

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

**UTILIZAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS PARA PROTEÇÃO DE
TUBULAÇÕES PRESSURIZADAS ENTERRADAS**

NÉSTOR TUPA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO G.TD-036A/06

BRASÍLIA DF: ABRIL DE 2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**UTILIZAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS PARA PROTEÇÃO DE
TUBULAÇÕES PRESSURIZADAS ENTERRADAS**

NÉSTOR TUPA

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

APROVADA POR:

**Prof. ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB).
(ORIENTADOR)**

**Prof. MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB).
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. RENATO PINTO DA CUNHA, PhD (UnB).
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof^a. ANNA LAURA LOPES DA SILVA NUNES, PhD (UFRJ).
(EXAMINADORA EXTERNA)**

**Prof. ROMERO CÉSAR GOMES, DSc (UFOP).
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA DF, 05 DE ABRIL DE 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

TUPA, NÉSTOR

Utilização de Geossintéticos para Proteção de Tubulações Pressurizadas Enterradas [Distrito Federal] 2006.

xix, 154 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2006)

Tese de Doutorado-Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1. Reforço de solos | 2. Expansão de cavidade |
| 3. Tubulações pressurizadas | 4. explosão de tubulações. |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TUPA, N; (2006). Utilização de Geossintéticos para Proteção de Tubulações Pressurizadas Enterradas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-036/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Néstor Tupa

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Utilização de Geossintéticos para Proteção de Tubulações Pressurizadas Enterradas.

GRAU / ANO: Doutor em Ciências / 2006

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.

Néstor Tupa Fernández

- Av. Independencia, 112. Juliaca, PERU.

- Urb. Juventud Ferroviaria F-5, Cercado. Telef. 54 244898 Arequipa. PERU.

DEDICATÓRIA

A minha família:

Nery Regina minha esposa,
Rocio Adriana, Nestor Paulo e Claudia Regina meus filhos,
por me acompanharem esse longo caminhar.

Aos meus pais Isidora Irene e Juan Pastor,
por adiantar a caminhada.

Aos meus irmãos:

Edgar, Henry, Hernan, Mirian, Blanca Nieves, Juan Carlos e Maritza Irene.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade de Brasília por ter me considerado membro do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, sendo uma grande honra haver-me instruído nesta Alma Mater.

Especial agradecimento ao Prof. Ennio Marques Palmeira PhD, por ter orientado esta Tese de Doutorado, pelo seu dinamismo e dedicação para a conclusão deste trabalho e sua grande amizade brindada. Agradeço também a sua família, Deusa e Felipe Palmeira pela apoio e amizade à minha família.

Ao Prof. Jose Camapum de Carvalho e sua família pela grande amizade compartilhada a minha família. Agradecimentos especiais aos professores André Pacheco de Assis, Márcio Muniz de Farias pela boa amizade durante o decorrer do curso. Também, agradeço aos professores Pedro Murrieta, Renato da Cunha e Newton Moreira.

Aos colegas e amigos da Pós-graduação pelo companheirismo e pelos bons momentos que passamos juntos (Helio, Renato, Márcia Mara, Patrícia, Martha, Claudia, Luis Guillermo, Paula, Karla, Márcia, Silvrano, Fabrício, Paulo César, Rafael, Janaina, Mariana).

Aos grandes amigos e compadres Paulo Roberto da Silva, Cleire e Vitor da Silva pela amizade e compartilhar muitos domingos em Brasília.

A minha cara amiga Daniela Lanz e Maria Tereza da Silva por sua grande amizade.

Ao caro amigo Carlos Lauro pelo apoio na instalação de moradia em Brasília e sua grande amizade. Aos compatriotas: Aldo Gonzáles, Carlos Carreon, Carlos Rendon e família, e Wilber Chambi.

Ao bom amigo Raul Dario Durand pela sua amizade e ajuda nos ensaios laboratoriais e logística informática. Aos caros amigos Aldo e Célida Durand em Campos de Goytacazes.

Aos grandes amigos e ao pessoal técnico do laboratório de Geotecnia.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq / Cooperação Internacional pelo suporte financeiro durante o curso.

Aos meus familiares e amigos do Peru. Aos meus pais Isidora Irene e Juan Pastor. Aos meus Irmãos Maritza, Blanca, Juan Carlos, Mirian, Hernan, Henry, Edgar, Maria, Virginia e Epifania; aos meus sobrinhos Diego, Alberto, Enrique, Juan Luis, Carlos, Andréa, Marcela, Gabriela, David e Ada.

A minha família: A Nery Regina por sua compreensão, companheirismo, incentivo crédito e por tudo que fez e tem feito pela nossa família. A Rocio Adriana, Nestor Paulo e Claudia Regina meus filhos por serem o suporte e espiritual durante todo tempo.

UTILIZAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS PARA PROTEÇÃO DE TUBULAÇÕES PRESSURIZADAS ENTERRADAS

RESUMO

Nas últimas décadas, o uso dos materiais geossintéticos como reforço das obras geotécnicas tem aumentado muito, ampliando os âmbitos de suas aplicações. Essa técnica apresenta grande potencial para uso em obras de segurança e minimizar os problemas de conservação do meio ambiente. Também, a procura de energia mais econômica e menos contaminante ao meio ambiente esta impulsionando a exploração de gás natural. O transporte desse combustível pode ser feito por gasodutos que são sistemas interessantes pelas suas vantagens de rapidez, quantidade massiva de transporte e economia. Porém, estas estruturas apresentam situações de acidentes (vazamentos e explosões), os mesmos são perigosos principalmente quando ocorrem em regiões povoadas ou que requeiram cuidados especiais, podendo apresentar conseqüências fatais, perdas materiais ou contaminar o meio ambiente.

O presente trabalho estudou a aplicação de geossintéticos como elemento de reforço em aterros para proteção de tubulações pressurizadas enterradas de gasodutos visando minimizar os efeitos de uma explosão.

Para o estudo foram implementados dois tipos de ensaios idealizando as seqüências do mecanismo de explosão de uma tubulação pressurizada enterrada. Assim, o ensaio de expansão de cavidade simulou a condição de expansão de gás na explosão de uma tubulação de modo a se observar os seus efeitos no solo circundante (deslocamentos e mecanismos de ruptura). Já, o ensaio de vazamento em uma tubulação com ranhura de enfraquecimento simulou a condição de estouro da tubulação pressurizada para observar as suas conseqüências sobre o solo circundante (lançamento do solo, formação de cratera e deformação do talude). Em ambos os casos de simulação as metodologias procuraram adaptar o problema a condições de deformação plana, em caixa de ensaios de face transparente para observação dos mecanismos de interação do solo e da tubulação com os reforços. Os reforços utilizados foram: geotêxteis tecidos, geogrelha e papel alumínio. Os reforços apresentaram diversos arranjos (camada, u-invertido e envelopado). Nos ensaios de expansão de cavidade os aterros tiveram superfície horizontal ou seções transversais trapezoidais com taludes 2H:1V. Diversas combinações de arranjos de reforços, tipos de reforços e tipos de aterros foram estudadas. Também se estudou a variação da profundidade do posicionamento de cavidade de expansão. Os ensaios de vazamento em tubulação enfraquecida foram realizados variando-se tipos de arranjos de reforços, tipos de reforços (em alguns casos com adição de filme e brita) em aterros trapezoidais.

Os resultados de ensaios de expansão de cavidade mostraram que a inclusão de reforço em aterros como proteção de tubulações pressurizadas diminuiu os efeitos de explosões no solo circundante e aumentou a resistência à expansão em comparação com o comportamento de aterros não reforçados. O geotêxtil tecido em arranjo envelopado foi o que apresentou melhor desempenho. Foi observado que a resistência à expansão imposta pelos reforços depende de suas características de rigidez, textura e geometria.

Os resultados da simulação de vazamentos em tubulações enfraquecidas mostraram que, a inclusão de reforço em aterros de proteção de tubulações pressurizadas diminuiu os efeitos no solo circundante apresentando menor altura de lançamento do solo, menor quantidade de nuvem de solo, menor tamanho de cratera e menor expansão do aterro em comparação com a situação sem reforço. O arranjo envelopado com geotêxtil tecido e filme de PVC e o arranjo envelopado com geogrelha e brita foram os de melhor desempenho. Em geral, os resultados de ensaios em modelos físicos em escala reduzida sugerem que as inclusões de reforços em aterros de proteção de tubulações pressurizadas podem diminuir substancialmente as conseqüências de explosões.

THE USE OF GEOSYNTHETICS FOR THE PROTECTION OF PRESSURISED BURIED PIPES

ABSTRACT

The use of geosynthetic materials as reinforcement has increased markedly during the last decades, as well as their fields of application. The soil reinforcement technique presents great potentials for safety works and environmental protection. The pursuit of more economical and less pollutant energy forms has increased the exploitation of natural gas. Gas transportation can be made by pipelines, which are advantageous structures due to the speed of gas transportation, amount of mass transported and economy. However, this type of structure can be subjected to accidents (leakages or explosions), which are serious events when occurring in urban or industrial areas, and may yield to material and human lives losses, as well as damages to the environment.

This thesis studied the use of geosynthetics as reinforcements in fills for the protection of buried pressurised pipes aiming the minimisation of the consequences of an explosion. Two types of tests were carried out. The cavity expansion test aimed to simulate the conditions of gas expansion in the soil resulting from the collapse of the pipe and to investigate the effects on the surrounding soil (displacements and failure mechanisms). The leakage test through a weakness in the pipe aimed to investigate the effects of such mechanism on the soil (soil movement, crater formation and fill deformation). In both types of tests plane strain deformation conditions were assumed and the tests were carried out in a rigid box with a transparent frontal face to allow the observation of interaction mechanisms between soil, pipe and reinforcement. The reinforcements used were woven geotextiles, a geogrid and aluminium foil. Different types of reinforcement arrangements were tested (individual reinforcement layer, inverted U and enveloped arrangement). In the cavity expansion tests the fills had horizontal surfaces or were built with a trapezoidal shape with 2:1 slopes. Different combinations of reinforcement arrangements, reinforcement types and fill types were investigated. The influence of the depth of the cavity was also studied. The leakage tests were carried out varying the reinforcement arrangement and the type of reinforcement (sometimes with the addition of PVC films or gravel) in trapezoidal fills.

The cavity expansion test results showed that the use of reinforcement reduced the effects of pipe explosion on the surrounding soil and increased the fill resistance against cavity expansion in comparison with the results obtained for unreinforced fills. The enveloped arrangement with woven geotextile was the one presenting the best performance. The effectiveness of the reinforcement depended on its tensile stiffness, roughness and geometry.

The leakage test results showed the beneficial effects of the presence of reinforcement regarding lower distances reached by the soil particles launched by the air blast, smaller crater and less fill deformation in comparison to the situation without reinforcement. The enveloped arrangements using woven geotextile and geogrid were the ones presenting the best performances. In general, the model studies showed that the use of geosynthetic reinforcement for the protection of buried pipes can significantly reduce the consequences of pipe explosion or leakage.

ÍNDICE

Conteúdo	Página
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 A TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS POR INCLUSÕES	1
1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2.1 CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO DE TUBULAÇÕES	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 METODOLOGIA DE TRABALHO	4
1.5 ESCOPO DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 - GENERALIDADES SOBRE A TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM INCLUSÕES	7
2.2 – REFORÇO DE SOLOS COM INCLUSÃO DE GEOSSINTÉTICOS	8
2.3 - MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS	8
2.3.1 – GEOTÊXTIL	8
2.3.2 – GEOGRELHA	9
2.3.3 – GEOMEMBRANA	9
2.3.4 – GEORREDE	9
2.3.5 – GEOCOMPOSTO	9
2.3.6 – GEOCÉLULAS	9
2.3.7 – GEODRENOS	10
2.3.8 - TIRAS PLÁSTICAS	10
2.3.9 – FIBRAS	10
2.4 - PROPRIEDADES RELEVANTES DOS GEOSSINTÉTICOS	10
2.5 - INTERAÇÃO SOLO-REFORÇO	11
2.5.1 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	12
2.5.2 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO	12
2.5.3 - ENSAIO DE TRAÇÃO CONFINADA	12
2.6 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE INTERFACE ENTRE SOLO E REFORÇO	13
2.7 – GASODUTOS E EXPLOSÕES DE GASODUTOS	14
2.7.1 EXPLOSÕES DE GASODUTOS	15
2.7.2 TIPOS DE MECANISMOS DE RUPTURA DE TUBULAÇÕES PRESSURIZADAS	17
2.8 – RESULTADOS DE PESQUISAS SOBRE DUTOS E CAVIDADES NA LITERATURA TÉCNICA	21
2.9 – TUBULAÇÕES SUBMETIDAS A EXPLOSÕES	23
2.9.1 - DINÂMICA DO MECANISMO DE EXPLOÇÃO DE TUBULAÇÕES	24
2.9.2 - FORMAÇÃO DE CRATERAS	25
2.10 PREVISÕES DA RESISTÊNCIA AO LEVANTAMENTO DO SOLO POR EXPANSÃO DE CAVIDADE EM ATERROS REFORÇADOS E NÃO REFORÇADOS	27

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	31
3.1 – MATERIAIS	31
3.1.1 – SOLO	31
3.1.2 – GEOSSINTÉTICOS	32
3.2 EQUIPAMENTO	34
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA DE ENSAIO E SIMPLIFICAÇÕES PARA ANÁLISE	43
4.1 - METODOLOGIA DE ENSAIO	43
4.1.1 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE REFORÇOS	43
4.1.2 - PREPARAÇÃO DA CAVIDADE E CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO EXPANSOR	44
4.2 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DOS ATERROS E DOS REFORÇOS NOS ENSAIOS	46
4.3 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO	47
4.3.1 – PREPARAÇÃO DO ATERRO	47
4.3.2 – MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS E DEFORMAÇÕES	49
4.4 – SIMPLIFICAÇÕES PARA ANÁLISES DE EXPANSÃO DE CAVIDADES	51
4.5 – ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE E DE VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES EM ATERROS COM E SEM REFORÇO	52
4.5.1 – ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE EM ATERROS COM E SEM REFORÇO	52
4.5.2 ENSAIOS DE VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES EM ATERROS COM E SEM REFORÇO	53
4.5.3 - ESPESSURA DA TUBULAÇÃO NA REGIÃO ENFRAQUECIDA E PRESSÃO DE EXPLOSÃO	55
4.6 CÓDIGOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADES E DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES	56
CAPÍTULO 5: RESULTADOS DE ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE EM ATERROS COM E SEM REFORÇO	60
5.1 – INTRODUÇÃO	60
5.2 - RESULTADOS DE ENSAIOS EM ATERROS COM SUPERFÍCIE HORIZONTAL	61
5.2.1 - ENSAIOS SEM REFORÇO COM CAVIDADE A DIFERENTES PROFUNDIDADES	61
5.2.2 ENSAIOS COM REFORÇOS NA HORIZONTAL	62
5.2.3 ENSAIOS EM ARRANJOS EM FORMA DE U INVERTIDO	63
5.2.4 ENSAIOS EM ARRANJOS ENVELOPADOS	67
5.3 - ENSAIOS EM ATERROS COM FORMA TRAPEZOIDAL	69
5.3.1 - ENSAIOS SEM REFORÇO	69
5.3.2 - ENSAIO COM REFORÇO EM CAMADA	70
5.3.3 - ENSAIOS EM ARRANJOS EM FORMA DE U INVERTIDO	72
5.3.4 - ENSAIOS EM ARRANJOS ENVELOPADOS	74
5.3.5 - INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DA CAVIDADE EM ATERROS TRAPEZOIDAIS REFORÇADOS COM ARRANJOS ENVELOPADOS	76
5.4 - COMENTÁRIOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS	79

5.4.1 - ENSAIOS EM ATERROS COM SUPERFÍCIE HORIZONTAL	79
5.4.2 - ENSAIOS EM ATERROS COM SEÇÃO TRANSVERSAL TRAPEZOIDAL	80
5.5 - DESLOCAMENTOS DOS MARCOS NO ATERRO	83
5.6 - DESLOCAMENTOS SUPERFICIAIS DO ATERRO	86
5.7 - MECANISMOS DE RUPTURA DOS MACIÇOS COM E SEM REFORÇO	90
5.7.1 - ATERRO DE SUPERFÍCIE HORIZONTAL	90
5.7.2 - ATERRO DE SEÇÃO TRAPEZOIDAL	92
5.8 - MECANISMOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE OBSERVADOS	97
5.9 - MECANISMO DE RUPTURA DO REFORÇO DURANTE OS ENSAIOS	99
5.10 - COMPARAÇÕES ENTRE PREVISÕES E OBSERVAÇÕES DE PRESSÕES DE CAVIDADE NA RUPTURA.	100
CAPÍTULO 6: RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES EM ESCALA REDUZIDA	104
6.1 - INTRODUÇÃO - MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO E RUPTURA DOS ATERROS DEVIDOS AO VAZAMENTO NA TUBULAÇÃO	104
6.2 - ALTURA DO SOLO LANÇADO EM ENSAIOS DE VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES PRESSURIZADAS	105
6.3 - DOMOS DE NUVEM DE AREIA	110
6.4 - DEFORMAÇÕES DAS SUPERFÍCIES DOS ATERROS (CRATERAS E DEFORMAÇÃO LATERAL) DEVIDO AO VAZAMENTO	123
6.5 - DESLOCAMENTOS INTERNOS NO ATERRO E MECANISMOS DE RUPTURA	129
6.6 - MECANISMO DE RUPTURA DO REFORÇO EM PAPEL ALUMÍNIO POR EFEITO DO JATO DE AR COMPRIMIDO	133
6.7 - MECANISMOS DE RUPTURA DAS TUBULAÇÕES EM ESCALA REDUZIDA	133
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	137
7.1 - CONCLUSÕES	137
7.1.1 - ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE	138
7.1.2 - SIMULAÇÃO DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES EM ESCALA REDUZIDA	141
7.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
APÊNDICE A	150
APÊNDICE B	154

LISTA DE TABELAS

Conteúdo	Página
Tabela 2.1. Marcos da evolução cronológica da técnica de reforço de solos com inclusões (Palmeira, 1987; Campbell, 1990; Tupa, 1994 e Koerner, 1998).	7
Tabela 3.1. Características da areia.	32
Tabela 3.2. Características dos reforços.	33
Tabela 4.1. Simulações de explosões de tubulações por meio da expansão de cavidade.	53
Tabela 4.2. Características da tubulação em ensaios de vazamento na tubulação.	55
Tabela 5.1. Resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros com superfície horizontal e $Z = 7R$.	79
Tabela 5.2. Resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros de superfície horizontal e $Z = 2R$.	80
Tabela 5.3. Resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros de superfície horizontal e $Z = 4R$.	80
Tabela 5.4. Resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros de superfície horizontal e $Z = 11R$.	80
Tabela 5.5. Resultados de ensaios de expansão de cavidades em aterros trapezoidais e $Z = 7R$.	81
Tabela 5.6. Resultados de ensaios de expansão de cavidades em aterros trapezoidais e $Z = 2R$.	82
Tabela 5.7. Resultados de ensaios de expansão de cavidades em aterros trapezoidais e $Z = 4R$.	82
Tabela 6.1. Resultados da altura (Y) atingida pelo solo lançado para $t = 9$ a 11 ms ($Z = 4R$).	107
Tabela 6.2. Comparações entre valores da altura atingida pelo solo lançado para $t = 9$ a 11 ms medidos (Y) e calculados (Y') ($Z = 4R$).	107
Tabela 6.3. Resultados da altura (Y) atingida pelo solo lançado para $t = 9$ a 11 ms ($Z = 2R$).	109
Tabela 6.4. Resultados de $\Delta Y/Y'$ (%) atingida pelo solo lançado para $t = 9$ a 11 ms ($Z = 2R$).	109
Tabela 6.5. Nuvem de solo suspenso em aterros de $Z = 4R$.	117
Tabela 6.6. Redução de solo suspenso do aterro ($Z = 4R$).	119
Tabela 6.7. Valores de índice de solo suspenso do aterro ($Z = 4R$).	120
Tabela 6.8. Redução de solo suspenso do aterro $Z = 2R$.	122
Tabela 6.9. Valores de índice de solo suspenso do aterro ($Z = 2R$).	122
Tabela 6.10. Valores de solo lançado, massa deslocada e cratera aparente ($Z = 4R$).	123
Tabela 6.11. Diâmetro e profundidade da cratera ($Z = 4R$).	124
Tabela 6.12. Valores das quantidades relativas de massa deslocada, de solo lançado e cratera.	125
Tabela 6.13. Solo lançado, diâmetro e profundidade da cratera para aterros com $Z = 2R$.	126
Tabela 6.14. Valores das quantidades relativas de massa deslocada, de solo lançado e cratera $Z = 2R$.	126

LISTA DE FIGURAS

Conteúdo	Página
Figura 1.1. Mecanismos deletérios a tubulações enterradas.	3
Figura 1.2. Tubulações sujeitas a acidentes por instabilidade de taludes.	3
Figura 1.3. Aplicações de geossintéticos para proteção de tubulações pressurizadas enterradas (a). superfície horizontal. b). aterro trapezoidal)	3
Figura 1.4. Mecanismos simulados nos ensaios: (a) expansão de cavidade (b) vazamento em tubulação enfraquecida.	4
Figura 2.1. Tipos comuns de geossintéticos (modificado – Palmeira, 1993).	10
Figura 2.2. Mecanismos de interação em estruturas reforçadas (modificado – Palmeira, 1999).	12
Figura 2.3. Vista geral pós-explosão em decorrência de vazamento de tubulação de gás com ¾" de diâmetro (modificado - National Transportation Safety Board, 2000a).	15
Figura 2.4. Explosão de gasoduto tubulação de 30 polegadas de diâmetro em Near Carlsbad, New México: (a). Incêndio causado após a explosão; (b) Vista geral da explosão de gasoduto; (c) Cratera gerada pela explosão (modificado - National Transportation Safety Board, 2000b).	16
Figura 2.5. Explosão de tubulação em zona industrial Bélgica (modificado -Rossignel, 2004).	17
Figura 2.6. Ruptura de tubulação de polietileno de 3/4", distribuição de gás (modificado - National Transportation Safety Board, 2001).	18
Figura 2.7. Ruptura de tubulação de aço por efeito de SCC (modificado – Manfredi & Otegui, 2002).	18
Figura 2.8. Ruptura de tubulação de aço de 75 cm de diâmetro (modificado – Manfredi & Otegui, 2002).	18
Figura 2.9. Ruptura de uma tubulação de combustível diesel, Knoxville, Tennessee (modificado - National Transportation Safety Board, 2000c).	19
Figura 2.10. Ruptura por dobra em tubulação, Near Chalk Point, Maryland (modificado - National Transportation Safety Board, 2000e).	19
Figura 2.11. Ruptura de tubulação de petróleo de 24" de diâmetro (modificado - National Transportation Safety Board, 2000d).	20
Figura 2.12. Ruptura de tubulação de 20" de diâmetro por impacto de máquina de escavação em Indianápolis, Indiana (modificado - National Transportation Safety Board, 1999).	20
Figura 2.13. Ruptura da tubulação e vazamento de óleo no rio Reedy, Fork Shoals, South Caroline (modificado - National Transportation Safety Board, 1998).	21
Figura 2.14. Esquema do processo de detonação mostrando o ponto de transição onde $p > p_{CJ}$, que expande à estrutura de confinamento (modificado - Wingerden <i>et al.</i> , 1999).	24
Figura 2.15. Perfil típico da formação de uma cratera por impacto ou por explosão (modificado - Hess e Nordike, 1961).	25
Figura 2.16. Formação de domo e jato por efeito de explosão química (modificado - Violet, 1961).	26
Figura 2.17. Formação do domo de nuvem de areia e dispersão pelo lançamento (modificado - Blinov, 2004).	26
Figura 2.18. Explosão de dinamite: (a) Nuvem de poeira da explosão, (b) Região em	27

verde apresenta temperatura menor a 10°C (modificado - Ohba <i>et al.</i> , 2002).	
Figura 2.19. Mecanismo de ruptura de um maciço sem reforço: a) Mecanismo de ruptura simplificado, b) Resultante da pressão interna na tubulação.	27
Figura 2.20. Possíveis arranjos de reforços geossintéticos para minimizar conseqüências de uma explosão.	28
Figura 2.21. Previsões de cavidade pressurizada na ruptura (modificado - Palmeira, 2005).	30
Figura 3.1. Formato dos grãos do solo granular utilizado para os ensaios da pesquisa.	31
Figura 3.2. Curvas de distribuição granulométrica da areia utilizada.	32
Figura 3.3. Geossintéticos utilizados nos ensaios de expansão e vazamento.	34
Figura 3.4. Detalhe da seção longitudinal do dispositivo de expansão no contato com a face frontal da caixa de ensaios.	35
Figura 3.5. Detalhe da seção da cavidade de expansão: (a) $p_i = 0$; (b) $p_i \neq 0$.	35
Figura 3.6. Modelo do dispositivo (tubo expensor) para ensaios de expansão de cavidade (Tupa e Palmeira, 2003).	36
Figura 3.7 Tubo expensor: a) Pressão interna nula; b) Pressão interna de 37,6 kPa.	36
Figura 3.8. Esquema da ocorrência do efeito membrana.	36
Figura 3.9. Ensaios com e sem massa de vedação no contato tubo-face frontal: (a) e (c) sem massa; (b) e (d) com massa.	37
Figura 3.10. Marcos de referência utilizados nos ensaios de expansão.	38
Figura 3.11. Esquema geral do ensaio de expansão da tubulação sob pressão interna.	38
Figura 3.12. Modelo físico da tubulação de explosão.	39
Figura 3.13. Seção transversal da tubulação de explosão (tubo de PVC enfraquecido).	39
Figura 3.14. Modelo físico da tubulação de explosão mostrando a barra de reação da pressão interna longitudinal.	39
Figura 3.15. Teste de explosão na tubulação.	40
Figura 3.16. Esquema geral do equipamento de simulação de vazamentos na tubulação.	41
Figura 3.17. Aparelhagem para execução da chuva de areia (pórtico e caixa móvel).	41
Figura 4.1. Geometria das amostras de geossintéticos para diferentes arranjos: a) Horizontal, b) U-Invertido, c) Envelopado, d) Camada.	43
Figura 4.2. Verificação da uniformidade de expansão ao longo do comprimento do dispositivo.	45
Figura 4.3. Calibração da tubulação de expansão (pressurização e despressurização).	45
Figura 4.4. Sistemas típicos de aterros sem reforço com tubulações sob pressão.	46
Figura 4.5. Configuração geométrica dos reforços para aterros com superfície horizontal.	46
Figura 4.6. Configuração geométrica dos reforços para aterros trapezoidais.	47
Figura 4.7. Caixa móvel: (a) com comporta aberta provocando a chuva de areia. (b) coordenadas da face transparente da caixa de ensaios.	48
Figura 4.8. Processo construtivo do aterro: chuva de areia, posicionamento do dispositivo de expansão e colocação do reforço.	49
Figura 4.9. Detalhe do procedimento de geração da seção expandida da cavidade.	50
Figura 4.10. Simulação U-Invertido 4R-Geogrelha F, AH-7R: a) inicial. b) intermediária.	51
Figura 4.11. A resistência à expansão (p_e) sob distribuição de pressão interna	52

uniforme.	
Figura 4.12. Esquema de obtenção da curva C de ensaio corrigida (valores de p_c).	52
Figura 4.13. Elevação do solo devido à explosão da tubulação: a) frontal e b) lateral – Ensaio sem reforço.	54
Figura 4.14. Elevação do solo devido à explosão da tubulação: a) frontal e b) lateral. - Ensaio com reforço.	54
Figura 4.15. Esquema da saída do ar comprimido no instante do estouro da tubulação.	55
Figura 4.16. Micrômetro para controle da espessura da região enfraquecida da tubulação.	55
Figura 4.17. Relação da espessura na região enfraquecida da tubulação e a pressão interna de explosão com aterros de superfícies horizontais.	56
Figura 4.18. Esquema das combinações de variáveis nas simulações.	58
Figura 4.19. Esquema da codificação de ensaios.	59
Figura 5.1. Expansão de cavidade: (a) Inicial. (b) Resistência à expansão (p_e).	60
Figura 5.2. Resultados de ensaios de expansão de cavidades a diferentes profundidades.	61
Figura 5.3. Avaliação da repetibilidade dos ensaios.	62
Figura 5.4. Resultados de ensaios de aterros reforçados com geotêxtil tecido G em arranjo de camada com comprimentos de 15 cm (C15), 25 cm (C25) e 35 cm (C35).	62
Figura 5.5. Resultados de simulações de aterros reforçados com geogrelha F em arranjo de camada com comprimentos de 15 cm (C15), 25 cm (C25) e 35 cm (C35).	63
Figura 5.6. Resultados para ensaio com arranjo U-Invertido 4R de papel alumínio, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.	64
Figura 5.7. Resultados para ensaio em arranjo U-Invertido 4R com geotêxtil tecido G, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.	64
Figura 5.8. Resultado para ensaio em arranjo U-Invertido 4R de geogrelha F, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.	65
Figura 5.9. Resultado de ensaio em arranjo U-Invertido 6R de geotêxtil tecido P, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.	65
Figura 5.10. Influência da profundidade da cavidade – Ensaios em arranjos em U invertido com comprimento de pernas igual a 6R e geotêxtil P.	66
Figura 5.11. Resultados de ensaio em arranjo U-Invertido 4R e 6R de geogrelha F, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.	67
Figura 5.12. Resultado de ensaio em arranjo Envelopado-4R de papel alumínio A, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.	67
Figura 5.13. Resultados de ensaio em arranjo Envelopado 4R de geogrelha F, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.	68
Figura 5.14. Resultado de ensaio em arranjo Envelopado-4R de geotêxtil tecido P, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.	68
Figura 5.15. Resultado de ensaio não reforçado de aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	69
Figura 5.16. Resultados de ensaio em arranjo camada de papel alumínio, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	70
Figura 5.17. Resultados de ensaio em arranjo em camada de geotêxtil tecido P, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	70
Figura 5.18. Resultados de ensaio em arranjo em camada de geogrelha F, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	71
Figura 5.19. Resultados de ensaio em arranjo U-invertido 6R de papel alumínio, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	72
Figura 5.20. Resultados de ensaio em arranjo U-invertido 6R de geotêxtil tecido P,	72

aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	
Figura 5.21. Resultados de ensaio em arranjo em U-invertido-6R de geogrelha F, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	73
Figura 5.22. Resultados de ensaio em arranjo envelopado de papel alumínio, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	74
Figura 5.23. Resultados de ensaio em arranjo envelopado-4R de geotêxtil tecido P, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	74
Figura 5.24. Resultados de ensaio em arranjo envelopado-4R de geogrelha F, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.	75
Figura 5.25. Resultado de ensaio em arranjo envelopado de papel alumínio AA, aterro trapezoidal e $Z = 2R$.	76
Figura 5.26. Resultados de ensaio em arranjo envelopado de geotêxtil tecido P, aterro trapezoidal e $Z = 2R$.	77
Figura 5.27. Resultados de ensaio em arranjo envelopado com papel alumínio e em aterro sem reforço, aterro trapezoidal e $Z = 4R$.	77
Figura 5.28. Resultados de ensaio em arranjo envelopado de geotêxtil tecido-P, aterro trapezoidal e $Z = 4R$.	78
Figura 5.29. Resultados de ensaios em aterros com superfície horizontal e aterros trapezoidais com taludes 2H:1V (sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido P em arranjo U invertido).	82
Figura 5.30. Face transparente da caixa de ensaios com deslocamentos dos marcos no aterro.	83
Figura 5.31. Sistema de coordenadas da face transparente da caixa de ensaios (escala em cm).	83
Figura 5.32. Trajetórias de deslocamento na simulação E/SEM REFORÇO/AH/7R.	84
Figura 5.33. Trajetórias de deslocamento para o ensaio E/U4R/GTX-GG/AH/7R.	85
Figura 5.34. Trajetórias de deslocamento dos marcos no ensaio E/U4R/GGR-FF/AH/7R.	85
Figura 5.35. Levantamento superficial de aterro com superfície horizontal sem reforço (ensaio E/SEM REFORÇO/AH/7R).	86
Figura 5.36. Levantamento superficial do aterro com superfície horizontal reforçado (E/U6R/GTX-PP/AH/7R).	87
Figura 5.37. Levantamento superficial do aterro com superfície horizontal reforçado (código: E/E4R/GTX-PP/AH/7R).	87
Figura 5.38. Deslocamentos na superfície dos aterros em ensaios com sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido P ($Z=7R$).	89
Figura 5.39. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/SEM REFORÇO/AH/7R).	90
Figura 5.40. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/U4R/GGR-FF/AH/7R).	90
Figura 5.41. Desenvolvimento das superfícies de ruptura no ensaio E/U6R/GTX-PP/AH/7R.	91
Figura 5.42. Desenvolvimento das superfícies ruptura no ensaio E/E4R/GTX-PP/AH/7R.	91
Figura 5.43. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/SEM REFORÇO/AT/7R).	92
Figura 5.44. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/CAT/GTX-PP/AT/7R).	93
Figura 5.45. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/CAT/GGR-FF/AT/7R).	93
Figura 5.46. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/U6R/GTX-PP/AT/7R).	94
Figura 5.47. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/U6R/GGR-FF/AT/7R).	94
Figura 5.48. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/E4R/GTX-PP/AT/7R).	95
Figura 5.49. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/E4R/GGR-FF/AT/7R).	95
Figura 5.50. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/SEM REFORÇO/AT/4R).	96

Figura 5.51. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/SEM REFORÇO/AT/2R)	96
Figura 5.52. Mecanismos de expansão da cavidade: a) ensaio E/SEM REFORÇO/AH/7R; b) ensaio E/C15/GTX-GG/AH/7R e c) ensaio E/U4R/GTX-GG/AH/7R.	97
Figura 5.53. Mecanismos de expansão da tubulação: a) ensaio E/U6R/GTX-PP/AH/7R e b) ensaio E/E4R/GTX-PP/AH/7R.	98
Figura 5.54. Alongamento vertical da expansão da cavidade devido à ruptura do reforço na parte superior (ensaio E/E4R/PAL-AA/AH/7R, DSC01571).	98
Figura 5.55. Mecanismo de ruptura do reforço em arranjos envelopados.	99
Figura 5.56. Detalhes de ruptura do reforço (papel alumínio).	99
Figura 5.57. Abordagens para estimativas de pressões máximas em cavidades.	100
Figura 5.58. Comparações entre previsões e observações de pressões na cavidade na ruptura.	102
Figura 6.1. Mecanismo de solitação do aterro em consequência do vazamento de ar.	104
Figura 6.2. Aspecto típico dos efeitos causados pelo vazamento na tubulação.	104
Figura 6.3. Configuração do talude em diferentes instantes da explosão.	105
Figura 6.4. Relação entre a altura máxima (Y) atingida pelo solo lançado e pressão interna.	106
Figura 6.5. Resultados normalizados das simulações para aterros com $Z = 4R$.	110
Figura 6.6. Resultados normalizados das simulações para aterros com $Z = 2R$.	110
Figura 6.7. Formação da nuvem de areia após vazamento na tubulação ($Z = 4R$, tempo $t = 9$ a 11 ms após explosão).	111
Figura 6.8. Seqüência do vazamento da tubulação em aterro não reforçado (ensaio: D/SEM REFORÇO/AT/4R).	112
Figure 6.9. Seqüência do vazamento em aterro não reforçado e reforçado com geogrelha envelopado (ensaio: D/E3R/GGR-FF/AT/4R).	113
Figure 6.10. Seqüência do vazamento em aterro nao reforcado e reforcado com geogrelha + brita (ensaio: D/E4R/GGR-FB/AT/4R).	114
Figure 6.11. Seqüência do vazamento em aterro não reforçado e reforçado com geotêxtil S, envelopado (ensaio: D/E4R/GTX-SS/AT/4R).	115
Figure 6.12. Seqüência do vazamento de tubulação em aterro não reforçado e reforçado com geotêxtil S + PVC envelopado (código: D/E3R/GTX-SV/AT/4R).	116
Figura 6.13. Solo suspenso em aterros com $Z = 4R$.	118
Figura 6.14. Nuvem de areia em aterros reforçados e não reforçados com $Z = 2R$.	122
Figura 6.15. Esquema após explosão do efeito lateral do solo deslocado.	123
Figura 6.16. Solo deslocado efeito lateral após explosão.	127
Figura 6.17. Esquemas após explosão em aterros sem e com reforço ($Z = 2R$).	127
Figura 6.18. Detalhe do solo lançado aparente nas simulações de aterros trapezoidais, $Z=4R$.	128
Figura 6.19. Formação de cratera nas simulações de aterros trapezoidais $Z=4R$.	129
Figura 6.20. Coordenadas do aterro trapezoidal para locação do ponto D.	130
Figura 6.21. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal sem reforço (ensaio D/SEM REFORÇO/AT/4R), $p_i = 550$ kPa.	130
Figura 6.22. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal envelopado 3R, Geotêxtil S (ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R), $p_i = 590$ kPa.	131
Figura 6.23. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal envelopado 3R, Geotêxtil S-Filme (ensaio D/E3R/GTX-SV/AT/4R), $p_i = 560$ kPa.	131
Figura 6.24. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal envelopado 3R, Papel Alumínio (ensaio D/E3R/PAL-AA/AT/4R), $p_i = 560$ kPa.	132

Figura 6.25. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal envelopado 4R, Geotêxtil S, AT-4R (ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R), $p_i = 600$ kPa.	132
Figura 6.26. Deslocamentos no aterro trapezoidal envelopado 4R, Geogrelha F-Brita AT-4R (ensaio D/E4R/GGR-FB/AT/4R), $p_i = 520$ kPa.	132
Figura 6.27. Ruptura do reforço em papel alumínio (ensaio D/E3R/PAL-AA/AT/4R).	133
Figura 6.28. Mecanismos de ruptura de tubulações: a). Sem Reforço; b). Envelopado 3R, Geogrelha F; c). Envelopado-3R, Geotêxtil S; d). Envelopado-4R, Geotêxtil S.	134
Figura 6.29. Explosão da tubulação pressurizada não enterrada.	135
Figura 6.30. Ondas acústicas de explosão nos ensaio	136

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E NOMENCLATURA

a	adesão entre solo e reforço;
AT	área da seção do aterro trapezoidal.
b	altura ou espessura dos membros de ancoragem;
C	cunha de solo acima da cavidade de expansão
c'	coesão efetiva do solo
CR	área da seção da cratera;
D	diâmetro da cavidade, largura da cratera
f	coeficiente de aderência por atrito entre solo e reforço;
f_b	coeficiente de aderência entre solo e geogrelha
fm1, fm2	faixas milimétricas
H	profundidade da cratera
h	altura do aterro trapezoidal
ISS	índice de suspensão de solo em lpercentagem
K_a	coeficiente empuxo ativo do solo,
k_o	coeficiente de empuxo lateral do solo no repouso de Jaky ($1 - \text{sen } \phi$);
L	comprimento da tubulação; comprimento da camada de reforço horizontal
MD	área da massa de solo deslocado;
ms	Milisegundos
p	pressão na cavidade na ruptura, pressão máxima na cavidade
p_c	pressão interna calibragem
p_e	pressão no solo, pressão transferida ao solo ou resistência à expansão kPa
p_i	pressão interna na tubulação, pressão de ensaio ou simulação (em kPa)
QCR	quantidade relativa de formação da cratera;
QMD	quantidade relativa de solo deslocado;
Q_R	resistência oferecida pelo terreno contra a suspensão do solo,
QSL	quantidade relativa de solo lançado;
R	raio da cavidade de expansão, raio da tubulação
RSS	redução do solo suspenso em percentagem
S0, S1	superfície de ruptura em ordem de aparecimento
s_g	espaçamento entre membros de ancoragem;
SL	área de solo lançado;
ss	área de solo suspenso em aterro sem reforço
T	força de tração mobilizada no reforço, resistência à tração do reforço
T_{\max}	resistência a tração do reforço.
VAT	volume inicial do aterro incluindo o volume da tubulação.
VSS	volume somente do solo suspenso
VSSCR	volume de solo suspenso na simulação de sistema com reforço
VSSSR	volume do solo suspenso de sistema sem reforço
W	peso do bloco de solo acima da cavidade,
Y	altura máxima, altura atingida medida no ensaio
Y'	altura atingida (equação 6.1, cm); altura de solo lançado em sistema não reforçado
Z	profundidade de posicionamento da cavidade, altura de solo acima da cavidade.
z'	profundidade de ao meio da cavidade
α_b	fração da área total sólida disponível em cada membro de ancoragem da grelha;
α_s	fração da área em planta da grelha disponível para atrito com o solo;
ϕ	ângulo de atrito do solo

ψ	ângulo de dilatância do solo.
θ	inclinação da força no reforço com a horizontal,
γ	peso específico do solo,
ψ	ângulo de dilatância do solo.
ΔY	diferença entre Y' e Y .
μ	coeficiente de atrito entre materiais na superfície de ruptura
$\Delta V/V_0$	variação volumétrica de cavidade (%)
δ	ângulo de atrito de interface equivalente entre solo e greogrelha;
δ	ângulo de atrito entre solo e reforço.
δ_p	ângulo de atrito de interface do solo com a superfície sólida da geogrelha;
ϕ	ângulo de atrito do solo;
λ	coeficiente de aderência por adesão entre solo e reforço a solo
σ'	pressão normal efetiva no plano do reforço;
σ'_b	tensão normal desenvolvida em cada membro de ancoragem
σ_v	tensão vertical atuante sobre a geogrelha.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 A TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS POR INCLUSÕES

Nos últimos anos, o uso dos materiais geossintéticos como reforço de obras geotécnicas tem crescido muito, ampliando também os âmbitos de suas aplicações (Koerner, 1998). As razões para o crescente uso desses materiais são muitas como, por exemplo: eles são manufaturados com adequado controle de qualidade, podem ser instalados rapidamente, substituem materiais naturais, seu uso é requerido pela regulamentação ambiental em alguns casos, suas aplicações são diversas e são ativadores do mercado de materiais de construção.

Os solos e reforços estudados isoladamente podem ser caracterizados com relativa facilidade. Entretanto, o estudo da interação entre solo e reforço é complexo, particularmente no que diz respeito a solos finos, devido à maior compressibilidade, menor resistência e geração de poropressões nestes solos (Palmeira, 1987; Zornberg & Mitchell, 1992). Há que se considerar também em maciços reforçados a durabilidade do reforço, o comportamento quanto à fluência e a redistribuição de tensões e deformações no maciço.

A técnica de reforço de solos apresenta grande potencial para aumentar a segurança de obras geotécnicas e minimizar os problemas da conservação do meio ambiente. Nesse contexto, o presente trabalho visa estudar a aplicação de geossintéticos como elemento de reforço em aterros para proteção de tubulações pressurizadas e minimizar os efeitos de explosões ou vazamentos. As explosões em áreas muito povoadas são perigosas e podem apresentar conseqüências fatais e perdas materiais.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Na atualidade, a procura de fontes de energia mais econômicas e menos poluentes está impulsionando a exploração de gás natural. O transporte desses fluidos combustíveis pode ser

feito por meio de gasodutos, que são sistemas bastante interessantes pelas suas vantagens de rapidez, quantidade de massa transportada e economia. Porém, estas estruturas também apresentam situações de risco (explosões), que são mais relevantes principalmente quando atravessam regiões povoadas ou que requeiram cuidados especiais (áreas industriais). Assim, a tendência de construção de gasodutos em diversos países e, particularmente, na América Latina, está crescendo, o que torna cada vez mais importante o desenvolvimento de técnicas que protejam tais instalações e minimizem as conseqüências de acidentes.

Uma explosão de gás é definida como um processo onde a combustão de um gás pré-misturado causa rápido acréscimo da pressão como, por exemplo, nas misturas combustível-ar ou combustível-oxidante. Contudo, no ponto de transição à detonação, pode gerar uma força excedente à resistência da tubulação (Bjerketvedt *et al.*, 1997).

Os gasodutos apresentam grandes riscos de explosões e a técnica de reforço de solos com geossintéticos poderia ser aplicada para minimizar conseqüências de acidentes nas proximidades de regiões povoadas, como também, dentro das cidades que utilizam tubulações de gás para distribuição. A literatura técnica apresenta inúmeros acidentes em gasodutos e oleodutos; estes eventos são relatados por muitos autores, como por exemplo Manfredi & Otegui (2002), National Transportation Safety Board (2001), Kinsman & Lewis (2000), Bjerketvedt *et al.* (1997).

1.2.1 CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO DE TUBULAÇÕES

As condições de instalação de tubulações na construção de gasodutos podem ser motivos de acidentes. Na Figura 1.1 são mostradas algumas solicitações que podem provocar acidentes em tubulações. A Figura 1.2 mostra tubulações sujeitas a acidentes por causa de instabilidade de solos.

A Figura 1.3 apresenta esquemas para proteção de tubulações sob pressão em aterros reforçados com geossintéticos. O reforço com o geossintético visa minimizar os efeitos da explosão de tubulações pressurizadas, assim como representar uma camada de prevenção e proteção das tubulações contra impactos de diferentes naturezas.



Figura 1.1. Mecanismos deletérios a tubulações enterradas.

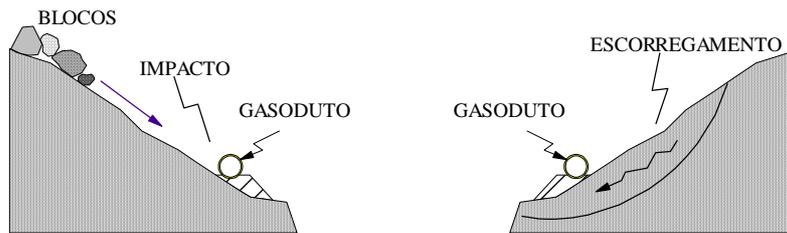


Figura 1.2. Tubulações sujeitas a acidentes por instabilidade de taludes.

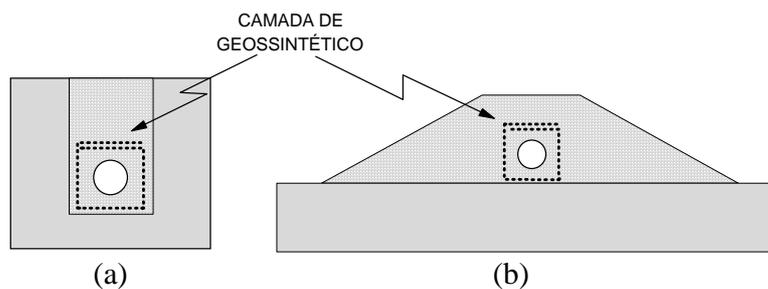


Figura 1.3. Aplicações de geossintéticos para proteção de tubulações pressurizadas enterradas
(a). superfície horizontal. b). aterro trapezoidal)

1.3 OBJETIVOS

O presente estudo visou avaliar a resistência à expansão de maciços com e sem reforço por meio de ensaios de expansão de cavidades e avaliar os efeitos de explosões em ensaios em modelos reduzidos. Os objetivos da pesquisa foram:

- Estudar a aplicação de geossintéticos como reforço de aterros de gasodutos visando minimizar os efeitos das explosões;
- Estudar os mecanismos de ruptura de sistemas solo-tubulações e solo-tubulações-geossintéticos (maciços sem e com reforço) por meio da simulação de explosões em ensaios

de expansão de cavidades, em aterros de superfície horizontal e aterros trapezoidais com taludes 2H:1V, sob condições de deformação plana;

- Selecionar o geossintético com desempenho mais adequado aos carregamentos das explosões em ensaios de expansão de cavidades;

- Adotar o arranjo geométrico do reforço com desempenho mais eficiente por meio de ensaios de expansão de cavidade;

- Estudar os deslocamentos e deformações provocadas no maciço;

- Estudar os mecanismos de ruptura de sistemas solo-tubulações e solo-tubulações-geossintéticos (maciços sem e com reforço) através de explosões controladas em protótipos de aterros de taludes 2H:1V;

- Estudar os parâmetros físicos e geométricos relevantes em aterros reforçados (profundidade de posicionamento da tubulação, tipo de reforço, tipo de arranjo do reforço etc).

1.4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Para realização do estudo foi utilizada metodologia observacional, complementada por processo experimental. Foram estabelecidas duas condições de ensaio: a de expansão de cavidade, visando simular, em velocidade reduzidíssima, a expansão do solo provocada pela explosão de tubulação, e vazamento em tubulação enfraquecida com pressão controlada. A Figura 1.4 mostra as idealizações das tubulações para os modelos físicos de laboratório em cada caso.

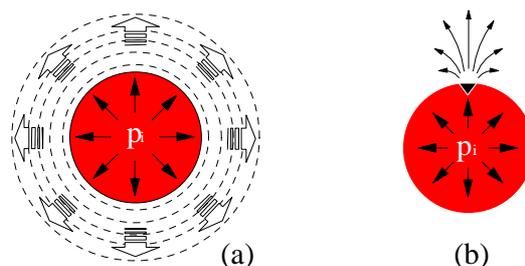


Figura 1.4. Mecanismos simulados nos ensaios: (a) expansão de cavidade (b) vazamento em tubulação enfraquecida.

1.5 ESCOPO DO TRABALHO

O estudo consta de duas partes. A primeira parte apresenta o estudo do comportamento de maciços reforçados para proteção de tubulações sob pressão, por meio da simulação de explosões em ensaios de expansão de cavidade, sob condições de deformação plana. Na segunda parte, apresenta-se o estudo do comportamento de maciços reforçados de proteção de tubulações sob pressão, por meio de explosões controladas provocadas pelo estouro de tubulações pressurizadas com ar comprimido. O trabalho está dividido em sete capítulos, descritos sumariamente a seguir:

O Capítulo 1 apresenta o tema de estudo, a descrição do problema, os objetivos e a metodologia para realização do trabalho.

O Capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica com temas relacionados à técnica de reforço de solos por inclusões; a explosões de gasodutos, com descrição de casos de explosões ocorridos em diferentes locais e com diversas conseqüências; mecanismos de explosão e de ruptura de tubulações sob pressão; mecanismos de ruptura de maciços e previsões de levantamento de solos.

O Capítulo 3 descreve os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios de modelo em ambos os mecanismos simulados.

O Capítulo 4 apresenta a descrição da metodologia empregada no estudo da expansão de cavidade e ensaios de explosão de tubulações em escala reduzida.

O Capítulo 5 apresenta os resultados de ensaios de expansão de cavidades variando tipos de arranjo dos reforços, tipos de geossintéticos e tipos de aterros (aterro de superfície horizontal e aterros de seção trapezoidal com taludes 2H:1V). Apresenta também os resultados de estudo da expansão de cavidade variando-se a profundidade de posicionamento da cavidade de expansão (Z) e são abordados mecanismos de deformação da cavidade, do levantamento da superfície do aterro, mecanismos de ruptura do maciço e mecanismos de ruptura dos reforços.

O Capítulo 6 apresenta os resultados de ensaios de vazamento de tubulações com pressão controlada em aterros de seção trapezoidal de taludes 2H:1V e análises do lançamento do solo do aterro causado pelo vazamento. São analisadas também a formação de crateras e a deformação dos aterros. Os efeitos da explosão variando a profundidade de posicionamento da tubulação de explosão são analisados e descritos os mecanismos de ruptura das tubulações.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - GENERALIDADES SOBRE A TÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS COM INCLUSÕES

A técnica de reforço de solos com inclusões era conhecida por muitas civilizações antigas, tais como a Mesopotâmica, Romana, Chinesa e Inca (Palmeira, 1987; Campbell, 1990; Tupa, 1994 e Koerner, 1998). Os materiais utilizados como reforços eram de origem natural, tais como raízes, galhos (palha, bambu) e lã. Na Mesopotâmia, tais materiais foram usados nas muralhas de Zigurat de Agar Quf, enquanto na China foram utilizados em alguns trechos da Grande Muralha. Em Roma, os materiais de reforço consistiram de palha e bambu, utilizados debaixo de caminhos de pedra. No Tahuantinsuyo (cultura inca) utilizou-se mistura de lã com argila nas calçadas dos templos. Já na época moderna, os EUA, Holanda, França e outros países, começaram a utilizar materiais sintéticos há mais de 50 anos. Uma seqüência histórica resumida a respeito da utilização da técnica de reforço de solos é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Marcos da evolução cronológica da técnica de reforço de solos com inclusões (Palmeira, 1987; Campbell, 1990; Tupa, 1994 e Koerner, 1998)

DATA	LOCAL	OBRA DE APLICAÇÃO	TIPO DE INCLUSÃO
1400 AC	Mesopotâmia	Muralhas de Zigurat de Agar Quf	Mantas de raízes
	China	Trechos da Muralha China	Galhos e raízes
	Roma	Estradas de pedra	Palha e bambu na base
1500	Peru (Incas)	Calçadas Templo do Sol e a Lua	Misturas de lã com argila
1926	EUA	Reforço de camada asfáltica	Mantas de algodão
Após 1950	EUA/Holanda	Diversidade de obras civis	Elementos sintéticos
1966	França	Muros de contenção e aterros	Tiras metálicas
Após 1970	Mundialmente	Diversas Aplicações	Geossintéticos em geral

2.2 – REFORÇO DE SOLOS COM INCLUSÃO DE GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são produzidos por indústrias petroquímicas ou com borracha natural, fibra de vidro e outros materiais similares (Koerner, 1998). As principais propriedades mecânicas e/ou hidráulicas dos geossintéticos são aproveitadas para melhoria das condições de resistência e /ou drenagem dos maciços.

Nos últimos anos, o uso dos materiais geossintéticos como reforço de obras geotécnicas tem crescido muito, ampliando também o seu campo de aplicações. Segundo Palmeira (1987), o reforço de um solo por meio de uma inclusão consiste em instalá-lo nas regiões do maciço, onde sua presença gerará uma redistribuição favorável de tensões e deformações. A inclusão causa um acréscimo da resistência do material composto e a diminuição de sua compressibilidade. Podem ser aplicados carregamentos maiores a estruturas de solo reforçado em relação a uma estrutura não reforçada.

