

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

**PROTEÇÃO DE TUBULAÇÕES ENTERRADAS CONTRA
DANOS MECÂNICOS COM A UTILIZAÇÃO DE REFORÇO
GEOSSINTÉTICO**

HELLEN KAROLINE PORFÍRIO DE ARAÚJO ANDRADE

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G. DM 172/2009

BRASÍLIA / DF: MARÇO/2009

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

**PROTEÇÃO DE TUBULAÇÕES ENTERRADAS CONTRA
DANOS MECÂNICOS COM A UTILIZAÇÃO DE REFORÇO
GEOSSINTÉTICO**

HELLEN KAROLINE PORFÍRIO DE ARAÚJO ANDRADE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

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

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

**ANNA LAURA LOPES DA SILVA NUNES, PhD (COPPE/UFRJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**RENATO PINTO DA CUNHA, PhD (UnB)
(SUPLENTE)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 13 de Março de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

ANDRADE, HELLEN KAROLINE PORFÍRIO DE ARAÚJO.

Proteção de Tubulações Enterradas Contra Danos Mecânicos com a Utilização de Reforço Geossintético. [Distrito Federal] 2009

xxiv, 99 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2009)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Geogrelha

2. Tubulações Enterradas

3. Geotêxtil Tecido

4. Ferramentas de Escavação

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANDRADE, H.K.P.A (2009). Proteção de Tubulações Enterradas Contra Danos Mecânicos com a Utilização de Reforço Geossintético. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-172/2009, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Hellen Karoline Porfírio de Araújo Andrade.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Proteção de Tubulações Enterradas Contra Danos Mecânicos com a Utilização de Reforço Geossintético.

GRAU / ANO: Mestre / 2009

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

Hellen Karoline Porfírio de Araújo Andrade

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e Ambiental – Prédio SG-12, Universidade de Brasília.

CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

hellenporfirio@yahoo.com.br

“Ensina-nos a contar os nossos dias para que o nosso coração alcance sabedoria.”

Salmos 90:12

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter permitido e conduzido a realização deste sonho.

Agradeço a minha mãe, Carol, primeiramente pelo esforço em prol da minha formação profissional e pessoal. Obrigada também pela força e otimismo contagiantes transmitidos nos momentos difíceis. Obrigada, pois sei que mesmo sentindo a minha ausência, sempre foi minha primeira incentivadora. Essa conquista também é sua.

Ao meu amado esposo, Alisson, por ser “o melhor marido de todos”. Obrigada por entender minha falta de tempo para fazer todas as sobremesas gostosas que você merece. Ficamos longe de nossas famílias e apostamos juntos nessa empreitada. Serei eternamente grata por isto.

Ao meu querido irmão com quem pude contar em todos os momentos. Você foi meu exemplo de determinação e força de vontade desde a saudosa época do colegial.

Ao meu pai pela torcida.

Ao Prof. Ennio Marques Palmeira não somente pela efetiva e presente orientação, imprescindíveis para a realização deste trabalho, mas também pelo exemplo de profissional.

Agradeço ao Professor Nilton Pereira de Andrade da UFPB que me permitiu o primeiro contato com a pesquisa através do PIBIC, me proporcionando grande aprendizado.

Aos colegas da Geotecnia, Gregório Araújo e Paulo Vianna pelas valiosas dicas e conselhos transmitidos ao longo de minha pesquisa. Obrigada também pelas pizzas compartilhadas no laboratório de Geotecnia, que tornaram momentos de meu trabalho mais descontraídos.

À turma de mestrado de 2007.1 pelos momentos de companheirismo que passamos juntos.

Às “meninas da república da Geotecnia”, Joseleide Pereira, Claudia Champi e Angela Almeida com quem pude conviver alguns meses. Nossos momentos de companheirismo e algumas vezes de desentendimentos foram importantes para mim.

Aos “novos” familiares de Brasília pela solidariedade prestada. Principalmente pelo apoio nos momentos de minha chegada.

Aos casais Francis e Paula e Régio e Talita pelos momentos de comunhão principalmente nos “experimentos de cozinha” aos domingos e saídas nos finais de semana, que tornaram nossa estada (minha e do Alisson) menos solitária.

Aos técnicos do laboratório de Geotecnia pela “forcinha”. Eu não teria conseguido encher “a caixa” de areia tantas vezes sem o auxílio de vocês!

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB que contribuíram com a minha formação profissional.

Ao CNPq e à Petrobras pelo apoio financeiro e incentivo a pesquisa.

A todos que, embora não tenham sido acima citados, contribuíram de alguma forma com essa pesquisa.

RESUMO

No cenário do mundo atual, o gás natural passou a assumir papel relevante na matriz energética do país. Seu consumo tem aumentado substancialmente nas últimas décadas. Redes de dutos metálicos são amplamente utilizadas como meio eficiente para o seu transporte e também para o transporte de petróleo e outros derivados. Para que estes produtos sejam transportados das fontes de produção até os centros de consumo, a infra-estrutura necessária requer, muitas vezes, que o subsolo de regiões urbanas, industriais e até mesmo rurais seja cortado por uma ampla rede de tubulações enterradas. Nestes ambientes, estas estruturas estão sujeitas às influências do meio, movimentações do solo e à ação de terceiros. Por conta desses fatores, muitos acidentes vêm sendo reportados na literatura. Uma das principais causas apontadas é o desconhecimento da existência destas tubulações enterradas. Grande parte dos acidentes é proveniente de danos provocados nas tubulações por impactos de ferramentas de escavação. Estes acidentes, geralmente seguidos por explosões ou incêndios, trazem graves conseqüências ao meio ambiente e à sociedade, geralmente envolvendo vítimas fatais.

Este trabalho investiga o uso de geossintéticos para proteção de tubos enterrados contra danos causados por ferramentas de escavação. Para avaliar a influência da presença do geossintético como camada protetora, foram executados experimentos em laboratório em escala reduzida. Foi utilizado um tubo de aço instrumentado enterrado em um maciço de areia. Um objeto contundente (OC), simulando uma ferramenta de escavação, foi forçado a penetrar na massa de areia com inclinações variadas. Foram avaliados os efeitos de tal penetração no tubo, que foi instrumentado com extensômetros elétricos em vários pontos ao longo do seu perímetro. Células de tensões totais foram instaladas no interior do maciço onde o tubo foi enterrado a fim de medir os incrementos de tensão causados pela penetração do OC. Os geossintéticos (geogrelha e geotêxtil tecido) foram instalados no interior do maciço em diferentes configurações geométricas.

Os resultados obtidos mostraram o potencial da utilização de reforço geossintético como elemento de proteção de tubulações enterradas. A presença do reforço no maciço causou um aumento significativo na força requerida para penetração da ferramenta em comparação à situação sem a presença do reforço. Em alguns casos, a inclusão aumentou a resistência à penetração em até nove vezes. O estado de tensões no maciço também foi favoravelmente alterado na maioria dos casos reforçados e as deformações sofridas pelo tubo foram reduzidas.

ABSTRACT

In the modern world, natural gas has assumed a relevant role in the energy sector. His consumption has increased substantially in the last decades. Networks of metallic pipes are used thoroughly as an efficient way for its transport and also for the transport of oil and other derived products. In order to transport these products from the production sources to the consumption centers, the necessary infrastructure requires, many times, that the underground of urban, industrial and even rural areas be cut by a wide network of buried pipes. In those areas, these structures are subjected to the influences of the environment, soil movements and to the action of third parties. Many accidents have been reported in the literature. One of the main causes of accidents is the unawareness of the existence of these buried pipes. Most of the accidents is originated from damages in the pipelines caused by impacts of excavating tools. These accidents, usually followed by explosions or fire, bring serious consequences to the environment and the society, usually involving fatal victims.

This work investigates the use of geosynthetics to protect buried pipes against damages caused by excavating tools. To assess the influence of the presence of the geosynthetic protective layer, model scale experiments were executed in laboratory. An instrumented steel pipe buried in dense sand was used and a wedge simulating an excavating tool was forced to penetrate in the sand mass with varying inclinations to the vertical direction. The effects on the pipe behaviour generated by such penetration were assessed through the use of strain gauges installed in several points along the perimeter of the pipe. Total pressure cells were installed inside the sand mass where the pipe was buried in order to measure the stress increments caused by the penetration of the excavating tool. The geosynthetics (geogrid and woven geotextile) were installed inside the sand mass in different geometrical arrangements.

The results obtained showed the potential for the use of geosynthetics materials as protective elements for buried pipes. The presence of the reinforcement in the sand mass caused a significant increase on the force required for tool penetration in comparison with the situation without the presence of the reinforcement. In some cases, the presence of the reinforcement increased the resistance against tool penetration up to nine times. The total stresses in the sand mass were also favorably altered in most of the reinforced cases and the strains in the pipe were reduced.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 APRESENTAÇÃO DO MÉTODO	2
1.3 OBJETIVO DA PESQUISA	3
1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	3
CAPÍTULO 2	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 OS GEOSSINTÉTICOS	4
2.1.1 TIPOS E CLASSIFICAÇÃO	4
2.1.2 PRINCIPAIS FUNÇÕES E PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS	6
2.2 TUBULAÇÕES ENTERRADAS E GEOSSINTÉTICOS	7
2.2.1 ACIDENTES ENVOLVENDO TUBULAÇÕES ENTERRADAS	8
2.2.2 O USO DE REFORÇO GEOSSINTÉTICO VISANDO A PROTEÇÃO DE TUBULAÇÕES ENTERRADAS CONTRA DANOS.	12
CAPÍTULO 3	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 INTRODUÇÃO	18
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	18

3.2.1 AREIA	19
3.2.2 GEOSINTÉTICOS	20
3.2.3 TUBO.....	21
3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	21
3.3.1 A CAIXA DE ENSAIOS.....	22
3.3.2 O EQUIPAMENTO PARA PREPARAÇÃO DOS ATERROS	22
3.3.3 A ESTRUTURA DE REAÇÃO	23
3.3.4 O OBJETO CONTUNDENTE (OC).....	24
3.3.5 MARCOS DE REFERÊNCIA.....	24
3.4 A INSTRUMENTAÇÃO.....	25
3.4.1 O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SPIDER).....	26
3.4.2 CÉLULA DE CARGA	27
3.4.3 CÉLULA DE TENSÃO TOTAL.....	28
3.4.4 EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS.....	29
3.4.5 TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTOS.....	30
3.5 METODOLOGIA DOS ENSAIOS	31
3.5.1 AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS	31
3.5.2 CÓDIGOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS ENSAIOS.....	33
3.5.3 PREPARAÇÃO DO TUBO	35
3.5.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	37

3.5.5 MONTAGEM DO ENSAIO.....	37
3.5.6 PROCEDIMENTO DO ENSAIO.....	38
3.6 REPETIBILIDADE DOS RESULTADOS	40
CAPÍTULO 4.....	42
4. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DO REFORÇO NAS CARGAS E TENSÕES MEDIDAS NOS ENSAIOS.....	42
4.1 INTRODUÇÃO	42
4.2 ESTUDO DO MECANISMO DE PENETRAÇÃO DO OBJETO CONTUNDENTE (OC) NO MACIÇO.....	42
4.2.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA NA VERTICAL ($\alpha=0^0$)	43
4.2.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 16^0 ($\alpha=16^0$).....	47
4.2.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 45^0 ($\alpha=45^0$).....	51
4.2.4 COMENTÁRIOS SOBRE O ESTUDO DO MECANISMO DE PENETRAÇÃO DO OBJETO CONTUNDENTE (OC) NO MACIÇO	53
4.3 ESTUDO DAS TENSÕES DESENVOLVIDAS NO MACIÇO E NAS VIZINHANÇAS DO TUBO.....	55
4.3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA NA VERTICAL ($\alpha=0^0$)	56
4.3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 16^0 ($\alpha=16^0$).....	64
4.3.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 45^0 ($\alpha=45^0$).....	71
CAPÍTULO 5.....	74

5. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DO REFORÇO NAS DEFORMAÇÕES NO TUBO DEVIDO À PENETRAÇÃO DO OBJETO CONTUNDENTE	74
5.1 INTRODUÇÃO	74
5.2 ESTUDO DAS DEFORMAÇÕES DO TUBO	74
5.2.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA NA VERTICAL ($\alpha=0^0$)	74
5.2.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 16^0 ($\alpha=16^0$)	85
5.2.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 45^0 ($\alpha=45^0$)	91
CAPÍTULO 6.....	94
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	94
6.1 INTRODUÇÃO	94
6.2 CONCLUSÕES	94
6.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mecanismo de dano em tubulações enterradas (modificado – Tupa, 2006)	2
Figura 2.1. Classificação dos geossintéticos.....	5
Figura 2.2. Geossintéticos: (a) Geotêxtil tecido; (b) Geogrelhas (Palmeira, 1993).....	5
Figura 2.3. Interação solo-geossintético (Palmeira, 1993).	7
Figura 2.4. Acidente decorrente de vazamento em uma tubulação de gás em Bergenfield, Nova Jersey: (a) Incêndio causado após vazamento; (b) Esquema do local do acidente (modificado - National Transportation Safety Board, 2007a).	10
Figura 2.5. Acidente decorrente de vazamento em uma tubulação de gás em St. Cloud, Minnesota: (a) Instrumento que atingiu a tubulação de gás; (b) Conseqüências da explosão (modificado - National Transportation Safety Board, 2000).	11
Figura 2.6. Ruptura de tubulação de gás natural (National Transportation Safety Board, 1999). 12	
Figura 2.7. Deflexões no conduto (modificado - Viana e Bueno, 1998 <i>apud</i> Viana, 2003).	13
Figura 2.8. Geossintéticos para redução de tensões verticais em tubos em valas ou aterros (Viana, 2003).	13
Figura 2.9. Representação típica das tensões geradas no tubo: (a) Ensaio de referência; (b) Sistema Geovalã (modificado - Viana, 2003).	14
Figura 2.10. Mecanismos simulados nos ensaios de Tupa (2006): (a) expansão de cavidade (b) vazamento em tubulação enfraquecida.	15
Figura 2.11. Ensaio de expansão de cavidade (modificado - Tupa 2006).	15
Figura 2.12. Elevação do solo devido à ruptura da tubulação: (a) Frontal; (b) Lateral (Tupa, 2003).	16

Figura 2.13. Arranjos dos geossintéticos: (a) Camada; (b) U invertido; (c) Envelopado (Tupa, 2003).	16
Figura 3.1. Formato dos grãos do solo utilizado nos ensaios.	19
Figura 3.2. Curvas de distribuição granulométrica da areia utilizada (Tupa, 2006).....	20
Figura 3.3. Geossintéticos utilizados nos ensaios: (a) Geotêxtil Tecido; (b) Geogrelha.	21
Figura 3.4. Caixa de ensaios.	22
Figura 3.5. Equipamento para execução dos ensaios.....	23
Figura 3.6. Arranjo do objeto contundente (OC): (a) OC; (b) Conjunto que permitia a penetração do OC no maciço; (c) Fixação do OC na estrutura de reação.....	24
Figura 3.7. Marcos de referência utilizados: (a) Início do ensaio; (b) Final do ensaio.	25
Figura 3.8. Posição da instrumentação nos ensaios.	26
A Figura 3.9. Sistema de aquisição de dados (Spider).	27
Figura 3.10. Célula de carga e leitora digital.	27
Figura 3.11. Modelo das células de tensões totais utilizadas nos ensaios.	28
Figura 3.12. Calibração das células de tensão total.	29
Figura 3.13. Extensômetros elétricos e terminais soldáveis utilizados nos ensaios.	30
Figura 3.14. Calibração do transdutor de deslocamento.....	31
Figura 3.15. Configurações geométricas dos reforços: (a) Camada; (b) U invertido; (c) Envelopado.	32
Figura 3.16. Ângulos de aplicação de cargas: (a) Direção de penetração do OC na vertical; (b) Direção de penetração do OC com $\alpha=16^0$; (c) Direção de penetração do OC com $\alpha=45^0$	32

Figura 3.17. Posição do tubo com relação à direção de penetração do OC: (a) Direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo.	33
Figura 3.18. Seqüência de preparação do tubo.	36
Figura 3.19. Etapas de montagem dos ensaios.	38
Figura 3.20. Vista geral de um ensaio montado e em andamento.	39
Figura 3.21. Dinâmica do ensaio: (a) Início do ensaio; (b) Final do ensaio.	40
Figura 3.22. Repetibilidade dos ensaios de referência com carga aplicada na vertical.	41
Figura 3.23. Repetibilidade dos registros da célula de tensão total.	41
Figura 4.1. Esquema dos ensaios realizados com aplicação de carga na vertical.	43
Figura 4.2. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha em arranjo em camada.	44
Figura 4.3. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha em arranjo U invertido.	45
Figura 4.4. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha em arranjo envelopado.	47
Figura 4.5. Esquema dos ensaios realizados com aplicação de carga inclinada ($\alpha=16^0$): (a). Direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b). Direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo.	48
Figura 4.6. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha em arranjo envelopado - OC inclinado de 16^0 sobre direção passando pelo centro do tubo.	49

Figura 4.7. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geogrelha em arranjo envolpado - OC inclinado de 16^0 sobre direção passando na lateral do tubo: (a) Variações em função de d; (b) Variações em função de d'.	50
Figura 4.8. Posição final do OC: (a) Direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo.	51
Figura 4.9. Esquema dos ensaios realizados com aplicação de carga inclinada ($\alpha=45^0$). (a) Início do ensaio; (b) Final do ensaio.	52
Figura 4.10. Resultados dos ensaios em aterros sem reforço e reforçados com geogrelha em arranjo envolpado - OC inclinado de 45^0	52
Figura 4.11. Posição das células de tensão no interior do maciço em relação ao tubo.....	56
Figura 4.12. Posição das células de tensão em relação aos reforços: (a) Configuração em camada; (b) Configuração em U invertido (c) Configuração envolpada.	56
Figura 4.13. Registros da célula de tensão 01 para ensaios com aplicação de carga na vertical ($\alpha = 0^0$): (a) Ensaios com configurações em camada; (b) Ensaios com configurações em U invertido (c) Ensaios com configurações envolpadas.....	58
Figura 4.14. Registros da célula de tensão 02 para ensaios com aplicação de carga na vertical ($\alpha = 0^0$): (a) Ensaios com configurações em camada; (b) Ensaios com configurações em U invertido (c) Ensaios com configurações envolpadas.....	59
Figura 4.15. Registros da célula de tensão 03 para ensaios com aplicação de carga na vertical ($\alpha = 0^0$): (a) Ensaios com configurações em camada; (b) Ensaios com configurações em U invertido (c) Ensaios com configurações envolpadas.....	61
Figura 4.16. Registros da célula de tensão 04 para ensaios com aplicação de carga na vertical ($\alpha = 0^0$): (a) Ensaios com configurações em camada; (b) Ensaios com configurações em U invertido (c) Ensaios com configurações envolpadas.....	63

Figura 4.17. Registros da célula de tensão 01 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16° ($\alpha = 16^{\circ}$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.	65
Figura 4.18. Registros da célula de tensão 02 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16° ($\alpha = 16^{\circ}$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.	66
Figura 4.19. Registros da célula de tensão 03 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16° ($\alpha = 16^{\circ}$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.	67
Figura 4.20. Registros da célula de tensão 04 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16° ($\alpha = 16^{\circ}$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.	69
Figura 4.21. Registros da célula de tensão 05 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16° ($\alpha = 16^{\circ}$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.	70
Figura 4.22. Registros das células de tensão instaladas nos ensaios com ângulo de aplicação de carga de 45° ($\alpha = 45^{\circ}$): (a) Registros da célula 01; (b) Registros da célula 02; (c) Registros da célula 03; (d) Registros da célula 04; (e) Registros da célula 05.....	73
Figura 5.1. Deformações medidas em seis pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio de referência (0-SR): (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.....	75
Figura 5.2. Deformações máximas registradas no tubo para o ensaio de referência (0-SR).	76
Figura 5.3. Deformações medidas em seis pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GG-C: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.	77
Figura 5.4. Deformações medidas em seis pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GG-C(R): (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.	77

Figura 5.5. Deformações medidas em seis pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GT-C: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.....	78
Figura 5.6. Comparações entre deformações medidas nos ensaios reforçados (geogrelha e geotêxtil tecido) e o ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN.	79
Figura 5.7. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GG-U: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.....	80
Figura 5.8. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GT-U: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.	80
Figura 5.9. Comparações entre deformações medidas nos ensaios reforçados (geogrelha e geotêxtil tecido) com configuração em U invertido e o ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN.	81
Figura 5.10. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GG-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.	82
Figura 5.11. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GT-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.....	83
Figura 5.12. Comparações entre deformações medidas nos ensaios reforçados (geogrelha e geotêxtil tecido) com configuração envelopada e o ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN.....	84
Figura 5.13. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-SR: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.....	85
Figura 5.14. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-GG-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.	86
Figura 5.15. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-GT-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.	87

