistema para mitigar o fluxo de detritos de uma falha em barragem de rejeito, foram realizados ensaios que simulam uma descarga e o impacto do fluido na estrutura. Fundamentadas no contexto teórico apresentado nos tópicos anteriores, nesse capítulo será tratada a sequência de atividades realizadas na pesquisa para obtenção dos objetivos propostos. Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma sequencial das atividades realizadas a partir de estudos e previsões e com a realização de experimentos com as barreiras e do fluxo e análises respectivas.

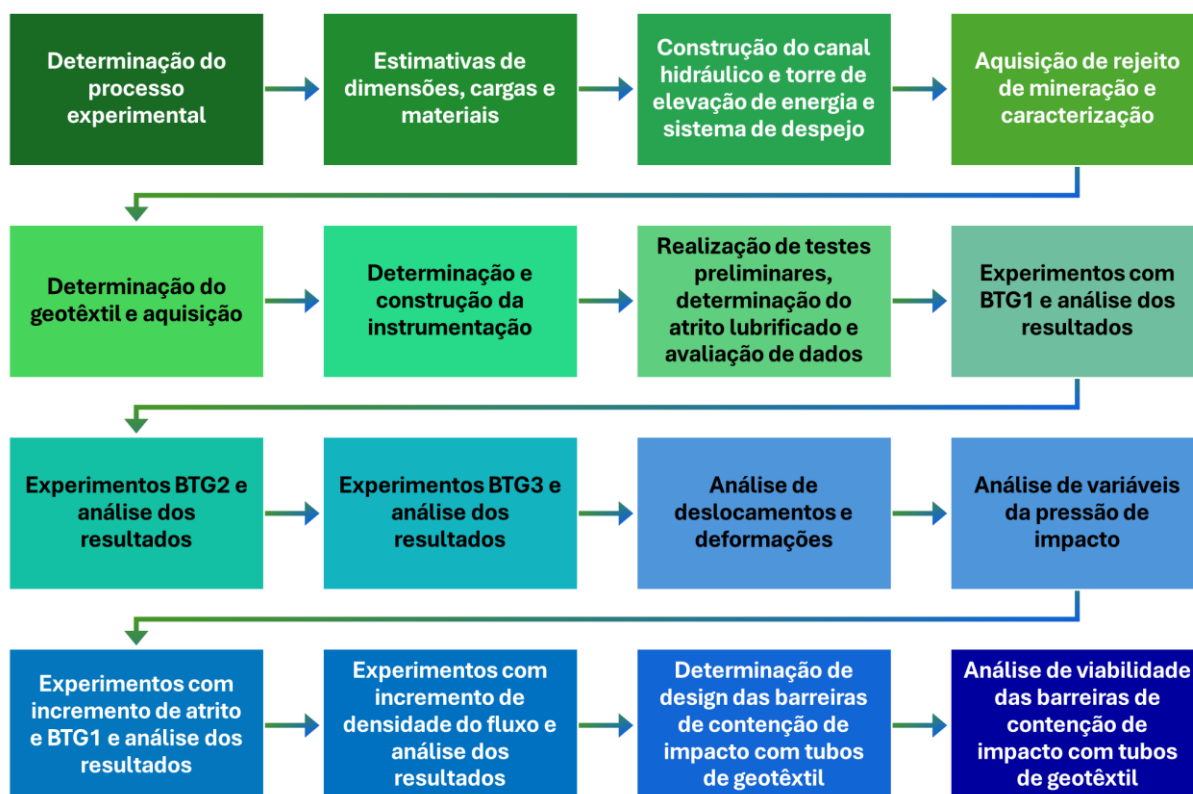


Figura 3.1 Fluxograma sequencial das atividades realizadas

A simulação do fluxo de detritos que impacta o tubo de geotêxtil, foi realizado inicialmente com água para uma normalização e melhor observação de vários parâmetros como

profundidades e deslocamentos. Posteriormente realizado com a utilização de material fino misturado com água em proporção em massa de mais de 50% de sólidos, em características próximas do evento ocorrido em Bento Rodrigues (MG) registrado por Ornelas (2017). A homogeneização do material feita em uma betoneira até formar uma polpa, o que causa a suspensão de partículas, que com o fluxo turbulento é capaz de carregar blocos de rochas.

Foi previsto pela aplicação do modelo de Kang e Kim (2015), estimativa da altura e distância para alcançar a pressão de impacto proporcional, desta forma o material é elevado a altura de 250 cm para geração da energia potencial e posteriormente liberado sobre uma esteira com segmentações de inclinações para redução da dissipação da energia cinética em impactos verticais nos componentes do canal e alteração para fluxo horizontal (a perda da velocidade é considerada o produto relevante da dissipação) e, medido a vazão e estimativa de pressão antes do impacto na estrutura.

Os experimentos foram realizados com o tubo de geotêxtil tecido na condição isolado e tubos na condição de empilhamento 3-2-1, preenchidos e instalados no canal sobre a superfície lisa e com aplicação de vaselina líquida e filme de PVC, para reduzir forças de atrito no fundo e paredes laterais. O objetivo é analisar a estabilidade da estrutura apenas com a condição de resistência da inércia ou da dificuldade de deslocamento em função do seu peso próprio, no entanto, o atrito do contato lubrificado foi apurado.

3.1 O FATOR DE SEGURANÇA

A estrutura de barreira de tubo de geotêxtil tem a estabilidade determinada a partir de fator de segurança para a pressão de impacto de modo que o barramento absorva a energia cinética e acumule o material do fluxo de detritos.

O fator de segurança da barreira para a estabilidade da estrutura foi elaborado a partir do que é utilizado em estruturas de contenção do tipo gravidade, alterando o empuxo do solo pela pressão de impacto estimada, e da relação de somatório de forças resistentes em razão de forças atuantes. Para as forças resistentes é considerada a relação entre o peso próprio da estrutura de barramento com tubos geotêxteis, multiplicada pelo coeficiente de atrito estático correspondente as áreas de contato das barreiras (base e ombreiras), e para as forças atuantes a estimativa unitária da força normal da pressão de impacto gerada pelo fluxo de detritos e multiplicada pela área do paramento das barreiras. O paramento é considerado como a área de

superfície a ser impactada, no sentido perpendicular a resultante das forças estimadas da pressão de impacto. A Equação 3.1 apresenta as relações numéricas e a Figura 3.2 o esquema da relação entre o peso próprio da estrutura e a pressão de impacto.

$$FS = \frac{W*(A_b+A_o)*\mu_e}{PI*A_p} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde:

FS: Fator de Segurança

W: Força Peso da Barreira

A_b : Área de Contato da Base

A_o : Área de Contato das Ombreiras

μ_e : Coeficiente de Atrito Estático máximo

PI: Pressão de Impacto

A_p : Área do fluxo

u: Deslocamento

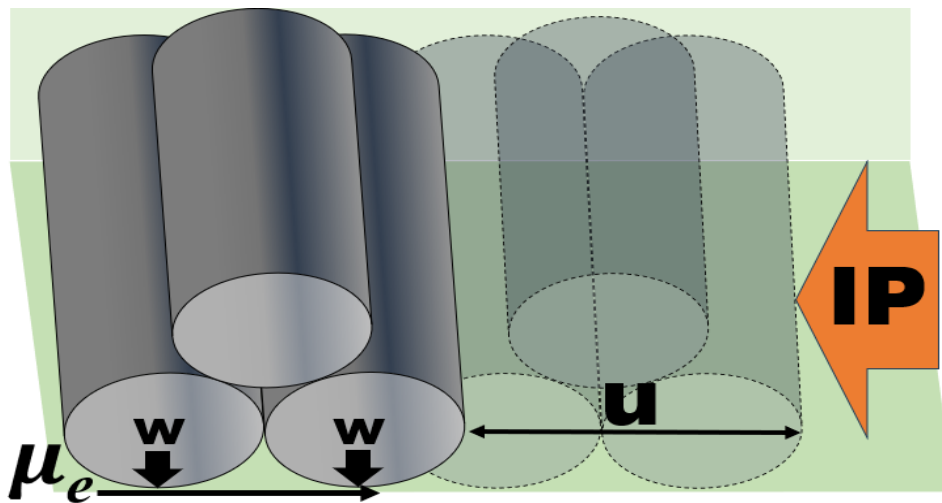


Figura 3.2. Parâmetros que compõe o experimento: W (peso próprio das barreiras), μ_e (coeficiente de Atrito), PI (pressão de impacto) e u (deslocamento)

O excesso de deslocamento (u), indica o fator de segurança para nível de falha da estrutura, é elaborado por conta da estrutura estar “solta” e com o mínimo atrito possível, para que seja identificado a força inercial que proporcione estabilidade ao impacto. É necessária esta lubrificação das superfícies entre o piso do canal e a barreira, para a construção de uma relação entre massa da barreira e a pressão de impacto, abstraindo as outras formas de ancoragem da estrutura. Em condições reais mesmo que haja o deslocamento e as barreiras consigam

acomodar o material proveniente do fluxo de detritos (projétil / material impactante), cumprem sua função de mitigar os riscos de forma que a relação entre o FS e o deslocamento, indica o limite de segurança e determina a viabilidade em função da mitigação de risco e do dano potencial associado. Vale destacar que capacidade de não ser “arrastado” pelo fluxo é importante para que a estrutura não seja incorporada ao mesmo.

A estrutura pode não ser estável para flutuação, devido ao formato, o fluxo pode impactar a base e auxiliar um levantamento da estrutura e contribuir para sua falha potencial por tombamento ou deslizamento e se o meio externo for mais denso, a barreira poderia "flutuar". Em densidades consideradas iguais, partes de uma barreira segmentada podem ser simplesmente incorporadas e seguirem "flutuando" junto ao fluxo e acrescer volume de materiais impactantes a jusante.

Outras falhas secundárias foram analisadas como: os danos ao geotêxtil e seu potencial de colapso progressivo e locais vulneráveis para vazamentos de fluxo e soluções para estas eventualidades.

A contribuição do tubo geotêxtil em detrimento de um muro de peso convencional, é a possibilidade de ser executado sem grandes equipamentos e compactações o que podem gerar sismos induzidos a alguma estrutura em nível de alerta. As características de instalação de uma estrutura flexível em locais de baixa capacidade de carga de fundações também é um fator muito importante.

3.2 CANAL HIDRÁULICO

A execução do programa experimental de ensaios é realizada dentro de um circuito constituído por canal hidráulico e uma torre para suportar reservatório basculante. O canal hidráulico teve por base os estudos feitos por Ribeiro (2000), para o equipamento de simulação de deposição hidráulica – ESDH. Os outros componentes desenvolvidos são para as simulações de fluxo de detritos e o experimento do impacto na estrutura. A Figura 3.3 apresenta perspectiva 3D do projeto de estrutura metálica do canal hidráulico e as Figuras 3.4 e Figura 3.5 os cortes longitudinal e transversal, respectivamente, do projeto do canal com dimensões em mm.

A necessidade de translucidez em uma das faces para observação dos experimentos no canal com segurança, exigiu que fosse executado a face com vidro. Os vidros temperados têm as seguintes dimensões: espessura 16 mm (duas peças de 8mm), altura 108,5 cm e largura 142,5

cm, definidos após alguns cálculos da previsão de cargas e impactos para garantir que não houvesse alguma ruptura considerado apoio nas quatro extremidades e tensões admissíveis superiores as estimativas de solicitações previstas.

As falhas em faces translucidas devem ser evitadas, ou seja, a quebra dos vidros ou vazamentos de líquidos nos pontos de fixação destes. Para garantir que o canal permaneça estanque durante e após a realização dos experimentos e mesmo com as vibrações e pequenas deformações sem que houvesse descolamentos das faces, os vidros foram fixados com silicone estrutural. A cura do silicone durou 7 dias conforme determina o fabricante para retirada do cimbramento.

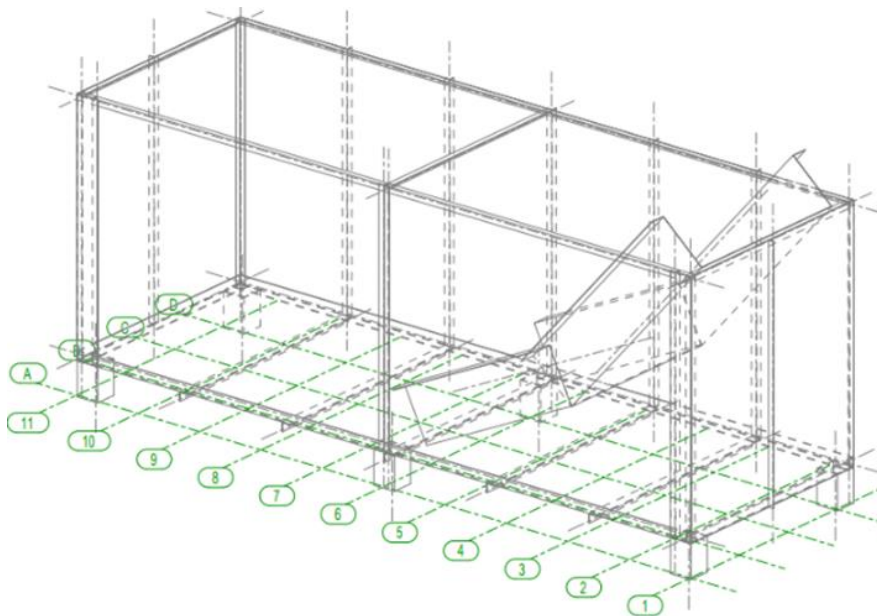


Figura 3.3 Perspectiva 3D do canal e da rampa segmentada

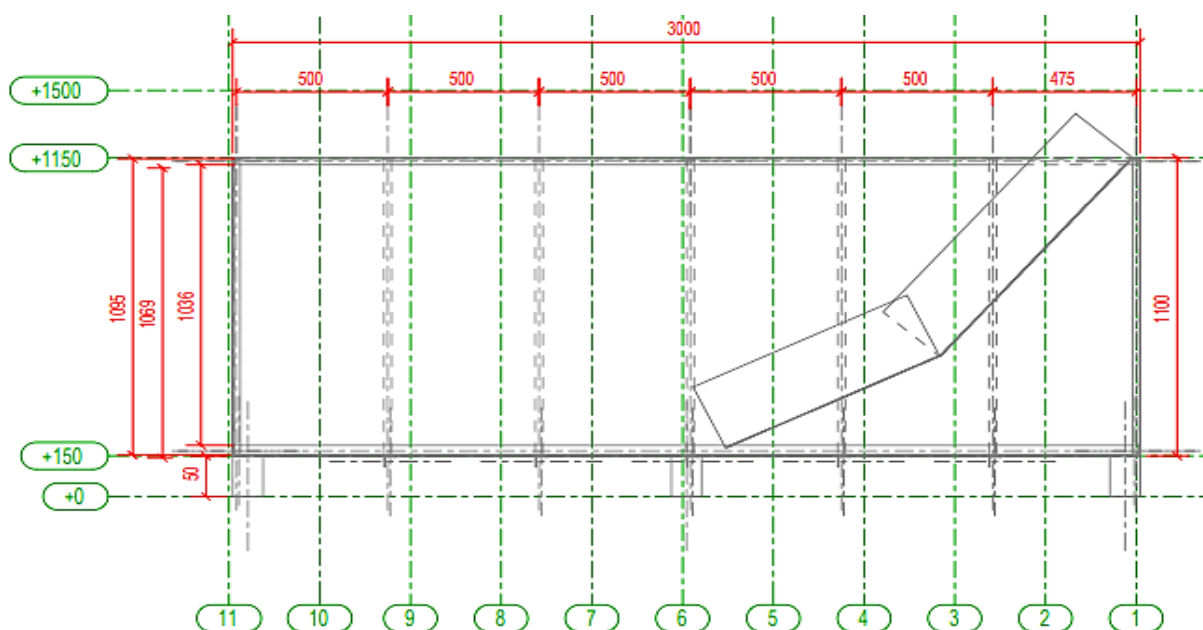


Figura 3.4 Corte longitudinal do projeto do canal (dimensões em mm)

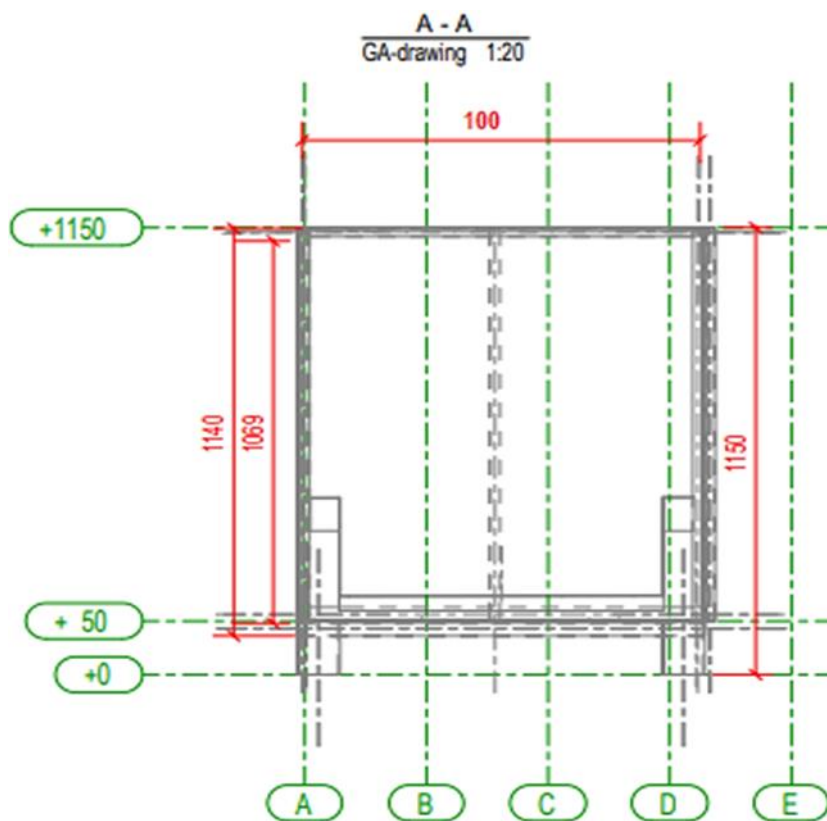


Figura 3.5. Corte transversal do projeto do canal (dimensões em mm)

O canal foi executado conforme planejado, com dimensões e características necessárias para os experimentos. Além deste foi executado a rampa segmentada para direcionar o fluxo de detritos e reduzir a dissipação da energia cinética. Após a definição do uso dos dinamômetros e durante os primeiros testes verificou-se que o fundo do canal deformava e poderia absorver

energia e balancear os dinamômetros causando registros diferentes dos reais. Para solucionar este problema foi realizado reforço do fundo do canal com perfis de aço transversais soldados externamente ao fundo. Para melhor rigidez, o suporte em aço dos dinamômetros foi soldado internamente no fundo e no sentido longitudinal ao canal. O sentido longitudinal é o mesmo do fluxo para evitar perda de carga neste e ainda o suporte teve as faces chanfradas.

O aumento da energia potencial e realização do fluxo foram estabelecidos com a construção de uma torre em aço com 2,0 m de altura para elevação da energia potencial e sobre esta foi realizada a suspensão de uma betoneira de 400 L de capacidade, para servir como misturador (rejeito e água) e como caçamba de despejo, na altura final do conjunto de 250 cm onde gera energia potencial e posteriormente solto sobre uma rampa (esteira) com duas segmentações e variação da inclinação até a base horizontal do canal, com superfícies lisas para reduzir atrito e a dissipação da energia cinética em um impacto na vertical antes de impactar horizontalmente a estrutura. Por fim a rampa tem função de minimizar impacto do fluxo nos vidros do canal para proteção destes. A Figura 3.6 apresenta o canal hidráulico com torre e rampa segmentada executados.



Figura 3.6. Canal hidráulico, rampa segmentada e torre com a betoneira

O suporte para fixação dos dinamômetros foi executado com rigidez suficiente para garantir que as leituras fossem mais precisas nas amostras de pressão no impacto dos fluxos nos

dinamômetros. O suporte de aço tem espessura 10 mm e em base com mesma espessura e comprimento de 40 cm para distribuir no fundo do canal que também foi enrijecido com perfis soldados a cada 12 cm garantindo que deformações do conjunto fossem mínimas ou nulas para os níveis de tensões e não afetassem as leituras. A Figura 3.7. apresenta a execução do enrijecimento do canal e o suporte já soldado no canal.



Figura 3.7. Enrijecimento do fundo do canal e o suporte confeccionado em aço

3.3 TUBO DE GEOTÊXTIL E PREENCHIMENTO

As barreiras de tubos de geotêxtil foram executadas nas condições isolada e em pilhas, as mesmas, foram encomendadas e patrocinadas pela fabricante HUESKER, que forneceu para a pesquisa tubos de geotêxteis tecidos adequados para as características de filtração (retenção) do rejeito de mineração obtido para esta pesquisa. Outras características do geotêxtil podem ser verificadas no Apêndice.

Com os tubos fornecidos é possível testar tubos isolados ou pilhas nas condições 2:1 e até 3:2:1 com comprimentos e com diâmetro teórico esperado para que quando cheio, possam alcançar as alturas de projeto (H_T). As extremidades ficaram conformadas nas paredes após o preenchimento, de maneira a formar a barreira que contenha o fluxo de detritos.

Os tubos de geotêxtil, foram preenchidos com o rejeito de mineração manualmente com ajuda de funil, e após instalados no canal. A tabela 2 apresenta as características dos tubos geotêxteis.

Tabela 2. Corpos de prova de Tubos de geotêxtil

Designação	Quantidade	Diâmetro (cm)	Raio (cm)	Perímetro (cm)	Massa (kg)
Tubo 1	6	11,46	5,73	36,00	0,44
Tubo 2	3	17,19	8,59	54,00	0,55
Tubo 3	3	23,56	11,78	74,00	0,72

O material de enchimento para as barreiras pode ser o mais próximo disponível e a partir das suas características encomendado o geotêxtil dos tubos. Para essa pesquisa foi escolhido o rejeito de mineração, principal produto de acumulação de mineradoras e disponibilidade próxima à possível estrutura com esta finalidade. O material obtido para esta pesquisa é constituído de rejeito de mineração de ouro, a localização de origem é na região sudeste do estado do Tocantins e o armazenado local era em pilhas sem resíduos contaminantes ou outros metais pesados, ou causadores de drenagem acida onde estas características foram determinadas por laboratórios da empresa, de tal maneira que a barragem de rejeitos local não tem revestimento e é autorizada pela agência nacional de mineração - ANM. Ao todo foi coletado a capacidade máxima de transporte, aproximadamente 800 kg. A Figura 3.8 apresenta a coleta do rejeito em pilhas depositadas e o transporte confinado em lona plástica.



Figura 3.8. Coleta do rejeito em pilhas depositadas e transporte confinado em lona plástica.

3.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO

O rejeito de mineração de ouro foi caracterizado no Laboratório de Geotecnia do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Tocantins – IFTO, Campus Palmas. O laboratório de Geotecnia é compartilhado com o Tribunal de Contas do Estado do Tocantins - TCE-TO por meio de termo de cooperação, espaço físico e equipamentos são usados em comum pelas duas

instituições com o benefício de dividir despesas públicas com contingente de pessoal e manutenção, ampliar a diversidade de equipamentos novos e principalmente a perfeita calibração destes, devido as constantes auditorias.

Foram realizados ensaios para determinação do teor de umidade, granulometria e máximo peso específico. O resumo dos resultados do teor de umidade e granulometria estão apresentados na Tabela 3 e Figura 3.9 que apresenta curva granulométrica do rejeito.