2.3 - MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS

Na presente data pode ser encontrada diferentes tipos de produtos geossintéticos para utilização como reforço. As descrições das características poliméricas constitutivas dos geossintéticos, das suas propriedades físicas e mecânicas, dos tipos de geossintéticos e das suas aplicações podem ser encontradas com detalhes em Koerner (1998), John (1987), Rankilor (1981) entre outros.

Os materiais geossintéticos apresentam características e funções diversas em obras geotécnicas e de proteção ambiental. A seguir, de maneira concisa, são apresentados os principais geossintéticos e suas características.

2.3.1 - GEOTÊXTIL

Geotêxtil é um produto têxtil permeável, utilizado predominantemente na engenharia geotécnica, com funções de drenagem, filtração, reforço, separação e proteção. Segundo Palmeira (2001) o geotêxtil tecido é o material composto do entrelaçamento de fios, filamentos, laminetes ou outros componentes, segundo direções preferenciais denominadas

trama e urdume (Figura 2.1 (a)). O geotêxtil não tecido é o material composto de fibras ou filamentos orientados ou distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos e/ou químicos (Figura 2.1 (b)).

2.3.2 - GEOGRELHA

A geogrelha é uma estrutura plana, em forma de grelha, constituída por elementos com característica predominante de resistência à tração (Figura 2.1 (c)). As geogrelhas podem ter variadas formas espaciais, dependendo do produto e do fabricante (Palmeira, 2001).

2.3.3 - GEOMEMBRANA

A geomembrana é um elemento com baixíssima permeabilidade (Figura 2.1 (d)) utilizada como barreira para contenção de líquidos e gases.

2.3.4 - GEORREDE

A georrede é uma estrutura plana constituída de forma a apresentar grande volume de vazios, utilizada predominantemente como meio drenante, como mostrado na Figura 2.1 (e) (Palmeira, 2001).

2.3.5 - GEOCOMPOSTO

O geocomposto é um produto formado pela associação de geossintéticos com funções diversas, como mostrado na Figura 2.1 (f) (Palmeira, 2001).

2.3.6 - GEOCÉLULAS

As geocélulas são materiais compostos por unidades (células) que confinam o solo (ou concreto) em seu interior (Figura 2.1 (g)). Podem ser superpostas uma às outras para a construção de estruturas de arrimo de gravidade ou serem instaladas sobre taludes como fixador de vegetação contra erosão superficial (Palmeira, 2001).

2.3.7 - GEODRENOS

Os geodrenos são compostos de tiras plásticas ranhuradas ou nervuradas ou tubos plásticos perfurados, envoltos por geotêxtil não tecido para utilização em drenagem e filtração, como mostrado na Figura 2.1 (h) (Palmeira, 2001).

2.3.8 - TIRAS PLÁSTICAS

As tiras plásticas são desenvolvidas para servirem como reforço em obras do tipo “terra armada” em situações de ambiente agressivo para as tradicionais tiras metálicas, como mostrado na Figura 2.1 (i) (Palmeira, 2001).

2.3.9 - FIBRAS

Fibras, micro-telas ou fios podem ser misturados ao solo a ser compactado, formando um material composto (fibrasolo), com maior resistência mecânica, como mostrado na Figura 2.1 (j) .

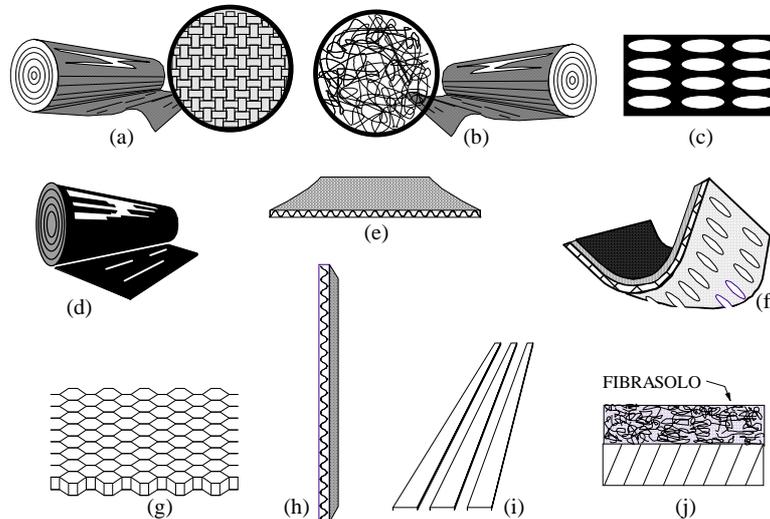


Figura 2.1. Tipos comuns de geossintéticos (modificado – Palmeira, 1993).

2.4 - PROPRIEDADES RELEVANTES DOS GEOSSINTÉTICOS

O estudo das propriedades dos geossintéticos tem grande relevância e foi tratado com detalhes por Rankilor (1981), John (1987), Palmeira (1987), Ingold & Miller (1988), Gomes

(1993) e Koerner (1998). Também, na atualidade, os pesquisadores vêm investigando com mais detalhes a durabilidade e a biodegradabilidade de reforços sintéticos enterrados. Com o intuito de fornecer uma idéia geral destas propriedades, apresenta-se a seguir uma listagem das propriedades relevantes para um geossintético.

- Propriedades Mecânicas dos geossintéticos: Compressibilidade; Flexibilidade; Resistência à tração; Resistência à propagação ao Rasgo; Resistência à perfuração; Resistência ao impacto e Resistência ao estouro.

- Propriedades de Durabilidade: Resistência à fadiga; Fluência e relaxação de tensões; Influência da temperatura; Resistência à degradação química; Resistência à degradação biológica; Resistência à foto-oxidação e Resistência à abrasão.

- Propriedades de Interação Solo-Geossintético: Resistência ao Cisalhamento de Interface; Resistência ao Arrancamento e Resistência à Tração confinada.

2.5 - INTERAÇÃO SOLO-REFORÇO

As estruturas geotécnicas reforçadas com geossintéticos, tais como muros de contenção, aterros, etc., podem apresentar características de interação entre solo e reforço como as mostradas na Figura 2.2. Para cada tipo de interação entre solo e geossintético deve-se identificar o mecanismo de ruptura. A maneira de quantificar os parâmetros de resistência gera diferentes tipos de ensaios de laboratório e de campo.

Na Figura 2.2 o ponto A se caracteriza pelo deslizamento entre a região superior do aterro e o geossintético; o ponto B se caracteriza pela interação entre o solo e o geossintético na superfície de ruptura; o ponto C se caracteriza pelo arrancamento do geossintético e no ponto D solo e reforço podem se deformar mantendo compatibilidade de deformações.

A aderência entre o solo e o reforço é de importância vital para o projeto de estruturas de solo-reforçado e depende do tipo de solo, tipo de reforço e como eles interagem

entre si (Andrawes *et al.*, 1982). O grau de interação entre solo e reforço, bem como os mecanismos de ruptura desenvolvidos, são também uma função da geometria do reforço (Palmeira, 1987; Swan Jr, 1987).

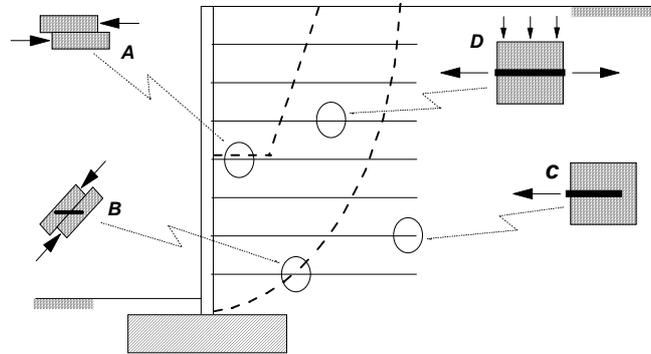


Figura 2.2. Mecanismos de interação em estruturas reforçadas (modificado – Palmeira, 1999).

2.5.1 - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto pode ser utilizado para avaliar os parâmetros de resistência da interface solo-geossintético. Vários autores estudaram este tipo de utilização introduzindo ou não modificações no equipamento de cisalhamento direto (Christie & El-Hadi, 1977; Myles, 1982; Richards & Scott, 1985; Palmeira, 1987; Sharma & Hullings, 1993; Gomes, 1993, e Tupa, 1994).

2.5.2 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO

O ensaio basicamente consiste em se arrancar um elemento de reforço enterrado na massa de solo. A escala e as condições de fronteira utilizadas no ensaio podem variar bastante dependendo das características do equipamento, em particular a face frontal da caixa. As condições de fronteira podem afetar significativamente os resultados do ensaio (Palmeira, 1987; Palmeira & Milligan, 1989; Ingold & Miller, 1988). No caso de geogrelhas, o ensaio de arrancamento simula melhor as condições no trecho de ancoragem do reforço.

2.5.3 - ENSAIO DE TRAÇÃO CONFINADA

A utilização de uma manta de reforço em uma obra real apresenta particularidades que não são abordadas nos ensaios convencionais de tração isolada. A principal delas é,

provavelmente, o confinamento do elemento de reforço pelo solo envolvente. Nos geotêxteis tecidos, as propriedades das fibras constituintes podem dominar o comportamento global (Palmeira, 1993). No entanto, para os geotêxteis não-tecidos e geocompostos, o fator dominante pode ser a sua estrutura interna (arranjo dos fios), o que provoca alterações substanciais na resposta do geossintético quando ensaiado sob condições de confinamento. A tração confinada foi estudada em detalhes por McGown *et al.* (1982), El-Fermaoui & Nowatzki (1982), Kokkalis & Papacharisis (1989), Christopher *et al.* (1986), Gomes (1993), Tupa (1994) e Martins, (2000).

2.6 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE INTERFACE ENTRE SOLO E REFORÇO

A determinação dos parâmetros de resistência de interface entre solo e reforço é de fundamental importância para o dimensionamento de obras em solo reforçado. No início da utilização de geossintéticos em Geotecnia, na ausência de resultados de ensaios, era comum a utilização de relações empíricas, tais como $\delta = 2\phi/3$ para solos granulares, onde δ é o ângulo de atrito de interface e ϕ é o ângulo de atrito do solo (Palmeira, 1987; Gomes, 1993). Os condicionantes sobre os parâmetros de interação solo-reforço foram estudados por diferentes autores (Christie & El-Hadi, 1977; Myles, 1982; Richards & Scott, 1985; Palmeira, 1987; Sharma & Hullings, 1993; Gomes, 1993, Tupa, 1994). A resistência ao cisalhamento na interface solo-reforço pode ser expressa por:

$$\tau = a + \sigma' \tan \delta \quad (2.1)$$

onde: a é a adesão entre solo e reforço; σ' é a tensão normal efetiva no plano do reforço; δ é o ângulo de atrito entre solo e reforço.

Os fatores de aderência em termos de atrito e adesão são definidos por:

$$f = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{a}{c'} \quad (2.3)$$

onde: f é o coeficiente de aderência por atrito entre solo e reforço; λ é o coeficiente de aderência por adesão entre solo e reforço e c' é a coesão efetiva do solo.

Para geogrelhas, a obtenção de atrito de interface é mais complexa. Isto se deve ao fato de que a intensidade de interação entre solo e geogrelha depende das características mecânicas da geogrelha, das características do solo, da geometria da grelha, do comprimento ensaiado e das condições de ensaio (Palmeira, 1987 e Palmeira e Milligan, 1989). A expressão abaixo é sugerida por Jewell *et al.* (1984) para estimativa do coeficiente de interação entre solo e geogrelha:

$$f_b = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} = \alpha_s \left(\frac{\tan \delta_p}{\tan \phi'} \right) + \left(\frac{\alpha_b b}{s_g} \right) \left(\frac{\sigma'_b}{\sigma'_v} \right) \left(\frac{1}{2 \tan \phi'} \right) \quad (2.4)$$

Onde: f_b é o coeficiente de aderência entre solo e geogrelha; δ é o ângulo de atrito de interface equivalente entre solo e geogrelha; ϕ' é o ângulo de atrito do solo; δ_p é o ângulo de atrito de interface do solo com a superfície sólida da geogrelha; α_s é a fração da área em planta da grelha disponível para atrito com o solo; α_b é a fração da área total sólida disponível para ancoragem em cada membro de ancoragem da grelha; b é altura ou espessura dos membros de ancoragem; s_g é o espaçamento entre membros de ancoragem; σ'_b é a tensão normal desenvolvida em cada membro de ancoragem e σ'_v é a tensão vertical atuante sobre a geogrelha.

2.7 – GASODUTOS E EXPLOSÕES DE GASODUTOS

A tendência de construção de gasodutos é crescente, particularmente na América Latina. À medida que cresce a malha de dutos no Brasil, aumenta a possibilidade de ocorrência de acidentes em tubulações que transportam gases ou outro fluido inflamável, além do aumento de ocorrência de vazamentos (Pimentel, 2003). No Peru, já funciona o gasoduto de Camisea. A Bolívia instalou um gasoduto que transporta gás para a região sul do Brasil. Atualmente, projeta-se a implantação de um anel energético por meio de um gasoduto com a participação da Bolívia, Peru, Brasil, Argentina e Chile. Outro gasoduto vai unir Venezuela,

Brasil e Argentina. As principais preocupações relativas a gasodutos e oleodutos são as possibilidades de explosões e vazamentos.

2.7.1 EXPLOSÕES DE GASODUTOS

Nos acidentes com gasodutos muitos dos danos e vítimas são comumente resultados da combustão de gás. A ignição de gás não necessariamente acontece no momento do estouro da tubulação e pode ocorrer muitos minutos após vazamento até o desencadeamento do mecanismo de ignição e conseqüente explosão.

São inúmeros os acidentes em gasodutos e oleodutos. Estes eventos foram relatados por muitos autores como, por exemplo, Manfredi & Otegui (2002), National Transportation Safety Board (2001), Kinsman & Lewis (2000), Bjerketvedt *et al.* (1997). Também são inúmeras as ocorrências relatadas pela mídia. A título de exemplo, a Figura 2.3 mostra as conseqüências de uma explosão de um tubo de gás, com $\frac{3}{4}$ " ($\cong 19$ mm) de diâmetro, em St. Cloud, Minnesota (National Transportation Safety Board, 2000a).



Figura 2.3. Vista geral pós-explosão em decorrência de vazamento de tubulação de gás com $\frac{3}{4}$ " de diâmetro (modificado - National Transportation Safety Board, 2000a).

Muitas explosões de gasodutos geralmente resultam em incêndios. Essas circunstâncias aumentam os níveis de danos e perdas. As situações de incêndios podem comprometer grandes trechos de um gasoduto. A Figura 2.4 (a) mostra a vista geral do incêndio decorrente da explosão de uma tubulação de gás de 30 polegadas ($\cong 76$ cm) de diâmetro em Near Carlsbad, New México (National Transportation Safety Board, 2000b), onde ocorreram perdas de vidas humanas. A altura das chamas ultrapassou a altura das torres de suporte da tubulação. A Figura 2.4 (b) mostra as conseqüências da explosão e a Figura 2.4

(c) mostra a cratera gerada (National Transportation Safety Board 2000b). A Figura 2.5 mostra uma outra explosão ocorrida em zona industrial da Bélgica (Rossignel, 2004), onde 9 pessoas morreram e houve mais de 150 feridos.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.4. Explosão de gasoduto tubulação de 30 polegadas de diâmetro em Near Carlsbad, New México: (a). Incêndio causado após a explosão; (b) Vista geral da explosão de gasoduto; (c) Cratera gerada pela explosão (modificado - National Transportation Safety Board, 2000b).



Figura 2.5. Explosão de tubulação em zona industrial Bélgica (modificado -Rossignol, 2004).

As figuras acima mostram ampla visão geral dos acidentes gerados pelas explosões de tubulações de gás enterradas e ilustram diferentes tipos de danos causados pelas explosões (perdas de vidas humanas e perdas materiais ou danos ao meio ambiente). Como a instalação de tubulações pressurizadas aumenta em número e magnitude relevante, as possibilidades de ocorrências de acidentes e vazamentos também aumentam. Acidentes como os descritos anteriormente incentivaram o desenvolvimento do presente estudo sobre a utilização da técnica de reforço dos solos para proteção de tubulações sob pressão.

2.7.2 TIPOS DE MECANISMOS DE RUPTURA DE TUBULAÇÕES PRESSURIZADAS

São diversos os tipos de mecanismos de ruptura de tubulações pressurizadas. Alguns estudos experimentais foram realizados em tubulações sem confinamento, com diferentes propósitos (Thomas & Oakley, 1998; Beltman *et al.*, 1999; Lam & Zielonka, 2002). Poucos são os estudos teóricos dos mecanismos de ruptura de tubulações (Ford, 1994 e Lam & Zielonka, 2002).

Na atividade de transporte de gases por tubulações enterradas, os mecanismos de ruptura são diversos e dependem do tipo de material da tubulação, sua localização e da pressão interna atuante. A seguir se apresentam alguns tipos de ruptura de tubulações em eventos de explosões.

A Figura 2.6 apresenta uma ruptura de tubulação de polietileno usada para distribuição de gás em South Riding, Virginia, USA (National Transportation Safety Board, 2001),

caracterizada por um furo em ponto de fraqueza. A Figura 2.7 mostra uma ruptura como efeito do SCC (*stress corrosion cracking*) que ocorreu em oleoduto na Argentina (Manfredi & Otegui, 2002). A Figura 2.8 apresenta uma ruptura de tubulação de 75 cm de diâmetro por efeito de sobrepressão nas cercanias da válvula de compressão, também na Argentina (Manfredi & Otegui, 2002).

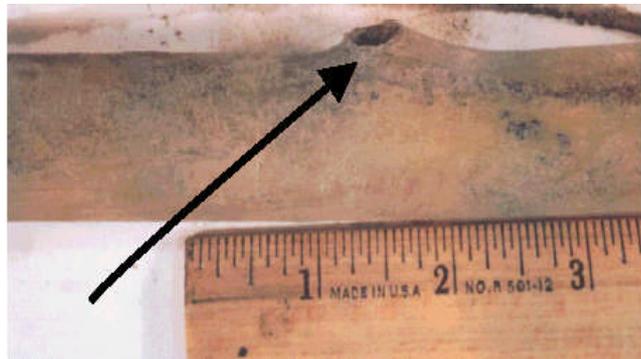


Figura 2.6. Ruptura de tubulação de polietileno de 3/4", distribuição de gás (modificado - National Transportation Safety Board, 2001).

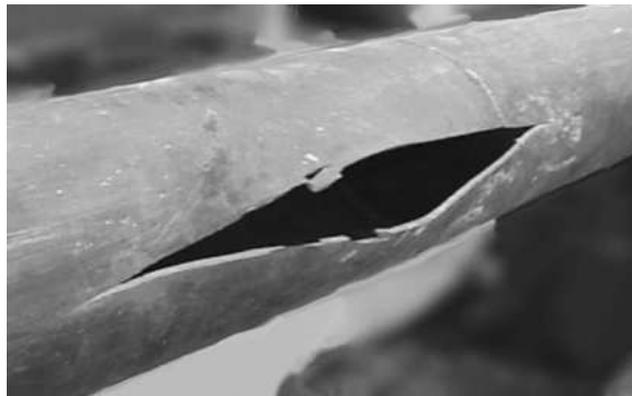


Figura 2.7. Ruptura de tubulação de aço por efeito de SCC (modificado – Manfredi & Otegui, 2002).



Figura 2.8. Ruptura de tubulação de aço de 75 cm de diâmetro (modificado – Manfredi & Otegui, 2002).

A Figura 2.9 apresenta um mecanismo de ruptura circunferencial no topo superior de uma tubulação de 10". O vazamento de combustível diesel, aproximadamente 1272 barris, provocou perdas em torno de 7 milhões de dólares, em Knoxville, Tennessee (National Transportation Safety Board, 2000c).



Figura 2.9. Ruptura de uma tubulação de combustível diesel, Knoxville, Tennessee (modificado - National Transportation Safety Board, 2000c).

A Figura 2.10 mostra uma ruptura por dobra de tubulação pressurizada em Near Chalk Point, Maryland (National Transportation Safety Board, 2000e).



Figura 2.10. Ruptura por dobra em tubulação, Near Chalk Point, Maryland (modificado - National Transportation Safety Board, 2000e).

A Figura 2.11 mostra a ruptura de uma tubulação de petróleo com 24" de diâmetro, gerando vazamento e prejuízos de 7,1 milhões de dólares em Winchester, Kentucky (National Transportation Safety Board, 2000d). Já a Figura 2.12 mostra a ruptura de tubulação de 20" por impacto de peça de escavação que ocasionou explosão e incêndio na tubulação de gás em Indianápolis, Indiana. Neste caso, teve-se uma vítima fatal e os prejuízos econômicos foram superiores a 2 milhões de dólares.

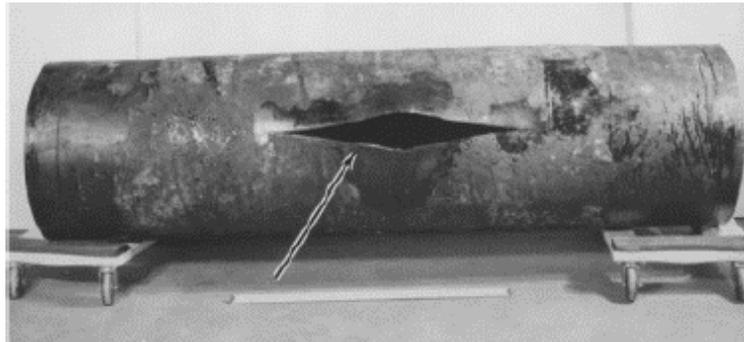


Figura 2.11. Ruptura de tubulação de petróleo de 24" de diâmetro (modificado - National Transportation Safety Board, 2000d).



Figura 2.12. Ruptura de tubulação de 20" de diâmetro por impacto de máquina de escavação em Indianápolis, Indiana (modificado - National Transportation Safety Board, 1999).

A Figura 2.13 mostra a ruptura de oleoduto que provocou contaminação no rio Reedy, Fork Shoals, South Caroline (National Transportation Safety Board, 1998), Estados Unidos.



Figura 2.13. Ruptura da tubulação e vazamento de óleo no rio Reedy, Fork Shoals, South Caroline (modificado - National Transportation Safety Board, 1998).

2.8 – RESULTADOS DE PESQUISAS SOBRE DUTOS E CAVIDADES NA LITERATURA TÉCNICA

Alguns estudos experimentais e teóricos sobre mecanismos de ruptura em tubos pressurizados (confinados ou não) e tubulações podem ser encontrados na literatura (por exemplo: Bulson, 1966; Thomas e Oakley, 1998; Beltman e Shepherd, 1998 e Lam e Zielonka, 2002), e alguns deles são sumariados a seguir.

Bulson (1966) apresentou os resultados de pesquisa sobre os modos de colapso de tubos com paredes finas, abertas nas extremidades e seção quadrada enterradas em areia densa. Os ensaios envolveram a aplicação de tensões verticais monotonicamente (condições de laboratório) e dinamicamente (condições de campo). O carregamento foi aplicado por meio de bolsa pressurizada. No caso dos ensaios dinâmicos, os explosivos foram detonados variando a distancia em relação posicionamento das amostras.

Vesić (1972) apresentou um estudo do problema da expansão de cavidades em solo devido ao interesse de solução de problemas geotécnicos tais como capacidade de carga de fundações profundas, interpretação de ensaios com pressiômetro, desenvolvimento de crateras

por explosão e resistência de ancoragens. Na maioria dos casos, o estudo envolveu a expansão de uma cavidade esférica ou cilíndrica dentro de uma massa de solo homogêneo e isotrópico de extensão infinita. Assim, derivaram-se equações que permitiam a avaliação da pressão última da cavidade em função das propriedades do solo. O autor mostrou que os principais parâmetros que afetam a tensão de ruptura da cavidade são: a tensão efetiva inicial no solo, a resistência e características de acréscimo volumétrico do solo, assim como o índice de rigidez do solo, definido como a razão entre o seu módulo de elasticidade e a sua resistência ao cisalhamento inicial.

Trautmann *et al.* (1985) afirmam que o projeto de tubulações enterradas em regiões movimentadas são governadas, em parte, pela magnitude das forças impostas acima da tubulação e os deslocamentos que elas provocam. O estudo experimental destes efeitos abordou a influencia da densidade do solo e da profundidade de enterramento. Os resultados se compararam bem com vários modelos publicados para areias medias e densas, mas os valores medidos da resistência ao levantamento foram muito menores que as previsões, no caso de areias soltas.

Selvadurai (1989) apresentou resultados de ensaios preliminares realizados para estudo do possível uso de geogrelhas para aumentar a resistência ao levantamento de tubulações enterradas. Os resultados do estudo sugerem que a resistência ao levantamento da tubulação pode aumentar significativamente devido à incorporação de geogrelhas na região da coroa da tubulação.

Nogami e Zhu (1994) apresentaram um método semi-analítico desenvolvido para dar maior eficiência ao domínio do tempo na análise da resposta dinâmica de uma cavidade cilíndrica de comprimento finito, com seção transversal arbitrária, utilizando o método dos elementos de contorno. A alta eficiência computacional foi lograda por mapeamento do formato complexo de seção transversal com formato circular. Para esse propósito foi apresentada uma equação de transformação de coordenadas. Foram determinadas as tensões transientes e deslocamentos, que são influenciados pela razão de esbeltez, o comprimento acima do diâmetro da cavidade e o ângulo de incidência da onda transiente de incidência elástica (ação do plano das tensões em relação ao eixo da cavidade).

Rogers e Chapman (1998) estabeleceram soluções particulares com muita acurácia e relativamente simples para previsão de deslocamentos ao redor de tubulações em valas. Foram descritas três análises alternativas, todas usadas, ou sugeridas, para o controle de deslocamentos ao redor de túneis. Os resultados das técnicas de análise teórica foram comparados com dados experimentais de ensaios em modelos reduzidos, simulando a operação de tubulações.

Beltman & Shepherd (1998) apresentaram resultados de estudo da resposta estrutural de tubos com paredes finas para condições de solicitação de detonação e explosão. Thomas & Oakley (1998) estudaram a resposta dinâmica e ruptura potencial de tubos por explosões internas. Lam & Zielonka (2002) apresentaram os resultados de ensaios de tubos com paredes finas de plástico pela detonação de carregamentos gasosos.

Yu e Carter (2002) estudaram o problema de expansão de cavidade de raio zero. Nesse caso, a primeira aproximação da velocidade incremental de Hill foi usada para analisar a expansão da cavidade em material obedecendo ao critério de ruptura de Tresca, podendo a solução ser estendida para a obtenção da pressão limite de cavidade de expansão em material Mohr-Coulomb.

A técnica de reforço de solos pode ser utilizada no reforço de aterros de proteção a tubulações pressurizadas. Pimentel (2003) realizou um estudo numérico de dutos sob pressão. Nas análises foram utilizados os programas PLAXIS (2D e 3D) e ANSYS. Para a expansão da cavidade em condições monotônicas, observou-se o efeito benéfico da presença de camadas de reforço no aterro que confinava os dutos. Limitações numéricas impediram análises mais realistas de explosões.

2.9 – TUBULAÇÕES SUBMETIDAS A EXPLOSÕES

O estudo do fenômeno da explosão é baseado em várias teorias. A seguir, serão apresentadas algumas definições gerais para o entendimento adequado do fenômeno das explosões.

2.9.1 - DINÂMICA DO MECANISMO DE EXPLOSÃO DE TUBULAÇÕES

Bjerketvedt *et al.* (1997) definem a explosão como um evento de acréscimo rápido de pressão. Este acréscimo de pressão pode ser causado por reações nucleares, ruptura dos recipientes de pressão alta, explosões de vapor de água, explosões afastadas, poeira combustível, gás no ar ou em oxidantes, etc. A pressão gerada pela onda da combustão dependerá de como a chama se propaga e como a pressão pode expandir a nuvem de gás (governada pelo confinamento). As consequências das explosões de gás vão desde um simples dano até a destruição total. O aumento de pressão causado pela explosão de gás pode causar dano pessoal e material ou podem gerar acidentes como incêndios e BLEVE's ("domino effects"). O incêndio é um evento muito comum após uma explosão de gás.

Wingerden *et al.* (1999) mencionaram que, numa tubulação, a chama pode continuar acelerando até se transformar numa detonação (onda supersônica da combustão que se propaga a 1500-2000 m/s). O fenômeno da transição da ignição à detonação se caracteriza por pressões locais muito altas, tendo-se medido pressões de até 50 vezes a pressão inicial (Figura 2.14) onde p é a pressão de transição à detonação e p_{CJ} é a pressão de detonação. Em condições de acidentes, o dano mais grave pode ser observado no local da transição à detonação se a tubulação danificada liberar uma pressão alta. Isto mostra que a transição à detonação nas tubulações, dutos e túneis é um fenômeno de alto risco, e que se deveria avaliar corretamente a sua probabilidade de ocorrência. Para o mecanismo de transição da deflagração à detonação só se tem entendimento qualitativo. Não sendo possível prever este fenômeno, apenas são disponibilizados dados experimentais.

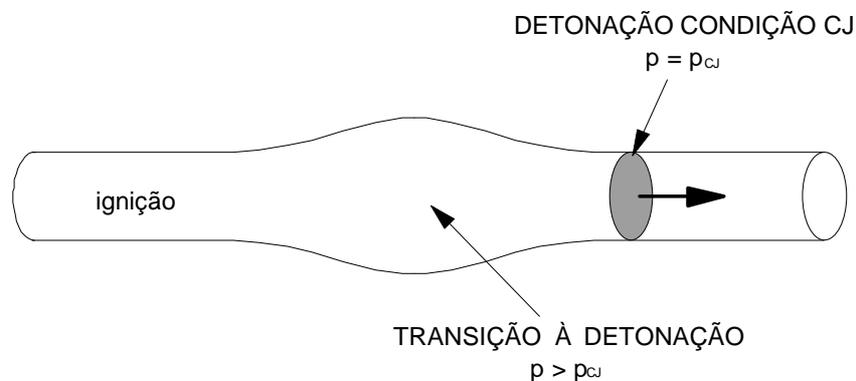


Figura 2.14. Esquema do processo de detonação mostrando o ponto de transição onde $p > p_{CJ}$, que expande à estrutura de confinamento (modificado - Wingerden *et al.*, 1999).

2.9.2 - FORMAÇÃO DE CRATERAS

O interesse pelo estudo da formação de crateras se justifica para um melhor entendimento daquelas causadas por explosões nucleares ou impactos de meteoritos com a superfície da Terra. Vários autores têm pesquisado a formação de crateras por meio de ensaios em modelos reduzidos, testes em grande escala e análises numéricas (Hess e Nordike, 1961; Murphey e Vortman, 1961; Carlson e Jones, 1963; Vesić, 1965; Lin *et al.*, 1994; Collins, 2002 e Blinov, 2004). A formação de uma cratera por explosão ou impacto em uma superfície horizontal gera um perfil similar à mostrada na Figura 2.15.

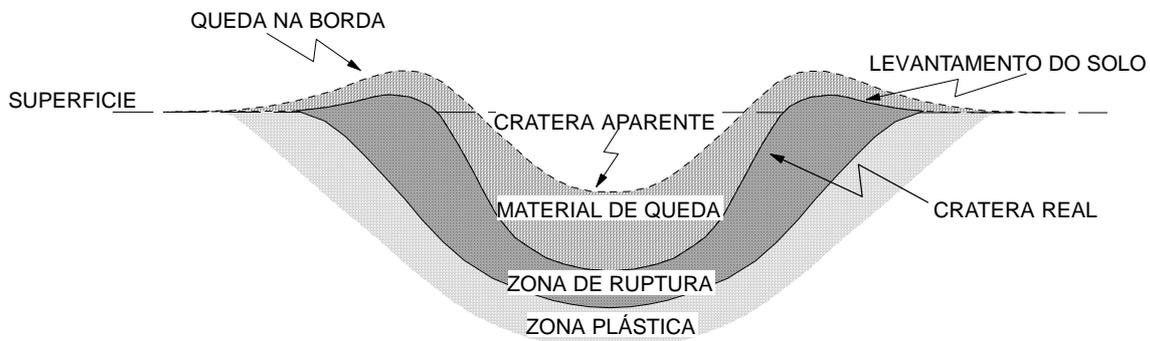


Figura 2.15. Perfil típico da formação de uma cratera por impacto ou por explosão (modificado - Hess e Nordike, 1961).

Vários autores acharam coincidências nos processos e na seqüência de formação da cratera por impacto e por explosão, principalmente nas fases do lançamento do solo e a formação dos taludes (Nordike, 1961; Carlson e Jones, 1963; Vesić, 1965; Melosh, 1980; e Alfer'ev *et al.*, 2001; Collins, 2002).

Segundo Blinov (2004), o mecanismo de formação de uma cratera de uma explosão é muito complexo. O referido autor descreveu o processo de explosão caracterizando várias fases que acontecem simultaneamente ou seqüencialmente. Por registros de uma câmera observou que, em ensaios com areia, a partir de 10 milissegundos após a explosão, os grãos de solo se movimentam para cima desde o fundo do furo. Subseqüentemente, a massa de areia, que inicialmente se movimenta como uma nuvem com formato de domo, concentra-se no eixo da cavidade de solo arrancado, desenvolvendo um jato. O momento da formação do jato coincide com o momento do colapso do domo (tempo = 35-40 ms após a explosão). O

sistema em movimento no ar com alta velocidade levanta o domo e alcança boa altura e logo o jato dispersa a massa de areia (em explosão química, a ação equivalente é a formação de uma bolha de gás). Após a perda de velocidade, a massa de areia expandida, cai no fundo da cratera e nas suas bordas. Às vezes, forma-se uma protuberância na região central da cratera. As condições de formação de domo são mostradas nas Figuras 2.16 e 2.17. O desenvolvimento das crateras após a explosão evidenciam a grande influência das propriedades do solo. Segundo Lin *et al.* (1994), o formato da cratera aparente é sensível à aceleração da gravidade.

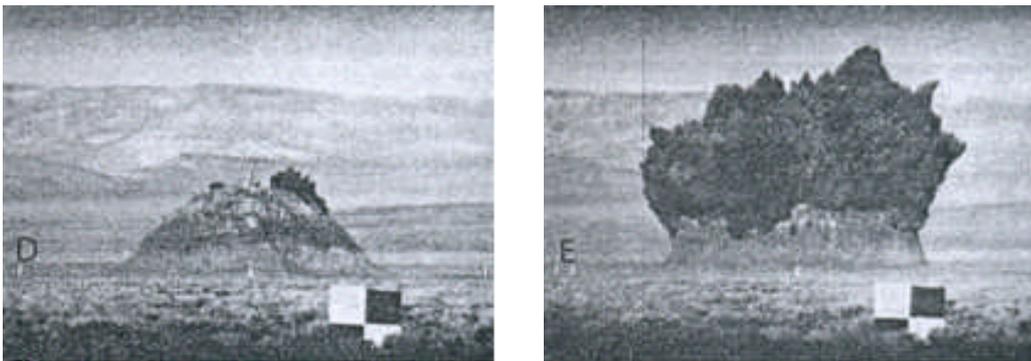


Figura 2.16. Formação de domo e jato por efeito de explosão química (modificado - Violet, 1961).

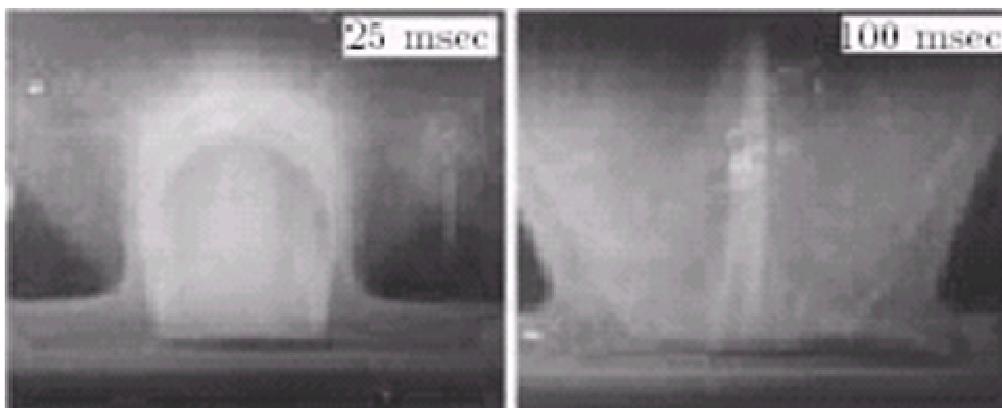


Figura 2.17. Formação do domo de nuvem de areia e dispersão pelo lançamento (modificado - Blinov, 2004).

A Figura 2.18 mostra explosões de dinamite executadas para se pesquisar o efeito da energia e profundidade da carga na natureza da nuvem de poeira resultante (Ohba *et al.*, 2002). Na pesquisa foi utilizada a técnica de termofotografia para a medida da nuvem de poeira. Na Figura 2.18 (b) a região em verde apresenta temperatura menor a 10°C (observar a situação de clima frio). Os resultados de tais pesquisas podem ser utilizados para uma melhor compreensão de explosões vulcânicas.

Estudos de similitude de explosões foram também empregados em pesquisas sobre os mecanismos de formação de crateras por vários autores (Nordike, 1962; Carlson e Jones, 1963; White, 1971; Oberbeck, 1971; Holsapple e Schmidt, 1980; Ma Qin-yong e Cai mei-feng, 2003, entre outros).

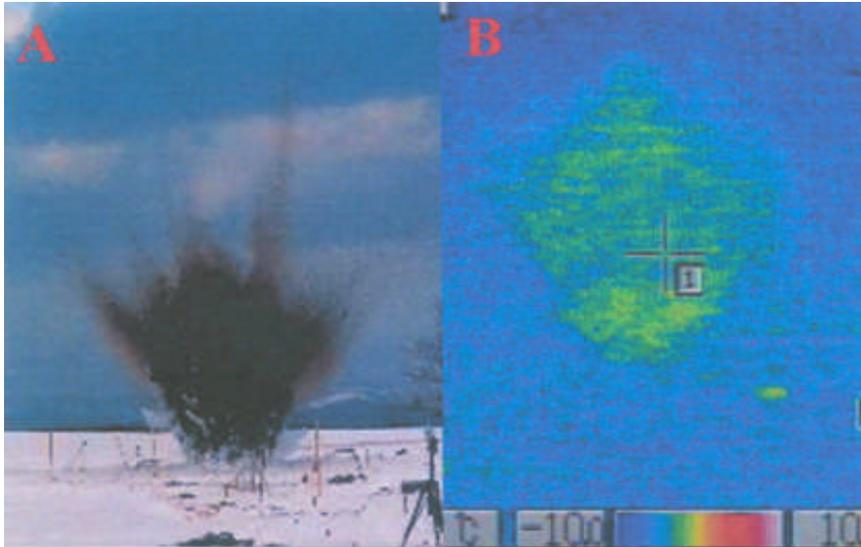


Figura 2.18. Explosão de dinamite: (a) Nuvem de poeira da explosão, (b) Região em verde apresenta temperatura menor a 10°C (modificado - Ohba *et al.*, 2002).

2.10 PREVISÕES DA RESISTÊNCIA AO LEVANTAMENTO DO SOLO POR EXPANSÃO DE CAVIDADE EM ATERROS REFORÇADOS E NÃO REFORÇADOS

O mecanismo de ruptura mais simples de um maciço não reforçado é considerado inicialmente como ocorrendo ao longo de duas superfícies de ruptura paralelas e tangentes à tubulação, como apresentado na Figura 2.19 (a). A força resultante (R) da pressão interna na tubulação de expansão é mostrada na Figura 2.19 (b) e é função da pressão interna (p_i).

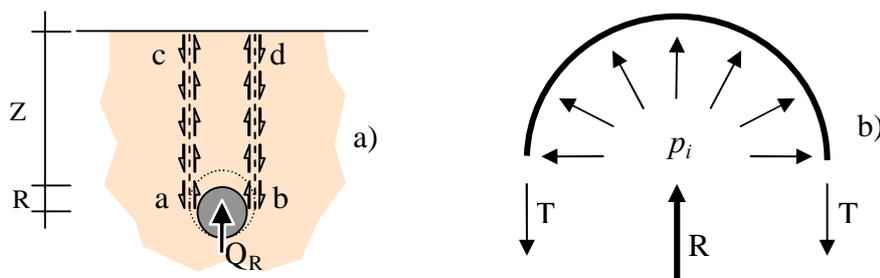


Figura 2.19. Mecanismo de ruptura de um maciço sem reforço: a) Mecanismo de ruptura simplificado, b) Resultante da pressão interna na tubulação.

Do equilíbrio ao longo da direção vertical (Fig. 2.19 (b)), tem-se:

$$\frac{Q_R}{L} = 2\gamma Z(R + \mu k_o Z) \quad (2.5)$$

onde: Q_R é a resistência oferecida pelo terreno contra a suspensão do solo, L é o comprimento da tubulação; k_o é o coeficiente de empuxo lateral do solo no repouso de Jaky ($1 - \sin \phi$); μ é coeficiente de atrito entre materiais na superfície de ruptura ($\tan \delta$, onde $\delta = \phi =$ ângulo de atrito do solo).

Face às pressões internas usuais em tubulações e suas profundidades de instalação, os valores de Q_R são baixos. Assim, a capacidade do terreno pode ser aumentada incorporando-se inclusões resistentes à tração, como esquematizado na Figura 2.20. Camadas de geossintético podem ser instaladas durante a colocação da tubulação em valas ou aterros para minimizar ou evitar as conseqüências de estouro de tubulações e explosões. A presença dos reforços também pode minimizar danos e prejuízos causados por vandalismo (Tupa e Palmeira, 2005)

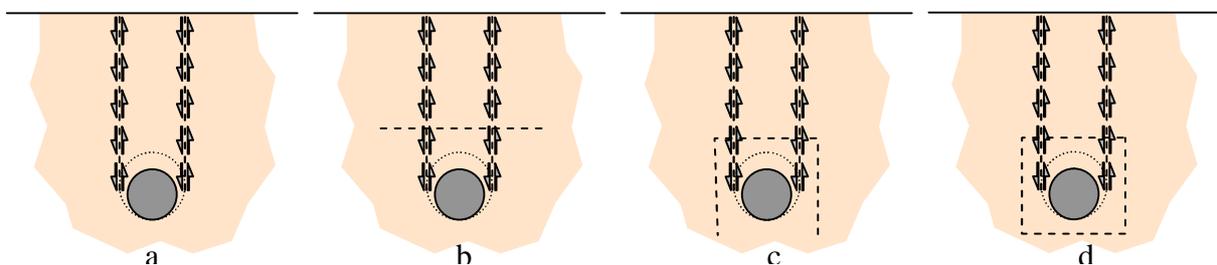


Figura 2.20. Possíveis arranjos de reforços geossintéticos para minimizar conseqüências de uma explosão.

Para pequenas profundidades, o arranjo mostrado na Figura 2.20 (b) é insuficiente para melhoria do maciço devido às baixas resistências por ancoragem da camada de reforço. O arranjo da Figura 2.20 (c) (“U” invertido) tenderá a apresentar uma maior mobilização de resistência do geossintético, dependendo do comprimento dos segmentos verticais do reforço. O arranjo da Figura 2.20 (d) é mais eficiente, já que envelopa totalmente o tubo e camada de solo.

Alguns autores (Bolton e Barefoot, 1997 e White *et al.*, 2001, por exemplo) estudaram problemas ligados a levantamento de tubulações ou placas enterradas em solos (Figura 2.21 (a)). Palmeira (2005) apresentou estudo teórico para previsão do levantamento por expansão de cavidade em aterros reforçados e não reforçados. Nesse estudo (Figura 2.21 (b)) assume a ruptura do solo ao longo das superfícies com inclinação igual ao ângulo de dilatância do solo (ψ). Para um solo granular, por meio do equilíbrio nas direções vertical e horizontal, obtém-se.

$$p = \frac{W + K_a \gamma f (z' - 0.5D)^2 + 2T(\sin \theta + f \cos \theta)}{(1 - f)D} \quad (2.6)$$

com

$$f = \frac{\tan \phi - \tan \psi}{1 + \tan \phi \tan \psi} \quad (2.7)$$

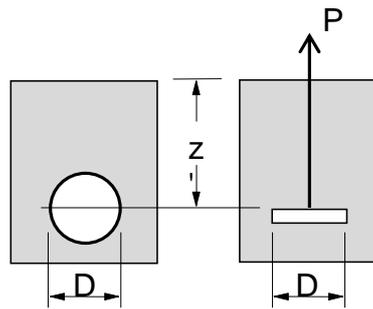
onde: p = pressão na cavidade na ruptura, W = peso do bloco de solo acima da cavidade, K_a = coeficiente empuxo ativo do solo, γ = peso específico do solo, z' = profundidade do centro da cavidade, D = diâmetro da cavidade, T = força de tração mobilizada no reforço, θ = inclinação da força no reforço com a horizontal, ϕ = ângulo de atrito do solo e ψ = ângulo de dilatância do solo.

O valor de T a ser usado na Equação 2.6 é o mínimo entre a resistência à tração e a resistência por ancoragem do reforço. No desenvolvimento da equação, o valor da força de ancoragem foi estimado assumindo-se estado de tensões horizontais no repouso em trechos de ancoragem verticais (arranjo U invertido, Fig. 2.20 (c)) ou em função da tensão vertical, no caso de reforço horizontal (Fig. 2.20 (b)).

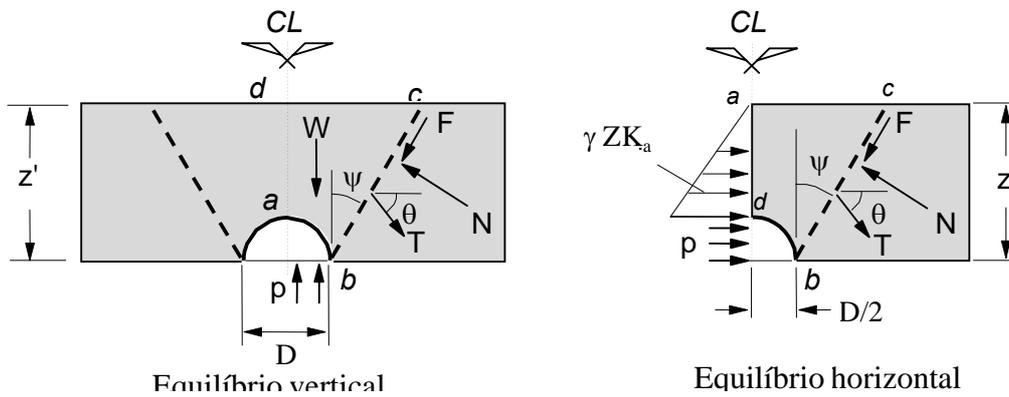
A Figura 2.21 (c) apresenta uma aproximação conservativa para a situação de ruptura de uma cavidade pressurizada com o arranjo de reforço envelopado (Fig. 2.20 (d)). Nesse caso, a ruptura do sistema ocorre quando o reforço rompe à tração. Assim, para uma cavidade rasa negligenciando a resistência do solo, a pressão geostática e o atrito de interface, o equilíbrio de forças ao longo da direção vertical resulta em:

$$p = \frac{2T_{\max}}{D} \quad (2.8)$$

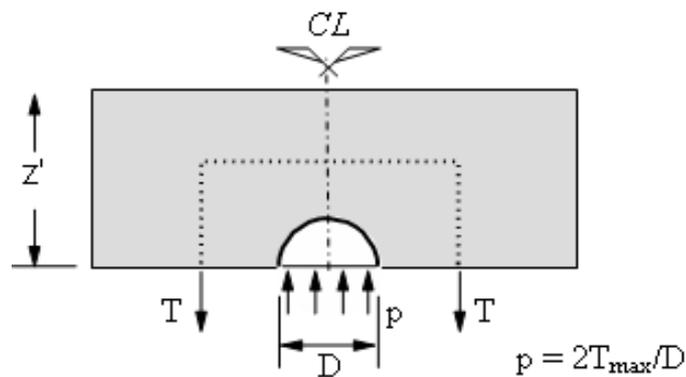
onde T_{\max} é a resistência à tração do reforço.



(a) Arrancamento de tubo e de placa.



(b) Aproximação para arrancamento de um cilindro.



(c) Ruptura do sistema com reforço envolvendo o tubo.

Figura 2.21. Previsões de cavidade pressurizada na ruptura (modificado - Palmeira, 2005).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1 – MATERIAIS

Os principais materiais utilizados nos ensaios da pesquisa foram materiais geossintéticos e areia uniforme seca. Foram utilizados acessórios para marcos de referência e aparelhagem de sistema de pressurização de ar.

Os equipamentos utilizados foram construídos para simular dois tipos de ensaios, um ensaio de expansão para simular a relação que existe entre a expansão e a resistência do solo no processo de explosão e outro ensaio de vazamento em tubulação com pressão controlada. Nesse caso, o enfraquecimento da tubulação de PVC de 75 mm de diâmetro foi provocado pela execução de uma ranhura ao longo do comprimento do tubo.

3.1.1 - SOLO

O solo utilizado para construção dos aterros de proteção de tubulações sob pressão em escala reduzida foi uma areia uniforme de quartzo hialino a leitoso, com grãos de formato geral arredondado. Na pesquisa foi utilizada uma areia para facilitar a interpretação de resultados (Figura 3.1). As principais características do solo utilizado são apresentadas na Tabela 3.1 e sua curva de distribuição granulométrica é apresentada na Figura 3.2.

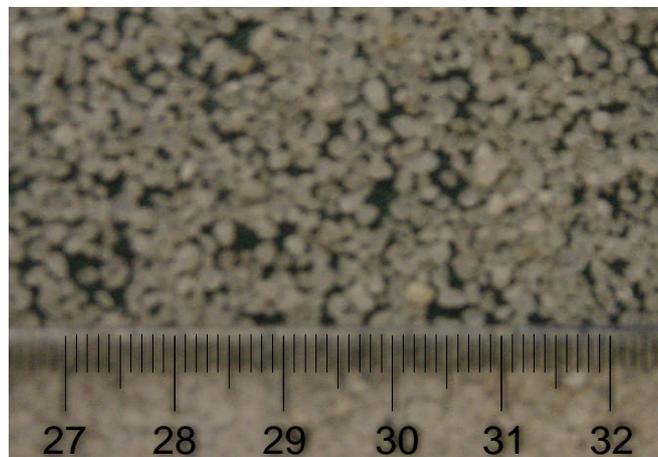


Figura 3.1. Formato dos grãos do solo granular utilizado para os ensaios da pesquisa.

Tabela 3.1. Características da areia.

Diâmetro médio das partículas D_{50} (mm)	1,35
Coeficiente de uniformidade (C_u)	2,30
Coeficiente de Curvatura (C_c)	0,83
Classificação pelo SUCS ⁽¹⁾	SP
Peso específico dos sólidos (kN/m^3)	26,40
Peso específico seco mínimo (kN/m^3)	15,94
Peso específico seco máximo (kN/m^3)	18,60
Ângulo de Atrito do solo ϕ ($^\circ$) ⁽²⁾	46 a 35
Ângulo de Atrito a volume constante ϕ_{CV} ($^\circ$)	32,7

Notas: (1) Sistema Universal de Classificação de Solos; (2) Obtido do ensaio de cisalhamento direto (tensões normais entre 15 kPa e 200 kPa).

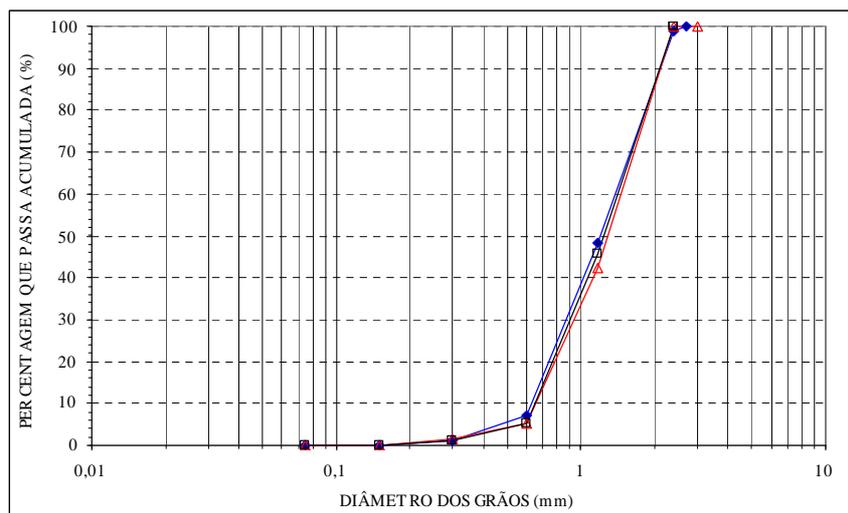


Figura 3.2. Curvas de distribuição granulométrica da areia utilizada.

3.1.2 – GEOSINTÉTICOS

Os materiais geossintéticos utilizados como reforços dos aterros de proteção das tubulações sob pressão foram: três geotêxteis tecidos (geotêxtil G, geotêxtil P e geotêxtil S), uma geogrelha (geogrelha F) e papel alumínio (papel alumínio A). O papel alumínio foi utilizado para simular um geossintético de baixa resistência e para a interpretação da redistribuição das tensões no maciço.

A Tabela 3.2 apresenta as características dos reforços. Para os geossintéticos utilizou-se um fator de escala de 1/5 nas dimensões geométricas, mantendo a sua espessura nominal e a sua rigidez à tração.

Tabela 3.2. Características dos reforços.

Tipo de Reforço	J (kN/m)	ϵ_{\max} (%)	ϕ_{sr}
Papel Alumínio A	30	3,4	22
Geotêxtil G	550	11	28
Geotêxtil P	200	12	29
Geotêxtil S	2000	10	31
Geogrelha F	200	12	---

Notas: J = rigidez à tração do geossintético (ensaio de tração de faixa larga), ϵ_{\max} = deformação de tração do geossintético na ruptura, ϕ_{sr} = ângulo de atrito entre solo e reforço.

O geotêxtil tecido P, fabricado pela empresa Propex, é formado pela disposição ortogonal de laminetes de polipropileno, sistematicamente entrelaçados segundo um modelo planar. A textura deste geotêxtil é mostrada na Figura 3.3 (a).