Figura 5.16. Comparações entre deformações medidas nos ensaios reforçados (geogrelha e geotêxtil tecido) com configuração envelopada e o ensaio de referência para um carregamento de 1,19 kN.....	87
Figura 5.17. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-SR-DC: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.....	89
Figura 5.18. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-GG-E-DC: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.	89
Figura 5.19. Comparações entre deformações medidas no ensaio reforçado com geogrelha em configuração envelopada e o ensaio de referência para um carregamento de 1,22 kN.	90
Figura 5.20. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 45-SR: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.....	92
Figura 5.21. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 45-GG-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.	92
Figura 5.22. Comparações entre deformações medidas no ensaio reforçado com geogrelha em configuração envelopada e o ensaio de referência para um carregamento de 0,35kN.	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Emprego de geossintéticos (Bueno e Vilar, 2004).....	6
Tabela 2.2. Distribuição de acidentes por causa (CONCAWE, 2002).	8
Tabela 3.1. Características da areia (modificado - Tupa, 2006).	19
Tabela 3.2. Características dos reforços (Tupa, 2006).....	21
Tabela 3.3. Variáveis dos ensaios.	33
Tabela 3.4. Símbolos que representam as variáveis dos ensaios	34
Tabela 3.5. Lista de ensaios realizados e nomenclatura utilizada.....	34
Tabela 4.1. Comparações entre carregamentos verticais ($\alpha = 0^0$) aplicados nos ensaios para d igual a 70 mm.....	53
Tabela 4.2. Comparações entre carregamentos inclinados ($\alpha = 16^0$) com direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo para d igual a 62,5 mm.	54
Tabela 4.3. Comparações entre carregamentos inclinados ($\alpha = 16^0$) com direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo nos ensaios para d igual a 62,5 mm.	55
Tabela 4.4. Comparações entre carregamentos inclinados ($\alpha = 45^0$) com direção de penetração do OC passando pelo centro do duto, aplicados nos ensaios para um d igual a 137,5 mm.....	55
Tabela 4.5. Comparações entre tensões registradas pela célula 01 nos ensaios com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$) para um nível de carga de 1,42 kN.....	58
Tabela 4.6. Comparações entre tensões registradas pela célula 02 nos ensaios com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$) para um nível de carga de 1,42 kN.....	60
Tabela 4.7. Comparações entre tensões registradas pela célula 03 nos ensaios com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$) para um nível de carga de 1,42 kN.....	62

Tabela 4.8. Comparações entre tensões registradas pela célula 04 nos ensaios com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$) para um nível de carga de 1,42 kN.....	63
Tabela 4.9. Comparações entre tensões registradas pela célula 01 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.....	65
Tabela 4.10. Comparações entre tensões registradas pela célula 02 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.....	67
Tabela 4.11. Comparações entre tensões registradas pela célula 03 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.....	68
Tabela 4.12. Comparações entre tensões registradas pela célula 04 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.....	69
Tabela 4.13. Comparações entre tensões registradas pela célula 05 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.....	70
Tabela 4.14. Relações entre tensões atingidas nos ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}) para um carregamento de 0,35 KN, registradas pelas células instaladas no maciço.	73
Tabela 5.1. Relações entre deformações medidas nos ensaios reforçados na configuração camada (geogrelha e geotêxtil tecido) e no ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN - ϵ/ϵ_{SR}	79
Tabela 5.2. Razões entre deformações medidas nos ensaios reforçados na configuração U invertido (geogrelha e geotêxtil tecido) e no ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN - ϵ/ϵ_{SR}	82

Tabela 5.3. Razões entre deformações medidas nos ensaios reforçados na configuração envelopada (geogrelha e geotêxtil tecido) e no ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN - ϵ/ϵ_{SR}	84
Tabela 5.4. Razões entre deformações medidas nos ensaios reforçados na configuração envelopada (geogrelha e geotêxtil tecido) e no ensaio de referência para um carregamento de 1,19 kN - ϵ/ϵ_{SR}	88
Tabela 5.5. Deformações e razões entre deformações medidas no ensaio reforçado com geogrelha em configuração envelopada e no ensaio de referência para um carregamento de 1,22 kN - ϵ/ϵ_{SR}	90
Tabela 5.6. Deformações e razões entre deformações medidas no ensaio reforçado com geogrelha em configuração envelopada e no ensaio de referência para um carregamento de 0,35 kN - ϵ/ϵ_{SR}	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONCAWE	Conservation of Clean Air and Water in Europe
cm	Centímetro
C_c	Coefficiente de Curvatura
C_u	Coefficiente de uniformidade
D	Diâmetro do tubo
D_{50}	Diâmetro médio das partículas
d	Variação de distância entre a base do OC e o topo do tubo
EXT	Extensômetro elétrico
g/m^2	Grama por metro quadrado
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik
J	Rigidez à tração do geossintético
Km	Quilômetro
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro
p_e	Pressão no solo
p_i	Pressão interna na tubulação
Q	Carga aplicada no maciço
Q_{sr}	Carga aplicada no maciço no ensaio de referência
R	Raio do tubo
SUCS	Sistema Universal de Classificação de Solos
%	Porcentagem
α	Ângulo de inclinação do OC com a vertical
$\mu m/m$	Micrometro por metro
ϕ_{sr}	Ângulo de atrito entre solo e reforço
ϵ_{max}	Deformação de tração do geossintético na ruptura

ϵ_{sr}	Deformação do extensômetro no ensaio de referência
ϵ	Deformação do extensômetro
σ	Tensões registradas nos ensaios
σ_{sr}	Tensões registradas nos ensaios de referência

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O uso de gás natural tem se difundido nos últimos tempos principalmente por ser uma forma de energia limpa, tendo em vista a menor emissão de gases de efeito estufa em relação às tecnologias baseadas no consumo de outros combustíveis fósseis, além da ausência de produção de cinzas pesadas. O transporte de gás natural possui uma particularidade que é a necessidade de existência de dutos até o cliente final. Redes de dutos metálicos são também amplamente utilizadas como o meio eficiente para o transporte de petróleo e seus derivados. Para que estes produtos sejam transportados das fontes de produção até os centros de consumo, a infra-estrutura necessária requer, muitas vezes, que o subsolo de regiões urbanas e até mesmo rurais seja cortado por uma ampla rede de tubulações enterradas.

Os dutos de transporte são pontos críticos no processo da indústria petrolífera, uma vez que um acidente pode causar danos materiais, contaminações ambientais e exposição de pessoas ao risco de incêndios e explosões. No caso de tubulações enterradas, este risco é intensificado quando se considera que os dutos percorrem imensas distâncias por áreas urbanas e industriais, onde estão sujeitos às influências do meio, movimentações do solo e à ação de terceiros.

Explosões envolvendo gasodutos vêm ocorrendo freqüentemente em todo o mundo. Uma das principais causas destes acidentes é o desconhecimento da existência destas tubulações enterradas, provocando perfurações acidentais por obras civis, por exemplo. Grande parte dos acidentes reportados na literatura é proveniente de danos provocados nas tubulações por impactos de ferramentas de escavação. Estes acidentes trazem graves consequências ao meio ambiente e à sociedade, geralmente envolvendo vítimas fatais.

A partir do exposto, percebe-se a grande necessidade do desenvolvimento de técnicas que previnam estes acidentes ou reduzam os danos causados pela sua ocorrência.

Tendo em vista a amplitude da aplicabilidade dos geossintéticos, o presente trabalho se propõe a avaliar o uso deste material como camada protetora e redutora de tensões em maciços onde dutos encontram-se enterrados, tendo o objetivo de reduzir os efeitos de impactos decorrentes da ação de ferramentas de escavação, evitando a ocorrência de acidentes sérios.

1.2 APRESENTAÇÃO DO MÉTODO

Para realização do estudo relativo ao tema proposto, foi executado processo experimental. Nos experimentos tentou-se simular a ação de uma ferramenta de escavação em maciços com e sem reforço (Figura 1.1).

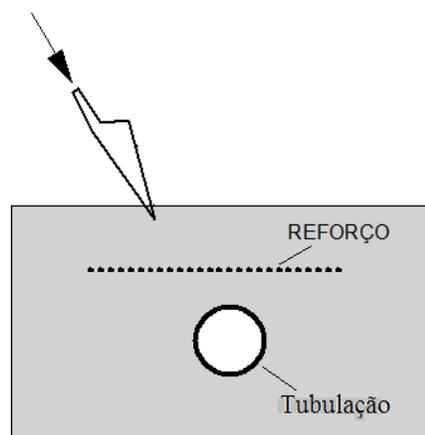


Figura 1.1. Mecanismo de dano em tubulações enterradas (modificado – Tupa, 2006)

Foi utilizado um tubo de aço instrumentado enterrado em um maciço de areia. Um objeto contundente (OC) simulando uma ferramenta de escavação foi forçado a penetrar na massa de areia com inclinações variadas. Foram avaliados os efeitos de tal penetração no tubo, que foi instrumentado com extensômetros elétricos em vários pontos ao redor de seu perímetro. Células de pressão total foram instaladas no interior do maciço onde o tubo foi enterrado a fim de medir os incrementos de tensão causados pela penetração do OC.

1.3 OBJETIVO DA PESQUISA

O presente estudo tem como objetivo avaliar a utilização de geossintéticos como elemento de reforço em solos que contêm tubulações enterradas, visando evitar ou minimizar danos nestas tubulações causados por esforços externos tais como a ação de ferramenta de escavação.

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Inicialmente, no Capítulo 2, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica, uma vez que não foram encontrados na literatura muitos trabalhos relativos à proposta do estudo. A revisão contempla (i) uma rápida abordagem sobre geossintéticos, tema já bastante conhecido no meio geotécnico, (ii) a apresentação de alguns acidentes envolvendo tubulações enterradas provocados pela ação de terceiros e (iii) a apresentação de trabalhos utilizando geossintéticos visando a proteção destas tubulações.

No Capítulo 3, apresentam-se os materiais e métodos utilizados para realização dos ensaios, que permitiram avaliar a aplicação de geossintéticos como camada protetora em maciços onde tubulações são enterradas e são solicitadas por ferramentas de escavação.

No Capítulo 4, apresentam-se e analisam-se os resultados relativos à penetração do objeto desenvolvido para simular a ação de uma ferramenta de escavação no maciço. A partir destes dados, pôde-se avaliar o aumento de resistência à penetração adquirida pela inserção do reforço no sistema. Foram também analisadas as tensões desenvolvidas no maciço.

No Capítulo 5, são apresentados e analisados os dados referentes às deformações sofridas pelo tubo devido à penetração da ferramenta nos ensaios com e sem reforço.

Finalmente, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OS GEOSINTÉTICOS

Nos dias de hoje, o uso de geossintéticos tem se tornado cada vez mais comum. Estes materiais vêm sendo cada vez mais aplicados nas diversas situações de obras de engenharia, a fim de sanar problemas em que o uso de materiais convencionais não se mostra eficiente ou torna a obra mais onerosa ou demorada.

O emprego de materiais naturais para melhorar a qualidade dos solos é prática comum desde 3000 a.C. (Aguiar e Vertematti, 2004). Exemplos bastante conhecidos são a Grande Muralha da China e as muralhas de Ziggurat de Agar Quf, na Mesopotâmia, 1400 anos a.C., que utilizaram mantas feitas de raízes como elementos de reforço. Shibam, a cidade vertical mais antiga do mundo possui edifícios de até sete andares construídos com tijolos de argila com adição de palha ou capim que datam do século XVI. Entretanto, o emprego de materiais sintéticos produzidos pela indústria petroquímica somente ocorreu com o desenvolvimento de alguns polímeros tais como PVC em 1913, poliamida e poliéster, em 1930, e polipropileno em 1954. Nos dias de hoje, já existem outros polímeros que estão sendo desenvolvidos e incorporados à fabricação de geossintéticos com propriedades que procuram atender necessidades específicas da moderna engenharia (Aguiar e Vertematti, 2004).

2.1.1 TIPOS E CLASSIFICAÇÃO

Os geossintéticos são constituídos essencialmente por polímeros e, em menor escala, por aditivos. Os aditivos têm a função de introduzir melhorias no processo de fabricação ou modificar aspectos do comportamento de engenharia do polímero básico (Bueno, 2004).

Devido a avanços na indústria de polímeros, a cada dia novos geossintéticos são desenvolvidos. A Figura 2.1 resume a classificação de alguns dos principais geossintéticos.

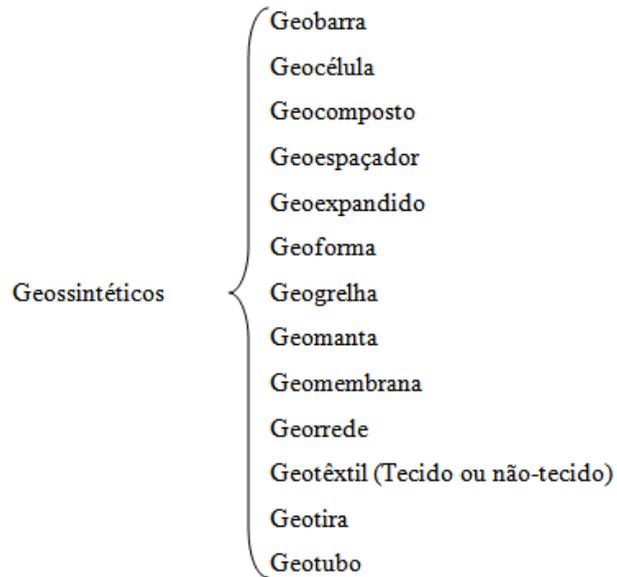
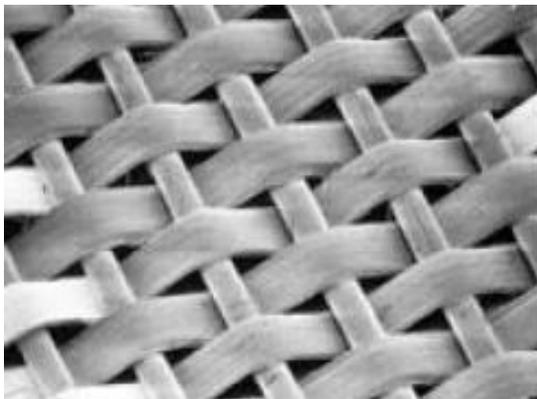


Figura 2.1. Classificação dos geossintéticos.

As Figuras 2.2a e 2.2b ilustram um geotêxtil tecido e algumas geogrelhas respectivamente. Ambos os materiais são elementos de reforço que serão utilizados nesta pesquisa.



(a)



(b)

Figura 2.2. Geossintéticos: (a) Geotêxtil tecido; (b) Geogrelhas (Palmeira, 1993).

2.1.2 PRINCIPAIS FUNÇÕES E PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS

De acordo com a NBR 12.533 - Geossintéticos - Terminologia, as possíveis funções de um geossintético em uma obra de geotecnia são: reforço, drenagem, filtração, impermeabilização, proteção, separação e controle de erosão superficial.

A Tabela 2.1 mostra a distribuição dos geossintéticos, de acordo com a função que os mesmos podem assumir.

Tabela 2.1. Emprego de geossintéticos (Bueno e Vilar, 2004).

Geossintético	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço	Impermeabilização
Geotêxtil	X	X	X	X	X	X	X(*)
Geogrelha	X	-	-	-	-	X	-
Geomembrana	X	-	-	-	-	-	X
Georrede	-	X	-	X	-	-	-
Geocomposto argiloso	-	-	-	-	-	-	X
Geocélula	-	X	-	-	X	X	-
Geotubo	-	-	-	X	-	-	-
Geofibras	-	-	-	-	-	X	-

* Quando impregnado com material asfáltico.

Dentre as funções que os geossintéticos podem assumir, as de maior relevância para este trabalho são as de proteção e reforço.

De acordo com Abramento e Pezzolo (2004), quando utilizados como elementos protetores, os geossintéticos atuam como uma camada redutora de tensões, tendo o objetivo de prevenir ou reduzir os danos que seriam causados a uma determinada superfície, camada ou estrutura adjacente. Alguns exemplos deste tipo de aplicação em tubulações enterradas são encontrados na literatura. Pode-se, por exemplo, citar a utilização de geoespaçador ou geotêxtil espesso para proteção da camada antioxidante de tubulações metálicas enterradas (Abramento e Pezzolo, 2004).

No que diz respeito ao uso dos geossintéticos com função de reforço, Palmeira (1993) define que o comportamento global de uma estrutura de solo reforçado com geossintéticos está condicionado às propriedades do reforço, às propriedades do solo e à interação solo-

geossintético. A Figura 2.3 ilustra a interação solo-geossintético, de acordo com o tipo de reforço. No caso do geotêxtil não tecido, em que os fios são distribuídos de forma aleatória, pode-se ter um maior entrosamento entre os grãos de solo e as fibras do reforço quando comparado ao geotêxtil tecido, caso ocorra o embricamento entre grãos de solo e filamentos do geotêxtil. No caso da geogrelha, observa-se que além do atrito entre o solo e as superfícies da grelha, existe a mobilização da resistência passiva devido à interação entre o solo presente nas aberturas e os membros transversais.

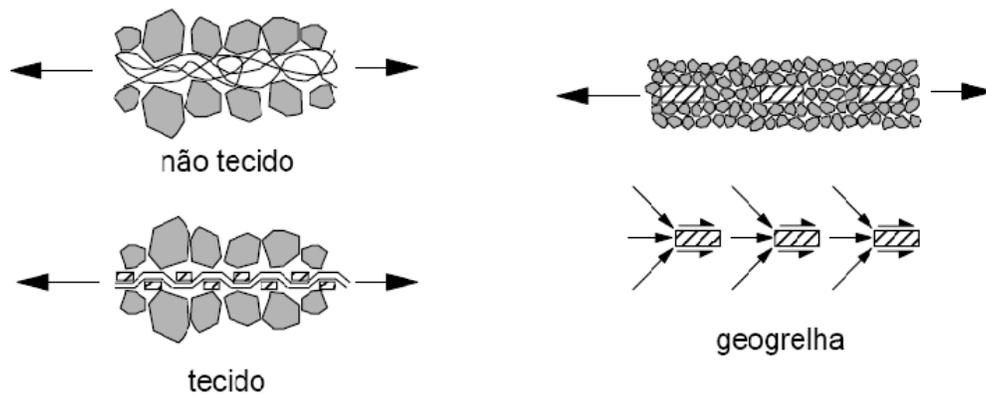


Figura 2.3. Interação solo-geossintético (Palmeira, 1993).

2.2 TUBULAÇÕES ENTERRADAS E GEOSSINTÉTICOS

Duto é a designação genérica de instalação constituída por tubos ligados entre si, destinada ao transporte de petróleo e seus derivados (oleodutos), e gás natural (gasodutos). Levando em conta a sua localização em relação ao meio, os dutos podem ser enterrados, aéreos, submarinos ou flutuantes.

De acordo com a ANP (2001), a partir da década de 1990, houve o surgimento do consumo de gás natural fora dos setores de transformação. A demanda urbana de consumo de gás, principalmente no setor de transportes e residencial, cresceu com respeitável velocidade. Esse fato implicou no conseqüente aumento da malha de tubulações enterradas, principalmente em áreas urbanas, o que aumenta a probabilidade de ocorrência de acidentes.

2.2.1 ACIDENTES ENVOLVENDO TUBULAÇÕES ENTERRADAS

O CONCAWE, uma organização européia que reúne várias companhias de petróleo, elaborou um relatório com estudos estatísticos sobre acidentes com oleodutos de 1971 a 2000. O relatório envolveu o transporte apenas de petróleo e derivados, relacionados com informações de vinte e um países da Europa Ocidental, em dutos de comprimentos superiores a 2 km de extensão, excluindo sistemas submarinos. Foram registrados 379 acidentes naquele período, com volumes vazados de no mínimo 1m³. Os resultados dos acidentes publicados foram classificados em cinco categorias principais: falha mecânica, falha operacional, corrosão, ação da natureza e ação de terceiros. A distribuição destas ocorrências está exposta na Tabela 2.2. Nela, observa-se que os acidentes motivados pela ação de terceiros são predominantes.

Tabela 2.2. Distribuição de acidentes por causa (CONCAWE, 2002).

Causas	Quantidade total: 379	Porcentagem (%)
Ação de terceiros	132	35
Corrosão	110	29
Falha mecânica	91	24
Falha operacional	29	8
Ação da natureza	14	4

Dos 132 registros de acidentes provocados pela ação de terceiros, 100 foram acidentais, 10 foram intencionais e 22 foram provenientes de incidente que causou dano ao tubo que, por sua vez, sofreu deterioração ao longo do tempo e culminou em um acidente. Em quase todos os casos, operações com máquinas ou ferramentas provocaram danos em tubulações devido (i) ao desconhecimento da existência da tubulação, (ii) à falta de habilidade com o maquinário ou (iii) a combinação de ambos os fatores. As causas mais comuns dos acidentes envolveram máquinas de escavação ou perfuração e equipamentos para o cultivo do solo. Em 69% dos casos, nem o operador das máquinas tinha conhecimento da existência da tubulação, nem a empresa operadora dos oleodutos tinha conhecimento da realização dos trabalhos no local.

No cenário nacional, acidentes envolvendo tubulações enterradas também são uma realidade. Uma pesquisa realizada pela CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

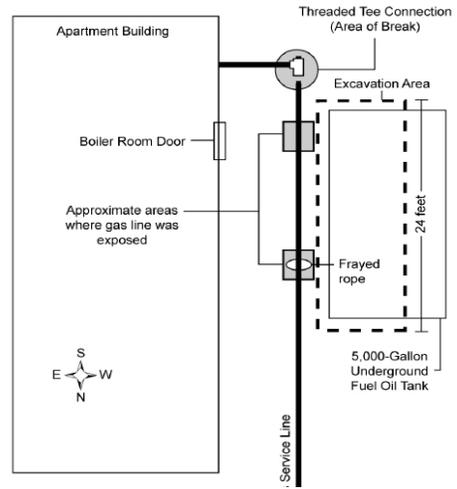
(2005) revela que os registros de acidentes em tubulações enterradas provocados por ação de terceiros aumentaram entre 1980 e 2006, sendo que nos últimos sete anos, praticamente todos os casos envolveram linhas transportando gás natural perfuradas acidentalmente por obras de empreiteiras contratadas por empresas de telefonia, água e esgoto ou mesmo por obras viárias municipais. Um exemplo disto foi o rompimento de um gasoduto em Barueri (Grande São Paulo), em 2001, que provocou o vazamento de 150 toneladas de gás, causando risco de explosão e provocando a retirada de 2.000 pessoas de suas casas. O acidente ocorreu quando uma máquina bate-estaca usada por uma construtora que executava obras no local atingiu acidentalmente a tubulação.