Tabela 3. Resumo de resultados dos ensaios teor de umidade e granulometria do rejeito

Amostra Total Seca		Umidade Higroscópica		Resumo Granulometria (%)	
Amostra total úmida (g)	1.000,75	Cápsula Nº	1	Pedregulho (>4,8mm)	1,76
Retido nº 10 (g)	139,60	Peso Cápsula Nº (g)	159,0	Areia Grossa 4,8 - 2,0mm	12,20
Passando Nº 10 úmida (g)	867,15	Cápsula e Solo Úmido (g)	1649,90	Areia Média 2,0 - 0,42mm	42,81
Água (g)	6,75	Solo Seco (g)	1479,3	Areia Fina 0,42 - 0,074mm	43,10
Passando Nº 10 seca (g)	860,40	Água (g)	11,6	Silte+Argila(<0,074mm)	0,13
Amostra Total Seca (g)	1.000,00	Umidade higroscópica(%)	0,78	Total	100,00
		Fator de Correção	0,9922		

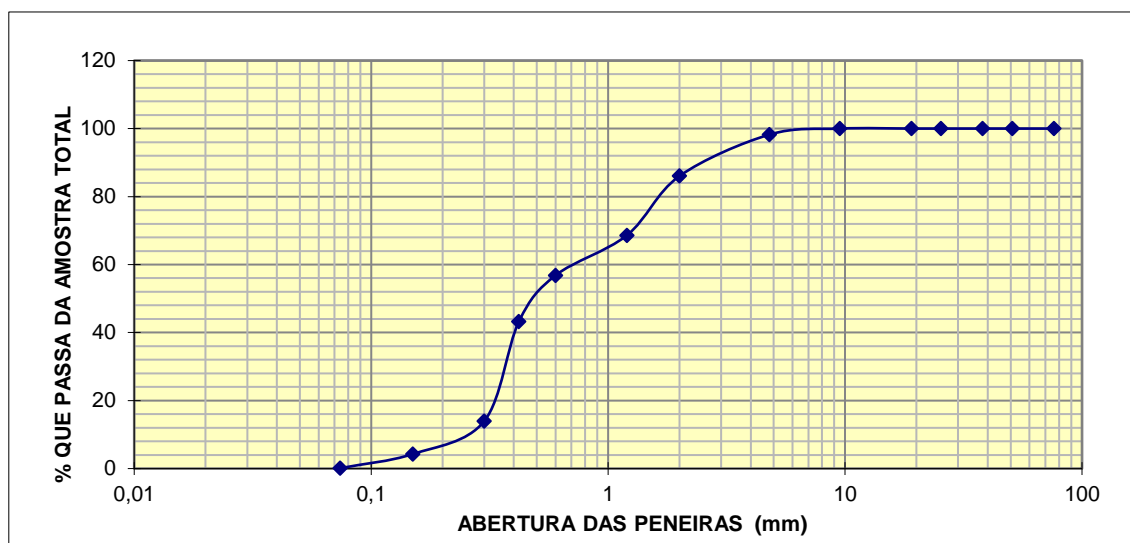


Figura 3.9. Curva granulométrica do rejeito de mineração

Para a determinação da densidade real dos grãos, foi utilizado o Rice Test que é um equipamento moderno adquirido pelo TCE-TO, moderno e com menor predisposição a erros de ensaios. O mesmo, é realizado com uma panela com fechamento hermético e bomba de vácuo acoplada. A panela fica apoiada sobre base vibratória para expulsar todo ar preso nas partículas do solo seco na estufa a 100°C por 24 horas, e posteriormente acrescido água destilada e como os pesos das massas da panela vazia, panela e solo seco, panela + solo seco + água destilada e por último peso da panela + água destilada com controle de temperatura

ambiente a 25°C. Os procedimentos detalhados de realização do ensaio estão em um manual no apêndice. O resultado de 3 ensaios diferentes, que os resultados não diferiam menos que 0,009g, correspondeu à densidade real dos grãos (Gs) do rejeito de mineração de ouro que foi igual a 2,67 g/cm³. A Figura 3.10 mostra o equipamento Rice Test durante o ensaio.



Figura 3.10. Determinação da densidade real dos grãos

3.4 PROGRAMA DE EXPERIMENTOS

O programa de experimentos constitui um conjunto de processos para obtenção de dados de resultante de forças, e cálculo da tensão gerada pelo impacto do fluxo, velocidade do fluxo e massas do material constituinte do fluxo e da estrutura, e, a avaliação do impacto nas barreiras de tubo de geotêxtil, modos de falha, deslocamentos e deformações.

A força gerada pelo fluxo é coletada com dois dinamômetros de capacidade 2.941,99 N (300 kgf) cada, que podem ser fixados em três alturas no suporte de aço rígido e em relação ao fundo do canal: 1 cm, 5 cm e 15 cm. Os dinamômetros estão ligados a um Arduino® com programação para coleta de dados simultânea e a intervalos suficientes (40 / segundo) e visor imediato de dados da carga por célula. Os dados são transmitidos para laptop via cabo conectado via porta USB, onde o aplicativo foi programado para registrar os dados de cargas das células A e B simultaneamente ao horário em uma planilha.

O impacto na estrutura é monitorado por câmeras, com as filmagens podem ser verificadas as características e padrão de comportamento observado durante o impacto, e

também, analisado possíveis falhas da estrutura. Os deslocamentos foram medidos entre marcações de pontos de leitura na face da barreira e marcos no canal utilizando de trena laser de precisão 0,1 mm, fixada em suporte com corredeira esquadrejada.

A determinação da velocidade do fluxo foi obtida pela relação do deslocamento espacial em função do tempo, com utilização de equipamentos de filmagem, cronômetros, marcos de distâncias e de registro de percurso.

A quantidade de variáveis sugere uma grande quantidade de experimentos com coleta e análise de dados. Para ensaios iniciais, foi estimado o processo com a relação entre a pressão de impacto PI, obtida pela equação que de Kang e King (2015) de pressão de impacto média (Pt), e nos parâmetros das barreiras: deslocamento e o peso próprio. A partir destes nos ensaios iniciais para calibração, foi verificado que as variáveis pressão, velocidade, vazão massa específica, estão correlacionadas.

A variável velocidade era influenciada em função da agilidade do despejo e até mesmo se houver variação de volume e da massa do material constituinte do fluxo. Ainda nestes ensaios preliminares, a pressão variava em função da velocidade, do volume e da massa do material, tornando o processo quase impossível de ser realizado pela grande quantidade de variáveis representativas. Para tornar viável, normalizar os ensaios e reduzir erros, foi ajustado o fluxo realizado com água limpa e a massa e volume constantes, e tentativa de manutenção mínima de variação da velocidade (entre 2 e 4 m/s).

As barreiras com tubos de geotêxtil têm as variáveis deslocamentos e deformações, estas variáveis se relacionam com as constantes: massa do tubo; área de contato da base; largura e altura. Cada barramento foi ensaiado até cumprir número suficiente de experimentos para estabelecer relação entre diferentes valores de impacto e deslocamentos proporcionais, sem nenhuma eventualidade ou perda de dados, em face da grande variação da velocidade, da pressão e deslocamentos da barreira. Cada experimento corresponde a um ciclo que necessita de preparação, ensaio, coleta de dados, recuperação do corpo de prova, limpeza do canal e por último, análise dos dados com cuidados para que não houvesse perdas de dados ou que estes fossem espúrios e, ainda, que não forneceram nenhuma resposta apropriada ou invalidada.

3.5 BARREIRAS DE TUBO DE GEOTÊXTIL E FATOR DE FORMA

O tubo de geotêxtil foi confeccionado com o seu comprimento maior que a largura do canal hidráulico para que o preenchimento com o rejeito de mineração fosse quase total e ajustasse as faces de extremidade das barreiras acomodando e preenchendo transversalmente o canal, ao máximo possível.

Os tubos são pesados antes e após o preenchimento. Após preenchidos, os tubos tiveram suas dimensões aferidas para os parâmetros de engenharia e comparados com as relações aproximadas determinadas por Lawson (2008). As relações e valores de referência e diferenças podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4 Comparação das relações aproximadas entre parâmetros fundamentais e de engenharia de tubos de geotêxtil conforme Lawson (2008)

Relações		Diâmetros do Tubo de geotêxtil (cm)								
Parâmetro de engenharia	Diâmetro teórico, D_T	11,46			17,19			23,56		
		obtido	valor de referência	Dif.	obtido	valor de referência	Dif.	obtido	valor de referência	Dif.
Altura máxima de enchimento, H_T	$H_T \approx 0,55 D_T$	10,50	6,30	40%	15,20	9,45	38%	18,60	12,96	30%
Largura preenchida W_T	$W_T \approx 1,5 D_T$	13,00	17,19	-32%	19,80	25,79	-30%	28,70	35,34	-23%
Largura do contato de base b_T	$b_T \approx D_T$	8,00	11,46	-43%	12,00	17,19	-43%	17,50	23,56	-35%
Área de seção transversal A_T	$A_T \approx 0,6 D_T^2$	107,20	78,80	26%	236,37	177,30	25%	419,25	333,04	21%

A forma da seção transversal dos tubos de geotêxtil, ficaram menos elípticos, entre tubos oblongos e cilíndricos. Foi verificado que quanto menores são os tubos mais cilíndrico ficam. Este fator, pode ocorrer pela dimensão dos grãos do material de preenchimento e atrito, pela forma de enchimento (inclinado, submerso etc.) e a o geotêxtil pode ter rigidez suficiente para não deformar do formato cilíndrico para o elíptico que é padrão. Estes fatores de forma podem ocorrer em tubos em escala real pelos mesmos motivos e foram registrados por Liu (1981), Kazimierowicz (1994), Leschinsky et al. (1996), Plaut e Suherman (1998), Palmerton (2002), onde os autores relatam que o preenchimento contido é assumido como um líquido sem resistência interna ao cisalhamento e o procedimento de preenchimento pode ser modelado junto com a forma de preenchimento resultante. Uma variação real e determinada do fator de

forma em função do material de preenchimento pode ser observado na Figura 3.13 com as alturas possíveis do tubo em relação ao preenchimento.

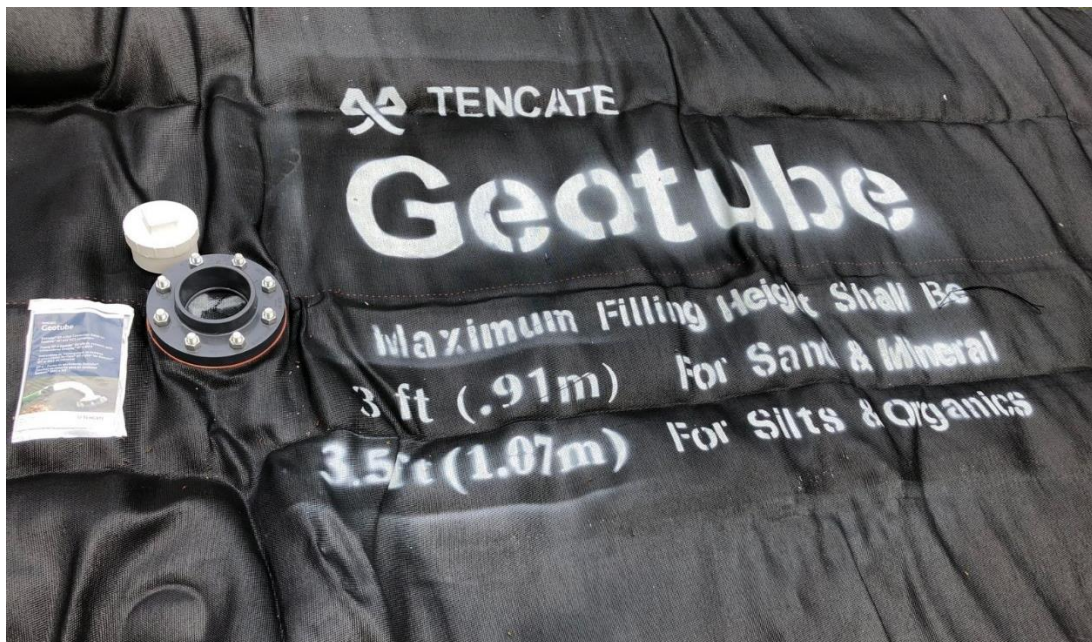


Figura 3.11. Tubo Geotêxtil com variação da altura em função do material de preenchimento

Entre as comparações das relações aproximadas Lawson (2008), em tubos isolados, a área de contato da base é equivalente à altura, mas a largura de preenchimento (L_p) pode chegar até três vezes a altura. Nos modelos experimentados, a largura preenchida é reduzida para aproximadamente duas vezes a altura, com o formato oblongo.

A pesquisa foi delimitada com 3 tipos de barreiras com as denominações BTG 1, BTG 2 e BTG 3. O BTG 1 é uma barreira simples constituída por apenas 01 tubo de geotêxtil constituída pelo tubo de 27,56 cm de diâmetro (o maior disponível), por ser o de característica mais próxima das relações de Lawson (2008), ser mais achatado e com maior massa. A BTG 2 é a barreira constituída por uma pilha de tubos de geotêxtil na configuração 3:2:1 usando os tubos de 11,46 cm. A escolha é pelo maior número de segmentações e o comportamento desta composição piramidal. Já a BTG 3 também é uma barreira simples utilizando os tubos de 17,19 cm, com propósito de avaliar a variação do fator forma e de deslocamentos com menor massa.

O BTG1 foi pesado antes obtendo 68,48 kg e após ensaio, houve acréscimo de massa com retenção de parte da água utilizada para promover o impacto resultando em 72,50 kg, que foi o valor da massa da barreira considerada nos cálculos. A barreira era colocada aproximadamente 60 cm a partir da parede de extremidade do canal e as barreiras eram retiradas

e colocadas manualmente e com uso de guindaste. As peças estão livres de qualquer fixação e com redução do atrito, para tanto, em todo ensaio antes do posicionamento da barreira era aplicada sobre a base de porcelanato polido, vaselina líquida e um novo filme de PVC. A Figura 3.12 apresenta colocação e retirada do tubo no canal e aplicação de vaselina e o filme de PVC sobre o porcelanato polido.



Figura 3.12 Colocação / retirada do tubo do canal e aplicação de vaselina e do filme de PVC

A determinação do coeficiente de atrito estático máximo - μ_e , foi obtido pelo ângulo da superfície de contato era inclinada até o momento em que o tubo de geotêxtil deixava o estado estático e começa a movimentar sobre um porcelanato polido igual ao instalado no fundo do canal hidráulico e com aplicação da vaselina e do mesmo filme de PVC. Também foram obtidos a massa do tubo de geotêxtil preenchido e a área de contato da base. O valor do atrito foi dividido pela tensão aplicada onde foi determinado o valor do $\mu_e = 0,0003708$ que deve ser multiplicado pela área de contado da base e da ombreira em cada barramento experimentado. A Figura 3.13, apresenta o procedimento executado para obter o valor do atrito estático máximo para o contato barreira/filme PVC + vaselina sobre o porcelanato polido.



Figura 3.13. Obtenção do valor do coeficiente de atrito estático máximo pelo ângulo

3.6 FATOR DE ESCALA DAS BARREIRAS DE TUBO GEOTÊXTIL

O modelo físico reduzido, em termos de fator de escala atende os principais quesitos, no entanto, quando se trabalha com forma cilíndrica, a dimensão básica do diâmetro é a medida mais prática e de visualização e medição direta. No entanto, por se apenas uma dimensão de estruturas circulares, a área, o volume e por consequência a massa, podem ter ampliações desproporcionais em termos de escala. Enquanto os parâmetros de engenharia, ficam com valores razoáveis, a escala da área do tubo oblongo é ampliada para valores muito altos e deve ser ajustado. A utilização da escala em função da área, faz com que os outros parâmetros tenham escalas com valores altos, mas a inviabilidade da escala em função da área é ainda sofre grande variação de acordo com qualquer pequena diferença no fator de forma do tubo. A partir destas verificações, foi determinado o diâmetro como o elemento básico para uma relação entre protótipo e modelo.

Os tubos de geotêxtil podem ter até 30 m de diâmetro. O protótipo, foi definido pelo tubo geotêxtil projetado para obra de contenção, com acréscimo de cargas no aterro, em Barra de São Miguel-AL, com altura máxima de enchimento de 91 cm (preenchimento com material granular), o que pode determinar o diâmetro de 166 cm (Figura 3.11). A Tabela 5. Apresenta as relações de escalas dos tubos de geotêxtil preenchidos em relação ao protótipo.

Tabela 5 Relações adotadas entre os modelos e o protótipo

Protótipo		Modelos		
Escala	1 : 1	TG3	TG2	TG1
Parâmetro		1 : 154	1 : 70	1 : 40
ϕ (cm)	166,00	11,46	17,19	23,56
H _T (cm)	91,30	10,50	15,20	18,60
W _T (cm)	249,00	13,00	19,80	28,70
b _T (cm)	166,00	8,00	12,00	17,50
A _T (cm ²)	16.533,60	107,20	236,37	419,25

A similaridade do modelo da BTG1, pode ser considerada análoga ao protótipo. Os o comprimento unitário, massa, geotêxtil são em escala real, apenas os parâmetros da seção transversal são reduzidos. O fluxo também tem características próximas as reais, apenas a densidade e vazão (por conta da profundidade) são reduzidas. Em resumo, os modelos reduzidos ficaram proporcionais a escala reduzida no que diz respeito aos fenômenos. A altura final do modelo, é o elemento que aumenta consideravelmente a escala da profundidade do fluxo e em dez vezes a vazão. A tabela 6 apresenta as características e as escalas do modelo.

Tabela 6. Parâmetros da barreira e fluxo e escalas do modelo

Parâmetros da barreira BTG1	Condição verificada do fator de escala	Proporção
Fator de forma	Análogo em função do diâmetro	Escala 1:40
Massa da barreira	Proporcional ao volume e densidade do enchimento	Escala 1:1
Atrito	Proporcional a massa x área de contato	Escala 1:1
Rigidez da barreira	Análogo para o nível de tempo de resposta	Escala 1:1
Resistência a tração da pele	Análogo em deformações pelo tempo de resposta (movimento de corpo livre)	Escala 1:2
Característica do fluxo	Condição verificada do fator de escala	Proporção
Velocidade	Proporcional	Escala 1:1
Profundidade	Reduzida em função da altura do modelo da barreira	1:17
Vazão do fluxo	Proporcional em função da velocidade da profundidade	1:160
Densidade	Reduzida (água)	1:2
Pressão de impacto	Proporcional área de impacto, valores similares a calibração e verificados em evento real	Escala 1:1

O comprimento do modelo é unitário (1 m) e linear, no entanto, o protótipo pode ter uma pequena curvatura dentro do limite de deformação do tubo geotêxtil.

Em relação a resistência a tração do tecido de propileno da pele, foi utilizado o de 100 kN/m nas duas principais direções e a maior disponibilidade hoje do mesmo fabricante é de 200 kN/m, ocorre que se há maior rigidez da pele, pode responder mais rápido as solicitações de tensões, porém, são verificadas que as deformações ocorrem em menor proporção, principalmente pelo movimento de corpo rígido da estrutura (mesmo que flexível) com alto grau de liberdade e lubrificação de contatos para reduzir o atrito a valores pouco significativos para gerar deformações. A rigidez da pele ainda é um dos fatores menos influentes para as deformações, pois o material de preenchimento confinado tem resistência ao cisalhamento e fornece maior rigidez a deformação que a pele.

À influência na rigidez do sistema pode ser deixada para outras análises posteriores, visto que em escala de grandeza para este experimento mesmo existindo deformações longitudinais pequenas que foram verificadas tanto nos experimentos quanto em carregamento estático lento, é reiterada a observação de Oshiro e Alves (2004), que descreve que os efeitos da taxa de deformação não são propensos a escalonamento e é um grande obstáculo para o uso de estruturas escalonadas sob carga de impacto. Farias (2014), relata que o movimento de corpo rígido ocorre mesmo em corpos deformáveis se estes não tiverem nenhum tipo de restrição (movimento de corpo livre), onde as deformações foram limitadas ao tempo de aplicação do impacto e, portanto, desconsideradas.

A simplificação necessária, e mais coerente neste experimento, é a comparação direta da colisão, resumida em um pico de pressão de impacto do fluxo de detritos e das forças reativas ou estabilizantes, sendo a força normal (massa) da barreira de tubos de geotêxtil preenchida e a resposta inercial desta e o consumo de energia cinética em energia interna e possível deformação. Desta forma é possível ser determinado um fator de segurança. Cabe salientar que pelo conjunto massa e rigidez do alvo (rigidez em função do tempo de aplicação da pressão), neste caso o barramento, pode haver a dispersão da energia cinética com pouco ou nenhuma deformação, deixando os esforços somente para o fluxo de detritos (projétil).

3.7 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO

3.7.1 VELOCIDADE, VOLUME E MASSA

Com os dados dimensionais do canal, foi aplicado o modelo de Kang e Kim (2015), para prever velocidade, vazão e pressões e assim organizar os instrumentos para padrões próximos. Os experimentos preliminares mostraram que somente o volume e massa sem grande velocidade (< 2 m/s), não são suficientes para causar impactos que geram deslocamentos, ruptura ou alguma deformação relevante no barramento, além de fornecerem baixos valores para a pressão de impacto e com pouca captação pelos dinamômetros. Altas velocidades, mas com baixa profundidade (inferior à metade das barreiras) não forneceram resultados relevantes em termos de deslocamentos. É perceptível que para que se obtenha valores de pressão de impacto relevantes com deslocamentos e até a falha das barreiras, é fundamental principalmente valores mínimos de velocidade, vazão e a massa do fluxo.

A vazão mínima depende de um volume que tivesse a profundidade mínima de 5cm com velocidades acima de 2 m/s. A determinação da velocidade foi obtida com registros do espaço delimitado de 1 m percorrido do fluxo, registrado com equipamentos de alta resolução e em câmera lenta, e para o tempo, um cronômetro com precisão de milésimos de segundos (0,001 s), também registrado na filmagem em câmera lenta com os tempos de início e o fim de percurso do fluxo. Importante destacar que o pico de impacto dura entre 0,2 s e 0,5 s e se fosse considerado somente a segunda casa decimal a velocidade poderia variar até 1 m / s. A Figura 3.15 apresenta o percurso do fluxo, marcos e cronometro.

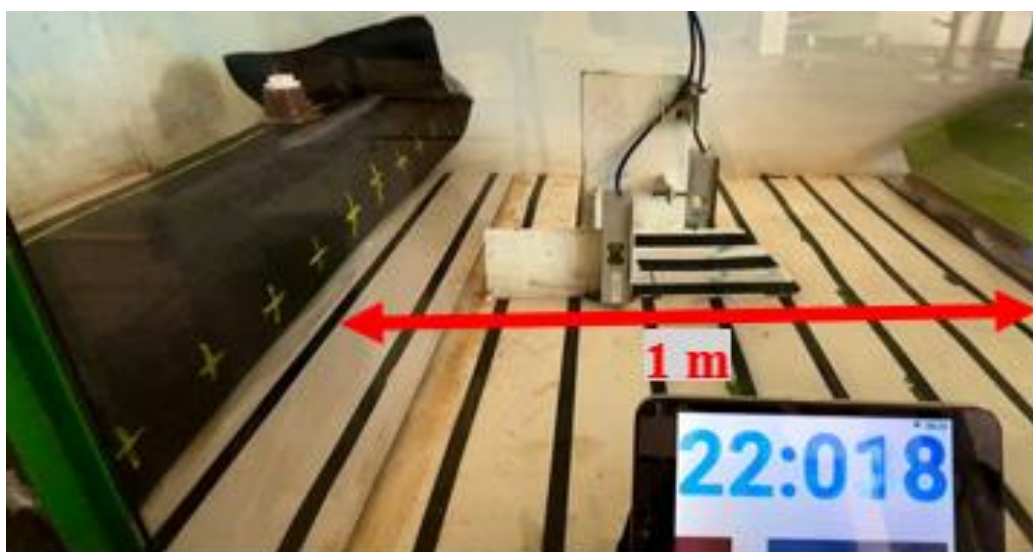


Figura 3.14 Percurso do fluxo, marcos e cronometro

3.7.2 INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE PRESSÃO DE IMPACTO

Medir a tensão gerada por um impacto pode ser desafiador devido à natureza dinâmica e rápida do evento. A escolha da melhor forma depende do contexto específico, algumas das técnicas mais comuns e eficazes que foram pesquisadas são apresentadas abaixo:

- I. Strain gauges (Extensômetros), são dispositivos que medem a deformação (strain) de um material. Quando um impacto ocorre, o material onde os strain gauges estão fixados deforma-se, alterando a resistência elétrica dos gauges, e pode ser correlacionado com a força.
- II. Acelerômetros medem a aceleração de um objeto durante um impacto. A partir da aceleração, é possível calcular a força do impacto e, usando as propriedades do material, determinar a tensão gerada.
- III. Transdutores de Força (Células de Carga) podem ser usadas para medir diretamente a força aplicada em um impacto. Combinadas com o conhecimento da área de contato e as propriedades do material, podem ser usadas para calcular a tensão.
- IV. Sensor Piezoelétrico geram uma carga elétrica proporcional à força aplicada sobre eles. São excelentes para medir eventos dinâmicos como impactos.
- V. Análise de Imagem de Alta Velocidade onde câmeras de alta velocidade podem capturar a deformação de um objeto durante um impacto. A análise subsequente das imagens pode ser usada para calcular a tensão e a deformação.
- VI. Técnicas Híbridas como combinações de diferentes métodos, como usar strain gauges e acelerômetros juntos, podem proporcionar uma visão mais completa e precisa da tensão gerada por um impacto e podem também existir relações entre dinamômetros e strain gauges.

Em muitos dinamômetros modernos, strain gauges são integrados para medir as deformações causadas pela aplicação de uma força. O funcionamento ocorre com a aplicação da força ao dinamômetro, ela causa uma deformação em uma parte do dinamômetro (geralmente uma célula de carga). Essa deformação é medida por strain gauges, fixados na célula, nas partes previstas para ocorrer essa deformação. A deformação medida é convertida eletronicamente em uma leitura de força, usando a calibração e as propriedades do material da célula de carga. Após os estudos da melhor técnica e materiais disponíveis no mercado e a forma de fixação e mobilidade dos experimentos, foi definido que os dinamômetros e strain gauges foram a melhor opção, para avaliação da pressão de impacto no fluxo.

3.7.3 PRESSÃO DE IMPACTO

A massa de um fluido em fluxo turbulento não segue padrão, pela própria variação de direções e do material constituinte no momento do impacto, e de outras variações, como o volume e a velocidade, os quais são a melhor opção de controle. Para normalizar os primeiros experimentos e determinar os padrões de pressão de impacto versus deslocamento das barreiras, optou-se por realizar os experimentos apenas com água limpa e posteriormente misturar também proporções de argila para obter polpa e densidade, visto que apenas o rejeito de mineração de ouro com água não obtinha uma boa adesão e fluotabilidade e nem chegava a uma mistura homogênea, e apenas as partículas menores chegavam até o barramento em grandes velocidades. A pressão gerada na face de impacto por fluxo turbulento (fluido newtoniano ou não), têm várias direções, no entanto, o dinamômetro realiza a coleta de uma resultante teórica do conjunto de forças que o impactam por alguns segundos, o que determina uma estimativa próxima da pressão de impacto na estrutura.