O geotêxtil tecido G, fabricado pela empresa Nicolon com uma gramatura de 220 g/m² (Palmeira, 1987), é formado pela disposição ortogonal de feixes de filamentos de poliéster, entrelaçados segundo modelo planar. Imagem deste geotêxtil é apresentada na Figura 3.3 (b). O geotêxtil tecido S, fabricado pela empresa Huesker, é formado pela disposição ortogonal de feixes de filamentos de poliéster, entrelaçados segundo modelo planar. Imagem deste geotêxtil é apresentada na Figuras 3.3 (c).

A geogrelha F é do tipo Fortrac 35/20-20 fabricada pela empresa Huesker, e é formado de multifilamentos de poliéster de alta tenacidade revestidos por capa de PVC, formando grelha com aberturas de 20 x 20 mm. Os membros longitudinais possuem uma superfície rugosa que garante boa aderência da geogrelha com o solo. A Figura 3.3 (d) mostra uma imagem dessa geogrelha.

Para emendas ou colagens dos materiais geossintéticos (arranjos U-invertido e envelopado) foi utilizada cola epóxi de secagem rápida.

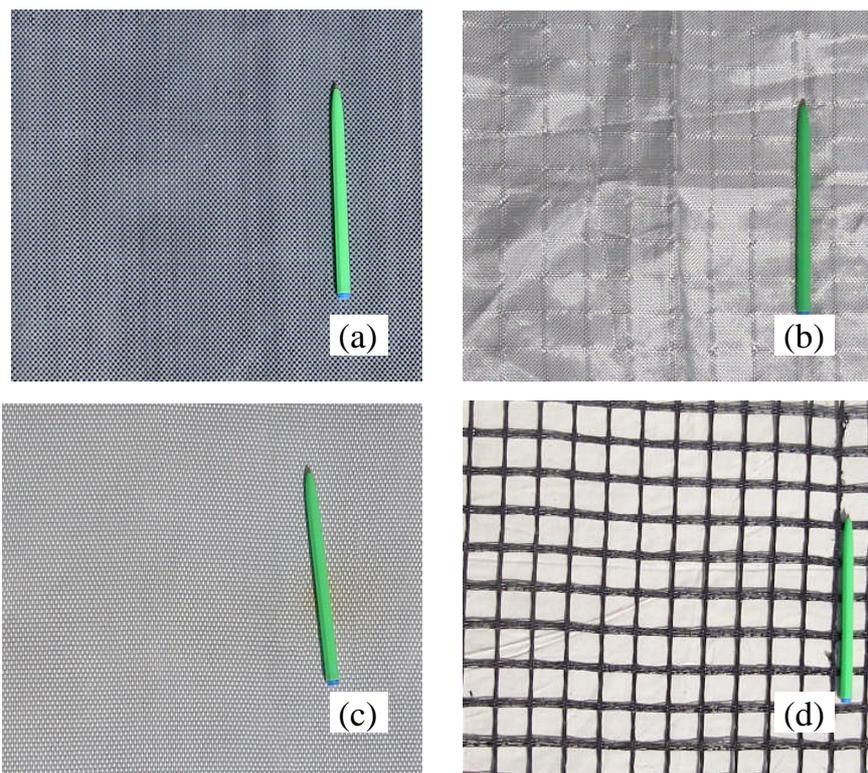


Figura 3.3. Geossintéticos utilizados nos ensaios de expansão e vazamento.

3.2 EQUIPAMENTO

Os ensaios em modelos foram realizados em uma caixa rígida de aço com dimensões 500mm (altura) x 500mm (profundidade) x 1500 mm (comprimento), com a face frontal de vidro transparente com 12 mm de espessura desenvolvida por Lanz, (1992).

O ar comprimido que provocava a expansão da cavidade era gerado por um compressor que abastece toda a rede do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, com pressão máxima gerada de 1200 kPa. O volume de ar comprimido do compressor é de 0,85 m³. Para aplicação no ensaio de simulação de expansão, o ar comprimido era controlado por um sistema de válvulas reguladoras com filtros. A pressão necessária para a realização dos ensaios foi menor que 110 kPa. O sistema de pressão interna na tubulação de expansão (ar comprimido) foi controlado por meio de um manômetro de coluna de mercúrio (Tupa e Palmeira, 2003). O ar comprimido da rede era injetado na membrana expansora que simulava a cavidade para gerar a deformação volumétrica, sendo utilizado apenas durante o ensaio de expansão. A tubulação de expansão é o principal acessório para gerar a pressão de expansão da cavidade.

O modelo da tubulação de expansão é constituído de um tubo de PVC de 35 mm de diâmetro externo, com uma série de furos alinhados com 2 mm de diâmetro (Figura 3.4). O tubo é coberto por uma membrana de borracha e as extremidades da membrana são dobradas para o interior do tubo de PVC e presos com caps de pressão colados com resina para garantir a sua vedação. Acima dessa configuração está uma série de 15 tubos de alumínio envoltos por uma membrana de látex. Os tubos se deslocam radialmente sob o impulso da expansão da membrana de borracha, mantendo as condições de deformação plana no processo de expansão da cavidade. A membrana de látex impede a queda de grãos de areia entre os tubos (Figuras 3.4 e 3.5).

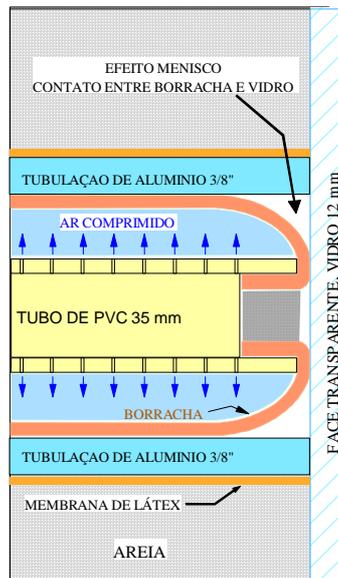


Figura 3.4. Detalhe da seção longitudinal do dispositivo de expansão no contato com a face frontal da caixa de ensaios.

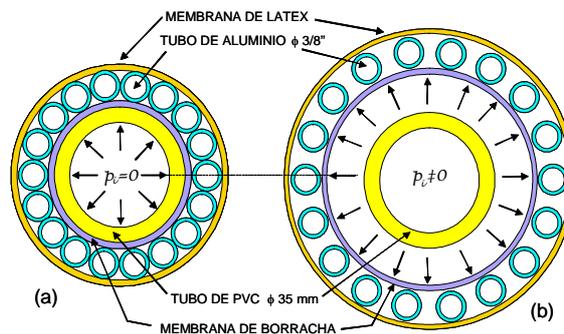


Figura 3.5. Detalhe da seção da cavidade de expansão: (a) $p_i = 0$; (b) $p_i \neq 0$.

A Figura 3.6 apresenta imagens do tubo expansor. A Figura 3.7 mostra a comparação do tubo de expansão em estágio inicial (pressão interna $p_i = 0$) e sob pressão. Quando a cavidade de expansão está sob pressão, os tubos de alumínio se afastam radialmente.

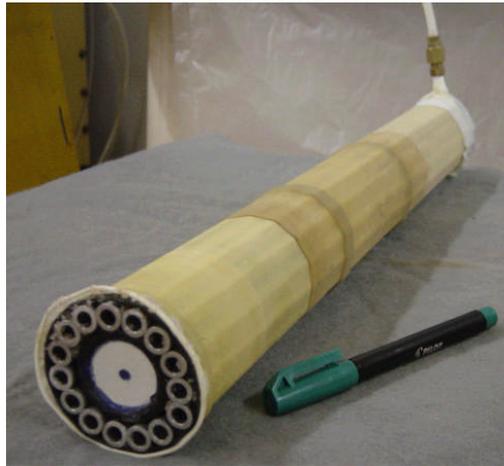


Figura 3.6. Modelo do dispositivo (tubo expansor) para ensaios de expansão de cavidade (Tupa e Palmeira, 2003).

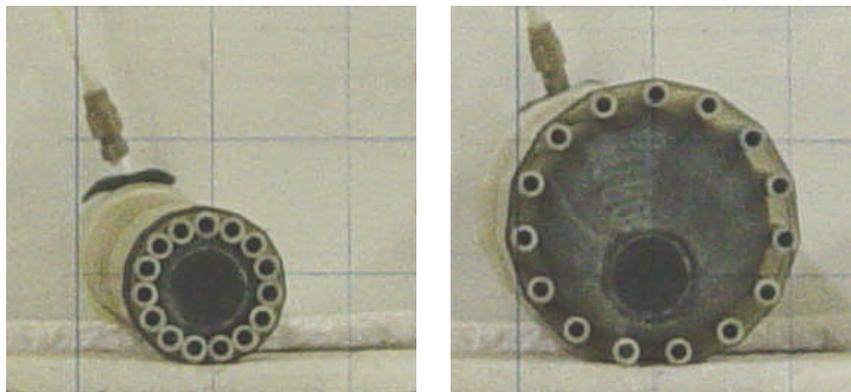


Figura 3.7 Tubo expansor: a) Pressão interna nula; b) Pressão interna de 37,6 kPa.

Em função das características do tubo expansor, ocorre um efeito membrana nos espaços entre tubos de alumínio, como mostrado na Figura 3.8. Este efeito foi estudado e foi desconsiderado nos cálculos da pressão transmitida ao solo (p_e).

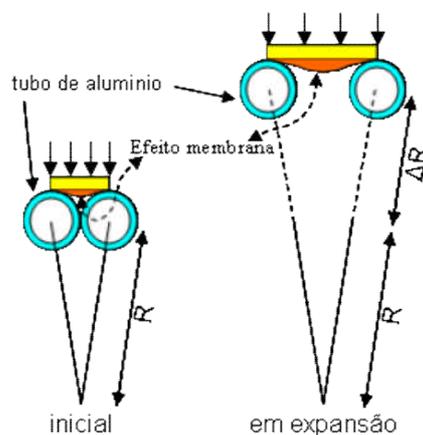


Figura 3.8. Esquema da ocorrência do efeito membrana.

No perímetro do tubo expensor, em contato com a face de vidro da caixa, colocou-se uma massa constituída de mistura de vaselina e areia, para evitar a intrusão de grãos de areia entre o tubo e a face (Figura 3.9). A Figura 3.9 mostra exemplos de ensaios com e sem a utilização da massa, onde se pode observar a vantagem da utilização dessa massa de vedação.

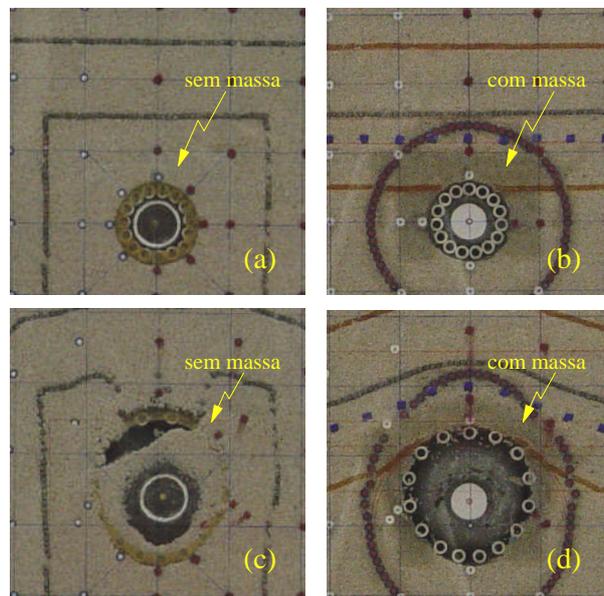


Figura 3.9. Ensaios com e sem massa de vedação no contato tubo-face frontal: (a) e (c) sem massa; (b) e (d) com massa.

Marcos de referência foram colocados na areia e encostados na face transparente da caixa de ensaios visando a obtenção do campo de deslocamentos, com o auxílio de técnica fotográfica. Os materiais para marcos de referência foram de plástico, com formato cúbico e cilíndrico. As medidas de deslocamentos e mecanismos de ruptura foram obtidas a partir da movimentação dos marcos isolados, formando linhas horizontais ou círculo (Figura 3.10).

Os marcos isolados de formato cúbico foram posicionados na superfície dos aterros. No interior dos aterros foram utilizados dois tipos de marcos isolados. Um tipo tinha formato cilíndrico, com diâmetro de 5 mm, e comprimento de 30 mm para ancoragem no solo. Tais marcos possuíam tinta em contato com a parede de vidro, de modo a traçar as trajetórias seguidas quando deslocados em decorrência da expansão da cavidade. O outro tipo de marco apresentava formato cilíndrico, com diâmetro 7 mm, sem tinta para identificação de trajetória. Os marcos isolados eram posicionados nas interseções da malha quadrada pintada na face transparente da caixa de ensaios.

As linhas horizontais tinham a função de mostrar os deslocamentos dos marcos isolados em relação às suas posições iniciais. Um conjunto de marcos formando uma circunferência concêntrica com a cavidade tinha a função de mostrar a movimentação radial do solo no decorrer do ensaio. Para posicionamento e fixação dos marcos formando um círculo foi utilizada vaselina. A Figura 3.10 mostra os diferentes tipos de marcos utilizados para instrumentar os aterros durante os ensaios.

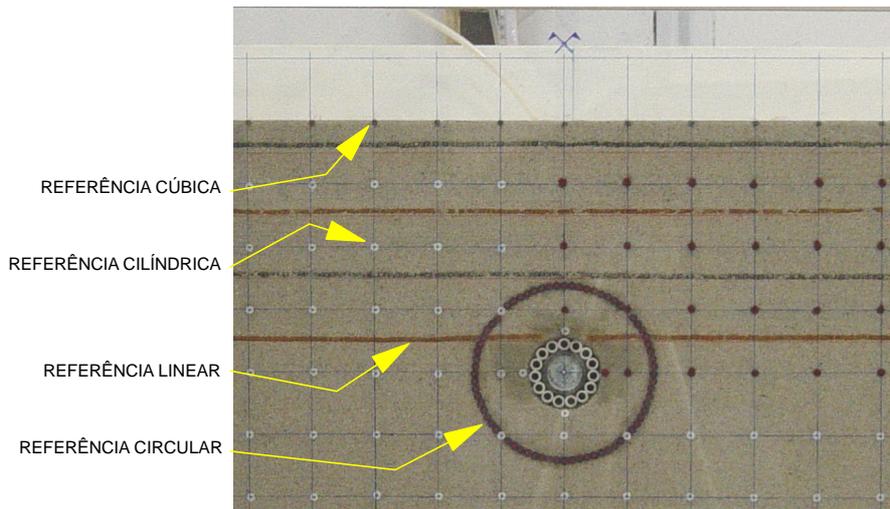


Figura 3.10. Marcos de referência utilizados nos ensaios de expansão.

Para a obtenção de deslocamentos e mecanismos de ruptura utilizou-se uma câmara fotográfica digital DSC-P71 Sony, Cyber Shot 3,2 mega pixels. A opção de qualidade da fotografia digital utilizada nos ensaios foi de alta resolução. A fotografia digital capta imagens da tubulação em expansão, do manômetro de coluna de mercúrio e do cronômetro. Filmagens também foram feitas durante os ensaios. A Figura 3.11 esquematiza o arranjo para obtenção de imagens de marcos durante os ensaios.

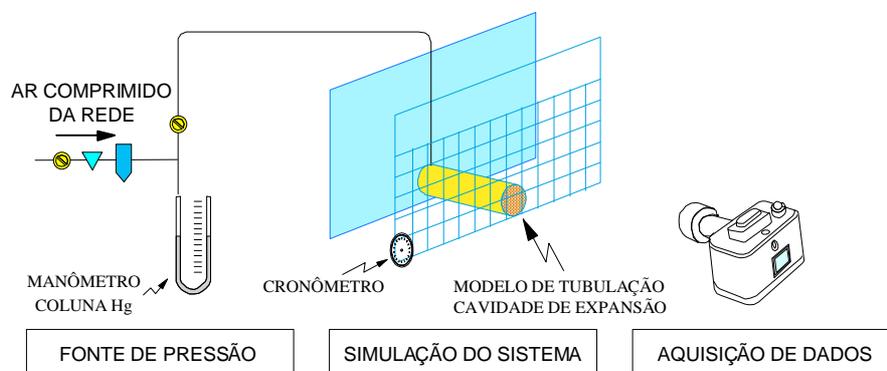


Figura 3.11. Esquema geral do ensaio de expansão da tubulação sob pressão interna.

O modelo físico da tubulação sujeita a vazamento em escala reduzida foi construído em PVC, com diâmetro externo de 75 mm e espessura de 2 mm. A tubulação era enfraquecida ao longo reduzindo-se a espessura do tubo para 0,45 mm em uma faixa ao longo do seu comprimento, como mostra a Figura 3.12. O enfraquecimento (Figura 3.13) teve por objetivo provocar o estouro do tubo e vazamento de ar a uma pressão interna pré-estabelecida em torno de 600 kPa. As extremidades da tubulação possuem tampas metálicas seladas. Na Figura 3.14 são apresentadas as tampas metálicas anexadas a um dispositivo de reação à pressão longitudinal dentro do conduto.



Figura 3.12. Modelo físico da tubulação de explosão.

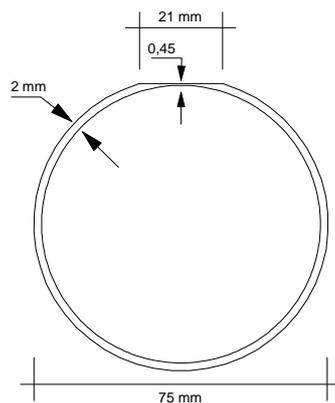


Figura 3.13. Seção transversal da tubulação de explosão (tubo de PVC enfraquecido).

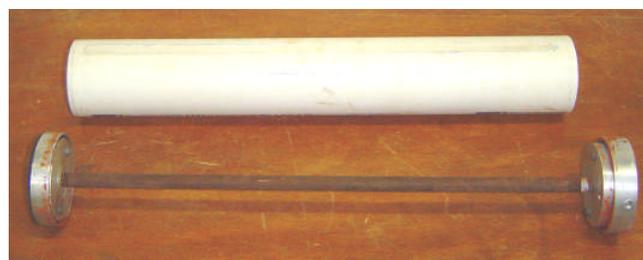


Figura 3.14. Modelo físico da tubulação de explosão mostrando a barra de reação da pressão interna longitudinal.

A Figura 3.15 (a) mostra o detalhe de montagem da tubulação. A função da barra de reação foi inibir o impacto dos caps (C-1 e C-2) e proporcionar segurança à face transparente da caixa de ensaio no instante da ocorrência de vazamento ou explosão acidental da tubulação (Figura 3.15 (b)). A Figura 3.15 (c) mostra a tubulação com ranhura de enfraquecimento submetida à pressão interna em testes preliminares, mostrando que, no instante da ruptura do tubo, os caps são atirados em direções opostas pela força atuante sobre as suas faces internas (Figura 3.16(d)).

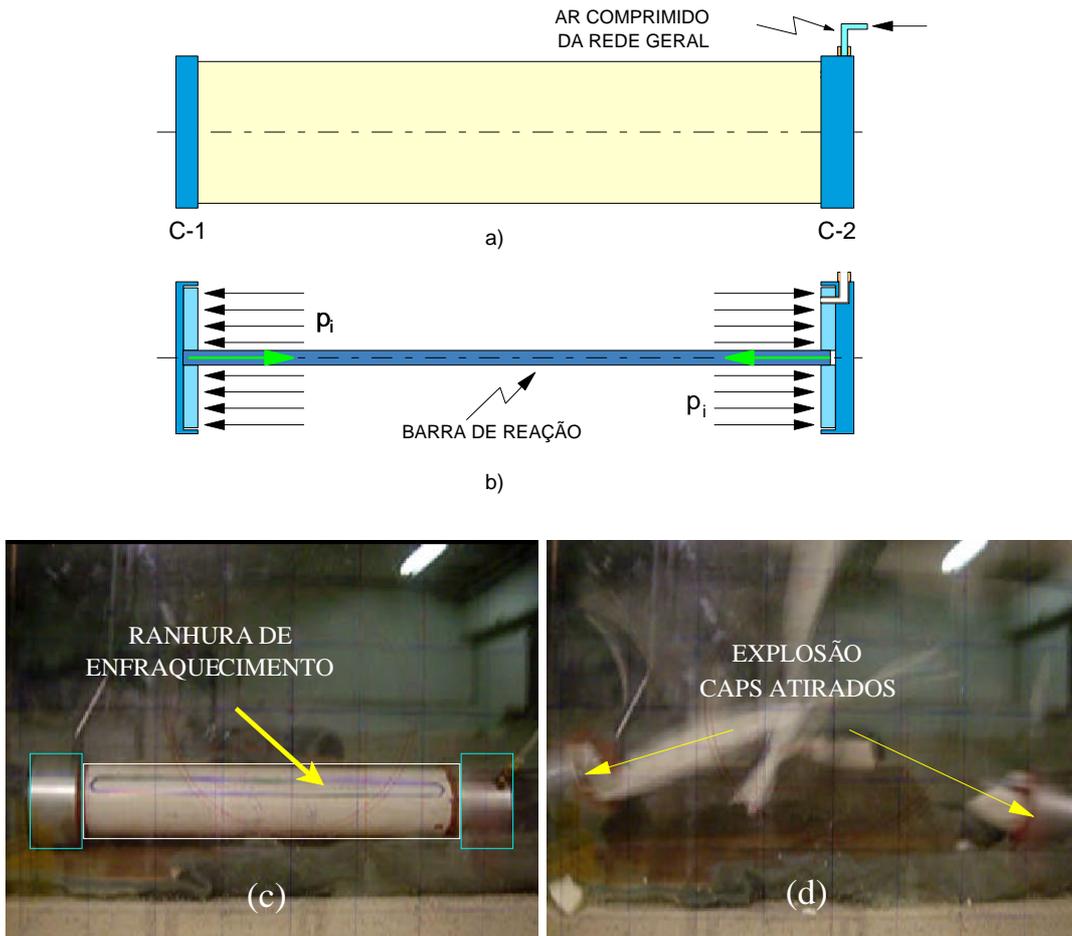


Figura 3.15. Teste de explosão na tubulação.

Para provocar o vazamento através do trecho enfraquecido, a pressão interna no tubo foi aumentada gradativamente, registrando-se seu valor em um manômetro (Figura 3.16). A câmara fotográfica, na opção “vídeo” capta as imagens do estouro do tubo e conseqüente vazamento de ar.

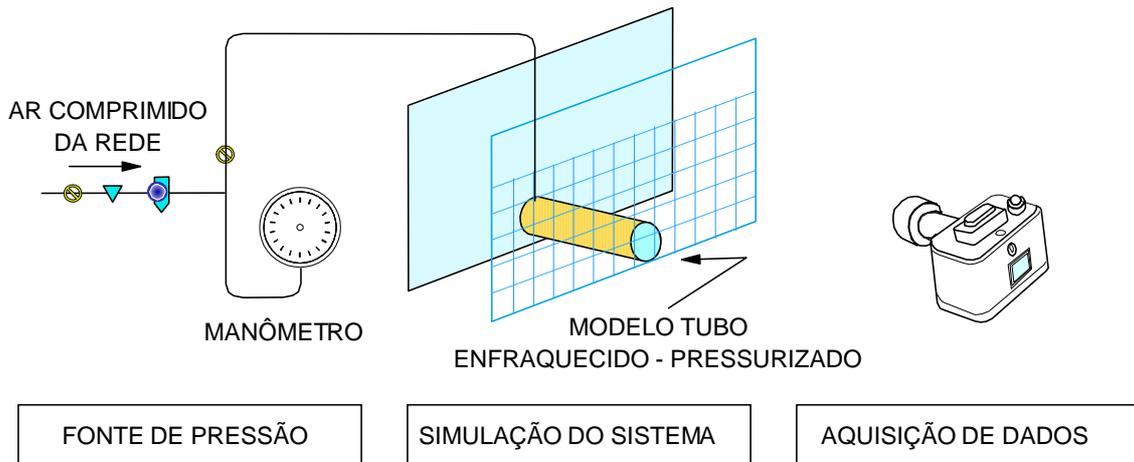


Figura 3.16. Esquema geral do equipamento de simulação de vazamentos na tubulação.

O método da chuva de areia foi utilizado para a preparação dos aterros. Esta técnica foi empregada com sucesso por muitos autores, podendo-se citar Maitland & Shroeder (1979), Palmeira (1987), Selvadurai (1989), Lanz (1992), Bieganousky & Marcuson (1976), entre outros.

No presente trabalho, para aplicação do método da chuva de areia, foram utilizados os componentes mostrados na Figura 3.17. Tinha-se um pórtico metálico (0,81m de largura, 1,7m de comprimento e altura variável desde 1,86 m) e uma caixa dispersora móvel de madeira (0,34m x 0,45 m e altura 0,70 m).

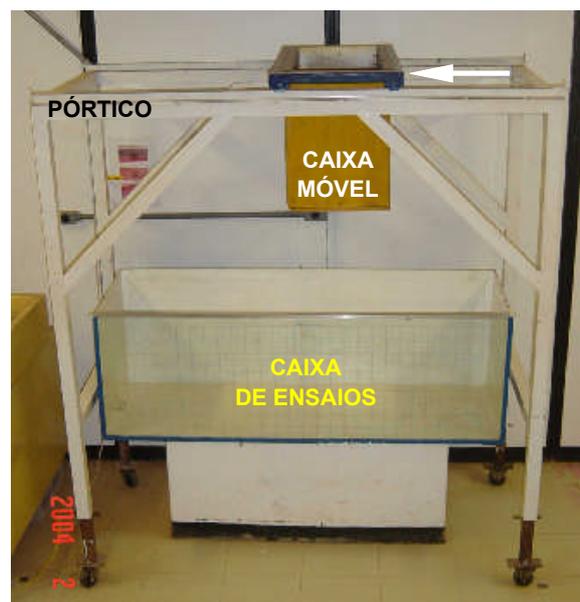


Figura 3.17. Aparelhagem para execução da chuva de areia (pórtico e caixa móvel).

A caixa móvel tem um dispositivo para o suporte com quatro rodas de aço que, por sua vez, encaixam em duas guias ao longo do trecho superior (1,70 m) do pórtico. A base da caixa móvel possui furos de 6,3 mm de diâmetro para a saída da areia, com uma porta inferior para controlar a saída do material. Quando a porta era aberta, se iniciava a chuva de areia para distribuição do material na caixa de ensaio. Para a distribuição contínua da areia, a caixa móvel foi deslocada manualmente ao longo do comprimento do pórtico com velocidade média de 25 cm/s. A vazão média de saída da areia foi de aproximadamente $2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. O aterramento foi feito em camadas de 2,5 cm de espessura.º

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE ENSAIO E SIMPLIFICAÇÕES PARA ANÁLISE

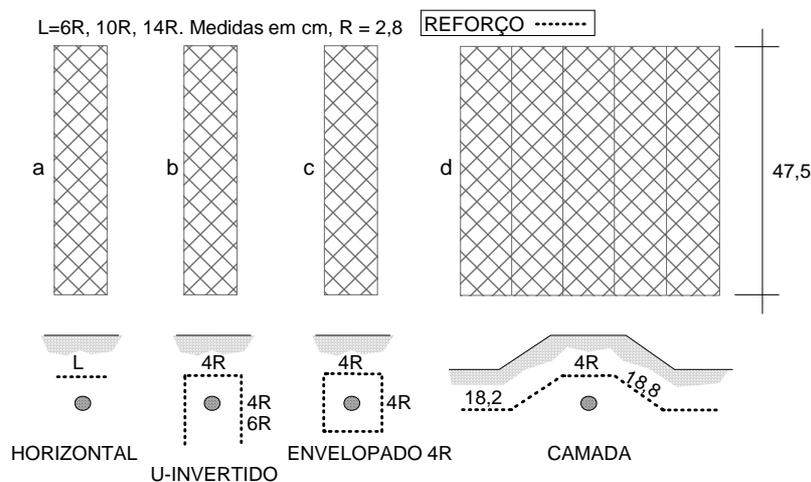
4.1 - METODOLOGIA DE ENSAIO

Este capítulo descreve a metodologia de ensaio de simulação de explosões em escala reduzida.

4.1.1 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE REFORÇOS

As amostras de reforços foram preparadas em função do tipo de arranjo geométrico da simulação e, para todos os casos, as larguras das amostras foram aproximadamente iguais à largura da caixa de ensaios (a largura padrão foi de 47,5 cm).

A Figura 4.1 mostra os esquemas das diferentes geometrias de arranjos dos reforços. Para amostras na posição horizontal a uma distância de um raio da cavidade (1R) acima dela, utilizaram-se os comprimentos de reforço, L, iguais a 150, 250 e 350 mm (Figura 4.1.a). Para arranjos em U-Invertido foram utilizados dois valores de comprimentos das pernas do U iguais a 4R e 6R (Figura 4.1.b). Para amostras com arranjo envelopado utilizou-se um formato quadrado, com lado igual a 4R circundando a cavidade (Figura 4.1.c).



Finalmente, as dimensões das amostras de reforço com arranjo em camada nos aterros trapezoidais com taludes 2H:1V estão apresentadas na Figura 4.1.d.

A forma dos reforços nos arranjos em U-Invertido e envelopado foram obtidos por colagem das extremidades do reforço em uma faixa de 2 cm na esquina superior direita dos arranjos.

4.1.2 - PREPARAÇÃO DA CAVIDADE E CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO EXPANSOR

O principal acessório do equipamento de simulação é o dispositivo para expansão da cavidade. No início de cada simulação este dispositivo era calibrado e testado para o seu adequado desempenho no decorrer do ensaio de simulação de explosão de uma tubulação sob pressão.

A calibração do dispositivo de expansão visou a determinação da pressão interna necessária para inflar a membrana de borracha somente (p_c). Com esta pressão e a área da seção transversal da cavidade foi possível a correção para a determinação aproximada da tensão transferida para o solo (pressão no solo, p_e).

Para calibragem do dispositivo expensor, foram realizadas operações prévias para verificar sua estabilidade sob pressão, sua uniformidade de expansão longitudinal e a calibração do comportamento da pressão interna versus área da seção radial expandida. A estabilidade do dispositivo de expansão foi verificada pela sua pressurização e fechamento do circuito com uma válvula. Nesta operação mediram-se a pressão interna e a circunferência do dispositivo que, para cada pressão, deveriam ser constantes pelo menos, por duas horas.

A uniformidade de deformação do dispositivo de expansão foi verificada pela medida da sua circunferência (perímetro de expansão p , mm) sob uma dada pressão interna. A medida da circunferência foi realizada em dois pontos extremos do dispositivo de expansão (com ajuda de duas faixas milimétricas fm_1 e fm_2 , Figura 4.2). As medidas das circunferências e a sua correspondente pressão interna (pressão de calibração, p_c) são apresentadas na Figura 4.2, onde as curvas superiores são as de carregamento (pressurização) e as curvas inferiores são as de descarregamento (despressurização).

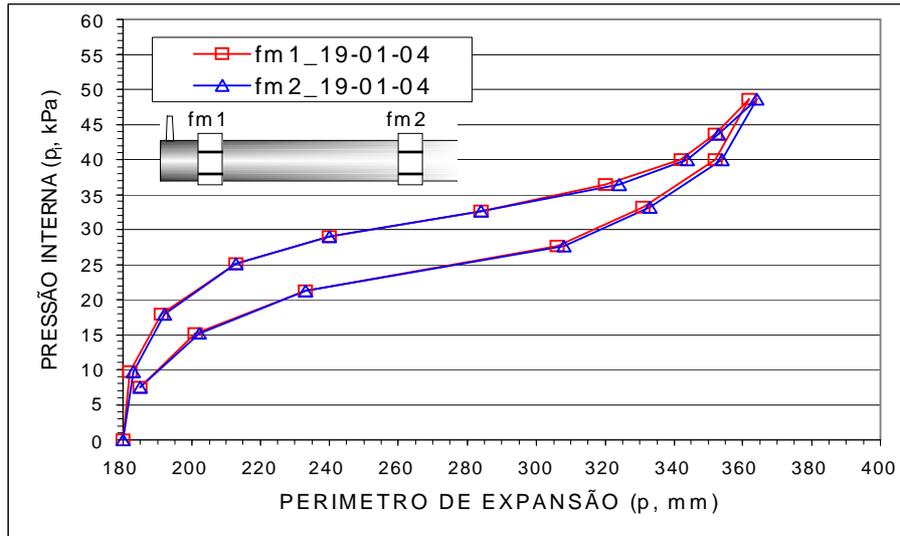


Figura 4.2. Verificação da uniformidade de expansão ao longo do comprimento do dispositivo.

A área da seção transversal da cavidade expandida associada à pressão interna (p_c) no dispositivo foi avaliada utilizando-se técnica fotográfica. As seções transversais da cavidade expandida foram obtidas das imagens fotográficas com suporte de programa computacional. A dependência da deformação volumétrica de cavidade com a pressão interna (p_c) é apresentada na Figura 4.3, onde a curva superior (azul) é de carregamento (pressurização) e curva inferior é de descarregamento (despressurização).

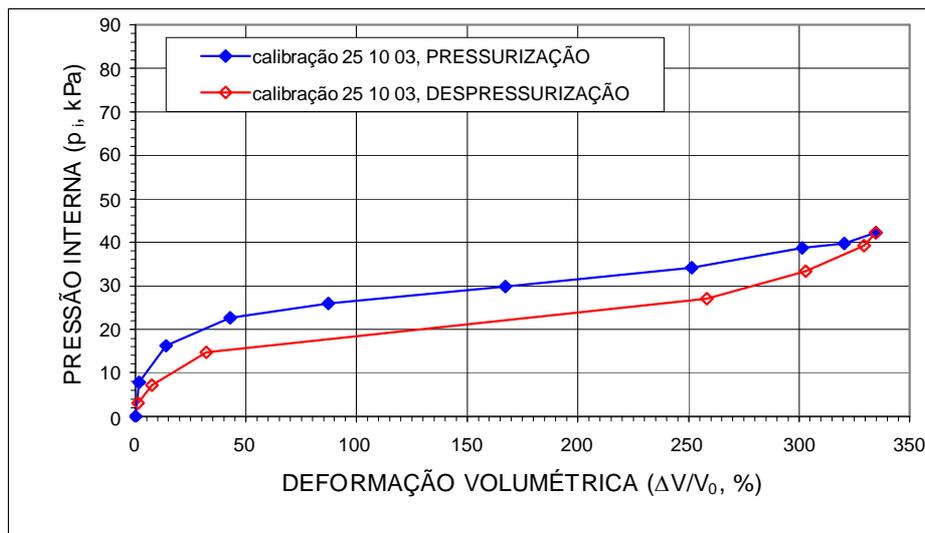


Figura 4.3. Calibração da tubulação de expansão (pressurização e despressurização).

4.2 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DOS ATERROS E DOS REFORÇOS NOS ENSAIOS

Os sistemas de simulação de maciços reforçados para proteção de tubulações sob pressão foram aqueles passíveis de utilização na construção de gasodutos típicos (Figura 4.4). Assim, tem-se o sistema em que os tubos são instalados em valas previamente escavadas, onde no fundo é colocada a tubulação do gasoduto ou oleoduto e que posteriormente é aterrado. O outro processo construtivo seria aquele em que a tubulação é instalada na superfície do terreno e protegida com aterro compactado com seção transversal trapezoidal. Os ensaios de expansão de cavidade foram iniciados simulando-se aterros sem reforço, como os mostrados na Figura 4.4.

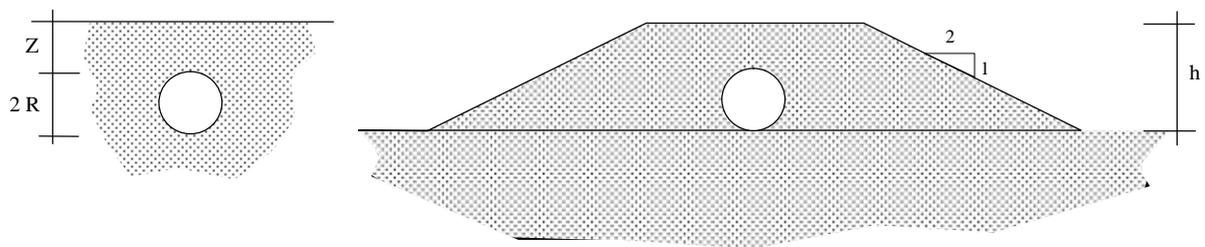


Figura 4.4. Sistemas típicos de aterros sem reforço com tubulações sob pressão.

A configuração geométrica dos reforços pode ser definida em função do processo construtivo da obra (existente ou nova). Para aterros de superfície horizontal e no caso de duto existente, as configurações de reforço mais facilmente aplicáveis seriam as mostradas nas Figuras 4.5 (a) e (b). No caso de uma obra nova a configuração de instalação do reforço poderia ser a mostrada na Figura 4.5 (c).

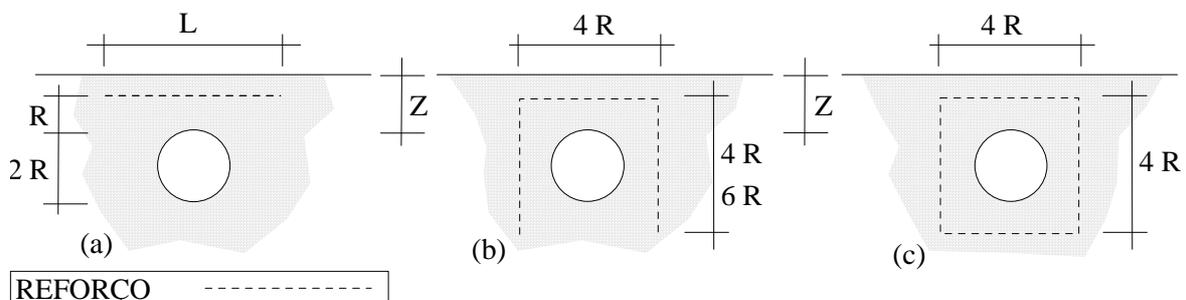


Figura 4.5. Configuração geométrica dos reforços para aterros com superfície horizontal.

As Figuras 4.6 (a), (b) e (c) mostram os arranjos dos reforços utilizados para o caso de aterros trapezoidais com taludes inclinados $H:V = 2:1$. Adiante, neste capítulo, dados adicionais são fornecidos sobre cada tipo de ensaio realizado. Os arranjos e configurações geométricas apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6 foram utilizados na presente tese.

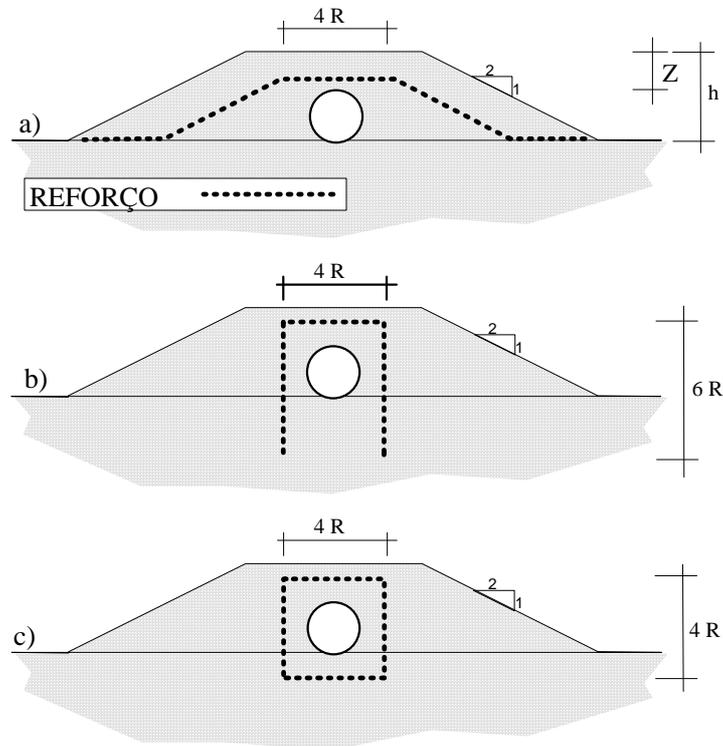


Figura 4.6. Configuração geométrica dos reforços para aterros trapezoidais.

4.3 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO

As simulações de explosões de tubulações sob pressão apresentaram procedimentos de ensaio similares e a seguir são descritas as suas principais fases.

4.3.1 – PREPARAÇÃO DO ATERRO

A areia uniforme para a construção dos aterros foi colocada na caixa de ensaios utilizando-se a técnica da chuva de areia. A altura mínima de queda foi de 53 cm, entre a face inferior da caixa dispersora móvel e o nível superior do aterro. A velocidade horizontal média da caixa móvel foi de 25 cm/s. O processo de preparação se iniciava quando era aberta a comporta da caixa dispersora móvel. A geometria do aterro compactado (com superfície

foram instalados marcos móveis na areia, coincidindo com as interseções das linhas da malha desenhada na face frontal. Nos níveis 22,5; 27,5; 32,5 e 37,5 cm foram construídas linhas horizontais feitas com marcos móveis cúbicos, com de 3 mm de aresta. Com centro na coordenada (0, 0) foi instalada uma referência circular com raio de 9 cm, executada com peças cilíndricas de 4 mm de diâmetro.

Para o posicionamento dos reforços nos aterros se usou um suporte auxiliar formado por duas barras com 3/8" de diâmetro, em posição horizontal com comprimentos iguais à largura da caixa de ensaios e apoiadas nas suas paredes (Figura 4.8). As barras possuem porcas nas extremidades para auto-fixação pela pressão da reação nas paredes. A Figura 4.8 mostra a seqüência de instalação da camada de reforço. O elemento expensor (dispositivo de cavidade) era instalado com centro no ponto com coordenadas (0, 0).

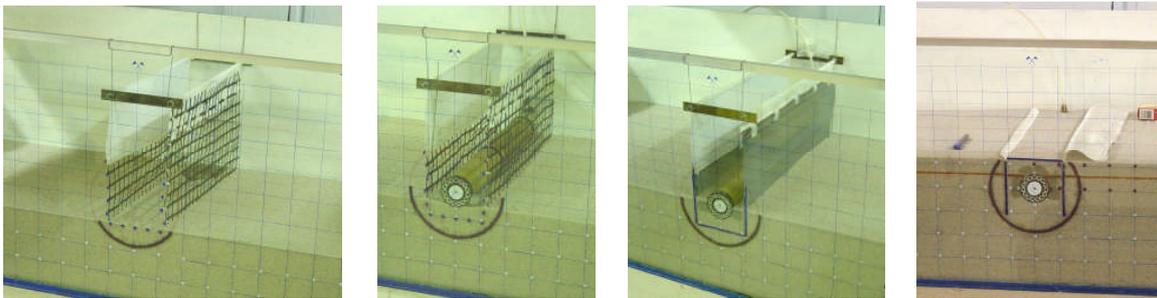


Figura 4.8. Processo construtivo do aterro: chuva de areia, posicionamento do dispositivo de expansão e colocação do reforço.

4.3.2 – MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS E DEFORMAÇÕES

O ensaio de expansão se iniciava após a revisão dos acessórios do equipamento como: a rede de ar comprimido e as suas válvulas de controle, a tubulação de expansão (elemento expensor) e o sistema de aquisição de dados (câmara fotográfica digital). A seguir, a válvula reguladora era aberta para transmitir o ar comprimido ao dispositivo de expansão.

No decorrer do ensaio a pressão era registrada no manômetro de coluna de mercúrio (de 0 a 140 kPa). A variação da seção transversal do dispositivo de expansão (tubulação de expansão) e as leituras do manômetro de coluna de mercúrio eram captadas das imagens fotográficas. Uma câmara digital DSC P71-Sony Cyber-Shot, 3,2 mega pixels, foi utilizada

em todos os ensaios. A câmara foi fixada sobre um tripé na frente da face transparente da caixa de ensaios, a uma distância de 2,85 m.

Logo, após o final do ensaio as fotografias eram descarregadas da câmara digital em um computador em arquivos tipo jpeg. O computador era dotado de programas (Office 2000, Microsoft Photo Editor e AutoCAD 2000) necessários para o processamento das imagens dos ensaios.

O programa Microsoft Photo Editor foi usado para visualizar as imagens de variação da seção do dispositivo de expansão dos ensaios e as suas correspondentes leituras de altura de coluna de mercúrio. Para se calcular a área da seção de expansão exportava-se um detalhe da seção para o programa AutoCAD 2000. Cada imagem fotográfica continha a seção transversal da cavidade para um valor de pressão interna e os deslocamentos dos marcos de referência (móveis pontuais, linhas e circunferência). Com a opção “poliline” do AutoCAD 2000 foram gerados polígonos delimitando a seção expandida para o cálculo da sua área. A acurácia e a precisão dos valores da área podem ser afetadas pela escala no programa (AutoCAD) e pelo número de pixels da fotografia (as imagens fotográficas em termos de pixels dependem da distância ao objetivo e da opção de qualidade da câmara). Além disso, outra variável é o processo de geração do polígono da área expandida, que é executado de maneira aproximada pela delimitação de área com a opção “poliline”. No polígono são quantificados os pixels dentro da região fechada, considerando que o polígono resulta da união dos pontos tangentes dos quinze tubos de alumínio que conformam o dispositivo de expansão. A Figura 4.9 mostra um detalhe da geração do polígono (expansão de cavidade).

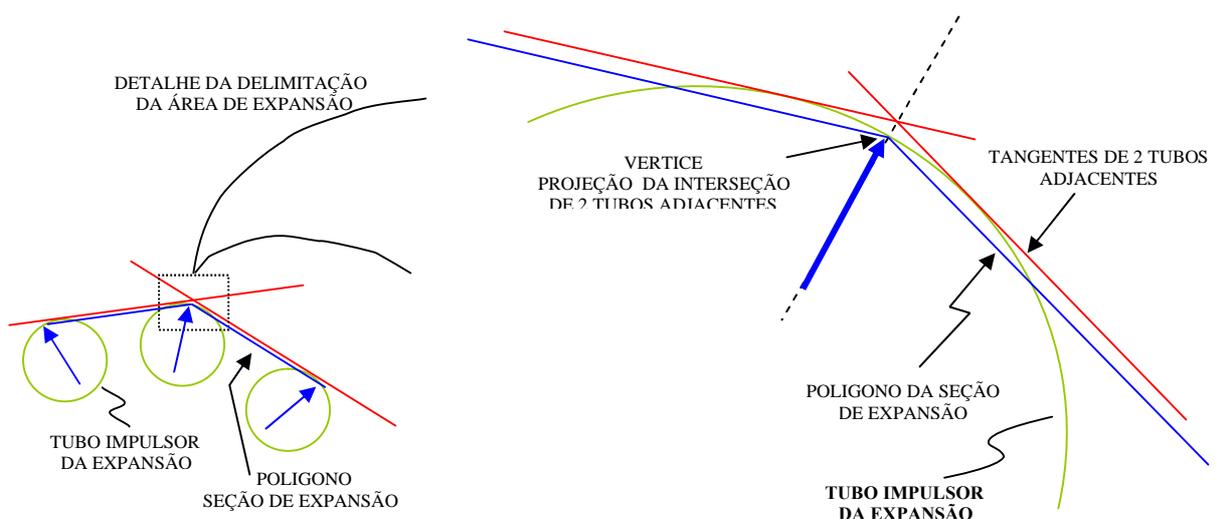


Figura 4.9. Detalhe do procedimento de geração da seção expandida da cavidade.

Os marcos de referência de um dos lados do eixo de simetria da face transparente da caixa eram pintados, de forma a marcar a trajetória de deslocamento sofrida, como mostrado na Figura 4.10 e comentado no capítulo 3. A Figura 4.10 mostra a simulação de um dos sistemas ensaiados, na etapa inicial, com pressão interna nula (Figura 4.10a), e na etapa intermediária, com pressão interna de 63,8 kPa (Figura 4.10b).

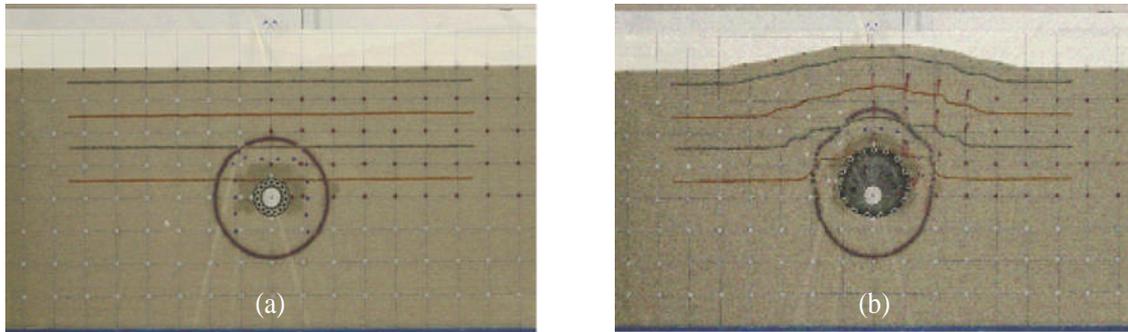


Figura 4.10. Simulação U-Invertido 4R-Geogrelha F, AH-7R: a) inicial. b). intermediária.

A quantificação da evolução da expansão é apresentada em gráficos relacionando a variação volumétrica da cavidade expandida ($\Delta V/V_0$, %) versus a pressão interna correspondente.

4.4 – SIMPLIFICAÇÕES PARA ANÁLISES DE EXPANSÃO DE CAVIDADES

Para a análise dos resultados da simulação do sistema foram assumidas algumas simplificações e hipóteses para interpretação dos dados experimentais e dos resultados, que são listadas a seguir:

- O aterro é considerado homogêneo e uniforme;
- A transferência da pressão no solo circundante é considerada radial e com distribuição uniforme. A Figura 4.11 mostra a idealização da distribuição da pressão no solo;
- Na calibração do elemento expensor (curva B, pressão de calibração, p_c , na Figura 4.12) a seção expandida sempre mantém formato circular. Na simulação de aterros sem e com reforço a cavidade no início apresenta expansão com formato circular e depois varia de forma em função das restrições impostas pelo solo e pela presença ou não de reforço (curva A, pressão de ensaio ou simulação, p_i); esta mudança de formato foi negligenciada nas análises. Assim, a

curva de ensaio corrigida (curva C, pressão no solo, p_e , na Figura 4.12) é obtida subtraindo-se a curva B da curva A, desconsiderando-se possíveis influências de forma da cavidade.

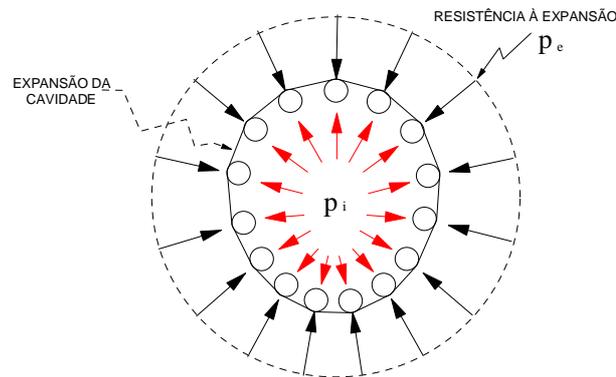


Figura 4.11. A resistência à expansão (p_e) sob distribuição de pressão interna uniforme.

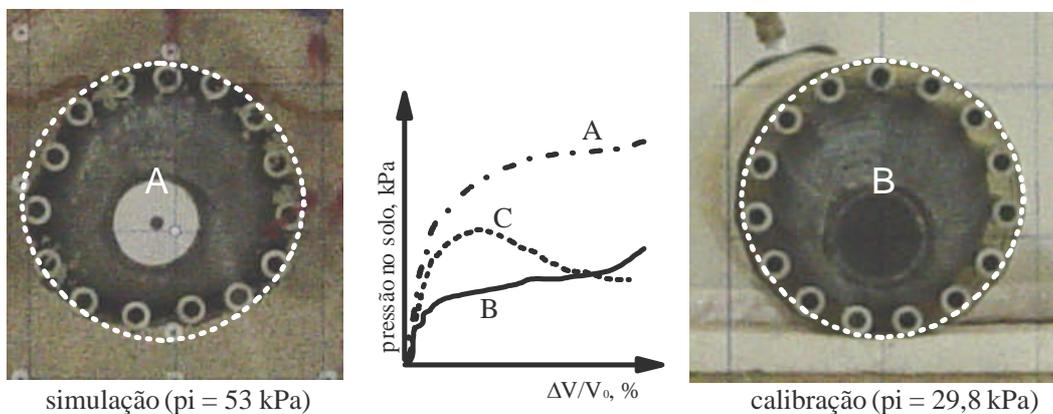


Figura 4.12. Esquema de obtenção da curva C de ensaio corrigida (valores de p_e).

4.5 – ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE E DE VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES EM ATERROS COM E SEM REFORÇO

As simulações foram executadas sob uma combinação de geometrias do aterro, geometrias e arranjos do reforço, tipos de reforço e profundidades de posicionamento da cavidade. Nos itens a seguir são discutidas as simulações executadas.

4.5.1 – ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE EM ATERROS COM E SEM REFORÇO

As simulações na condição de expansão foram executadas sob a combinação da geometria do aterro, geometria e arranjo do reforço, tipo de reforço e profundidade de

posicionamento da cavidade de expansão. Os aterros para o estudo da simulação de explosões por meio da expansão de cavidade apresentaram duas geometrias de aterro: com superfície horizontal e com seção trapezoidal com taludes 2H:1V (Figura 4.4).

As geometrias e arranjos do reforço utilizados no estudo dependeram da geometria do aterro. Para aterros com superfície horizontal, os arranjos de reforço foram: camada com comprimento (L) posicionado acima da cavidade de expansão, U-Invertido variando os comprimentos verticais das pernas do U entre 4R e 6R e envelopado com formato quadrado com lado com comprimento igual a 4R (Figura 4.5). Para aterros de seção trapezoidal os arranjos dos reforços foram: camada de reforço paralela ao contorno do aterro, o arranjo em U-Invertido e envelopado, como descritos para o caso de aterro com superfície horizontal (Figura 4.6).