Nos acidentes que envolvem tubulações enterradas, os vazamentos geralmente precedem incêndios ou explosões. Na maioria dos casos, os danos são alarmantes e envolvem vítimas fatais.

A Figura 2.4a mostra a vista geral do incêndio em um edifício residencial decorrente de vazamento de uma tubulação de gás de 1¼” (\cong 3,2 cm) de diâmetro em Bergenfield, Nova Jersey, USA (National Transportation Safety Board, 2007a), onde mortes foram registradas. A explosão ocorreu depois que gás natural proveniente da tubulação migrou para o edifício. A fratura no tubo de aço ocorreu em uma conexão subterrânea devido à desestabilização do solo proveniente de escavações que estavam sendo realizadas ao lado do edifício, para retirada de um tanque de óleo, como mostra a Figura 2.4b.



(a)



(b)

Figura 2.4. Acidente decorrente de vazamento em uma tubulação de gás em Bergenfield, Nova Jersey: (a) Incêndio causado após vazamento; (b) Esquema do local do acidente (modificado - National Transportation Safety Board, 2007a).

Outro acidente de grandes proporções ocorreu em St. Cloud, Minnesota, onde uma tubulação de gás enterrada sob uma calçada de concreto foi atingida por uma ferramenta de trabalho (Figura 2.5a), que estava sendo operada por trabalhadores para implantação de um sistema de comunicação por fibras óticas (National Transportation Safety Board, 2000). O rompimento do tubo de 1" ($\cong 2,5$ cm) provocou vazamento de gás seguido de explosão, onde seis edifícios foram destruídos (Figura 2.5b), 4 mortes foram registradas e 11 pessoas ficaram feridas.



(a)



(b)

Figura 2.5. Acidente decorrente de vazamento em uma tubulação de gás em St. Cloud, Minnesota: (a) Instrumento que atingiu a tubulação de gás; (b) Conseqüências da explosão (modificado - National Transportation Safety Board, 2000).

Em 2 de julho de 2003, uma empresa contratada pela cidade de Wilmington, Delaware, para substituir as calçadas de uma rua, atingiu uma linha de serviços de gás natural com uma retro escavadeira (National Transportation Safety Board, 2004). Após vazamento de gás, ocorreu uma explosão que destruiu duas casas e danificou outras na quadra.

Em 27 de outubro de 2004, vazamentos de anidro amônia provenientes de uma tubulação de aço carbono de 8" de diâmetro contaminaram um rio, matando 25.000 peixes. O acidente ocorreu seis milhas a oeste de Kingman, no Kansas, e os custos de reparos chegaram a US \$ 680.715, incluindo a reabilitação ambiental. Análises posteriores ao acidente concluíram que um equipamento pesado provocou um dano na tubulação. O choque pode ter ocorrido durante o período de construção ou durante alguma atividade de escavação subsequente, iniciando a fadiga do metal e levando a posterior ruptura da tubulação (National Transportation Safety Board, 2007b).

A Figura 2.6 mostra a ruptura de uma tubulação de aço com 20" de diâmetro que transportava gás natural em Indianápolis, Indiana, USA. A ruptura se deu devido ao impacto de uma máquina de escavação quando tentava-se instalar outra linha de gás, paralela à existente. O acidente ocasionou explosão seguida de incêndio. Neste caso, uma vítima fatal foi registrada e os prejuízos econômicos foram superiores a 2 milhões de dólares.



Figura 2.6. Ruptura de tubulação de gás natural (National Transportation Safety Board, 1999).

2.2.2 O USO DE REFORÇO GEOSSINTÉTICO VISANDO A PROTEÇÃO DE TUBULAÇÕES ENTERRADAS CONTRA DANOS.

Viana e Bueno (1998) estudaram a utilização de mantas de geotêxtil inseridas no maciço de solo que envolve o conduto a fim de avaliar a redução de esforços provenientes da simulação da construção de um aterro sobrejacente de até quatro metros de altura. Nesse trabalho, foi verificado que houve redução de esforços sobre a estrutura em todas as configurações de ensaios realizadas, chegando a atingir 60%, quando comparado à situação sem inclusão. A Figura 2.7 apresenta as deflexões do conduto para todas as configurações testadas no último estágio de carregamento. Nela, a linha em vermelho representa a forma original do tubo, a linha em preto a forma deformada do tubo na condição sem reforço e as demais linhas tracejadas representam as deflexões obtidas nos ensaios reforçados. Observa-se que o tubo sofreu as maiores deformações no ensaio sem reforço.

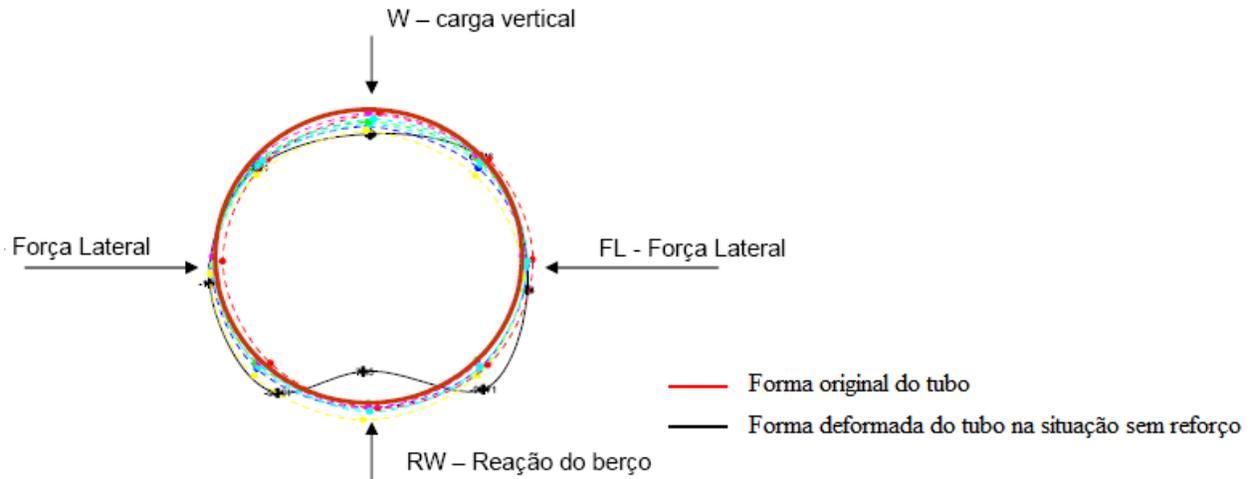


Figura 2.7. Deflexões no conduto (modificado - Viana e Bueno, 1998 *apud* Viana, 2003).

Viana (2003) realizou um trabalho que trata do desenvolvimento de uma técnica construtiva para dutos enterrados (Geovalva), baseada na instalação de um geossintético sobre uma vala, localizado acima do duto, com o principal objetivo de reduzir os esforços sobre a estrutura durante o processo construtivo (lançamento de camadas de solo e compactação) e aplicação de sobrecarga. A Figura 2.8 mostra a proposta objeto de pesquisa para as situações de vala e de aterro.

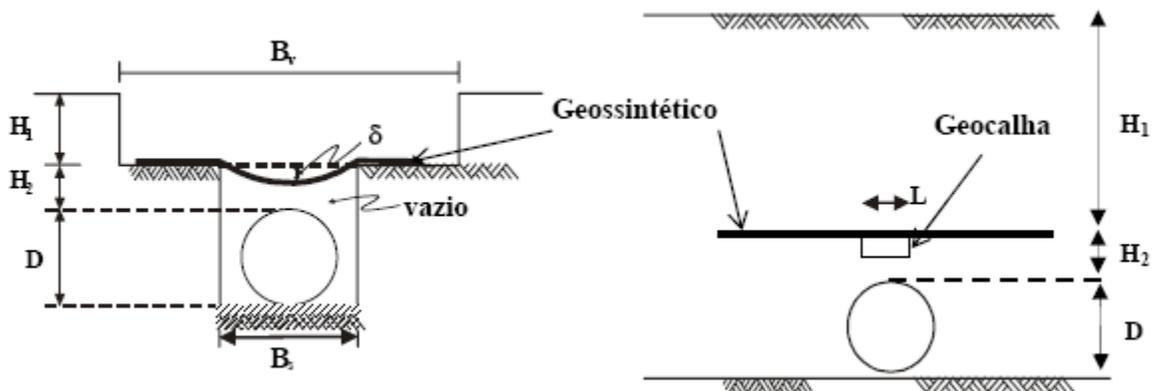


Figura 2.8. Geossintéticos para redução de tensões verticais em tubos em valas ou aterros (Viana, 2003).

Ensaio de grandes dimensões foram realizados para avaliar a técnica construtiva da Geovala. A seqüência do ensaio de grandes dimensões consistia basicamente na instalação do tubo no berço previamente compactado, lançamento e compactação (com soquete vibratório) de camadas de solo nas laterais do duto, posicionamento do geotêxtil ou da geocalha (dependendo do tipo de ensaio) e lançamento e compactação das demais camadas de solo. Depois de concluída a construção da estrutura, aplicavam-se incrementos de carga com auxílio de uma bolsa inflável de PVC no topo, a fim de simular a construção de um aterro sobre o duto. Durante as etapas de construção e aplicação de carga, foram registradas leituras das deformações das paredes do duto e das tensões totais nas laterais das paredes do duto e no solo. A Figura 2.9a apresenta a representação típica das tensões geradas no tubo no ensaio de referência e a Figura 2.9b no caso da Geovala. Vianna (2003) constatou que, no sistema Geovala, as tensões no topo foram eliminadas e nos ombros e nas laterais reduzidas.

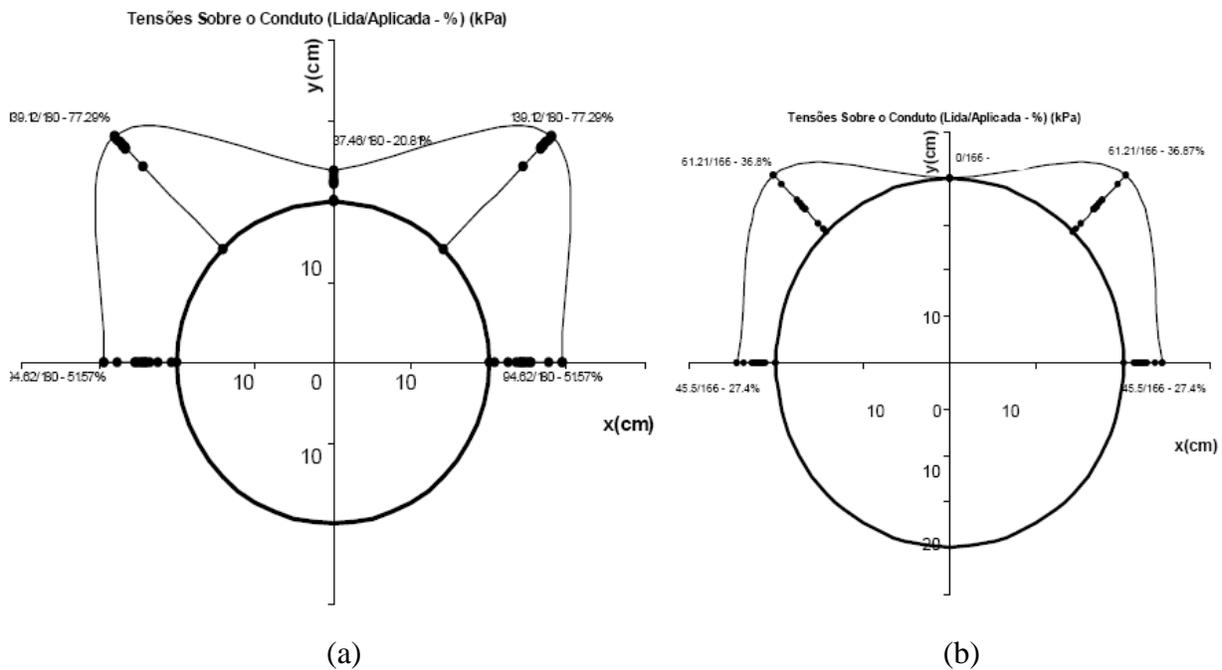


Figura 2.9. Representação típica das tensões geradas no tubo: (a) Ensaio de referência; (b) Sistema Geovala (modificado - Viana, 2003).

Tupa (2006) desenvolveu um estudo inovador aplicando geossintéticos como elemento de reforço em aterros para proteção de tubulações pressurizadas enterradas de gasodutos visando minimizar os efeitos de uma explosão. Para tanto, realizou dois tipos de ensaios em modelos

reduzidos: o de expansão de cavidade, visando simular, em velocidade reduzidíssima, a expansão do solo provocada pela explosão de tubulação, e o de vazamentos controlados provocados pelo estouro de tubulações enfraquecidas e pressurizadas com ar comprimido. A Figura 2.10 mostra as idealizações das tubulações para os modelos físicos de laboratório em cada caso.

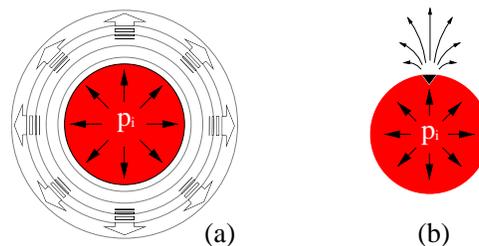


Figura 2.10. Mecanismos simulados nos ensaios de Tupa (2006): (a) expansão de cavidade (b) vazamento em tubulação enfraquecida.

Foram implementados dois tipos de ensaios a fim de idealizar as seqüências do mecanismo de explosão de uma tubulação pressurizada enterrada. O ensaio de expansão de cavidade consistia na instalação de uma tubulação de expansão no interior de um maciço. Ar comprimido era injetado no tubo fazendo a tubulação expandir com os acréscimos de pressão. A Figura 2.11 ilustra o mecanismo de expansão da cavidade.

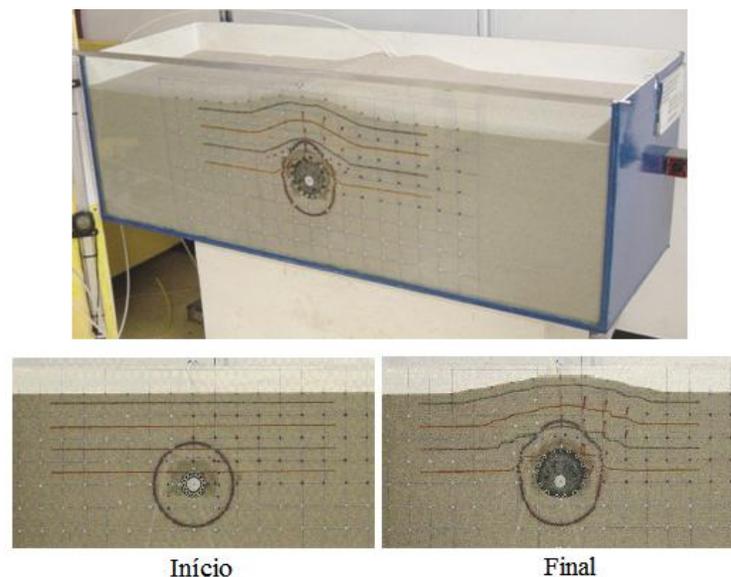


Figura 2.11. Ensaio de expansão de cavidade (modificado - Tupa 2006).

O ensaio de vazamento em tubulação enfraquecida consistia em inserir uma tubulação com fraqueza induzida no maciço e submetê-la à pressão interna. A fraqueza induzida ao longo do comprimento da tubulação era rompida quando a pressão interna atingia um valor de aproximadamente 600 kPa. O estouro da tubulação causava a ruptura catastrófica dos aterros, como mostra a Figura 2.12, mas suas conseqüências eram minimizadas quando o maciço possuía camada de reforço.

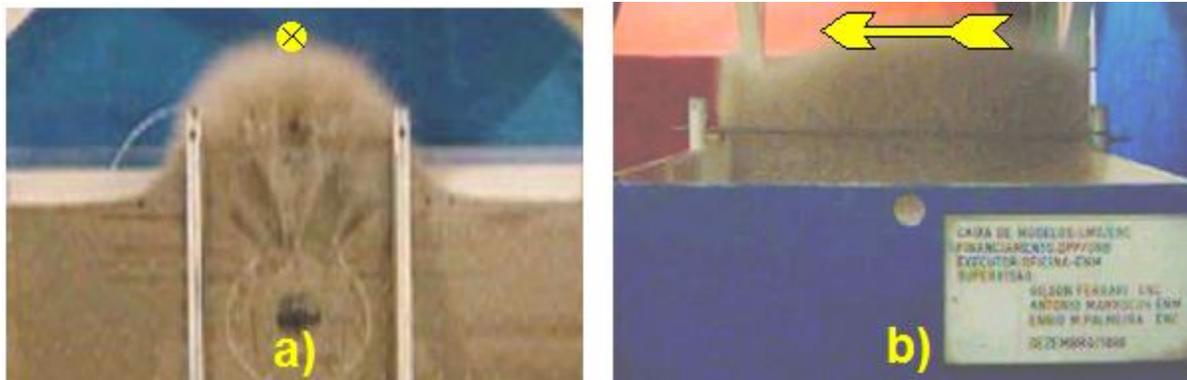


Figura 2.12. Elevação do solo devido à ruptura da tubulação: (a) Frontal; (b) Lateral (Tupa, 2003).

Tupa (2006) realizou os ensaios utilizando diversas combinações de arranjos de reforços, tipos de reforços e tipos de aterros. Os arranjos utilizados estão expostos na Figura 2.13.

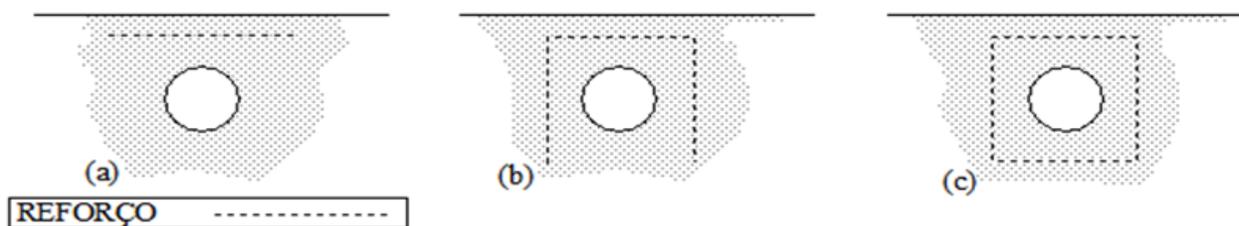


Figura 2.13. Arranjos dos geossintéticos: (a) Camada; (b) U invertido; (c) Envelopado (Tupa, 2003).

Os resultados obtidos mostraram uma influência significativa da presença do reforço, podendo diminuir substancialmente as conseqüências de explosões. Os resultados de ensaios de expansão de cavidade em aterros reforçados com geossintéticos apresentaram aumento da resistência à

expansão (pressão no solo, p_e) da cavidade em relação a aterros sem reforço. Esse aumento chegou a ser 275,2 % superior (para o arranjo envelopado) quando comparado ao sistema sem reforço.

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.

No que diz respeito à utilização de geossintéticos visando evitar ou minimizar danos em tubulações enterradas causados por ferramentas de escavação, não foi encontrado nenhum relato de estudo já realizado. Visando preencher essa lacuna, este trabalho se propõe a realizar tal estudo, dada a relevância do tema e considerando que grande número de casos envolvendo este tipo de acidente poderiam ter sido evitados, ou suas conseqüências minimizadas, a partir do uso do reforço.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão descritos os materiais e métodos utilizados para avaliar o potencial uso de geossintéticos como camada protetora de tubos enterrados contra danos causados por ferramentas de escavação. Para que esse objetivo fosse atingido, foi realizada uma campanha de ensaios em escala reduzida, devidamente monitorados. Dada a grande variabilidade dos diâmetros dos tubos utilizados na prática, a escala dos ensaios pode ser considerada como real.

Nos ensaios realizados, simulou-se a penetração de uma ferramenta de escavação em um maciço de areia onde um tubo de aço encontrava-se enterrado. Para simular a ação da ferramenta, utilizou-se um objeto contundente (OC), que era forçado a penetrar na massa de areia. Células de tensão total foram instaladas no maciço e o tubo foi instrumentado com extensômetros elétricos. À medida que o OC penetrava o maciço, os incrementos de tensão eram registrados pelas células e as deformações do tubo eram registradas pelos extensômetros. A aquisição destes registros permitiu avaliar a influência da presença do reforço no sistema. Como a face frontal da caixa de testes era transparente, foram instalados marcos móveis e linhas de areia colorida junto a ela. Com o auxílio desses elementos e de uma câmera digital pôde-se registrar os deslocamentos do maciço durante os ensaios.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

A fim de desenvolver o estudo, foi utilizada uma série de materiais e equipamentos, além da instrumentação necessária para o monitoramento dos ensaios. Os principais materiais utilizados foram a areia para construção do maciço, o tubo e os geossintéticos. Os principais equipamentos utilizados foram a caixa de ensaios, o equipamento para preparação dos aterros pelo método da chuva de areia (pórtico e caixa móvel), a estrutura de reação, o objeto contundente (OC) e o conjunto bomba e cilindro hidráulicos para aplicação das cargas. A instrumentação utilizada consistia em uma célula de carga, em células de tensões totais, extensômetros elétricos, um

transdutor de deslocamentos e o sistema de aquisição de dados. A seguir serão apresentados os itens listados.