A determinação amostral da possível pressão de impacto (resultante das forças), gerada pelo fluxo coletada pelos dinamômetros, tinham inicialmente a taxa de leitura de 6 leituras por segundo, foi ampliado de até dobrar esse valor, mas ainda se perdia o pico do carregamento, visto que as células pegam uma média dos valores por um determinado período. Para leituras em alta frequência, foram necessários ajustes na estrutura física do equipamento para melhorar a corrente e conseqüentemente a frequência de leitura instantânea com o registro de 40 leituras por segundo, por dinamômetro.

No processo de calibração do dinamômetro, havia perdas verificadas na célula B, ocasionadas por baixa corrente, tendo sido necessário o acréscimo de uma fonte de energia extra, além da fornecida pelo laptop. Após esta inclusão foi verificado que a célula A aumentava a carga entre 1,5 e 3,5 kgf caso o laptop também estivesse conectado a fonte de energia. Os dados finalmente ficaram fiéis, quando realizados com o laptop sem o processo de carregamento e os dinamômetros ligados à sua fonte exclusiva de energia. Escudos em chapa de inox somente do tamanho da célula, já haviam sido previstos e fabricados para proteger o sensor piezorresistivo (*strain gauge*) e a calibração era realizada com estes instalados.

A temperatura influencia nos valores obtidos pelas células de carga. É de conhecimento laboratorial que devem ser ligadas as balanças de alta precisão pelo menos 20 minutos antes de seu uso, não seria o caso para estas células industriais de alta capacidade, no entanto, o impacto

com água resfriava as células em aproximadamente 4 °C, reduzindo o valor das cargas para outro ensaio similar no mesmo dia em até 30%. Mesmo com processos de secar e soprar as células, o alumínio mantém a temperatura fria onde a maleabilidade do metal e sua deformação pode ser reduzida, a solução encontrada foi realizar um ensaio por dia, secar imediatamente e manter uma temperatura estável da célula até o próximo experimento.

Os dados de pressão de impacto eram coletados pelo dinamômetro que ligado ao Arduino transmitia as cargas para o laptop, onde o software Parallax, realizava o registro de tempo e cargas das células em uma planilha. A figura 3.16 apresenta o processo com componentes envolvidos: I) dinamômetros recebem o impacto, II) Arduino coleta e transmite os dados, III) o laptop recebe as informações e IV) o software registra em planilha.

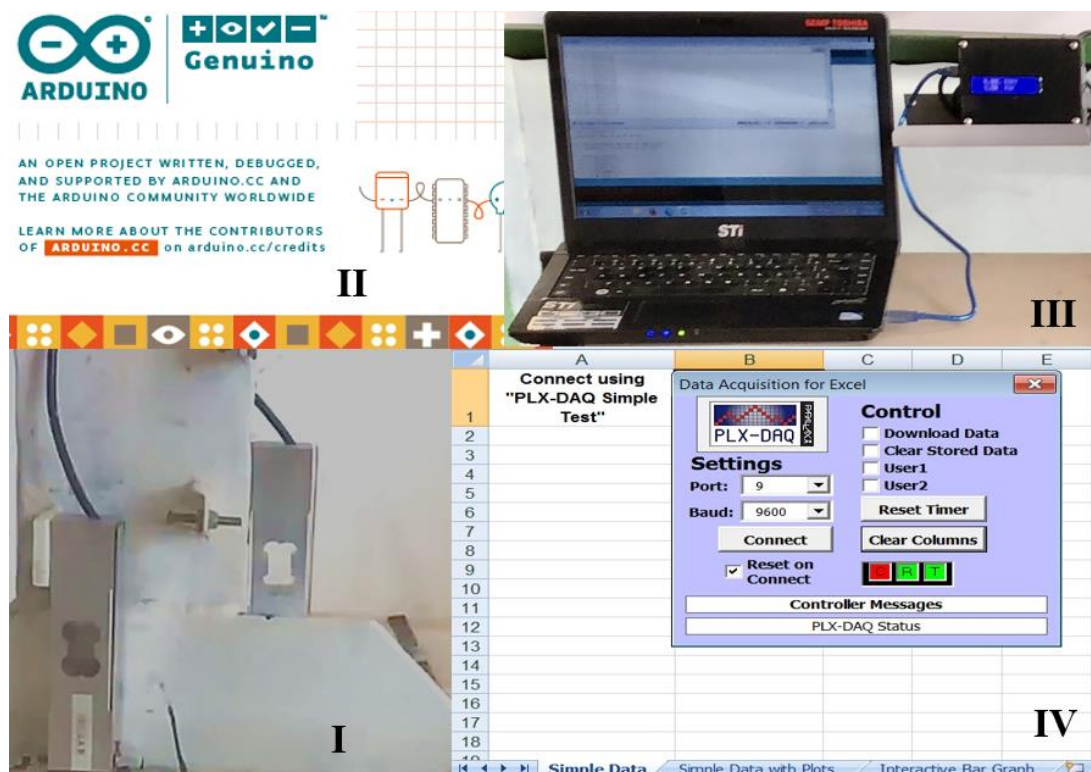


Figura 3.15 dinamômetros recebem o impacto (I), Arduino coleta e transmite os dados (II), o laptop recebe as informações (III) e o software registra em planilha (IV).

A altura e posição das células podem causar pequena variação nos resultados. Foi notado que quanto mais baixa maior a carga (maior concentração do fluido quanto mais próximo a superfície). A distância também poderia gerar atraso capaz de visualizar no gráfico a atuação do nível da onda e assim indicar com duas amostras bem definidas o pico de pressão, e, para tanto, optou-se por atrasar uma célula e aproximar do fundo do canal.

Os resultados das cargas eram plotados em um gráfico cargas (célula A e B) x tempo em que era possível observar os registros da variação de carga com o tempo, consoante as ondas de impacto. É possível observar também que toda pressão gerada pela onda de impacto dura menos de 2 segundos e após essa, a barreira mantém o espaço inundado e uma carga de inundação próximo de zero.

A partir do gráfico é retirado o valor do pico de carga das ondas de impacto. Este carregamento máximo da pressão de impacto ocorre no período máximo de dois segundos e os valores também podem ser comparados com velocidade, vazão e os deslocamentos onde podem ser extraídas relações relevantes. A carga de máxima (pico) registrada pelo aplicativo foi colocada em planilha para realização de conversão da resultante de forças para a unidade de pressão (kPa). A Figura 3.17 apresenta um gráfico de experimento realizado das cargas registradas nas células A e B em função de tempo.

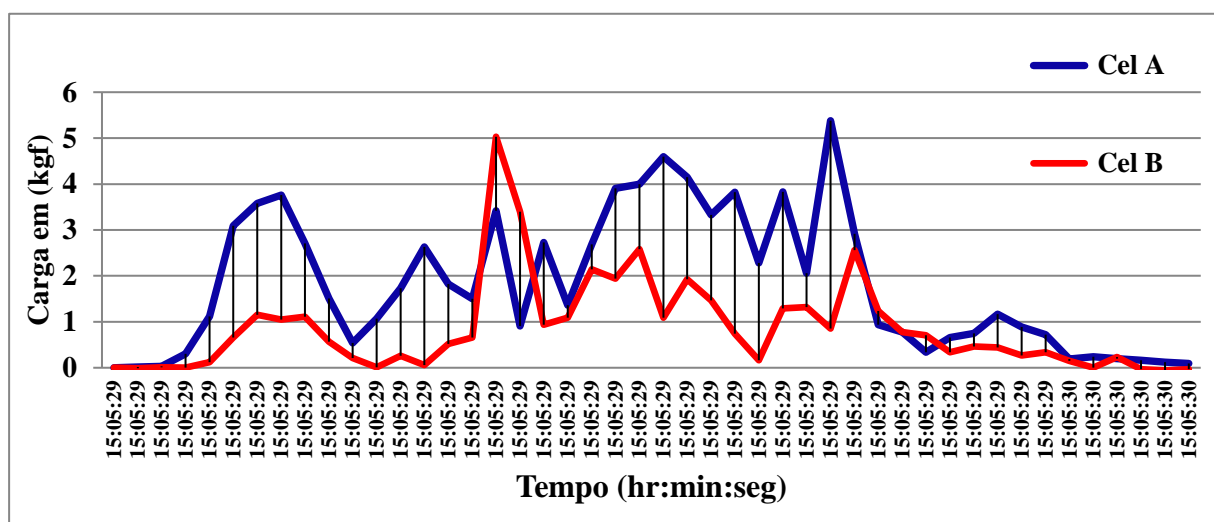


Figura 3.16 Gráfico de cargas das células A e B em função de tempo

Para definir o valor único da pressão de impacto é realizada o cálculo da média das duas amostras das células fixadas em alturas diferentes. A que fica colocada na posição mais inferior acaba pegando as maiores concentrações e picos de carregamentos. Somente com as otimizações do equipamento e com o ajuste no cálculo da tensão (dividindo a força resultante pela área de carregamento dos escudos) e a verificação da altura do fluxo em imagens e marcos para determinar a vazão, foi possível chegar aos valores estimados apropriados.

Com o valor unitário da tensão (kPa) multiplicado pela área de impacto pode ser estimada a pressão de impacto na estrutura. O impacto na estrutura é monitorado por duas câmeras filmadoras com taxa mínima de 30 fps (fotos por segundo). Já para registro da

velocidade, foi utilizado câmera de filmagem de aparelho telefônico celular, com filmagem em câmera lenta, com registro em 1080 pixels HD, 120 fps e em alguns testes 240 fps. Com as filmagens foi possível verificar as características e forma de como é o comportamento durante o impacto, com o apoio de marcações e verificação e medição de imagens. A Figura 3.18 apresenta o processo de realização do ensaio do início do fluxo, registro da velocidade e impacto na barreira.



Figura 3.17. Realização do ensaio com percurso do fluxo turbulento e da onda de impacto.

Os deslocamentos posteriores ao impacto foram medidos a partir de marcos no canal com trena laser e marcações de pontos de leitura. A distância deslocada (D_d) é medida a partir de marcos no canal até a face frontal das barreiras e em razão da largura da base (L_b), é relacionada em percentual para determinação do deslocamento (u). A medição foi realizada com trena laser (precisão 0,01 mm), fixada em suporte apoiado sobre corrediça telescópica com marcações de pontos de leitura a cada 10 cm. O processo descrito é apresentado na Figura 3.19.



Figura 3.18. Obtenção das medidas de deslocamento das barreiras

CAPÍTULO 4

Apresentação e Análise dos Resultados

4. RESULTADOS DE EXPERIMENTOS COM BARREIRAS

Nesse capítulo são apresentados os resultados do programa experimental relacionados ao comportamento das barreiras ao impacto de fluxo. As análises iniciam pela compilação dos dados e comparação por correlação entre duas variáveis. Também é analisado o comportamento das barreiras e do fluxo e suas variáveis e como influenciam na pressão de impacto. Complementam os experimentos os incrementos de atrito e de densidade do fluxo. Por fim, os experimentos e análise fundamentam critérios de design e requisitos específicos para viabilidade da estrutura.

4.1 ANÁLISE DE EXPERIMENTOS

Uma estrutura pode ser avaliada quanto a possibilidade de ocorrer diversos modos de falha, como deslocamentos e deformações excessivas, tombamento, erosão, transbordamento, falha na fundação, ruptura nas ombreiras e estabilidade global. Vários modos de falha podem ser eliminados neste tipo de barramento, devido a estrutura ser semirrígida (ou flexível), o que garante estabilidade mínima mesmo em condições adversas. Nos primeiros experimentos, a comparação direta da força normal gerada no impacto do fluxo de detritos e a resposta inercial da força peso da estrutura do tubo geotêxtil, somente estavam ocorrendo os extremos: permanência da mesma estática com deslocamentos inexpressivos e sem deformações ou a ruptura da estrutura por excesso de deslocamento.

Para esta pesquisa de laboratório o único critério que foi possível estabelecer como modo de falha é o deslocamento. Não houve determinação de outro modo correspondente a ruptura da estrutura que a impedisse de cumprir seu objetivo. O único que foi eliminado por não ser possível verificar no experimento é a estabilidade global da estrutura e recalque excessivo de fundações. Para os problemas com fundações o maciço estrutural flexível pode acomodar em caso de recalques ou solapamentos e ancoragem adequada nas ombreiras garante

o arqueamento de tensões. Análises de estabilidade global podem ser solucionadas em campo conforme as utilizadas em estruturas de contenção ou barramentos.

4.1.1 - RESULTADOS DE EXPERIMENTOS - BTG 1

A BTG 1 é composta por um único tubo de geotêxtil isolado de 27 cm, suas dimensões foram aferidas e comparadas com as relações aproximadas de parâmetros fundamentais de engenharia determinadas por Lawson (2008), a forma mais próxima.

Os dados dos experimentos e das características das barreiras foram colocados em uma planilha onde foram realizados cálculos para determinar velocidade e vazão. Além destes eram inseridos dados da altura do fluxo, picos de pressões das células e estimativa de pressão de impacto e o deslocamento da barreira. A partir dos dados obtidos, foi possível construir gráficos das correlações e realizar análises. As planilhas referentes aos experimentos da BTG1 e demais experimentos podem ser verificadas no apêndice.

A primeira informação buscada nos experimentos, era a proporção de massa da barreira que deve ser necessária para a contenção do fluxo com menor deslocamento e deformação. As deformações foram praticamente nulas no BTG1 e nas demais barreiras. Assim uma análise geral dos principais motivos será apresentada em outra seção.

Os deslocamentos registrados foram correlacionados com a relação da massa da barreira (constante) e a energia de impacto (variável) e transformados em um gráfico com a linha de tendência potencial (por se tratar de energia), para validação da correlação e equação correspondente para as variáveis de controle (W/P) e dependentes (u). A Figura 4.1 apresenta o gráfico estabelecido destas correlações onde a qualidade da relação é representada pelo R^2 que apresentou um valor superior a 0,9, considerado excelente para correlações de energias. A linha de tendência de regressão potencial ajuda a entender quando a barreira deixa o estado de repouso e começa a se mover e perde a atuação das forças inerciais e atrito estático. O fim da linha antes da curvatura máxima pode ser estabelecido o equilíbrio limite.

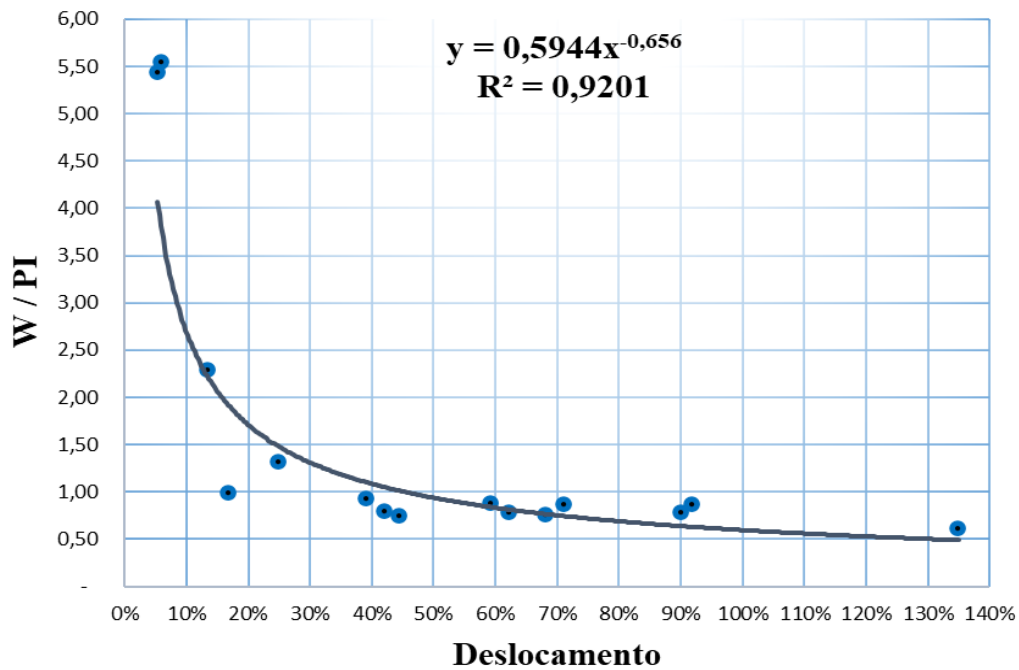


Figura 4.1. Regressão das relações Peso (W), Pressão de Impacto (PI) e Deslocamento (u)

Com o acréscimo dos parâmetros de coeficiente de atrito em função do contato da base multiplicado pela massa da barreira, foi possível construir a relação entre o Fator de Segurança e o deslocamento conforme previsto na Equação 3.1., e construir o gráfico da correlação. Também é possível observar o comportamento com os pontos com tendência de escoamento a partir de 10% de deslocamento e a faixa limite para o deslocamento. A Figura 4.2 apresenta a correlação entre o FS e o deslocamento das barreiras BTG1 e o comportamento da barreira com a atuação da inércia e atritos estático e cinético

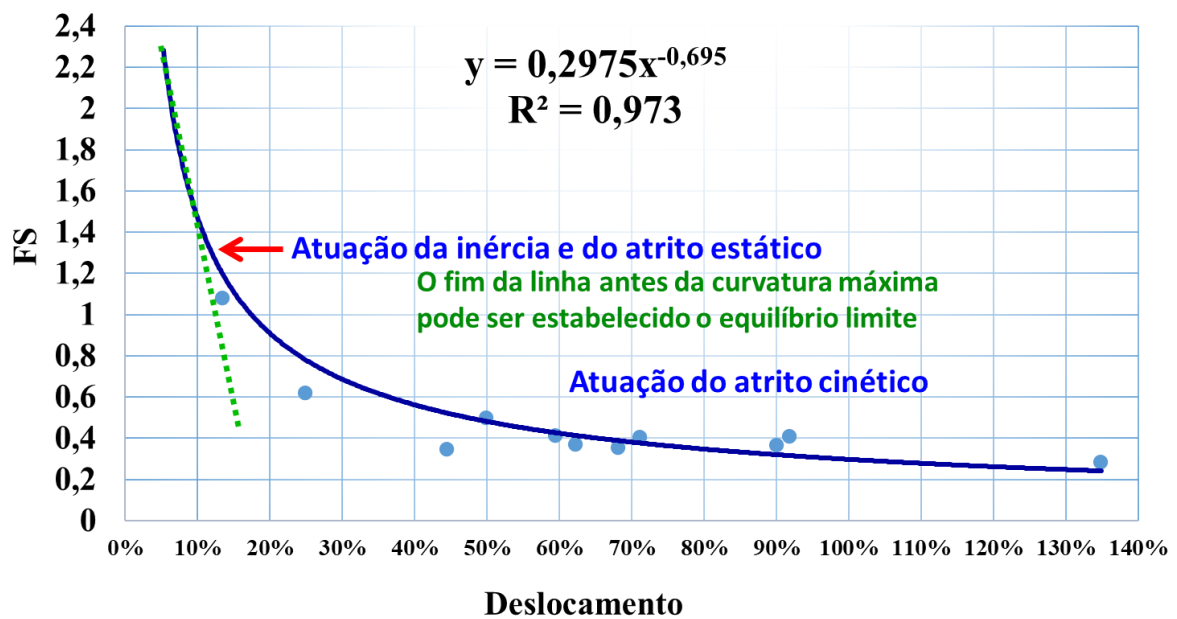


Figura 4.2. Fator de Segurança x Deslocamento da BTG1

É verificado na regressão potencial que aproximadamente entre 10 % e 15 % do deslocamento ocorria o equilíbrio limite e o $FS = 1$. Com o crescimento do FS em função de menores deslocamentos ocorre condição de reduzir a zero deslocamento ou estabilidade estática. Buscou-se nos experimentos o limite de falha em função de deslocamentos. Foi possível determinar que entre a taxa de 10% e 20% de deslocamento da barreira, de uma razão proporcional entre a massa da barreira e a pressão de impacto aplicada e independente de alguma variação de pressão de impacto, na maioria dos casos, a falha ocorria, sugerindo que rupturas ou grandes deslocamentos podem ocorrer a partir destes percentuais e desta relação.

Para chegar a estas conclusões foram feitos 61 experimentos, onde na maioria era buscado a alteração do comportamento da estrutura representado pela curva na linha de tendência potencial e do limite de deslocamento onde havia a ruptura da barreira com deslocamento até no fundo do canal. Foram perdidos 11 experimentos em que a barreira alcançava o deslocamento máximo e batia no fundo do canal. Também foram desprezados 24 ensaios onde não ocorreu deslocamento, o que não gera informação relevante para a determinação o equilíbrio limite, propósito deste experimento. A Figura 4.2 mostra o gráfico com a relação entre o Fator de Segurança e o deslocamento e o comportamento com os pontos com tendência de escoamento a partir de 40% de deslocamento.

Em muitos experimentos, foram perdidos ou desprezados dados por problemas com quedas de energia, variação de temperatura, erros humanos em salvar o registro e descartados por motivo das células perderem calibração. Ao todo entre experimentos realizados, falhas, problemas, e testes iniciais, somados totalizam 193 experimentos realizados e o consumo aproximado de 21.56 m³ de água, com reaproveitamento na limpeza do piso do laboratório e nos fluxos recuperação para reutilização em novos experimentos.

É necessário estabelecer que estes resultados servem para este fator de forma da BTG1 e relações de engenharia como proporção entre altura do tubo, largura da base, massa do conjunto e atrito reduzido. Para a condição real, o protótipo deve ser realizado como o material a ser utilizado e o geotêxtil tecido adequado além da obtenção do atrito e o fator de forma será específico de acordo com a forma de enchimento e do confinamento e atrito do material de preenchimento. Uma simulação numérica com os dados do protótipo pode prever os deslocamentos e deformações a partir de uma energia de impacto que pode ser estimada pelo modelo de Kang e Kim (2015), que também foi utilizado previamente para o dimensionamento deste modelo e posteriormente a pressão de impacto experimentada validada.

4.1.2 RESULTADOS DE EXPERIMENTOS - BTG 2

A BTG 2 é um barramento tipo 3:2:1 piramidal, segmentado com seis (6) tubos de geotêxtil de diâmetro 11,46 cm. A estrutura é montada dentro do canal para cada experimento e após este, realizado limpeza, desmontado o barramento com colocação dos tubos na posição vertical para que o excesso de água absorvido escorra e assim sejam reaproveitados, e a secagem das células e a cada experimento as massas são verificadas, colocação de vaselina e filme de PVC. A Figura 4.3. apresenta a configuração e o formato final das barreiras BTG 2.



Figura 4.3. Configuração e o formato final da BTG 2.

A segmentação com os 06 (seis) menores tubos de geotêxtil, apresentava a barreira com maior massa, contato nas ombreiras e na base, no entanto, os segmentos tinham massas individuais reduzidas para receber o impacto.

O fator de forma dos tubos de geotêxtil de menor diâmetro entre as barreiras e que tinham o formato mais próximo ao cilíndrico. Esta forma, têm maior dificuldade de permanecer estável durante os impactos. É possível que em algumas obras, ocorram tubos com este fator de forma. Não foi investigado plenamente o que motivou ser tão cilíndrico, mas é possível sugerir que para ocorrer este formato, depende principalmente da composição granulométrica do enchimento, do aumento da rigidez do geotêxtil em relação ao material de enchimento, do ângulo de atrito do material de preenchimento e o processo de enchimento abaixo do nível da água. Neste experimento, ocorreu pela composição granulométrica do enchimento em relação da redução de dimensões das peças componentes da barreira.

A forma cilíndrica dos tubos de geotêxtil da BTG2, representa menor área de contato da base (mesmo com 03 tubos na base da barreira), e por conta maior peso dentre as barreiras,

a que obteve maior concentração de tensão. Também a massa do conjunto é superior que a BTG1, o que levou a ampliação proporcional das variáveis velocidade e vazão.

Os dados dos experimentos e das características das barreiras foram colocados em uma planilha, onde foram realizados cálculos para determinar velocidade e vazão. Além destes eram inseridos dados da altura do fluxo, picos de pressões das células com estimativa da pressão de impacto no barramento e os deslocamentos deste. A partir desta junção de dados é possível construir gráficos e realizar análises. A Figura 4.4 apresenta gráfico com a linha de tendência potencial, para correlação e equação correspondente as variáveis de controle e dependentes da BTG2.