Os tipos de reforço utilizados nos ensaios foram: papel alumínio, geotêxteis tecidos e geogrelha, que encontram-se descritos no capítulo 3. A profundidade de posicionamento da cavidade Z variou em função do raio ($R = 28 \text{ mm}$) do elemento expansor, sendo utilizados os valores $Z = 11R$, $Z = 8R$; $Z = 4R$ e $Z = 2R$. A Tabela 4.1 sumaria as características dos ensaios de expansão de cavidade realizados.

Tabela 4.1. Simulações de explosões de tubulações por meio da expansão de cavidade.

Arranjos Reforço	Tipos de Reforços	Geometria dos Aterros	Profundidade Z
- Camada - U-Invertido 6R - Envelopado 4R	- Papel alumínio, A - Geotêxtil tecido, G - Geotêxtil tecido, P - Geotêxtil tecido, S - Geogrelha, F	- Superfície horizontal, AH - Seção Trapezoidal, AT	- 11R - 7R - 4R - 2R

4.5.2 ENSAIOS DE VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES EM ATERROS COM E SEM REFORÇO

A segunda fase de simulação da explosão foi submeter à pressão interna uma tubulação com fraqueza induzida. A fraqueza induzida ao longo do comprimento da tubulação fez com que a pressão interna de estouro não ultrapassasse um valor máximo estabelecido, de

aproximadamente 600 kPa. O estouro da tubulação causou a ruptura catastrófica do aterro (aterros de seção trapezoidal e taludes 2H:1V). Assumiu-se que o estouro da tubulação aconteceu instantaneamente sob condição de deformação plana. As Figuras 4.13 (a) e 4.14 (b) apresentam vistas frontais e as Figuras 4.13 (b) e 4.14 (a), vistas laterais da elevação do solo provocada pelo vazamento de ar em alguns ensaios realizados.

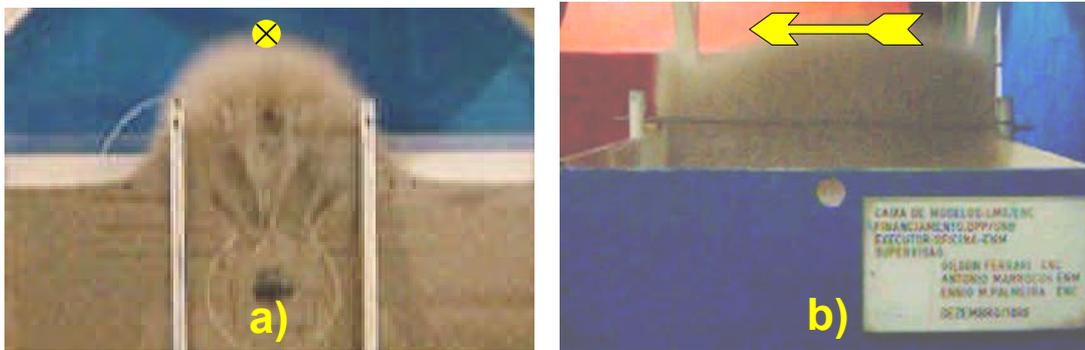


Figura 4.13. Elevação do solo devido à explosão da tubulação: a) frontal e b) lateral – Ensaio sem reforço.

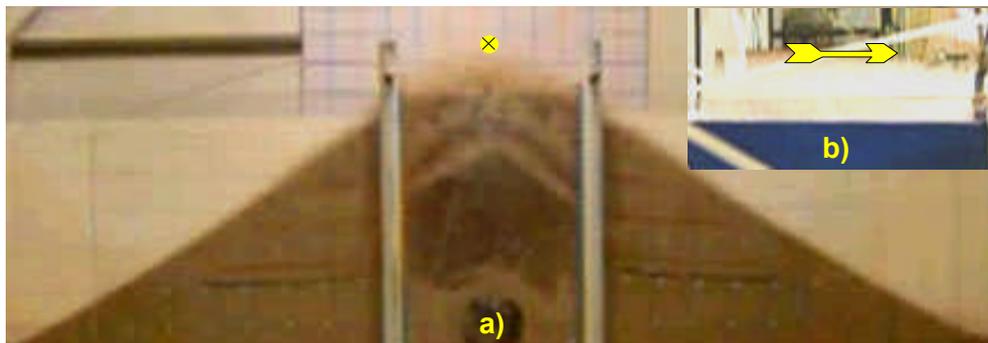


Figura 4.14. Elevação do solo devido à explosão da tubulação: a) frontal e b) lateral. - Ensaio com reforço.

As geometrias e arranjos dos reforços utilizados no estudo da simulação de vazamento em tubulação pressurizada em aterro com seção trapezoidal foram (Figura 4.6): camada única com forma do contorno do aterro, U-Invertido com comprimento vertical das pernas iguais a $5R$ ($R = 37,5$ mm) e envelopado com formato quadrado com lado igual a $3R$.

Os tipos de reforço utilizados nestes ensaios foram: papel alumínio A, geotêxtil tecido S e geogrelha F. A profundidade Z da cavidade foi de 150 mm. A Tabela 4.2 e a Figura 4.15 apresentam mais detalhes sobre a tubulação dos ensaios de vazamento.

Tabela 4.2. Características da tubulação em ensaios de vazamento na tubulação.

Diâmetro externo do tubo: 75 mm (PVC, cor branca)
Espessura do tubo (nominal): 2 mm
Profundidade (Z) de posicionamento do tubo: 4R (150 mm)
Largura da faixa enfraquecida: 2 a 3 mm
Espessura do tubo na faixa enfraquecida: 0,45 – 0,50 mm
Pressão interna: 520 a 600 kPa.

A Figura 4.15 esquematiza o estouro e a saída do ar comprimido (bolha de ar) no instante da ruptura do trecho enfraquecido da tubulação e o fluxo inicial através da areia.

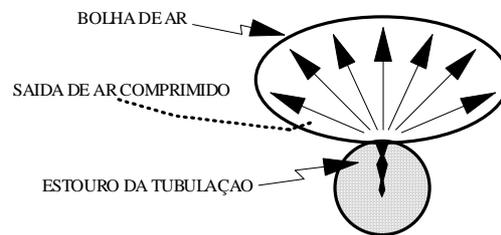


Figura 4.15. Esquema da saída do ar comprimido no instante do estouro da tubulação.

4.5.3 - ESPESSURA DA TUBULAÇÃO NA REGIÃO ENFRAQUECIDA E PRESSÃO DE EXPLOSÃO

A espessura da tubulação na região enfraquecida foi aferida após ensaio utilizando-se um micrômetro, como esquematizado na Figura 4.16. O resultado da verificação apresenta-se na Figura 4.17. A relação existente entre a espessura e a pressão interna de estouro mostra uma tendência proporcional, a dispersão pode ser devida às irregularidades da fabricação da própria tubulação, embora o processo de enfraquecimento também influencie a dispersão. Os resultados mostrados correspondem às simulações de aterros com superfície horizontal sem e com reforço.

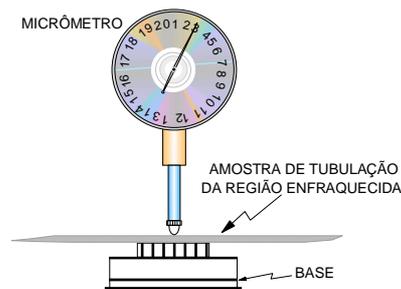


Figura 4.16. Micrômetro para controle da espessura da região enfraquecida da tubulação.

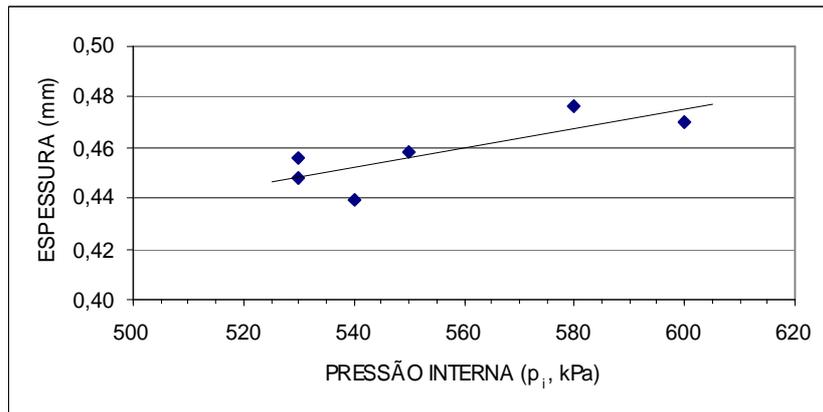


Figura 4.17. Relação da espessura na região enfraquecida da tubulação e a pressão interna de explosão com aterros de superfícies horizontais.

4.6 CÓDIGOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADES E DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES

As simulações de colapsos de tubulações sob pressão foram executadas levando em conta o tipo de ensaio, o tipo de arranjo, do tipo de geossintético, a geometria do aterro e a profundidade de posicionamento da tubulação. Assim, um grande número de grandezas pode ser variado, como mostrada na Figura 4.18.

Para a codificação e identificação de um ensaio fez-se uma combinação de símbolos que identificam ou indicam os valores dos parâmetros em cada ensaio. Os símbolos utilizados foram os seguintes:

Para identificar o tipo de ensaio:

Ensaio de Expansão: E

Ensaio de Vazamento: D

Para identificar o tipo de arranjo dos reforços:

Para camada simples de reforço:

C15 – reforço com 15 cm de comprimento (L).

C25 – reforço com 25 cm de comprimento (L).

C35 – reforço com 35 cm de comprimento (L).

CAT – camada de reforço seguindo o contorno do aterro com seção trapezoidal.

Para camada de reforço em forma de U Invertido:

U4R - comprimento das pernas do U igual a 4R (expansão de cavidade).

U6R - comprimento das pernas do U igual a 6R (expansão de cavidade).

U5R - comprimento das pernas do U igual a 6R (expansão de vazamento).

Para reforço envelopando a tubulação:

E4R - arranjo envelopado, com forma de quadrado com lado com comprimento igual a 4R (ensaio de expansão de cavidade)

E3R - arranjo envelopado, com forma de quadrado com lado com comprimento igual a 3R (ensaio de vazamento).

E4R - arranjo envelopado, com forma de quadrado com lado com comprimento igual a 4R (ensaio de vazamento)

Para identificar o tipo de reforço:

Papel alumínio: PAL-AA

Geotêxtil tecido tipo G: GTX-GG

Geotêxtil tecido tipo P: GTX-PP

Geotêxtil tecido tipo S: GTX-SS

Geotêxtil tecido tipo S combinado com filme de PVC: GTX-SV

Geogrelha tipo F: GGR-FF

Geogrelha tipo F com brita: GGR-FB

Para identificar a forma do aterro:

Superfície Horizontal: AH

Aterro com Seção Trapezoidal: AT

Para identificar a profundidade do posicionamento da cavidade:

Para $Z = 2R$, o símbolo é 2R. Para $Z = 4R$, o símbolo é 4R e assim sucessivamente, onde Z é a espessura de solo acima da cavidade e R é o raio do elemento expensor ou da

tubulação enfraquecida (28 mm para os ensaios de expansão e 37,5 mm para os ensaios de vazamento).

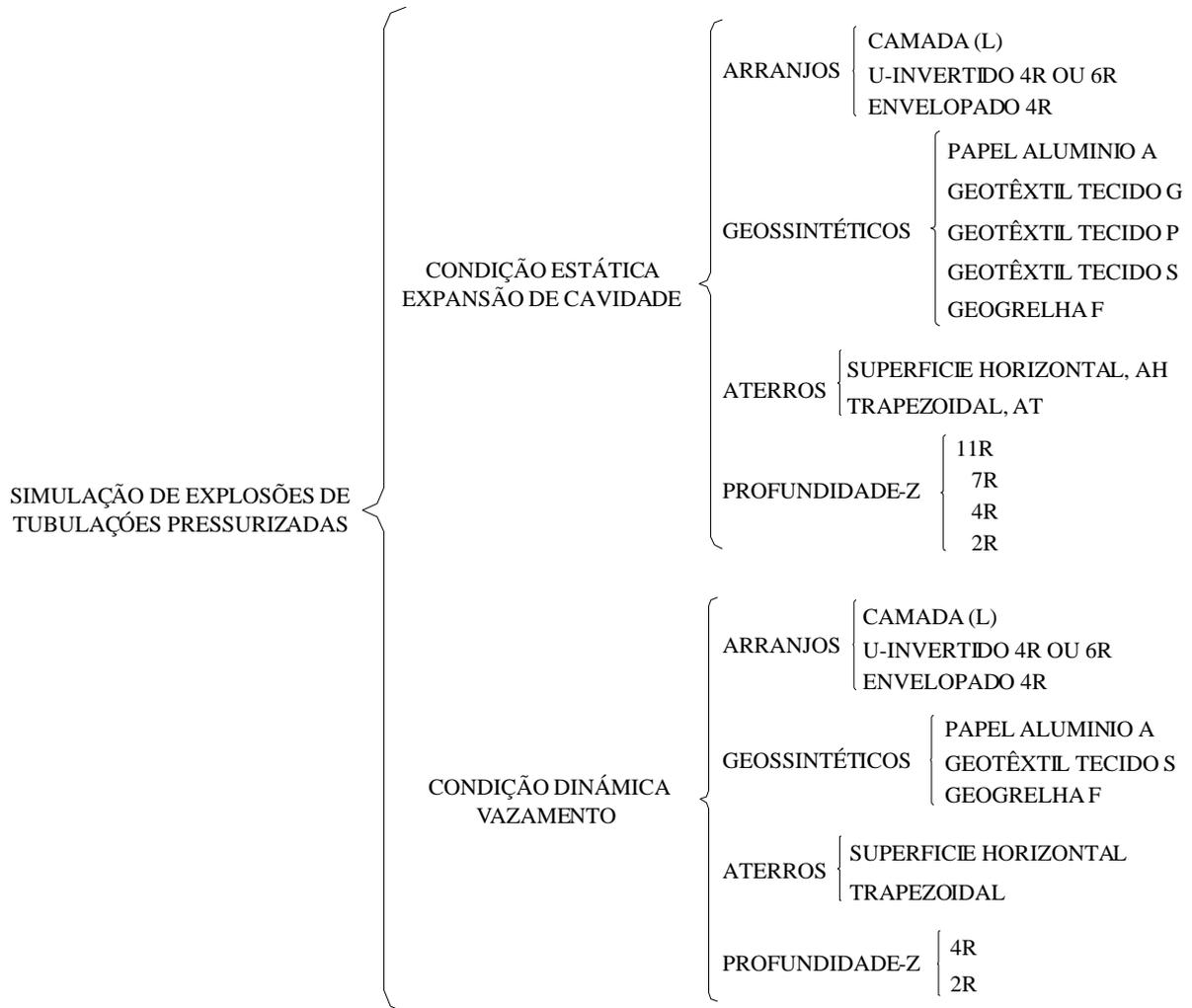


Figura 4.18. Esquema das combinações de variáveis nas simulações.

O código de um ensaio é estabelecido utilizando-se a simbologia apresentada acima, na seqüência de cima para baixo. Assim, a título de exemplo, seja considerar um ensaio com arranjo do reforço em U invertido com comprimento das pernas do U igual a 6R, com geotêxtil tecido P, com cavidade de expansão em aterro com superfície horizontal a uma profundidade igual a 7R. Neste caso, o código deste ensaio seria: E/U6R/GTX-PP/AH/7R. A Figura 4.19 esquematiza a montagem do código desse ensaio.

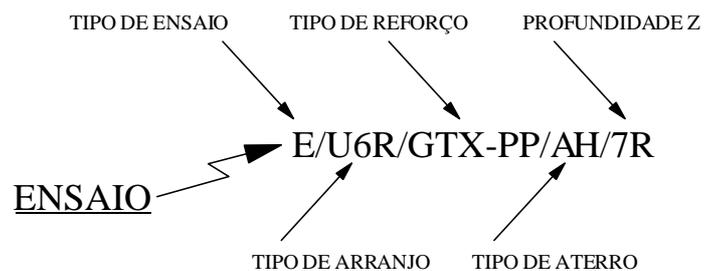


Figura 4.19. Esquema da codificação de ensaios.

Os Apêndices A e B apresentam as listagens completas dos ensaios realizados (expansão de cavidade e vazamento) usando terminologia baseada na codificação apresentada acima.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DE ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE EM ATERROS COM E SEM REFORÇO

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos os resultados da simulação de explosões por meio da expansão de cavidade em aterros com e sem inclusão de geossintéticos. As simulações foram executadas sob diferentes condições de simulação, variando-se a geometria do aterro, a geometria e arranjo dos reforços, o tipo de reforço e a profundidade de posicionamento da cavidade.

A fase de simulação da expansão da cavidade se assemelha a uma condição quase-estática, pelas condições de carregamento impostas. Os ensaios permitiram avaliar a pressão interna em cada instante do ensaio e os dados fotográficos permitiram quantificar a tendência radial de deformação da tubulação, de maneira a se estabelecer uma relação entre resistência à expansão dos maciços com e sem reforço (Figura 5.1 (a)).

Os resultados obtidos das simulações de explosões de tubulações por meio de expansão de cavidades serão apresentados em termos de gráficos de variação volumétrica de cavidade (%) x pressão transferida ao solo (ou resistência à expansão, p_e , kPa). Para a resistência à expansão admitiu-se uma distribuição uniforme (Figura 5.1 (b)).

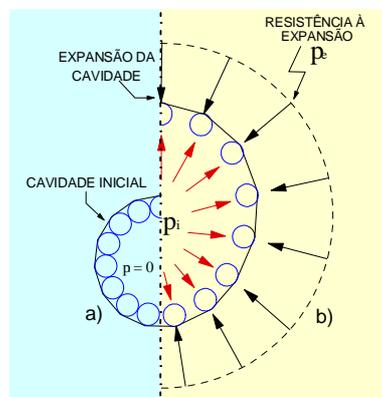


Figura 5.1. Expansão de cavidade: (a) Inicial. (b) Resistência à expansão (p_e).

A resistência à expansão é gerada pela reação do solo circundante quando a tubulação aumenta de volume pela ação da pressão interna (p_i) conforme esquematizado na Figura 5.1 (b). Na identificação dos ensaios, no texto ou em figuras, é utilizado o sistema de codificação apresentado no Capítulo 4 desta tese.

5.2 - RESULTADOS DE ENSAIOS EM ATERROS COM SUPERFÍCIE HORIZONTAL

Os resultados de ensaios de expansão de cavidade são descritos a seguir.

5.2.1 - ENSAIOS SEM REFORÇO COM CAVIDADE A DIFERENTES PROFUNDIDADES

A Figura 5.2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de expansão de cavidades, variando-se a profundidade da cavidade. Na figura, Z é a altura de solo acima da cavidade. Os resultados obtidos mostram que para valores de Z (altura de solo acima da cavidade) até $7R$ observa-se um valor máximo de pressão. Já para $Z = 11R$, o mecanismo de deformação do maciço é diferente e observa-se um contínuo aumento da pressão no solo, que só tende a se estabilizar para acréscimos de volume da cavidade superiores a 180%.

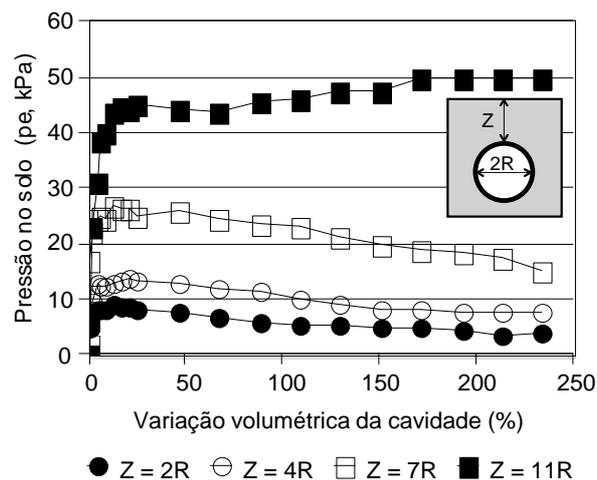


Figura 5.2. Resultados de ensaios de expansão de cavidades a diferentes profundidades.

Alguns ensaios foram repetidos para se avaliar a repetibilidade dos resultados obtidos. A Figura 5.3 mostra os resultados de duas simulações de aterros sem reforço (código E/SEM

REFORÇO/AH/7R), com $Z = 7R$, onde se observa boa repetibilidade dos resultados de ensaios.

Para efeito de comparação entre os diferentes tipos e arranjos de reforço, a maioria dos ensaios foi realizada com a cavidade instalada a uma profundidade $Z = 7R$.

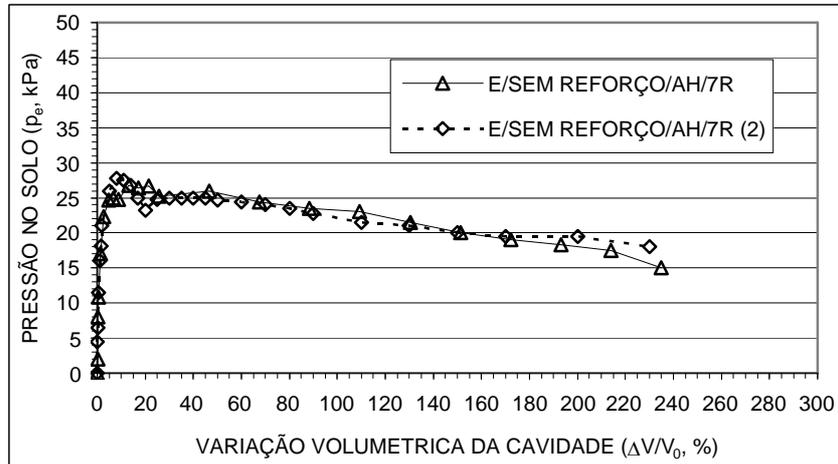


Figura 5.3. Avaliação da repetibilidade dos ensaios.

5.2.2 ENSAIOS COM REFORÇOS NA HORIZONTAL

Resultados de ensaios com o reforço G em arranjo com camada horizontal (15, 25 e 35 cm de comprimento, códigos: E/C15/GTX-GG/AH/7R, E/C25/GTX-GG/AH/7R e E/C35/GTX-GG/AH/7R) são apresentados na Figura 5.4.

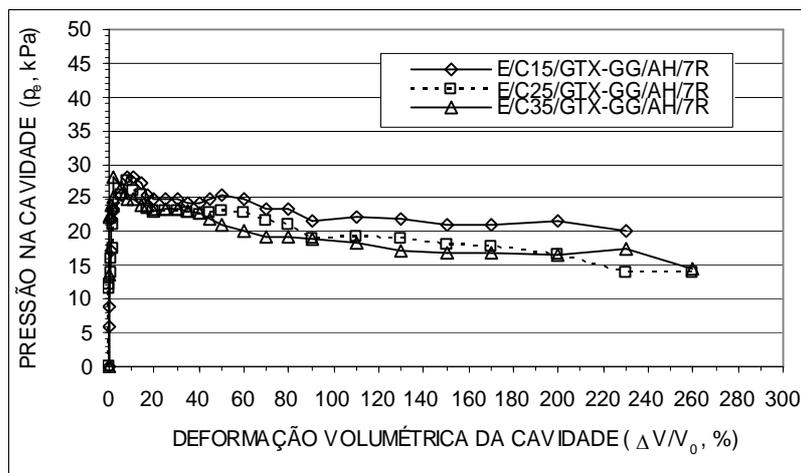


Figura 5.4. Resultados de ensaios de aterros reforçados com geotêxtil tecido G em arranjo de camada com comprimentos de 15 cm (C15), 25 cm (C25) e 35 cm (C35).

Os valores pico das curvas de deformação da cavidade (%) versus pressão na cavidade (kPa) não mostraram diferença significativa em relação às obtidas para o aterro sem reforço, independentemente do comprimento da camada de reforço. Este tipo de arranjo não é aplicável como reforço para minimizar os efeitos da expansão da cavidade, devido aos baixos níveis de tensões verticais a que o reforço está submetido. Assim, a mobilização de ancoragem nas suas extremidades é muito baixa, o que implica em um desempenho fraco como reforço.

Os resultados dos ensaios com geogrelha F com arranjo de camada horizontal (15, 25 e 35 cm de comprimento, códigos: E/C15/GGR-FF/AH/7R, E/C25/GGR-FF/AH/7R e E/C35/GGR-FF/AH/7R) são mostrados na Figura 5.5. Também neste caso os valores de pico das curvas da deformação de cavidade (%) versus a pressão na cavidade (kPa) não mostraram um efeito significativo da presença do reforço. Em geral, nos ensaios com arranjos em camada horizontal para os diversos reforços a resistência à expansão não apresentou ganho significativo, tendo sido inferior a 5 % em relação a um sistema sem reforço.

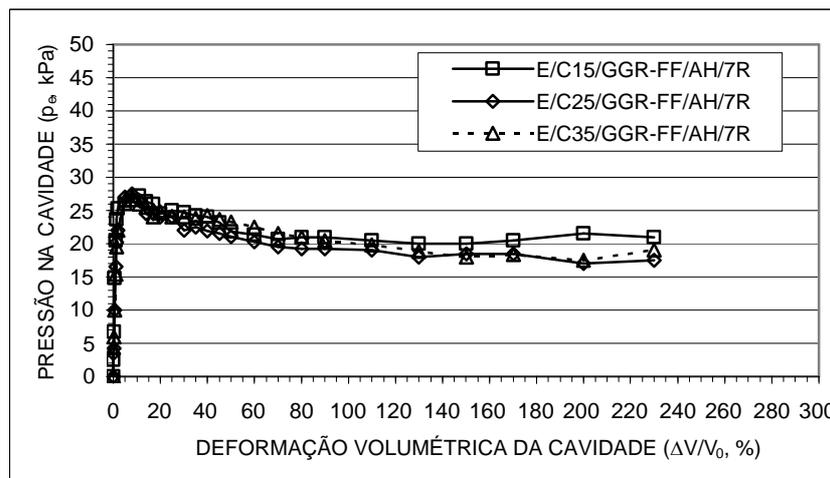


Figura 5.5. Resultados de simulações de aterros reforçados com geogrelha F em arranjo de camada com comprimentos de 15 cm (C15), 25 cm (C25) e 35 cm (C35).

5.2.3 ENSAIOS EM ARRANJOS EM FORMA DE U INVERTIDO

A Figura 5.6 apresenta os resultados da simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em aterro reforçado com papel alumínio em arranjo de U-Invertido, com comprimento de pernas do U igual a 4R (código: E/U4R/PAL-AA/AH/7R). Neste caso, observou-se benefício significativo com a inclusão do reforço. O valor máximo da resistência

à expansão apresentou 18 % de aumento em relação a um sistema não reforçado para uma deformação volumétrica da cavidade em torno de 50 %.

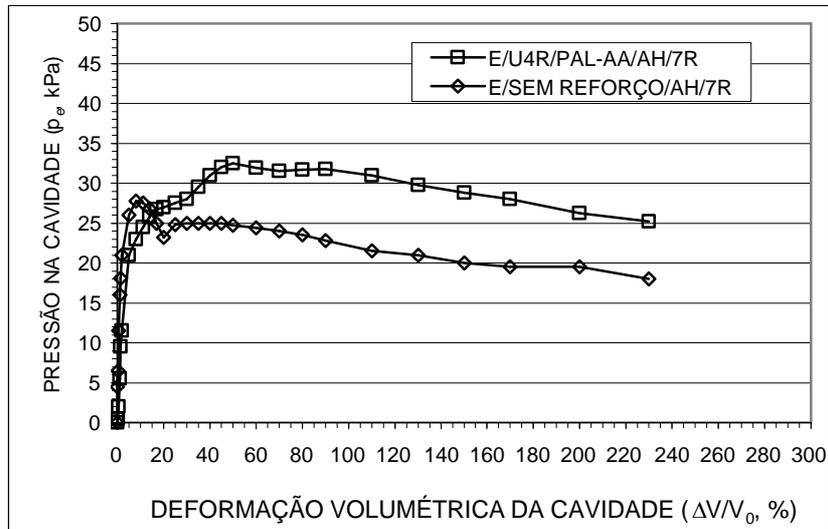


Figura 5.6. Resultados para ensaio com arranjo U-Invertido 4R de papel alumínio, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.

Na Figura 5.7 são apresentados os resultados obtidos na simulação da explosão por meio da expansão de cavidade em solo reforçado com geotêxtil tecido G em arranjo em U-Invertido (código: E/U4R/GTX-GG/AH/7R) mostrando também certo benefício da inclusão do reforço. Nesse caso, o valor máximo da resistência à expansão apresentou aumento de 14,5 % em relação a um sistema não reforçado para a deformação de 45 %.

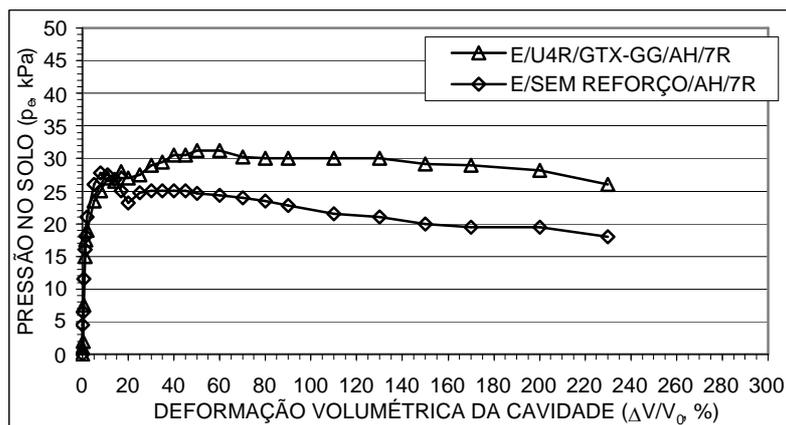


Figura 5.7. Resultados para ensaio em arranjo U-Invertido 4R com geotêxtil tecido G, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.

Os resultados da simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em solo reforçado com geogrelha F em arranjo em U-Invertido 4R (código: E/U4R/GGR-FF/AH/7R)

são mostrados na Figura 5.8. O valor máximo da resistência à expansão apresentou apenas 9,1 % de aumento em relação a um sistema não reforçado para deformação de 70,0 %. Observou-se que o solo deslocado pela expansão da cavidade neste caso foi capaz de passar pelas aberturas da geogrelha, resultando mínimo ganho de resistência e diminuiu a sua eficiência.

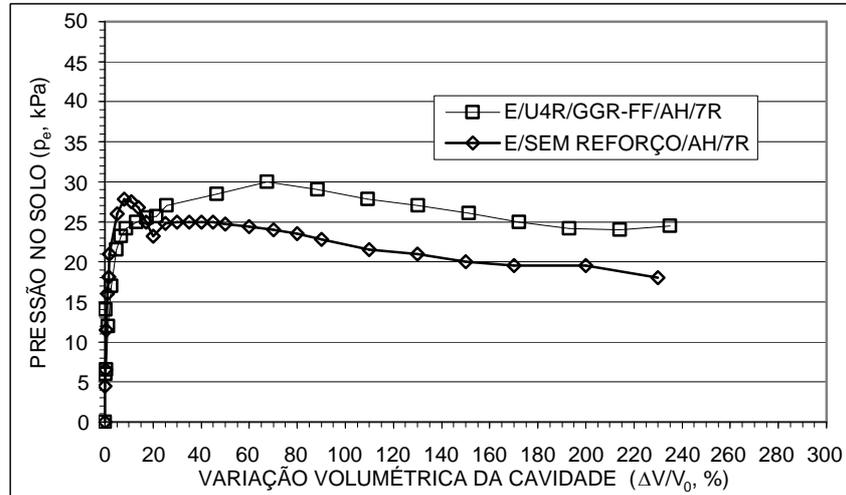


Figura 5.8. Resultado para ensaio em arranjo U-Invertido 4R de geogrelha F, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.

Os resultados da simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em solo reforçado com geotêxtil tecido P em arranjo em U-Invertido 6R (código: E/U6R/GTX-PP/AH/7R) são apresentados na Figura 5.9. O valor máximo da resistência à expansão neste caso apresentou 54,5 % de aumento em relação a um sistema não reforçado para deformação de 70 %. Este maior ganho de resistência do sistema reforçado está associado ao aumento da resistência por ancoragem, devido ao maior comprimento das pernas do U invertido.

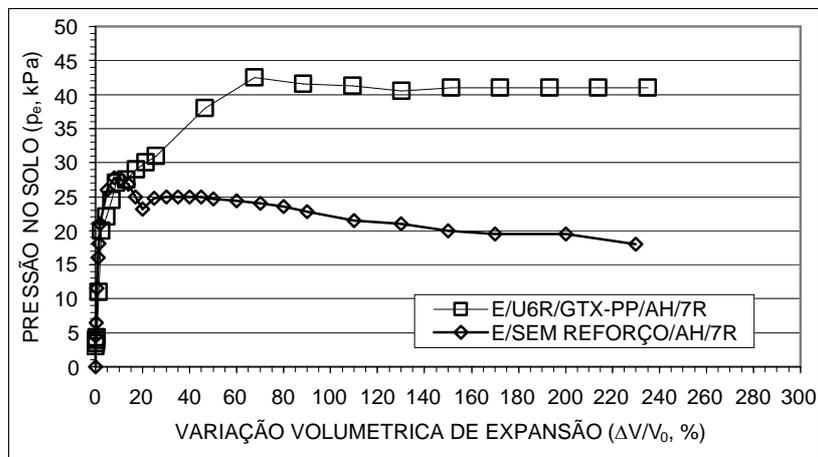


Figura 5.9. Resultado de ensaio em arranjo U-Invertido 6R de geotêxtil tecido P, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.

Com o geotêxtil tecido P foram também realizados ensaios em arranjos em U invertido (comprimento de pernas igual a 6R) com a cavidade nas profundidades iguais a 2R, 4R, 7R e 11R. A variação da resistência à expansão, normalizada pela pressão vertical sobre a cavidade, com a profundidade da cavidade, normalizada pelo seu diâmetro, em ensaios sem reforço e reforçados com o geotêxtil tecido P é apresentada na Figura 5.10. Os resultados mostram que a presença do reforço em arranjo em U é mais benéfica quanto mais superficial for a cavidade. Os resultados dos ensaios sem reforço mostram que a resistência à expansão normalizada não foi significativamente influenciada pela profundidade da cavidade.

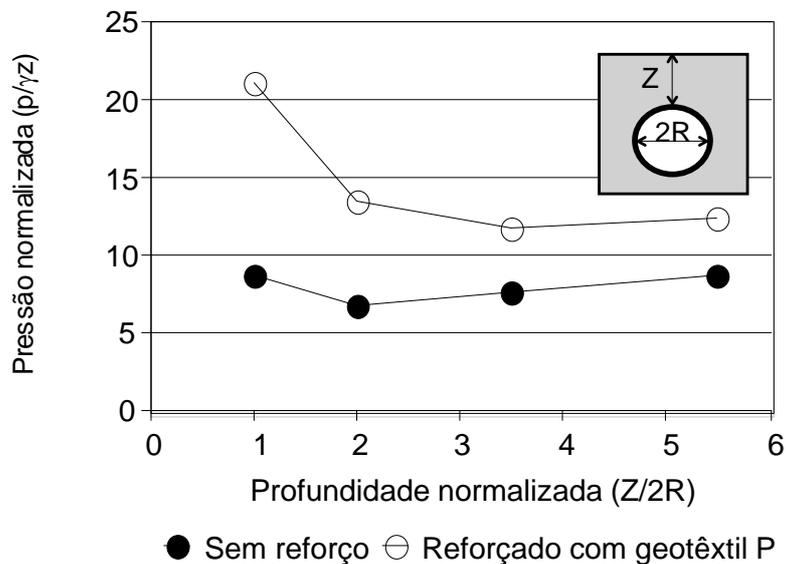


Figura 5.10. Influência da profundidade da cavidade – Ensaios em arranjos em U invertido com comprimento de pernas igual a 6R e geotêxtil P.

O efeito do aumento do comprimento das pernas do U foi também investigado no caso da geogrelha F. A Figura 5.11 apresenta os resultados da simulação em aterro reforçado com geogrelha F de arranjo em U-Invertido 6R (código: E/U6R/GGR-FF/AH/7R). Observa-se uma redução de resistência após um valor de deformação volumétrica em torno de 8%, talvez causada por alguma anomalia durante o ensaio. A seguir, o valor de pressão volta a aumentar, resultando em um valor máximo da resistência à expansão 56,0 % superior ao do sistema não reforçado, também evidenciando o benefício em se aumentar o comprimento de ancoragem do reforço. Por outro lado, ainda se observou a passagem de grãos de areia através das aberturas da geogrelha.

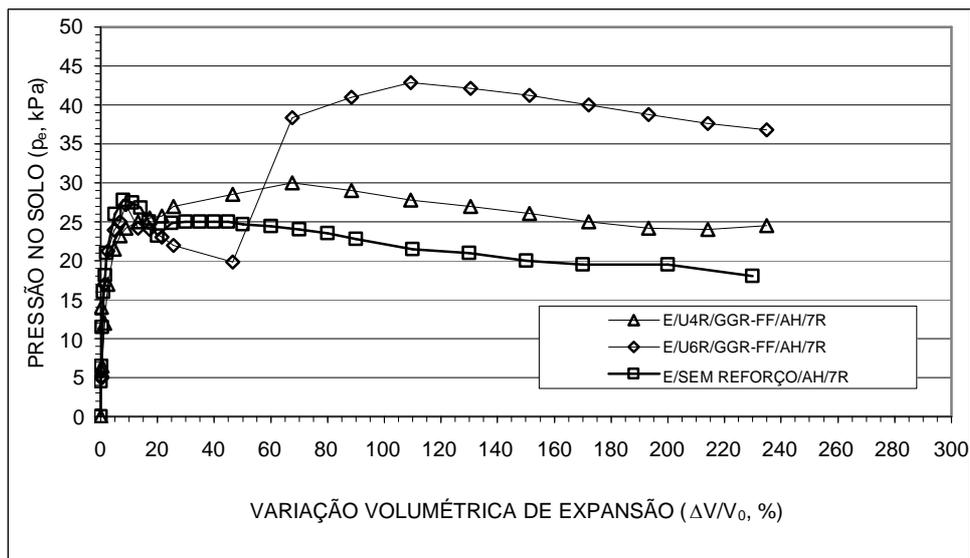


Figura 5.11. Resultados de ensaio em arranjo U-Invertido 4R e 6R de geogrelha F, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.

5.2.4 ENSAIOS EM ARRANJOS ENVELOPADOS

Os resultados da simulação da explosão por meio da expansão de cavidade em solo reforçado com papel alumínio em arranjo envelopado-4R (código: E/E4R/PAL-AA/AH/7R) são apresentados na Figura 5.12. O valor máximo da resistência à expansão apresentou 17,4 % de aumento em relação a um sistema não reforçado para a deformação de 65 %. Nesse caso o reforço rompeu subitamente. A ruptura do reforço aconteceu praticamente ao longo da linha geratriz superior do arranjo envelopado, o que confirma as condições de deformação plana do ensaio.

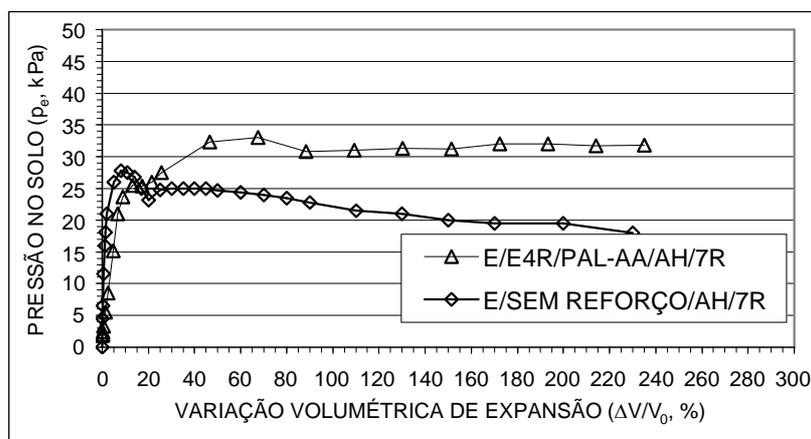


Figura 5.12. Resultado de ensaio em arranjo Envelopado-4R de papel alumínio A, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.

Os resultados da simulação da explosão por meio da expansão de cavidade de solo reforçado com geogrelha F em arranjo envelopado-4R (código: E/E4R/GGR-FF/AH/7R) são apresentados na Figura 5.13. O valor máximo da resistência à expansão apresentou 100,0 % de aumento em relação a um sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 160 %. Por outro lado, também se observou um fluxo de areia através das aberturas da geogrelha na direção radial. A proximidade das curvas dos dois ensaios apresentados na Figura 5.13 para o arranjo envelopado, em que um deles foi interrompido prematuramente, novamente mostrou a boa repetibilidade dos resultados.

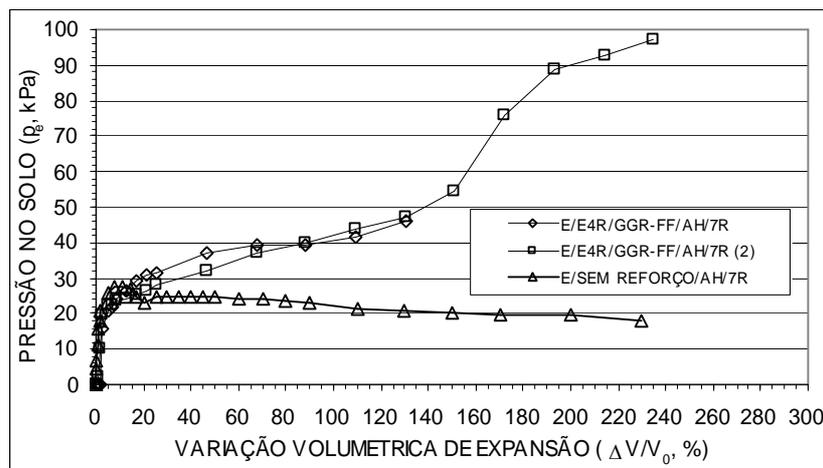


Figura 5.13. Resultados de ensaio em arranjo Envelopado 4R de geogrelha F, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.

A Figura 5.14 apresenta os resultados da simulação da expansão de cavidade em solo reforçado com geotêxtil tecido P em arranjo envelopado-4R (código: E/E4R/GTX-PP/AH/7R).

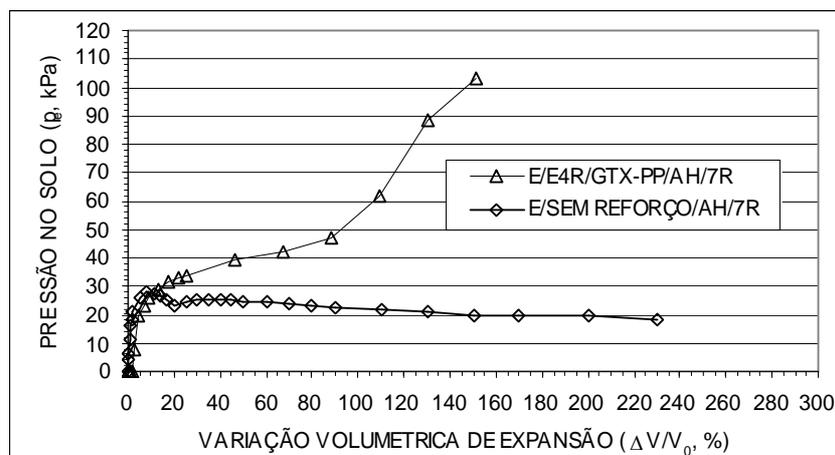


Figura 5.14. Resultado de ensaio em arranjo Envelopado-4R de geotêxtil tecido P, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$.

O valor máximo da resistência à expansão apresentou 100,0 % de aumento em relação a um sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 100 %, ganho este consideravelmente maior que o observado no ensaio reforçado com a geogrelha F para o mesmo nível de deformação (Figura 5.13). Tal ganho de resistência em relação à geogrelha está associado ao efeito deletério da passagem de grãos de areia através desta, o que não ocorreu no caso do geotêxtil P.

5.3 - ENSAIOS EM ATERROS COM FORMA TRAPEZOIDAL

5.3.1 - ENSAIOS SEM REFORÇO

A simulação da explosão por meio da expansão de cavidade em aterro com forma trapezoidal, não reforçado e para $Z = 7R$ (código: E/SEM REFORÇO/AT/7R), foi executada como referência para comparar os desempenhos da inclusão dos reforços. Nesse caso a resistência à expansão foi de 19,9 kPa para uma variação volumétrica da cavidade de 50 %, como apresentado na Figura 5.15. A forma trapezoidal implica em menor massa de solo sobre a cavidade, reduzindo a resistência do solo à expansão da cavidade (perdendo confinamento).

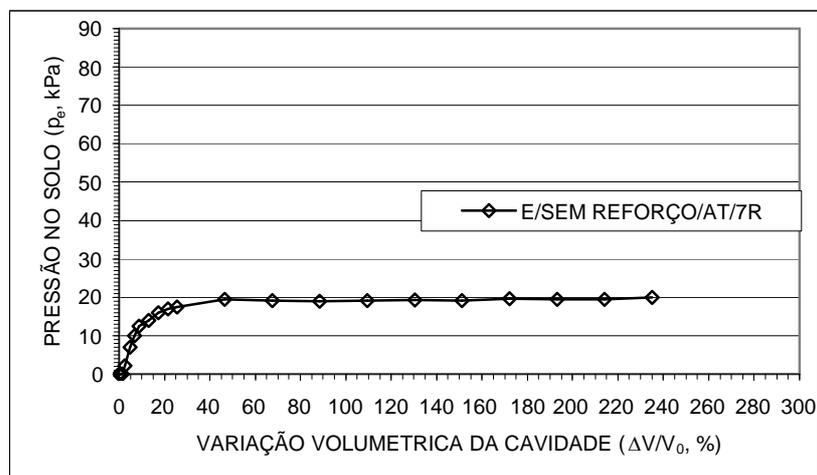


Figura 5.15. Resultado de ensaio não reforçado de aterro trapezoidal e $Z = 7R$.

5.3.2 - ENSAIO COM REFORÇO EM CAMADA

A Figura 5.16 apresenta os resultados da simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com camada de papel alumínio A (código:

E/CAT/PAL-AA/AT/7R). O valor máximo da resistência à expansão foi de 28,0 kPa, o que representa 40,7 % de aumento em relação ao sistema não reforçado. Nesse caso ocorreu ruptura do reforço por tração praticamente ao longo da linha de simetria do reforço em camada.

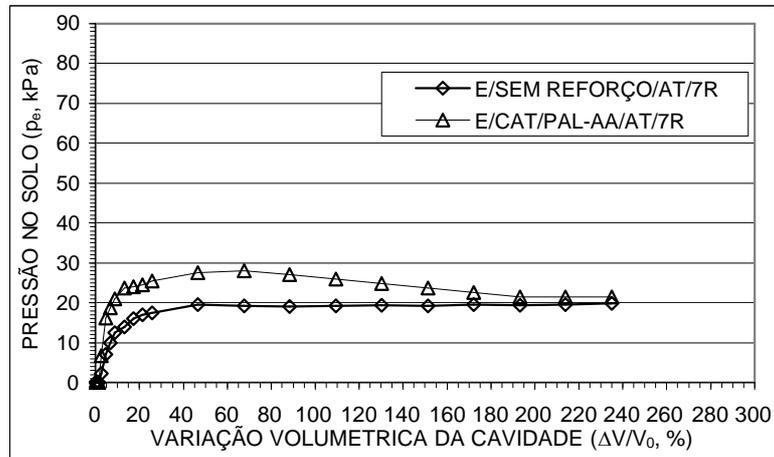


Figura 5.16. Resultados de ensaio em arranjo camada de papel alumínio, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.

A Figura 5.17 apresenta os resultados da simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com geotêxtil tecido P em arranjo em camada (código: E/CAT/GTX-PP/AT/7R). O valor máximo da resistência à expansão de 25,0 kPa apresentou aumento de 25,6 % em relação ao sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 70 %. Este valor é um pouco menor que o observado para o reforço de alumínio, que apresenta maior rigidez que o geotêxtil P.

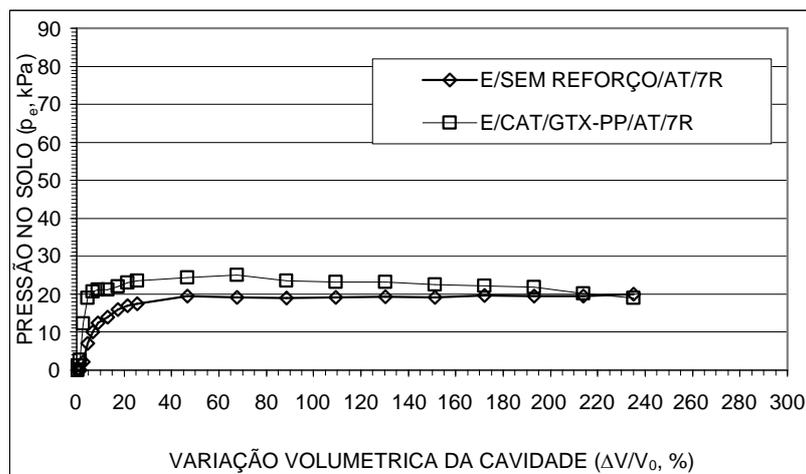


Figura 5.17. Resultados de ensaio em arranjo em camada de geotêxtil tecido P, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.

Na Figura 5.18 são apresentados os resultados obtidos na simulação de expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com geogrelha F em arranjo em camada (código: E/CAT/GGR-FF/AT/7R). O valor máximo da resistência à expansão de 26,0 kPa apresentou aumento de 30,6 % em relação a um sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 60 %. Nesse caso também se observou a passagem de grãos de areia através das aberturas de geogrelha na direção radial da expansão da cavidade.

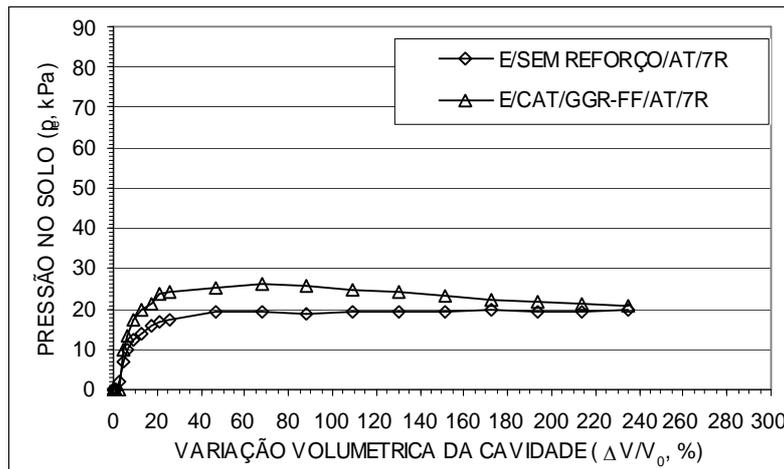


Figura 5.18. Resultados de ensaio em arranjo em camada de geogrelha F, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.

5.3.3 - ENSAIOS EM ARRANJOS EM FORMA DE U INVERTIDO

Na Figura 5.19 são apresentados os resultados obtidos na simulação de expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com papel alumínio A com arranjo em U-Invertido (código: E/U6R/PAL-AA/AT/7R).

Neste ensaio, o valor máximo da resistência à expansão foi de 34,5 kPa, apresentando aumento de 73,3 % em relação ao sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 70 %. A melhor condição de ancoragem do arranjo em U em relação à camada única propiciou maior ganho de resistência. Também neste caso se observou ruptura do reforço ao longo da linha simétrica superior do U-Invertido.

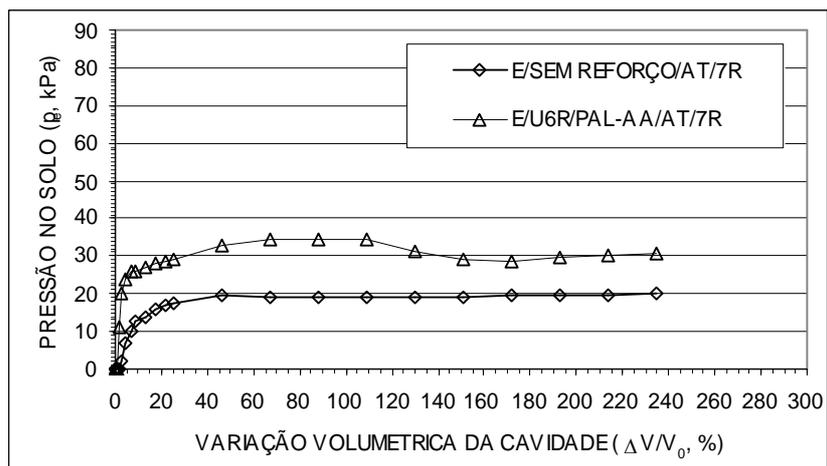


Figura 5.19. Resultados de ensaio em arranjo U-invertido 6R de papel alumínio, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.

Os resultados da simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com geotêxtil tecido P com arranjo em U-Invertido (código: E/U6R/GTX-PP/AT/7R) estão apresentados na Figura 5.20. O valor máximo da resistência à expansão de 34,0 kPa apresentou aumento de 70,8 % em relação ao sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 70 %. O ganho de resistência é semelhante ao obtido para o ensaio com papel alumínio. Neste ensaio foi nítida a falha do reforço pela perda de ancoragem nas pernas do U invertido.

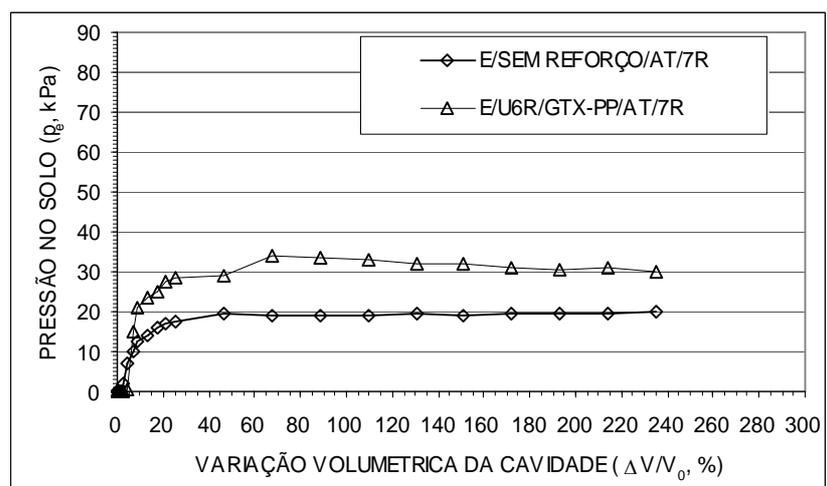


Figura 5.20. Resultados de ensaio em arranjo U-invertido 6R de geotêxtil tecido P, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.