3.2.1 AREIA

O solo utilizado para construção dos aterros em que os tubos foram enterrados foi uma areia uniforme ($C_u = 2,30$) de quartzo hialino a leitoso, com grãos de formato geral arredondado (Figura 3.1). A areia, caracterizada por Tupa (2006), tem suas principais características apresentadas na Tabela 3.1 e sua curva de distribuição granulométrica apresentada na Figura 3.2.



Figura 3.1. Formato dos grãos do solo utilizado nos ensaios.

Tabela 3.1. Características da areia (modificado - Tupa, 2006).

Diâmetro médio das partículas D_{50} (mm)	1,35
Coefficiente de uniformidade (C_u)	2,30
Coefficiente de Curvatura (C_c)	0,83
Classificação pelo SUCS ^(*)	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
Peso específico nos ensaios (kN/ m^3)	18,04
Ângulo de Atrito ϕ ($^\circ$) ^(**)	35 a 46
Ângulo de Atrito a volume constante ϕ_{CV}	32,7

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

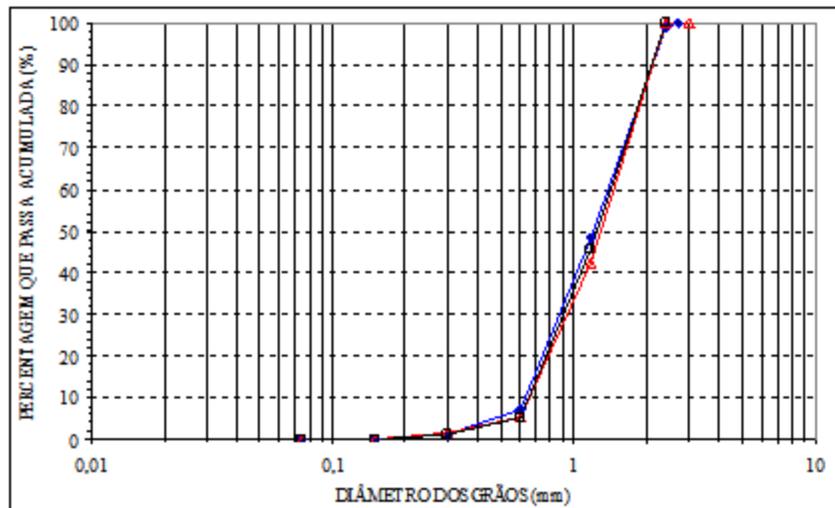


Figura 3.2. Curvas de distribuição granulométrica da areia utilizada (Tupa, 2006).

3.2.2 GEOSINTÉTICOS

Para a realização dos ensaios, foram utilizados um tipo de geotêxtil tecido e um tipo de geogrelha, ambos utilizados por Tupa (2006). O geotêxtil tecido utilizado é fabricado pela empresa Nicolon, com uma gramatura de 220 g/m^2 , sendo formado pela disposição ortogonal de feixes de filamentos de poliéster, entrelaçados segundo modelo planar (Figura 3.3a). A geogrelha é do tipo Fortrac 35/20-20, fabricada pela empresa Huesker, e é formada por multifilamentos de poliéster de alta tenacidade revestidos por capa de PVC, formando grelha com aberturas de $20 \times 20 \text{ mm}$ (Figura 3.3b). Os membros longitudinais possuem uma superfície rugosa que garante boa aderência da geogrelha com o solo.

Tais materiais foram escolhidos com propriedades que permitissem simular razoavelmente protótipos de reforços usuais com fator de escala, em relação às dimensões dos ensaios, de até 8. Entretanto, tal fator pode aumentar, caso sejam considerados reforços mais rígidos e resistentes, disponíveis no mercado, no entanto de custo maior.

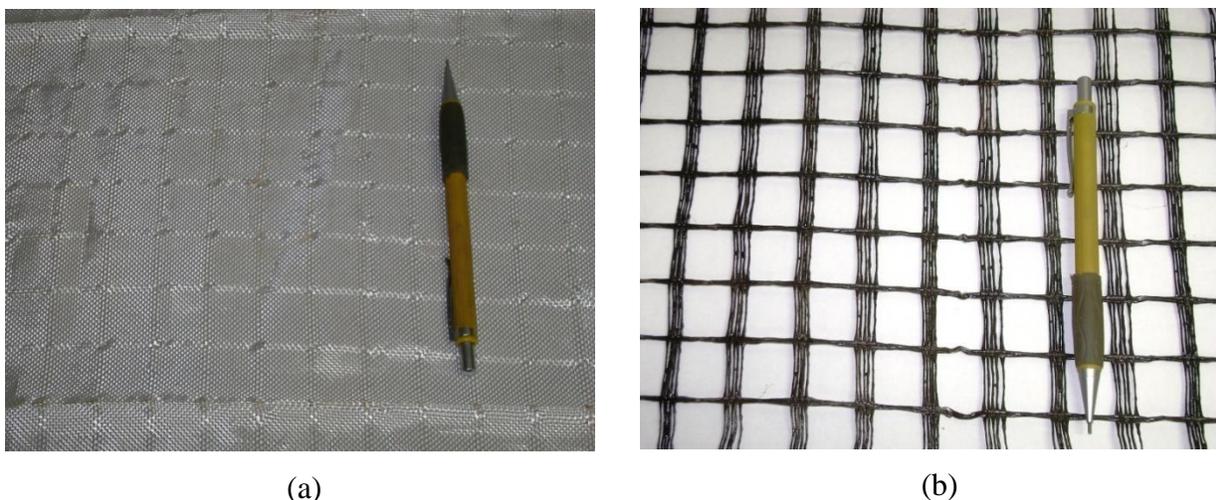


Figura 3.3. Geossintéticos utilizados nos ensaios: (a) Geotêxtil Tecido; (b) Geogrelha.

A Tabela 3.2 apresenta as principais características dos reforços utilizados.

Tabela 3.2. Características dos reforços (Tupa, 2006).

Reforço	J (kN/m)	ϵ_{\max}	ϕ_{sr} (°)
Geotêxtil Tecido	550	11	28
Geogrelha	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.

3.2.3 TUBO

Nos ensaios, foram utilizados tubos de aço carbono com diâmetro nominal de 75 mm e espessura das paredes de 1,5 mm. Este diâmetro foi adotado levando-se em conta as dimensões da caixa de ensaios e sua disponibilidade comercial. O material do tubo foi escolhido em virtude deste ser um dos materiais empregados na constituição de dutos.

3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.3.1 A CAIXA DE ENSAIOS

Os ensaios foram realizados em uma caixa rígida de aço com dimensões 500 mm (altura) x 500 mm (profundidade) x 1500 mm (comprimento), com a face frontal de vidro transparente com 12 mm de espessura, desenvolvida por Lanz (1992) e também utilizada por Tupa (2006). A face frontal possuía uma malha com elementos quadrados (5 cm x 5 cm) que auxiliavam no controle da preparação do aterro. A fim de reduzir o comprimento da caixa, foram colocados cavaletes de madeira nas suas extremidades. Isso foi feito para diminuir o volume de areia a ser utilizada no maciço a ser construído, facilitando a execução dos ensaios. Desta forma, seu comprimento útil foi de 800 mm. A Figura 3.4 apresenta a caixa de testes. As faces dos cavaletes em contato com o aterro eram revestidas com camadas de papel filme e vaselina ou graxa, a fim de reduzir o atrito lateral.



Figura 3.4. Caixa de ensaios.

3.3.2 O EQUIPAMENTO PARA PREPARAÇÃO DOS ATERROS

Como citado anteriormente, foi empregado o método da chuva de areia para a preparação dos aterros. Esta técnica também foi empregada por Lanz (1992) e Tupa (2006).

Para o desenvolvimento da técnica, foram utilizados 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), ambos esquematizados na Figura 3.5. A caixa móvel é

acomodada em um dispositivo metálico dotado de quatro rodas de aço que, por sua vez, encaixam-se em duas guias ao longo do trecho superior do pórtico, permitindo que a mesma possa ser deslocada manualmente. 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. O processo de preparação se inicia quando é aberta a comporta da caixa dispersora móvel e faz-se a mesma se deslocar ao longo do comprimento do pórtico com velocidade uniforme, a fim de se obter uma distribuição contínua da areia na caixa de ensaios.

3.3.3 A ESTRUTURA DE REAÇÃO

A estrutura de reação está esquematizada na Figura 3.5 e consiste em uma estrutura de aço que possui uma base fixa onde a caixa de ensaios é acoplada e um braço móvel utilizado como suporte para encaixar um cilindro hidráulico, que foi empregado para aplicação de cargas no aterro reforçado. O braço móvel possui furos onde parafusos podem ser encaixados, fixando-o e fazendo a sua inclinação variar com a horizontal. Foram realizados ensaios com o braço posicionado na vertical ($\alpha=0^0$) e formando ângulos de 16^0 e 45^0 com a vertical.

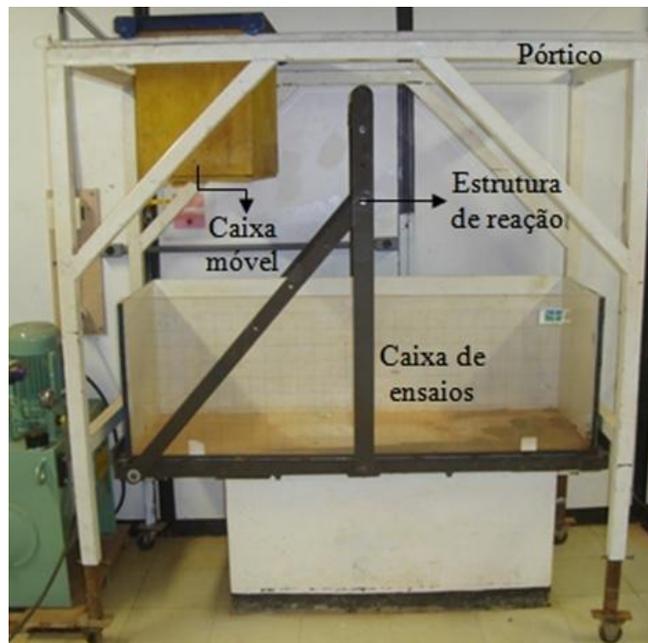


Figura 3.5. Equipamento para execução dos ensaios.

3.3.4 O OBJETO CONTUNDENTE (OC)

O objeto contundente que simulava a ação de uma ferramenta de escavação durante os ensaios era composto por uma chapa de alumínio interligada a uma placa de aço por meio de duas barras rosqueadas (Figura 3.6a). A chapa de alumínio era soldada nas extremidades das barras rosqueadas. A placa de aço era presa nas barras por meio de quatro porcas. Alterando a posição das porcas, podia-se ajustar a altura do OC movimentando a placa ao longo das barras. Esse mecanismo permitia que OC fosse posicionado no topo do maciço no início dos ensaios. Na seção central da placa de aço foi soldado um parafuso onde se acoplava a célula de carga e o cilindro hidráulico (Figura 3.6b). No topo do cilindro hidráulico, foi instalada uma peça formada por um disco em aço e uma rosca que permitia que o sistema fosse suspenso na estrutura de reação (Figura 3.6c). A chapa de alumínio possuía as seguintes dimensões: 49 cm de comprimento, 10 cm de altura e 2 cm de espessura. As barras rosqueadas possuíam diâmetro de 13 mm.

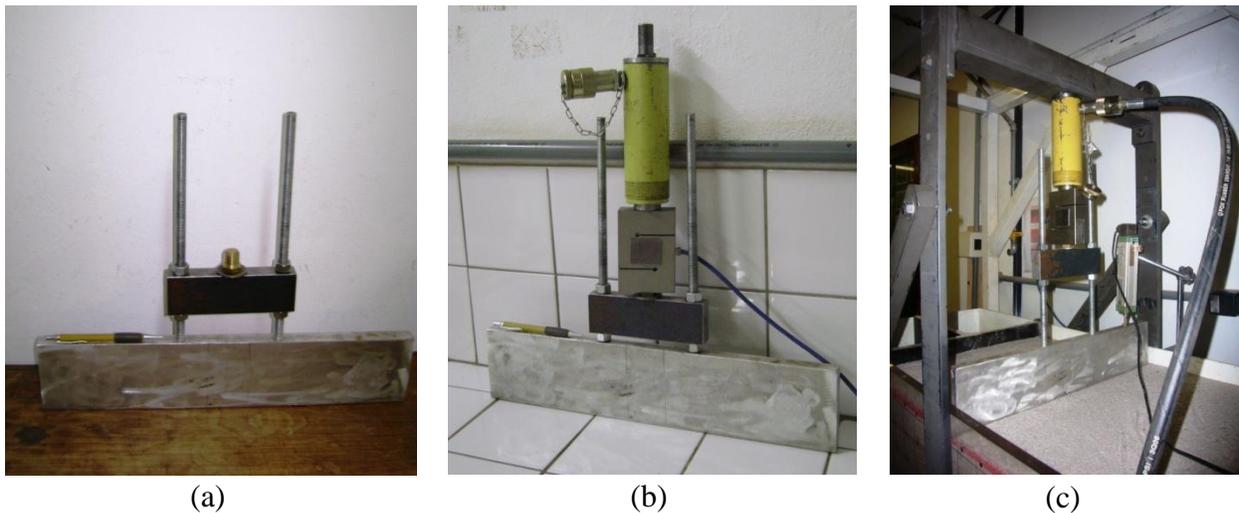


Figura 3.6. Arranjo do objeto contundente (OC): (a) OC; (b) Conjunto que permitia a penetração do OC no maciço; (c) Fixação do OC na estrutura de reação.

3.3.5 MARCOS DE REFERÊNCIA

Marcos de referência foram instalados junto a face transparente da caixa de ensaios nas arestas dos quadrados da malha, visando a obtenção dos deslocamentos do maciço. Os marcos de

referência eram metálicos, com formato cilíndrico, com diâmetro de 5 mm, e comprimento de 30 mm, para ancoragem no solo. Para que os marcos fossem posicionados e fixados junto à face, foi utilizada vaselina. Também foram instaladas linhas horizontais de areia colorida a diferentes profundidades na massa de solo. Os marcos e as linhas coloridas foram inseridos no maciço a fim de que se pudesse visualizar seus mecanismos de deslocamento e ruptura durante os ensaios em relação à posição inicial, por meio de técnica fotográfica. A Figura 3.7 ilustra esse processo.

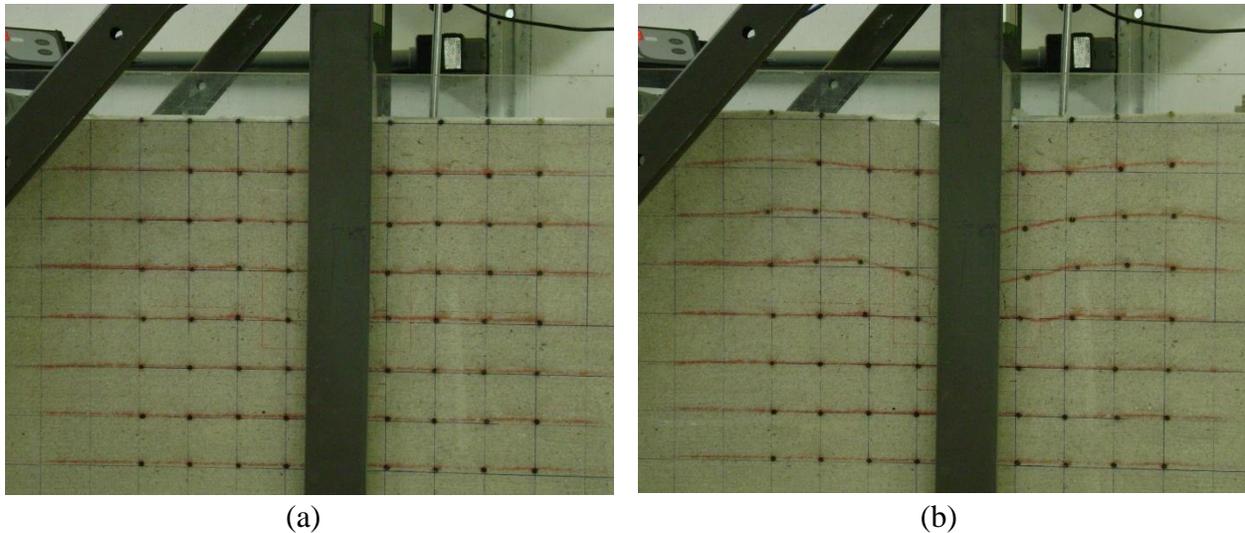


Figura 3.7. Marcos de referência utilizados: (a) Início do ensaio; (b) Final do ensaio.

Para a obtenção desses deslocamentos utilizou-se uma câmera fotográfica digital de 7,2 mega pixels. Assim, antes do início dos ensaios, a câmera era fixada em um tripé de onde fotos eram tiradas ao longo dos ensaios.

3.4 A INSTRUMENTAÇÃO

Todos os ensaios foram monitorados por meio de instrumentação apropriada. Em cada ensaio utilizou-se uma célula de carga, cinco células de tensões totais, um transdutor de deslocamento e extensômetros elétricos que foram colados na superfície externa do tubo, em sua seção central. A localização do tubo e das células de tensão foi mantida em todas as configurações dos ensaios. A Figura 3.8 apresenta o posicionamento da instrumentação utilizada. Nesta situação, a placa de alumínio do OC está em sua posição inicial (para a situação com direção de penetração na

vertical), isto é, imediatamente sobre o topo do aterro a uma distância de 15 cm (2 D) do topo do tubo.

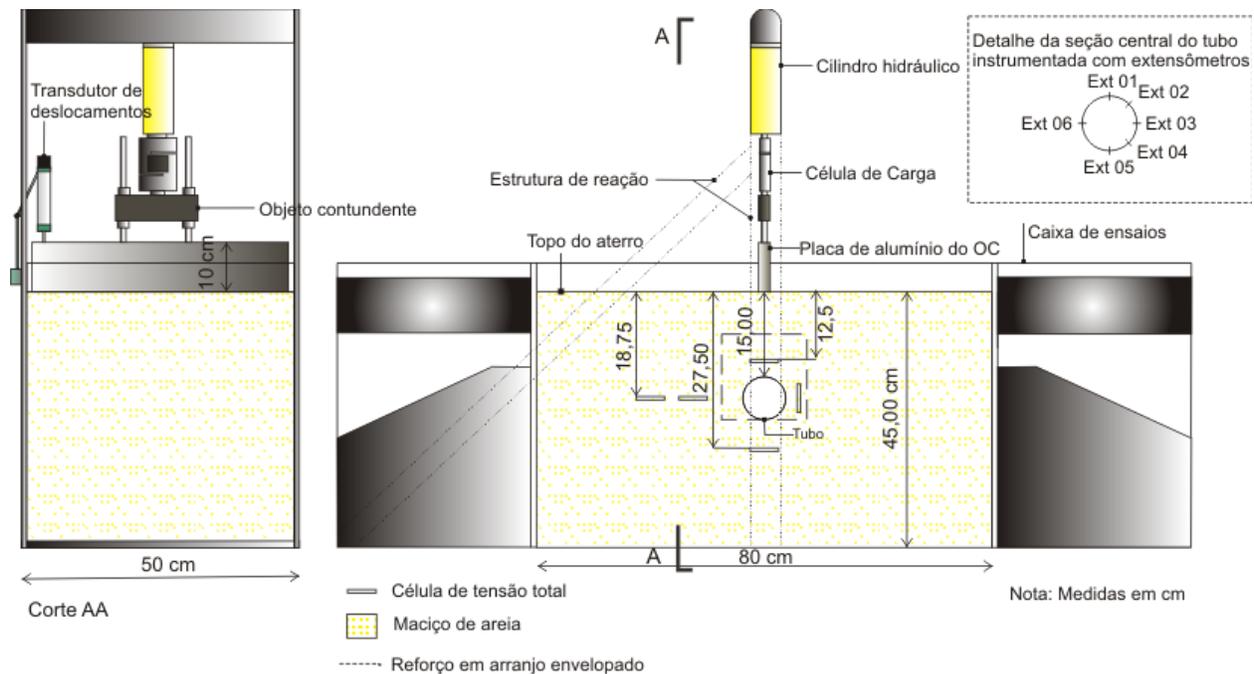


Figura 3.8. Posição da instrumentação nos ensaios.

3.4.1 O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SPIDER)

O sistema de aquisição de dados utilizado para obtenção das leituras da instrumentação (célula de carga, extensômetros elétricos, células de tensões totais e transdutor de deslocamentos) foi o Spider. Este equipamento é fabricado pela HBM e possui oito canais que convertem o sinal analógico em digital. Desta forma, cada instrumento é conectado a um canal, por meio de um conector de 15 pinos com ligações em ponte completa, meia ponte ou um quarto de ponte. O Spider é conectado a um computador e, por meio de um programa específico (Catman), pode-se visualizar os registros. Todos os registros são sincronizados, o que permite medidas simultâneas em todos os canais em intervalos de tempo programáveis. A Figura 3.9 apresenta o sistema de aquisição de dados.



A Figura 3.9. Sistema de aquisição de dados (Spider).