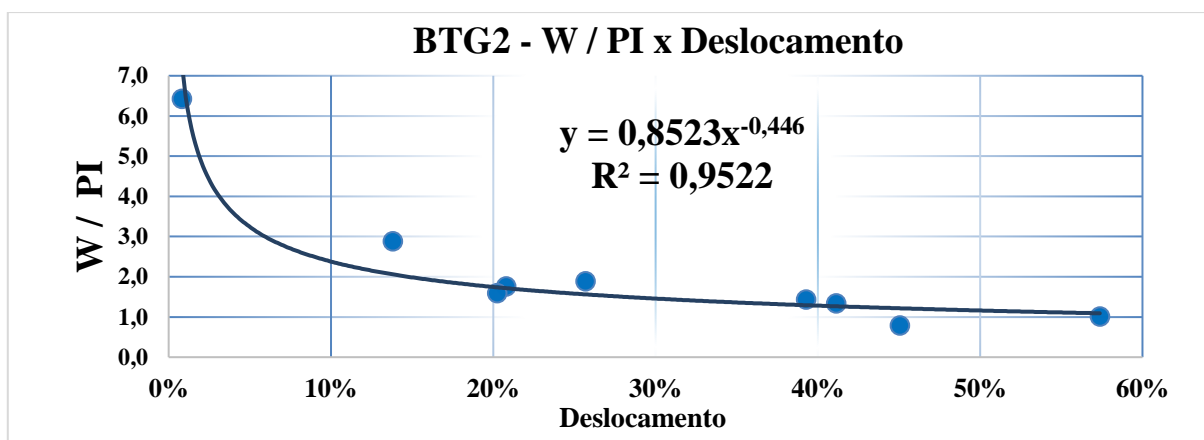


Figura 4.4. Relação Peso (W), Pressão de Impacto (PI) e Deslocamento (u)

Com o acréscimo dos parâmetros de coeficiente de atrito, em função do contato da base e ombreiras, multiplicado pela massa da barreira, foi possível construir a relação entre o Fator de Segurança e o deslocamento, conforme previsto na Equação 3.1., e o gráfico da correlação. Ainda assim a correlação do FS com o deslocamento, aplicando a regressão potencial dos dados, onde o equilíbrio limite ($FS = 1$), é prejudicado, pois ocorre com o início da curva acima de 10% de deslocamento das barreiras. Em muitos casos, após esse nível de deslocamento ocorre o colapso da estrutura e o risco de as barreiras acrescentarem massa ao fluxo de detritos, sendo transportada por este, o que é extremamente prejudicial, de forma que uma solução estabelecida se transforma em um problema ainda maior.

A avaliação das relações massa, impacto e deslocamento como observado na BTG1 foi prejudicada. Ou havia a estabilidade estática, ou o barramento colapsava pela relação W / PI próxima a 1, ou deslocava até o fundo (ruptura). Desta forma é possível construir a linha de regressão potencial, mas, difícil avaliar o equilíbrio limite. Dentre os experimentos a média da taxa de deslocamento das barragens que não colapsaram ou romperam, é de 26,15%. É sugerido

que em barramentos segmentados seja realizada amarração entre estes para que haja o comportamento uniforme das partes evitando o colapso. A Figura 4.5 apresenta a correlação entre o FS e o deslocamento das barreiras BTG2.

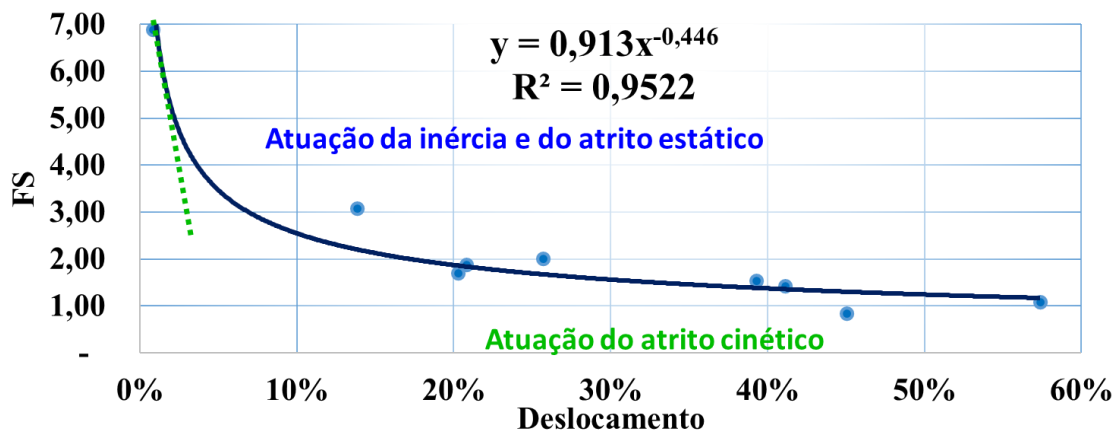


Figura 4.5. Fator de Segurança x Deslocamento da BTG2

4.1.3 RESULTADOS DE EXPERIMENTOS - BTG 3

A BTG 3 é uma barreira simples, utilizando o tubo isolado de 17,19 cm, com propósito de avaliar a variação do fator forma e de deslocamentos com a menor massa entre as barreiras. A estrutura é montada dentro do canal para cada experimento da mesma forma que a BTG1, com menor massa e com o fator forma oblongo próximo ao cilíndrico, foi possível verificar a ruína por tombamento da estrutura, mesmo com a condição de atrito extremamente reduzido.

Os dados dos experimentos foram colocados em uma planilha, onde foram realizados cálculos para determinar velocidade e vazão, inseridos picos de pressões das células com estimativa da pressão de impacto na barreira o barramento, e finalmente, os deslocamentos deste. A partir desta junção de dados foram construídos gráficos e realizadas análises.

Para a BTG3, o estabelecimento de uma correlação do FS com o deslocamento foi menos preciso e após a regressão potencial dos dados. Não foi possível estipular um critério razoável para o equilíbrio limite, em termos de relação do FS x Deslocamento. A concentração maior de tensão na base, por conta do fator de forma (com menor área de contato da base), não impediu que a estrutura rompesse com facilidade, por deslocamento excessivo, ou a ausência de deslocamentos, experimentos que não fornecem dados adequados para formulação de limites e hipóteses de falha. O R^2 de 0,638 demonstra o prejuízo em correlacionar os parâmetros da pesquisa. A Figura 4.6, apresenta gráfico com a linha de tendência potencial, para correlação entre a relação de massa da barreira e pressão de impacto e os deslocamentos da BTG3.

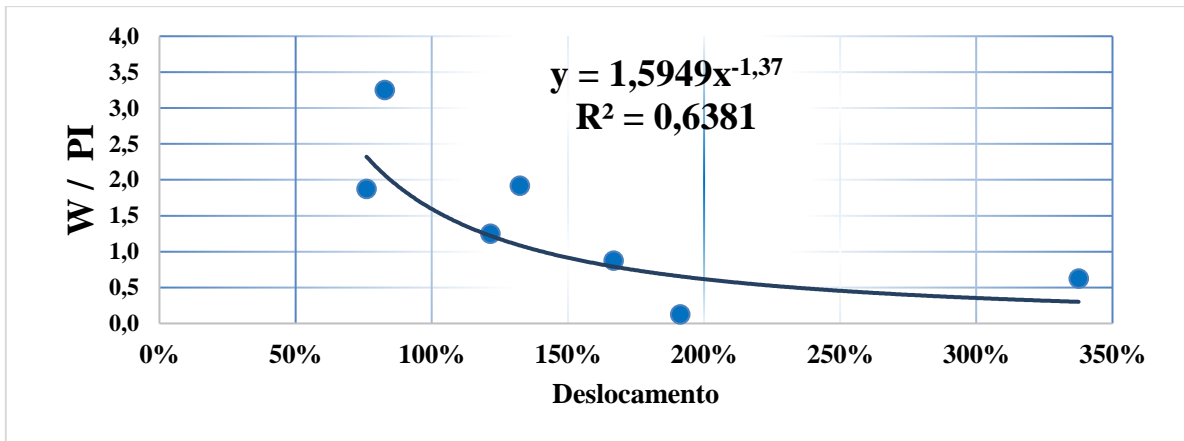


Figura 4.6. Correlação Peso (W), Pressão de Impacto (PI) e Deslocamento

Com o acréscimo do coeficiente de atrito em função do contato da base multiplicado pela massa da barreira foi possível construir a relação entre o Fator de Segurança e o deslocamento, conforme previsto na Equação 3.1., e construído o gráfico da correlação o que melhorou o R^2 para a condição de aceitável, pela consideração do atrito mínimo nos contatos entre a barreira e o canal hidráulico. A Figura 4.7 apresenta a correlação entre o FS e o deslocamento da BTG3.

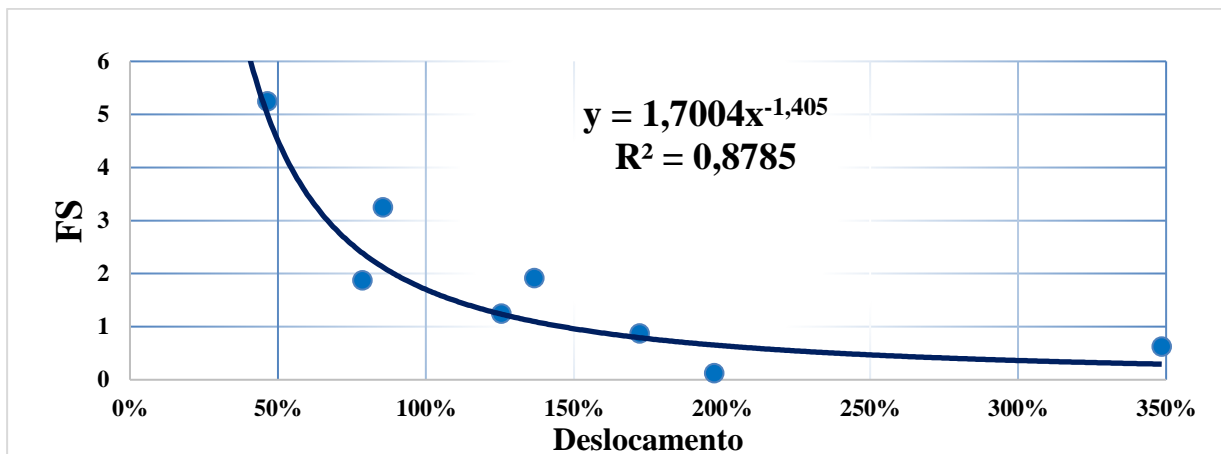


Figura 4.7 Fator de Segurança x Deslocamento da BTG3

Os excessos de deslocamentos e a não utilização de dados de deslocamentos nulos, prejudicaram o experimento e a avaliação das relações massa, impacto e deslocamento, não são relevantes suficientes, para determinar o comportamento da estrutura ao impacto. É verificado que a forma cilíndrica, sem que se utilize um tapete de ancoragem, demonstrou nos experimentos que não é adequada para essa finalidade.

4.1.4 AMPLIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO

A ampliação do atrito estático, foi implementado para verificar sua influência e as possíveis alterações de comportamento da estrutura em relação a este fator. O incremento de atrito foi realizado com a fixação de fita antiderrapante com 5 cm de largura, cujo coeficiente medido é $\mu_e = 8,26 / \text{cm}^2$. Foram realizados dois acréscimos de incremento de atrito, o último com a aplicação de mais uma fita dobrando a área do atrito estático unitário de $\mu_e = 8,26 / \text{cm}^2$ conforme apresentado na Figura 4.8. fita antiderrapante duplicada para incremento de μ_e .

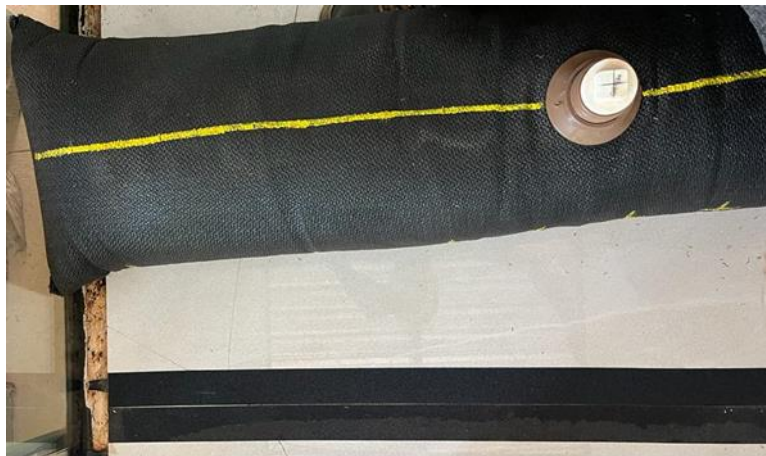


Figura 4.8. Fita antiderrapante duplicada para incremento de μ_e .

Para estes experimentos foi utilizada a BTG1 que apresentou melhor qualidade devido ao fator de forma e por apresentar maior área de contato e menor tensão na base. O incremento de atrito estático levou ao comportamento da estrutura frente a pressão de impacto onde ou não havia deslocamentos ou a ruptura com o deslocamento máximo e uma impossibilidade de correlacionar massa e atrito com o impacto e os deslocamentos da barreira. Desta forma o FS é em função de um modelo que pode haver pequenos ou nenhum deslocamento, apenas estabilidade estática ou a ruptura. Neste experimento, em todos os impactos, também não houve deformações, mesmo com a estabilidade estática e, no caso da falha também havia o deslocamento sem deformações.

4.1.5 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS BARREIRAS COM AS DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS

As deformações na face da barreira, foram medidas junto com os deslocamentos. Foram melhor analisados na BTG1. Quanto maior a pressão de impacto e deslocamento, menor

ocorrência de deformações da barreira. Raramente houve deformações e só ocorriam se fossem acompanhadas de deslocamentos. Quando ocorreram, foram registrados e analisados dois tipos de comportamentos e gerados um gráfico da deformação da face de cada exemplo. Na primeira forma de deformação analisada, foi verificado arqueamento central da barreira (concavidade), e ainda, uma pequena deformação nas extremidades, local de menor tensão na base pelo fator de forma e menor atrito em função da tensão. Estas deformações podem ser verificadas na Figura 4.9.

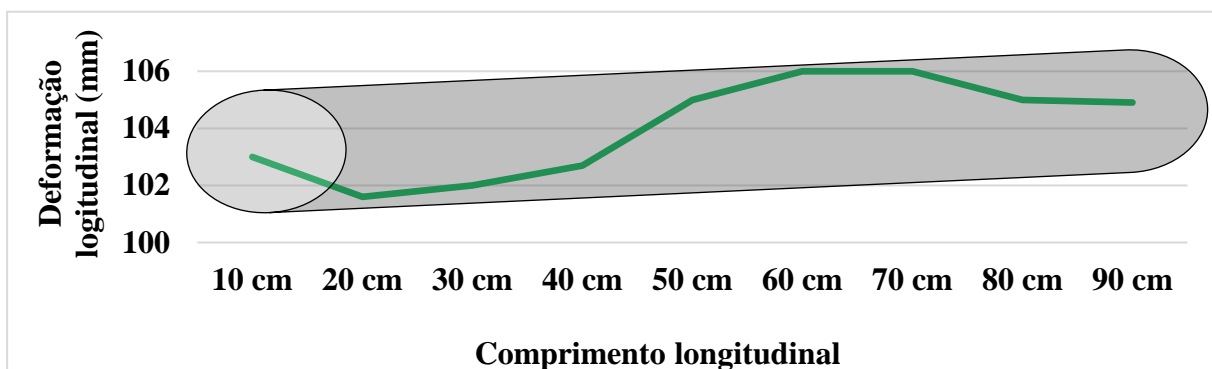


Figura 4.9. Deformações longitudinais no corpo e extremidades da BTG1 com maior impacto

O segundo comportamento de deformação, foi verificado em impactos com menor energia (velocidade, vazão). A deformação longitudinal da BTG1, ocorre de forma convexa, nas extremidades, local de menor tensão na base pelo fator de forma e menor atrito em função da tensão. A Figura 4.10. apresenta o gráfico das deformações nas extremidades da BTG1.

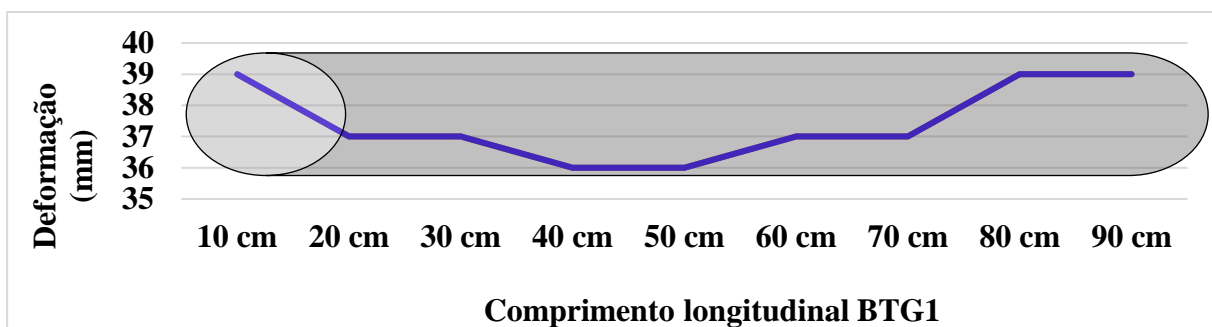


Figura 4.10. Deformações nas extremidades da BTG1 ocorridos com menor impacto

A deformação mínima em carregamentos grandes e rápidos, ocorre porque não há tempo do solo apresentar o seu comportamento viscoelástico e reacomodar ou se ajustar para melhor receber a carga. A relação entre a carga aplicada e a deformação resultante pode variar

dependendo da velocidade com que a carga é aplicada. Isso é conhecido como dependência da taxa de carregamento da rigidez. Em alguns materiais, especialmente aqueles que exibem comportamento viscoelástico, a rigidez pode variar com a taxa de aplicação da carga. À medida que a carga é aplicada mais rapidamente, menos tempo é dado para que o material se reorganize estruturalmente. Considerando uma carga aplicada no conjunto confinado geotêxtil e solo, especialmente em uma taxa de carregamento rápida, o solo interno pode exibir uma resposta imediata à carga devido à sua rigidez instantânea, que é a rigidez do solo no momento da aplicação da carga. No entanto, com solos finos e com o tempo, o solo pode sofrer deformações adicionais devido a processos como compactação, rearranjo de partículas e redistribuição de água dentro do solo.

O fenômeno onde o tubo de geotêxtil preenchido com solo granular se desloca como um todo, mas o solo confinado dentro do tubo permanece relativamente estático, pode ter algumas explicações possíveis que é fundamental considerar esses fatores ao analisar o comportamento do sistema e entender como eles afetam o desempenho da estrutura:

- I. **Redução do atrito entre o geotêxtil e o canal:** O geotêxtil obteve o favorecimento do deslizamento em sua superfície externa, especialmente devido ao processo de redução do atrito com o uso de porcelanato polido, lubrificação e utilização do filme de PVC que proporcionou que o tubo de geotêxtil deslizasse mais facilmente.
- II. **Confinamento do solo:** O solo dentro do tubo está confinado pela estrutura do geotêxtil, o que pode impedir seu movimento lateral. No entanto, o tubo de geotêxtil como um todo não está confinado e pode se mover como uma unidade.
- III. **Efeito do carregamento dinâmico:** Quando uma carga é aplicada rapidamente, pode haver um efeito dinâmico sobre o sistema solo-geotêxtil e criar condições em que o movimento do tubo de geotêxtil é favorecido em relação ao solo confinado dentro dele, resultando no deslocamento do tubo como um todo.

4.1.6 CORRELAÇÕES VELOCIDADE, VAZÃO, E IMPACTO COM A PRESSÃO DE IMPACTO DE ÁGUA E DE FLUXO DE DETRITOS

O fluxo de detritos foi inicialmente previsto com rejeito de mineração, no entanto, a condição inerte deste sozinho, não conseguia simular o fluxo de detritos. Como polpa, misturado na betoneira com proporção em massa de argila (60%) e água (40%). Até então optou-se por usar somente água nos experimentos para normalizar variáveis básicas e de controle

(principalmente massa específica do fluxo) em testes com os barramentos com a finalidade de propiciar menor tempo de execução (preparação, execução, remoção e limpeza), evitar danificar células e principalmente a visibilidade da altura do fluxo, e área impactada nas células, para determinação da estimativa da pressão de impacto.

Utilizando dados de velocidades, vazão e pressão de impacto foi possível estabelecer a correlação destes parâmetros. As velocidades utilizadas nas barreiras ficaram dentro observadas em alguns fluxos de detritos, entre 2 m/s e 5 m/s. Velocidades abaixo de 2 m/s, não representavam impactos suficientes para deslocar as barreiras e entre 4 m/s e 5m/s, a ruptura por deslocamento ocorria. Na Figura 4.10 é apresentado a correlação das velocidades praticadas nos experimentos, e as pressões de impacto registradas.

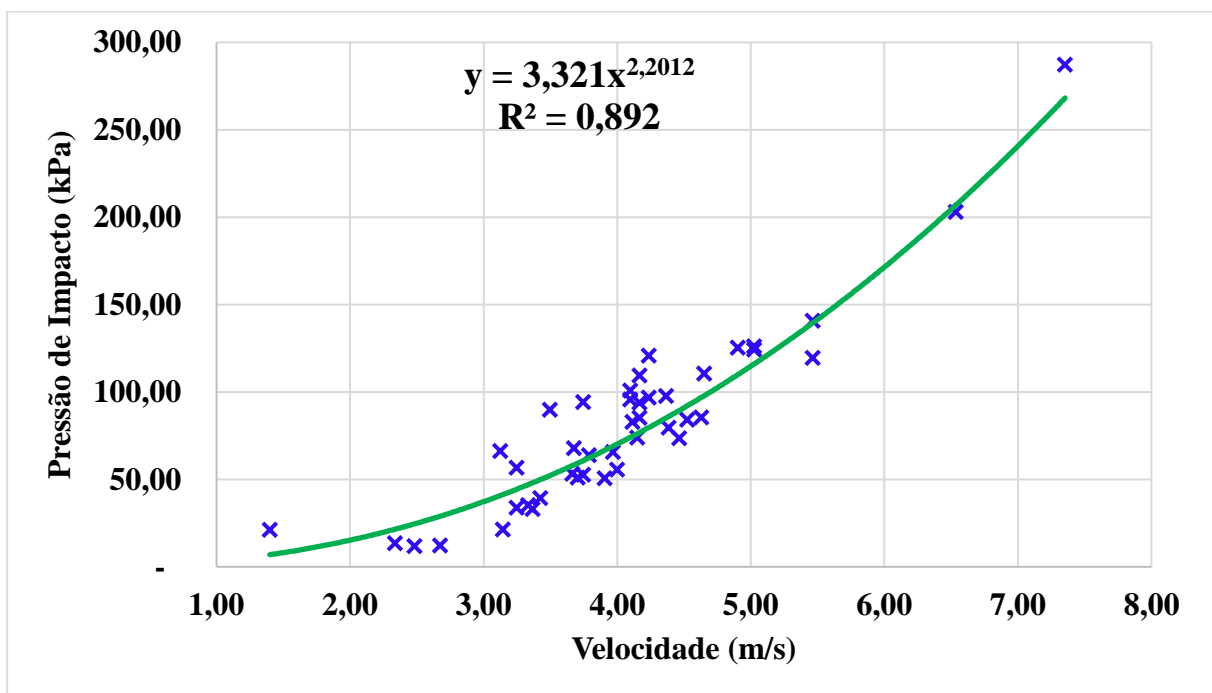


Figura 4.11 Correlação da velocidade do fluxo de água (m/s), com a pressão de impacto (kPa)

A correlação entre vazão do fluxo e a pressão de impacto, também foi estabelecida. A o comportamento linear (mesmo com a regressão potencial), mostra que a profundidade do fluxo é fundamental para a determinação precisa da pressão de impacto. Verificamos que altas velocidades e pouca vazão, não forneciam grandes valores de pressões. Vazões maiores com baixas velocidades também não forneciam grande intensidade nas pressões. A Figura 4.11, apresentada a correlação da vazão (cm³/s), com a pressão de impacto (kPa).

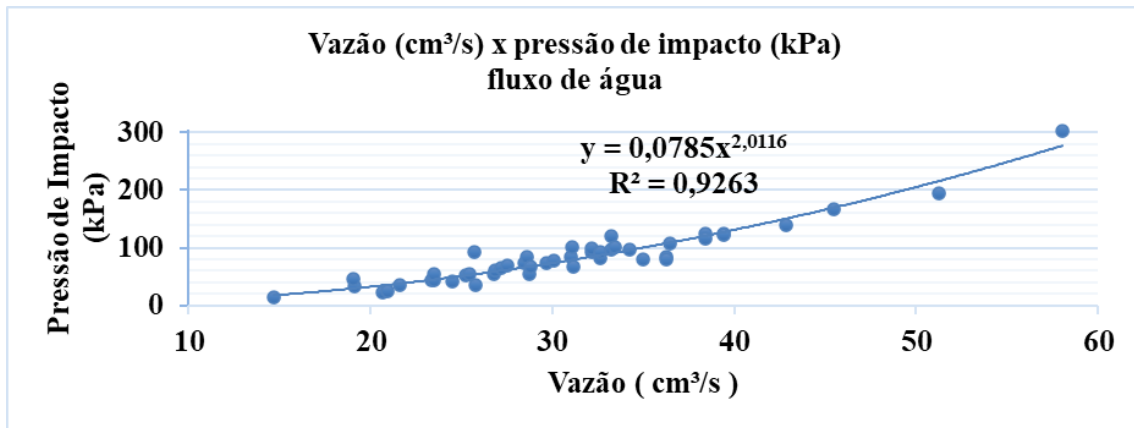


Figura 4.12. Correlação da vazão do fluxo de água (cm³/s) com a pressão de impacto (kPa)

Os experimentos com o fluxo (poupa), seguiram os mesmos processos para experimentos das barreiras, iniciando por menores vazão e densidade, ampliando e incrementando estes parâmetros. A argila e a água, foram misturadas na betoneira, para formar uma polpa densa similar aos fluxos de lama (mudflow), com densidades crescentes e com turbulência, o que mantém as partículas pesadas em suspensão, onde é possível o acréscimo de brita para a formação do fluxo de detritos. O material do fluxo era a recuperado e reutilizado em novo experimento, com ampliação dos parâmetros vazão e densidade. A correlação entre vazão, densidades e pressão de impacto é apresentado na Figura 4.13.