A Figura 5.21 apresenta os resultados obtidos na simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com geogrelha F em arranjo envolpado-4R (código: E/U6R/GGR-FF/AT/7R). O valor máximo da resistência à expansão de 37,8 kPa apresentou aumento de 89,9 % em relação ao sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 70 %. Nesse caso, também se observou passagem de grãos de areia através das aberturas de geogrelha na direção radial da expansão de cavidade. A falha do reforço se iniciou pela perda de ancoragem (perda de aderência entre solo e reforço nas pernas do U-Invertido).

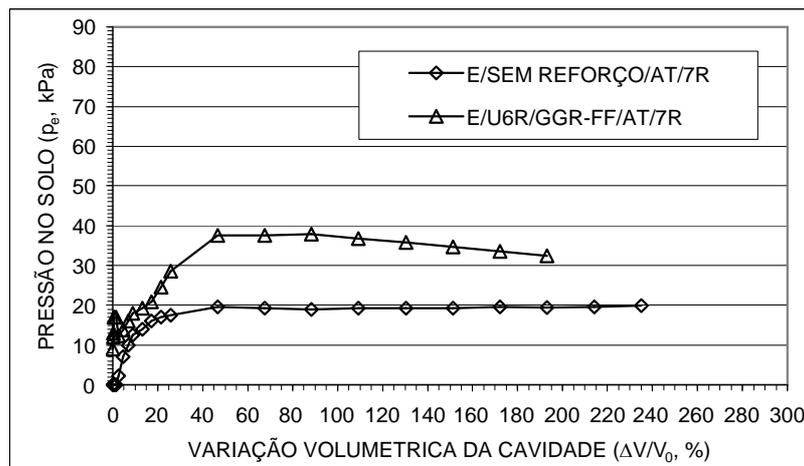


Figura 5.21. Resultados de ensaio em arranjo em U-invertido-6R de geogrelha F, aterro trapezoidal e Z = 7R.

5.3.4 - ENSAIOS EM ARRANJOS ENVELOPADOS

Na Figura 5.22 são apresentados os resultados obtidos na simulação de expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com papel alumínio em arranjo envolpado (código: E/E4R/PAL-AA/AT/7R). O valor máximo da resistência à expansão obtida nesse ensaio foi igual a 37,0 kPa, representando um aumento de 85,9 % em relação a um sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 90 %. Nesse caso o reforço rompeu por tração, tendo ocorrido a ruptura ao longo da linha geratriz central do lado superior do reforço envolpado.

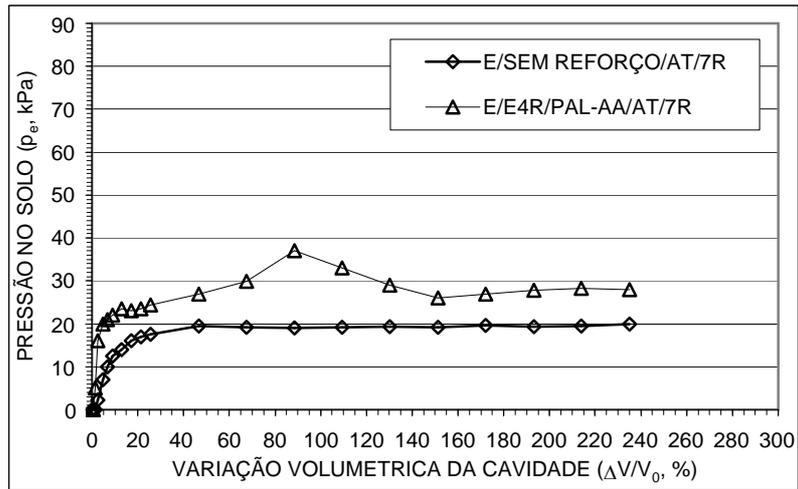


Figura 5.22. Resultados de ensaio em arranjo envelopado de papel alumínio, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.

Na Figura 5.23 apresentam-se os resultados da simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com geotêxtil tecido P em arranjo envelopado (código: E/E4R/GTX-PP/AT/7R).

O valor máximo da resistência à expansão de 40,0 kPa representou aumento de 100 % em relação ao sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 80 %. O aumento da resistência à expansão foi ainda maior, chegando a 300,0 % para a deformação volumétrica 130 %.

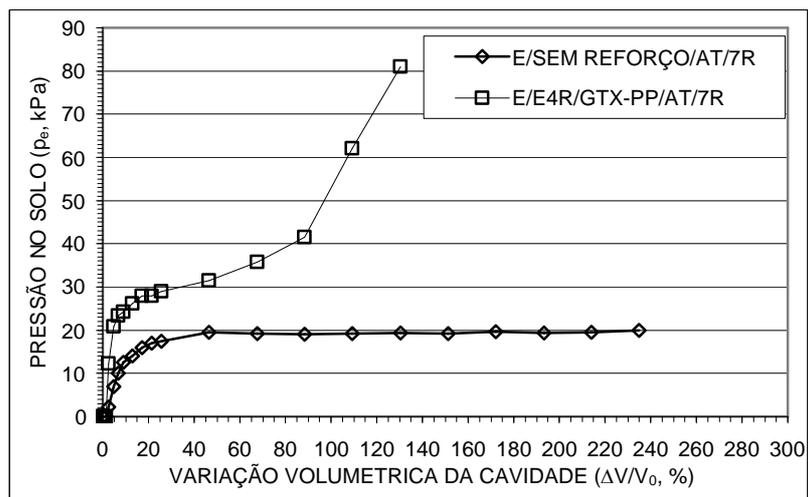


Figura 5.23. Resultados de ensaio em arranjo envelopado-4R de geotêxtil tecido P, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.

Na Figura 5.24 são apresentados os resultados obtidos na simulação de expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com geogrelha F em arranjo envelopado-4R (código: E/E4R/GGR-FF/AT/7R).

O valor máximo da resistência à expansão de 40,0 kPa representou aumento de 100 % em relação ao sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 140 %. A resistência à expansão cresceu de forma mais significativa a partir de 110% de deformação volumétrica, atingindo um ganho de 300 % ao final do ensaio.

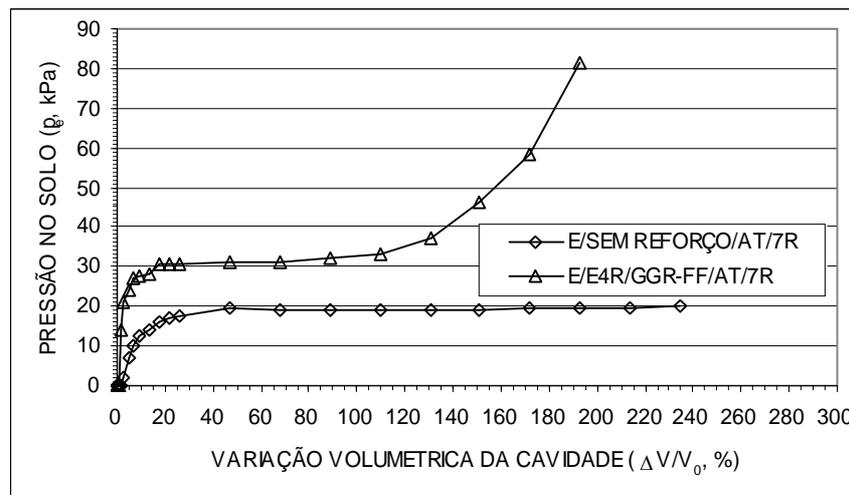


Figura 5.24. Resultados de ensaio em arranjo envelopado-4R de geogrelha F, aterro trapezoidal e $Z = 7R$.

5.3.5 - INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DA CAVIDADE EM ATERROS TRAPEZOIDAIS REFORÇADOS COM ARRANJOS ENVELOPADOS

Uma série de ensaios foi realizada visando avaliar a influência da profundidade da cavidade nos resultados de ensaios sem reforço e com arranjo de reforço envelopado. O arranjo envelopado foi escolhido por ter sido o que mostrou maior eficiência em reforçar o aterro. As profundidades de cavidade ensaiadas foram iguais a 2R e 4R.

A Figura 5.25 mostra os resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterro trapezoidal com e sem reforço para uma profundidade de cavidade (Z) igual a 2R. No caso sem reforço (código: E/SEM REFORÇO/AT/2R) obteve-se uma resistência à expansão de 7,6

kPa para 5 % de variação volumétrica, com aumentos e quedas de resistência para deformações maiores.

Também na Figura 5.25 são apresentados os resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterro reforçado com papel alumínio em arranjo envelopado (código: E/E4R/PAL-AA/AT/2R). O valor máximo da resistência à expansão foi de 10,1 kPa mostrando aumento de 32,8 % em relação ao sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 70 %. Também neste ensaio o reforço rompeu subitamente ao longo da linha geratriz central do lado superior do arranjo envelopado.

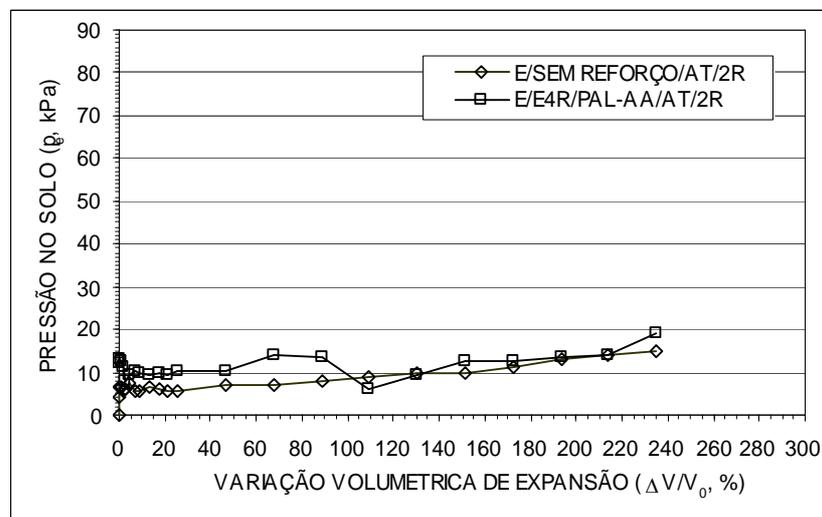


Figura 5.25. Resultado de ensaio em arranjo envelopado de papel alumínio AA, aterro trapezoidal e $Z = 2R$.

A Figura 5.26 apresenta os resultados de ensaio com o geotêxtil tecido P em arranjo em envelopado (código: E/E4R/GTX-PP/AT/2R). O valor da resistência à expansão que apresentou foi de 15 kPa, o que resulta em aumento de 100 % em relação ao sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 100 %.

Nesse caso a resistência à expansão atingiu a 90 kPa mostrando aumento de 1000 % para uma variação volumétrica de 170% ao final do ensaio. Os resultados do ensaio com papel alumínio e do ensaio com geotêxtil P mostram a importância de serem utilizados reforços com elevada resistência à tração neste tipo de aplicação.

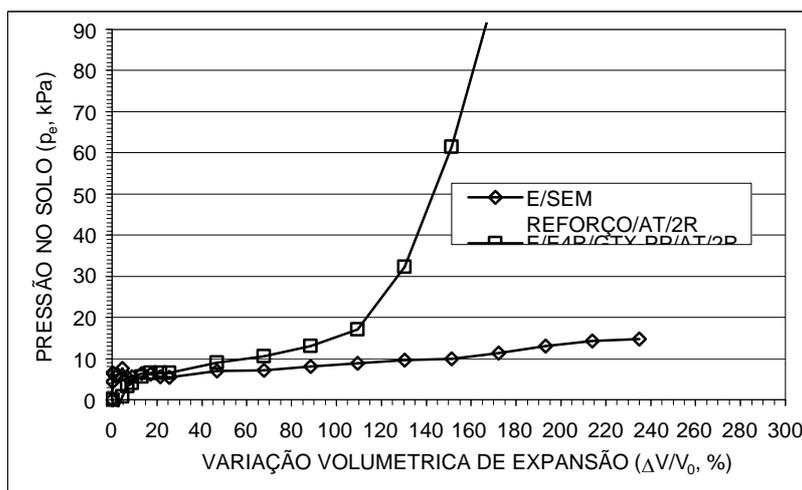


Figura 5.26. Resultados de ensaio em arranjo envelopado de geotêxtil tecido P, aterro trapezoidal e $Z = 2R$.

Para a profundidade de cavidade igual a 4R, o ensaio em aterro sem reforço (código: E/SEM REFORÇO/AT/4R) uma resistência máxima à expansão de 18,8 kPa (Fig. 5.27). Os resultados da simulação de expansão de cavidade em aterro trapezoidal reforçado com papel alumínio A em arranjo envelopado (código: E/E4R/PAL-AA/AT/4R) são também mostrados na Figura 5.27.

O valor máximo da resistência à expansão foi de 29,0 kPa, mostrando aumento de 54,2 % em relação a um sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 54 %. Novamente o reforço rompeu na sua linha geratriz central do lado superior do envelopamento.

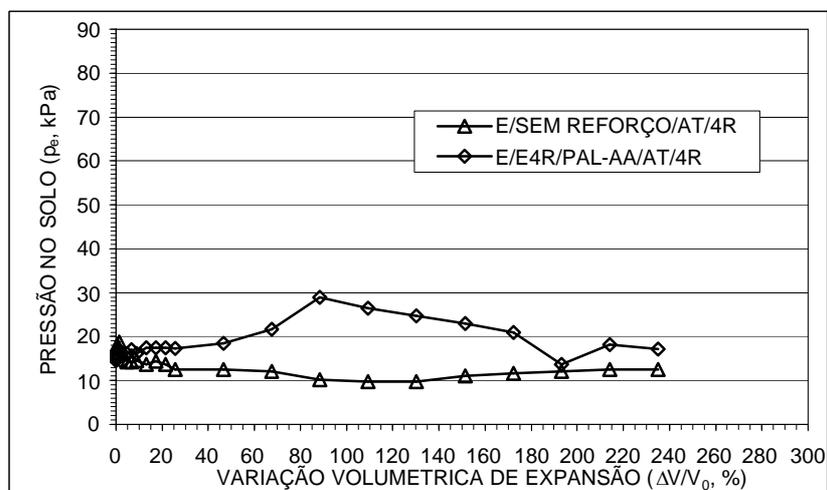


Figura 5.27. Resultados de ensaio em arranjo envelopado com papel alumínio e em aterro sem reforço, aterro trapezoidal e $Z = 4R$.

A Figura 5.28 apresenta os resultados de ensaios de aterro sem reforço e reforçado com arranjo envelopado com o geotêxtil P e $Z = 4R$ (código: E/E4R/GTX-PP/AT/4R). O valor da resistência à expansão de 38,0 kPa representa aumento de 100 % em relação ao sistema não reforçado, para uma variação volumétrica de expansão de 140 %.

A resistência à expansão aumentou com o aumento da variação volumétrica da cavidade, e no final do ensaio se obteve uma resistência de 90 kPa, que representa um aumento de 378 % em relação à resistência máxima do sistema não reforçado.

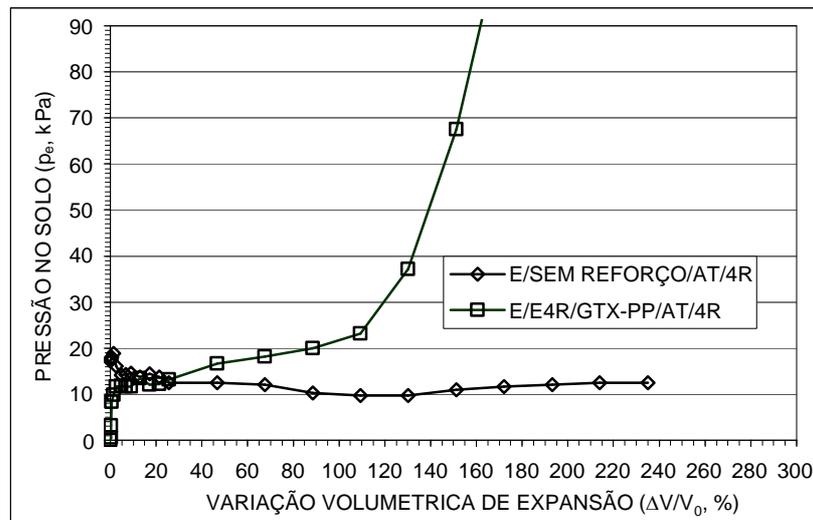


Figura 5.28. Resultados de ensaio em arranjo envelopado de geotêxtil tecido-P, aterro trapezoidal e $Z = 4R$.

5.4 - COMENTÁRIOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.4.1 - ENSAIOS EM ATERROS COM SUPERFÍCIE HORIZONTAL

Em geral, os resultados das simulações de explosões por meio da expansão de cavidades em aterros reforçados com geossintéticos apresentaram melhoria da resistência à expansão do maciço. O resumo dos resultados dos ensaios em aterros de superfície horizontal e $Z = 7R$ é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros com superfície horizontal e $Z = 7R$.

Simulação	Resistência à expansão (kPa)	$\Delta V/V_0$, %	Melhoria %
E/SEM REFORÇO/AH/7R	27,5	15,0	-
E/C15/GTX-GG/AH/7R	28,0	14,0	1,8
E/C15/GGR-FF/AH/7R	28,0	11,0	1,8
E/U4R/PAL-AA/AH/7R	32,5	50,0	18,0
E/U4R/GTX-GG/AH/7R	31,5	50,0	14,5
E/U4R/GGR-FF/AH/7R	30,0	67,5	9,1
E/U6R/GTX-PP/AH/7R	42,5	67,5	54,5
E/E4R/PAL-AA/AH/7R	32,3	67,5	20,0
E/U6R/GGR-FF/AH/7R	42,9	109,3	56,0
E/E4R/GGR-FF/AH/7R	97,0 (final do ensaio)	235,0	252,7
E/E4R/GTX-PP/AH/7R	103,2 (final do ensaio)	151,2	275,2

Observa-se que o sistema com melhor desempenho foi o de arranjo envelopado com geotêxtil tecido P (275,2 % de aumento na resistência em relação ao sistema não reforçado).

Outro sistema que mostrou bom desempenho foi em arranjo envelopado de geogrelha F (252,7 % de aumento na resistência em relação ao sistema não reforçado).

No que se refere ao arranjo em U invertido, o melhor desempenho foi aquele em que se utilizou geotêxtil tecido P, com comprimento de pernas do U igual a 6R (54,5 % de aumento da resistência em relação a um sistema não reforçado). Similarmente, o arranjo em U invertido com geogrelha apresentou 56 % de aumento de resistência à expansão em relação a um sistema não reforçado.

O resumo dos resultados de ensaios de expansão de cavidades em aterros de superfície horizontal para valores de Z iguais a 2R, 4R e 11R são apresentados nas Tabelas 5.2 a 5.4. Se observa nitidamente que os maiores ganhos de resistência proporcionados pela presença de reforço ocorrem para cavidades rasas.

Tabela 5.2. Resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros de superfície horizontal e $Z= 2R$.

Simulação	Resistência à expansão (kPa)	$\Delta V/V_0$, %	Melhoria %
E/SEM REFORÇO/AH/2R	10,5	13,1	-
E/U6R/GTX-PP/AH/2R	21,9	130,3	108,6

Tabela 5.3. Resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros de superfície horizontal e $Z= 4R$.

Simulação	Resistência à expansão (kPa)	$\Delta V/V_0$, %	Melhoria %
E/SEM REFORÇO/AH/4R	14,8	21,4	-
E/U6R/GTX-PP/AH/4R	27,9	46,6	88,5

Tabela 5.4. Resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros de superfície horizontal e $Z= 11R$.

Simulação	Resistência à expansão (kPa)	$\Delta V/V_0$, %	Melhoria %
E/SEM REFORÇO/AH/11R	50,0	20,0	-
E/U6R/GTX-PP/AH/11R	70,6	88,0	41,2

5.4.2 - ENSAIOS EM ATERROS COM SEÇÃO TRANSVERSAL TRAPEZOIDAL

Os resultados da simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em aterros trapezoidais reforçados com geossintéticos indicaram aumento na resistência à expansão em relação aos aterros não reforçados. O resumo dos resultados de ensaios em aterros trapezoidais para $Z = 7R$ são apresentados na Tabela 5.5.

Como observado para o caso de aterro com superfície horizontal, o arranjo com melhor desempenho para aterros trapezoidais foi o envelopado. No caso deste arranjo com geotêxtil tecido P observou-se 307,0 % de aumento de resistência em relação ao sistema não reforçado), enquanto que para o arranjo envelopado com geogrelha F o ganho de resistência à expansão foi de 309,0 % em relação a um sistema não reforçado.

Para os arranjos em U invertido, o de melhor desempenho foi o com geogrelha (89,9 % de aumento de resistência em relação a um sistema não reforçado). Similarmente, bom

desempenho foi também observado para o arranjo com o geotêxtil tecido P (70,8 % de aumento de resistência em relação ao sistema não reforçado).

Os ensaios de expansão de cavidade em aterros trapezoidais reforçados com papel alumínio A apresentaram ruptura do reforço em todos os casos. A ruptura ocorreu ao longo da linha superior de simetria do reforço nos diversos arranjos. Tal fato permitiu concluir que no ensaio de expansão a linha geratriz superior do reforço (acima da cavidade de expansão) é o ponto mais solicitado à tração.

Tabela 5.5. Resultados de ensaios de expansão de cavidades em aterros trapezoidais e Z= 7R.

Simulação	Resistência à expansão (kPa)	$\Delta V/V_0$, %	Melhoria %
E/SEM REFORÇO/AT/7R	19,9	46,6	-
E/CAT/PAL-AA/AT/7R	28,0	67,5	40,7
E/E4R/PAL-AA/AT/7R	37,0	88,4	85,9
E/U6R/PAL-AA/AT/7R	34,5	67,5	73,3
E/U6R/GTX-PP/AT/7R	34,0	67,5	70,8
E/CAT/GTX-PP/AT/7R	25,0	67,5	25,6
E/E4R/GTX-PP/AT/7R	81,0 (final do ensaio)	130,3	307,0
E/CAT/GGR-FF/AT/7R	26,0	67,5	30,6
E/E4R/GGR-FF/AT/7R	81,4 (final do ensaio)	193,1	309,0
E/U6R/GGR-FF/AT/7R	37,8	88,4	89,9

Nos ensaios com aterros trapezoidais, com Z = 2R e 4R, os melhores desempenhos foram também observados para o arranjo envelopado com geotêxtil tecido P, como mostrado nas Tabelas 5.6. e 5.7.

Tabela 5.6. Resultados de ensaios de expansão de cavidades em aterros trapezoidais e Z= 2R.

Simulação	Resistência à expansão (kPa)	$\Delta V/V_0$, %	Aumento %
E/SEM REFORÇO/AT/2R	7,6	4,7	-
E/E4R/PAL-AA/AT/2R	14,2	67,5	86,8
E/U6R/GTX-PP/AT/2R	15,5	3,0	103,9
E/E4R/GTX-PP/AT/2R	final de ensaio 124,0	193,1	1531,5

Tabela 5.7. Resultados de ensaios de expansão de cavidades em aterros trapezoidais e Z= 4R.

Simulação	Resistência à expansão (kPa)	$\Delta V/V_0$, %	Aumento %
E/SEM REFORÇO/AT/4R	18,8	1,3	
E/E4R/PAL-AA/AT/4R	29,0	88,4	54,2
E/E4R/GTX-PP/AT/4R	final de ensaio 112	172,2	495,3

A resistência à expansão da cavidade foi influenciada pelas propriedades geométricas, textura e rigidez dos reforços. A resistência à expansão em um sistema tubulação-reforço-solo depende do grau de ancoragem do reforço e do confinamento da tubulação gerado pela camada de solo acima da mesma. Neste contexto, o confinamento é maior em aterros com superfície horizontal em relação a aterros trapezoidais com taludes 2H:1V. Isto pode ser constatado pelos resultados obtidos em ensaios de expansão para condições similares de espessura de camada de solo acima do reforço, tipo de reforço e arranjo geométrico dos reforços. A Figura 5.29 mostra resultados de ensaios de expansão em aterros com superfície horizontal e aterros trapezoidais com taludes 2H:1V, sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido P em arranjo U invertido, com comprimento de pernas igual a 6R).

A resistência de aterros horizontais é significativamente maior que a de trapezoidais. Assim, no caso de utilização de aterros de forma trapezoidal, quanto maior a largura da plataforma do aterro, maior é a resistência do maciço à expansão.

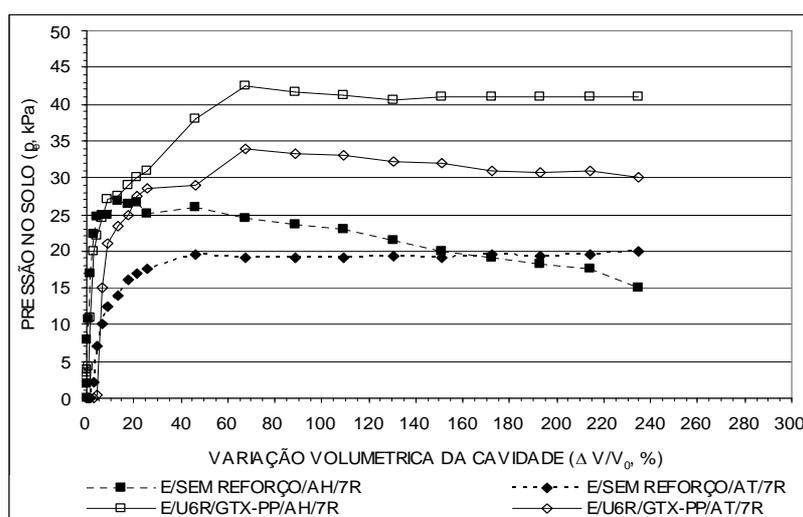


Figura 5.29. Resultados de ensaios em aterros com superfície horizontal e aterros trapezoidais com taludes 2H:1V (sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido P em arranjo U invertido).

A Figura 5.32 mostra as trajetórias de deslocamento dos marcos no ensaio em aterro com superfície horizontal, sem reforço (código: E/SEM REFORÇO/AH/7R), para um nível de variação volumétrica de cavidade de 240,9 % sob uma pressão no solo de 18,0 kPa (resistência à expansão de cavidade).

A região comprometida com o deslocamento do solo forma uma cunha de aspecto triangular acima da cavidade e a superfície superior do aterro sofre levantamento, gerando superfícies de ruptura que variam desde linhas quase verticais até superfícies inclinadas com a vertical.

Os maiores deslocamentos foram desenvolvidos nos pontos superficiais A e B, e no ponto C (Figura 5.32). Para o ensaio E/SEM REFORÇO/AH/7R os deslocamentos verticais dos pontos A, B e C foram 28,0 mm, 32,5 mm e 43,9 mm, respectivamente.

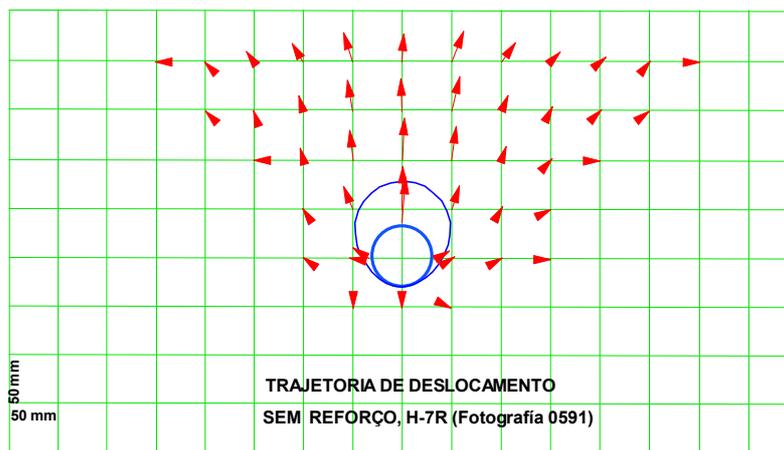


Figura 5.32. Trajetórias de deslocamento na simulação E/SEM REFORÇO/AH/7R.

A Figura 5.33 mostra as trajetórias de deslocamentos obtidas no ensaio com arranjo em U invertido e geotêxtil G, E/U4R/GTX-GG/AH/7R, para um nível de variação volumétrica de cavidade de 240 %, sob uma pressão no solo de 26,0 kPa (resistência à expansão). Neste caso, os deslocamentos dos pontos A, B e C foram iguais a 31,5 mm, 28,4 mm e 37,0, respectivamente.. Estes valores são ligeiramente inferiores aos obtidos no ensaio sem reforço, com exceção do ponto A (Fig. 5.34).

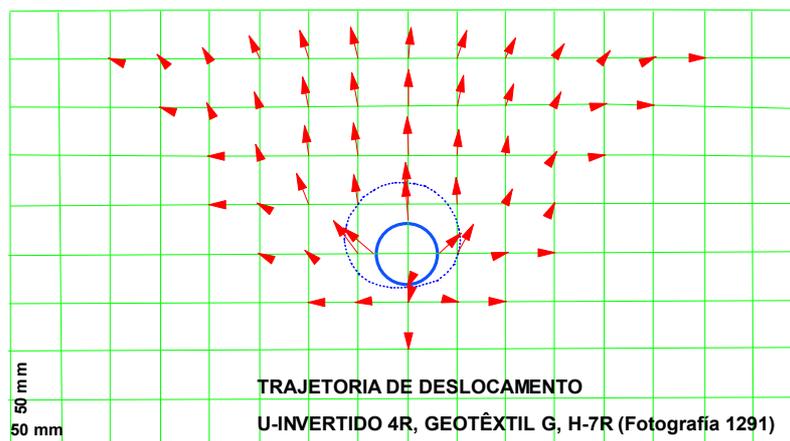


Figura 5.33. Trajetórias de deslocamento para o ensaio E/U4R/GTX-GG/AH/7R.

A Figura 5.34 apresenta as trajetórias de deslocamentos dos marcos do ensaio com arranjo em U invertido e geogrelha F, E/U4R/GGR-FF/AH/7R, para um nível de variação volumétrica de cavidade de 109 % sob uma pressão no solo de 27,8 kPa (resistência à expansão). A região circundante apresenta deslocamentos para os pontos A, B e C iguais a 37,7 mm, 40 mm e 50 mm, respectivamente.

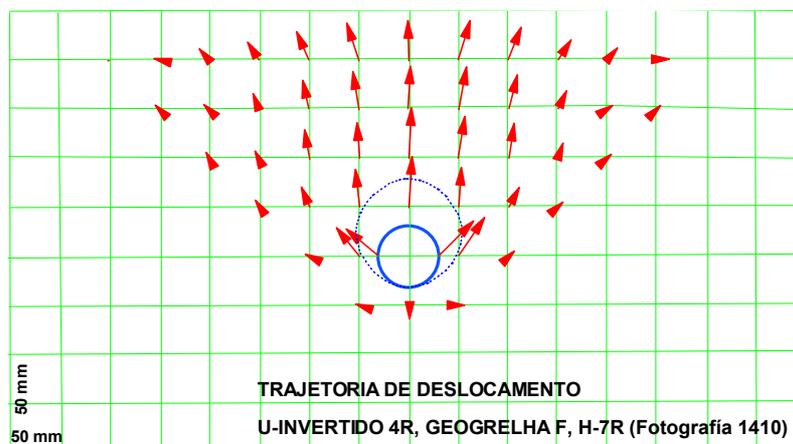


Figura 5.34. Trajetórias de deslocamento dos marcos no ensaio E/U4R/GGR-FF/AH/7R.

Os resultados apresentados nas Figuras 5.33 e 5.34 mostram que em aterros com reforços em forma de U invertido, se observa uma movimentação de uma quantidade de massa de solo ligeiramente maior que no caso de ensaios sem reforço. A presença do reforço provoca uma redistribuição de tensões no maciço, fazendo com que uma maior porção dele seja solicitada. Embora o acompanhamento dos deslocamentos dos marcos seja útil para a visualização de mecanismos de deslocamentos internos na massa de solo, deu-se ênfase no presente trabalho na movimentação de marcos localizados na fronteira superior do maciço, bem como na evolução da deformação da cavidade.

5.6 – DESLOCAMENTOS SUPERFICIAIS DO ATERRO

Como era esperado, a expansão da cavidade no aterro provocou levantamento da sua superfície. Para o ensaio em aterro sem reforço com superfície horizontal (código: E/SEM REFORÇO/AH/7R), observou-se que até a pressão de 25,5 kPa, a forma da superfície deformada se assemelhava à forma de uma curva de Gauss. Para deformações maiores da cavidade, o topo sofreu uma depressão, formando uma bacia na região central, como mostra a Figura 5.35. O levantamento máximo na região central do aterro foi de cerca de 30,0 mm, ao final do ensaio.

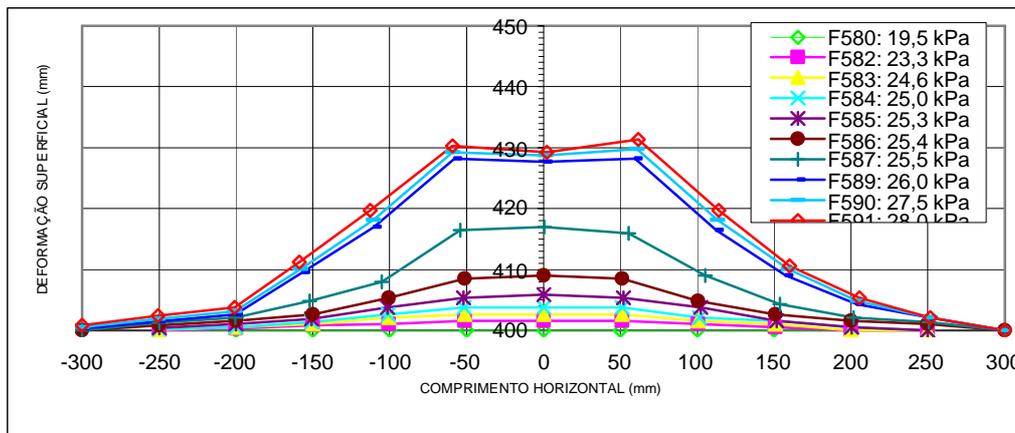


Figura 5.35. Levantamento superficial de aterro com superfície horizontal sem reforço (ensaio E/SEM REFORÇO/AH/7R).

A progressão da forma deformada da superfície do aterro obtida no ensaio reforçado com geotêxtil P, arranjo em U invertido (código: E/U6R/GTX-PP/AH/7R), é apresentada na Figura 5.36. Até uma pressão da cavidade em torno de 40 kPa, também se observou uma forma da deformada da superfície semelhante à curva de Gauss. Entanto, a ruptura no trecho de ancoragem da perna esquerda do U provocou uma significativa assimetria no padrão de deslocamento superficial, que se acentuou até o final do ensaio.

O valor máximo do deslocamento vertical na superfície foi de 31,0 mm (26 mm sob o eixo de simetria) ao final do ensaio. Este valor de deslocamento é comparável ao do aterro sem reforço, mas deve-se ter em mente que a pressão na cavidade foi cerca de 60% maior no caso reforçado.

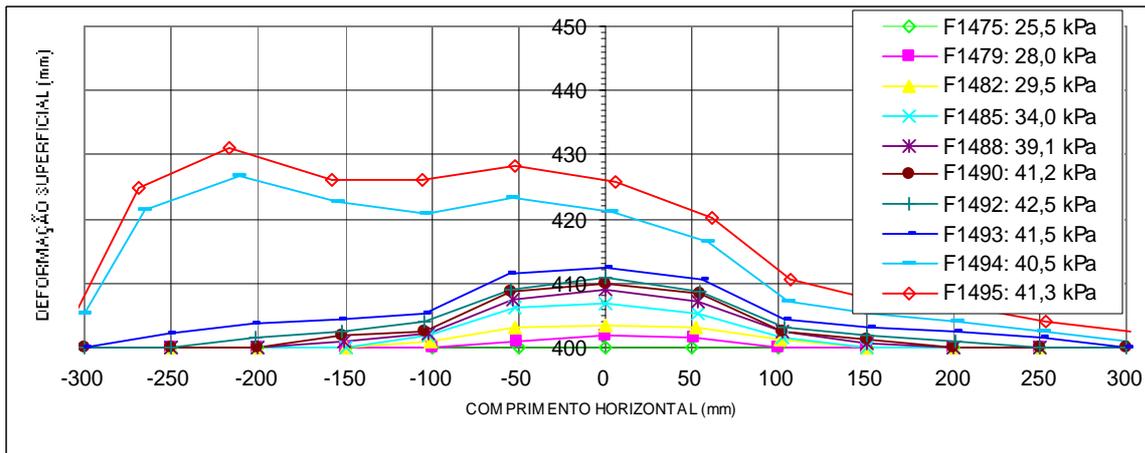


Figura 5.36. Levantamento superficial do aterro com superfície horizontal reforçado (E/U6R/GTX-PP/AH/7R).

No ensaio no aterro reforçado com geotêxtil P, em arranjo envelopado (código: E/E4R/GTX-PP/AH/7R) observou-se levantamento contínuo da superfície até o final do ensaio (pressão igual a 104,0 kPa), como mostra a Figura 5.37. A forma deformada da superfície do terreno também assemelhou-se a uma curva de Gauss, embora, nesse caso, sem a formação de uma depressão na região central. O valor máximo do deslocamento vertical ao final do ensaio foi de 18,0 mm, o que é significativamente menor que o observado para o aterro sem reforço, particularmente se for considerada a diferença da pressão na cavidade em ambos os casos (25,5 kPa no caso se reforço e 104 kPa no caso reforçado em arranjo envelopado 4R com geotêxtil P). Também pode-se observar uma maior área da região levantada no ensaio reforçado (Figura 5.37) em relação ao ensaio sem reforço (Figura 5.35).

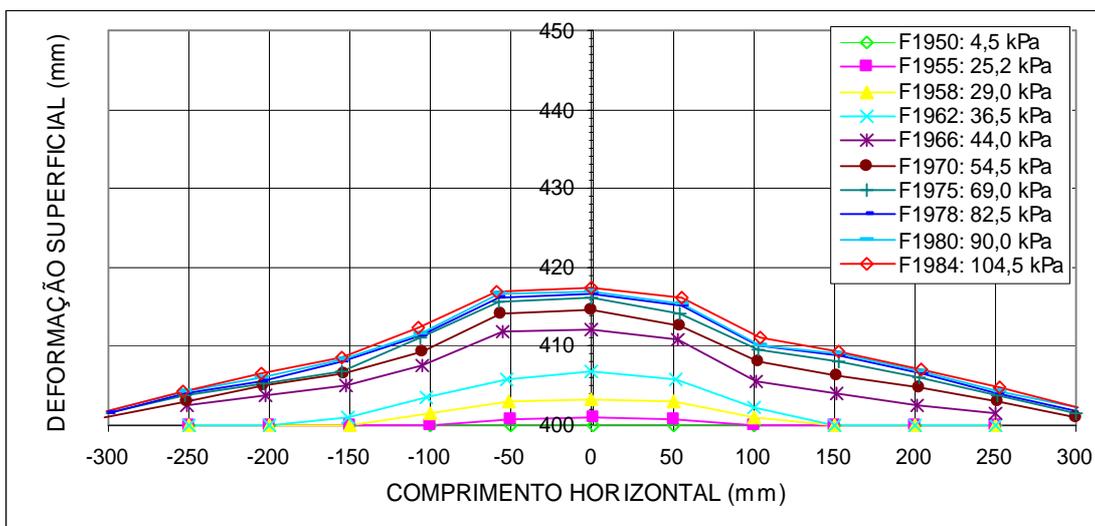
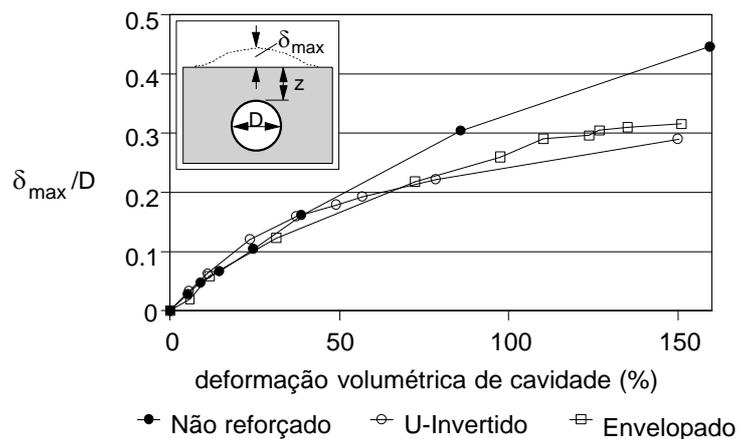
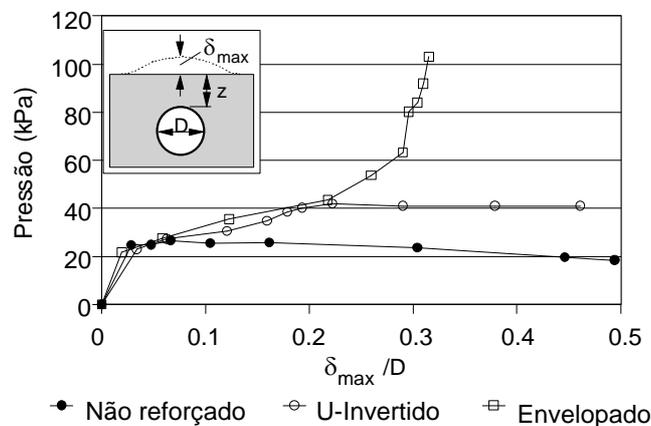


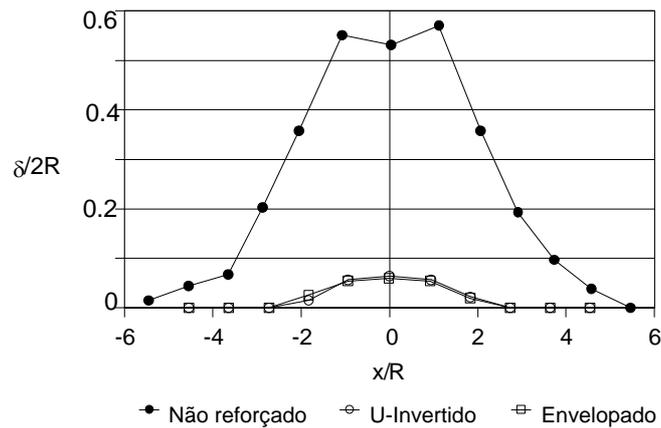
Figura 5.37. Levantamento superficial do aterro com superfície horizontal reforçado (código: E/E4R/GTX-PP/AH/7R).

A Figura 5.38 (a) apresenta a relação entre o deslocamento vertical máximo na superfície do aterro e o aumento de volume da cavidade para os ensaios de expansão de cavidade com (ensaios com o geotêxtil tecido P) e sem reforço. Estes resultados mostram a pequena influência da presença e tipo de arranjo do reforço no deslocamento superficial do aterro em relação ao aumento do volume da cavidade. No entanto, é importante ressaltar os diferentes valores de pressão da cavidade para cada caso. Este aspecto é mais claramente observado na Figura 5.38 (b) que mostra que os sistemas reforçados e não reforçados apresentam comportamentos similares até a pressão na cavidade de 26 kPa, em termos do deslocamento vertical máximo normalizado pelo diâmetro inicial da cavidade. Após esse valor o levantamento da superfície foi significativamente maior no maciço não reforçado em relação aos maciços reforçados, particularmente quando se compara com o caso do arranjo envelopado. Os arranjos U invertidos e envelopado apresentam comportamentos similares até a pressão de 41 kPa na cavidade (Fig. 5.38 (b)), mas a seguir o levantamento superficial aumenta sob pressão de cavidade constante para o caso do arranjo em U, em comparação com o arranjo envelopado.



(a) Deslocamento vertical máximo normalizado versus deformação volumétrica.





(c) Perfis de deslocamentos verticais normalizados.

Figura 5.38. Deslocamentos na superfície dos aterros em ensaios com sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido P ($Z=7R$).

A Figura 5.38 (c) apresenta os perfis de deslocamentos verticais das superfícies dos aterros em ensaios com e sem reforço para uma mesma pressão de cavidade igual a 28 kPa. Este foi o valor máximo de pressão observado no ensaio sem reforço. Para este valor de pressão, pode-se notar que os deslocamentos superficiais nos aterros reforçados foram consideravelmente menores que os obtidos no aterro não reforçado. Estes resultados mostram a importante influência da presença do reforço na redução dos deslocamentos superficiais devido à expansão da cavidade. A inferência que se poderia fazer no caso de uma explosão real é a de que menos material seria lançado pelos ares em decorrência da explosão, ou estes atingiriam distância menores que no caso de o aterro não ser reforçado, com conseqüências benéficas na redução de ferimentos ou danos a pessoas ou estruturas vizinhas.

Comportamentos semelhantes aos descritos nas figuras anteriores foram também obtidos em ensaios com aterros com forma trapezoidal.

5.7 - MECANISMOS DE RUPTURA DOS MACIÇOS COM E SEM REFORÇO

Os aterros submetidos à simulação de explosão por meio da expansão de cavidade apresentaram mecanismos de ruptura muito diferentes, quando comparados os sistemas com e sem reforço.

A seguir, descreve-se os mecanismos de ruptura ocorridos em aterros de superfície horizontal e seção trapezoidal.

5.7.1 - ATERRO DE SUPERFÍCIE HORIZONTAL

O mecanismo de ruptura apresentado por um aterro não reforçado inicia-se com tendência de superfícies de ruptura verticalizadas, como se a expansão da cavidade provocasse um punctionamento do solo, de baixo para cima. Este padrão de comportamento foi observado até deformações volumétricas da cavidade da ordem de 5 %. Com o prosseguimento da expansão da cavidade, outros mecanismos de ruptura aparecem, com inclinação de planos de ruptura variáveis, como mostrado na Figura 5.39 (planos S1, S2, S3 e S4), ao final do ensaio sem reforço (ensaio E/SEM REFORÇO/AH/7R).

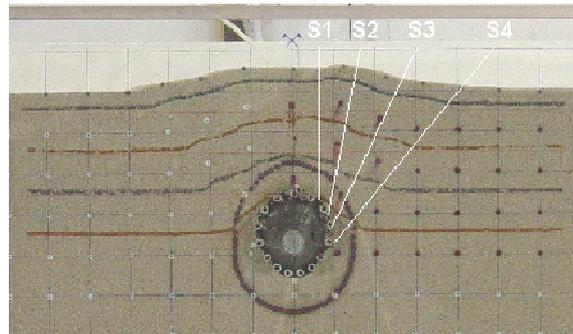


Figura 5.39. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/SEM REFORÇO/AH/7R).

A Figura 5.40 mostra o desenvolvimento de superfícies de ruptura no ensaio com reforço em geogrelha F, arranjo em U invertido com comprimento de pernas igual a 4R, código E/U4R/GGR-FF/AH/7R. O comportamento da evolução das superfícies de ruptura segue o padrão semelhante ao de um sistema não reforçado, com a observação de passagem de grãos de areia através das aberturas da geogrelha na direção radial.

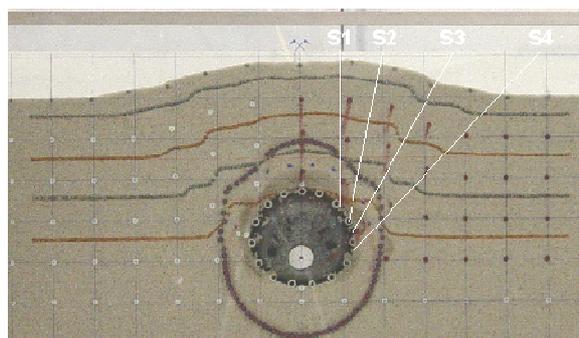


Figura 5.40. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/U4R/GGR-FF/AH/7R).

A Figura 5.41 apresenta o comportamento do aterro com superfície horizontal com reforçado com geotêxtil P, arranjo em U invertido, com pernas com comprimento igual a 6R (código: E/U6R/GTX-PP/AH/7R). Neste ensaio observou-se também a seqüência de estágios de mobilização de mecanismos de ruptura. Primeiramente, até a pressão de 41,8 kPa observou-se o surgimento da superfície de ruptura S0 (Figura 5.41), de certa forma associada com o embarrigamento da parte superior do U. Outros mecanismos de ruptura começam a aparecer, à medida que aumenta o volume da cavidade. A ocorrência de deslizamento da perna esquerda do U provoca uma movimentação mais acentuada da massa de solo na região à esquerda da cavidade (superfície S4), bem como um deslocamento desta também para a esquerda.

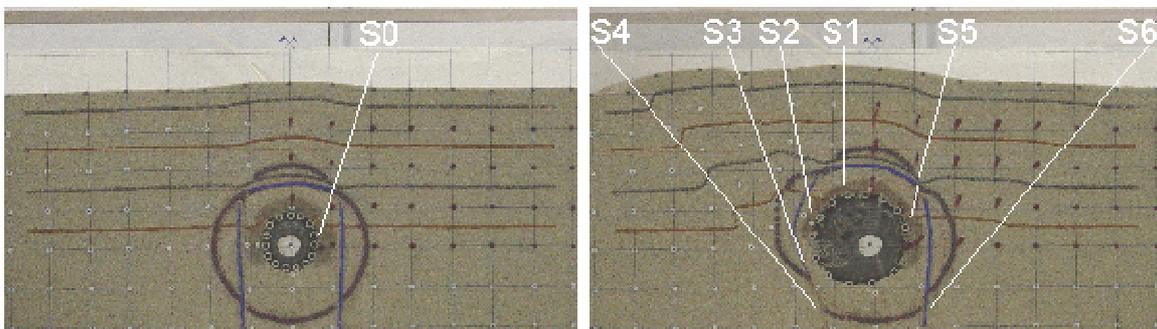


Figura 5.41. Desenvolvimento das superfícies de ruptura no ensaio E/U6R/GTX-PP/AH/7R.

A Figura 5.42 apresenta os mecanismos de ruptura observados no ensaio com o aterro reforçado com geotêxtil P, arranjo envolpado (código: E/E4R/GTX-PP/AH/7R) onde se observou a ocorrência da superfície de ruptura inicial S1 e posteriormente a superfície de ruptura S2, partindo do canto do reforço. Neste ensaio foi possível observar que outros mecanismos de ruptura foram inibidos por este tipo de arranjo, face ao confinamento provocado pelo envelopamento da cavidade pelo reforço.

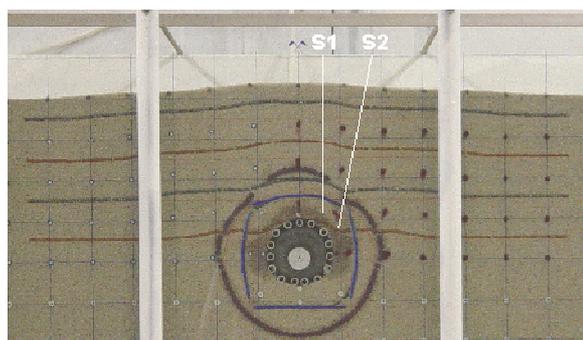


Figura 5.42. Desenvolvimento das superfícies ruptura no ensaio E/E4R/GTX-PP/AH/7R.

5.7.2 - ATERRO DE SEÇÃO TRAPEZOIDAL

Os mecanismos de ruptura observados nos aterros foram muito diferentes, quando comparados sistemas com e sem reforço de seção trapezoidal. O mecanismo de ruptura apresentado por um aterro não reforçado se inicia com tendência de superfície de ruptura vertical (S0) até uma deformação de 10 % que, após interrompe-se pela forma do aterro e falta de confinamento na sua coroa; essa interrupção delimita à formação de uma cunha (C) (Figura 5.43). O aumento de volume da cavidade gerou outras superfícies de ruptura com formato curvo (S1, S2 e S3) que apareceram subsequentemente. Observou-se a tendência à deformação do aterro de baixo para cima, o que gerou o levantamento vertical e expansão lateral e expansão da parte superior do aterro (equivalente ao levantamento da superfície em aterro com superfície horizontal), a linha branca corresponde à seção inicial do aterro, o que permite visualizar o grau de deformação do aterro (ensaio E/SEM REFORÇO/AT/7R).

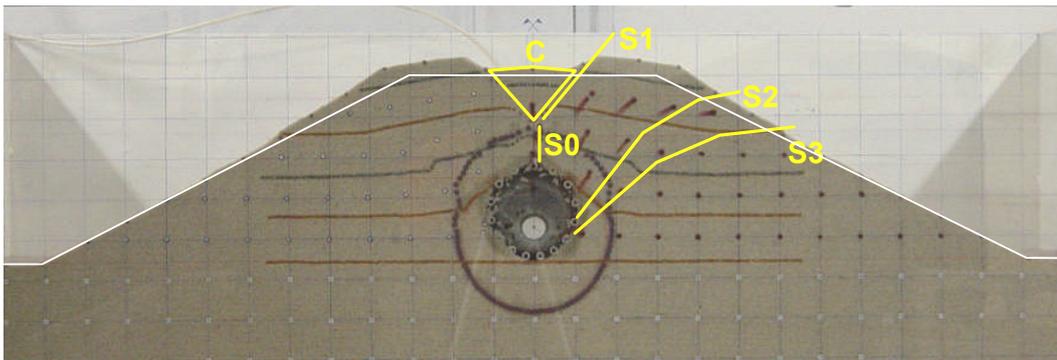


Figura 5.43. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/SEM REFORÇO/AT/7R).