3.4.2 CÉLULA DE CARGA

Para que o OC penetrasse no maciço, eram aplicadas cargas com o auxílio de uma bomba e de um cilindro hidráulicos. A fim de que se pudesse medir estas cargas, utilizou-se uma célula de carga que era acoplada entre o cilindro e o OC, como descrito no item 3.2.2.4. As leituras efetuadas eram registradas em uma leitora digital. A célula utilizada tinha capacidade de 24,5 kN. A Figura 3.10 apresenta a célula e a leitora utilizadas.



Figura 3.10. Célula de carga e leitora digital.

3.4.3 CÉLULA DE TENSÃO TOTAL

Células de tensões totais foram instaladas no interior do maciço onde o tubo foi enterrado, a fim de medir os incrementos de tensão causados pela penetração do OC. As células utilizadas são do tipo diafragma fabricadas pela Micro Sensores Industrial, com diâmetro de 50 mm, espessura de 6 mm e com uma acurácia de 1%. A Figura 3.11 mostra o modelo utilizado.

Antes de realizar os ensaios, as células foram devidamente calibradas. Para tanto, utilizou-se uma caixa rígida de aço preenchida com o mesmo solo utilizado nos ensaios. O processo de compactação da areia se deu, de forma similar ao utilizado nos ensaios, pelo método da chuva de areia. A célula era instalada a meia altura da caixa, sendo recoberta por aproximadamente 15 cm de areia. Após esse processo, uma placa de aço era instalada sobre a camada final de areia onde eram aplicados incrementos de carga, com o auxílio de uma bomba e cilindros hidráulicos. As cargas aplicadas foram registradas pela célula de carga e pela leitora digital. Concomitantemente, o sistema de aquisição de dados (Spider) registrava as voltagens correspondentes fornecidas pelos extensômetros elétricos existentes no diafragma da célula de tensão. A Figura 3.12 apresenta o conjunto utilizado para calibração das células de tensão.

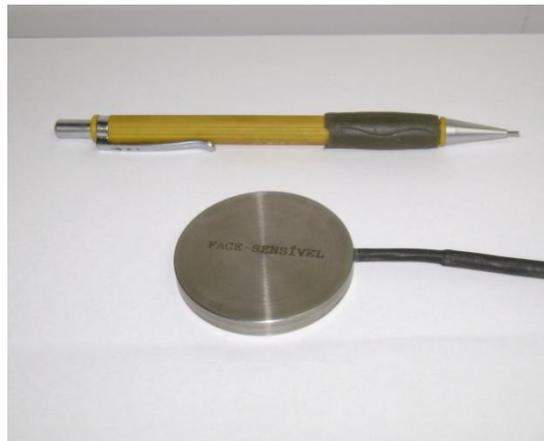


Figura 3.11. Modelo das células de tensões totais utilizadas nos ensaios.



Figura 3.12. Calibração das células de tensão total.

3.4.4 EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS

A fim de que se pudesse medir as deformações do tubo à medida que o OC penetrava no maciço, foram instalados extensômetros elétricos ao longo de sua seção central (externa). Os extensômetros utilizados foram do tipo PA-06-375BG-120L, fabricados pela Excel Sensores. Eles foram escolhidos levando-se em conta o material do tubo onde foram colados. Utilizou-se também um kit de colagem e proteção indicados pelo fabricante. Foram utilizados terminais soldáveis para que se pudessem fazer as ligações entre os fios de cobre dos extensômetros e os fios de conexão com o sistema de aquisição de dados. O comprimento destes fios foi de 1,5 m. O modelo dos extensômetros e dos terminais soldáveis utilizados estão apresentados na Figura 3.13.

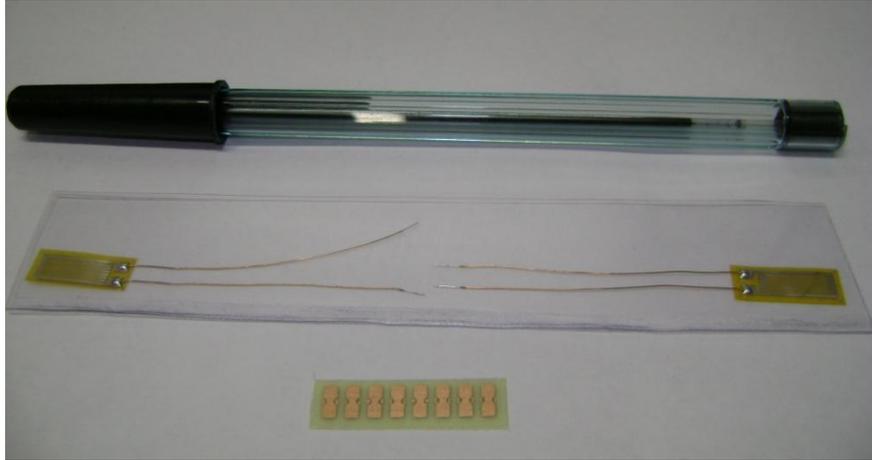


Figura 3.13. Extensômetros elétricos e terminais soldáveis utilizados nos ensaios.

3.4.5 TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTOS

As leituras dos deslocamentos verticais sofridos pelo OC à medida que ele penetrava no maciço foram realizadas com a utilização de um transdutor de deslocamento que possuía curso máximo de 10 cm. Estes registros permitiram comparar os carregamentos requeridos para os diversos níveis de deslocamento do OC nas várias configurações dos ensaios, e assim avaliar a influência da presença dos reforços no maciço.

Antes de serem realizados os ensaios, foi necessário efetuar a calibração do transdutor junto ao sistema de aquisição de dados. Para isto, foram utilizadas uma prensa e um deflectômetro. O transdutor e o deflectômetro eram fixados por meio de bases magnéticas na prensa. O transdutor era conectado ao Spider e, à medida que o disco da prensa descia, as hastes de ambos os instrumentos acompanhavam o movimento. A cada intervalo de deslocamento, as leituras do relógio do deflectômetro eram inseridas no Spider e, concomitantemente, o sistema de aquisição de dados registrava as voltagens correspondentes fornecidas pelo transdutor. A Figura 3.14 mostra detalhes da calibração.



Figura 3.14. Calibração do transdutor de deslocamento.

3.5 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

3.5.1 AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS

Como dito anteriormente neste trabalho, procurou-se avaliar a influência da presença do reforço em maciços onde tubulações encontram-se enterradas e são solicitados por ferramentas de escavação. Para tanto, nestes ensaios, variou-se o tipo de geossintético a ser utilizado, a configuração geométrica do reforço, o ângulo de aplicação de cargas e, em alguns casos, a posição do tubo com relação à direção de penetração do OC.

Como descrito no item 3.2.2 foram realizados ensaios com dois tipos de reforços, uma geogrelha e um geotêxtil tecido. Para cada tipo de reforço foram realizados ensaios em três configurações geométricas; camada, U invertido e envelopado. A Figura 3.15 apresenta as configurações geométricas utilizadas.

De acordo com Tupa (2006) a configuração geométrica dos reforços pode ser definida em função do processo construtivo da obra (existente ou nova). Para aterros com superfície horizontal e no

caso de duto existente, as configurações de reforço mais facilmente aplicáveis seriam as mostradas nas Figuras 3.15a e 3.15b. No caso de uma obra nova, a configuração de instalação do reforço poderia ser a mostrada na Figura 3.15c.

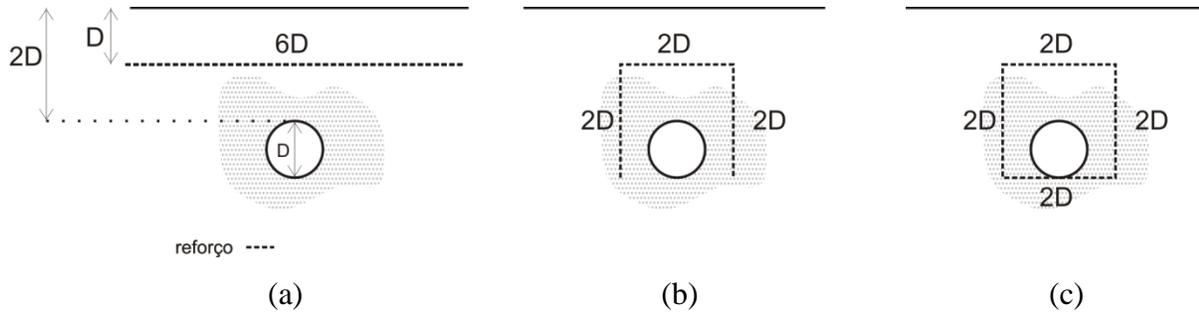


Figura 3.15. Configurações geométricas dos reforços: (a) Camada; (b) U invertido; (c) Envelopado.

Outra variável nos ensaios realizados foi o ângulo de aplicação de cargas. Como descrito no item 3.3.3, a mobilidade dos braços da estrutura de reação permitiu que fossem realizados ensaios com a direção de penetração do OC na vertical ($\alpha=0^0$) e variando sua inclinação com a horizontal formando ângulos de 16^0 e 45^0 . A Figura 3.16 esquematiza estas configurações.

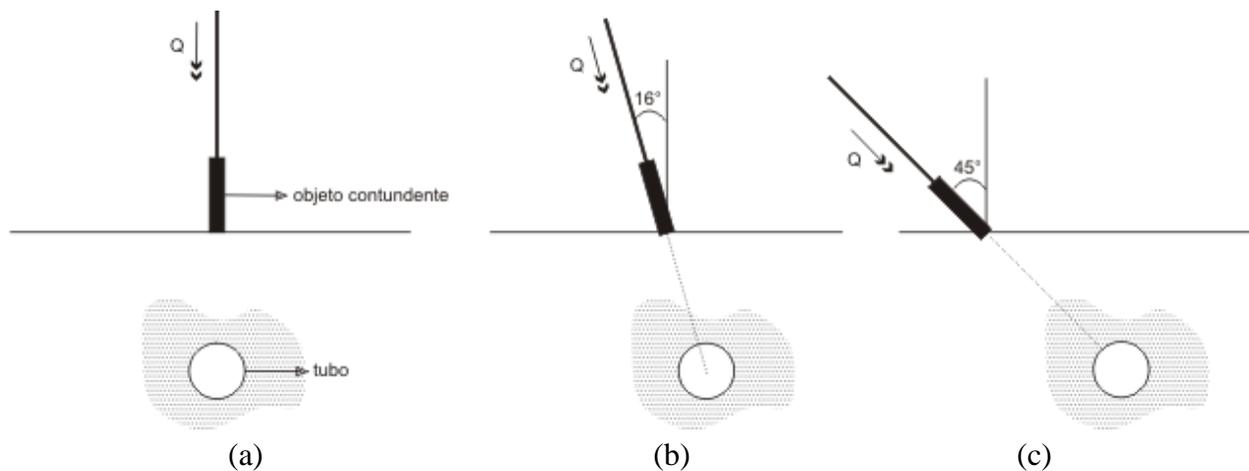


Figura 3.16. Ângulos de aplicação de cargas: (a) Direção de penetração do OC na vertical; (b) Direção de penetração do OC com $\alpha=16^0$; (c) Direção de penetração do OC com $\alpha=45^0$.

Nos ensaios realizados com ângulo de aplicação de cargas de 16^0 com a vertical ainda variou-se a posição do tubo com relação à direção de penetração do OC. Assim, foram realizados ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo e com direção de penetração

do OC passando pela lateral do tubo a uma distância D do seu centro, conforme ilustrado na Figura 3.17.

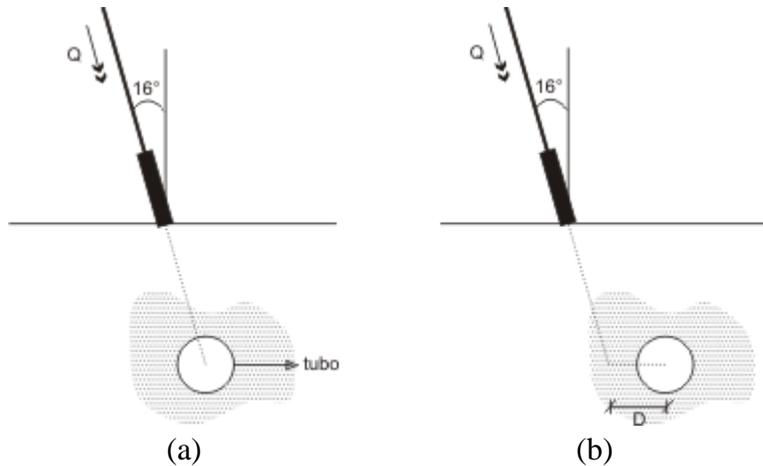


Figura 3.17. Posição do tubo com relação à direção de penetração do OC: (a) Direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo.

A Tabela 3.3 resume as variáveis utilizadas nas configurações dos ensaios executados.

Tabela 3.3. Variáveis dos ensaios.

Configuração do Reforço	Tipos de Reforços	Ângulo (α)	Posição do tubo com relação ao OC
Camada	Geotêxtil tecido	0°	Passando pelo centro
U-Invertido	Geogrelha	16°	Passando pela lateral
Envelopado		45°	

3.5.2 CÓDIGOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios executados durante o programa experimental foram realizados combinando-se as diversas variáveis resumidas na Tabela 3.3. A fim de facilitar a identificação destes, serão aqui apresentados os códigos utilizados na sua nomenclatura. Foram executados cinco ensaios de referência (sem reforço). As únicas variáveis nestes ensaios foram o ângulo de aplicação das cargas e a posição do centro do tubo em relação à direção de penetração do OC (naqueles com

$\alpha=16^\circ$). Também foram executados 11 ensaios reforçados com diferentes configurações. A Tabela 3.4 resume os símbolos que representam as variáveis dos ensaios. A Tabela 3.5 resume o programa de ensaios e apresenta a nomenclatura adotada.

Tabela 3.4. Símbolos que representam as variáveis dos ensaios

Ângulo α de aplicação da carga		Tipo de reforço		Arranjo dos Reforços		Posição da linha de ação de cargas com relação ao centro do tubo	
Variável	Símbolo	Variável	Símbolo	Variável	Símbolo	Variável	Símbolo
0°	0	Geogrelha	GG	Camada	C	Distante do centro	DC
16°	16	Geotêxtil	GT	U invertido	U	Passando pelo centro	-
45°	45	Tecido		Envelopado	E		

Tabela 3.5. Lista de ensaios realizados e nomenclatura utilizada.

Ensaio	Identificação	Ângulo α	Tipo de reforço	Tipo de arranjo	Direção de penetração do OC
Referência	0-SR	0°	-	-	Passando pelo centro
Referência	0-SR2*	0°	-	-	Passando pelo centro
03	0-GG-C	0°	Geogrelha	Camada	Passando pelo centro
04	0-GG-C(R)**	0°	Geogrelha	Camada	Passando pelo centro
05	0-GT-C	0°	Geotêxtil tecido	Camada	Passando pelo centro
06	0-GG-U	0°	Geogrelha	U invertido	Passando pelo centro
07	0-GT-U	0°	Geotêxtil tecido	U invertido	Passando pelo centro
08	0-GG-E	0°	Geogrelha	Envelopado	Passando pelo centro
09	0-GT-E	0°	Geotêxtil tecido	Envelopado	Passando pelo centro
Referência	16-SR	16°	-	-	Passando pelo centro
11	16-GG-E	16°	Geogrelha	Envelopado	Passando pelo centro
12	16-GT-E	16°	Geotêxtil tecido	Envelopado	Passando pelo centro
Referência	16-SR-DC	16°	-	-	Distante do centro

14	16-GG-E-DC	16°	Geogrelha	Envelopado	Distante do centro
Referência	45-SR	45°	-	-	Passando pelo centro
16	45-GG-E	45°	Geogrelha	Envelopado	Passando pelo centro

Notas: *O 2 inserido na identificação é justificado pela duplicidade do ensaio para efeito de comparação de resultados e verificação de repetibilidade.

** Ensaio realizado com a geogrelha instalada com uma espessura de aterro igual ao raio do tubo (R) acima de sua cota. Nos demais ensaios essa altura foi de D (2R).

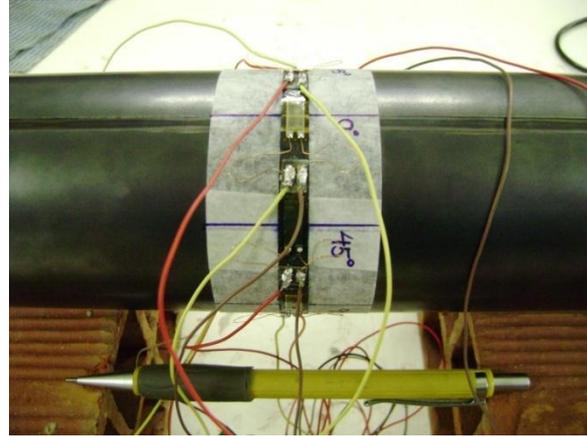
Para exemplificar a nomenclatura adotada ilustra-se o ensaio 0-GG-C. Assim, trata-se do ensaio realizado com ângulo de aplicação de carga de 0°, reforçado com geogrelha sendo seu arranjo na forma de camada e direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo. Para os ensaios de referência representa-se apenas o ângulo de aplicação seguido do símbolo SR (sem reforço) e caso necessário o símbolo referente à posição do duto, por exemplo, 16-SR-DC.

3.5.3 PREPARAÇÃO DO TUBO

O tubo utilizado nos ensaios foi instrumentado com extensômetros elétricos colados ao longo de seu diâmetro, em sua seção central. Os pontos de colagem dos extensômetros foram espaçados por ângulos de 45° a partir do topo do tubo e sua instalação seguiu as recomendações descritas por Palmeira (1996). A Figura 3.18 mostra a preparação do tubo. A seqüência da preparação consistiu nas seguintes etapas: (i) Aplicação do condicionador e neutralizador na superfície do tubo, seguido da locação e colagem dos extensômetros e terminais soldáveis no tubo (Figura 3.18a); (ii) Solda dos fios de cobre do extensômetro e dos fios que faziam ligação ao sistema de aquisição no terminal por meio de ligações de ¼ de ponte (Figura 3.18b). O comprimento total do fio (do terminal do extensômetro elétrico ao Spider) era de 1,5 m; (iii) Aplicação de resina e borracha de silicone nos extensômetros, terminais e soldas com a função de proteção mecânica (Figura 3.18c); (iv) Conexão dos fios que faziam a ligação de cada extensômetro ao Spider aos conectores de quinze pinos, devidamente soldados (Figura 3.18d). Assim, cada conector era ligado a um canal do Spider e ao longo dos ensaios as deformações de cada extensômetro eram registradas.



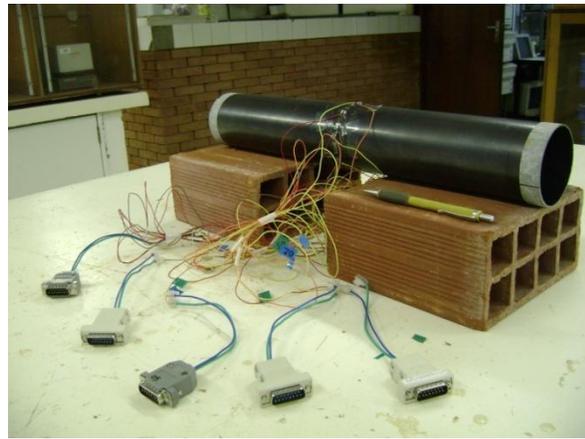
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.18. Seqüência de preparação do tubo.

Para que se pudesse garantir o bom funcionamento do tubo e a possibilidade de sua reutilização nos ensaios, verificava-se se as deformações registradas encontravam-se dentro do regime elástico de deformação da grade do extensômetro (2%). Caso esse valor fosse ultrapassado, um novo tubo deveria ser confeccionando. A fim de avaliar se as paredes do tubo deformavam-se em regime elástico, após cada ensaio, media-se o diâmetro do tubo em pontos previamente demarcados, com auxílio de um paquímetro. Diversas medidas eram efetuadas para um mesmo par de pontos. A partir da média e do desvio padrão das medidas efetuadas antes e após os ensaios, e utilizando testes estatísticos, podia-se concluir se o diâmetro inicial equivalia ao diâmetro final. Caso fosse concluída a equivalência o tubo poderia continuar a ser usado.

3.5.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de reforços foram preparadas de acordo com a metodologia utilizada por Tupa (2006). As formas e dimensões dos arranjos utilizados estão ilustradas na Figura 3.14. 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).

3.5.5 MONTAGEM DO ENSAIO

Como descrito no item 3.2.2 a construção do aterro foi feita pelo método da chuva de areia. Uma vez aberta a comporta da caixa dispersora, a areia saía pelos furos existentes em sua base, sendo depositada na caixa de ensaios. A altura mínima de queda foi de 53 cm, entre a face inferior da caixa dispersora móvel e o nível superior do aterro. O aterro foi construído em camadas com altura de 5 cm controladas por meio da malha de elementos quadrados existentes na face da caixa. Na interseção entre duas camadas de areia, instalava-se, junto a face transparente, uma cama de areia colorida. Nas arestas dos quadrados da malha eram inseridos marcos cilíndricos junto a face transparente.

Para montagem dos ensaios seguia-se uma seqüência construtiva. A Figura 3.19 ilustra essas etapas. As etapas de construção resumem-se da seguinte forma: (i) Lançamento das camadas de solo na caixa de ensaios intercaladas pela instalação da linha de areia colorida e dos marcos (Figura 3.19a); (ii) Instalação do tubo na cota previamente estabelecida (Figura 3.19b); (iii) Posicionamento do reforço no maciço de acordo com a sua geometria no ensaio (Figura 3.19c); (iv) Instalação das células de tensões totais em pontos previamente estabelecidos (Figura 3.19d), ilustrados na Figura 3.8; (v) Lançamento das camadas de areia até a cota de colagem das extremidades do reforço (para os arranjos em U invertido e envelopado) (Figura 3.19e); (vi) Lançamento das demais camadas de areia até a cota final do aterro (Figura 3.19f).