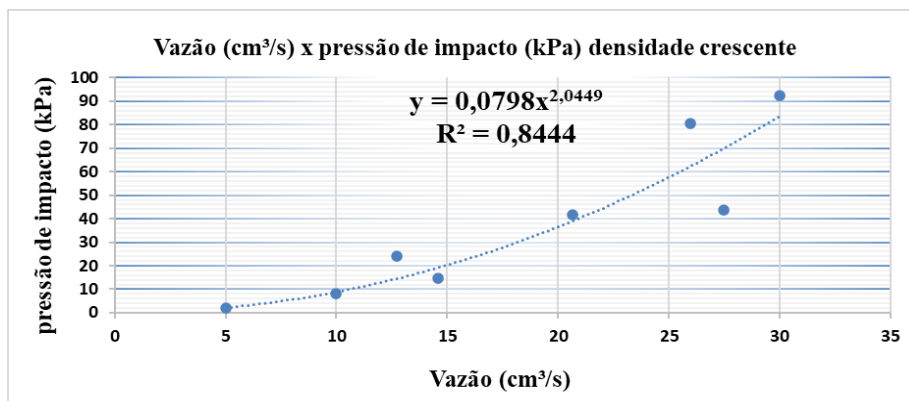


Figura 4.13 Correlação entre vazão (cm³/s), densidade (g/cm³) e pressão de impacto (kPa)

4.2 CRITÉRIOS DE DESIGN DE BARREIRAS DE CONTENÇÃO COM TUBOS DE GEOTEXTIL

Os critérios de design para barreiras de contenção com tubos de geotêxtil variam dependendo das características do solo, das condições do local e dos requisitos específicos do projeto. No entanto, alguns critérios comuns são frequentemente considerados:

Estabilidade Estrutural: Os tubos de geotêxtil devem ser dimensionados para resistir à pressão de impacto estimada que pode ser obtida por informações do dambreak em caso de barragens de água e pelo modelo estabelecido por Kang e Kim (2015) para barragens de rejeito de mineração. Em alguns casos após evento também, às cargas hidrostáticas e à pressão do solo, garantindo a estabilidade global da barreira. Nos experimentos, impactos em velocidades acima de 2 metros por segundo, barreiras, que antes eram flexíveis no limite de deformação do tubo, entram em regime transiente, com comportamento rígido no sentido do impacto.

Capacidade de Filtração: Os tubos de geotêxtil devem ter uma capacidade adequada de filtração para permitir a passagem de água enquanto retêm as partículas do solo de preenchimento das barreiras. Isso evita a erosão e a perda de solo através do tubo. Também em relação ao solo de assentamento, se o material do tubo for muito poroso em relação ao solo local, pode permitir a passagem de partículas finas, e se o material de enchimento do tubo tiver permeabilidade reduzida, pode obstruir o fluxo de água e prejudicar a drenagem.

Durabilidade: Os materiais dos tubos de geotêxtil devem ser selecionados para garantir a durabilidade da estrutura, resistindo à degradação química, biológica e física ao longo do tempo de vida útil da barreira.

Compatibilidade com o solo: é recomendada uma compatibilidade dos tubos de geotêxtil com o solo local em termos de granulometria, coesão, ângulo de atrito interno, entre outras propriedades. Esse fator é importante pois assegura que os tubos de geotêxtil tenham uma interação adequada com o solo circundante, garantindo a estabilidade da estrutura de contenção. A compatibilidade com o solo permite que os tubos de geotêxtil se adaptem adequadamente ao terreno e às condições de carga, garantindo uma distribuição uniforme das tensões e uma resposta eficaz às variações do solo ao longo do tempo. Se os materiais do tubo e do solo forem incompatíveis, pode haver problemas de aderência ou de transferência de carga, comprometendo a estabilidade da estrutura.

Flexibilidade: Os tubos de geotêxtil devem ser flexíveis o suficiente para se adaptarem às irregularidades do terreno e às variações de carga ao longo do tempo, garantindo a estabilidade da estrutura. A flexibilidade do tubo geotêxtil, permite a adaptação mesmo aonde a fundação for pouco competente, no entanto, devem ser realizadas análises sobre a estabilidade global. Alguns cuidados devem ser realizados em vales com grande inclinação. A posição inclinada, reduz a força normal e conseqüente o atrito estático. No caso de terrenos inclinados,

a força normal deve ser decomposta da vertical, para uma inclinação perpendicular ao terreno e outra no sentido da inclinação o que pode ser um fator de instabilidade. Portanto, deve ser garantida a posição em plano horizontal. A força normal é apenas o peso do objeto que está sobre uma superfície, mas se um objeto estiver inclinado ou tiver componentes de força aplicada perpendicularmente à superfície, então não é igual ao peso. É reiterado que a massa é a propriedade de um corpo que especifica quanta resistência a mudanças em sua velocidade o corpo tem. Outros tubos e a execução do tapete de ancoragem pode ser construído para manter o tubo na posição horizontal.

Resistência ao Impacto: Os tubos dimensionados adequadamente e preenchidos, demonstraram que o conjunto suporta os impactos. É importante destacar que assim que instalados e preenchidos já se encontram aptos. Com o tempo o material pode se consolidar, cimentar e tornar a estrutura cada vez mais rígida.

Facilidade de instalação: Os tubos de geotêxtil devem ser projetados para facilitar a instalação no local, permitindo uma montagem eficiente e segura da estrutura de contenção. Pode ser previsto um enchimento a seco para locais onde há dificuldades com a água utilizada no enchimento hidráulico

Compatibilidade com elementos de reforço: Quando utilizados em conjunto com elementos de reforço, como geogrelhas ou geocélulas, os tubos de geotêxtil devem ser compatíveis para garantir uma interação eficaz entre os diferentes componentes da estrutura. As estruturas com tubos de geotêxtil podem facilmente se integrar à outras soluções. A característica de interoperabilidade é presente nestas estruturas, que podem ser adaptadas a infinitas possibilidades. Podem ser citados como ampliação de altura de estruturas existentes, como na barragem de Santarém, ou que poderiam servir como bermas a frente da jusante de barragens de rejeito atuando tanto como agente de estabilizador como para mitigação dos riscos. As barreiras podem se ajustar a qualquer terreno e geometrias, complementar estruturas e reduzir impactos. Podem ser fixadas por tapetes de ancoragem ou em ombreiras que podem ter elementos de ancoragem, ligados a pontos de fixação nos tubos conforme apresentado na Figura 4.14.



Figura 4.14. Elemento de fixação de extremidade do tubo geotêxtil

Geotêxtil do tubo: É recomendável a utilização de geotêxteis tecidos onde pele tem maior resistência a impactos e elementos perfurantes ou cortantes em fluxos de detritos, que podem causar rupturas por tração, puncionamento e abrasão. Em geral, os geotêxteis tecidos tendem a ter maior resistência a estes agentes agressores do que os geotêxteis não tecidos. Isso se deve à forma como as fibras são dispostas em cada tipo de material onde no geotêxtil tecido as fibras são entrelaçadas perpendicularmente, criando uma estrutura mais compacta e resistente que o geotêxtil não tecido onde as fibras são dispostas aleatoriamente e unidas por processos como agulhamento ou calandragem.

A barreira será instalada em talvegue ou rio intermitente e, portanto, é necessário sistema de passagem de água para vazão sanitária mínima e drenagem em caso de carregamento. É importante lembrar que conforme o artigo 2º da Lei 14066/2010 a barreira terá de cumprir os mesmos critérios de estabilidade ou de falhas possíveis.

4.3 VIABILIDADE E UTILIZAÇÃO DE BARREIRAS EM GRANDES ESCALAS

O modelo reduzido foi construído para experimentar as hipóteses mínimas para o princípio de protótipo da barreira, a partir de uma pressão de impacto pré-estimada, com a utilização de uma correlação para determinação do peso próprio mínimo da barreira, reduzindo ao máximo o atrito no contato com a base. Espera-se que em escala real, a barreira obtenha também seja efetiva. A viabilidade de execução da barreira implica em construir o fator de segurança com as condições reais de instalação da barreira incluindo as dimensões e peso da barreira e o atrito entre o contato com a base. Um coeficiente de ajuste “ λ ” pode ser multiplicado as capacidades resistentes (força peso e atrito estático) na equação 3.1 para ajuste do fator de segurança preestabelecido de acordo com os danos potenciais associados.

Uma simulação numérica com estes dados pode conseguir ajustar e tornar a estrutura mais precisa e segura para o seu uso. Ainda é fundamental a prescrição do geossintético adequado e do material de enchimento. Materiais granulares são os mais indicados, os mais finos podem ser utilizados, a consolidação deste ocorrem em prazo proporcional a desidratação.

A viabilidade ambiental é demonstrada pela proteção dada na retenção do fluxo de detritos e a mitigação de todos os danos que são evitados, além dos altos custos de recuperação ambiental. Vale salientar que as barreiras com tubos de geotêxtil, podem ter uma camada de cobertura e se integrarem ao meio ambiente. O ideal é que o preenchimento seja com material inerte, no entanto, quando o tubo geotêxtil é preenchido com rejeito de mineração, devem ser tomados cuidados para evitar a drenagem ácida, como o preenchimento com finos o que pode minimizar a presença de oxigênio e liberação de lixiviado e da mesma forma, evitar a entrada e percolação de água e consequente lixiviação.

A viabilidade econômica pode ser obtida por utilizar mão de obra local, material mais próximo disponível e técnicas simples de enchimento e fixação. A viabilidade do uso da estrutura é completada com a escolha do melhor local para instalação da barreira, com fundação competente e opções para fixação e ajustes mínimos como o tapete de ancoragem. No caso de proteção contra falha em barragem de rejeito de mineração, é adequado instalação da barreira após uma passagem de vale aberto ou com menor inclinação, para redução de velocidade e vazão e com uma estrutura com menor comprimento por um novo estreitamento do canal o que levará a utilização de menor volume de materiais.

O elemento distintivo do uso de barreiras passivas com tubos geotêxteis, em detrimento de estruturas de peso convencionais, é o processo executivo mais seguro para estruturas que podem se instabilizar com os outros processos. Os tubos se tornam mais viáveis que barreiras de solo compactado ou de enrocamento, quando o nível de segurança da barragem de rejeitos, não admite sismos induzidos, pelos processos construtivos da barreira com estes materiais. Em comparação com os custos destas estruturas, dependem de outras análises.

Em barragens convencionais, a viabilidade do projeto busca o vale mais encaixado tanto para economia do barramento quanto para menor área inundada para reserva de volume. Neste caso de uma barreira de contenção de impacto, busca-se a inundação para minimizar o impacto e por isso a posição estratégica após vale mais aberto é ideal.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões para pesquisa futuras

5. CONCLUSÕES

A indústria da mineração é importante e vital para a humanidade e em especial para o Brasil, no seu crescimento e desenvolvimento econômico, cuja grande riqueza mineral tem alto potencial de exploração. Soluções para o uso sustentável e provisório do solo são fundamentais para garantir uma exploração segura e eficaz contra riscos de acidentes como os que ocorreram.

Os tubos geotêxteis são fabricados em polietileno de alta densidade (PEAD), e possuem excelente durabilidade devido a resistência química, física e aos raios UV, sendo adequados para diversas aplicações exigentes. São flexíveis, o que facilita o transporte, manuseio e instalação em campo e apresentam um ótimo custo-benefício, atendendo determinações de aplicações e de elevados padrões de qualidade.

Os tubos de geotêxtil e suas muitas funções são reconhecidos internacionalmente e o uso como estruturas de proteção costeiras têm sido ampliados para recuperação e proteção contra as mais sérias intempéries. O desempenho das estruturas com a tecnologia de tubos geotêxteis podem atuar como as estruturas de barreira de contenção de impacto de fluxo de detritos. Os tubos podem ser estabelecidos de forma permanentemente no local por complementar a paisagem sem modificar o meio. O menor tempo de instalação sem uso de grandes equipamentos e o menor custo com o uso de material de preenchimento próximo ou rejeito de mineração e menor tempo de instalação, promovem vantagens significativas para o uso da tecnologia para esta finalidade.

A utilização de tubos geotêxteis demonstra ser uma solução, promissora. O uso desta tecnologia como um barramento para mitigar riscos é viável, visto a possibilidade de ser instalado em praticamente qualquer terreno e preenchido com materiais mais próximos disponíveis, inclusive resíduos, como o caso do rejeito de mineração. Para tanto nesta pesquisa buscou-se identificar o processo de impacto e a resposta com o comportamento inercial da estrutura de forma que embase outros estudos para projetos e usos em grandes escalas.

Este trabalho propiciou desenvolvimentos de protótipos de estruturas, técnicas de instrumentação e de captação e tratamento de dados, além de estudos de retro análises para definição de modelos físicos. As informações obtidas são importantes para um pré-dimensionamento de um barramento para receber impacto, e elaboração de critérios de instalação que devam buscar reduzir custo de construção e redução do impacto.

A construção de uma instrumentação capaz de registrar a estimativa do impacto é um item muito relevante da tese. Dinamômetros industriais modernos com strain gauges integrados, por meio de leituras das deformações causadas pela aplicação de forças impactantes, convertida eletronicamente em uma carga pelo Arduino, e transferido para um aplicativo com registro dos impactos em frequência adequada à velocidade do processo. O desafio foi realizado com sucesso. Correlações de velocidades, vazões e impactos foram então possíveis de serem concretizadas. A instrumentação validou as equações que produzem empiricamente, a partir dos parâmetros estimados como a velocidade, a vazão e a densidade, uma determinada pressão de impacto de um fluxo de detritos. Desta forma é calibrada com eficiência a formulação do fator de segurança.

Os modelos físicos das barreiras foram testados até que se pudesse estabelecer relação entre diferentes valores de impacto e deslocamentos proporcionais. O fator de segurança para a estabilidade da estrutura, foi definido pela razão de forças resistentes e de forças atuantes. Para as forças resistentes é considerada a relação entre o peso próprio da estrutura de barramento com tubos geotêxteis, coeficiente de atrito estático correspondente as áreas de contato das barreiras (base e ombreiras), e para as forças atuantes, a estimativa unitária da Pressão de Impacto gerada pelo fluxo de detritos e multiplicada pela área de projeção (perpendicular ao fluxo) do paramento das barreiras.

Neste experimento, foi abordado a possibilidade do movimento de corpo livre, visto que em experimentos ancorados não apresentavam os resultados provenientes da resposta inercial, mas das forças de amarração. É sugerido que haja o dimensionamento da massa e obtenção do coeficiente de atrito estático para determinar a resistência da estrutura ao movimento.

Dentre as configurações analisadas, entre os arranjos definidos das barreiras em modelo reduzido, a BTG 1, que tem a escala mais próxima do protótipo (1:40), obteve o melhor comportamento, onde é indicado que o fator de forma elíptico e relações de Lawson (2008),

são mais favoráveis ao dimensionamento de barreiras para este uso. Os dados da BTG1 apresentam uma excelente correlação entre massa da barreira e a pressão de impacto e, portanto, dados adequados para determinação do fator de segurança para a barreira de contenção de impacto com tubo geotêxtil.

Para a BTG 1, a relação entre o Fator de Segurança e o deslocamento foi realizado, a partir do gráfico de correlação e verificado na regressão potencial, que entre 10 % e 15 % do deslocamento ocorria o equilíbrio limite e onde $FS = 1$. Com o crescimento do FS em função de menores deslocamentos, ocorre a condição de reduzir a zero deslocamento ou a estabilidade estática. A partir da taxa de 50% de deslocamento das barreiras, e de uma razão proporcional entre a massa das barreiras e a pressão de impacto, foi observado que independente de alguma variação de pressão de impacto, na maioria dos casos, a ruptura ocorria, sugerindo que rupturas totais e ou grandes deslocamentos, podem ocorrer a partir deste percentual e desta relação, onde o atrito atuante é o cinético. O deslocamento excessivo (menor que 50%), pode não significar uma falha ainda pois, se o barramento conseguir dissipar o impacto e em sequência grande parte do material ficar retido, ou minimizar qualquer dano potencial, a estrutura já terá sido efetiva.

O atrito estático foi ampliado para verificar o nível da sua influência. Foram realizados dois acréscimos de incremento de atrito que levou ao comportamento da estrutura frente a pressão de impacto onde ou não havia deslocamentos ou a ruptura com o deslocamento máximo. Desta forma, o Fator de Segurança em razão de um atrito grande em relação aos outros processos é em função de um modelo que pode haver pequenos ou nenhum deslocamento, apenas estabilidade estática ou a ruptura, ambos sem apresentarem deformação da barreira em modelo reduzido.

Para a BTG 2 também foi possível estabelecer uma correlação do FS com o deslocamento, aplicando a regressão potencial dos dados, onde o equilíbrio limite ($FS = 1$) ocorre com o início da curva antes de 10% de deslocamento das barreiras. A barragem teve comportamento considerado colapsível ou de rupturas bruscas. Nos experimentos, ou ocorria a estabilidade, ou a ruptura com poucas observações de deslocamentos, que manteriam o material do fluxo retido. As falhas na BTG2 ocorreram principalmente de duas formas possíveis no canal: ou o colapso do conjunto segmentado em casos de fluxo com alto valor da pressão de impacto, ou em poucas oportunidades apresentaram deslocamento excessivo e com estas foi possível ainda estabelecer a correlação dos deslocamentos com o fator de segurança.

É sugerido que em barramentos segmentados, seja realizada a amarração entre os segmentos para que haja o comportamento uniforme das partes evitando o colapso. Outra opção é incremento de atrito entre os tubos empilhados, atualmente no mercado surgiram elementos de ampliação deste atrito, o que permite maior estabilidade no empilhamento e auxílio na segurança para os profissionais quando na necessidade de andar por sobre estes.

A BTG 3, teve sua avaliação prejudicada pela ocorrência excessiva do tombamento da barreira. O fator forma (mais cilíndrico) prejudicou o movimento de corpo livre e a melhor compreensão dos deslocamentos em função da pressão de impacto. O comportamento da barreira leva ao incremento do problema com o risco de as barreiras somarem à massa transportada pelo fluxo de detritos.

As barreiras com tubos de geotêxtil, em modelos reduzidos, apresentaram estabilidade da estrutura ao transbordamento sem erosão. A estabilidade para flutuação deve ser verificada em barragens de concreto, mas também, ocorreu como esperado. Não houve nenhum elemento que causasse danos ao geotêxtil e seu potencial de colapso progressivo, no entanto, é possível que este possa ocorrer em caso de um fluxo contínuo com elementos cortantes e se previsto, pode ser executado com tubos com o geotêxtil próprio para esta ocasião ou alguma proteção superficial.

Os modelos experimentais foram concebidos em escalas reduzidas controladas, que satisfazem as características do protótipo e dos procedimentos. Experimentos com modelos em escalas reduzidas tem suas limitações, mesmo com carregamentos extrapolados e atritos irrelevantes. Os ensaios foram feitos sobre a perspectiva de efetividade do protótipo da barreira em escala real, onde é esperado que os resultados também ocorram.

Os limites de velocidades para impacto nas barreiras em modelo com escala controlada foram verificados, onde abaixo de 2 m/s, não representavam impactos destrutivos enquanto impactos acima de 5m/s com profundidades de pelo menos 50% em relação à altura da estrutura podem ser considerados impactos muito destrutivos. Os parâmetros fundamentais que influenciam na pressão de impacto são a vazão (velocidade e profundidade no local do impacto) e o peso específico do material constituinte do fluxo de detritos, neste caso é necessária certa quantidade de finos para formar uma polpa com partículas dispersas e adicionado o fluxo turbulento, é a condição para que este fluxo possa carregar blocos de rochas a grandes velocidades e distâncias e que são grandes agentes de impacto.

A posição de instalação de uma barreira para contenção de impacto é desejável em vales mais encaixados por questões de viabilidade econômica e ainda, o barramento executado após um vale aberto ou zonas abertas, pode reduzir as dimensões construtivas das barreiras, que propicia no fluxo, uma redução da profundidade, anterior ao local do impacto. Grandes blocos de rochas (mais destrutivos), podem conseguir segregar com a menor velocidade, visto que a energia cinética também é dissipada pela rugosidade do terreno em maior área de contato e desta forma, se depositarem em vales ou zonas abertas de baixo gradiente.

A característica de interoperabilidade é presente nestas estruturas, que podem ser adaptadas a infinitas possibilidades. Os tubos de geotêxtil podem ser utilizados junto à outras soluções e podem também serem fixados ou ancorados otimizando ainda mais sua eficiência.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizado nesta pesquisa é o princípio de estudos para a elaboração de uma barreira de contenção de impactos efetiva. As conclusões obtidas são as preliminares para o início do processo de construção de todos os elementos para projeto e execução definitivos que devem ser complementados em várias outras pesquisas.

O comportamento complexo das barreiras nesta primeira etapa, revelou uma geometria mais adequada, que pode levar a uma melhor correlação do fator de forma com a geometria do tubo mais achatado (relação entre base e altura de barreira). As demais geometrias não foram adequadas, mas é possível que barreiras segmentadas sejam experimentadas com amarração entre os segmentos para que haja o comportamento uniforme das partes evitando o colapso.

Em outras abordagens pode ser experimentado barreiras com ancoragens em pontos específicos, mas ainda, com a utilização da massa da barreira e do atrito como parâmetros principais de resistência. Desta forma é possível realizar estudos em função da deformação da barreira. Barreiras fixadas permitem utilização de outros instrumentos que determinem a pressão de impacto com precisão, como membradas de tensão e o uso de acelerômetros. Neste caso os experimentos podem ser tratados com fluxos em maior tempo ou contínuos ao invés de apenas a onda de impacto.

Alterações de densidade de elementos de preenchimento, uso de agregados reciclados e outras configurações podem ser experimentadas em diferentes abordagens. Uma simulação

numérica com os dados desta pesquisa, pode confeccionada e ajustada com acréscimos de atrito e de massa da barreira, para escalas reais e assim, tornar o projeto da estrutura preciso e seguro.

Análise da utilização de tubos de geotêxtil em outras composições estruturais na jusante do barramento, como bermas de equilíbrio, poderá mitigar riscos, pois atuaria tanto como agente estabilizador, quanto barreira de contenção, antes de algum ganho de velocidade do fluxo de detritos. Da mesma forma pode ser analisada a utilização em cristas de barramentos provisórios de contenção emergencial, para aumento de altura útil.