A Figura 5.44 mostra o desenvolvimento de superfícies de ruptura no ensaio com reforço de geotêxtil P, arranjo em camada, código E/CAT/GTX-PP/AT/7R. O comportamento da evolução das superfícies de ruptura segue o padrão semelhante ao de um sistema não reforçado, com a observação de que o aumento de volume da cavidade notoriamente dividiu o aterro em dois blocos. O aumento de volume da cavidade puxou o reforço, o que causou a rotação dos blocos divididos na direção das setas; já na parte horizontal do reforço, o solo acima acompanhou a movimentação e o solo abaixo movimentou-se na direção oposta, tal como sinalizado pelas setas na Figura 5.44.

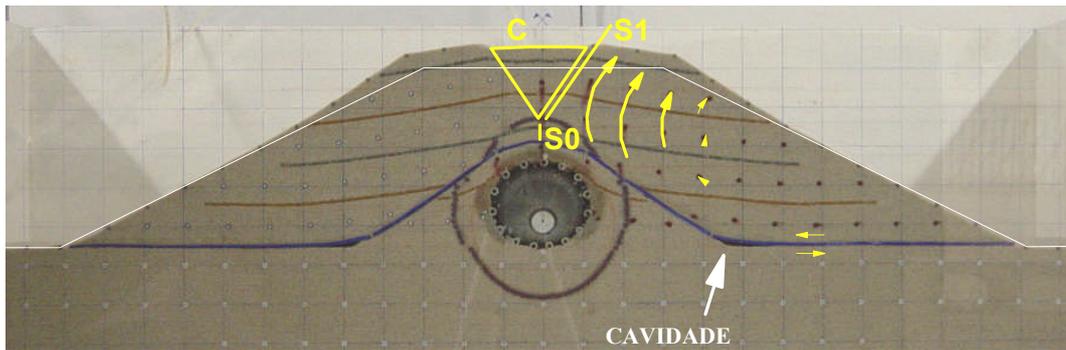


Figura 5.44. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/CAT/GTX-PP/AT/7R).

A Figura 5.45 mostra o desenvolvimento de superfícies de ruptura no ensaio com reforço de geogrelha F, arranjo em camada, código E/CAT/GGR-FF/AT/7R. O comportamento da evolução das superfícies de ruptura segue o padrão semelhante ao de um sistema não reforçado, o aumento de volume da cavidade dividiu o aterro em duas partes. O aumento de volume da cavidade puxou a geogrelha, gerando a rotação do solo acima tal como mostram as setas na figura.

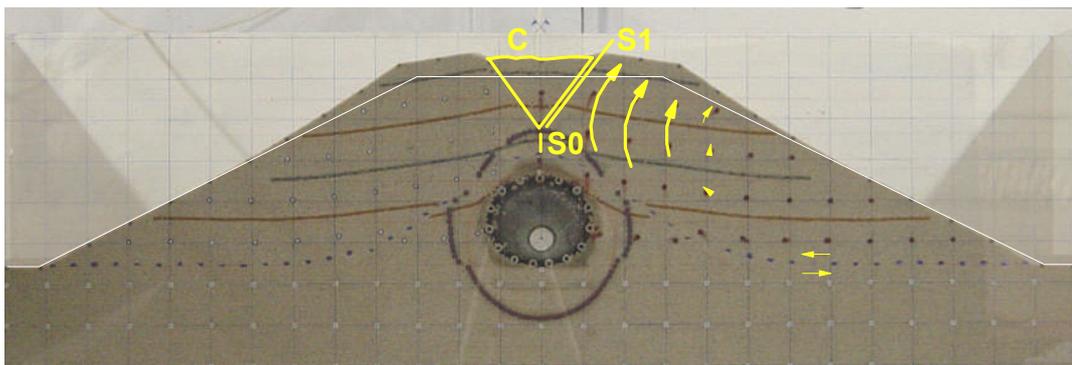


Figura 5.45. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/CAT/GGR-FF/AT/7R).

A Figura 5.46 apresenta o comportamento do aterro trapezoidal reforçado com geotêxtil P, arranjo em U invertido, com pernas com comprimento igual a 6R (código: E/U6R/GTX-PP/AT/7R). Inicialmente, observou-se o surgimento da superfície de ruptura S0, interrompida pela formação de uma cunha. Com o aumento de volume da cavidade outras superfícies de ruptura aparecem. O deslizamento da perna esquerda do U provocou uma movimentação mais acentuada da massa de solo na região à esquerda da cavidade (superfície S4 e S5), fato este que alterou os limites da cunha. O talude todo apresenta deslocamento radial geral (assinalada com a seta na figura), percebendo-se acentuada deformação do aterro ao final do ensaio.

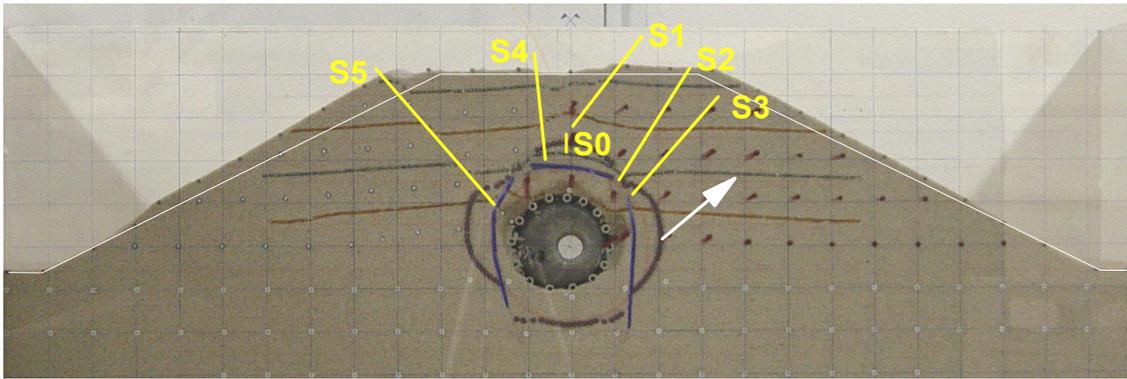


Figura 5.46. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/U6R/GTX-PP/AT/7R).

A Figura 5.47 mostra o desenvolvimento de superfícies de ruptura no ensaio com reforço em geogrelha F, arranjo em U invertido com comprimento de pernas igual a $6R$, código E/U6R/GGR-FF/AT/7R. O comportamento da evolução das superfícies de ruptura segue o padrão semelhante ao de um sistema não reforçado, com a observação de passagem de grãos de areia através das aberturas da geogrelha na direção radial. Observa-se a ocorrência da cunha e deslocamento radial do solo (assinalada com seta na figura).

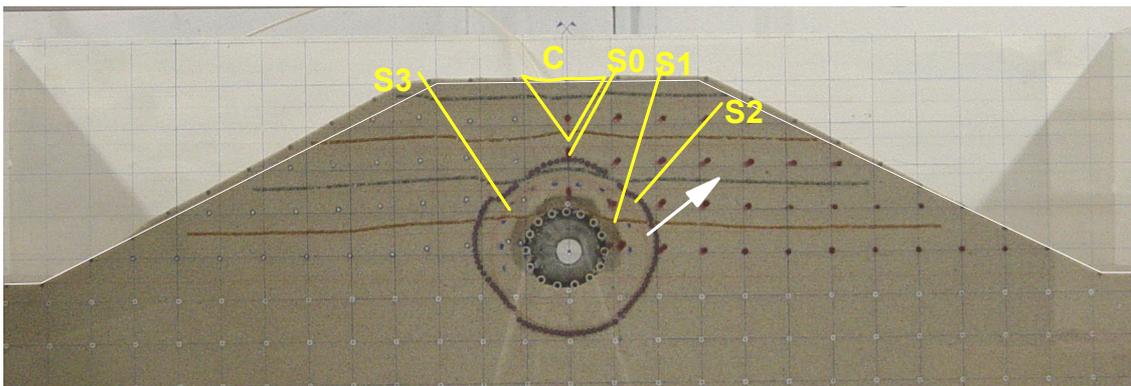


Figura 5.47. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/U6R/GGR-FF/AT/7R).

A Figura 5.48 apresenta os mecanismos de ruptura observados no ensaio com o aterro reforçado com geotêxtil P, arranjo envelopado (código: E/E4R/GTX-PP/AH/7R) onde se observou a ocorrência da superfície de ruptura inicial S0 e a formação da cunha (C) e, posteriormente, as superfícies de ruptura S1 e S2, partindo do canto do arranjo do reforço. Neste ensaio foi possível observar que outros mecanismos de ruptura foram inibidos por este tipo de arranjo, face ao confinamento provocado pelo envelopamento da cavidade pelo reforço. O aumento de volume da cavidade deslocou os taludes de forma radial (assinalada com seta na figura), mas a mobilização da resistência à tração do reforço diminuiu o deslocamento e a deformação do aterro.

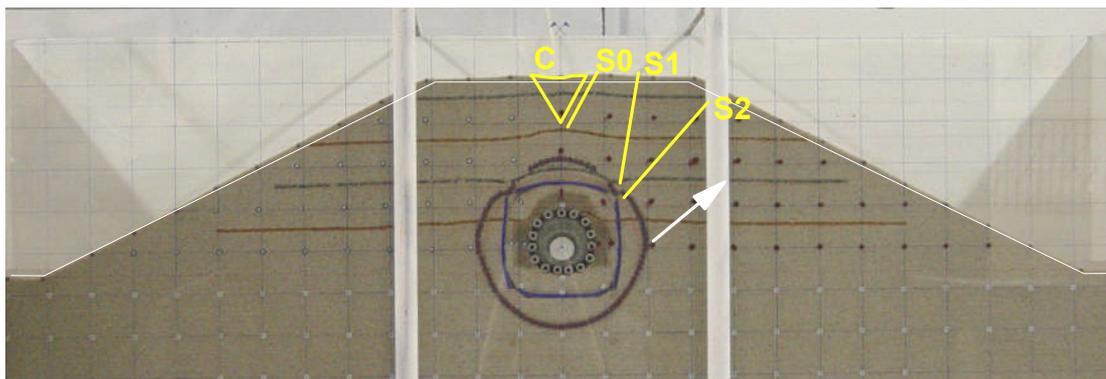


Figura 5.48. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/E4R/GTX-PP/AT/7R).

A Figura 5.49 apresenta os mecanismos de ruptura observados no ensaio com o aterro reforçado com geogrelha F arranjo envolpado (código: E/E4R/GGR-FF/AT/7R), onde se observou a ocorrência da superfície de ruptura inicial S0 e a formação de cunha (C). O deslocamento radial do solo e a deformação do aterro foram mais notórios em relação ao sistema envolpado de geotêxtil tecido. Neste ensaio foi possível observar que outros mecanismos de ruptura foram inibidos por este tipo de arranjo, face ao confinamento provocado pelo envelopamento da cavidade pelo reforço, apesar da passagem de solo através das aberturas (assinalada com seta na figura).

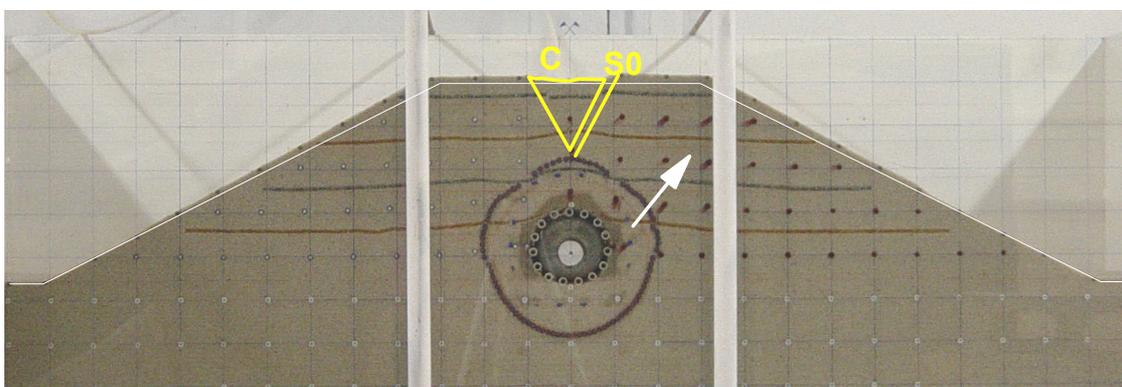


Figura 5.49. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/E4R/GGR-FF/AT/7R).

A Figura 5.50 apresenta o mecanismo de ruptura apresentado por um aterro não reforçado com cavidade mais rasa, na profundidade $Z = 4R$. O mecanismo se inicia com tendência de superfície de ruptura vertical (S0), seguida de desenvolvimento de cunha de ruptura na região da coroa do aterro (Figura 5.50). O aumento de volume da cavidade gerou outra superfície de ruptura (S1). Observou-se a tendência à deformação do aterro de baixo para cima, o que gerou expansão lateral e da parte superior do aterro (equivalente ao levantamento da superfície em aterro de superfície horizontal).

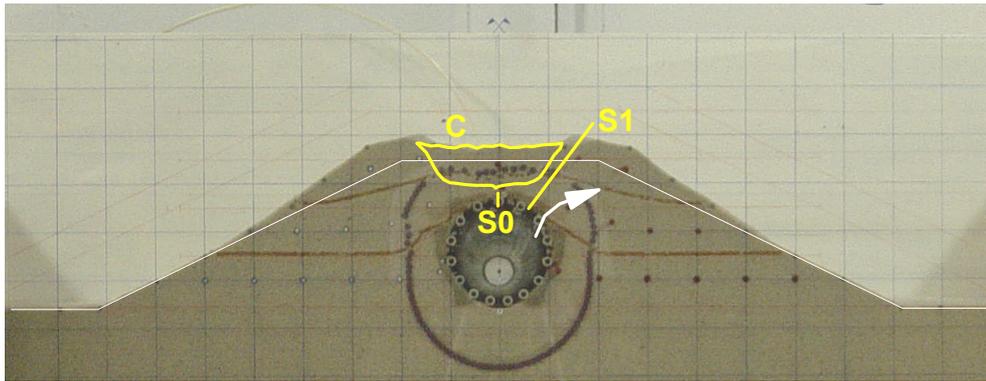


Figura 5.50. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/SEM REFORÇO/AT/4R).

A Figura 5.51 apresenta o mecanismo de ruptura apresentado por um aterro não reforçado com cavidade na profundidade $Z = 2R$ (ensaio E/SEM REFORÇO/AT/2R). O mecanismo de ruptura é semelhante ao descrito anteriormente, mas por ser ainda mais rasa a expansão da cavidade provocou danos maiores na superfície do aterro para grandes variações volumétricas, como era de se esperar.

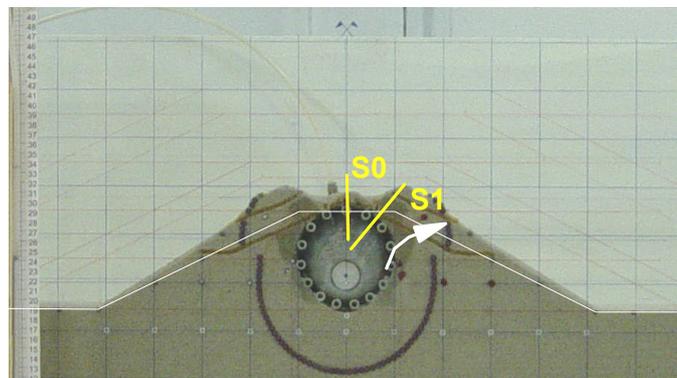


Figura 5.51. Evolução das superfícies de ruptura (ensaio E/SEM REFORÇO/AT/2R)

5.8 - MECANISMOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE OBSERVADOS

Nas simulações de explosões por meio de expansão de cavidades foram observadas diferenças no modo da deformação da cavidade dentro do aterro. As formas assumidas pela cavidade dependeram dos tipos de arranjo dos reforços e dos tipos de reforços.

A Figura 5.52 mostra a comparação entre mecanismo de expansão de alguns ensaios realizados com e sem reforço (códigos E/SEM REFORÇO/AH/7R, E/C15/GTX-GG/AH/7R e E/U4R/GTX-GG/AH/7R). Esta figura mostra a influência do arranjo de instalação do reforço e da pressão interna na forma de deformação da cavidade.

Para o aterro sem reforço E/SEM REFORÇO/AH/7R (Figura 5.52 (a)) a deformação da cavidade apresenta maior expansão na sua parte superior (ver deslocamentos relativos entre os cilindros que conforma a cavidade). O mesmo tipo de mecanismo de deformação foi observado com o reforço em camada horizontal de geotêxtil G (código: E/C15/GTX-GG/AH/7R) (Figura 5.52 (b)).

Já para a configuração com o reforço em U invertido e geotêxtil G (código: E/U4R/GTX-GG/AH/7R), a expansão da tubulação se dá de forma mais próxima à circular, como mostrado na Figura 5.52 (c).

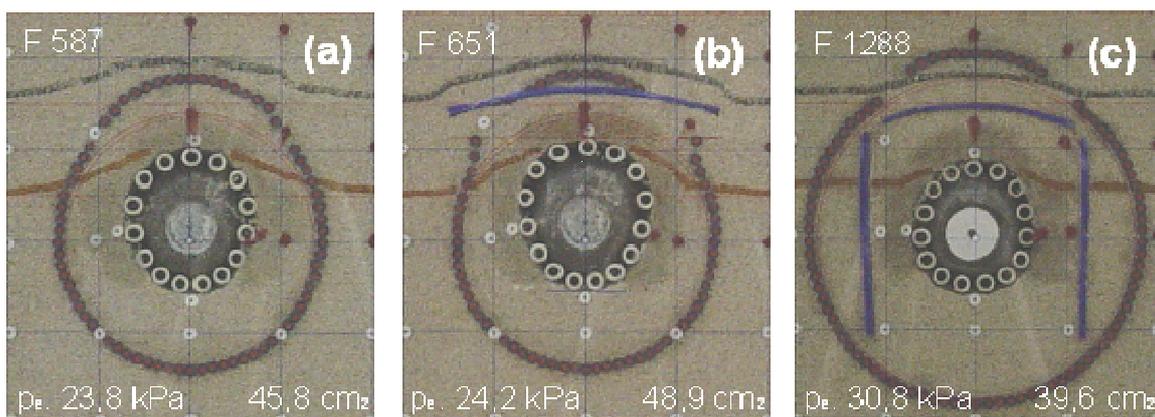


Figura 5.52. Mecanismos de expansão da cavidade: a) ensaio E/SEM REFORÇO/AH/7R; b) ensaio E/C15/GTX-GG/AH/7R e c) ensaio E/U4R/GTX-GG/AH/7R.

As Figuras 5.53 (a) e (b) apresentam os mecanismos de expansão da cavidade para os casos de aterros reforçados com o geotêxtil tecido P em arranjos em U-invertido (comprimento de pernas igual a 6R) e envelopado. No caso da configuração em U invertido (código: E/U6R/GTX-PP/AH/7R) e na configuração envelopada (código: E/E4R/GTX-PP/AH/7R) observam-se a cavidade com forma mais próxima à circular, particularmente no arranjo envelopado.

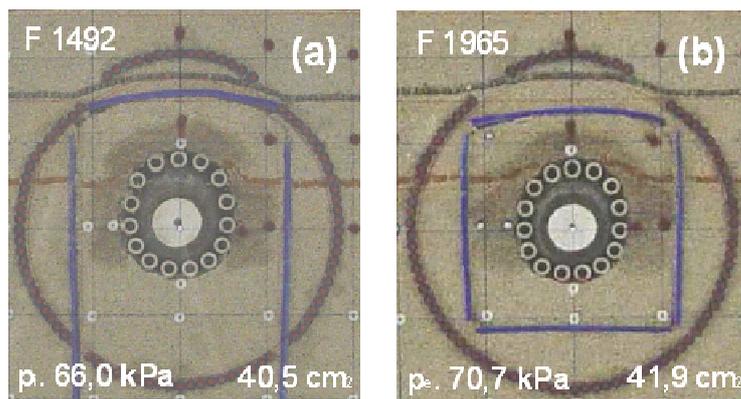


Figura 5.53. Mecanismos de expansão da tubulação: a) ensaio E/U6R/GTX-PP/AH/7R e b) ensaio E/E4R/GTX-PP/AH/7R.

5.9 - MECANISMO DE RUPTURA DO REFORÇO DURANTE OS ENSAIOS

Nas simulações de explosões por meio da expansão de cavidade foi utilizado papel alumínio para identificar os mecanismos de ruptura do reforço. Como observado em itens anteriores, em vários ensaios com esse tipo de reforço o mesmo rompeu por tração.

A Figura 5.54 mostra a forma da cavidade, após a ruptura do reforço no ensaio com arranjo envelopado (código: (E/E4R/PAL-AA/AH/7R, DSC01571). A ruptura provoca o aparecimento de um mecanismo de deformação da cavidade não uniforme, acentuando-se a sua deformação na direção vertical.

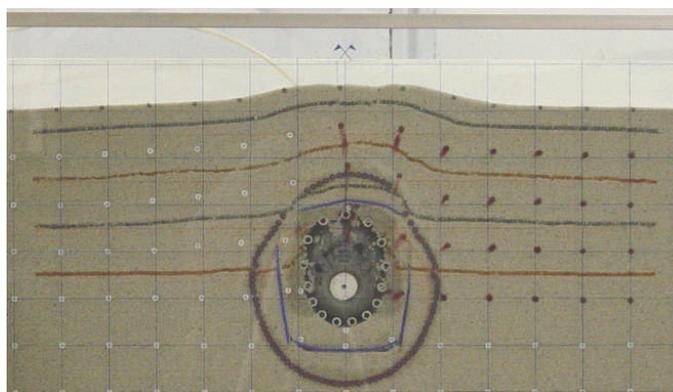


Figura 5.54. Alongamento vertical da expansão da cavidade devido à ruptura do reforço na parte superior (ensaio E/E4R/PAL-AA/AH/7R, DSC01571).

Em todos os casos de aterros reforçados com papel alumínio observou-se a tendência do reforço em romper na linha de simetria do arranjo, acima da cavidade. As Figuras 5.55 (a) e (b) mostram o modo de ruptura típico do reforço nestes ensaios. A Figura 5.55 (c) mostra uma alternativa para melhorar o desempenho do arranjo, com aumento de reforço na região superior.

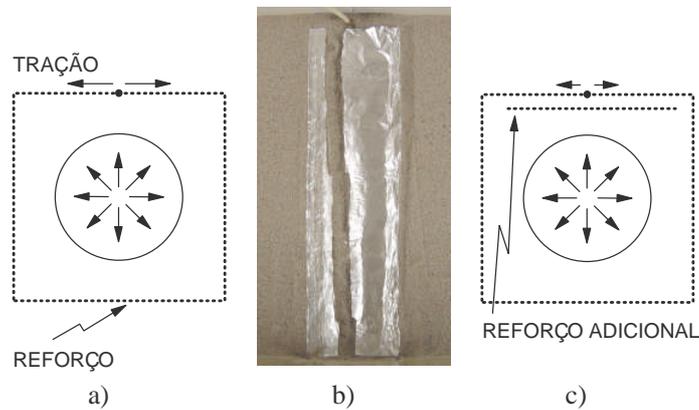


Figura 5.55. Mecanismo de ruptura do reforço em arranjos envelopados.

Na Figura 5.56 são apresentados diversos detalhes de ruptura do reforço após ensaios com reforço em papel alumínio. Pode-se observar que, em praticamente todos os casos a ruptura ocorreu na região central do arranjo. Mostra-se para arranjo envelopado-4R, aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$ (Figura 5.56 (a)); arranjo envelopado-4R, aterro com superfície horizontal e $Z = 4R$ (Figura 5.56 (b)); arranjo envelopado-4R, aterro com superfície horizontal e $Z = 2R$ (Figura 5.56 (c)); arranjo em camada, aterro trapezoidal e $Z = 7R$ (Figura 5.56 (d)); arranjo em U-Invertido 6R, aterro trapezoidal e $Z = 7R$ (Figura 5.56 (e)); arranjo envelopado-4R, aterro trapezoidal e $Z = 7R$ (Figura 5.56 (f)).

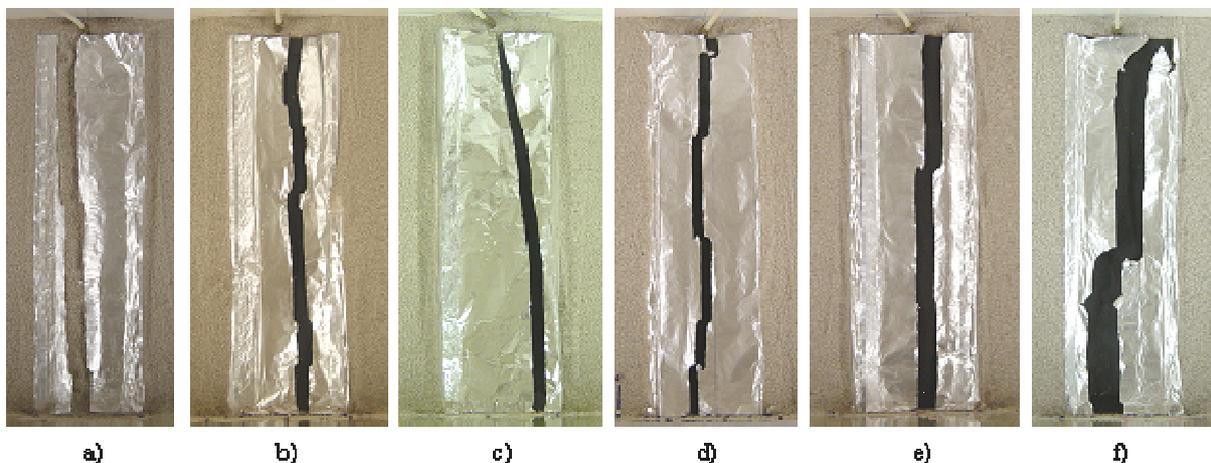
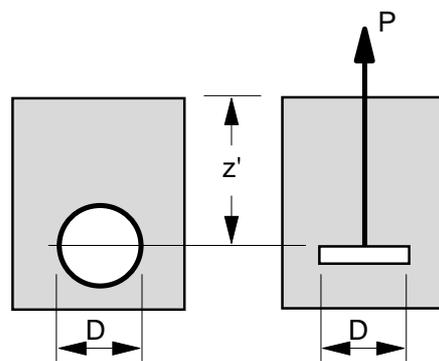


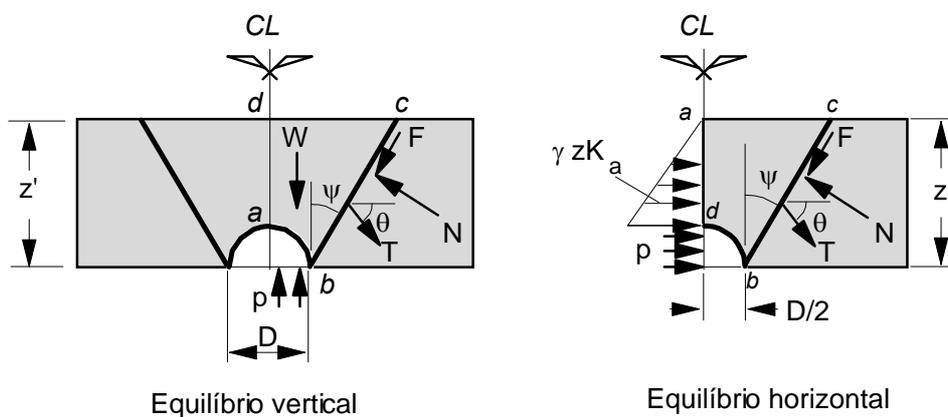
Figura 5.56. Detalhes de ruptura do reforço (papel alumínio).

5.10 - COMPARAÇÕES ENTRE PREVISÕES E OBSERVAÇÕES DE PRESSÕES DE CAVIDADE NA RUPTURA.

A literatura apresenta algumas soluções para determinação de pressões limites em situações de expansão de cavidades, com particular referência à interpretação de ensaios de pressiômetro e desenvolvimento de crateras decorrentes de explosões (Vesić, 1965 e 1972, por exemplo). Soluções teóricas são também disponíveis para a estimativa da resistência ao arrancamento de placas e cilindros, algumas delas baseadas em expansão de cavidades (Vesić, 1971 e Tagaya *et al.*, 1987). Assim, análises preliminares da resistência do solo à expansão podem ser feitas associando-se o mecanismo de ruptura provocado pela expansão da cavidade ao de uma placa, ou cilindro, sendo arrancada do terreno, como esquematizado na Figura 5.57 (a). Vesić (1971) apresentou um método para a estimativa da resistência ao arrancamento de placas horizontais enterradas.



(a) Levantamento de placas enterradas



(b) Levantamento de cilindro enterrado

Figura 5.57. Abordagens para estimativas de pressões máximas em cavidades.

Rowe e Davis (1982) apresentaram uma abordagem mais sofisticada para a determinação da carga de colapso de placas de ancoragem em areias, baseada nos parâmetros de resistência da areia e na profundidade da placa. Estes autores fornecem gráficos ou tabelas que permitem a determinação das cargas de colapso.

A resistência ao arrancamento de cilindros horizontais enterrados foi mais recentemente investigada por Bolton e Barefoot (1997) e White *et al.* (2001) para o estudo do levantamento de oleodutos enterrados no fundo do mar. A abordagem apresentada por estes autores foi estendida ao caso de expansão de cavidades por Palmeira (2005), descrita na revisão bibliográfica desta tese, e mostrada na Figura 5.57 (b). Nessa abordagem assume-se que a ruptura do solo ocorre ao longo de superfícies inclinadas com a vertical de um ângulo igual ao ângulo de dilatância do solo (ψ). Para solos não coesivos, a pressão máxima na cavidade (p) pode ser estimada (ver Capítulo 2). O valor de T a ser utilizado na Equação 2.6 deve ser o mínimo entre a resistência à tração do reforço e a sua resistência por ancoragem.

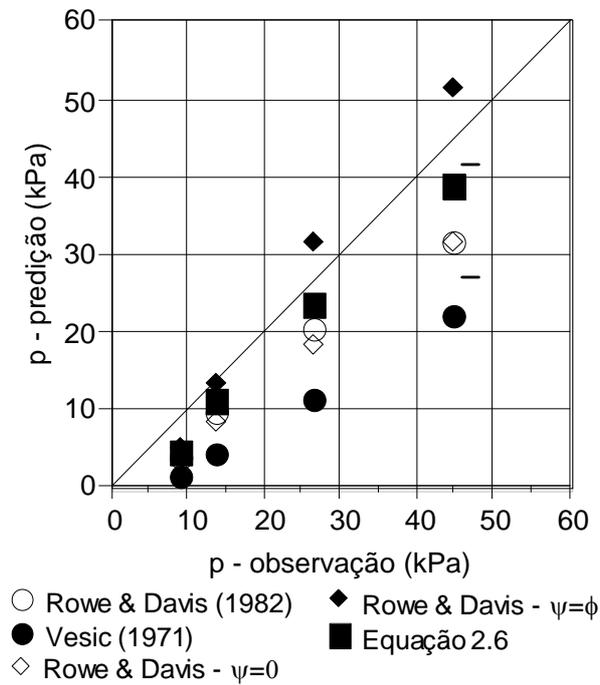
Na Figura 5.58 (a) são apresentadas as comparações entre pressões máximas na cavidade obtidas em ensaios e previstas por Rowe e Davis (1982), Vesić (1971) e pela Equação 2.6 para o caso de aterros não reforçados.

O método de Vesić subestimou significativamente a pressão de cavidade, enquanto uma melhor previsão foi obtida pelo método de Rowe e Davis, particularmente para a condição $\psi = \phi$. As previsões pela Equação 2.6 subestimam ligeiramente as pressões na cavidade na ruptura.

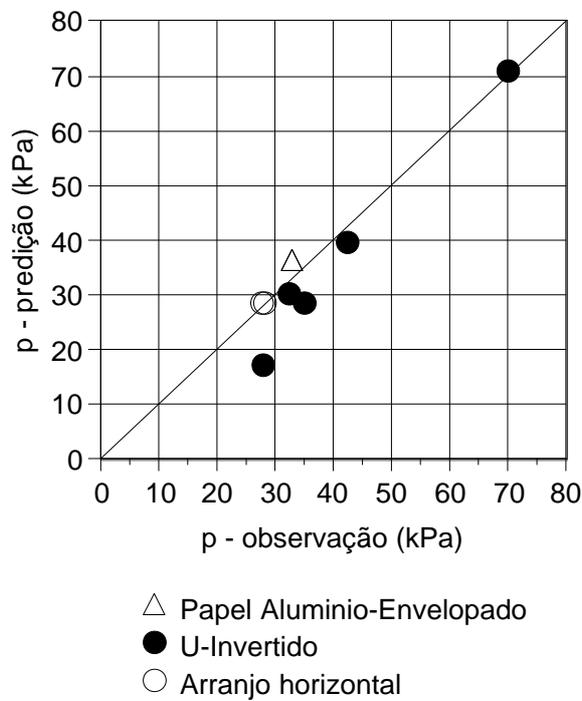
Todos os métodos subestimaram a pressão máxima para cavidades mais rasas. Isto deve ter sido causado pelas limitações dos métodos e incertezas relacionados aos valores de ϕ e ψ sob baixos níveis de tensões.

A Figura 5.58 (b) mostra as comparações entre previsões de pressões na cavidade na ruptura pela Equação 2.8 e aquelas observadas em ensaios reforçados (arranjos horizontal e U invertido). Os resultados apresentam boa concordância entre valores previstos e observados na maioria dos casos. A Figura 5.58 (b) também apresenta a comparação entre as previsões pela Equação 2.8, desenvolvida para arranjo de reforço envelopado (Palmeira, 2005) (ver

Capítulo 2), e o resultado do ensaio com arranjo envelopado onde o reforço em papel alumínio rompeu. Uma boa concordância é também observada nesse caso.



(a) Ensaios não reforçados.



(b) Ensaios reforçados.

Figura 5.58. Comparações entre previsões e observações de pressões na cavidade na ruptura.

Apesar de ainda o limitado número de dados, as comparações discutidas acima sugerem que, na ausência de métodos mais sofisticados, as soluções empregadas podem ser ferramentas úteis para estimativas preliminares de pressões máximas resistidas pelo solo devido à expansão de cavidades em maciços com e sem reforço, bem como podem ajudar em dimensionamentos na fase de anteprojetos para situações de explosões de tubulações reais.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES EM ESCALA REDUZIDA

6.1 - INTRODUÇÃO - MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO E RUPTURA DOS ATERROS DEVIDOS AO VAZAMENTO NA TUBULAÇÃO

Neste capítulo, os resultados dos ensaios da simulação de vazamentos em tubulações em escala reduzida são apresentados pela quantificação dos efeitos do estouro da tubulação sob pressão no solo do aterro circundante. Após a ruptura da tubulação ao longo do seu trecho enfraquecido, o aterro sofre efeitos diversos causados pela liberação repentina de ar comprimido. Esses efeitos são caracterizados a seguir: formação de domo de nuvem de areia, solo lançado e expansão do solo circundante. Em seguida à ruptura da tubulação, observa-se a formação de uma bolha de gás (Figura 6.1) que se propaga até a superfície do aterro, provocando o lançamento do solo e formação da cratera (Figura 6.2). A relevância da quantificação da massa de solo deslocada e da deformação do aterro devido ao vazamento de ar está relacionada a possíveis danos a estruturas ou tubulações vizinhas ou a pessoas.

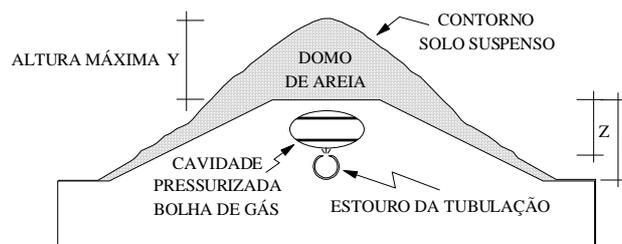


Figura 6.1. Mecanismo de solicitação do aterro em consequência do vazamento de ar.

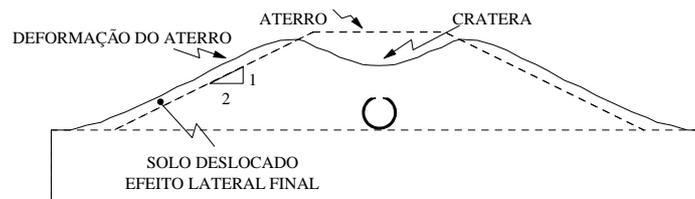


Figura 6.2. Aspecto típico dos efeitos causados pelo vazamento na tubulação.

A deformação final do aterro é gerada por efeitos muito complexos, tendo sido observado que a maior parcela dessa deformação ocorre por duas causas. Uma causa para a ocorrência dessa deformação foi aquela produzida pelo impacto do estouro da tubulação que desloca horizontalmente a massa do aterro em direção aos pés do talude simetricamente. A outra causa foi a queda de areia acumulada no talude. Em menor proporção, observou-se também o deslocamento do solo que se dirige da coroa do aterro ao pé do talude (Figura 6.3). Em todos os casos, em geral esses efeitos aconteceram simetricamente em relação à seção transversal dos aterros, com e sem a presença de reforço.

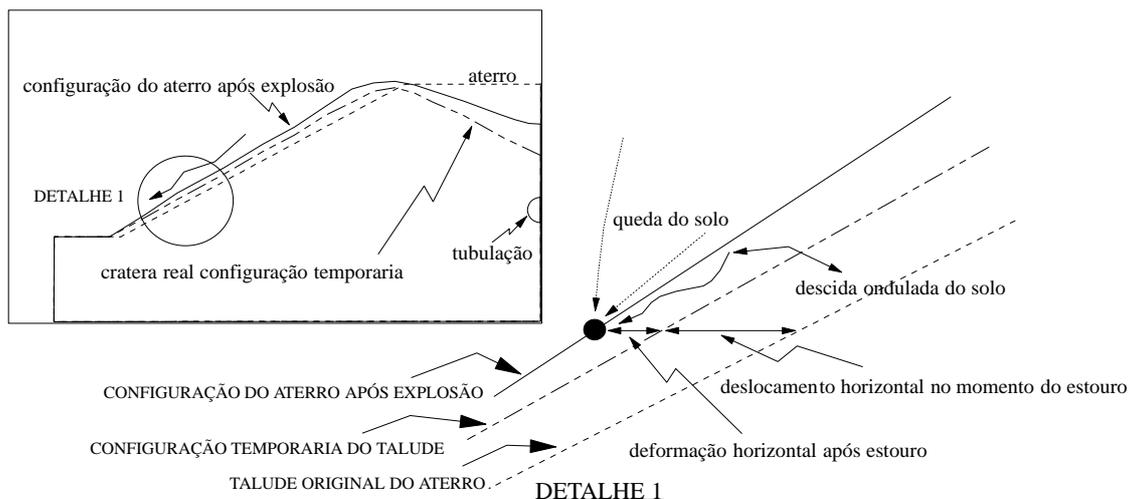
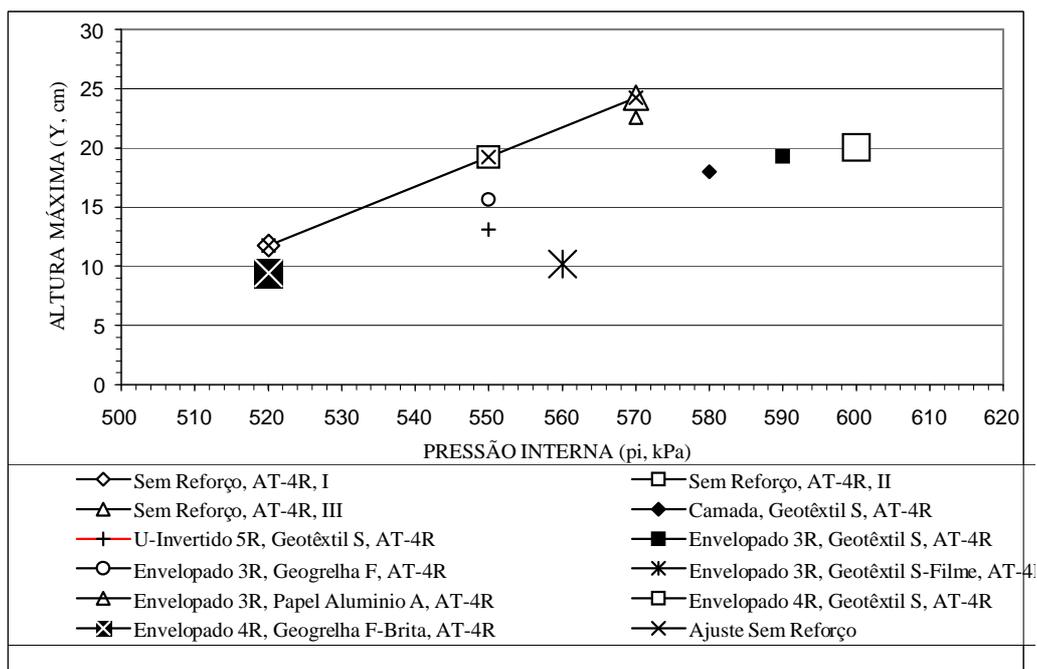


Figura 6.3. Configuração do talude em diferentes instantes da explosão.

6.2 - ALTURA DO SOLO LANÇADO EM ENSAIOS DE VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES PRESSURIZADAS

Os resultados das simulações são expressos em termos da altura atingida (Y) pelo solo lançado após o estouro da tubulação, no intervalo de 9 a 11 ms. Os resultados das simulações de vazamentos em tubulações, em geral, mostraram que o aterro reforçado foi menos afetado que o não reforçado. A Figura 6.4 mostra o comportamento, em termos de altura máxima atingida pelo solo em condições sem e com reforço para os diferentes tipos de geossintéticos e arranjos geométricos ensaiados em aterros trapezoidais. Pode-se observar que, dependendo do tipo de arranjo, a altura de solo lançado pode ser significativamente menor em ensaios com reforço.



Notas: I, II e III identificam o número de ensaios sem reforço.

Figura 6.4. Relação entre a altura máxima (Y) atingida pelo solo lançado e pressão interna.

Os sistemas de aterros sem reforço apresentaram um comportamento proporcional da altura (Y') atingida pelo solo em relação à pressão interna de estouro (p_i). O ajuste linear resulta em uma reta onde o valor do R^2 foi 1 (Equação 6.1), para aterro trapezoidal com taludes 2H:1V.

$$Y' = 0,2494 p_i - 117,91 \quad (6.1)$$

Os resultados das simulações para condições reforçadas mostram que em nenhum caso as alturas atingidas pelo solo lançado foram maiores em relação às condições sem reforço, o que indica que a presença do reforço tem um efeito de amortecimento da expansão do ar comprimido reduzindo a altura atingida pelo solo lançado.

A percentagem de redução de altura de solo lançado dependeu do tipo de reforço e do tipo de arranjo utilizado. A Tabela 6.1 mostra os resultados das simulações para aterro trapezoidal com taludes 2H:1V com $Z = 4R$. Para efeito de comparação, as estimativas das alturas atingidas (Y') pelo solo lançado nos casos com reforço foram feitas usando-se a Equação 6.1, em função das pressões internas obtidas nos ensaios de cada caso avaliado. Os resultados nesta tabela mostram que os arranjos envelopados foram os mais eficientes, observando-se reduções de até 36,9% na altura alcançada pela areia (Tabela 2).

Tabela 6.1. Resultados da altura (Y) atingida pelo solo lançado para t = 9 a 11 ms (Z = 4R).

Arranjo de Simulação	p _i (kPa).	Y, cm
Sem Reforço, I, AT-4R. (D/SEM REFORÇO/AT/4R (I))	520	11,77
Sem Reforço, II, AT-4R. (D/SEM REFORÇO/AT/4R (II))	550	19,24
Sem Reforço, III, AT-4R. (D/SEM REFORÇO/AT/4R (III))	570	24,24
U-Invertido5R, Geogrelha F, AT-4R. (D/U5R/GGR-FF/AT/4R)	580	-
Camada, Geotêxtil S, AT-4R. (D/CAT/GTX-SS/AT/4R)	580	18,01
U-Invertido5R, Geotêxtil S, AT-4R. (D/U5R/GTX-SS/AT/4R)	550	13,08
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-4R. (D/E3R/GTX-SS/AT/4R)	590	19,30
Envelopado3R, Geogrelha F, AT-4R. (D/E3R/GGR-FF/AT/4R)	550	15,59
Envelopado3R, Geotêxtil S-Filme, AT-4R. (D/E3R/GTX-SV/AT/4R)	560	10,20
Envelopado3R, Papel Alumínio, AT-4R. (D/E3R/PAL-AA/AT/4R)	570	22,55
Envelopado4R, Geotêxtil S, AT-4R. (D/E4R/GTX-SS/AT/4R)	600	20,02
Envelopado4R, Geogrelha F-Brita, AT-4R. (D/E4R/GGR-FB/AT/4R)	520	9,45

Tabela 6.2. Comparações entre valores da altura atingida pelo solo lançado para t = 9 a 11 ms medidos (Y) e calculados (Y') (Z = 4R).

Arranjo de Simulação	Y', cm, Eq. 6.1	ΔY/Y', (%)
Sem Reforço, I, AT-4R. (D/SEM REFORÇO/AT/4R (I))	11,78	0,0
Sem Reforço, II, AT-4R. (D/SEM REFORÇO/AT/4R (II))	19,26	0,0
Sem Reforço, III, AT-4R. (D/SEM REFORÇO/AT/4R (III))	24,25	0,0
U-Invertido5R, Geogrelha F, AT-4R. (D/U5R/GGR-FF/AT/4R)	-	-
Camada, Geotêxtil S, AT-4R. (D/CAT/GTX-SS/AT/4R)	26,74	32,6
U-Invertido5R, Geotêxtil S, AT-4R. (D/U5R/GTX-SS/AT/4R)	19,26	32,1
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-4R. (D/E3R/GTX-SS/AT/4R)	29,24	34,0
Envelopado3R, Geogrelha F, AT-4R. (D/E3R/GGR-FF/AT/4R)	19,26	19,0
Envelopado3R, Geotêxtil S-Filme, AT-4R. (D/E3R/GTX-SV/AT/4R)	21,75	53,1
Envelopado3R, Papel Alumínio A, AT-4R. (D/E3R/PAL-AA/AT/4R)	24,25	7,0
Envelopado4R, Geotêxtil S, AT-4R. (D/E4R/GTX-SS/AT/4R)	31,73	36,9
Envelopado4R, Geogrelha F-Brita, AT-4R. (D/E4R/GGR-FB/AT/4R)	11,78	19,8

Notas: Y altura atingida medida no ensaio (cm); Y' altura atingida (equação 6.1, cm); ΔY diferença entre Y' e Y.

O arranjo envelopado 3R de geotêxtil tecido (ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R) reduziu a altura (Y) atingida pelo solo em 34,0 % em relação ao sistema sem reforço. Quando comparado com a geogrelha nas mesmas condições, esse arranjo se mostrou mais eficiente na redução do lançamento de solo. Como a movimentação ascendente de solo foi o resultado do fluxo de ar através dos seus vazios, considerou-se a possibilidade de minimizar este fluxo por meio de cegamento dos vazios do geotêxtil com a utilização de um filme de PVC. Assim, observou-se uma maior redução de solo lançado quando se utilizou o geotêxtil tecido associado a um filme de PVC (similar a um geocomposto) (ensaio D/E3R/GTX-SV/AT/4R). Nesse caso a redução na altura de lançamento da areia atingiu a 53,1 %.

Para o arranjo envelopado com geogrelha (ensaio D/E3R/GGR-FF/AT/4R) a redução da altura (Y) atingida foi de 19,0 %, que é menor em relação ao do mesmo arranjo com o geotêxtil tecido. Além disso, a simulação mostrou que entre as aberturas da geogrelha ocorreu passagem dos grãos de areia, o que limitou o seu desempenho e resultou em menor resistência ao lançamento de solo.

Com o intuito de eliminar o fluxo de areia através da geogrelha e dispersar melhor o fluxo de ar na massa de areia, foi simulado um arranjo envelopado de geogrelha com preenchimento de brita entre esta e a tubulação (ensaio D/E4R/GGR-FB/AT/4R). Este procedimento resultou em uma redução de 19,9 % na altura (Y) atingida pelo solo lançado, praticamente igual à obtida sem o emprego da brita.

Dentre os ensaios com reforço, a menor redução de altura (Y) do solo lançado ocorreu no sistema reforçado com o papel alumínio (7,00 % de redução) (ensaio D/E3R/PAL-AA/AT/4R), em consequência da ruptura por tração deste reforço durante o ensaio. Isto mostra a importância da resistência do reforço para minimizar os efeitos de um vazamento ou explosão de uma tubulação pressurizada enterrada.

A variação das dimensões do geotêxtil tecido no arranjo envelopado mostrou uma ligeira redução na redução da altura (Y) atingida pelo solo lançado. Para o arranjo envelopado em forma quadrada com lado igual a 4R a redução foi maior (36,9 %) (ensaio D/E4R/GTX-SS/AT/4R) do que para um arranjo com lado igual a 3R (34,0 %) (ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R).

Procurou-se investigar também a influência da profundidade de instalação da tubulação na altura atingida pela areia lançada (Tabela 6.3).

As simulações de vazamentos em aterros trapezoidais com taludes 2H:1V e $Z = 2$, em condições sem e com reforço, mostram também que, a presença do reforço reduz a altura atingida pelo solo lançado em 34,7% com relação ao caso de aterro sem reforço, como pode ser visto na Tabela 6.4. O valor de $\Delta Y/Y'$ neste caso foi próximo ao obtido no ensaio com a tubulação na profundidade 4R (Tabela 6.1).

Tabela 6.3. Resultados da altura (Y) atingida pelo solo lançado para $t = 9$ a 11 ms ($Z = 2R$).

Arranjo de Simulação	p_i (kPa)	Y
Sem Reforço, AT-2R. (D/SEM REFORÇO/AT/2R)	550	11,37
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-2R. (D/E4R/GTX-SS/AT/2R).	600	7,42

Tabela 6.4. Resultados de $\Delta Y/Y'$ (%) atingida pelo solo lançado para $t = 9$ a 11 ms ($Z = 2R$).

Arranjo de Simulação	p_i (kPa)	$\Delta Y/Y'$, %
Sem Reforço, AT-2R. (D/SEM REFORÇO/AT/2R)	550	0,0
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-2R. (D/E4R/GTX-SS/AT/2R).	600	34,7

A Figura 6.5 mostra os resultados normalizados das simulações de explosões para aterros trapezoidais, com $Z = 4R$, considerando um peso específico da areia, γ , igual a $18,4 \text{ kN/m}^3$ ($Z = 4R = 0,1625 \text{ m}$). A Figura 6.6 mostra os resultados normalizados das simulações em aterros com $Z = 2R$.

Os resultados para $Z = 4R$ mostram que os melhores desempenhos ocorreram para os arranjos envelopados e para o arranjo em camada. Este último apresentou desempenho melhor que o do arranjo em U invertido. Isto provavelmente se deveu ao maior comprimento de ancoragem do reforço no arranjo em camada. Por outro lado, em que pese o número limitado de ensaios no caso de $Z = 2R$, os resultados sugerem que a influência do reforço é maior para tubulações a menores profundidades.

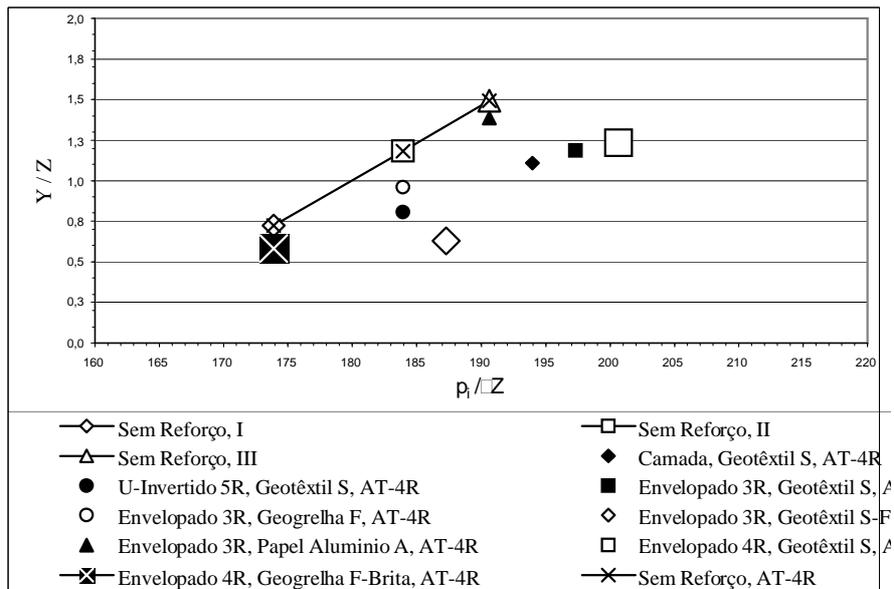


Figura 6.5. Resultados normalizados das simulações para aterros com $Z = 4R$.

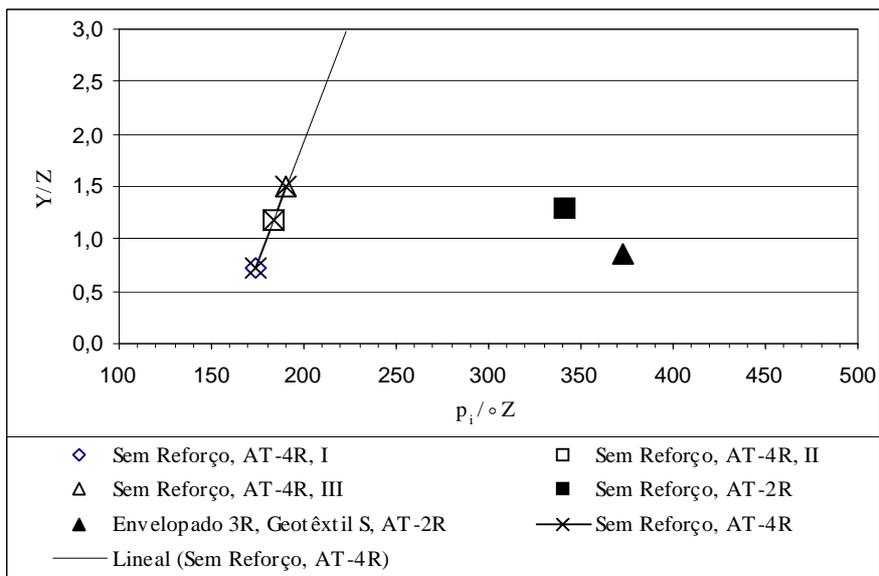


Figura 6.6. Resultados normalizados das simulações para aterros com $Z = 2R$.