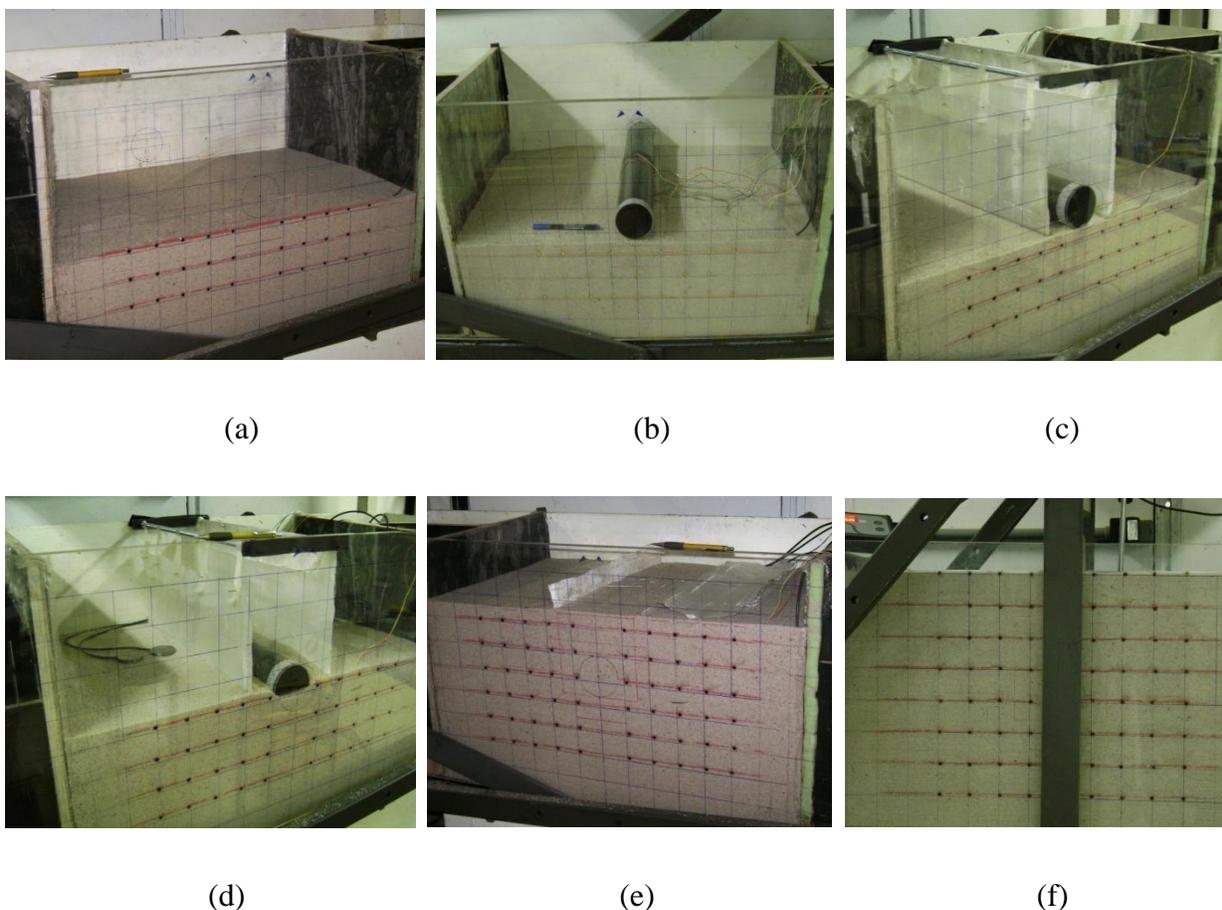


Figura 3.19. Etapas de montagem dos ensaios.

Para o posicionamento dos reforços com arranjos em U invertido e envelopado 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 3.19c). As barras possuem porcas nas extremidades para auto-fixação pela pressão da reação nas paredes. A forma dos reforços nesses arranjos foram obtidos por colagem das extremidades do reforço em uma faixa de 2 cm na quina superior esquerda dos arranjos. Este procedimento também foi utilizado com sucesso por Tupa (2006).

3.5.6 PROCEDIMENTO DO ENSAIO

Concluída a construção do aterro, procedia-se a montagem do equipamento para execução dos ensaios. A montagem do equipamento consistia em: (i) posicionamento e fixação dos braços

móveis da estrutura de reação de acordo com o ângulo a ser utilizado, (ii) acoplamento do conjunto que permitia a penetração do OC no maciço à estrutura (ver Figura 3.6c), (iii) posicionamento do OC rente ao topo do maciço, (iv) engate da bomba no cilindro hidráulico e (v) fixação do transdutor de deslocamento junto à placa de alumínio do OC. A Figura 3.20 mostra uma vista geral de um ensaio montado e em andamento.



Figura 3.20. Vista geral de um ensaio montado e em andamento.

Com o sistema montado, a instrumentação conectada ao sistema de aquisição de dados e a câmera fotográfica devidamente posicionada, iniciava-se o ensaio. Primeiramente, aplicava-se carga no macaco hidráulico. Esse mecanismo ejetava o êmbolo do cilindro fazendo com que a placa de alumínio do OC penetrasse o maciço. A Figura 3.21 ilustra esse mecanismo. À medida que os incrementos de carga eram aplicados, a célula de carga, uma vez conectada ao cilindro, registrava esses valores. O transdutor de deslocamento acompanhava o movimento de penetração do OC, registrando por meio do Spider esses deslocamentos. As deformações sofridas pelo tubo, devido à penetração do OC, também eram registradas ao longo dos ensaios. O ensaio chegava ao fim quando o curso (10 cm) do êmbolo do cilindro se esgotava.



(a)



(b)

Figura 3.21. Dinâmica do ensaio: (a) Início do ensaio; (b) Final do ensaio.

3.6 REPETIBILIDADE DOS RESULTADOS

Como descrito no item 3.5.6 durante os ensaios eram feitas leituras dos deslocamentos do OC por meio do transdutor de deslocamento e das cargas aplicadas por meio da célula de carga. A partir destes registros foram elaborados gráficos em termos da carga aplicada para o OC penetrar o maciço (kN) x d (mm), onde d representa as variações de distância entre a base do OC e o topo do tubo. Na Figura 3.22 apresentam-se as curvas obtidas nos dois ensaios de referência. Ambos foram executados sob as mesmas condições a fim de que se pudesse avaliar a repetibilidade dos resultados. Isso foi feito para se ter idéia da precisão dos mesmos, uma vez que a proposta dos ensaios não possui equipamentos nem metodologia usuais.

De uma forma geral, observa-se, a partir das curvas que os resultados apresentaram boa repetibilidade.

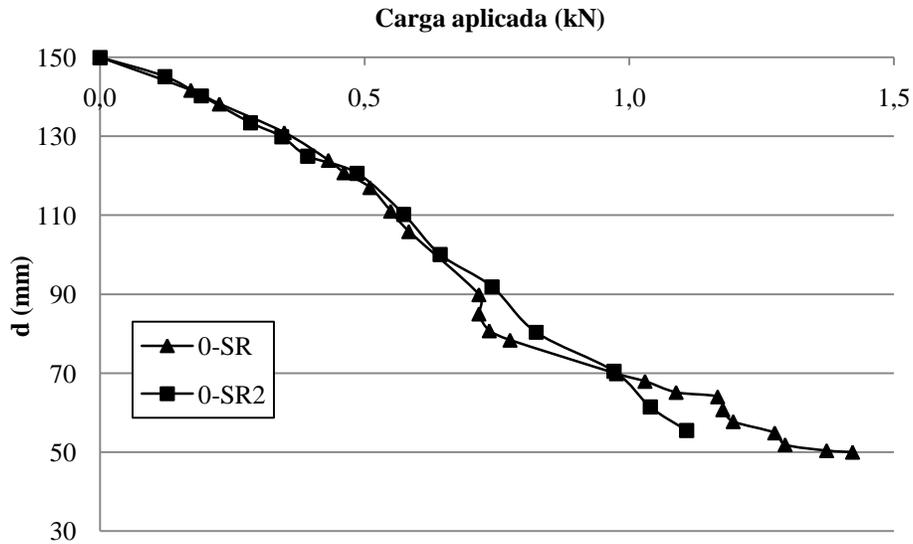


Figura 3.22. Repetibilidade dos ensaios de referência com carga aplicada na vertical.

A Figura 3.23 apresenta os registros de uma das células de tensão inseridas na mesma posição no interior do maciço em ambos os ensaios. As demais células foram instaladas em pontos diferentes a fim de que se pudesse estabelecer seu melhor posicionamento. Os resultados destes registros também apresentam boa repetibilidade.

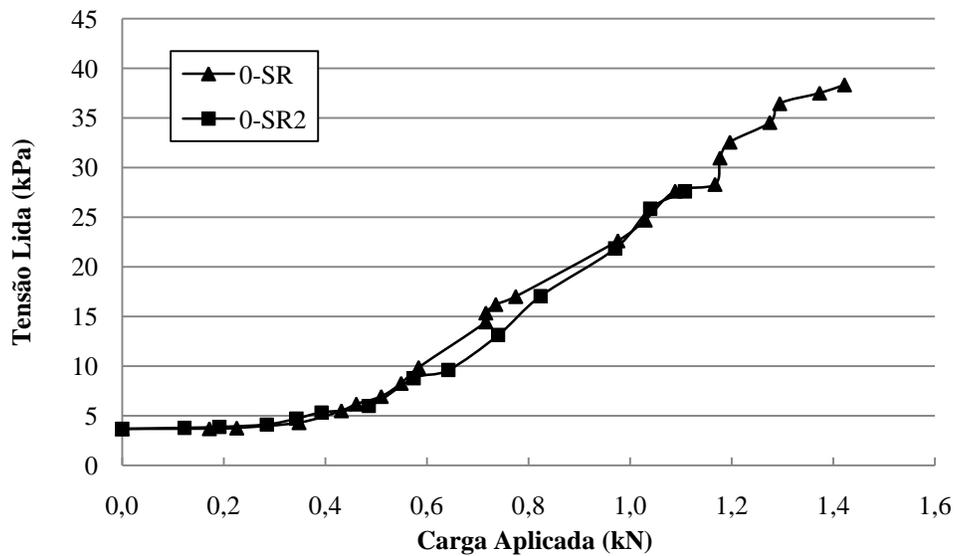


Figura 3.23. Repetibilidade dos registros da célula de tensão total.

CAPÍTULO 4

4. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DO REFORÇO NAS CARGAS E TENSÕES MEDIDAS NOS ENSAIOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios realizados para avaliar a utilização de geossintéticos como elemento de reforço em solos que contém tubulações enterradas. Para que esse objetivo fosse cumprido, foram realizados ensaios laboratoriais em escala reduzida, já descritos no capítulo anterior. A fim de facilitar a compreensão dos resultados, as informações obtidas serão agrupadas da seguinte forma. Primeiramente, serão expostos os dados referentes à penetração do objeto contundente no maciço e em seguida, serão apresentados os resultados dos registros de tensões totais no maciço e nas vizinhanças do tubo. Em cada um destes tópicos serão abordados os diversos tipos de configurações dos ensaios agrupados de acordo com o ângulo α de aplicação das cargas.

4.2 ESTUDO DO MECANISMO DE PENETRAÇÃO DO OBJETO CONTUNDENTE (OC) NO MACIÇO

Neste tópico, apresentam-se os resultados obtidos a partir da perfuração do maciço pelo objeto contundente (OC). O principal objetivo destes registros foi avaliar o aumento da resistência à penetração do OC em maciços reforçados a fim de proteger tubulações enterradas. Como descrito no Capítulo 3, o OC era pressionado contra o maciço com o auxílio de uma bomba hidráulica. À medida que as cargas eram aplicadas, o êmbolo do cilindro era ejetado fazendo com que a ferramenta fosse inserida no solo, até que o curso do cilindro fosse esgotado. As cargas aplicadas e as medidas de deslocamento do OC foram registradas, respectivamente, pela célula de carga e pelo transdutor de deslocamento. A partir destes registros, foram elaborados gráficos que serviram de subsídio para as análises necessárias ao estudo.

4.2.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA NA VERTICAL ($\alpha=0^0$)

Os gráficos apresentados neste item são estruturados em termos de Q (carga aplicada no maciço, kN) x d (mm), onde d representa a distância entre a base do OC e o topo do tubo (Figura 4.1). No início dos ensaios com carga aplicada na vertical essa distância era de 150 mm ($d_o= 150$ mm). Ao final dos ensaios, após a placa de alumínio do OC penetrar o maciço, essa distância era reduzida para aproximadamente 50 mm ($d_f= 50$ mm).

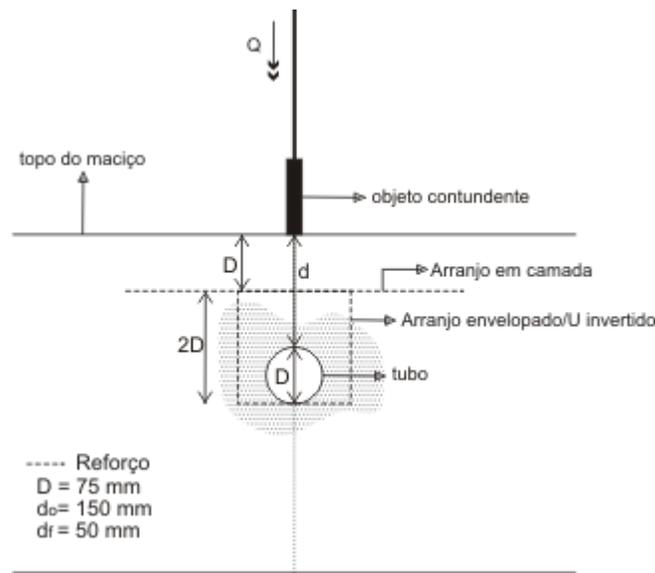


Figura 4.1. Esquema dos ensaios realizados com aplicação de carga na vertical.

A Figura 4.2 ilustra os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados utilizando geotêxtil tecido e geogrelha em arranjo com camada horizontal. Também estão inseridos nesta figura os resultados do ensaio sem reforço, a fim de que se possa estabelecer comparações. Pode-se observar que do início do ensaio ($d = 150$ mm) até o momento em que o objeto contudente encontrava-se a aproximadamente 95 mm do tubo ($d = 95$ mm) não se percebem diferenças significativas entre os ensaios com e sem reforço, com exceção do ensaio 0-GG-C(R). Isso pode ser explicado pelo fato do reforço não ter sido solicitado até este momento e assim, os conjuntos se comportam de maneira semelhante.

Para valores de d inferiores a 95 mm, pode-se observar um contínuo aumento de resistência à penetração do OC nos ensaios reforçados. A carga final de 1,42 kN no ensaio de referência (0-

SR) foi atingida para uma distância entre a base do OC e o topo do tubo igual a 50 mm. Esse mesmo nível de carga nos ensaios 0-GG-C, 0-GG-C(R) e 0-GT-C foi atingido para valores de d iguais a 85, 105 e 87 mm, respectivamente. Esses resultados mostram que, para um mesmo nível de carga, o objeto contundente se aproximaria menos do tubo nos casos reforçados. Analisando os níveis finais de carregamentos necessários para completar o curso final da penetração nos ensaios reforçados, observa-se que o nível de carregamento requerido em todas as configurações foi aproximadamente 2,5 vezes superior ao do ensaio de referência.

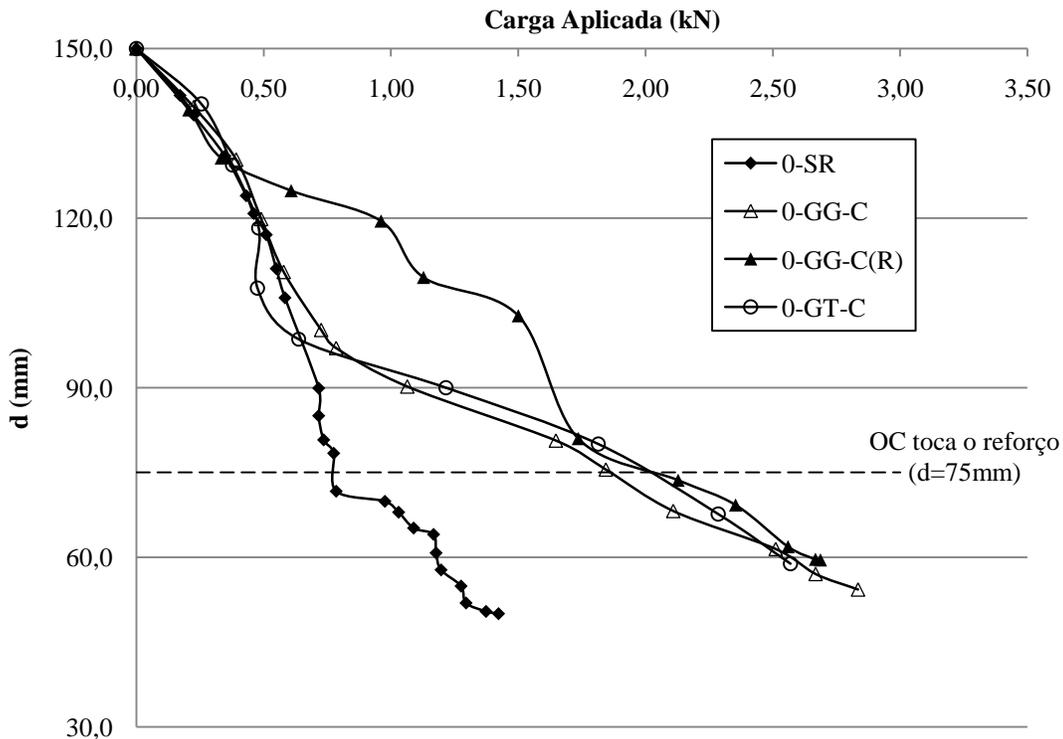


Figura 4.2. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha em arranjo em camada.

O comportamento atípico do ensaio 0-GG-C(R) pode ser explicado pelo fato deste ensaio ter sido realizado com a geogrelha instalada com uma espessura de aterro R (raio do tubo) acima de sua cota. Nos demais ensaios essa espessura foi igual a D . Neste caso, o OC, no início do ensaio, encontrava-se mais próxima da geogrelha e a mobilização de cargas de tração no reforço ocorreu de forma mais precoce quando comparado aos demais ensaios reforçados.

A Figura 4.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio de referência e em ensaios envolvendo geotêxtil tecido (0-GT-U) e geogrelha (0-GG-U) com arranjo na forma de U invertido.

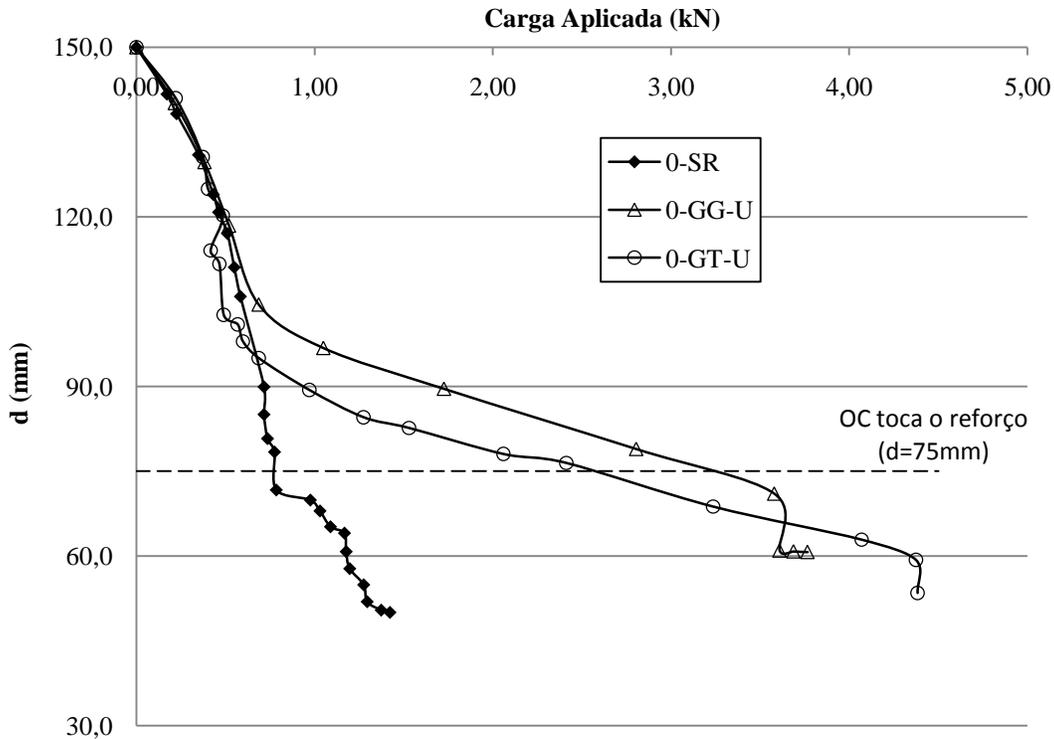


Figura 4.3. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha em arranjo U invertido.