A utilização de cargas cíclicas e processos dinâmicos, podem ser utilizados em abordagens, com a verificação do comportamento a longo prazo. Também com a variação da dimensão dos grãos dos processos. No caso de rejeito de mineração, a variação com o rejeito fino ou o rejeito grosso. No caso de materiais finos a consolidação a longo prazo é possível uma avaliação sobre os comportamentos e resistências que podem ser adquiridas. É sugerido também a compreensão do comportamento mecânico do material de enchimento antes e após algum processo de adensamento (ensaios de permeabilidade, edométricos, ou complementarmente, de compressão triaxial).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682 (2009): Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122 (2022): Projeto e execução de fundações. Emenda 1 25/03/2022. Rio de Janeiro. 2022. ISBN 978-85-07-02271-8.
- ANM - Agência Nacional de Mineração (2020), Resolução nº 32, 11 de maio de 2020.
- ANM - Agência Nacional de Mineração (2023), Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração – SIGBM:
<https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>
- Assis, A.P., Hernandez, H.M. & Colmanetti, J.P. (2003) Apostila de Barragens: Publicação G.AP-AA006/02 180 p
- Bauer, W. Westfall, G. D. Dias, H.; (2012); *Física para Universitários - Mecânica*, McGraw Hill; Brasil; ISBN 8-580-55095-5
- Beer, F. P. & Johnston JR. E. R. *Mecânica vetorial para engenheiros: estática* 5. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2006. 793 p. (n. 1). ISBN 85-346-0202-6.
- BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília, DF: Presidência da República, 2020.
- Cantré, S. (2002). Geotextile tubes-analytical design aspects. *Geotextiles and Geomembranes*, 20: 305–319.
- Cantré, S. & Saathoff, F. (2011). Design method for geotextile tubes considering strain - formulation and verification by laboratory tests using photogrammetry. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(3): 201–210.
- Cantré, S. & Saathoff, F. (2011). Design method for geotextile tubes considering strain e formulation and verification by laboratory tests using photogrammetry. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(3): 201–210.
- Carneiro, F. L.; (1993); análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos. editora UFRJ, Rio de Janeiro
- Castro, Nathalia P. B. de; (2020); Uso de tubos de Geotêxtil no controle de Erosão e Proteção de Patrimônio Histórico na Baía de Delaware, New Jersey-USA; XII Encontro GGGAITA 2020, Instituto tecnológico de Aeronáutica. Disponível em: <https://www.youtube.com/live/Y5XR7ivNoi0?si=BkWRIGI6MU2QWTXn>
- Costa, J.E. (1988) Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows, in *Flood geomorphology*. Org. por BAKER, V.R
- Das, B.M., Sobhan, K. (2014). *Fundamentos de engenharia geotécnica*. Tradução da 8. Ed norte-americana. São Paulo: Cenagage Learning, 562p
- DIAS, J. Alveirinho. *Movimentos de Massa*, (2006). Consult. 08 julho 2017. Disponível em: http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA4_MovMassa/GA43_tipos/Tipos.html
- Farias, M.M. (2014); *Elasticidade e plasticidade em Geotecnia*, notas de aula. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia; Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF.
- Foley, K. & Wright, A. (2017); *Mile Point Training Wall Configuration*; Proceedings of The Dredging Summit & Expo 2017 June 26-29, 2017 Vancouver
- Feynman, RP (1963). *The Feynman Lectures on Physics*. Reading, Massachusetts:

- Addison-UM Wesley.
- French, AP (1971). *Newtonian Mechanics*. London: Thomas Nelson and Sons, LTD.
- Gerscovich, D.; Danziger, B. R.; Saramago R. (2016). *Contenções: teoria e aplicações em obras*. 1ª edição, Oficina de Textos, Brasil.
- Gerscovich, D. (2013). *Estabilidade de Talude. Métodos de estabilidade*. 1ª edição, pp. 101-146, Oficina de Textos, Brasil.
- Gireli, T. Z.; (2008) *Modelação física em canal de geração de ondas regulares e irregulares para estudo de quebra-mar de enrocamento*; Tese de Doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 267 p.
- Górniak, J., Villard, P. & Delmas, P. (2016). Coupled discrete and finite-element modelling of geosynthetic tubes filled with granular material. *Geosynthetics International*, 23(5).
- Grau Sacoto, C. A. (2017). *Análise dos Esforços de Impacto de Debris Flows*. Dissertação MSc, COPPEUFRJ, Rio de Janeiro, 179 p.
- Grau Sacoto, C.A. & Nunes, A.L.L.S. (2018). *Análises de Forças de Impacto de Fluxos de Detritos*. 16CNG, Geotecnia, Riscos Naturais e Geotécnicos e Sustentabilidade, Açores, Portugal, 12 p.
- Grau Sacoto, C.A. & Nunes, A.L.L.S. (2018). *Análise de Modelos de Forças de Impacto de Fluxos de Detritos – Área de Testes Pieve di Alpago e Veltheim*; XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; COBRAMSEG 2018; Geotecnia e Desenvolvimento Urbano; ABMS; Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334899582_Analise_de_Modelos_de_Forcas_de_Impacto_de_Fluxos_de_Detritos.
- Guo, W., Chu, J., Nie, W. & Yan, S. (2014). A simplified method for design of geosynthetic tubes. *Geotextiles and Geomembranes*, 42: 421–427.
- Guo, W., Chu, J. & Yan, S. (2011). Effect of subgrade soil stiffness on the design of geosynthetic tube. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(3): 277–284.
- Hornsey, W., Scheirs, J., Gates, W.P. & Bouazza, A. (2010). The impact of mining solutions / liquors on geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2): 191–198.
- Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical J.*, N. 32, p. 610-623, 1995.
- Hungr, O.; Evans, S. G.; Bovis, M. J.; Hutchinson, J. N.; (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*; 7 (3): 221–238. doi: <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>
- Hungr, O. McDougall, S.; (2009) Two numerical models for landslide dynamic analysis, *Computers & Geosciences*, Volume 35, Issue 5, 2009, Pages 978-992, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.12.003>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300408000289>)
- ICOLD-International Committee on Large Dams. (2014). Bulletin 121 “Tailings Dams Risks of Dangerous Occurrences Lessons Learned From Practical Experiences”;
- Iverson; R. M.; LaHusen, R. G.; *Dynamic Pore-Pressure Fluctuations in Rapidly Shearing Granular Materials* (1989) *Science, New Series*, Vol. 246, No. 4931. (Nov. 10, 1989), pp. 796-799.
- Iverson, R M. and Denlinger R. P.; *Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain*; *Journal of geophysical research*, vol. 106, no. B1, pages 537-552, january 10, 2001
- Iverson RM, George DL. 2014; A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis. *Proc. R. Soc. A* 470: 20130819. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2013.0819>
- Jiang, Y.-J.; I. Towhata; (2012) *Experimental Study of Dry Granular Flow and Impact*

- Behavior Against a Rigid Retaining Wall; Rock Mechanics and Rock Engineering · July 2012; DOI: 10.1007/s00603-012-0293-3
- Jones, Edwin R (Rudy) e Childers, Richard L, Contemporary College Physics, Addison-Wesley, 1990. 2ª Ed. 1993.
- Kang, H. & Kim, Y. (2015). The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. *Nat. Hazards*.
- Kim, H.-J., Won, M.-S., Jamin, J. & Joo, J.-H. (2016). Numerical and field test verifications for the deformation behavior of geotextile tubes considering 1d and areal strain. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(2): 209–218.
- Kim, H.-J., Won, M.-S., Lee, J.-B., Joo, J.-H. & Jamin, J.C. (2015). Experimental study on pressures changes on infilling soil and geotextile drain in circular acrylic tube structure. *Geomechanics and Engineering*, 9(December 2016): 243–259.
- Kim, H.-J., Jamin, J. & Mission, J.L. (2013). Finite Element Analysis of Ground Modification Techniques for Improved Stability of Geotubes Reinforced Reclamation Embankments Subjected to Scouring. ASEM - Jeju, Korea, 2013.
- Kim, M., Filz, G.M. & Plaut, R.H. (2005). Two-chambered water-filled geomembrane tubes used as water barriers: experiments and analysis. *Geosynthetics International*.
- Koerner, G.R. & Koerner, R.M. (2006). Geotextile tube assessment using a hanging bag test. *Geotextiles and Geomembranes*, 24: 129–137.
- Kurovskaia, V., Vinogradova, T., Vasiakina, A. (2020). Comparison of Debris Flow Modeling Results with Empirical Formulas Applied to Russian Mountains Areas, *Open Journal of Geology* Vol.10 No.1, DOI: 10.4236/ojg.2020.101005
- Lopes dos Santos, J.M.B. (2017) Forças inerciais, *Rev. Ciência Elem.*, V5(1):005
- Lange, K., Rowe, R. & Jamieson, H. (2010). The potential role of geosynthetic clay liners in mine water treatment systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2): 199–205.
- Langhaar, Henry L.; (1962) Dimensional Analysis and Theory of Models; fifth printing, april, Digitized by the Internet Archive in 2019 with funding from Kahle/Austin Foundation; disponível em: [Dimensional analysis and theory of models : Langhaar, Henry L. \(Henry Louis\), 1909- : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive](#)
- Lawson, C. R. (2008). Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International*, 15, No. 6, 384–427. [doi: 10.1680/gein.2008.15.6.384]
- Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling, H.I. & Gilbert, P.A. (1996). Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects. *J. Geotechnical Engineering*, 122.
- Liu, G.S. & Silvester, R. (1977). Sand sausages for beach defense work (. 6th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Adelaide, Australia, 5-9 December 1977.
- Malík, J. (2009). Some problems connected with 2d modeling of geosynthetic tubes. *Nonlinear Anal.*, 10: 810–823.
- Malik, J. & Sysala, S. (2011). Analysis of geosynthetic tubes filled with several liquids with different densities. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(3): 249–256.
- Marangon; Marcio; (1992) Avaliação de pressões horizontais de empuxo de terra para condições de retro aterro irregular e com sobrecarga.
- Marchetti, Osvaldemar (2008), Muros de Arrimo, 1ª Edição. Editora Blucher. São Paulo-SP, Brasil.
- Moliterno, A. (1994). Muros de Arrimo. 2ª edição 1994, 6ª reimpressão 2010, Ed. Edgar Blucher.
- Massad, Faissal. (2010). Obras de Terra Curso básico de Geotecnia, 2ª Ed. Oficina de

Textos

- Motta, Victor Freire; (1972) Curso de teoria da semelhança.; Porto Alegre-RS; Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 154 p. ilustr.; editora da urgs.
- Nunes, A.L.L.S.; Sayão, A.S.F.J. (2014). Debris Flows e Técnicas de Mitigação e Convivência. 14CNG, Cong. Nacional de Geotecnia, Geotecnia nas infraestruturas, Covilhã, Portugal, pp. 83 – 123.
- Oh, Y.I. & Shin, E.C. (2006). Using submerged geotextile tubes in the protection of the e korean shore. *Coastal Engineering*, 53: 879–895.
- Ornelas, F. S. (2017). Estudo da vulnerabilidade física de estruturas afetadas por fluxo de detritos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM 292/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 148 p.
- Ortiz, R.N., Junior, O.S. & Ladchumanandasivam, R. (2003). Tubos de geotêxteis aplicados a obras de defesa costeira. II Congr. sobre Planej. e Gestão das Zo. Costeiras dos Países Expressão Port. IX Congr. Assoc. Bras. Estud. do Quaternário II Congr. do Quaternário dos Países Língua Ibéricas.
- Oshiro, R. & Alves, Marcílio. (2004). Scaling impacted structures. *Archive of Applied Mechanics*. 74. 130-145. 10.1007/s00419-004-0343-8.
- Palmeira, E.M., (2018). Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente
- Parab SR, Chodankar DS, Shirgaunkar RM, Fernandes, M, Parab AB, Aldonkar SS, Savoikar PP, (2011); Geotubes for Beach Erosion Control in Goa. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*; pp. 1013-1016
- Pilarczyk, K.W. (1994). Novel systems in coastal engineering geotextile systems and other methods., Road and Hydraulic Engineering Division. GA Delf, The Netherlands.
- Pilarczyk, K.W. (2000). Hydraulic and coastal structures in international perspective.
- Plaut, R. & Klusman, C. (1999). Two-dimensional analysis of stacked geosynthetic tubes on deformable foundations. *Thin-Walled Structures*, 34: 179–194.
- Plaut, R. & Suherman, S. (1998). Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes. *Acta Mechanica*, 218: 207–218.
- Plaut, R.H. & Filz, G. (2008). Deformations and tensions in single-layer and stacked geosynthetic tubes. The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition 2-5 March 2008, Cancun, Mexico, 382–389.
- Recio, J. & Oumeraci, H. (2007). Effect of deformations on the hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers. *Geotextiles and Geomembranes*, 25: 278–292.
- Recio, J. & Oumeraci, H. (2009). Process based stability formulae for coastal structures made of geotextile sand containers. *Coastal Engineering*, 56(5–6): 632–658.
- Ribeiro, L.F.M. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-005A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Saathoff, F., Oumeraci, H. & Restall, S. (2007). Australian and german experiences on the use of geotextile containers. *Geotextiles and Geomembranes*, 25: 251–263.
- Serway, Raymond A. & John W. Jewett Jr. Física para cientistas e engenheiros, v.1: mecânica. Tradução de Solange Aparecida Visconte. São Paulo: Cengage Learning, 2018. v. 1 . 504 p., il, col, 28 cm. ISBN 978852212706-1.
- Seay, P.A. & Plaut, R.H. (1998). Three-dimensional behavior of geosynthetic tubes. *Thin-Walled Structures*, 32: 263–274.
- Shin, E & Ahn, K & Oh, Y & Das, B. (2002). Construction and Monitoring of Geotubes. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. 12.

- Shin, E. & Oh, Y. (2007). Coastal erosion prevention by geotextile tube technology. *Geotextiles and Geomembranes*, 25: 264–277.
- Silvester, B.R. & Asce, M. (1986). Use of grout-filled sausages in coastal structures. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, 112(1): 95–114.
- Takahashi T. (2019): Fluxo de detritos: Mecânica, Previsão e Contramedidas. Routledge; 2ª edição.
- VALE (2019); Vale faz obras de contenção para aumentar segurança de comunidades próximas a barragens em nível 3 de emergência. Disponível em: [Vale faz obras de contenção para aumentar segurança de comunidades próximas a barragens em nível 3 de emergência - Vale](#)
- Valinhas; Alexandre & Moreira; João Bosco; (2020); Pós PUC Minas - LIVE - Tema: Barragem em CCR p/ Contenção de Rejeitos, Disponível em: <https://www.youtube.com/live/-mnstMIRanU?si=50MQZY8sKMkgyl9j>
- Vertematti, J. C. & Castro G. R. (2015); Manual Brasileiro de Geossintéticos 2ª edição atualizada e ampliada; cap 6; Editora Blucher; ISBN 978-85-212-0926-3.
- VIEL, Isabella do Nascimento. Uso de estacas metálica tubulares em estruturas de proteção de barragens de rejeito de mineração. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.
- Voellmy, A., 1955. Ober die Zerstorungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung (U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service).
- Yee, T. W., Zengerink, E. & Choi, J. C. (2007). Geotextile tube application for Incheon Bridge Project, Korea. Proceedings of Conference CEDA Dredging Days 2007, Rotterdam, The Netherlands, CD-ROM, 14 pp

Caracterização do rejeito de mineração:

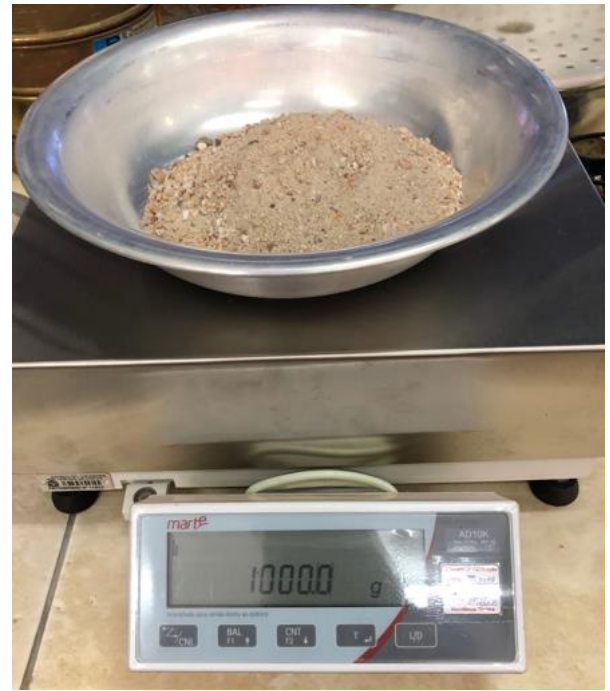


rejeito de mineração de ouro inerte

Determinação do teor de umidade						
Cápsula	peso cap (g)	cap+solo úmido (g)	cap+solo seco (g)	água (g)	solo seco (g)	h (%)
1	159	1649,9	1638,3	11,6	1479,3	0,78
2	167,9	1524,7	1505,7	19	1337,8	1,42
3	168,4	1892,2	1867,1	25,1	1698,7	1,48
média						1,23

Determinação do peso específico dos grãos com o equipamento: RICE TEST					
n° ensaio	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	p2 - p1
	Peso panela	Peso pan + solo seco	Peso pan + solo + água	Peso pan + água	(p4-p1) - (p3-p2)
1	793,6	2372,6	6247,5	5259,9	2,670
2	793,6	2679,2	6440,7	5259,9	2,675
3	793,6	2496,6	6327,3	5259,9	2,679
média geral					2,675


* a diferença entre duas não pode diferir mais que 0,009g



Jogo de peneiras calibradas e certificadas TCE-TO



Rice Test: peso da panela e da panela com água destilada

 ANM Agência Nacional de Mineração		
ID Barragem	Nome da Barragem	Nome do Empreendedor
8421	5 (MAC)	VALE S.A.
9353	Água Fria	Topazio Imperial Mineração Comercio e Industria Ltda
9037	Alemães	GERDAU ACOMINAS S/A
9632	Área IX	VALE S.A.
8215	B3/B4	VALE S.A.
9091	Bacia 01	ARCELORMITTAL BRASIL S.A.
9121	Bacia de Finos da Mina do Cerro	Copelmi Mineração Ltda
9120	Bacia de Finos da Mina do Recreio	Copelmi Mineração Ltda
8277	Baixo João Pereira	VALE S.A.
8753	Barragem 01	JACOBINA MINERACAO E COMERCIO LTDA
8820	Barragem 01	SAMACA FERROS LTDA
8941	Barragem 03 - Zé da Grota	Minerita Minérios Itaúna Ltda.
8357	Barragem 1	João de Pinho Novo Filho
8345	Barragem 2	MOSAIC FERTILIZANTES P&K LTDA.
9834	Barragem 3	COOPERATIVA DOS GARIMPEIROS DO VALE DO VILA NOVA
8505	Barragem B1	MINERACAO GERAL DO BRASIL S/A
9317	Barragem B1 - Mina Ipê	MINERACAO MORRO DO IPE S.A.
9319	Barragem B1-Auxiliar - Mina Tico-Tico	MINERACAO MORRO DO IPE S.A.
8507	Barragem B2	MINERACAO GERAL DO BRASIL S/A
8694	BARRAGEM B2	MINERIOS NACIONAL S.A.
9320	Barragem B2 - Mina Tico-Tico	MINERACAO MORRO DO IPE S.A.
8693	BARRAGEM B2 AUXILIAR	MINERIOS NACIONAL S.A.
8574	BARRAGEM B4	CSN MINERACAO S.A.
8496	Barragem B5	MOSAIC FERTILIZANTES P&K LTDA.
8782	Barragem Central	SAFM MINERACAO LTDA
8849	Barragem de Aredes	SAFM MINERACAO LTDA
8765	Barragem de Germano	SAMARCO MINERACAO S.A. EM RECUPERACAO JUDICIAL
8955	Barragem de Rejeitos	ARCELORMITTAL BRASIL S.A.
8690	BARRAGEM DO VIGIA	CSN MINERACAO S.A.
8291	Barragem MSG	MINERACAO SERRA GRANDE S A
9000	BARRAGEM REJEITOS	Extrativa Metalurgia S A
9186	Barragem Sul	VETRIA MINERACAO S.A.
9187	BARRAGEM USINA/CIP - LAGO 1 E 2	FAZENDA BRASILEIRO DESENVOLVIMENTO MINERAL LTDA
9188	BARRAGEM USINA/CIP - LAGO 3	FAZENDA BRASILEIRO DESENVOLVIMENTO MINERAL LTDA
8209	Campo Grande	VALE S.A.
8751	Cava do Germano	SAMARCO MINERACAO S A
8318	Conceição	VALE S.A.
9765	Dique do Grotão	BURITIRAMA MINERACAO S.A.
8207	Doutor	VALE S.A.
9533	ED Monjolo	VALE S.A.
9532	ED Vale das Cobras	VALE S.A.
8283	Forquilha I	VALE S.A.
8286	Forquilha II	VALE S.A.
8290	Forquilha III	VALE S.A.
8302	Grupo	VALE S.A.
8355	Ipoema	VALE S.A.
9149	Jacaré Inferior	COOPERATIVA DOS GARIMPEIROS DE SANTA CRUZ - COOPERSANTA
9151	Jacaré Superior	COOPERATIVA DOS GARIMPEIROS DE SANTA CRUZ - COOPERSANTA
9378	MBR II SUL	MINERACAO BOM RETIRO II EIRELI
9536	Pilha 01	AVG EMPREENDIMENTOS MINERARIOS S.A.
9537	Pilha 02	AVG EMPREENDIMENTOS MINERARIOS S.A.
8332	Pontal	VALE S.A.
8710	Sítio Horii	EMPRESA DE MINERACAO HORII LTDA
8577	SP2_3	Mineracao Rio do Norte S A
8590	SP6	Mineracao Rio do Norte S A
9693	SR.PEDRINHO	COOPERATIVA DE MINERACAO DOS GARIMPEIROS DE PONTES E LACERDA - COMPEL
8389	Sul Superior	VALE S.A.
9029	Taboquinha 01 - Crente	ESTANHO DE RONDONIA S/A
9030	Taboquinha 02 - Serra Azul	ESTANHO DE RONDONIA S/A
8610	TANQUE DE LAMA	CONCRE SAND MINERACAO LTDA
9157	Unidade I	CMOC BRASIL MINERACAO, INDUSTRIA E PARTICIPACOES LTDA.
9471	Unidade IB	CMOC BRASIL MINERACAO, INDUSTRIA E PARTICIPACOES LTDA.
9100	Vargem Grande	VALE S.A.
8857	Volta Grande 2	AMG BRASIL S.A.
9534	Xingu	VALE S.A.

Cálculo de Parâmetros Kang e Kim (2015)

$$S = \Delta h/L$$

Cálculo Inclinação (S)

unid.

Comprimento (L)	1,50	m
Varição da Altura (ΔH)	2,50	m
Inclinação (S)	1,67	

$$V = A \times h$$

Cálculo Volume

Área (A)	0,098	m ²
Altura (h)	0,08	m
Volume (V)	0,01	m ³

Cálculo Vazão de Pico

$$Q_P = 0,1 \cdot V^{0,833}$$

Total Vazão de Pico	0,00176	m ³ /s
---------------------	---------	-------------------

Cálculo da Velocidade $v = 2,1 \cdot Q_p^{0,33} \cdot S^{0,33}$

Total Velocidade (V)	0,307	m/s
	18,40	m/min
	1,104	Km/h

Cálculo da Pressão de Impacto $P_t = \left(\frac{1}{2}\right) \rho_{df} g h + \rho_{df} v^2$ (kPa)

densidade média do material	1.000,00	kg / m ³
Velocidade do Fluxo (V)	0,307	m/s
Profundidade de fluxo (h)	0,08	m
Aceleração da Gravidade (g)	9,80665	m/s ²

Pressão de Impacto (PI) 94,41 kPa



Fixação dos vidros com silicone estrutural cura de 7 dias para retirada de cimbramento



Rampa segmentada – a inclinação foi ajustada nos ensaios para $30^\circ + 60^\circ$

**HUESKER**

Ideen. Ingenieure. Innovationen.

Rua Romualdo Davoli, 375 - Centro Empresarial Eldorado
São José dos Campos - SP - Brasil / CEP: 12238-577
Tel.: +55 (12) 3903-9300 / Fax: +55 (12) 3903-9301
huesker@huesker.com.br / www.huesker.com.br**Especificações Técnicas das Geofomas SoilTain DW****SoilTain® DW 105/105 DW**


Descrição do material: Geoforma confeccionada a partir de tecido de polipropileno de alta tenacidade, ultra-estabilizado anti-UV, cuja principal função é realizar o confinamento de partículas sólidas de forma provisória ou permanente reduzindo impactos ambientais. Pode ser confeccionada a partir de tecidos com resistência variando de 25 a 250 kN/m.

Principais Aplicações: Dessecagem de lodos e lamas provenientes de estações de tratamento de água, de esgoto, ou de efluentes industriais.

Propriedades (*)	SoilTain 105/105 DW
Matéria-Prima Principal	Laminetes PP ultra-estabilizado anti-UV
Gramatura (ISO 9864)	$\geq 440 \text{ g/m}^2$
Resistência à tração nominal (ISO 10.319)	
- Direção longitudinal	105 kN/m
- Direção transversal	105 kN/m
Deformação na resistência nominal (ISO 10.319)	
- Direção longitudinal	$\leq 10,0 \%$
- Direção transversal	$\leq 10,0 \%$
Abertura de filtração (O ₉₀) (ISO 12.956)	$240 \mu\text{m}$ $\pm 40 \mu\text{m}$
Permeabilidade (ISO 11.058)	$20 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ $\pm 2 \times 10^{-3} \text{ m/s (= 20 L/s/m}^2\text{)}$
Apresentação dos módulos	
Bocais de preenchimento	
- Diâmetro	0,3m
Costuras	
- Circunferenciais e inferior	Costura sextupla, tipo sobreposta, com linha de alta tenacidade.
- Extremidades	Tipo Prayer, seis linhas de costura de poliéster de alta tenacidade e costura de reforço.


(*) Materiais Certificados ISO 9001. (**) Comprimentos e perímetros sob medida são possíveis.