6.3 - DOMOS DE NUVEM DE AREIA

A geração de uma nuvem de areia foi causada pela expansão do ar comprimido após o estouro da tubulação. A Figura 6.7 apresenta as formações de domos nuvens de areia nas simulações de explosões de tubulações em aterros com e sem reforço. A avaliação da formação de nuvem de areia foi feita na faixa de tempo de 9 a 11 ms após o início do

vazamento. O volume total do domo da nuvem de areia inclui a parcela decorrente da bolha de gás que se propaga pela massa de aterro, bem como o solo suspenso.

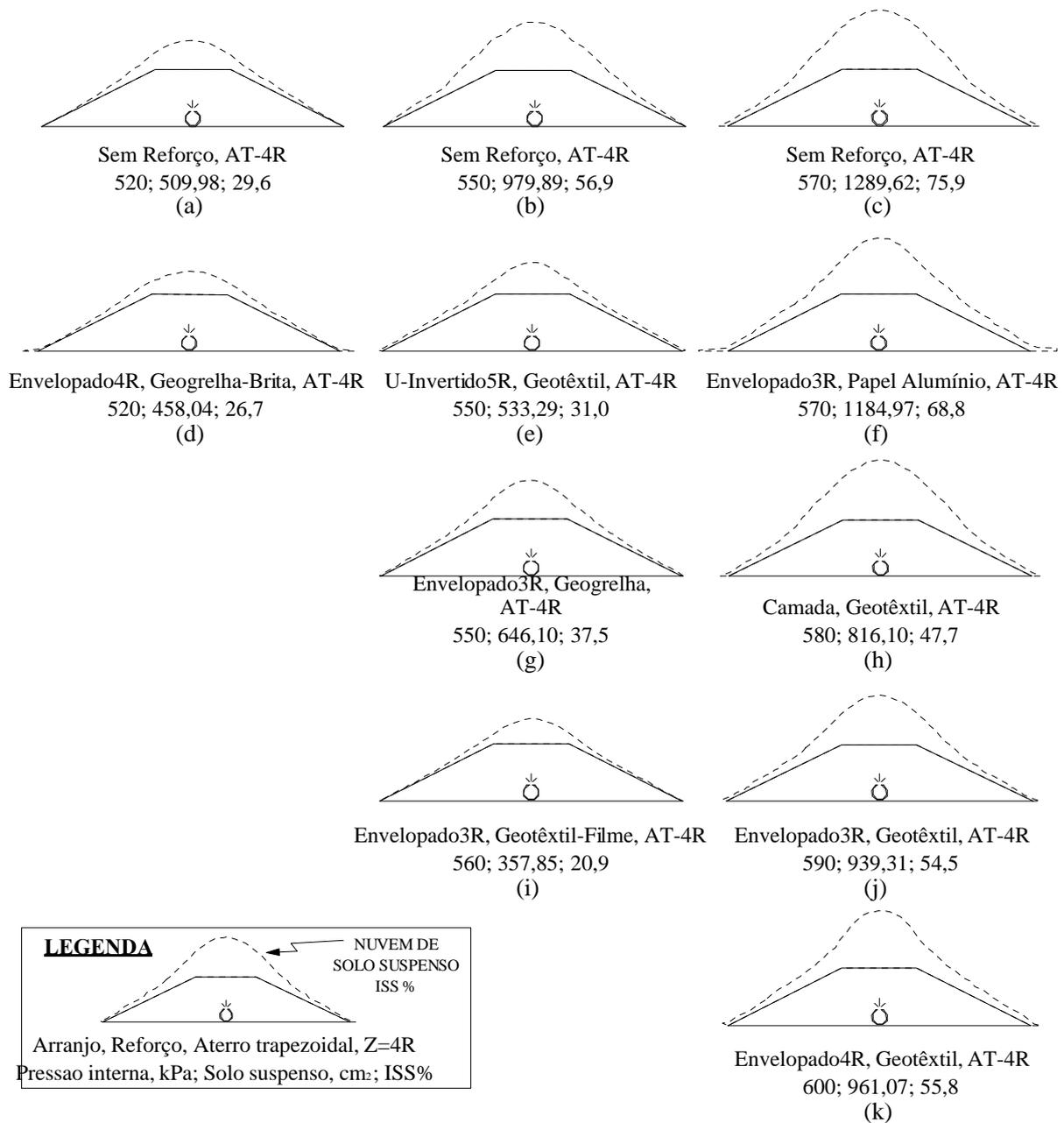


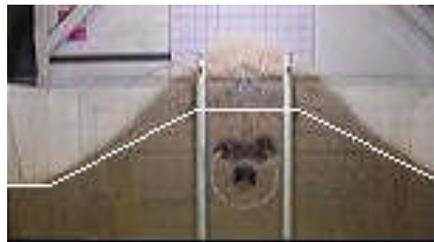
Figura 6.7. Formação da nuvem de areia após vazamento na tubulação ($Z = 4R$, tempo $t = 9$ a 11 ms após explosão).

As Figuras 6.8 a 6.12 apresentam fotografias tiradas durante os ensaios de vazamento com e sem reforço no aterro. No caso dos resultados de ensaios com reforço, as fotos obtidas nos ensaios sem reforço são também apresentadas a título de comparação. As fotos mostram a formação de bolha de ar que se propaga para a superfície do aterro, provocando a formação da

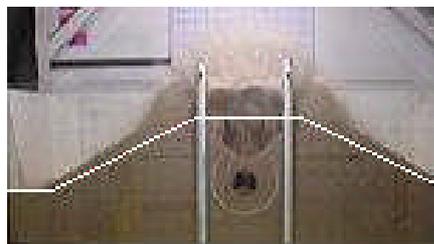
cratera. É possível também se identificar diferentes formas e dimensões da bolha, em função da presença ou não da camada de reforço, como será comentado posteriormente.



(a)



(b)

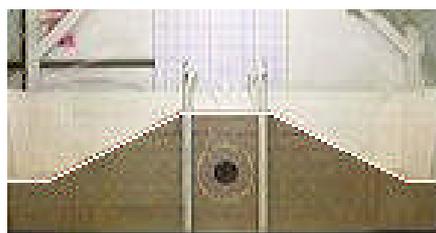


(c)



(d)

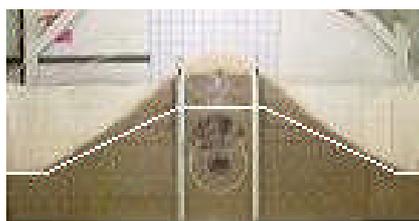
Figura 6.8. Seqüência do vazamento da tubulação em aterro não reforçado (ensaio: D/SEM REFORÇO/AT/4R).



(a)

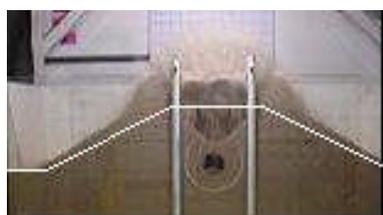


Não reforçado.

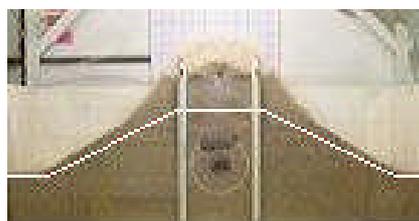


Reforçado com geogrelha.

(b)



Não reforçado.



Reforçado com geogrelha.

(c)



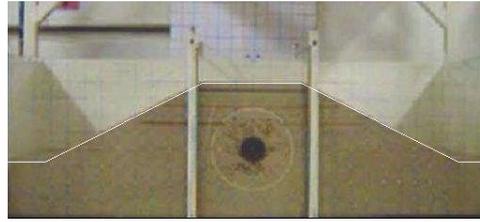
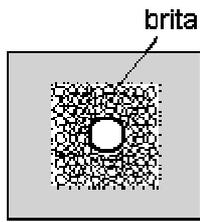
Não reforçado.



Reforçado com geogrelha.

(d)

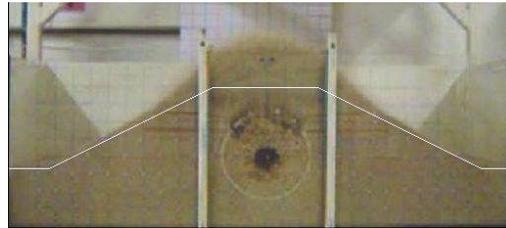
Figure 6.9. Seqüência do vazamento em aterro não reforçado e reforçado com geogrelha envolpado (ensaio: D/E3R/GGR-FF/AT/4R).



(a)



Não reforçado.

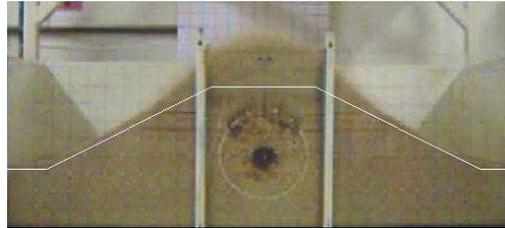


Reforçado com geogrelha + brita.

(b)

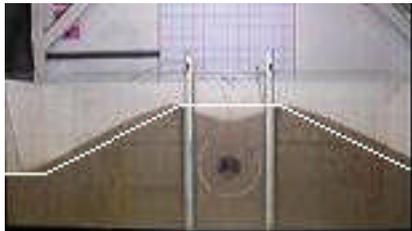


Não reforçado.



Reforçado com geogrelha + brita.

(c)



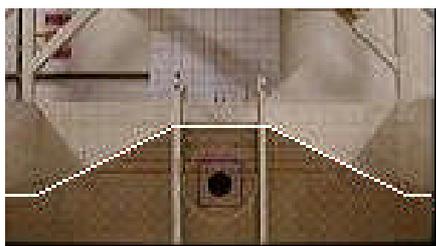
Não reforçado.



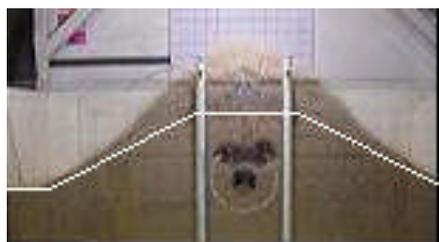
Reforçado com geogrelha + brita.

(d)

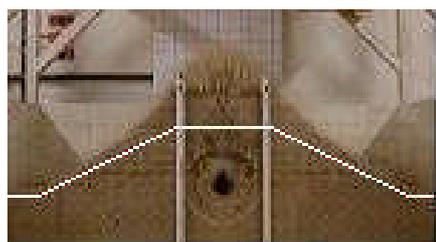
Figure 6.10. Seqüência do vazamento em aterro não reforçado e reforçado com geogrelha + brita (ensaio: D/E4R/GGR-FB/AT/4R).



(a)

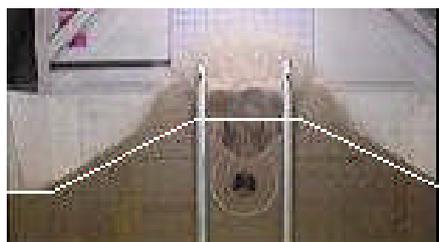


Não reforçado.

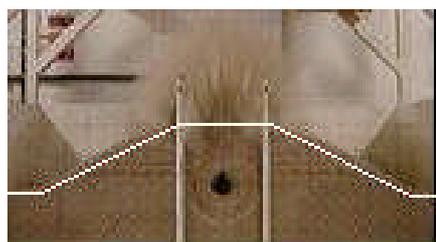


Reforçado com geotêxtil S.

(b)



Não reforçado.

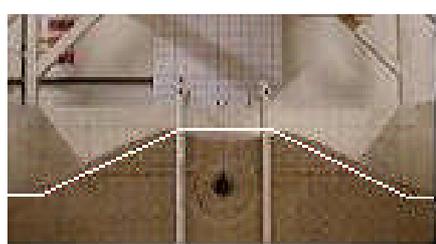


Reforçado com geotêxtil S.

(c)



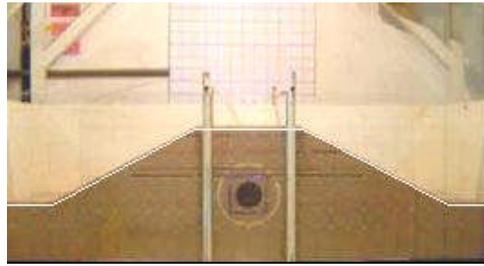
Não reforçado.



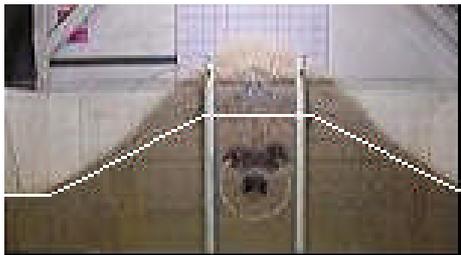
Reforçado com geotêxtil S.

(d)

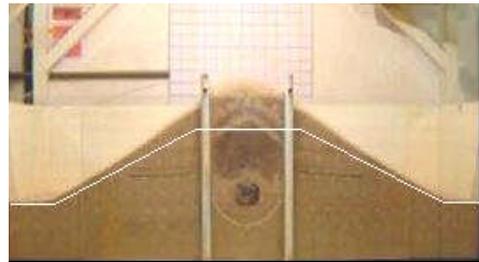
Figure 6.11. Sequência do vazamento em aterro não reforçado e reforçado com geotêxtil S, envolado. (ensaio: D/E4R/GTX-SS/AT/4R).



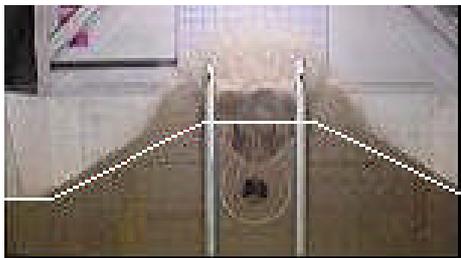
(a)



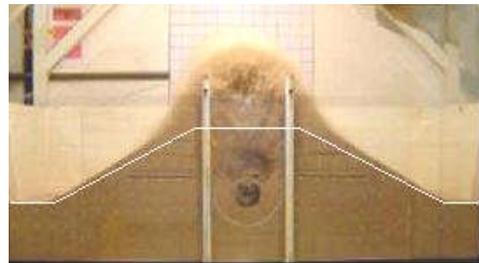
Não reforçado.



Reforçado com geotêxtil S + Filme PVC.
(b)



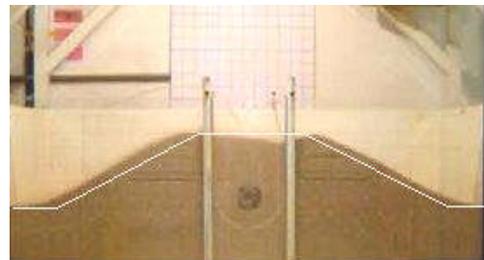
Não reforçado.



Reforçado com geotêxtil S + Filme PVC.
(c)



Não reforçado.



Reforçado com geotêxtil S + Filme PVC.
(d)

Figure 6.12. Seqüência do vazamento de tubulação em aterro não reforçado e reforçado com geotêxtil S + PVC envelopado (código: D/E3R/GTX-SV/AT/4R).

A Tabela 6.5 mostra os resultados da quantificação da nuvem do solo suspenso obtida das simulações de aterros com $Z = 4R$ na faixa de tempo de 9 a 11 ms em termos de área. A quantidade de solo suspenso no caso de sistemas não reforçados foi proporcional à pressão interna de estouro da tubulação, apresentando uma envoltória de limite superior como é observado nas Figuras 6.7 (a), (b) e (c).

Tabela 6.5. Nuvem de solo suspenso em aterros de $Z = 4R$.

Arranjo da simulação	Pressão interna (kPa)	Nuvem de Solo Suspenso (cm ²)
Sem Reforço, AT-4R, I.	520	509,98
Sem Reforço, AT-4R, II.	550	979,89
Sem Reforço, AT-4R, III.	570	1289,62
U-Invertido5R, Geogrelha F, AT-4R.	580	-
Camada, Geotêxtil S, AT-4R.	580	816,10
U-Invertido5R, Geotêxtil S, AT-4R.	550	533,29
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-4R.	590	939,31
Envelopado3R, Geogrelha F, AT-4R.	550	646,10
Envelopado3R, Geotêxtil S-Filme, AT-4R.	560	357,85
Envelopado3R, Papel Alumínio A, AT-4R.	570	1184,97
Envelopado4R, Geotêxtil S, AT-4R.	600	961,07
Envelopado4R, Geogrelha F-Brita, AT-4R.	520	458,04

Notas: I, II e III identificam o número de ensaio em condição sem reforço.

De forma geral, todos os sistemas reforçados simulados geraram menor quantidade de solo suspenso do que os sistemas não reforçados (Figura 6.13). O melhor comportamento foi observado para o sistema envolvendo geotêxtil e filme de PVC, mostrando a importância da redução do fluxo de ar pela massa de solo na redução do volume de solo suspenso.

Os resultados da simulação em aterros sem reforço (ensaio D/SEM REFORÇO/AT/4R) apresentaram relação linear entre a pressão interna no instante do vazamento e a área do domo de nuvem de areia. As quantificações das regiões de nuvem de areia associadas às pressões de estouro da tubulação conduzem a se estabelecer uma linha envoltória que representaria um limite superior de resultados de ensaios.

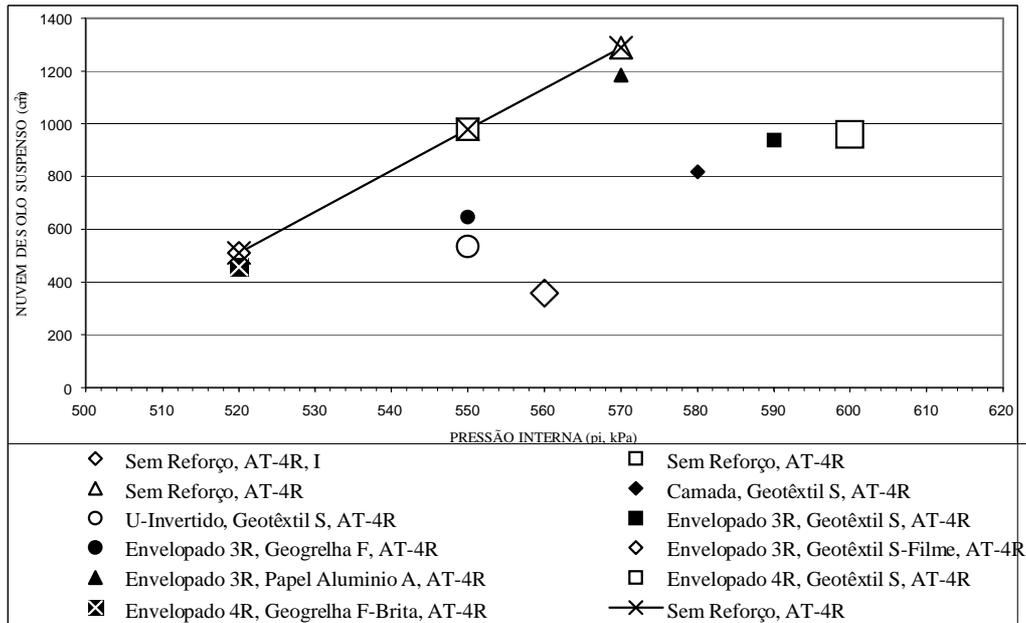


Figura 6.13. Solo suspenso em aterros com $Z = 4R$.

Os valores de áreas do solo suspenso (ss) em simulações de aterros não reforçados foram considerados como referências para avaliar o comportamento de sistemas reforçados. Em geral, para todas as simulações em condições reforçadas os valores da quantificação do domo da nuvem de areia não ultrapassaram os valores da linha envoltória.

O ajuste dos valores de áreas de solo suspenso (ss) em sistemas sem reforço em função da pressão interna de estouro gerou a seguinte relação:

$$ss = 15,598(p_i) - 600,6 \quad (6.2)$$

onde: ss é a área de solo suspenso (em cm^2) e p_i é a pressão interna na tubulação (em kPa).

Em sistemas reforçados, a percentagem de redução do solo suspenso (RSS, %) foi determinada pela expressão a seguir:

$$RSS (\%) = \frac{VSSCR - VSSSR}{VSSSR} \times 100 \quad (6.3)$$

onde: VSSCR é o volume de solo suspenso na simulação de sistema com reforço e VSSSR é o volume do solo suspenso de sistema sem reforço (o VSSSR se determina pela multiplicação do valor de ss e um valor unitário na direção perpendicular à seção transversal, Tabela 6.6)

A relação entre os volumes da parcela de solo suspenso e do volume inicial do aterro, foi definida como o índice de suspensão de solo (ISS %), e foi avaliada pela seguinte relação:

$$ISS(\%) = \frac{VSS}{VAT} \times 100 \quad (6.4)$$

onde: VSS é o volume somente do solo suspenso e VAT é o volume inicial do aterro incluindo o volume da tubulação. Os valores do índice de solo suspenso (ISS, %) são apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.6. Redução de solo suspenso do aterro (Z = 4R).

	p _i (kPa)	VSS (cm ³)	VSSCR (cm ³)	ss (cm ²)	VSSSR (cm ³)	RSS (%)
Sem Reforço, AT-4R, I.	520	509,98	-	510,36	510,36	-
Sem Reforço, AT-4R, II.	550	979,89	-	978,30	978,30	-
Sem Reforço, AT-4R, III.	570	1289,62	-	1290,26	1290,26	-
U-Invertido5R, Geogrelha F, AT-4R.	580	-	-	-	-	-
Camada, Geotêxtil S, AT-4R.	580	-	816,10	1446,24	1446,24	43,57
U-Invertido5R, Geotêxtil S, AT-4R.	550	-	533,29	978,30	978,30	45,49
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-4R.	590	-	939,31	1602,22	1602,22	41,37
Envelopado3R, Geogrelha F, AT-4R	550	-	646,10	978,30	978,30	33,96
Envelopado3R, Geotêxtil S-Filme, AT-4R.	560	-	357,85	1134,28	1134,28	68,45
Envelopado3R, Papel Alumínio A, AT-4R.	570	-	1184,97	1290,26	1290,26	8,16
Envelopado4R, Geotêxtil S, AT-4R.	600	-	961,07	1758,20	1758,20	45,34
Envelopado4R, Geogrelha F-Brita, AT-4R.	520	-	458,04	510,36	510,36	10,25

A simulação de vazamento em aterro reforçado com geotêxtil tecido em arranjo de camada (ensaio D/CAT/GTX-SS/AT/4R) apresentou efeito redutor na quantidade de solo suspenso em relação a um sistema não reforçado (Figura 6.7 (h)). A redução foi de 43,57 %, e apresentou um valor de ISS do aterro de 47,7 %.

A simulação de explosão em sistema reforçado com geotêxtil tecido em arranjo de U-Invertido (ensaio D/U5R/GTX-SS/AT/4R) causou redução da quantidade de solo suspenso de 45,49 % em relação a um sistema não reforçado. O formato da nuvem de areia apresenta maior desenvolvimento na faixa central, tal como apresentada na Figura 6.7 (e).

Tabela 6.7. Valores de índice de solo suspenso do aterro ($Z = 4R$).

	p_i (kPa)	VAT (cm^3)	VSS (cm^3)	ISS (%)
Sem Reforço, AT-4R, I.	520	1723,68	509,98	29,6
Sem Reforço, AT-4R, II.	550	1721,63	979,89	56,9
Sem Reforço, AT-4R, III.	570	1710,65	1289,62	75,4
U-Invertido5R, Geogrelha F, AT-4R.	580	-	-	-
Camada, Geotêxtil S, AT-4R.	580	1710,13	816,10	47,7
U-Invertido5R, Geotêxtil S, AT-4R.	550	1719,39	533,29	31,0
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-4R.	590	1722,65	939,31	54,5
Envelopado3R, Geogrelha F, AT-4R	550	1722,96	646,10	37,5
Envelopado3R, Geotêxtil S-Filme, AT-4R.	560	1714,22	357,85	20,9
Envelopado3R, Papel Alumínio A, AT-4R.	570	1722,98	1184,97	68,8
Envelopado4R, Geotêxtil S, AT-4R.	600	1723,16	961,07	55,8
Envelopado4R, Geogrelha F-Brita, AT-4R.	520	1715,65	458,04	26,7

No ensaio reforçado com geotêxtil S, envelopado (ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R) a redução da quantidade de solo suspenso foi de 41,37 % em relação aos aterros sem reforço, e o formato da nuvem de areia apresenta maior concentração na faixa central (Figuras 6.7 (j) e 6.11) do aterro em relação ao caso sem reforço. A deformação volumétrica do aterro causada pela expansão do ar comprimido foi de 54,5 %. A cavidade gerada pela expansão do ar comprimido não apresentou formato bem definido (Figura 6.11) em consequência de uma atenuação da dispersão do ar pelos vazios do geotêxtil.

Quando utilizada uma geogrelha (ensaio D/E3R/GGR-FF/AT/4R) a quantidade de solo suspenso foi reduzida em 33,96 % em relação ao caso sem reforço e a nuvem de areia apresentou formato alargado (Figura 6.7 (g)). O ISS do aterro alcançou 37,5 %. A cavidade gerada apresenta formato de um setor circular e, além disso, são observados jatos de areia secundários ejetados através das aberturas da geogrelha (Figura 6.9 (b)).

Ao se empregar um reforço composto (geotêxtil S e filme de PVC) (ensaio D/E3R/GTX-SV/AT/4R) na simulação, a geração da nuvem de areia foi minimizada em 68,45 % em relação a sistemas de aterros não reforçados (Figuras 6.7 (i) e 6.12) e o ISS obtido de 20,9 %. Na Figura 6.12 observa-se nitidamente a retenção da bolha de ar pela camada de reforço, alterando a forma original quadrada do arranjo.

Com o objetivo de estudar o efeito da ruptura do reforço durante o ensaio, foi empregado um reforço em papel alumínio (ensaio D/E3R/PAL-AA/AT/4R). Neste caso, a formação da nuvem de areia foi reduzida apenas em 8,16 %. O ISS do aterro alcançou 68,8 % (Figura 6.7 (f)). Após o ensaio, observou-se que a parte superior do reforço foi arrancada e lançada juntamente com o solo.

Para observar a influência da dimensão do reforço foi realizado um ensaio com o geotêxtil S envelopado, com forma quadrada inicial com lado igual a 4R (ensaio D/E4R/GTX-SS/AT/4R). A redução da área da nuvem de areia formada foi de 45,34 % em relação ao caso sem reforço e o ISS foi igual a 55,8 %. O formato da nuvem de areia se desenvolveu mais acentuadamente na faixa central (Figura 6.7 (k)). A Figura 6.11 mostra que também nesse caso não se observou uma forma bem definida da bolha de ar gerada na massa de aterro.

A simulação de reforço composto por geogrelha envelopada e preenchida com brita (ensaio D/E4R/GGR-FB/AT/4R) reduziu a quantidade de solo suspenso em 10,25 % em relação ao sistema não reforçado e o ISS do aterro foi de 26,7 % (Figura 6.7 (d)). O formato da nuvem de areia mostra uma imagem alargada. A expansão do ar (bolha) se distribuiu ao longo do lado superior do arranjo quadrado (Figura 6.10).

A simulação de vazamentos em aterros trapezoidais de taludes 2H:1V mais rasos ($Z = 2R$) mostrou comportamento semelhante aos de aterros trapezoidais mais profundos ($Z = 4R$), tanto para sistemas reforçados como não reforçados. A Figura 6.14 mostra as evidentes diferenças entre sistemas reforçados e não reforçados. Em geral, o sistema reforçado apresentou redução de altura (Y) atingida pelo solo lançado e também na quantidade de solo suspenso em relação ao aterro não reforçado. A Tabela 6.8 apresenta dados sobre a nuvem de solo suspenso em aterros com $Z = 2R$. A redução de solo suspenso e o ISS do aterro são

apresentados na Tabela 6.9. Novamente, os resultados sugerem a melhor eficiência da presença do reforço para menores profundidades da tubulação.

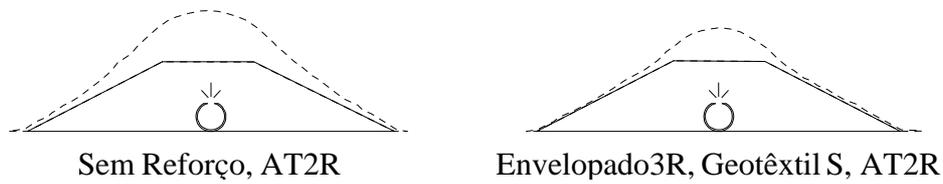


Figura 6.14. Nuvem de areia em aterros reforçados e não reforçados com $Z = 2R$.

Tabela 6.8. Redução de solo suspenso do aterro $Z = 2R$.

Arranjo da simulação	p_i (kPa)	VSSSR (cm^3)	VSSCR (cm^3)	RSS (%)
Sem Reforço, AT-2R.	550	416,26	-	-
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-2R.	600	-	179,05	56,96

Tabela 6.9. Valores de índice de solo suspenso do aterro ($Z = 2R$).

Arranjo da simulação	p_i (kPa)	VAT (cm^3)	VSS (cm^3)	ISS (%)
Sem Reforço, AT-2R.	550	770,18	416,26	54,0
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-2R.	600	772,66	179,05	23,2

Em função dos resultados apresentados neste item, pode-se concluir que, dentre os ensaios com aterros reforçados, a maior quantidade de solo suspenso gerado ocorreu para o aterro reforçado com papel alumínio. A menor quantidade de solo suspenso foi gerada no aterro reforçado com geotêxtil tecido associado ao filme de PVC.

A expansão do ar comprimido em aterros em condições não reforçadas gera formatos de nuvem de areia do solo suspenso mais alargados do que os gerados em aterros em condições reforçadas. Isto foi observado em todos os casos, embora as pressões de estouro da tubulação tenham variado. Os domos alargados da nuvem de areia nestes casos também se mostraram proporcionais à pressão de estouro da tubulação. Por outro lado, aparentemente, a presença do reforço amorteceu o impacto da onda de choque do ar comprimido no instante do estouro da tubulação. Este amortecimento diminuiu o lançamento do solo, afetando o aterro

numa região mais concentrada e, conseqüentemente, diminuindo o espreadimento lateral da nuvem de areia.

6.4 - DEFORMAÇÕES DAS SUPERFÍCIES DOS ATERROS (CRATERAS E DEFORMAÇÃO LATERAL) DEVIDO AO VAZAMENTO

Em todos os casos simulados após as explosões das tubulações foram observadas mudanças na geometria dos aterros, com grandes deformações laterais e a formação de uma cratera. O efeito lateral é caracterizado pela massa de solo empurrada para as laterais do aterro, pelo acúmulo da massa de solo que foi ejetada do aterro e pelos deslizamentos e rastejo de solo nas bordas da cratera em formação. Os contornos do aterro antes e após a explosão foram utilizados para calcular a massa de solo deslocada (Figura 6.15).

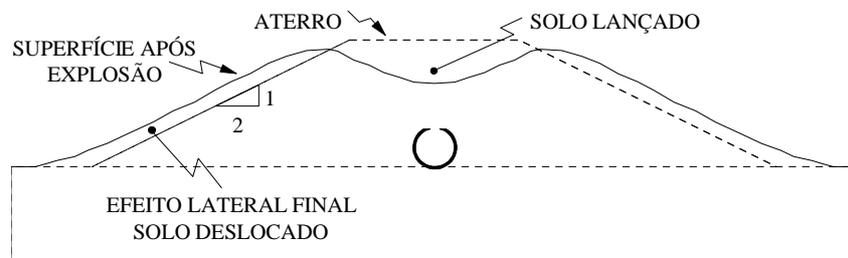


Figura 6.15. Esquema após explosão do efeito lateral do solo deslocado.

Na Tabela 6.10 são mostrados os valores da quantidade de solo lançado ou ejetado (SL), solo deslocado (MD), seção da cratera (CR) e a seção do aterro trapezoidal (AT). A Tabela 6.11 apresenta a largura da cratera (D) e a profundidade da cratera (H).

Tabela 6.10. Valores de solo lançado, massa deslocada e cratera aparente ($Z = 4R$).

	AT cm ²	SL cm ²	MD Cm ²	CR cm ²
Sem Reforço, AT-4R, II.	1722,005	127,446	237,14	93,999
Sem Reforço, AT-4R, III.	1731,968	116,167	280,41	95,9487
U-Invertido-5R, Geogrelha F, AT-4R.	1728,009	120,935	235,74	82,450
Camada, Geotêxtil S, AT-4R.	1716,049	147,832	241,64	107,115
U-Invertido-5R, Geotêxtil S, AT-4R.	1720,138	80,5198	220,49	60,773
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-4R.	1723,284	96,572	212,79	73,692
Envelopado3R, Geogrelha F, AT-4R.	1723,284	93,848	234,33	72,717
Envelopado3R, Geotêxtil S-Filme, AT-4R.	1723,284	63,571	254,94	48,210
Envelopado3R, Papel Alumínio, AT-4R.	1720,996	98,080	296,71	31,980
Envelopado4R, Geotêxtil S, AT-4R.	1722,297	126,979	268,38	70,930
Envelopado4R, Geogrelha F-Brita, AT4R.	1719,144	50,632	191,72	49,652

Tabela 6.11. Diâmetro e profundidade da cratera (Z = 4R).

	D cm	H cm
Sem Reforço, AT-4R, II.	33,319	3,203
Sem Reforço, AT-4R, III.	35,968	5,063
U-Invertido-5R, Geogrelha F, AT-4R.	37,696	3,606
Camada, Geotêxtil S, AT-4R.	38,922	4,641
U-Invertido-5R, Geotêxtil S, AT-4R.	37,754	2,855
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-4R.	37,465	3,757
Envelopado3R, Geogrelha F, AT-4R.	38,588	3,214
Envelopado3R, Geotêxtil S-Filme, AT-4R.	39,066	2,577
Envelopado3R, Papel Alumínio, AT-4R.	38,597	1,519
Envelopado4R, Geotêxtil S, AT-4R.	39,289	3,385
Envelopado4R, Geogrelha F-Brita, AT4R.	34,195	3,492

As Equações 6.5, 6.6 e 6.7 foram utilizadas para quantificar, em termos relativos, as quantidades de massa deslocada, solo lançado e a cratera, respectivamente.

$$QMD = \frac{MD}{AT} * 100\% \quad (6.5)$$

$$QSL = \frac{SL}{AT} * 100\% \quad (6.6)$$

$$QCR = \frac{CR}{AT} * 100\% \quad (6.7)$$

onde: QMD é a quantidade relativa de solo deslocado; MD é a área de solo deslocado; QSL é a quantidade relativa de solo lançado; SL é a área de solo lançado; QCR é a quantidade relativa de formação da cratera; CR é a área da seção da cratera; e AT é a área da seção do aterro trapezoidal.

A Figura 6.16 apresenta os contornos dos aterros mostrando a massa de solo deslocado após vazamentos em tubos instalados na profundidade igual a 4R. Estes resultados e os valores apresentados na Tabela 6.11 mostram que o efeito do reforço foi marginal, no que se refere a reduzir os deslocamentos laterais e a massa de solo deslocada em consequência do vazamento.

A Tabela 6.12 apresenta os valores das quantidades relativas de massa deslocada, de solo lançado ou ejetado e da formação da cratera.

Tabela 6.12. Valores das quantidades relativas de massa deslocada, de solo lançado e cratera.

	QMD %	QSL %	QCR %
Sem Reforço, AT-4R, II.	13,77	7,40	5,45
Sem Reforço, AT-4R, III.	16,19	6,71	5,54
U-Invertido-5R, Geogrelha F, AT-4R.	13,64	7,00	4,77
Camada, Geotêxtil S, AT-4R.	14,08	8,61	6,24
U-Invertido-5R, Geotêxtil S, AT-4R.	12,82	4,68	3,53
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-4R.	12,35	5,60	4,28
Envelopado3R, Geogrelha F, AT-4R.	13,60	5,45	4,22
Envelopado3R, Geotêxtil S-Filme, AT-4R.	14,79	3,69	2,80
Envelopado3R, Papel Alumínio, AT-4R.	17,24	5,70	1,86
Envelopado4R, Geotêxtil S, AT-4R.	15,58	7,37	4,12
Envelopado4R, Geogrelha F-Brita, AT4R.	11,15	2,95	2,89

De forma geral, os sistemas não reforçados (ensaio D/SEM REFORÇO/AT/4R) mostraram maior quantidade de solo deslocado (13,77 a 16,19 %, Figuras 6.16 (a) e (b)) e as bordas dos taludes apresentaram formato angular com concentração de solo na parte superior do talude. Além disso, o solo deslocado apresentou simetria, desde a borda da cratera até o pé do talude. Também de forma geral, os aterros com reforço apresentaram menor profundidade de cratera.

A Tabela 6.13 apresenta valores de solo lançado, diâmetro e profundidade da cratera para aterros com tubulações localizadas a menor profundidade ($Z = 2R$).

A Figura 6.17 mostra contornos de aterros em ensaios em tubulações mais rasas, após o vazamento. Na simulação de um aterro trapezoidal em condição não reforçada (ensaio D/SEM REFORÇO/AT/2R), a quantidade de solo deslocada foi de 38,52 % (Tabela 6.14). Os taludes formados mostram simetria e o maior volume do solo foi concentrado na parte inferior.

O valor de quantidade de solo deslocada no ensaio reforçado (ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/2R) foi de 40,22 %, sendo maior ligeiramente que o observado para sistema não reforçado para mesma geometria de aterro. Os taludes finais também apresentaram simetria e o maior volume de areia está concentrado na sua parte inferior.

Tabela 6.13. Solo lançado, diâmetro e profundidade da cratera para aterros com $Z = 2R$.

Arranjo da simulação	AT cm ²	SL cm ²	MD cm ²	CR cm ²	D mm	H Mm
Sem Reforço, AT-2R.	772,48	187,56	297,53	90,46	37,89	3,98
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-2R.	772,25	276,67	310,61	99,86	53,25	2,88

Tabela 6.14. Valores das quantidades relativas de massa deslocada, de solo lançado e cratera
 $Z = 2R$.

Arranjo da simulação	QMD %	QSL %	QCR %
Sem Reforço, AT-2R.	38,52	24,28	11,71
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-2R.	40,22	35,83	12,93

No que se refere ao solo lançado aparente não se observou uma tendência definida (Tabela 6.12). Sendo que a maior quantidade relativa de solo lançado foi de 8,61 % para o caso do ensaio em camada de geotêxtil e $Z = 4R$ (ensaio D/CAT/GTX-SS/AT/4R), e o menor valor de 2,80 % foi para o caso do ensaio envelopado de geotêxtil S-filme de PVC (ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R) apresentadas na Figura 6.18.

Para o caso de aterros com $Z = 2R$ (Tabela 6.14) as quantidades de solo lançado aparente foram de 24,28 % e 35,83 %, respectivamente (ensaios D/SEM REFORÇO/AT/2R e D/E3R/GTX-SS/AT/2R).

No que se refere às crateras formadas pelo vazamento em tubulação na profundidade igual a $4R$, também não se observou diferença apreciável entre as situações com e sem reforço, como se pode observar pelos resultados das Figuras 6.19. Resultados semelhantes foram também obtidos em ensaios em tubulações rasas ($Z = 2R$).

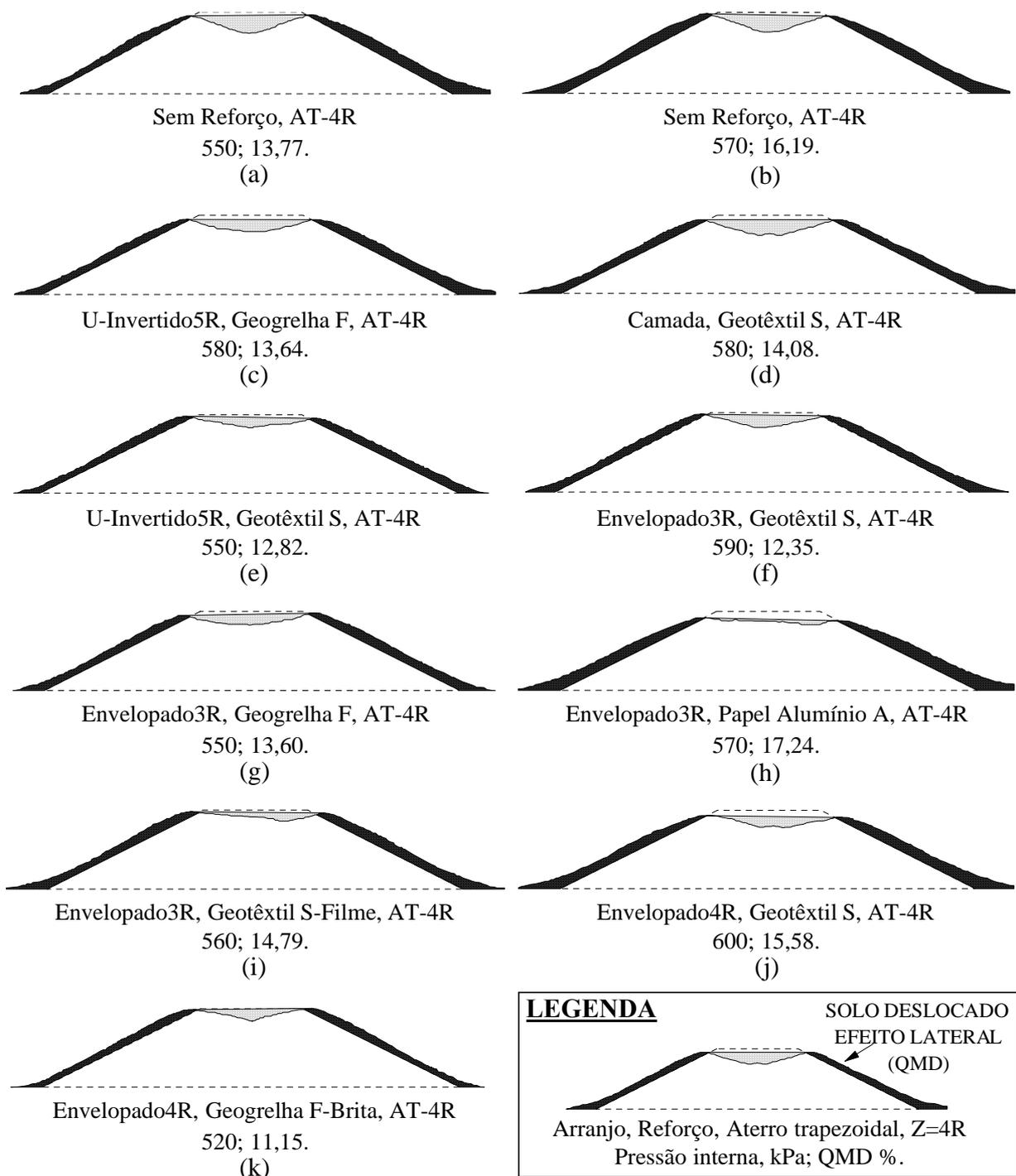


Figura 6.16. Solo deslocado efeito lateral após explosão.

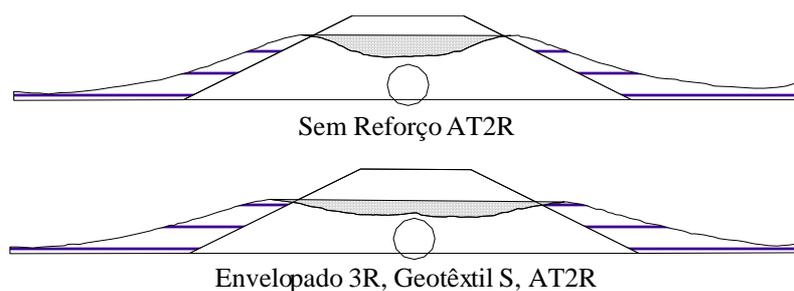


Figura 6.17. Esquemas após explosão em aterros sem e com reforço ($Z = 2R$).

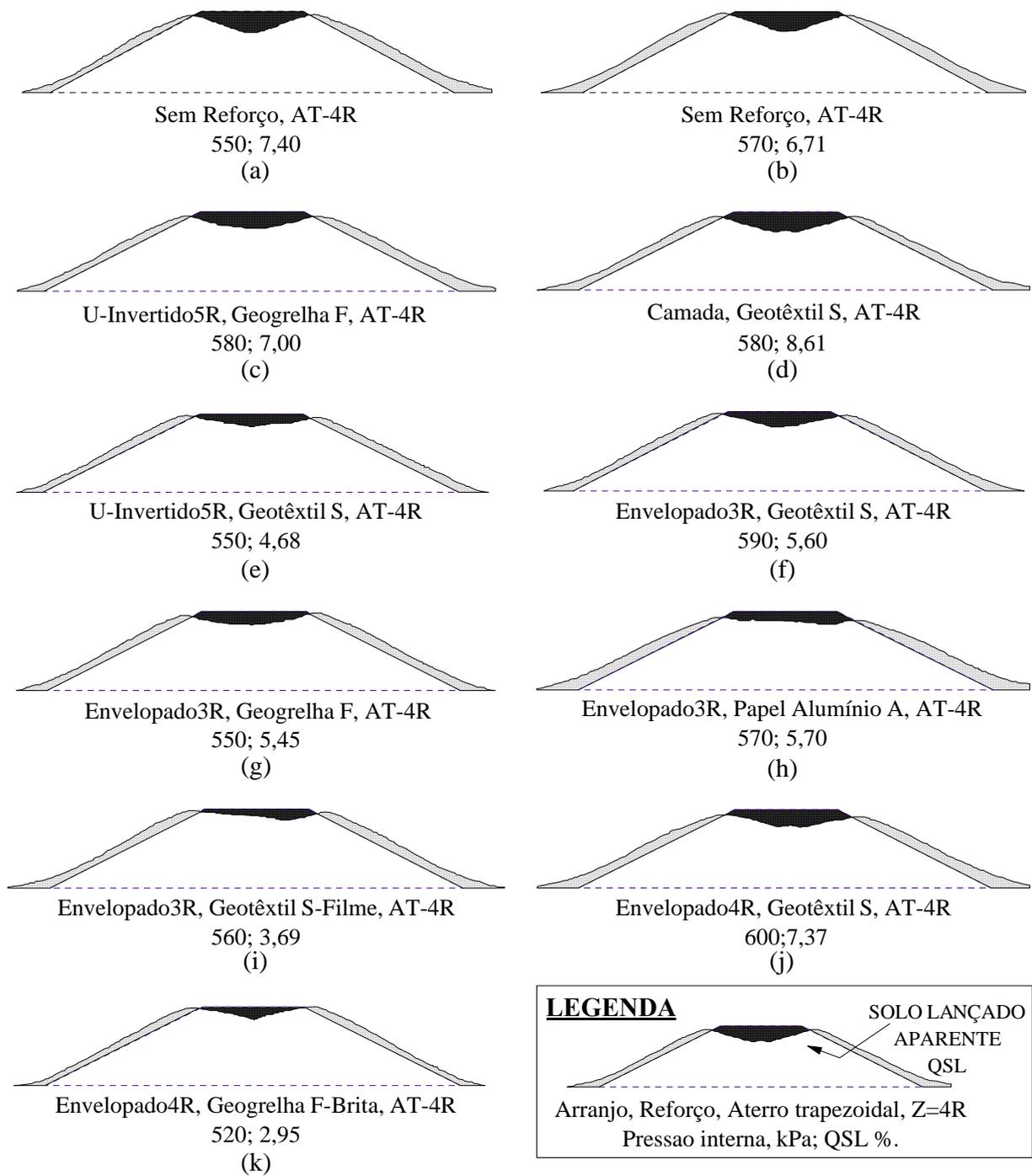


Figura 6.18. Detalhe do solo lançado aparente nas simulações de aterros trapezoidais, $Z=4R$.

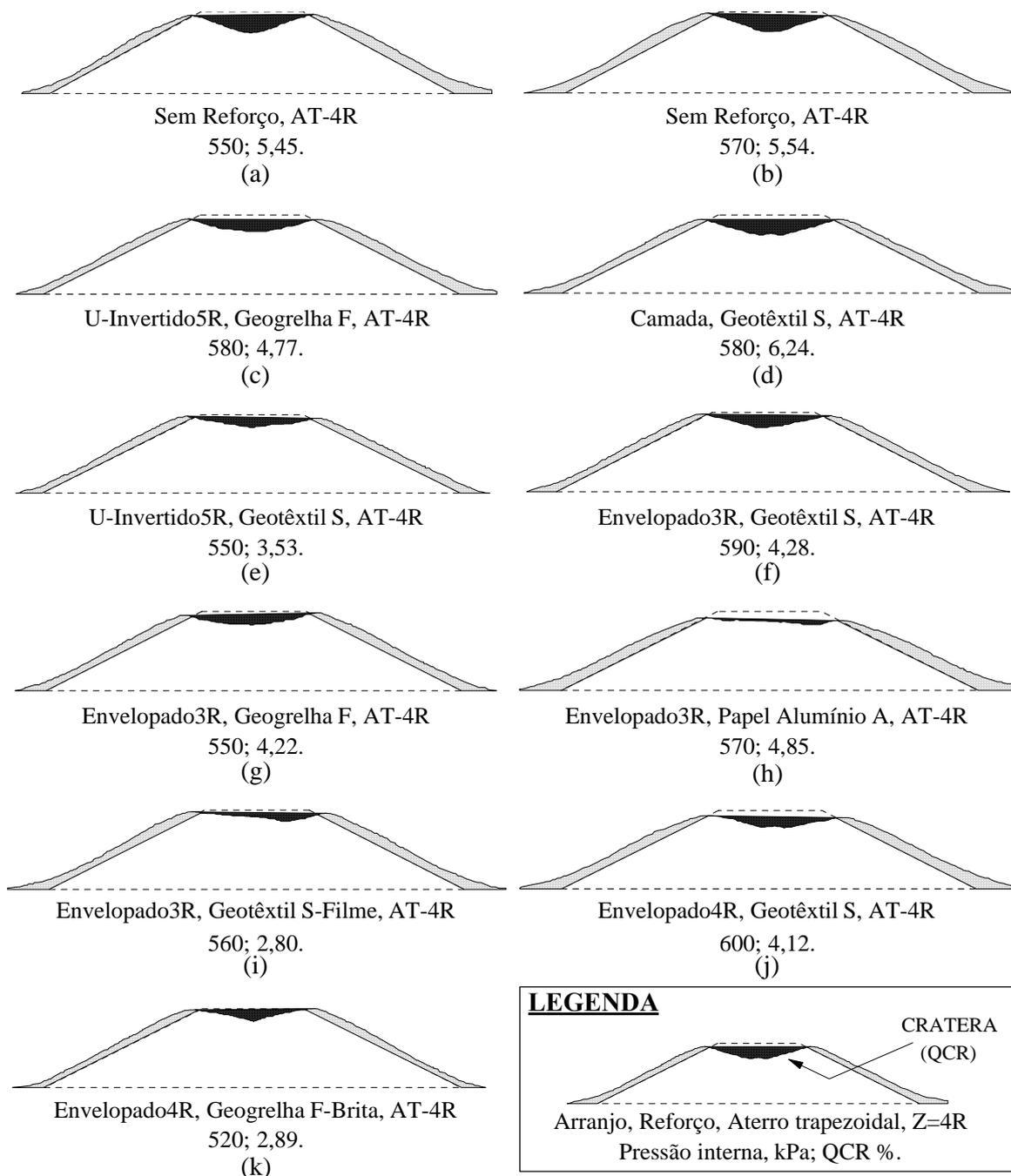


Figura 6.19. Formação de cratera nas simulações de aterros trapezoidais $Z=4R$.

6.5 - DESLOCAMENTOS INTERNOS NO ATERRO E MECANISMOS DE RUPTURA

Os deslocamentos no aterro foram obtidos por meio do monitoramento dos marcos. As observações foram realizadas em imagens dos aterros após o vazamento. A união dos

deslocamentos dos marcos permitiu a construção de uma malha deformada mostrando no seu conjunto a ocorrência de grandes deformações no interior do aterro. Na Figura 6.20 apresenta-se as coordenadas da malha de 5 cm de lado. E as coordenadas do ponto D (utilizado para mostrar o maior deslocamento medido nos diferentes ensaios realizados).

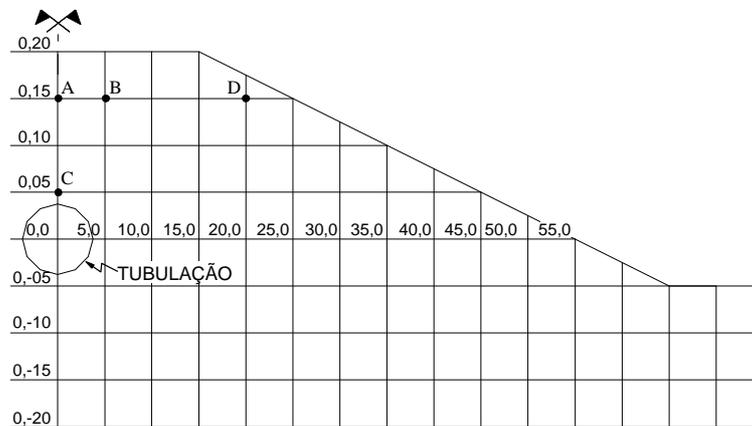


Figura 6.20. Coordenadas do aterro trapezoidal para locação do ponto D.

A Figura 6.21 (aterro trapezoidal, sem reforço, com $Z = 4R$) mostra os deslocamentos do solo no aterro. A ausência de elementos quadrangulares da malha acima da tubulação mostra a região afetada em grau dramático, onde os marcos desapareceram (os pontos A, B e C, por exemplo). Essa região, na realidade, representa a cratera real que se desenvolveu.