De forma similar aos ensaios realizados com arranjo em camada, os aterros reforçados com arranjo em U invertido apresentaram comportamento semelhante ao do aterro sem reforço no início do ensaio. Para valores de d inferiores a aproximadamente 105 mm percebe-se o efeito benéfico da presença do reforço no ensaio 0-GG-U. No ensaio 0-GT-U esse efeito benéfico só é percebido para valores de d inferiores a 95 mm. Até valores de d da ordem de 60 mm, para um dado valor de carga, o afundamento é um pouco maior para o ensaio com geotêxtil tecido. O melhor desempenho da geogrelha neste arranjo até valores de d da ordem de 60 mm pode ser atribuído à maior interação entre solo e reforço, devido à mobilização da resistência passiva (por ancoragem) nos membros transversais da grelha e atrito ao longo da superfície da geogrelha. Entretanto, ao final do ensaio, observa-se um comportamento ligeiramente melhor para o ensaio com geotêxtil, o que pode ser consequência da passagem de grãos de solo através das aberturas

da geogrelha, o que diminuiu a sua eficiência. Situação semelhante foi observada por Tupa (2006) em ensaios simulando explosões de tubulações enterradas em maciços reforçados.

Observa-se que, quando aplicada a carga final do ensaio de referência (1,42 kN), a base do OC encontrava-se a aproximadamente 50 mm do tubo. No caso dos ensaios reforçados com arranjo em U invertido, para esse mesmo nível de carregamento essa distância era de aproximadamente 92 mm para o ensaio 0-GG-U e 83 mm para o ensaio 0-GT-U. Esses resultados confirmam também os benefícios da inclusão do reforço. Para que este fato fique ainda mais claro, note-se que para que o OC atingisse uma cota de 70 mm de penetração nos ensaios reforçados foi necessário um carregamento 4,0 vezes superior no ensaio 0-GG-E e 3,8 vezes superior no ensaio 0-GT-E, em comparação ao carregamento aplicado no ensaio de referência para se atingir essa mesma cota.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios envolvendo as configurações em arranjo envelopado com geotêxtil tecido e geogrelha, assim como o ensaio de referência estão representados na Figura 4.4. Os resultados obtidos nos ensaios com arranjo envelopado também mostram comportamento similar entre os maciços com e sem reforço no início do ensaio. A partir do momento em que o reforço passa a ser mais solicitado ($d < 90$ mm) pode-se perceber o aumento da resistência à penetração do OC ao longo dos ensaios reforçados. Comparando-se a distância entre a base do OC e o topo do tubo para o nível final de carga do ensaio de referência (1,42 kN), nota-se que houve um aumento de 50 mm para aproximadamente 85 mm em ambos os ensaios reforçados (0-GG-E e 0-GT-E). É importante observar também que ao final dos ensaios 0-GG-E e 0-GT-E os valores finais de d são semelhantes (aproximadamente 50 mm), no entanto, os níveis finais de carga aplicados para atingir tal penetração foram diferentes. No ensaio 0-GG-E o nível máximo de carga atingiu 8,48 kN (aproximadamente seis vezes superior ao ensaio de referência). No ensaio 0-GT-E esse valor chegou a 13,24 kN, ou seja, aproximadamente nove vezes superior ao ensaio de referência. O maior ganho de resistência à penetração obtido no ensaio envolvendo geotêxtil tecido pode ser explicado pelo fato da configuração geométrica da geogrelha conter aberturas. Assim, para níveis de carga mais elevados a passagem de grãos de areia pelas suas aberturas pode ter reduzido a sua eficiência como reforço.

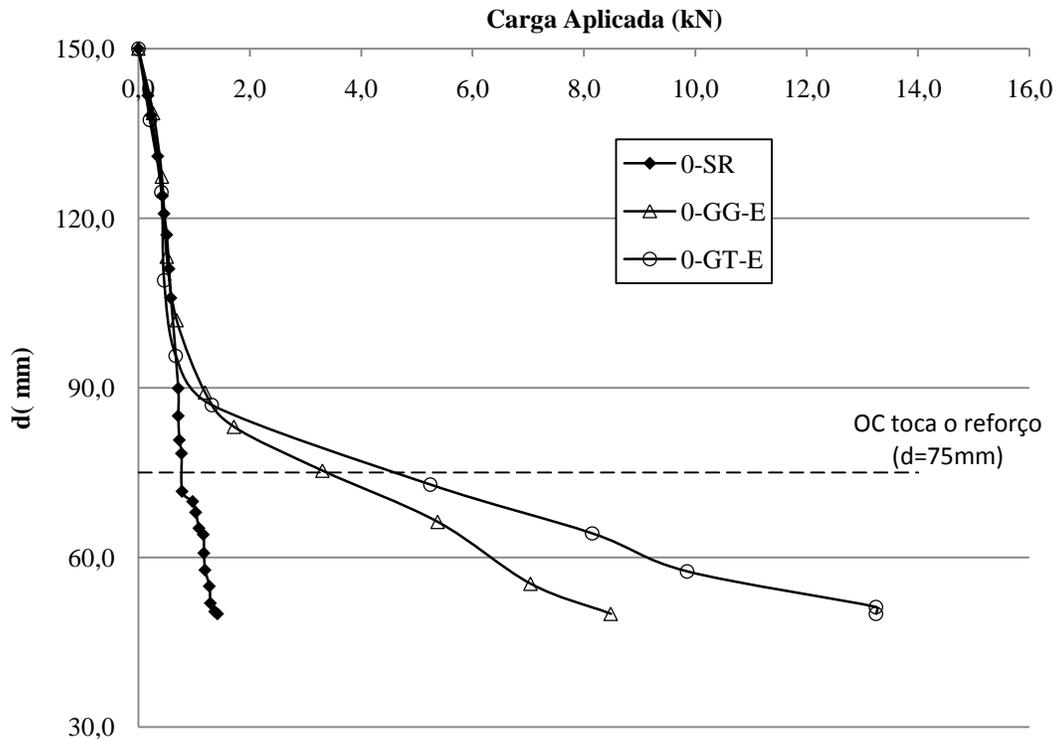


Figura 4.4. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha em arranjo envelopado.

4.2.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 16° ($\alpha=16^{\circ}$)

Os ensaios realizados com a carga fazendo um ângulo α de 16° com a vertical foram realizados em duas situações. A primeira com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo e a segunda com a direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo. Isso foi feito com o intuito de se verificar a influência da inclinação e da posição relativa do OC no comportamento do conjunto. A Figura 4.5 esquematiza essas situações.

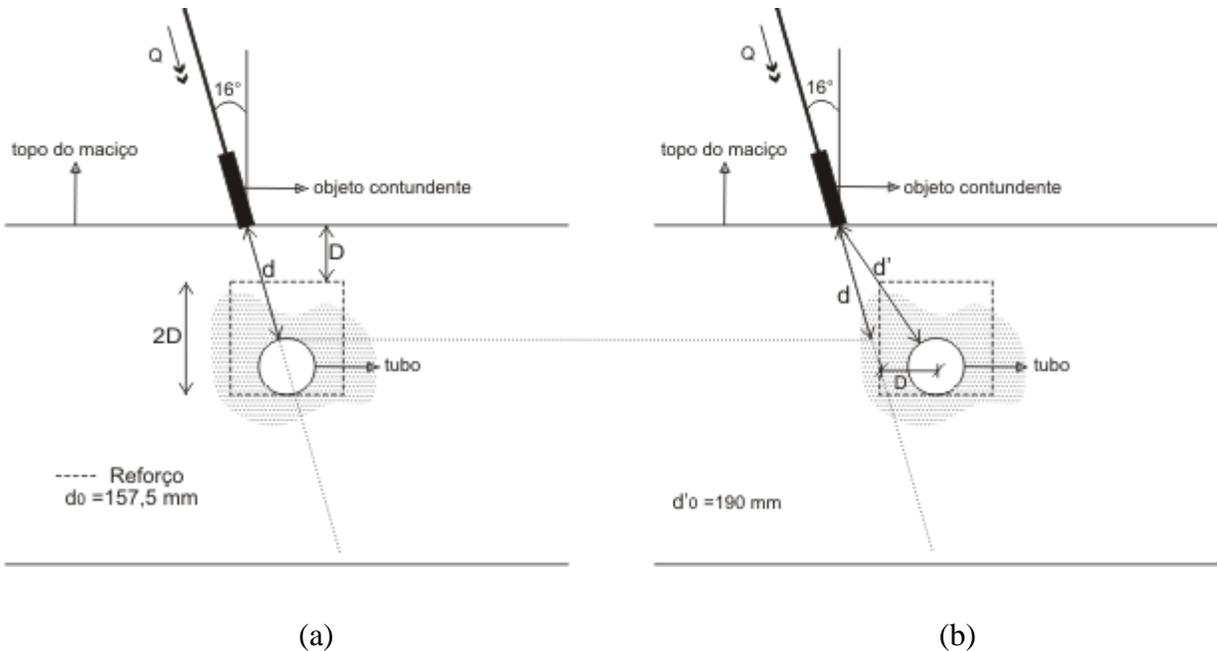


Figura 4.5. Esquema dos ensaios realizados com aplicação de carga inclinada ($\alpha=16^0$): (a). Direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b). Direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo.

Os resultados de ambos os casos também estão expressos por meio de gráficos em termos da carga aplicada no maciço (kN) x d (mm). Na primeira situação, os valores de d representam as variações de distância entre a base do OC (objeto contundente) e a superfície do tubo ao longo da direção de penetração (Figura 4.5a). Pode-se observar que no início dos ensaios, momento em que o OC era posicionado no topo do maciço, a distância entre a base do OC e a superfície do tubo era de 157,5 mm ($d_0=157,5$ mm).

Na segunda situação, d representa a distância, ao longo da direção de cravação do OC, entre a base do OC e a linha horizontal, equivalendo ao mesmo valor de d da primeira situação (Figura 4.5b). Nessa mesma figura, os valores de d' representam as variações de distância entre a base do OC e a superfície do tubo na direção de seu centro. Neste caso, o valor inicial de d' (no início dos ensaios) era de 190 mm ($d'_0=190$ mm).

Estes ensaios foram realizados sem a presença do reforço e reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha com arranjo envelopado. Esse arranjo foi escolhido por ter sido o que mostrou maior eficiência em reforçar o aterro.

A Figura 4.6 apresenta as cargas aplicadas e os valores de d obtidos a partir da penetração do objeto contundente no maciço para a situação em que a direção de penetração do OC passa pelo centro do tubo. De maneira similar ao que ocorreu nas demais configurações de ensaios, o mecanismo de penetração se deu de forma semelhante nos ensaios reforçados e sem reforço no início do ensaio.

O ganho de resistência à penetração devido às inclusões dos reforços é claramente percebido na Figura 4.6. É importante notar que no ensaio de referência (16-SR), para que o OC penetrasse completamente no maciço, foi requerida uma carga de aproximadamente 1,19 kN. No ensaio 16-GT-E, para que esse nível de penetração fosse atingido, foi requerida uma carga aproximadamente 3,4 vezes superior (4,05 kN). No ensaio 16-GG-E esse carregamento foi de 5,70 kN, ou seja, aproximadamente cinco vezes superior àquela aplicada no ensaio de referência.

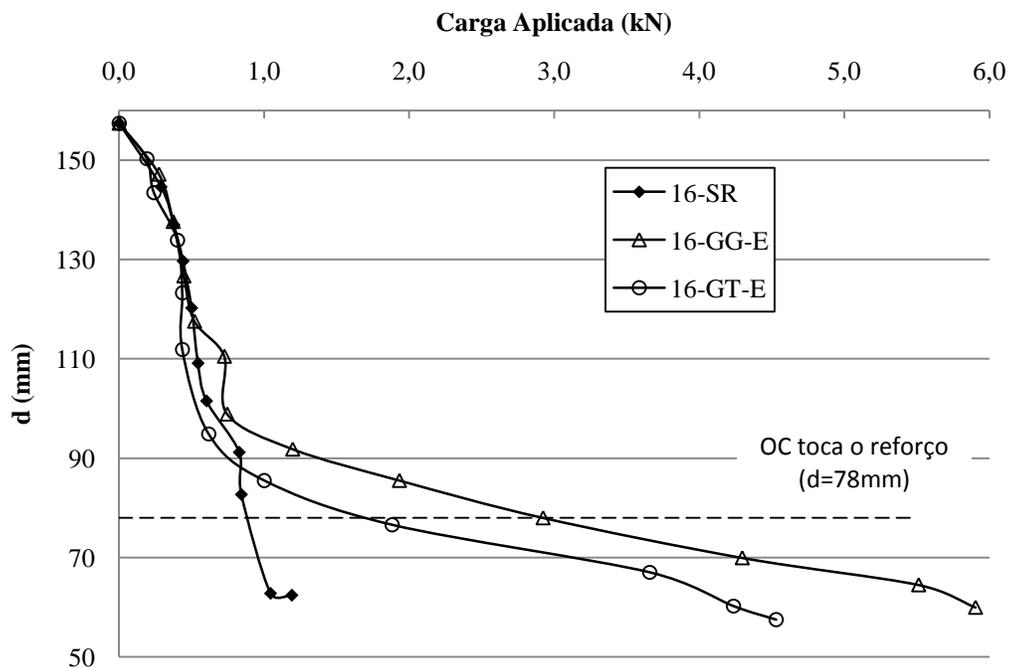


Figura 4.6. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geotêxtil tecido e geogrelha em arranjo envelopado - OC inclinado de 16° sobre direção passando pelo centro do tubo.

A Figura 4.7 apresenta os resultados dos ensaios para a situação em que a direção de penetração do OC passa na lateral do tubo com inclinação de 16° . A partir dos resultados dessa figura pode-

se perceber que a presença do reforço no maciço não acarretou ganhos significativos de resistência à penetração para a situação em que a direção de penetração do OC passa pela lateral do tubo.

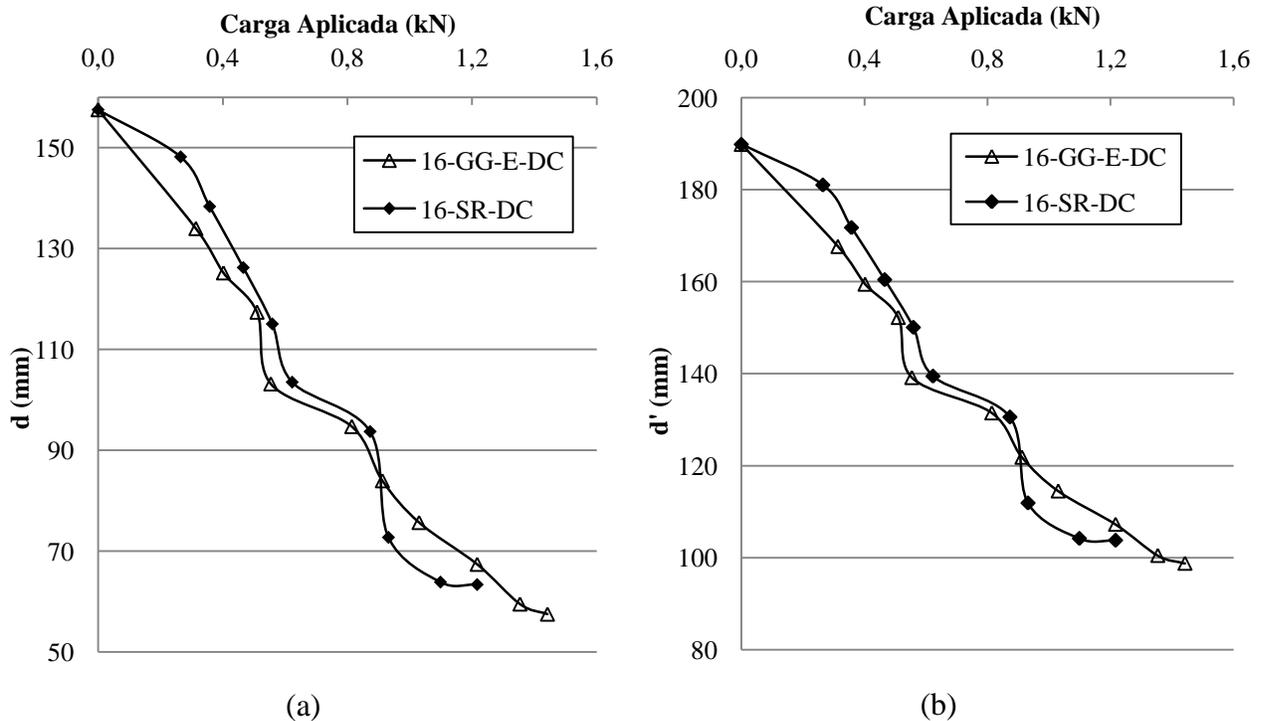


Figura 4.7. Resultados dos ensaios de aterros sem reforço e reforçados com geogrelha em arranjo envelopado - OC inclinado de 16° sobre direção passando na lateral do tubo: (a) Variações em função de d ; (b) Variações em função de d' .

Comparando-se os ensaios com geogrelha em arranjo envelopado nas situações com a direção de penetração do OC passando pelo centro e na lateral do tubo, observa-se que o nível de cargas requerido no ensaio 16-GG-E foi 4,4 vezes superior que no ensaio 16-GG-E-DC para que o OC atingisse sua cota final. No ensaio 16-GG-E-DC a direção de penetração do OC passa pela lateral do tubo a uma distância D do centro. Para o menor valor de d , o OC não toca o reforço e assim não o solicita de forma significativa à tração. No entanto, no ensaio 16-GG-E, o OC atinge o reforço, mobilizando-o mais à tração e provocando maior resistência à penetração. A Figura 4.8 esquematiza essas duas situações.

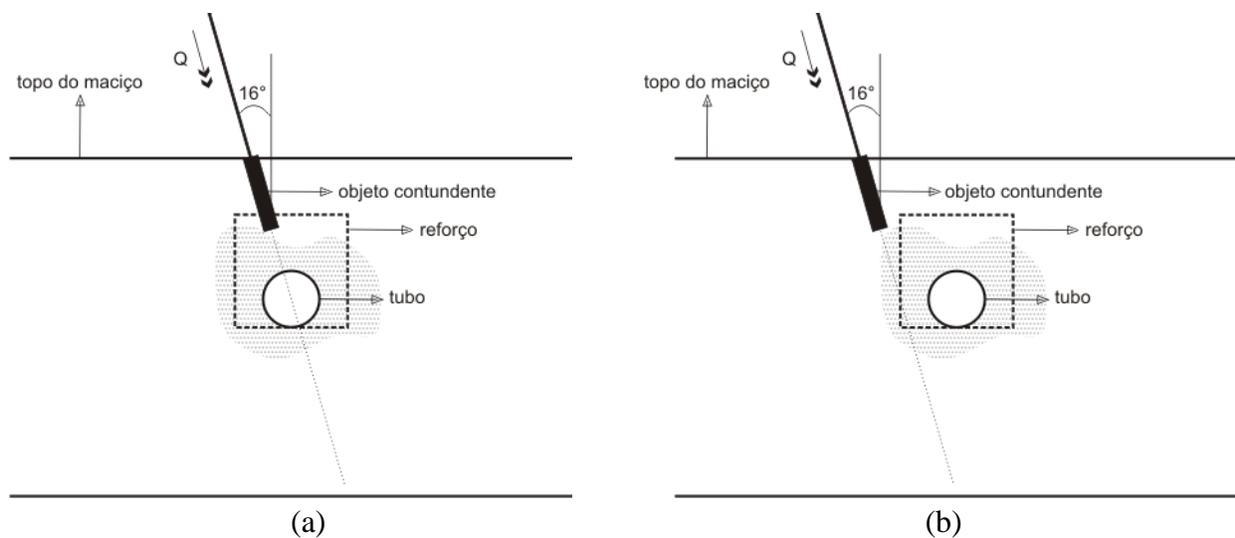


Figura 4.8. Posição final do OC: (a) Direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo.

4.2.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 45° ($\alpha=45^\circ$)

Por fim, serão tratados os dados obtidos nos ensaios com ângulo de aplicação de cargas de 45° . Neste caso, d também representa a distância entre a base do OC e a superfície do tubo ao longo da direção de penetração. No início dos ensaios, momento em que o OC era posicionado no topo do maciço, a distância entre a base do OC e a superfície do tubo (d_0) era de 227,7 mm (Figura 4.9a). Ao final dos ensaios (Figura 4.9b), o OC também não atingia a cota do reforço, sendo a distância final (d_f) de aproximadamente 127,7 mm.

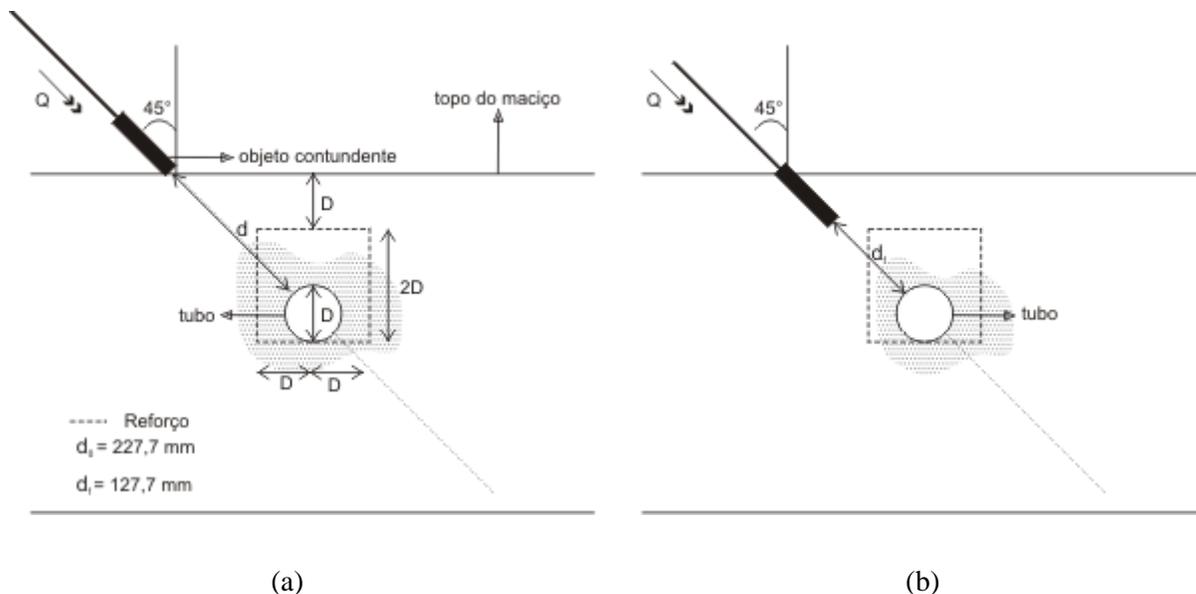


Figura 4.9. Esquema dos ensaios realizados com aplicação de carga inclinada ($\alpha=45^{\circ}$). (a) Início do ensaio; (b) Final do ensaio.