Ensaio de Resistência à tração: - Direção longitudinal (MD)



DAF P-43 224-00-88-06

Stripe-tensile test
 Test No : P112/960



Test Date : 15.12.2011

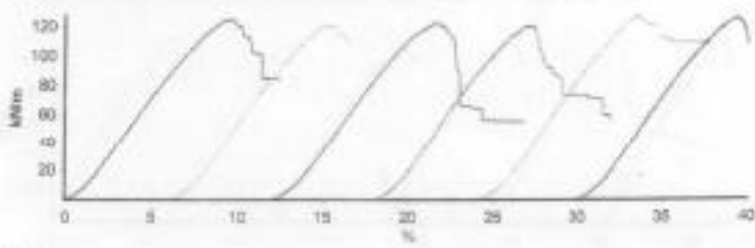
Article-No. : PP105/105MDW

Order/Wrap No. : 10413/0	Calcut. : 5.470	Fin. con. : mm
Weight/gm ² : 470	Threads/specimen : 189.000	mm
Thickness/mm : 1,819		
Width/cm : 520 520	test width : 200,000	mm
Test norm : ASTM D 4856-09	initial load : 22,2	dMN

date of receipt of the specimen : 14.12.2011	F1 = Force at : 2 %
Method of sampling : DIN EN ISO 9662	F2 = Force at : 3 %
Condition of specimen : dry	F3 = Force at : 5 %
Type of testing machine : Impact 500	ε1 = extension at : 100 (mm)
Type of sample : hydraulic clamp	
conditioning : D 1778 21°C/65%	

Test direction : MD

No.	specimen	F-max	ε-max	F1	F2	F3	ε1	mass-ir.	Test speed	comment
	date	kN/m	%	MNm	MNm	MNm	%	mm	%/Min	
1	2017,7	125,0	0,9	22,8	36,2	72,1	7,2	43,0	10,5	
2	2449,4	122,5	8,9	19,5	27,9	71,6	7,4	45,3	10,9	
3	2482,1	124,1	0,7	20,1	35,3	68,8	7,4	43,0	10,6	
4	2451,0	121,6	0,3	20,7	38,1	73,1	7,3	42,8	10,3	
5	2568,0	127,2	5,4	17,2	31,9	69,2	7,4	45,7	11,1	
6	2537,8	128,9	0,4	21,1	38,1	73,0	7,2	43,7	10,4	



Statistic :

no	specimen	F-max	ε-max	F1	F2	F3	ε1	mass-ir.	Test speed
	date	kN/m	%	MNm	MNm	MNm	%	mm	%/Min
2	2449,4	124,82	8,30	25,16	36,00	71,20	7,33	44,00	10,47
s	50,460	2%	0,279	1,79	1,891	1,97	0,090	1,25	0,270
V	2,823	2,000	2,97	8,821	9,014	2,706	1,113	2,839	2,911


Modification of procedure:
 information:

The test results only relate to the above material.
 This test report may not be reproduced in part without permission of the lab.

date : 15.12.2011 Test executed by : J.R. Laboratory manager : (J.Rietkötter) page 1 of 2

HUESKER Synthetic GmbH - Fabrikstraße 13 - 15 - D-48712 Gescher
 Phone + 49 (0) 25 42/701-0 - Fax + 49 (0) 25 42/701-499


- Direção transversal (CMD)



01.7-01.228-00-01-01

Stripe-tensile test

Test No : P112/980



Test Date : 15.12.2011

Order/Work No. : 1041302
 Weight g/m² : 475
 Thickness mm : 1,010
 Width mm : 520 525
 Test norm : ASTM D 4525-09

Article-No. : PP105/105MDW

Calcut. : 4,990
 Threads/specimen : 06,000
 Test width : 200,000
 Initial load : 22,2


Thickness : 1,010 mm
 Test width : 200,000 mm
 Initial load : 22,2 daN

Date of receipt of the specimen : 14.12.2011
 Method of sampling : DIN EN ISO 9866
 Condition of specimen : dry
 Type of testing machine : Inspekt 630
 Type of clamps : hydraulic clamps
 conditioning : D 1778 21°C/65%

F1 = Force at : 2 %
 F2 = Force at : 5 %
 F3 = Force at : 8 %
 ε1 = Extension at : 100 kN/m

Test direction : CMD

No.	specimen daN	F-max kN/m	ε-max %	F1 kN/m	F2 kN/m	F3 kN/m	ε1 %	mod.-ln. mm	Test speed %/min	comment
1	2288,8	114,4	5,4	44,3	88,6	95,1	5,6	47,1	10,0	
2	2277,2	111,4	5,6	39,2	78,3	92,7	5,6	46,3	10,3	
3	2246,0	112,3	5,7	38,6	77,1	86,4	5,1	45,6	10,7	
4	2220,0	114,7	6,9	41,3	82,2	95,0	5,6	46,5	10,0	
5	2246,0	112,4	6,5	41,3	82,9	95,7	5,6	39,7	10,1	
6	2295,1	114,5	6,0	43,7	83,2	98,4	5,8	41,7	10,1	



Statistic :

n=0	specimen daN	F-max kN/m	ε-max %	F1 kN/m	F2 kN/m	F3 kN/m	ε1 %	mod.-ln. mm	Test speed %/min
7	2285,30	113,26	6,02	41,82	81,1	94,20	5,77	45,86	10,33
s	28,581	1,429	0,172	2,16	3,668	2,707	0,267	3,339	0,301
V	1,262	1,26	2,263	0,239	4,362	2,873	0,562	7,98	2,914

Modification of procedure:
 Information:

The test results only relate to the above material.
 This test report may not be reproduced in part without permission of the lab.

date : 15.12.2011 Test executed by: J. Rieckötter Laboratory manager (J. Rieckötter) *J. Rieckötter*

page 2 of 2

mas0980e HUESKER Synthetic GmbH - Fabrikstraße 12 - 15 - D-45712 Gescher
 Phone + 49 (0) 25 42701-0 - Fax + 49 (0) 25 42701-499



HUESKER

Ideen. Ingenieure. Innovationen.

Rua Romualdo Davoli, 375 - Centro Empresarial Eldorado
São José dos Campos - SP - Brasil / CEP: 12238-577
Tel.: +55 (12) 3903-9300 / Fax: +55 (12) 3903-9301
huesker@huesker.com.br / www.huesker.com.br

Ensaio de Resistência à tração da costura tipo sobreposta sêxtupla



Deutsche
Akreditierungsstelle
D-PL 15209-01-00

Seam-tensile test

Test No : P143/116



HUESKER

Ideen. Ingenieure. Innovationen.

Test Date : 01.12.2014

Article-No.: PP105/105DW

i-Order/Warp No: : F11
Weight g/m² :
Thickness mm :
Width cm :
Test norm : DIN EN ISO 10 321 0196

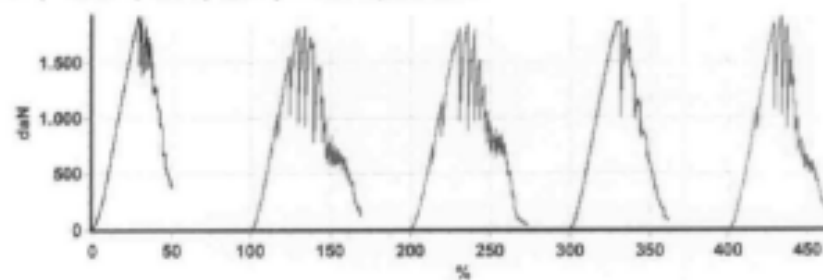
Calcut : 0,000 Thr/cm
Threads/specimen : 0,000
Burdles/specimen : 0,000
AP-test width : 200,000 mm
Initial load : 10 daN

date of receipt of the specimen : 28.07.2014
Method of sampling : DIN EN ISO 9862
Condition of specimen : dry
Type of testing machine : Inspect 600
Type of clamps : hydraulic-clamps
conditioning : ISO 554 20°C/65%

Mass-Ie : 100,000
Seam thread :
Seam type :
Seam model :
Seam machine :

Test direction :

No.	specimen daN	F-max KN/m	e-max %	Test speed %/Min	Comment
1	1908,3	98,4	29,1	24,2	fabric-failure
2	1828,1	91,3	33,3	21,2	fabric-failure
3	1841,0	92,1	34,8	21,2	fabric-failure
4	1855,5	93,3	31,0	20,4	fabric-failure
5	1920,2	96,0	32,5	19,9	fabric-failure



Statistic :

n/D	specimen daN	F-max KN/m	e-max %	Test speed %/Min
Σ	1872,22	93,82	32,14	21,38
s	41,081	2,039	2,185	1,871
V	2,194	2,178	6,798	7,815

Modification of procedure:

Information:

The test results only relate to the above material.

This test report may not be reproduced in part without permission of the lab.

date : 01.12.2014 Test executed by: *S.Rohring* Laboratory manager: *Thuse*
(S.Rohring) page 1 of 1


pne0116x

HUESKER Synthetic GmbH - Fabrikstraße 13 - 15 - D-48712 Gescher
Phone + 49 (0) 25 42/701-0 - Fax + 49 (0) 25 42/701-499

Ensaio de Abertura de Filtração

18/11/2016 15:17 +55-2542-700-482 HUESKER SYNTHETIC DK 5 02





Test-No.: P107/104
Test date: 14.03.2016

Determination of the characteristic opening size in accordance to DIN EN ISO 12 858 6/98
wet - sieving principle

ARTICLE	PP 105/155 DK9
Material	
weight (g/m ²)	497
colour	black
Customer	
Date of receipt of the specimen	12.03.2016
Internal Batch-No.	
Quantity	
Pieces /Roll. No. tested	1/3162/30
Pieces /Roll. No. delivered	
Comment	P105/205

Testing Machine
Sewing machine: Fritsch analysete 300
sieved area: 1.000 cm² vertical sieve motor: 1.500mm
sieving time: 1.000 sec ball quantity: 140g
Test Climate
Method of sampling: ISO 664 20°C/65%
Modification of procedure: DIN EN ISO 9942

Particle size µm	sum. mass passed g	%	φ 90 mm
0.250	215.8300	85.56	<u>0.250</u>
0.350	220.7300	91.12	
particles passed			
total g		252.8190	

The test results only relate to the above material.
This test report may not be reproduced in part without permission of the test laboratory.

Test executed by: K. Zwick Date: 24.3.16 Laboratory manager: T. M. ...

HUESKER SYNTHETIC DK9 - Testwerke GmbH - Sieb- und Mischtechnik
Postfach 30 00 40 10 10 - Tel. +49 (0) 25 42 70 1 - 482

Ensaio de Permeabilidade

19/11/2016 15:17 +49-2542-701-482 HUESKER SYNTHETIC DE S. 01

Test No.: P106/111
Test Date: 18.03.2016

HUESKER Test Laboratory

Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load, acc. to DIN EN ISO 11068 6-09

Article	PP 106/108 DW		
Material / color	black		
Weight g/m ²	467		
Thickness mm	1,881		
Origin / Supplier			
Date of delivery/receipt	18.03.2016		
I-Order/Warp-No.	10162001 P182360		

Conditioning	ISO 604	testing apparatus	Permeometer	GeoMess
Sampling Method	DIN EN ISO 9902	hydr. difference of height	0 < h < 500 mm	
No. of Specimen	5	Size of specimen	Ø	75.0 mm
		Size of tested area	Ø	57.8 mm

Test specification
Tap water will flow through a single layer, uncoated and wrinkle free specimen. The test gives a value for the permeability of the specimen dependent from the hydraulic difference in height h. The evaluation is being done with the GEOS Flow-K software for processing of measurements.

modification of procedure

Specimen No.		V_1 (ml) at h = 50mm		
		using water pressure altitude		
		v200(mm), q200(h,m ²)		
1		33,110		tested area 58,1cm ² thickness mm 1,88 water temp. 18,00 Rt. 1,0160
2		32,140		
3		32,170		
4		32,130		
5		32,180		
	Σ	161,730		
	min	32,130		
	max	33,110		



The test report may not be reproduced in part without permission of the lab.

Test executed by: S. Guder Date: 19.3.16 Laboratory Manager: *[Signature]*

HUESKER Syn. und Techn. Parkstraße 1115 3-48713 Soester
Phone +49 (0) 25 42771-0 Fax +49 (0) 25 42771-428

VERBODEN TOEGANG
A.12.0113 Rev. 1.1

RECEBEMOS DE HUESKER LTDA OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INSCRITA ABAIXO		NF-e Nº 11051 SÉRIE: 1
DATA DE RECEBIMENTO	IDENTIFICAÇÃO E ASSINATURA DO RECEBEDOR	

 HUESKER HUESKER LTDA Av. Dr. Sebastião Honório de Castro Pinheiro, 800 - Galpão E Condomínio Industrial Contour - Chácara Rosalina São José dos Campos - SP CEP: 12.218-363 Telefone: 123933000	DANFE		 Chave de acesso 3521 1102 5458 7689 0108 5500 1000 0310 5311 7206 8464 Consulta de autenticidade no portal da NF-e http://www.nfe.br/valida.asp?portal/ Protocolo de emissão de NF-e 135211373883561 - 18/11/2021 14:40:26
	DOCUMENTO AUXILIAR DA NOTA FISCAL ELETRÔNICA 0 - ENTRADA 1 - SAÍDA Nº 11051 Série: 1 Página: 1 / 1		
NATUREZA DA OPERAÇÃO Outros Serviços			
INSCRIÇÃO ESTADUAL 44520851119	RE SUPOSTO TERC. TERC. TERC.	CNPJ 02.565.876/0001-00	

DESTINATÁRIO REMETENTE		CNPJ / CPF 078.971.171-68	DATA DE EMISSÃO 18/11/2021
NOME / RAZÃO SOCIAL FLAVIO DA SILVA ORNEAS		RAZÃO / DISTRITO CENTRO	CEP 11.628-526
ENDEREÇO RUA 22 ALAMEDA 10, LOTE 31		MUNICÍPIO Palmas	UF TO
FONE / FAX 6700429949		INSCRIÇÃO ESTADUAL	HORA DA SAÍDA

FATURA / DUPLICATA

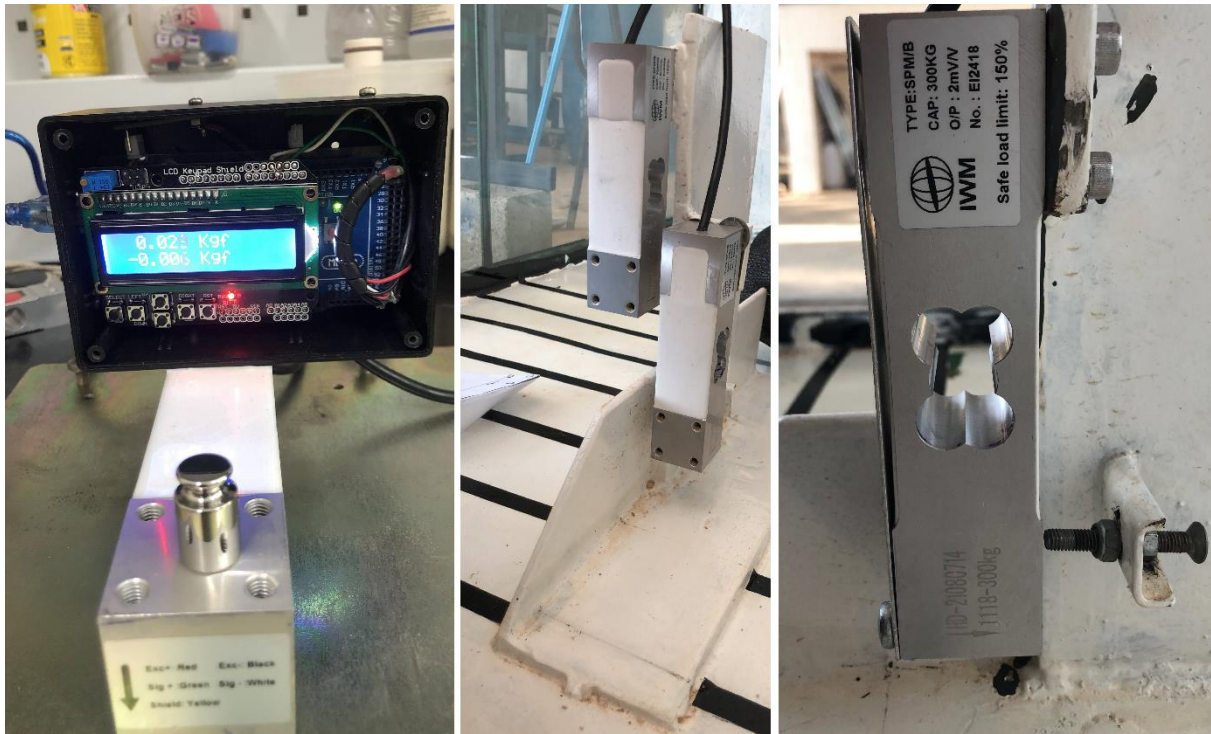
CALCULO DO IMPOSTO	
BASE DE CALCULO DO ICMS 255,20	VALOR DO ICMS 17,86
ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00	VALOR DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00
VALOR DO ICMS 255,20	VALOR TOTAL DOS PRODUTOS 255,20
VALOR DO FRETE 0,00	VALOR DO IPI 0,00
VALOR DO SEGURO 0,00	VALOR TOTAL DA NOTA 255,20

TRANSPORTADOR / VEHICULOS TRANSPORTADOS		RAZÃO SOCIAL EMPRESA BRASILEIRA DE TELECOMUNICAÇÕES S.A	FRETE POR CONTA D Control. Remat.CIF	CODIGO ANTT	PLACA DO VEICULO	UF	CNPJ / CPF 33.591.866/0001-29
ENDEREÇO RUA DOS ENGLISH 600 BELA VISTA 01.328-080		MUNICÍPIO São Paulo	UF SP	INSCRIÇÃO ESTADUAL 110208571119			
QUANTIDADE 1	ESPÉCIE Vidiana	MARCA	NUMERAÇÃO	PESO BRUTO 8,00 Kg	PESO LÍQUIDO 8,00 Kg		

DADOS DO PRODUTO / SERVIÇO													
COD. PROD.	DESCRIÇÃO DO PRODUTO / SERVIÇO	NCM	CST	CEP	UNID.	QUANT.	V. UNITÁRIO	V. TOTAL	ICMS	V. ICMS	V. IPI	ALIQ. ICMS	ALIQ. IPI
3004	NOTE PP 305103 DF (fornecida tanto de PP)	8407.20.00	0.00	4999	M	0,54	26,7500	255,20	255,20	17,86	0,00	7,00	0,00

INSCRIÇÃO MUNICÍPIAL 409713	VALOR TOTAL DOS SERVIÇOS 0,00	BASE DE CALCULO ISENT	VALOR DO ISENT 0,00
--------------------------------	----------------------------------	-----------------------	------------------------

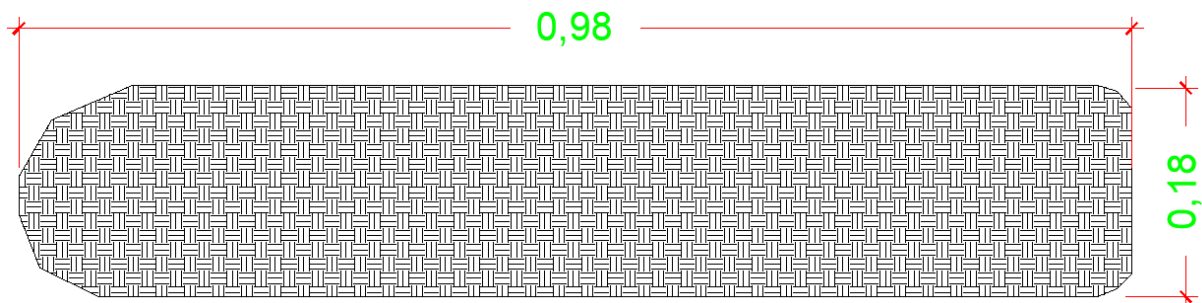
DADOS ADICIONAIS	RESERVADO AO FISCO
INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES LOCAL DE ENTREGA O MESMO DO FATURAMENTO. ICMS Destino: R\$ 28,08 ICMS Remetente: R\$ 0,00 Valor Aparentado dos Tributos - R\$ 45,94	



(a) calibração das células, (b) Posição no suporte inicial, (c) escudo para strain gauge



Configuração das células, cronometro, marcos de distância e profundidade



Área de projeção da barreira de contenção com tubo de geotêxtil. No entanto, foi definido a pressão em função da profundidade da vazão do fluxo x a área do canal.



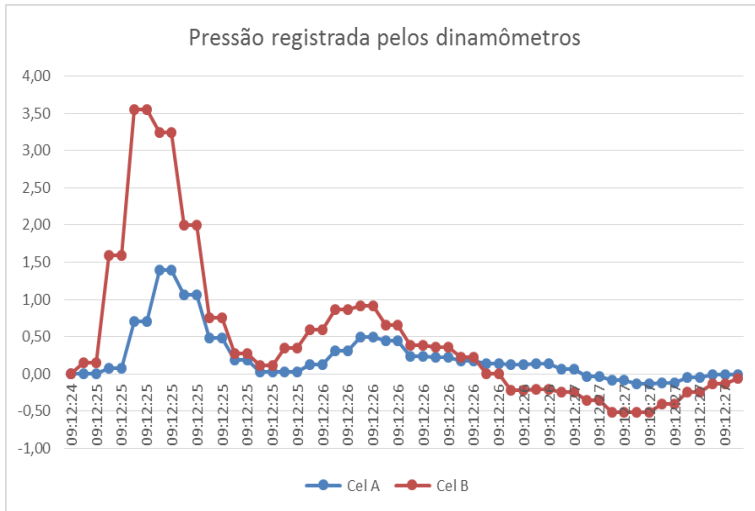
Experimento BTG1 – Data: 10/05/2022 Velocidade: Tempo inicial de percurso



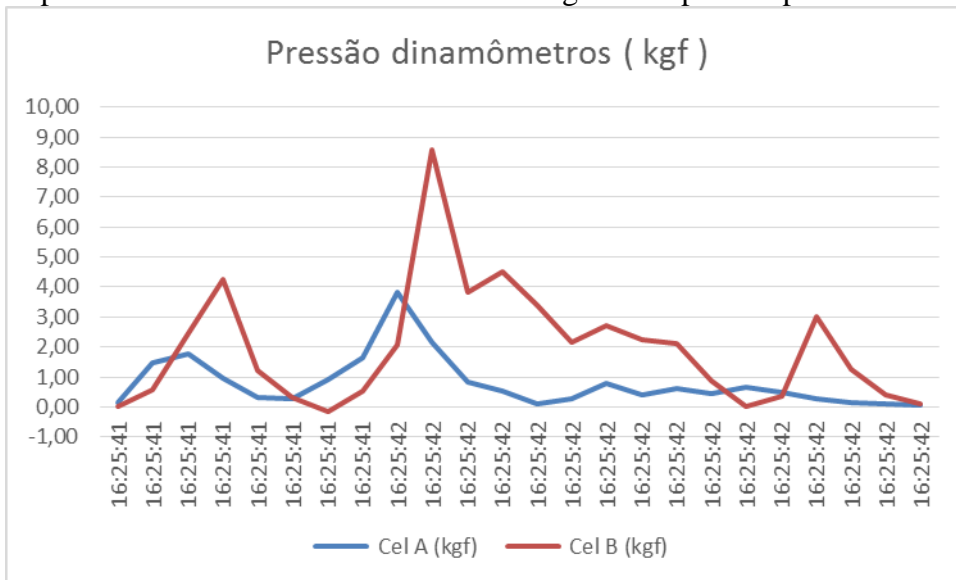
Tempo final do percurso



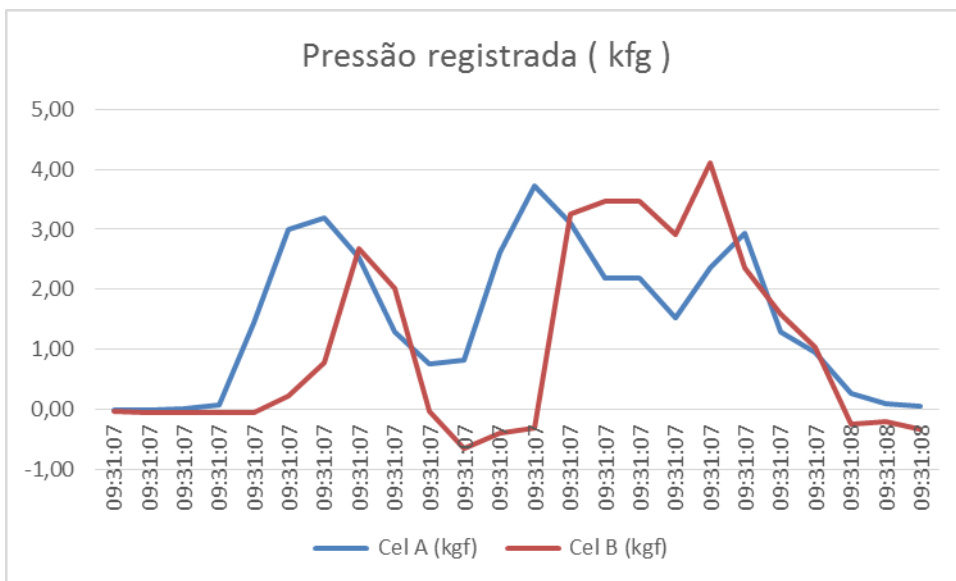
monitoramento do experimento análise de falha



Experimento BTG1 – Data: 10/06/2022 registro de pico de pressão da onda de impacto



Experimento BTG1 – Data: 14/06/2022 registro de pico de pressão da onda de impacto



Experimento BTG1 – Registro de pico de pressão da onda de impacto

EXPERIMENTOS Tubo Geotextil Diâmetro 23,56 cm - BTG 1

Dimensões (cm)	
Diâmetro	23,56
Largura	27,80
altura	18,60

Massas (kg)	
Geotextil	0,72
Tubo cheio	68,48

Parâmetro	
Razão Ht/Lt	0,67
LT / Dt	1,18

comprimento do contato:	87	cm
Largura do contato na base (cm)	17,50	cm
área de contato	1.522,5	cm ²