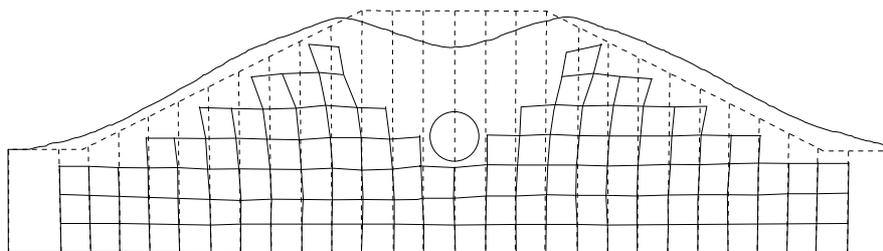


Figura 6.21. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal sem reforço (ensaio D/SEM REFORÇO/AT/4R), $p_i = 550$ kPa.

Nos marcos remanescentes, os deslocamentos horizontais representaram a maior parcela da movimentação de marcos no aterro, sendo que os deslocamentos verticais foram mínimos. O maior deslocamento horizontal medido no aterro sem reforço foi 36,2 mm no ponto D (Figura 6.20). O solo localizado na parte inferior da tubulação sofreu pequenos deslocamentos.

A Figura 6.22 mostra os deslocamentos de um aterro trapezoidal reforçado (Envelopado 3R, Geotêxtil S, AT-4R – ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R). Foi observado que os deslocamentos horizontais internos diminuíram em relação ao sistema de aterro não reforçado. Neste caso, o máximo valor de deslocamento horizontal medido foi de 26,6 mm (ponto D, Figura 6.20). Esse fato confirma que a presença do reforço provocou certa atenuação dos efeitos do vazamento. A região afetada acima da tubulação foi menor que a observada no sistema não reforçado.

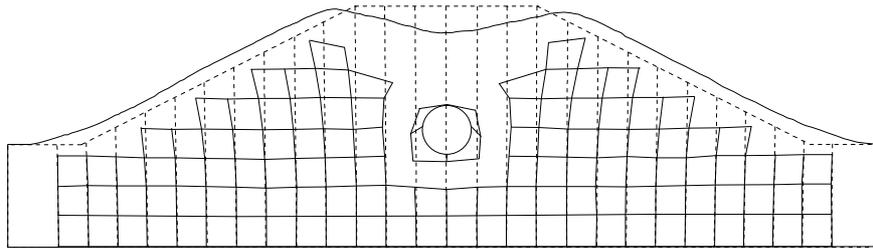


Figura 6.22. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal envelopado 3R, Geotêxtil S (ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R), $p_i = 590$ kPa.

A Figura 6.23 apresenta os deslocamentos de um aterro reforçado com o geotêxtil S e filme de PVC (Envelopado 3R, Geotêxtil S-Filme PVC, AT-4R; ensaio D/E3R/GTX-SV/AT/4R). O máximo deslocamento horizontal medido foi 30,5 mm (ponto D, Figura 6.20), similar aos valores obtidos nos ensaios anteriores.

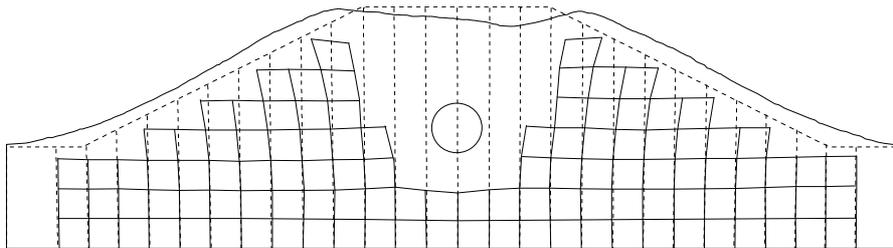


Figura 6.23. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal envelopado 3R, Geotêxtil S-Filme (ensaio D/E3R/GTX-SV/AT/4R), $p_i = 560$ kPa.

A Figura 6.24 mostra os deslocamentos internos no aterro reforçado com papel alumínio em arranjo envelopado (envelopado 3R, Papel Alumínio, AT-4R; ensaio D/E3R/PAL-AA/AT/4R). Neste caso, o deslocamento horizontal máximo medido foi 39,2 mm (ponto D da Figura 6.20).

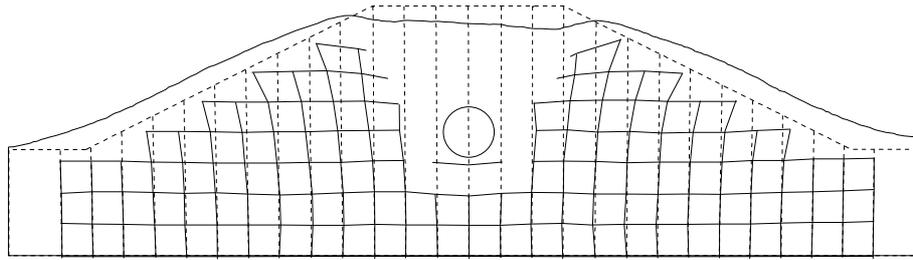


Figura 6.24. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal envelopado 3R, Papel Alumínio (ensaio D/E3R/PAL-AA/AT/4R), $p_i = 560$ kPa.

Os deslocamentos do aterro reforçado com geotêxtil S em arranjo envelopado (envelopado 4R, Geotêxtil S, AT-4R; ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R) são apresentados na Figura 6.25. O maior deslocamento horizontal foi 29,1mm (ponto D da Figura 6.20), embora, a área afetada tenha sido ligeiramente maior.

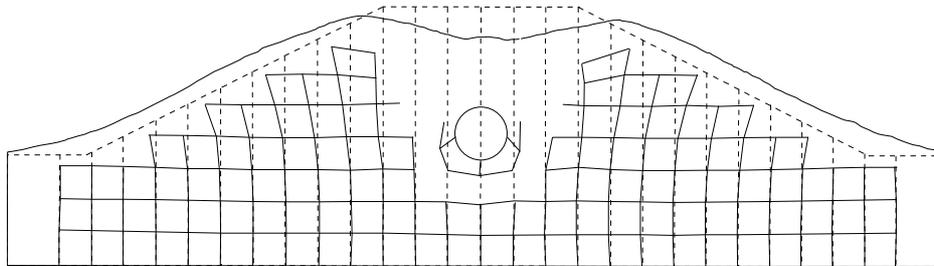


Figura 6.25. Deslocamentos internos no aterro trapezoidal envelopado 4R, Geotêxtil S, AT-4R (ensaio D/E3R/GTX-SS/AT/4R), $p_i = 600$ kPa.

A Figura 6.26 mostra os deslocamentos do sistema Envelopado 4R, Geogrelha F-Brita, AT-4R (ensaio D/E4R/GGR-FB/AT/4R). O maior deslocamento horizontal foi de 23,1 mm. Nesse caso, os deslocamentos horizontais foram menores que os obtidos para o sistema não reforçado.

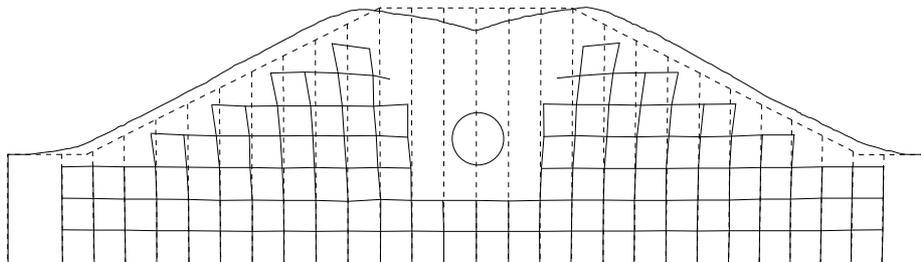


Figura 6.26. Deslocamentos no aterro trapezoidal envelopado 4R, Geogrelha F-Brita AT-4R (ensaio D/E4R/GGR-FB/AT/4R), $p_i = 520$ kPa.

6.6 - MECANISMO DE RUPTURA DO REFORÇO EM PAPEL ALUMÍNIO POR EFEITO DO JATO DE AR COMPRIMIDO

O mecanismo de ruptura do reforço por efeito do jato de ar comprimido foi estudado usando papel alumínio em condições de envelopamento, que representaria um reforço com elevada rigidez. A Figura 6.27 mostra os danos provocados no reforço após ensaio, onde podem-se observar trechos onde se verificou ruptura do reforço por tração. Em geral o reforço (papel alumínio) mostrou uma textura gerada pela impressão dos grãos da areia no momento da expansão do ar comprimido. Essa textura é observada em toda a superfície de envelopamento.

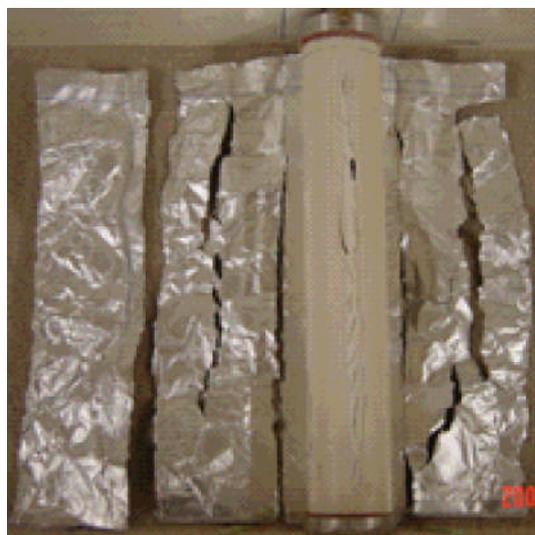


Figura 6.27. Ruptura do reforço em papel alumínio (ensaio D/E3R/PAL-AA/AT/4R).

6.7 - MECANISMOS DE RUPTURA DAS TUBULAÇÕES EM ESCALA REDUZIDA

O mecanismo de ruptura da tubulação em escala reduzida ocorreu ao longo do comprimento enfraquecido. A Figura 6.28 mostra mecanismos de ruptura típicos das tubulações após ensaios. Pode-se observar que o grau de severidade não parece ter sido necessariamente uniforme ao longo de todo o trecho enfraquecido, o que pode explicar algumas diferenças entre resultados de ensaios.

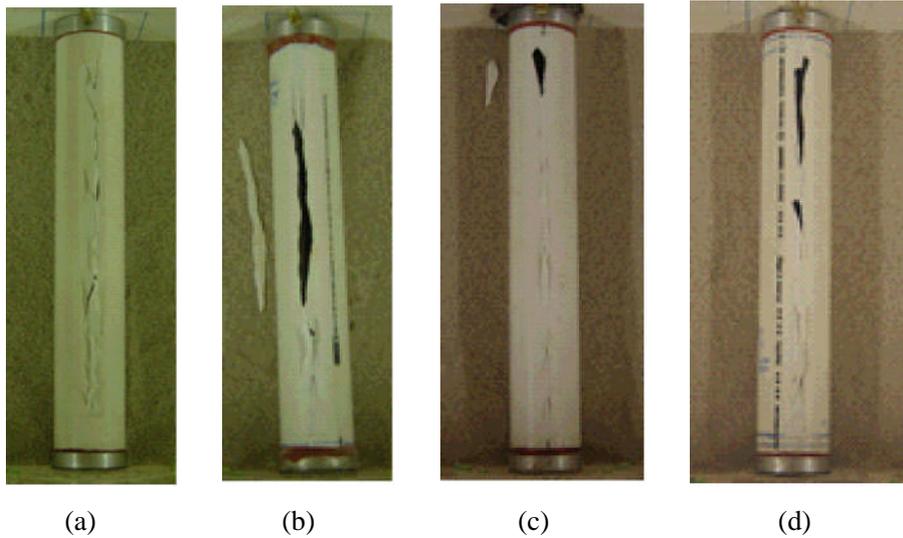
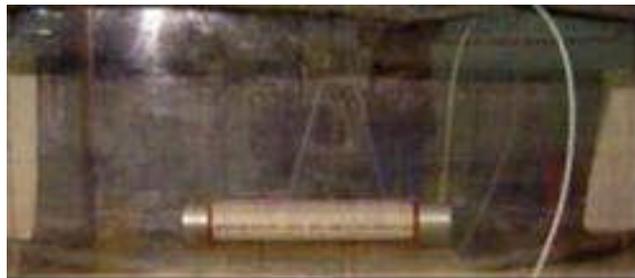


Figura 6.28. Mecanismos de ruptura de tubulações: a). Sem Reforço; b). Envelopado 3R, Geogrelha F; c). Envelopado-3R, Geotêxtil S; d). Envelopado-4R, Geotêxtil S.

Por outro lado, os testes de explosão de tubulações não enterradas íntegras (Figura 6.29 (a)) mostram que o tipo de tubulação ensaiado rompe catastroficamente e com muita violência, dispersando pedaços do tubo em todas as direções no instante da explosão (Figura 6.29 (b)); A Figura 6.29 (c) mostra o aspecto da tubulação após o ensaio de explosão não confinada.



(a)



(b)



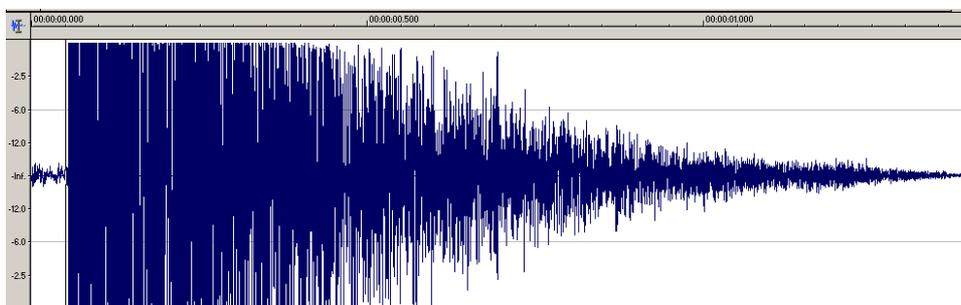
(c)

Figura 6.29. Explosão da tubulação pressurizada não enterrada.

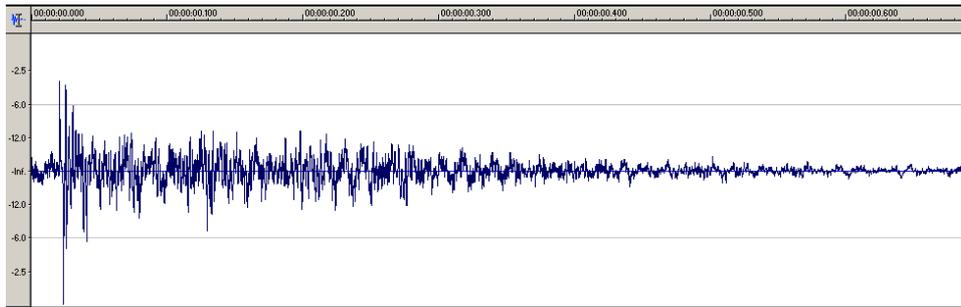
De maneira preliminar, a Figura 6.30 (a) apresenta o espectro da resposta de onda acústica de explosão da tubulação não enterrada (pressão interna 450 kPa), onde as amplitudes ultrapassaram a escala prevista (nesse caso não foi possível quantificar a amplitude da onda acústica captada pela câmara fotográfica opção de vídeo).

No caso de explosão de tubulação enterrada em aterro sem reforço (pressão interna 540 kPa) e com reforço (tubulação enterrada em aterro reforçado em arranjo U-Invertido, geotêxtil S, pressão interna 570 kPa), as ondas acústicas foram bastante atenuadas pelo material circundante (Figuras 6.30 (b) e (c), respectivamente). Os ensaios enterrados foram executados em aterros de superfície horizontal e as amplitudes foram comparadas.

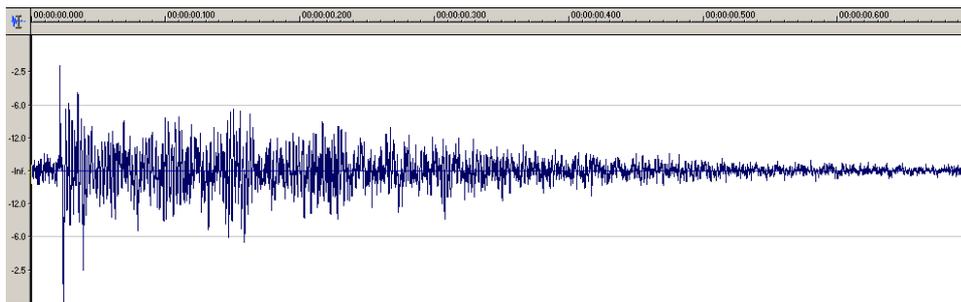
Comparando-se os resultados de ondas sonoras de explosões, claramente foi possível estabelecer que, no caso de tubulação não enterrada, o efeito do impacto sonoro foi bem maior em comparação aos casos de tubulações enterradas com e sem reforço.



(a). Tubulação não enterrada (p_i 450 kPa).



(b). Tubulação enterrada em aterro sem reforço (p_i 540 kPa).



(c). Tubulação enterrada em aterro reforçado em arranjo U-Invertido, geotêxtil S (p_i 570 kPa).

Figura 6.30. Ondas acústicas de explosão nos ensaios.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

7.1 - CONCLUSÕES

O presente trabalho visou apresentar o estudo da utilização de geossintéticos para proteção de tubulações pressurizadas enterradas visando minimizar os efeitos de uma explosão mediante duas metodologias experimentais: primeiro, por meio da expansão de cavidade em aterros com e sem reforço e, segundo, por meio da simulação de vazamentos em tubulações pressurizadas em escala reduzida. A seguir serão apresentadas as conclusões referentes ao estudo.

Materiais e equipamentos

Várias situações e materiais foram testados para as simulações de tubulações pressurizadas enterradas. No que se refere aos materiais e métodos, pôde-se concluir o seguinte:

- O aterro foi composto de material homogêneo e uniforme, o que pode não ocorrer no campo. A transferência de pressão para o solo circundante foi radial e com distribuição uniforme. Os aterros para os ensaios foram compactados pelo método da chuva de areia, o que se mostrou uma técnica fácil e que promoveu boa repetibilidade dos resultados obtidos.

- Face à rigidez da membrana de borracha utilizada nos ensaios de expansão de cavidade, foi necessária a realização de ensaios de calibração desta membrana. Estes ensaios permitiram corrigir os resultados dos experimentos de expansão de cavidades enterradas. O material utilizado na membrana também apresentou bom desempenho durante o programa de ensaios.

- Na calibração do dispositivo de expansão a seção expandida sempre manteve formato circular (curva B, Figura 4.12). Já nos ensaios de expansão de cavidade de aterros com e sem reforço, a cavidade no início apresenta expansão com formato circular e, depois a

seção de expansão varia de formato, dependendo das restrições impostas pelo arranjo geométrico do reforço (curva A, Figura 4.12); esta mudança de formato foi negligenciada para obter a curva de desempenho do ensaio (curva C, Figura 4.12).

7.1.1 - ENSAIOS DE EXPANSÃO DE CAVIDADE

Aterros de superfície horizontal

- Os resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros reforçados com geossintéticos apresentaram aumento da resistência à expansão (pressão no solo, p_e) em relação a aterros sem reforço.

- Observou-se que o sistema com melhor desempenho foi o do aterro com superfície horizontal e $Z = 7R$, em arranjo envelopado 4R, de geotêxtil P (no final do ensaio a resistência à expansão foi de 103,2 kPa e variação volumétrica de cavidade 151,2 %, resultando em 275,2 % de aumento em relação ao sistema não reforçado). Outro sistema que mostrou bom desempenho foi em arranjo envelopado 4R de geogrelha F (no final do ensaio a resistência à expansão foi de 97 kPa e variação volumétrica da cavidade 235 %, resultando em 252,7 % de aumento em relação ao sistema não reforçado).

- Avaliando-se os valores máximos da resistência à expansão de cavidade em aterros com superfície horizontal reforçados com arranjo em U invertido, o arranjo com melhor desempenho foi o em U-Invertido 6R de geotêxtil P (resistência à expansão 42,9 kPa e variação volumétrica da cavidade 67,5 %, resultando em 54,5 % de aumento em relação a um sistema não reforçado). Similarmente, o arranjo em U-Invertido 6R de geogrelha F apresentou uma resistência à expansão 42,9 kPa e variação volumétrica de cavidade 109,3 %, resultando em 56 % de aumento em relação a um sistema não reforçado.

Aterros de seção trapezoidal

- Em geral, os resultados da simulação de explosão por meio da expansão de cavidade em aterros de seção trapezoidal reforçados com geossintéticos apresentaram aumento na resistência à expansão em relação a aterros de seção trapezoidal não reforçado.

- O sistema de melhor desempenho foi o com arranjo envelopado 4R de geotêxtil tecido P em aterro trapezoidal (no final do ensaio a resistência à expansão foi de 81,0 kPa e variação volumétrica da cavidade 130,3 %, resultando em 307,0 % de aumento em relação ao sistema não reforçado). Outro sistema com bom desempenho foi o arranjo envelopado 4R de geogrelha F em aterro trapezoidal (no final do ensaio a resistência à expansão foi de 81,4 kPa e variação volumétrica da cavidade 193,1 %, resultando em 309,0 % de melhoria em relação a um sistema não reforçado).

- Avaliando-se as condições de valores máximos de resistência à expansão de cavidade em aterros trapezoidais reforçados com arranjos em U-invertido, o arranjo com melhor desempenho foi o em U-Invertido 6R com geogrelha F (resistência à expansão 37,8 kPa e variação volumétrica da cavidade 88,4 %, resultando em 89,9 % de melhoria em relação a um sistema não reforçado). Similarmente, o arranjo em U-Invertido 6R de geotêxtil tecido P também apresentou bom desempenho (resistência à expansão 34,9 kPa e variação volumétrica da cavidade 67,5 %, resultando em 70,8 % de aumento em relação ao sistema não reforçado).

- Os ensaios de expansão de cavidade em aterros trapezoidais reforçados com papel alumínio A foram executados para estudar os mecanismos de ruptura dos reforços e mostraram que a linha geratriz superior do reforço (acima da cavidade de expansão) representou o ponto mais solicitado do reforço.

- A resistência à expansão de cavidade dependeu das propriedades geométricas, textura e rigidez dos reforços. A resistência à expansão em um sistema tubulação-reforço-solo também dependeu do grau de ancoragem do reforço e do confinamento da tubulação gerado pela camada de solo acima da mesma. De modo geral, o arranjo envelopado foi o que melhor reforçou os aterros ensaiados.

- Em ensaios de aterro sem reforço foi observado que as superfícies de ruptura na areia se iniciam com tendência vertical no intervalo de variação volumétrica da cavidade de 1 a 5 %. A seguir, as superfícies de ruptura desenvolvem-se aumentando o ângulo da superfície de ruptura com a vertical.

- Os sistemas ensaiados em aterros com superfície horizontal foram submetidos a maior confinamento em relação a aterros com seção trapezoidal. Por essa razão, os resultados

de ensaios de expansão de cavidade de aterros com superfície horizontal apresentaram maior resistência à expansão de cavidade em relação a aterros com seção trapezoidal, sob as mesmas condições de espessura de camada superior, tipo de reforço e arranjo geométrico do geossintético.

Influência da Profundidade, Z, da Cavidade

- O efeito da profundidade de posicionamento da cavidade de expansão no aterro (Z) (espessura de camada de solo acima da cavidade) foi estudado e, quanto maior a profundidade maior resistência à expansão ou pressão no solo. Quanto menor a espessura de solo acima da cavidade, menor o confinamento e mais imediatamente se mobilizaram os esforços no reforço. O mesmo foi observado em relação aos aterros com seção transversal trapezoidal.

- Em termos relativos, a presença da inclusão de reforço mostrou uma influência maior para cavidades mais rasas.

Deslocamentos dos marcos no aterro e deslocamentos superficiais do aterro

- Os marcos instalados no aterro permitiram avaliar os mecanismos de deslocamento na massa de areia. A presença da inclusão de reforço influenciou significativamente os deslocamentos superficiais, particularmente no caso do arranjo envelopado.

Mecanismos de ruptura dos maciços com e sem reforço

- Os aterros submetidos à simulação de explosão por meio da expansão de cavidade apresentaram mecanismos de ruptura muito diferentes, quando comparados os sistemas com e sem reforço. O mecanismo de ruptura mostrado por um aterro não reforçado se inicia com tendência vertical, como se fosse o levantamento vertical de uma placa horizontal de largura $2R$. À medida que a expansão da cavidade continua com o decorrer do ensaio surgem outras superfícies de ruptura, formando ângulos de inclinação com a vertical de valor cada vez maior.

- Em aterros reforçados a evolução das superfícies de ruptura seguiu o padrão semelhante ao de um sistema não reforçado e foi possível observar que outras superfícies de

ruptura foram atenuadas pela presença do reforço. No caso de reforço com geogrelha observou-se a passagem de areia através das aberturas na direção da expansão da cavidade.

- Nos ensaios de expansão de cavidade foram observadas diferenças no padrão de deformação da cavidade dentro do aterro. As formas adotadas pelas seções da tubulação dependeram dos tipos de arranjo dos reforços e dos tipos de reforços. No caso do arranjo envelopado, a cavidade se expandiu de forma mais circular, ao passo que no caso sem reforço o processo de expansão se assemelhou à forma de um ovo de cabeça para baixo.

- Os ensaios com reforço do tipo papel alumínio mostraram a tendência de ruptura do reforço por tração na linha de simetria do arranjo, localizada acima da cavidade de expansão.

- Os resultados de previsões e observações de pressões de cavidade na ruptura apresentaram boa concordância. Apesar do limitado número de dados, os resultados obtidos sugerem que, na ausência de métodos mais sofisticados, as soluções empregadas podem ser ferramentas úteis para estimativas preliminares de pressões máximas resistidas pelo solo devido à expansão de cavidade.

7.1.2 - SIMULAÇÃO DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES EM ESCALA REDUZIDA

- O vazamento de ar da tubulação enterrada com e sem reforço causou diversos efeitos no aterro. Os efeitos desencadeados pelo vazamento foram: a formação de domo de nuvem de areia, lançamento de solo, expansão do solo circundante e formação de uma cavidade ou bolha de gás. Após o vazamento observou-se a formação de cratera e espalhamento lateral do aterro. Os resultados das simulações de explosões de tubulações, em geral, mostraram que um aterro reforçado resulta afetado em menor grau em relação a um não reforçado.

Altura atingida e Domo de Nuvem de areia

- Em geral a altura atingida pelo solo lançado foi maior em aterros não reforçados do que em aterros reforçados.

- A quantidade de solo suspenso no caso de sistemas não reforçados foi proporcional à pressão interna de estouro da tubulação. Em geral, todos os sistemas reforçados simulados geraram menor quantidade de solo suspenso do que os sistemas não reforçados. Novamente, os melhores resultados foram obtidos para o arranjo envelopado.

- A expansão do ar comprimido em aterros em condições não reforçadas gerou formatos de nuvem de areia do solo suspenso mais alargados do que os gerados em aterros em condições reforçadas. Isto foi observado em todos os casos.

- Nos ensaios com reforço, a maior quantidade de solo suspenso ocorreu para o aterro reforçado com papel alumínio, devido à ruptura do reforço nesse ensaio. A menor quantidade de solo suspenso ocorreu para o aterro reforçado com geotêxtil tecido associado ao filme de PVC. O fechamento dos poros do geotêxtil pelo filme de PVC minimizou a dispersão de ar pela massa de solo, provocando menor suspensão do solo do aterro.

Solo Lançado e Crateras

- A quantidade de solo lançado foi maior em aterros sem reforço (para pressões internas que variaram de 550 kPa a 570 kPa) comparado aos aterros reforçados. Em geral, as crateras formadas em aterros sem reforço mostraram o seu fundo em forma de “V”.

- A menor quantidade de solo lançado foi observada em arranjo envelopado-geotêxtil-filme. No arranjo envelopado-papel alumínio ocorreu ruptura do reforço por tração, e o mesmo foi arrancado e lançado com o solo.

- Os deslocamentos no aterro foram observados pela construção de uma malha deformada com os marcos deslocados após explosão. A malha deformada foi construída abaixo da cratera real e, onde o solo sofreu deslocamentos suficientes para vencer a sua resistência ao cisalhamento. Em aterros sem reforço, os deslocamentos foram dramáticos, com mudanças violentas, sendo que os deslocamentos horizontais foram mais notórios do que os verticais; a região afetada acima da tubulação foi menor em ensaios reforçados. Os arranjos envelopados de geotêxtil e de geotêxtil-filme foram os que menores deslocamentos apresentaram. O arranjo envelopado com papel alumínio apresentou deslocamentos similares ao caso de aterro sem reforço, devido à ruptura do reforço. Neste caso, o reforço (papel

alumínio) apresentou uma textura gerada pela impressão dos grãos de areia em decorrência da expansão do ar comprimido. Essa textura foi observada nas quatro faces da superfície de envelopamento.

- A simulação de explosão de tubulação não enterrada gerou um grande impacto sonoro em relação a tubulações enterradas com e sem reforço, embora não tenha sido possível quantificar as amplitudes e frequências das ondas acústicas.

7.2 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As sugestões para pesquisas futuras são sumariadas a seguir:

- Realizar ensaios de expansão de cavidade com medições de pressões por meio de células de pressões totais posicionadas ao redor da cavidade.

- Realizar estudos de explosão de tubulações com medição das deformações da tubulação em função da pressão interna.

- Realizar estudos analíticos ou numéricos para o caso de uma explosão de um sistema de aterro, tubulação e reforço.

- Realizar ensaios em verdadeira grandeza, semelhantes aos ensaios dos modelos reportados nesta tese.

- Estudar a utilização de reforço como forma de proteger tubulações pressurizadas enterradas sujeitas a acidentes por impactos de equipamentos de escavação.

- Realizar ensaios de explosões instrumentadas com acelerômetros para a estimativa da energia dissipada.

- Realizar ensaios em tubulações enterradas em outros tipos de solos, particularmente solos finos. Também, estudar a aplicabilidade de outros tipos de reforços e arranjos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFER'EV, K. V.; BOROVNIKOV, V. V., AND LYUBARSKII, S. D. (2001). The Effect of Rigid Boundaries on the Directionality of an Excavating Explosion. Plenum Publishing Corporation; Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 37, No. 5, pp. 613-615.
- ANDRAWES, K.Z., MCGOWN, A., WILSON-FAHMY, R. F. & MASHHOUR, M. M. (1982). The Finite Element Method of Analysis Applied to Soil-Geotextile Systems. Second International Conference of Geotextiles, Las Vegas, USA, 695-700;
- BELTMAN, W. M. & SHEPHERD, J. E. (1998). Structural response of shells to detonation and shock loading-Parts I and II. GALCIT Report FM 98-3, Explosion Dynamics Laboratory, Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology, Pasadena.
- BELTMAN, W. M.; BURCSU, E. N.; SHEPHERD, J. E. & ZUHAL, L. (1999). The Structural Response of Cylindrical Shells to Internal Shock Loading. Journal of Pressure Vessel Technology, p. 315-322.
- BIEGANOUSKY, W. A. & MARCUSON, W. F. (1976). Uniform Placement of Sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, march-GT3, pp 229-233.
- BJERKETVEDT, D.; BAKKE, J.R. & WINGERDEN, K. (1997). Gas explosion handbook. Elsevier Science B.V., Vol. 52, 150 p.
- BLINOV, I. M. (2004). Mechanism and Conditions of Hill Formation at the Crater Bottom in an Excavation Explosion, UDC 622.235.5. Springer Science+Business Media, Inc. Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 40, No. 6, pp. 679-685.
- BOLTON, M.D. AND BAREFOOT, A.J. (1997). The variation of critical pipeline trench back-fill properties. IBC Conference on Risk-Based and Limit State Design and Operation of Pipelines, Aberdeen, Scotland, Vol. 1, p.1-26.
- BULSON, P. S. (1966). Blast Loading of Buried Square Tubes. Vibration in Civil Engineering, Proceedings of a Symposium Organized by the British National Section of the International Association for Earthquake Engineering, Held at Imperial College of Science and Technology, London, pp. 229-234.
- CAMPBELL, D. M. (1990). Avances en Geotextiles. Simposio sobre Geosintéticos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., México.
- CARLSON, R. H. and JONES, G. D. (1963). Distribution of Ejecta from Cratering Explosion in Soils. Journal of Geophysical Research, Vol. 70, No. 8, pp. 1897-1910.
- CHRISTIE, I.F. & EL HADI, K.M.; 1977. Some Aspects of the Design of Earths Dams Reinforced with Fabric. Int. Conf. on the Use of Fabrics in Geotechnics, Paris, 99-104;

- CHRISTOPHER, B.R., HOLTZ, R. D., & BELL, W. D. (1986). New Tests for Determining the in-soil stress-strain properties of geotextiles. Third International Conference on Geotextiles, Vienna, Austria, pp. 683-688;
- COLLINS, G. (2002). Numerical Modelling of Large Impact Crater Collapse. PhD, Thesis, Department of Earth Science and Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
- EL-FERMAOUI, A. & NOWATZKI, E.; 1982. Effect of Confining Pressure on Performance of Geotextiles in Soils. Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, 799-804;
- FORD, I. J. (1994). Rupture of pressurised tubes by multiple cracking and fragmentation. *Int. J. Pres. Ves. & Piping* 57 (1994) 21-29.
- GOMES, R. C. (1993). Interação Solo-Reforço e Mecanismos de Ruptura em Solos Reforçados com Geotêxteis. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 294p.
- HESS, W. N. and NORDIKE, M. D. (1961). Throwout Calculations for Explosion Craters. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, No. 10, pp. 3405-3412.
- HOLSAPPLE, K. A. and SCHMIDT, R. M. (1980). On the Scaling of Crater Dimensions 1. Explosive Processes. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. B12, pp. 7247-7256.
- INGOLD, T.S. & MILLER, K.S. (1988). *Geotextile Handbook*. Thomas Telford, London, 152 p.
- JEWELL, R. A.; MILLIGAN, G. W. E.; SARSBY, R. W. & DUBOIS, D. (1984). Interaction Between Soil and Geogrids. *Prod. Symp. on Polimer Grid Reinforcement*, ICE, London, paper 1.3.
- JOHN, N. W. M. (1987). *Geotextiles*. Blackie and Son Ltd. London, 347p;
- KINSMAN, P. & LEWIS, J. (2000). Report on a study of international pipeline accidents. Mechphyic Scientific Consultants, Contract Research Report 294/2000, Chester, Norwich, UK, 128 p.
- KOERNER, R. M. (1998). *Designing with Geosynthetics*, 4th Ed., Prentice Hall Inc., New Jersey, 775 p;
- KOKKALIS, A. & PAPACHARISIS, N.; 1989. A Simple Laboratory Method to Estimate the in-soil Behaviour of Geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 8, 147-157;
- LAM, A. & ZIELONKA, M. (2002). Fracture response of externally flawed thin-walled plastic tubes to gaseous detonation loading. Project Report Ae104c, Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology, 62 p.

- LANZ, D. (1992). Estudo de Deformabilidade e Tensões em Estruturas de Arrimo em Solo Reforçado com Geotêxteis. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 170 p.
- LIN, C. L.; GOODINGS, D. J.; BERNOLD, L. E.; DICK, R. D., and FOURNEY, W. L. (1994). Model Studied of Effects on Lunar Soil of Chemical Explosion. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 10, October, 1994, 1684-1703.
- MAITLAND, J. K. & SCHROEDER, W. L. (1979). Model Study of Circular Sheetpile Cells. *Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE*, Vol. 105, No. GT7, Proc. Paper 14712, July, pp. 805-821.
- MANFREDI, C. & OTEGUI, J.L. (2002). Failures by SCC in buried pipelines. *Engineering Failure Analysis* 9, Elsevier Science Ltd., Pergamon, pp. 495-509.
- MARTINS, C. C. (2000). Analise e Reavaliacao de Estruturas em solos Reforçados com Geotêxteis. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 270 p.
- MA QIN-YONG & CAI MEI-FENG (2003). Determination of Similarity of Explosions for a Model Experiment. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 39, N° 5, pp. 06-609.
- McGOWN, A., ANDRAWES, K. Z. & KABIR, M. H. (1982). Load-Extension Testing of Geotextiles Confined in Soil. *Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, III*, 793-798;
- MELOSH, H. J. (1980). Cratering Mechanics – Observational, Experimental, and Theoretical. *Annual Reviews Earth Planetary Science*, 1980, Vol. 8, pp. 65-93.
- MURPHEY, B. F. & VORTMAN, L.P. (1961). High-Explosive Craters in Desert Alluvium, Tuff, and Basalt. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, No. 10, pp. 3389-3404.
- MYLES, B.; 1982. Assessment of Soil Fabric Friction by Means of Shear. *Second International Conference on Geotextiles. Las Vegas, USA*, 787-791;
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2000a). Natural Gas Pipeline Rupture and Subsequent Explosion, St. Cloud, Minnesota, December 11, 1998. Pipeline Accident Report NTSB/PAR-00/01. Washington.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2000b). Natural Gas Pipeline Rupture and Fire Near Carlsbad, New Mexico. August 19, 2000. Pipeline Accident Report NTSB/PAR-03/01, Washington.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (1998). Pipeline Rupture And Release Of Fuel Oil Into The Reedy River At Fork Shoals, South Carolina, June 26, 1996. Pipeline Accident Report, NTSB/PAR-98/01, Washington.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (1999). Rupture and fire, Natural gas, Indianapolis, Indiana, July 21, 1997. Pipeline Accident Brief, Washington.

- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2000c). Pipe rupture, Diesel fuel, high sulfur, 86 Grade, Knoxville, Tennessee, February 9, 1999. Pipeline Accident Brief, Washington.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2000d). Hazardous Liquid Pipe failure and leak (Crude oil), LLC Winchester, Kentucky, January 27, 2000, Pipeline Accident Brief, Washington.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2001). Natural Gas Explosion and Fire in South Riding, Virginia July 7, 1998. Pipeline Accident Report, PB2001-916501, NTSB/PAR-01/01, Washington.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2000e). Rupture of Piney Point Oil Pipeline and Release of Fuel Oil Near Chalk Point, Maryland, April 7, 2000, Pipeline Accident Report, NTSB/PAR-02/01, Washington.
- NOGAMI, T. & ZHU, J. X. (1994). Transient Reponse of Finitely Long Cylindrical Cavity with Arbitrary Cross-Section. Elsevier Science Limited, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 13, pp. 31-43.
- NORDIKE, M. D. (1961). Nuclear Craters and Preliminary Theory of the Mechanics of Explosive Crater Formation. Journal of Geophysical Research, Vol. 66, No. 10, pp. 3439-3459.
- NORDIKE, M. D. (1962). An Analysis of Cratering Data from Desert Alluvium. Journal of Geophysical Research, Vol. 67, No. 5, pp. 1965-1974.
- OBERBECK, V. R. (1971). Laboratory Simulation of Impact Cratering with High Explosives. Journal of Geophysical Research, Vol. 76, No. 23, pp. 5732-5749.
- OHBA, T.; TANIGUCHI, H.; OSHIMA, H.; YOSHIDA, M., AND GOTO, A. (2002). Effect of Explosion Energy and Depth on the of Explosion Cloud – A Field Experimental Study. Elsevier Science B. V. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 115 (2002), pp 33-42.
- PALMEIRA, E.M. (1993). Curso de Estabilização e Reforço de Solos Introdução a Utilização de Geossintéticos. Publicação GAP002B/93, Área de Geotecnia/ENC/FT/UnB, Brasília/DF, 165 p.;
- PALMEIRA, E. M. & MILLIGAN, G. W. E. (1989). Scale and other Factors Affecting the Results of Pull-out Tests of Grids Buried in Sands. Geotechnique, 39, (3), 511-524.
- PALMEIRA, E. M. (1987). The Study of Soil Reinforcement Interaction by Means of Large Scale Laboratory Tests. D.Phil. Thesis, University of Oxford, 237 p.
- PALMEIRA, E.M. (1999). Solo Reforçado, Huesker LTDA. São Paulo, 16 p.
- PALMEIRA, E.M. (2001). Estruturas de Contenção e Taludes Ingremes Reforçados com Geossintéticos. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Área de Geotecnia/ENC/FT/UnB, Brasília/DF.

- PALMEIRA, E.M. (2005). Estimativa teórica de cavidades pressurizadas em solos reforçados e não reforçados. Relatório de Pesquisa PPGEMP-01/05, Programa de Pós-graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil.
- PIMENTEL, K.C.A. (2003). Tubulações Pressurizadas em Aterros Reforçados com Geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 213 p.
- RANKILOR, P. R. (1981). Membranes in Ground Engineering, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 387 p.
- RICHARDS, E.A. & SCOTT, J.D.; 1985. Soil Geotêxtil Frictional Properties. 2nd. Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes, Edmonton, Alberta, Canada, 13-24;
- ROGERS, C. D .F. & CHAPMAN, D. N. (1998). Analytical Modelling of Ground Movements Associated with Trenchless Pipelaying Operations. Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng., Vol. 131, Oct., pp. 210-222.
- ROSSIGNEL, P. (2004). Pipeline explosion in Belgium. Reuters News Agency-Folha de Sao Paulo On Line of July 30th 2004 (in Portuguese).
- ROWE, R.K. AND DAVIS, E.H. (1982). The behaviour of anchor plates in sand. Geotechnique 32 (1), pp. 25-41.
- SELVADURAI, A. P. S. (1989). Enhancement of the uplift capacity of buried pipelines by the use of geogrids. Geotechnical Testing Journal GTJODI, Vol. 12, No. 3, pp. 211-216.
- SHARMA, H.D. & HULLINGS, D.E.; 1993. Direct Shear Testing for HDPE/Amended Soil Composites. Geosynthetics '93, Vancouver, Canada, 1469-1481.
- SWAN Jr, R.H.; 1987. The Influence of Fabric Geometry on Soil/Geotextile Shear Strength. Geotextiles and Geomembranes, 6, 81-87;
- TAGAYA, K., SCOTT, R.F., ABOSHI, H., (1987). Centrifugal test on pullout resistance of buried anchor in sand. Prediction and Performance in Geotechnical Engineering, Calgary, Canada, pp. 407-418.
- THOMAS, G. O. & OAKLEY, G. L. (1998). The Dynamic Response and Potential Failure of Pipes and Supports to Internal Explosions. Centre for Explosion Studies, University of Wales Aberystwyth, UK, ERA conference London.
- TRAUTMANN, C. H.; O'ROURKE, T. D. & KULHAWY, F. H. (1985). Uplift Force-Displacement Response of Buried Pipe. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, Nº 9, September, pp. 1061-1075.
- TUPA, N. & PALMEIRA, E. M. (2005). Geosynthetics Reinforcement for the Reduction of the Effects of Explosions of Pressurised Buried Pipes. Geotextile & Geomembranes, (aceitado para publicacao, Geofrontiers 2005 edicao especial).

- TUPA, N. (1994). Estudo da Aderencia e Interação Solo-Geossintético. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília DF, 188p.
- TUPA, N. e PALMEIRA, M. E. (2003). Relatório de Atividades-Período/2002, PEC-PG, CNPq. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental Universidade de Brasília, Brasília, 12 p.
- VESIĆ, A. S. (1965). Cratering by Explosives as an Earth Pressure Problem. Proceedings, Sixth International Conference Soil Mechanics Foundation Engineering, Montreal, Canada, 1965, Vol. 2, pp. 427-431.
- VESIC, A.S. (1971). Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, SM9, September, pp. 1183-1205.
- VESIC, A.S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, SM3, March, pp. 265-290.
- VIOLET, C. E. (1961). A Generalized Empirical Analysis of Cratering. Journal of Geophysical Research, Vol. 66, No. 10, pp. 3461-3470.
- WHITE, D.J., BAREFOOT, A.J. AND BOLTON, M.D. (2001). Centrifuge modelling of upheaval buckling in sand. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2, pp. 19-28.
- WHITE, J. W. (1971). Examination of Cratering Formulas and Scaling Methods. Journal of Geophysical Research, Vol. 76, No. 35, pp. 8599-8603.
- WINGERDEN, K. V.; BJERKETVEDT, D. & BAKKE, J. R. (1999). Detonations in Pipes and in the Open. Christian Michelsen Research and GexCon, Bergen; Telemark Høgskole, Porsgrunn, Norway.
- YU, H. S. & CARTER, J. P. (2002). Rigorous Similarity Solutions for Cavity Expansion in Cohesive-Frictional Soils. The International Journal Geomechanics, Vol. 2, N° 2, pp. 233-258.
- ZORNBERG, J.G. & MITCHELL, J.K. (1992). Poorly Draining Backfills for Soil Structures "A State of the Art Review". Geotechnical Engineering Report UCB/GT/92-10, Depart. Civil Engineering, University of California, 110 p.

APÉNDICE A

Ensaio de explosões de tubulações sob pressão. Listagem de Ensaio e Calibrações.

Data	Ensaio	Fotografia	Abreviação
05/01/03	Sem-Reforço	173-185	E/SEM REFORÇO/AH/7R
16/01/03	Calibração		
26/01/03	E0, sem reforço	sem.registro	E/SEM REFORÇO/AH/7R
06/02/03	E1, papel alumínio 6R, H-7R	274-324	E/CAQ/PAL-AA/AH/7R
14/02/03	E2 papel alumínio 10R, H-7R	325-364	E/CAV/PAL-AA/AH/7R
19/02/03	E3 papel alumínio 14R, H-7R	382-426	E/CAT/PAL-AA/AH/7R
22/02/03	E4, sem reforço	427-465	E/SEM REFORÇO/AH/7R
17/03/03	Calibração	472-494	
24/03/03	Calibração		
27/03/03	Calibração	540-565	
01/04/03	Sem Reforço, H-7R	566-592	E/SEM REFORÇO/AH/7R
03/04/03	Calibração	603-625	
07/04/03	150 mm, geolon, H-7R	628-655	E/CAQ/GTX-GG/AH/7R
09/04/03	Calibração	670-694	
13/04/03	250 mm, geolon, H-7R	696-735	E/CAV/GTX-GG/AH/7R
15/04/03	Calibração	739-761	
16/04/03	Calibração	765-788	
17/04/03	350 mm, geolon, H-7R	789-814	E/CAR/GTX-GG/AH/7R
22/04/03	Calibração	821-874	
24/04/03	150 mm, fortrac, H-7R	875-909	E/CAQ/GGR-FF/AH/7R
29/04/03	Calibração	910-932	
01/05/03	350 mm, fortrac, H-7R	941-959	E/CAR/GGR-FF/AH/7R
05/05/03	Calibração	960-982	
08/05/03	350 mm, fortrac, H-7R (2)	986-1006	E/CAR/GGR-FF/AH/7R(2)
15/05/03	Teste de envelopamento papel al.	1012-1017	
16/05/03	Teste de envelopamento papel al.	1021-1028	
21/05/03	Calibração	1029-1043	
25/05/03	250 mm, fortrac, H-7R	1053-1074	E/CAV/GGR-FF/AH/7R
02/06/03	Calibração.	1014-1126	

07/06/03	U-invertido u-4R papel alumínio, H-7R	1126-1146	E/U4R/PAL-AA/AH/7R
19/06/03	Calibração	1184-1213	
20/06/03	Calibração	1219-1242	
23/06/03	U-invertido u-4R geolon, H-7R	1259-1296	E/U4R/GTX-GG/AH/7R
01/07/03	Calibração	1317-1338	
04/07/03	Calibração	1361-1371	
07/07/03	U-invertido u-4R fortrac, H-7R	1393-1414	E/U4R/GGR-FF/AH/7R
21/07/03	Calibração	1437-1454	
22/07/03	U-invertido u-6R propex, H-7R	1464-1498	E/U6R/GTX-PP/AH/7R
25/07/03	Calibração	1517-1540	
28/07/03	envelopado, p. al. H-7R	1548-1570	E/E4R/PAL-AA/AH/7R
04/08/03	Calibração	1605-1617	
04/08-03	Calibração	1626-1646	
06/08/03	U-invertido u-6R fortrac, H-7R	1658-1683	E/U6R/GGR-FF/AH/7R
12/08/03	Calibração	1701-1723	
19/08/03	envelopado 4R, fortrac, H-7R	1751-1780	E/E4R/GGR-FF/AH/7R
06/09/03	Calibração	1802-1820	
16/09/03	envelopado 4R, fortrac, H-7R(2)	1835-1871	E/E4R/GGR-FF/AH/7R (2)
19/09/03	Calibração	1895-1914	
20/09/03	Calibração	1915-1938	
24/09/03	Envelopado 4R, propex, H-7R	1947-1984	E/E4R/GTX-PP/AH/7R
01/10/03	Calibração	2007-2014	
01/10/03	Calibração	2015-2038	
03/10/03	Sem Reforço-Aterro-7R	2045-2062	E/SEM REFORÇO/AT/7R
07/10/03	Calibração	2074-2090	
09/10/03	Camada, p. al. Aterro-7R	2109-2119	E/CAT/PAL-AA/AT/7R
14/10/03	Calibração	2144-2163	
15/10/03	Envelopado, p. al., aterro-7R	2164-2188	E/E4R/PAL-AA/AT/7R
16/10/03	Calibração	2209-2227	
19/10/03	U-invertido u-6R, p. al., aterro-7R	2228-2246	E/U6R/PAL-AA/AT/7R
21/10/03	Calibração	2260-2278	
23/10/03	U-invertido u-6R, propex, aterro-7R	2283-2301	E/U6R/GTX-PP/AT/7R
25/10/03	Calibração	2309-2324	

27/10/03	Camada, propex, aterro-7R	2328-2344	E/CAT/GTX-PP/AT/7R
27/10/03	Calibração	2358-2372	
29/10/03	Envelopado 4R, propex, aterro-7R	2373-2392	E/E4R/GTX-PP/AT/7R
03/11/03	Calibração	2402-2417	
05/11/03	Camada, fortrac, aterro-7R	2423-2443	E/CAT/GGR-FF/AT/7R
09/11/03	Calibração	2458-2475	
11/11/03	Envelopado 4R, fortrac, aterro-7R	2476-2501	E/E4R/GGR-FF/AT/7R
14/11/03	Calibração	2509-2525	
15/11/03	U-invertido u-6R, fortrac, aterro-7R	2537-2560	E/U6R/GGR-FF/AT/7R
21/11/03	Calibração	2571-2585	
22/11/03	U-invertido u-6R, fortrac, H-7R (2)	2586-2613	E/U6R/GGR-FF/AH/7R (2)
25/11/03	Calibração	2619-2635	
25/11/03	U-invertido u-6R, fortrac, aterro-7R (2)	2637-2655	E/U6R/GGR-FF/AT/7R (2)
29/11/03	Calibração	2666-2678	
29/11/03	Envelopado 4R, propex, aterro-7R	2681-2705	E/E4R/GTX-PP/AT/7R
08/12/03	Calibração	2723-2736	
08/12/03	Sem Reforço, H-4R	2738-2752	E/SEM REFORÇO/AH/4R
09/12/03	Calibração	2754-2769	
10/12/03	U-invertido u-6R, propex, H-4R	2772-2789	E/U6R/GTX-PP/AH/4R
18/12/03	Calibração	2829-2843	
19/12/03	Sem Reforço, aterro-4R	2848-2860	E/SEM REFORÇO/AT/4R
26/12/03	Calibração	2869-2882	
27/12/03	Envelopado 4R, p. al., aterro-4R	2884-2901	E/E4R/PAL-AA/AT/4R
28/12/03	Calibração	2915-2927	
29/12/03	Envelopado 4R, propex, aterro-4R	2928-2951	E/E4R/GTX-PP/AT/4R
29/12/03	Calibração	2964-2976	
30/12/03	Sem Reforço, aterro-2R	2977-2993	E/SEM REFORÇO/AT/2R
30/12/03	Calibração	3001-3014	
31/12/03	Envelopado 4R, p. al., aterro-2R	3016-3030	E/E4R/PAL-AA/AT/2R
02/01/04	Calibração	3042-3055	
03/01/04	Envelopado 4R, propex, aterro-2R	3056-3077	E/E4R/GTX-PP/AT/2R
04/01/04	Calibração	3089-3101	
04/01/04	U-invertido u-6R, propex, aterro-2R	3103-3115	E/U6R/GTX-PP/AT/2R

07/01/04	Calibração	3129-3142	
09/01/04	Sem Reforço, H-2R	3143-3155	E/SEM REFORÇO/AH/2R
14/01/04	Calibração	3165-3176	
16/01/04	U-invertido-6R, propex, H-2R	3184-3200	E/U6R/GTX-PP/AH/2R
19/01/04	Calibração	2137-3232	
19/01/04	Sem Reforço, H-11R	3235-3256	E/SEM REFORÇO/AH/11R
21/01/04	U-invertido u-6R, propex, H-11R	3280-3307	E/U6R/GTX-PP/AH/11R

APÉNDICE B

Ensaio de simulação de explosões de tubulações sob pressão. Listagem de Ensaio.

Arranjo de Simulação	p_i (kPa).
Sem Reforço, I, AT-4R. (D/SEM REFORÇO/AT/4R (I))	520
Sem Reforço, II, AT-4R. (D/SEM REFORÇO/AT/4R (II))	550
Sem Reforço, III, AT-4R. (D/SEM REFORÇO/AT/4R (III))	570
U-Invertido5R, Geogrelha F, AT-4R. (D/U5R/GGR-FF/AT/4R)	580
Camada, Geotêxtil S, AT-4R. (D/CAT/GTX-SS/AT/4R)	580
U-Invertido5R, Geotêxtil S, AT-4R. (D/U5R/GTX-SS/AT/4R)	550
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-4R. (D/E3R/GTX-SS/AT/4R)	590
Envelopado3R, Geogrelha F, AT-4R. (D/E3R/GGR-FF/AT/4R)	550
Envelopado3R, Geotêxtil S-Filme, AT-4R. (D/E3R/GTX-SV/AT/4R)	560
Envelopado3R, Papel Alumínio, AT-4R. (D/E3R/PAL-AA/AT/4R)	570
Envelopado4R, Geotêxtil S, AT-4R. (D/E4R/GTX-SS/AT/4R)	600
Envelopado4R, Geogrelha F-Brita, AT-4R. (D/E4R/GGR-FB/AT/4R)	520
Sem Reforço, AT-2R. (D/SEM REFORÇO/AT/2R).	550
Envelopado3R, Geotêxtil S, AT-2R. (D/E4R/GTX-SS/AT/2R).	600