Coefficiente de atrito estático: 0,00037 /cm²
 Atrito total: 0,6

Data	Constantes do Fluxo			Variáveis do Fluxo			Vazão Estimada (cm ³ /s)	Pressão do Fluxo		Pressão Impacto estimada	Variáveis do Barramento											Obs.		
	energia potencial		energia cinética		Velocidade			Pressão kgf			Deslocamento e deformações longitudinais (mm)													
	Vol d ³	Massa kg	Alt (cm)	Vol m ³	Massa (kg)	t inicial		t final	V (m/s)		Cel A	Cel B	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm	90 cm		média	%
10/6/22	100	100	8,00	0,08	78,40	31,536	31,776	4,167	32,667	8,57	3,84	82,04	40	37	37	36	36	37	37	40	39	37,67	22%	ok
14/6/22	120	120	8,00	0,08	78,40	35,152	35,685	1,876	14,709	3,73	4,11	54,59	274	268	260	261	255	250	250	242	242	255,8	146%	ok
14/6/22	110	110	8,00	0,08	78,40	18,722	18,905	5,464	42,842	2,36	3,93	43,80	5	4	2	1	1	1	0	0	0	1,556	1%	ok
14/6/22	110	110	8,00	0,08	78,40	33,700	33,952	3,968	31,111	6,78	7,89	102,14	69	66	64	63	62	59	56	54	51	60,44	35%	ok
20/6/22	110	110	8,00	0,08	78,40	1,227	1,463	4,237	33,220	4,00		27,85	55	51	50	51	51	51	53	54	52,11	30%	ok	
21/6/22	110	110	7,00	0,07	68,60	17,010	17,302	3,425	23,493	1,87	0,46	42,90	10	6	5	5	4	4	4	3	3	4,889	3%	ok
22/6/22	110	100	8,00	0,08	78,40	51,306	51,530	4,464	35,000	4,03	1,23	79,37	65	63	61	60	57	56	54	53	57	58,44	33%	ok
23/6/22	110	110	8,00	0,08	78,40	1,763	1,963	5,000	39,200	1,18	0,82	30,18	70	75	83	88	94	102	105	111	116	93,78	54%	ok
29/6/22	110	110	7,00	0,07	68,60	21,106	21,426	3,125	21,438	0,55	0,19	13,62	8	9	9	10	10	10	9	9	9	9,222	5%	ok
30/6/22	100	100	7,00	0,07	68,60	34,593	34,967	2,674	18,342	0,56	0,15	13,07	15	14	13	12	10	10	9	6	5	10,44	6%	ok
30/6/22	110	110	7,00	0,07	68,60	42,589	42,845	3,906	26,797	2,41	0,59	55,23	177	177	175	174	173	173	171	171	171	173,6	99%	ok
1/7/22	110	110	8,00	0,08	78,40	47,437	47,701	3,788	29,697	10,14	0,73	164,01	55	53	49	46	43	40	36	30	28	42,22	24%	ok
4/7/22	110	110	7,00	0,07	68,60	28,124	28,552	2,336	16,028	0,60	0,49	13,34	3	4	6	9	10	10	12	15	15	9,333	5%	ok
4/7/22	110	110	8,00	0,08	78,40	37,706	37,946	4,167	32,667	5,03	2,96	92,17	77,5	75,9	74,7	73,8	72,6	72,7	71,4	69,6	73,9	73,57	42%	ok
4/7/22	110	110	8,00	0,08	78,40	45,852	46,035	5,464	42,842	6,18	5,97	140,16											0%	bat. fundo
6/7/22	110	110	8,00	0,08	78,40	29,271	29,579	3,247	25,455	3,24	1,56	55,37	44	43	42	43	44	45	44	44	44	43,67	25%	ok
6/7/22	110	110	8,00	0,08	78,40	22,359	22,558	5,025	39,397	5,66	5,21	125,40											0%	bat. fundo
6/7/22	110	110	8,00	0,08	78,40	50,126	50,418	3,425	26,849	1,52	0,69	25,49	100	95	86	81	75	69	60	54	50	74,44	43%	ok
7/7/22	110	110	8,00	0,08	78,40	1,450	1,666	4,630	36,296	4,89	2,33	83,29	103	100,6	102	101,7	104,3	106	106	109,7	104,9	104,2	60%	ok
12/7/22	110	110	7,00	0,07	68,60	52,649	53,093	2,252	15,450			-	44	39	39	39	39	39	38	38	40	39,44	23%	perda dados
14/7/22	110	110	8,00	0,08	78,40	36,504	36,740	4,237	33,220	4,21	4,15	96,44	122,9	120,6	120,8	120	119,6	118,2	117,9	117,8	115,6	119,3	68%	ok
15/7/22	100	100	7,00	0,07	68,60	14,045	14,285	4,167	28,583	4,75	2,14	84,31	129,7	128,2	126,4	124,5	124	124,4	124,4	119,6	119,2	124,5	71%	ok
18/7/22	100	100	7,00	0,07	68,60	27,651	27,923	3,676	25,221	1,68	0,91	31,69	32	29	26	24	23	22	20	18	18	23,56	13%	ok
18/7/22	100	100	7,00	0,07	68,60	34,766	35,007	4,149	28,465	3,77	2,22	73,30	35	32	32	32	30	28	27	24	24	29,33	17%	ok
19/7/22	100	100	7,00	0,07	68,60	43,118	43,346	4,386	30,088	4,52	1,90	78,56	71,9	71	70,1	69,9	71,7	69,9	68,1	59,2	63,3	68,34	39%	ok
20/7/22	100	100	7,00	0,07	68,60	56,569	56,790	4,525	31,041	4,06	2,77	83,58	168,1	164,6	164,2	160,3	163,8	160,7	158,3	153,2	153	160,7	92%	ok
22/7/22	100	100	8,00	0,08	78,40	7,454	7,698	4,098	32,131	5,62	2,92	98,52	84,2	80,8	79,5	79	78,1	78,8	74,8	71,6	74,7	77,94	44,54%	ok
26/7/22	100	100	7,00	0,07	68,60	30,248	30,515	3,745	25,693	5,46	2,14	93,00	112,3	112,4	111,7	110,6	110,5	109,7	106,6	103,3	103,3	108,9	62,25%	ok
27/7/22	100	100	8,00	0,08	78,40	29,894	30,138	4,098	32,131	5,48	2,61	93,33	161,1	160,8	159,3	157,9	159,1	158,1	156,4	152,3	153,3	157,6	90,05%	ok

EXPERIMENTOS BTG 2

Dimensões (cm)	
Diâmetro	11,46
Largura	13,00
altura	10,50
Parâmetro	
Ø base (cm)	8,30
Razão Ht/Lt	0,81
LT / Dt	1,13

Massas (kg)	Tg1	17,14	Tg4	16	
Geotextil	0,72		Tg5	15,84	
barramento	97,88	Tg3	15,74	Tg6	16,2

Barramento Coeficiente de atrito 0,0004
 Ø base (cm) 8,30 / 3 tubos L base 42,82
 Razão Ht/Lt 0,81 H total 24,30667

comprimento do contato: 87 cm
 Largura do contato na base (cm) 8,30 atrito estático/cr 26,21
 área de contato 722,1 área de contato ombreiras 54,00

Data	Constantes do Fluxo			Variáveis do Fluxo			Vazão Estimada (cm³/s)	Pressão do Fluxo		Pressão Impacto estimada (kgf)	Pressão Impacto estimada média	Variáveis do Barramento										Obs.					
	energia potencial		energia cinética		Velocidade			Pressão kgf				deslocamento longitudinal e deformações distâncias em cm															
	Vol d³	Massa kg	Alt (cm)	Vol m³	Massa (kg)	t inicial		t final	V (m/s)			Cel A	Cel B	deslocamentos em mm													
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm		70 cm	80 cm			90 cm	média	%													
5/8/22	120	120	7,00	0,07	68,60	45,616	45,752	7,353	50,441	2,55	1,40	48,76	48,34	161,1	160,8	159,3	157,9	159,1	158,1	156,4	152,3	153,3	157,6	36,80%	ok		
9/8/22	120	120	8,00	0,08	78,40	31,201	31,529	3,049	23,902	1,08	0,24	15,86	15,23	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0,82%	ok
9/8/22	120	120	8,00	0,08	78,40	10,659	10,888	4,367	34,236	4,84	3,52	97,69	96,44	240	242	244	245	246	247	248	249	250	245,7	57,37%	ok		
9/8/22	140	140	9,00	0,09	88,20	11,739	11,891	6,579	58,026	12,41	5,26	202,98	195,15	222	224,6	227,9	227,7	231,1	236	239	241	244,2	232,6	54,32%	ok		
10/8/22	110	110	6,00	0,06	58,80	45,086	45,239	6,536	38,431	2,40	1,50	51,69	51,93	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	25,69%	ok
12/8/22	120	120	7,00	0,07	68,60	35,716	35,965	4,016	27,550	1,74	0,88	32,37	32,06	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	3,50%	ok
13/8/22	120	120	6,00	0,06	58,80	29,572	29,760	5,319	31,277	2,05	0,83	38,01	38,35	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	21,72%	ok
13/8/22	120	120	8,00	0,08	78,40	13,965	14,169	4,902	38,431	6,34	4,37	125,35	123,55	199,3	199,5	199,8	197,3	188,9	184,9	188	189,8	188,9	192,9	45,06%	ok		
15/8/22	120	120	6,00	0,06	58,80	32,640	32,890	4,000	23,520	2,20	1,97	55,48	55,52	65	66	69	78	84	98	102	110	129	89	20,78%	ok		
15/8/22	120	120	7,00	0,07	68,60	15,791	16,011	4,545	31,182	3,29	2,27	68,43	68,04	164	161,7	163,2	163,8	168,1	173,3	175,4	173,3	170,6	168,2	39,27%	ok		
16/8/22	100	100	6,00	0,06	58,80	54,612	54,864	3,968	23,333	1,69	1,57	43,43	43,45	189,2	189,2	189,2	189,2	190	191,1	191	191,8	193,5	190,5	44,48%	ok		
17/8/22	140	140	8,00	0,08	78,40	29,821	30,036	4,651	36,465	6,74	2,56	110,54	107,29													0,00%	rompeu
17/8/22	140	140	8,00	0,08	78,40	23,128	23,400	3,676	28,824	3,38	2,43	67,92	67,03													0,00%	rompeu
27/10/22	120	120	9,00	0,09	88,20	45,593	45,857	3,788	33,409	3,77	1,80	63,73	61,52	77,6	79,1	80,5	83	85,7	89,4	92,6	95,5	97	86,71	20,25%	1 A 7		
28/10/22	120	120	6,00	0,06	58,80	13,576	13,884	3,247	19,091	1,63	0,92	33,76	33,95	40	45	50	55	60	65	70	72,5	75	59,17	13,82%	ok		
1/11/22	120	120	9,00	0,09	88,20	4,287	4,481	5,155	45,464	3,90	2,73	74,78	73,22	91,8	112,7	133,6	147,85	162,1	190,6	225,2	259,8	261,6	176,1	41,13%	ok		
16/11/22	120	120	9,00	0,09	88,20	25,983	26,226	4,115	36,296	4,49	2,83	82,90	80,84	60	63,7	72,8	78,7	85,4	92,1	97,2	98,1	104,8	83,64	19,53%	ok		

EXPERIMENTOS - BTG 3

Dimensões (cm)	
Diâmetro	27,00
Largura	27,00
altura	13,00
Parâmetro	
h base (cm)	8,30
Razão Ht/Lt	0,48
LT / Dt	1,00

Massas (kg)	BTG3	40		
Geotextil	0,72			
barramento	40,00			

Barramento	Coefficiente de atrit	0,00037
L base	8	
H total	24,30667	

comprimento do contato:	87	cm
Largura do contato na base (cm)	8,00	
área de contato	696,0	
atrito estático/cr	10,32	

Data	Constantes do Fluxo			Variáveis do Fluxo			Vazão Estimada (cm³/s)	Pressão do Fluxo		Pressão Impacto estimada média	Variáveis do Barramento										Obs.					
	energia potencial		energia cinética		Velocidade			Pressão kgf			deslocamento longitudinal e deformações distâncias em cm deslocamentos em mm															
	Vol d³	Massa kg	Alt (cm)	Vol m³	Massa (kg)	t inicial		t final	V (m/s)		Cel A	Cel B	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm		90 cm	média	%		
31/8/23	100	100	7,00	0,07	68,60	34,736	35,036	3,333	22,867	2,80		34,26												0,00%	rompeu	
31/8/23	100	100	7,00	0,07	68,60	54,215	54,455	4,167	28,583	0,79	0,47	15,42												0,00%	rompeu	
1/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	18,162	18,345	5,464	37,486	5,30	0,55	71,59												0,00%	rompeu	
1/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	54,215	54,485	3,704	25,407	2,24	1,91	50,78												0,00%	rompeu	
4/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	37,772	38,039	3,745	25,693	2,13	2,17	52,62	190									100	150	187,50%	inclin	
4/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	41,553	41,804	3,984	27,331	1,25	1,22	30,23	180									120	153,3	191,67%	inclin	
5/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	10,071	10,321	4,000	27,440	1,68	0,28	23,98	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	87,50%	ok	
12/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	35,801	35,971	5,882	40,353	2,85	1,10	48,34	420									100	260	325,00%	inclin	
13/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	18,591	18,888	3,367	23,098	1,56	1,13	32,92	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	125,00%	ok
13/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	23,605	24,320	1,399	9,594	1,21	0,50	20,93	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	12,50%	ok
14/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	16,135	16,421	3,497	23,986	4,80	2,47	88,96	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	525,00%	rompeu
14/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	22,779	23,097	3,145	21,572	1,14	0,58	21,05	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	287,50%	ok
15/9/23	100	100	7,00	0,07	68,60	21,054	21,274	4,545	31,182	1,33	0,99	28,39													0,00%	tobou
15/9/23	100	100	6,00	0,06	58,80	50,806	51,209	2,481	14,591	0,60	0,29	11,85	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	62,50%	ok

EXPERIMENTOS - Variação do atrito estático - Tubo Geotextil Diâmetro 23,56 cm - BTG 1

Dimensões (cm)		Massas (kg)		Parâmetro		flexa		comprimento do contato:					
Diâmetro	23,56	Geotextil	0,72	Largura do conta	17,50	máx	15	Largura do contato na base (cm)					
Largura	27,80	Tubo cheio	72,50	razão Ht/Lt	0,67	área de contato							
altura	18,60			LT / Dt	1,18								
Data	Constantes do Fluxo					Variáveis do Fluxo			Vazão Estimada (cm ³ /s)	Pressão do Fluxo		Pressão Impacto (KPa)	Pressão Impacto estimada (kPa)
	energia potencial		energia cinética			Velocidade				Pressão kgf			
	Vol d ³	Massa kg	Altura (cm)	Volume m ³	massa (kg)	t inicial	t final	V (m/s)		Celula A	Celula B		
Incremento de atrito 1													
4/10/23	100,00	100,00	6,50	0,06	63,70	42,577	42,949	2,688	17,124	1,15	0,44	1,91	32,79
4/10/23	100,00	100,00	6,00	0,06	58,80	21,355	21,705	2,857	16,800	0,68	0,07	0,96	2,87
5/10/23	100,00	100,00	7,00	0,07	68,60	26,156	26,473	3,155	21,640	3,37	1,59	5,17	68,28
6/10/23	100,00	100,00	7,50	0,07	73,50	5,832	6,208	2,660	19,548	1,19	0,40	1,47	14,59
Incremento de atrito 2													
9/10/23	100,00	100,00	7,50	0,07	73,50	25,885	26,236	2,849	20,940	2,01	1,50	3,24	44,84
10/10/23	100,00	100,00	7,00	0,07	68,60	45,665	45,881	4,630	31,759	3,24	0,68	4,09	36,54
11/10/23	100,00	100,00	7,00	0,07	68,60	34,852	35,118	3,759	25,789	2,84	2,14	5,19	84,98
12/10/23	100,00	100,00	7,00	0,07	68,60	24,990	25,322	3,012	20,663	1,42	0,69	2,20	29,46
13/10/23	100,00	100,00	7,00	0,07	68,60	19,528	19,862	2,994	20,539	0,33	0,27	0,63	10,61

CONTRATANTE: Flávio da Silva Ornelas

DATA: 16/02/2023

OBRA / PROJETO: Qualificação de Doutorado

LOCAL DA COLETA: -

ESTUDO: -

AMOSTRA: AM 01

N° RELATÓRIO: RE 32-2023

RELATÓRIO DE ENSAIOS GEOTÉCNICOS CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS DE SOLOS

**PALMAS - TO
2023**

RESUMO DE PROPRIEDADES

INTERESSADO: Flávio da Silva Ornelas

DATA: 16/02/2023

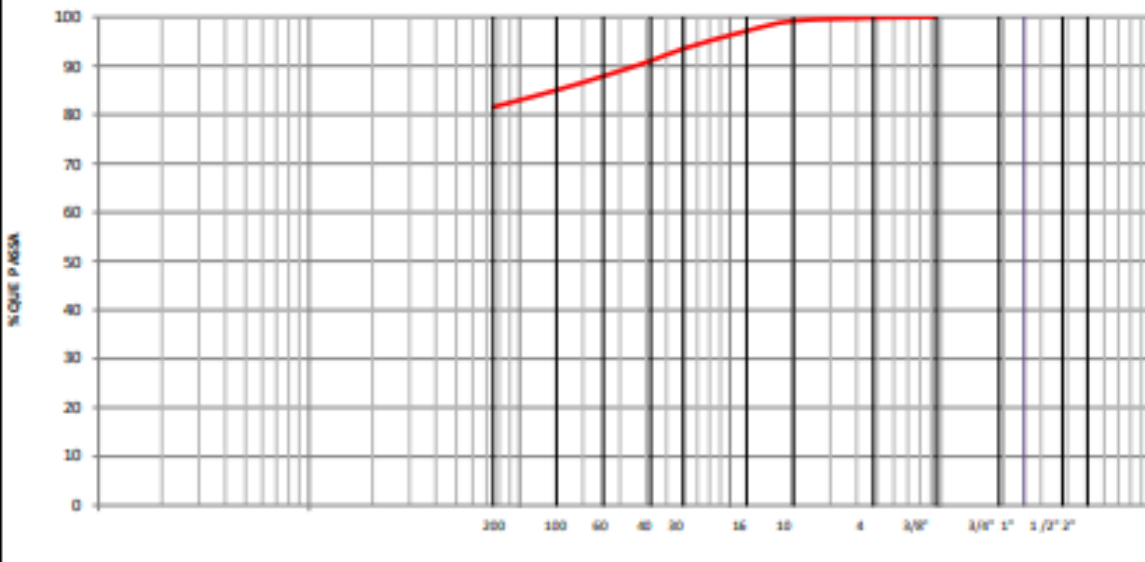
OBRA / PROJETO: Qualificação de Doutorado

LOCAL DA COLETA: -

Porcentagem Retida na Pen. N° 4":	-			
Energia de Compactação:	-			
Numero de Golpes:	-			
Massa Espec. Compactada Máxima:	-	g/cm ³		
Umidade Ótima:	-	%		
Expansão:	-	%		
Índice Suporte California (ISC):	-	%		
Peso Específico dos Graços:	25.77	kN/m ³		
Pedregulho:	0.83	%		
Areia Grossa:	8.18	%		
Areia Média:	3.12	%	17.64	%
Areia Fina:	6.34	%		
Silte + Argila:	81.54	%		
Limite de Liquidez (LL):	54.50	%		
Limite de Plasticidade (LP):	31.06	%		
Índice de Plasticidade (IP):	23.44	%		
Classificação TRB:	A-7-6			
Índice de Grupo:	20			
Classificação:	Argila sitoarenosa de cor cinza			

LABORATORISTA: Hugo de Jesus

ENGENHEIRO RESP.: Marcos Coelho Milhomem

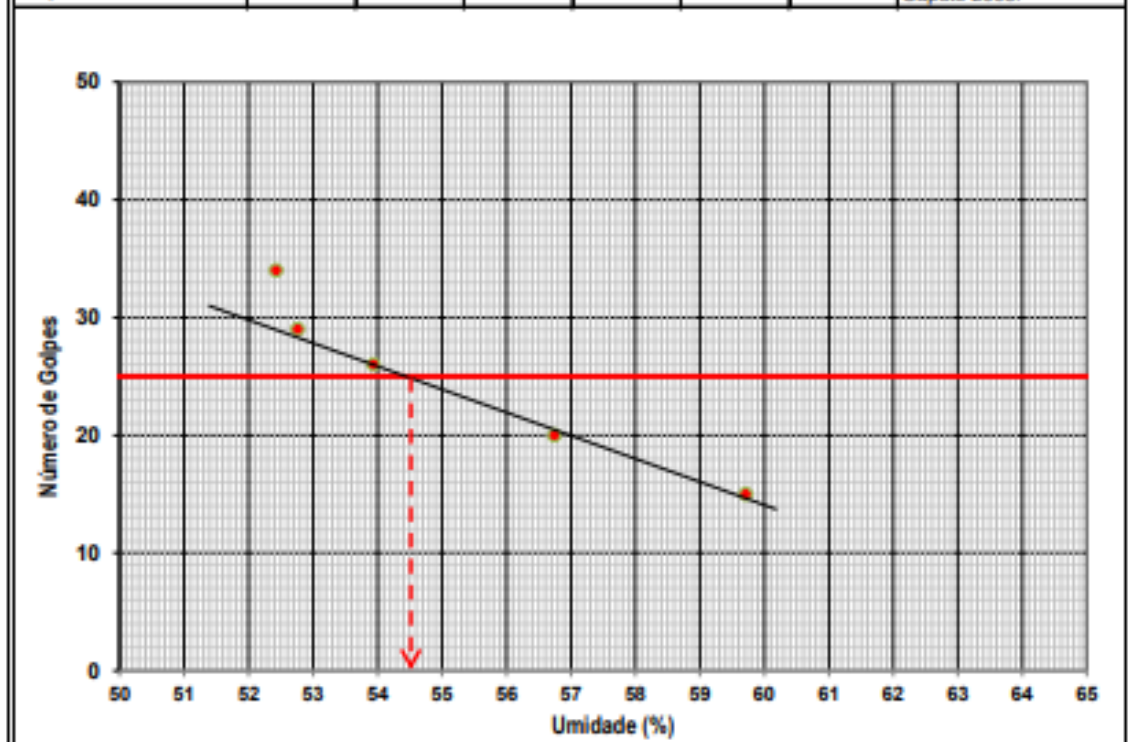
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - NBR 7181									
INTERESSADO: Flávio da Silva Ornelas						DATA: 16/02/2023			
OBRA / PROJETO: Qualificação de Doutorado									
ESTUDO: -									
LOCAL DA COLETA: -									
CLASSIFICAÇÃO: Argila siltearenosa de cor cinza									
UMIDADE HIGROSCÓPICA				PENEIRAMENTO DO MATERIAL GROSSO					
				PENEIRAS		AMOSTRA SECA (g)		% PASSANTE DA AMOSTRA TOTAL	
Nº CÁPSULA =	17	28	11	POL.	mm	RETIDO	PASSADO		
C + A + B =	53.99	65.21	64.39	2"	50				
C + B =	53.30	64.30	63.5	1 1/2"	38				
ÁGUA (g) =	0.69	0.91	0.89	1"	25				
CAPS. (g) =	11.10	13.15	12.52	3/4"	19				
SOLO SECO (g) =	42.20	51.15	50.98	3/8"	9.5	-	-		100.00
UMIDADE (%) =	1.64	1.78	1.75	Nº 4	4.8	1.79	981.44		99.82
UMIDADE MÉDIA (%) =	1.72			Nº 10	2.0	6.33	975.11		99.17
AMOSTRA				PENEIRAMENTO DO MATERIAL FINO					
AMOSTRA TOTAL ÚMIDA = 1000.00 g				MASSA DA AMOSTRA PARCIAL ÚMIDA = 120.00 g					
SOLO SECO RETIDO PEN. Nº10 = 8.12 g				MASSA DA AMOSTRA PARCIAL SECA = 117.97 g					
SOLO UMIDO PASS. PEN. Nº 10 = 991.88 g				PENEIRAS		AMOSTRA SECA		% QUE PASSA DA AMOSTRA PARCIAL	% QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL
SOLO SECO PASS. PEN. Nº 10 = 975.11 g				Nº	mm	RETIDO (g)	PASSADO (g)		
AMOSTRA TOTAL SECA = 983.23 g									
RESUMO GRANULOMÉTRICO (%)									
PEDREGULHO = 0.83 %				16	1.20	2.41	115.56	97.96	97.15
AREIA GROSSA = 8.18 %				30	0.60	4.34	111.22	94.28	93.50
AREIA MÉDIA = 17.64 %				40	0.42	2.98	108.24	91.75	90.99
AREIA FINA = 8.34 %				60	0.25	3.71	104.53	88.61	87.88
SILTE + ARGILA = 81.54 %				100	0.15	3.40	101.13	85.73	85.02
				200	0.075	4.14	96.99	82.22	81.54
									
LABORATORISTA: Hugo de Jesus									
ENGENHEIRO RESPONSÁVEL: Marcos Coelho Milhomem									

LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE - 6459/7180

INTERESSADO: Flávio da Silva Ornelas	DATA: 16/02/2023
OBRA / PROJETO: Qualificação de Doutorado	
ESTUDO: -	
LOCAL DA COLETA: -	
CLASSIFICAÇÃO: Argila siltoarenosa de cor cinza	

LIMITE DE LIQUIDEZ

Cápsula	Nº	18	22	27	36	37	1 < IP < 7	Fracamente Plástico
C + S + A	g	9.10	8.93	8.98	9.68	10.15		
C + Solo	g	8.02	7.88	7.76	8.31	8.49		
Água	g	1.08	1.05	1.22	1.37	1.66		
Peso Cápsula	g	5.96	5.89	5.61	5.77	5.71	IP > 15	Altamente Plástico
Solo	g	2.06	1.99	2.15	2.54	2.78		
Umidade	%	52.43	52.76	56.74	53.94	59.71	Valores de referência bibliográfica conforme Caputo 2008.	
Golpes		34	29	20	26	15		



LIMITE DE PLASTICIDADE

Cápsula	Nº	19	29	31	32	33	Índices de Conclstencia	
C + S + A	g	7.05	7.40	7.54	8.34	6.75		LL % = 54.50
C + Solo	g	6.71	6.92	7.09	7.84	6.38		
Água	g	0.34	0.48	0.45	0.50	0.37		LP % = 31.06
Cápsula	g	5.55	5.36	5.68	6.20	5.25		
Solo	g	1.16	1.56	1.41	1.64	1.13		IP % = 23.44
Umidade	%	29.31	30.77	31.91	30.49	32.74		