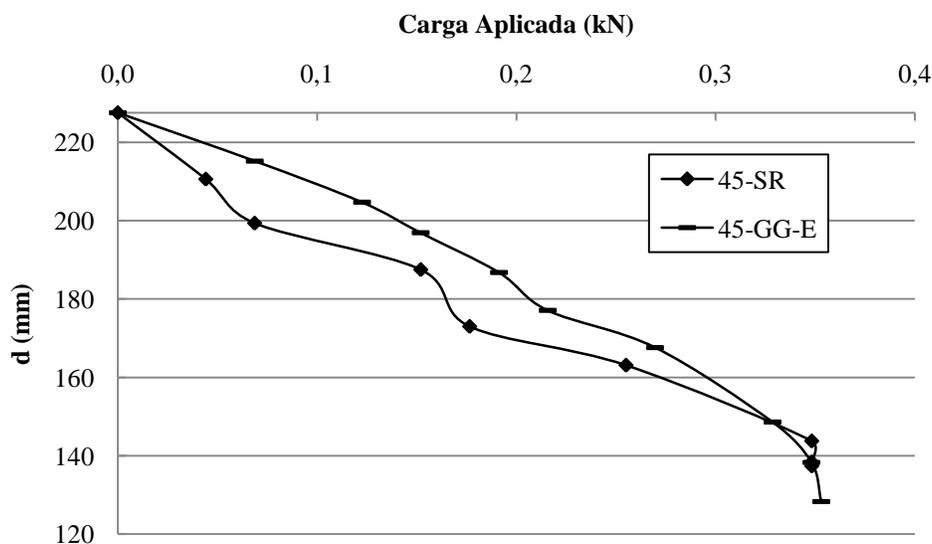


Figura 4.10. Resultados dos ensaios em aterros sem reforço e reforçados com geogrelha em arranjo envolado - OC inclinado de 45° .

Observa-se que a presença da geogrelha no maciço não acarretou grandes ganhos de resistência à penetração, uma vez que o mecanismo de penetração em ambos os ensaios (45-SR e 45-GG-E) se deu de maneira semelhante. Neste caso, o OC também não chega a atingir a cota do reforço e assim, não se percebem ganhos significativos de resistência.

4.2.4 COMENTÁRIOS SOBRE O ESTUDO DO MECANISMO DE PENETRAÇÃO DO OBJETO CONTUNDENTE (OC) NO MACIÇO

Em geral, os desempenhos de aterros reforçados com geossintéticos foram melhores que os dos sistemas sem reforço. Para facilitar o entendimento global dos resultados apresentados no item 4.2, apresenta-se a seguir tabelas com o resumo de algumas informações relevantes.

A Tabela 4.1 apresenta os níveis de carga (Q) atingidos em todos os ensaios reforçados e com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$), para um d igual a 70 mm. Nesta tabela apresentam-se ainda as relações entre carregamentos em ensaios com e sem reforço (Q/Q_{sr}). Os resultados da Tabela 4.1 mostram que em todos os sistemas reforçados houve ganho de resistência à penetração. Com relação ao tipo de arranjo, observa-se que o envelopado foi o que apresentou melhores resultados. Esse tipo de configuração possui melhores condições de ancoragem, fato responsável pelo seu melhor desempenho, sobretudo quando utilizado com o geotêxtil tecido. Os benefícios do uso da geogrelha podem ter sido reduzidos devido à passagem de grãos da areia pelas aberturas da grelha, reduzindo assim a mobilização de esforços de tração.

Tabela 4.1. Comparações entre carregamentos verticais ($\alpha = 0^0$) aplicados nos ensaios para d igual a 70 mm.

Ensaio	Q (kN)	Q/Q _{sr}
0-SR	0,85	1,00
0-GG-C	2,01	2,35
0-GG-C(R)	2,26	2,65
0-GT-C	2,16	2,52
0-GG-U	3,58	4,18
0-GT-U	2,99	3,50
0-GG-E	4,29	5,02
0-GT-E	5,87	6,86

O segundo melhor tipo de configuração, em termos de ganho de resistência à penetração foi o U-invertido. Observa-se que o uso da geogrelha neste tipo de arranjo apresentou melhores resultados quando comparados ao uso do geotêxtil tecido. Neste caso, a grelha apresentou

melhor ancoragem nas pernas do U que o geotêxtil tecido. Esse fenômeno pode ter compensado o efeito da passagem dos grãos pelas aberturas da grelha.

Embora os ensaios reforçados com arranjo em camada tenham apresentado os menores ganhos de resistência à penetração, se comparados aos resultados do sistema sem reforço, observa-se que esse arranjo apresentou o dobro de resistência.

A Tabela 4.2 apresenta os níveis de carga (Q) atingidos em todos os ensaios reforçados, com carregamento inclinado ($\alpha = 16^0$) e com direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo para d igual a 62,5 mm. Pode-se também observar que para os ensaios reforçados com carga aplicada a 16^0 , e com direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo, houve considerável ganho de resistência à penetração em relação ao sistema sem reforço.

Tabela 4.2. Comparações entre carregamentos inclinados ($\alpha = 16^0$) com direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo para d igual a 62,5 mm.

Ensaio	Q (kN)	Q/Qsr
16-SR	1,04	1,00
16-GG-E	5,68	5,44
16-GT-E	4,04	3,87

A Tabela 4.3 apresenta os níveis de carga (Q) atingidos em todos os ensaios reforçados, com carregamento inclinado ($\alpha = 16^0$) e com direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo para d igual a 62,5 mm. No caso dos ensaios reforçados, com carga aplicada a 16^0 e com direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo, não se observaram ganhos significativos de resistência à penetração do OC. O fato da direção de penetração do OC passar a uma distância D (diâmetro do tubo) do centro do tubo fez com que, para o nível máximo de penetração, o OC não tocasse o reforço e assim, a mobilização de esforços de tração no reforço foi menor, ao contrário do que ocorreu nos ensaios a 16^0 com linha de ação passando pelo centro do tubo.

Tabela 4.3. Comparações entre carregamentos inclinados ($\alpha = 16^{\circ}$) com direção de penetração do OC passando pela lateral do tubo nos ensaios para d igual a 62,5 mm.

Ensaio	Q (kN)	Q/Qsr
16-SR-DC	1,22	1,00
16-GG-E-DC	1,30	1,07

A Tabela 4.4 apresenta os níveis de carga (Q) atingidos nos ensaios reforçados com carregamento inclinado ($\alpha = 45^{\circ}$) para um d igual a 137,5 mm. Observa-se que, para os ensaios a 45° , a presença do reforço também não implicou ganhos significativos de resistência, fato que também pode ser explicado pelo OC não ter se aproximado muito da camada de reforço.

Tabela 4.4. Comparações entre carregamentos inclinados ($\alpha = 45^{\circ}$) com direção de penetração do OC passando pelo centro do duto, aplicados nos ensaios para um d igual a 137,5 mm.

Ensaio	Q (kN)	Q/Qsr
45-SR	0,35	1,00
45-GG-E	0,35	1,00

4.3 ESTUDO DAS TENSÕES DESENVOLVIDAS NO MACIÇO E NAS VIZINHANÇAS DO TUBO

O intuito desse estudo é verificar a influência da presença do reforço no desenvolvimento de tensões em aterros que contêm tubulações enterradas e são solicitados por ferramentas de escavação.

Neste item, serão abordados os resultados das tensões desenvolvidas no maciço e nas vizinhanças do tubo no momento em que cargas eram aplicadas e o OC penetrava o aterro. Esses resultados foram obtidos a partir dos registros de células de tensão total inseridas no maciço. Os pontos de instalação das células em relação ao tubo estão ilustrados Figura 4.11.

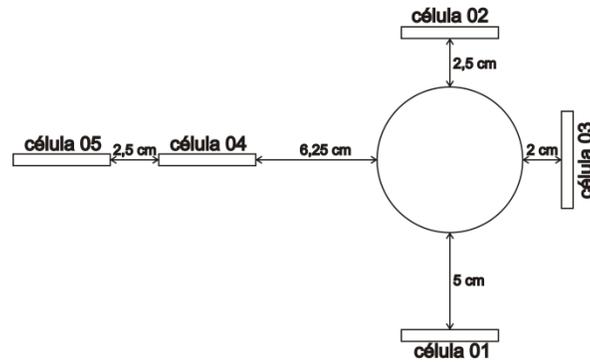


Figura 4.11. Posição das células de tensão no interior do maciço em relação ao tubo.

Apesar de terem sido utilizadas diferentes configurações para os reforços, as posições das células em relação ao tubo foram mantidas constantes em todos os ensaios. A Figura 4.12 facilita a visualização da posição das células com relação ao reforço.

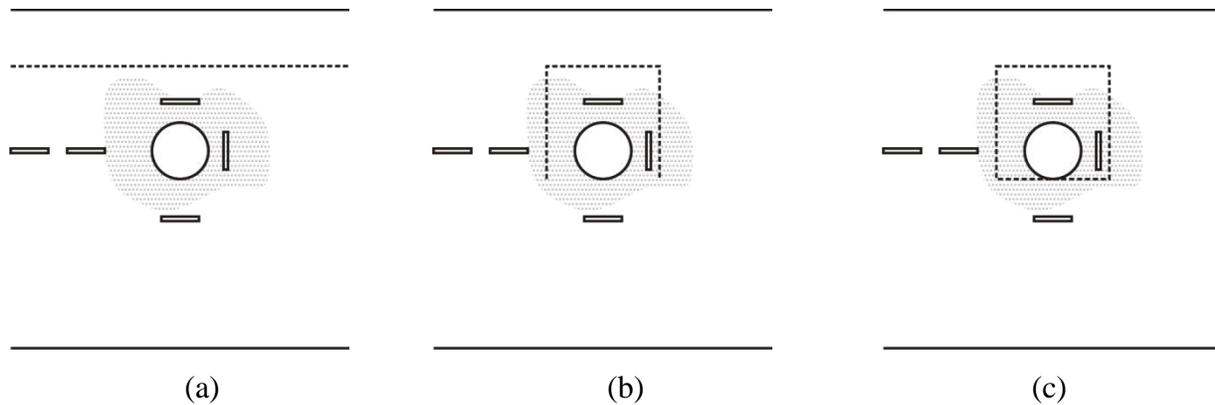


Figura 4.12. Posição das células de tensão em relação aos reforços: (a) Configuração em camada; (b) Configuração em U invertido (c) Configuração envelopada.

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos nos ensaios realizados agrupados de acordo com o ângulo de aplicação de cargas.

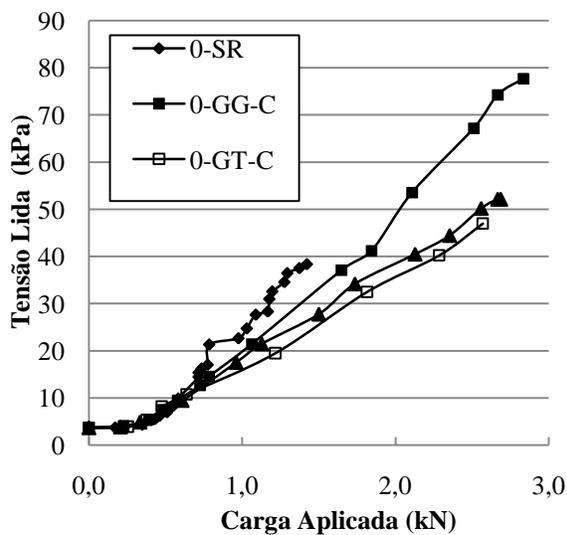
4.3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA NA VERTICAL ($\alpha=0^0$)

Neste item, serão apresentados os registros das cinco células de tensão total para os ensaios sem reforço e reforçados (geotêxtil tecido e geogrelha) com aplicação de cargas na vertical.

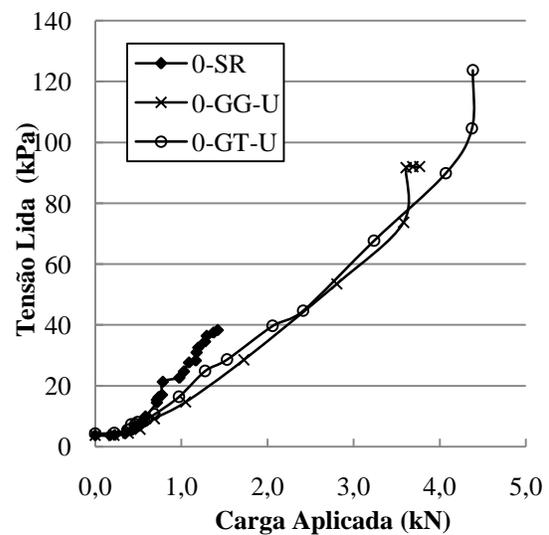
As Figuras 4.13a a c apresentam os registros efetuados pela célula de tensões 01. Como visto no item 4.2, os níveis de carga final atingidos nos ensaios variaram em função da configuração do reforço. Assim, neste item, os resultados foram plotados separadamente, de acordo com estas configurações, a fim de facilitar a compreensão dos registros.

A Figura 4.13 indica, de um modo geral, que em todos os ensaios reforçados, para os três tipos de configuração utilizados (camada, U invertido e envelopado), as tensões na região abaixo do tubo foram menores que as observadas no ensaio de referência (0-SR). Observa-se, em todos os casos, que esse efeito só é percebido a partir de um determinado nível de carga aplicado e, conseqüentemente, a partir de um determinado valor de d . É importante notar que, como dito no item 4.2, a presença do reforço no maciço causou um aumento significativo na força requerida para penetração do OC em comparação com a situação sem a presença do reforço. Assim, os registros finais de tensão total nos ensaios reforçados são sempre superiores ao do ensaio de referência.

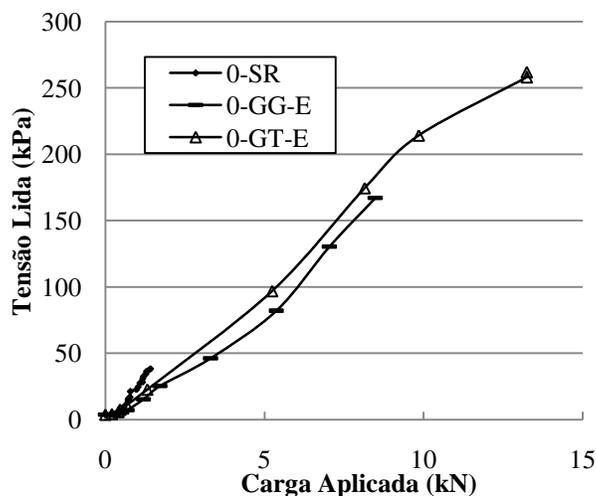
Na Figura 4.13a, observa-se que, até um nível de carga de 0,80 kN, as tensões registradas pela célula 01 foram semelhantes nos ensaios com e sem reforço. No entanto, entre este valor e o valor de carga final no ensaio sem reforço as tensões registradas nos ensaios reforçados foram sempre inferiores às registradas no ensaio de referência.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.13. Registros da célula de tensão 01 para ensaios com aplicação de carga na vertical ($\alpha = 0^0$): (a) Ensaios com configurações em camada; (b) Ensaios com configurações em U invertido (c) Ensaios com configurações envelopadas.

A Tabela 4.5 apresenta os níveis de tensão (σ) atingidos em todos os ensaios reforçados e com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$), para um nível de carga de 1,42 kN (carga final no ensaio sem reforço). Nesta tabela apresentam-se ainda as razões entre as tensões em ensaios reforçados (σ) e de referência (σ_{sr}), além dos valores de d atingidos para aquele nível de carga.

Tabela 4.5. Comparações entre tensões registradas pela célula 01 nos ensaios com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$) para um nível de carga de 1,42 kN.

Ensaio	σ (kPa)	σ/σ_{sr}	d (mm)
0-SR	38,32	1,00	50,0
0-GG-C	30,98	0,81	84,7
0-GG-C(R)	26,42	0,69	105,1
0-GT-C	23,92	0,62	87,0
0-GG-U	22,24	0,58	92,0
0-GT-U	27,00	0,70	83,3
0-GG-E	19,54	0,51	85,9
0-GT-E	24,64	0,64	85,8

Observam-se reduções de tensões normais de até 49% na região onde a célula 01 foi instalada a partir do uso da geogrelha no ensaio 0-GG-E, em comparação com o ensaio de referência.

As Figuras 4.14a a c apresentam os registros efetuados pela célula de tensão 02, que foi instalada entre o topo do tubo e o reforço (Fig. 4.12). A partir destes registros, observa-se que também nesta região, a presença do reforço em todas as configurações acarretou em reduções dos níveis de tensão atingidos no maciço em comparação com o ensaio sem inclusões.

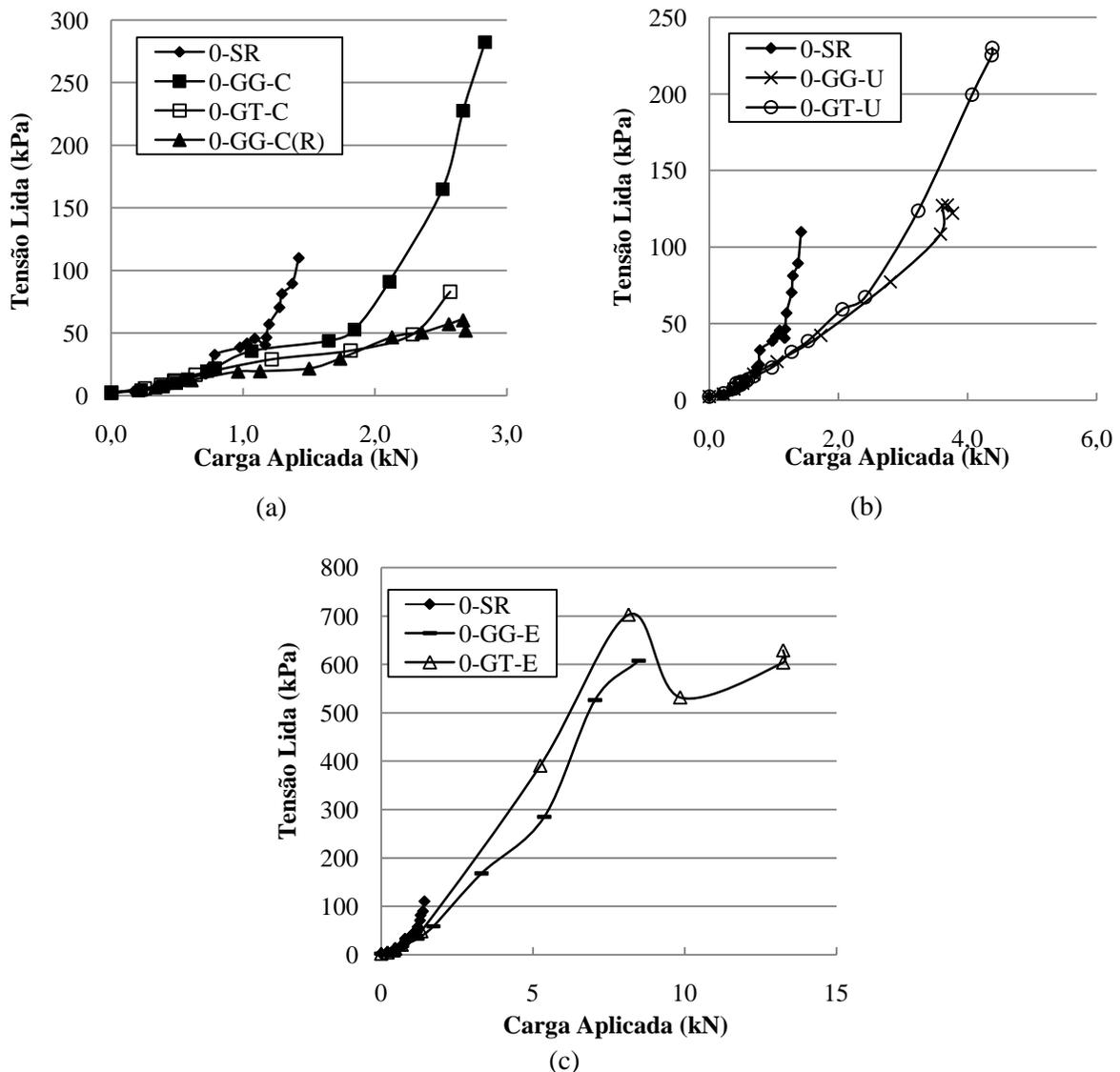


Figura 4.14. Registros da célula de tensão 02 para ensaios com aplicação de carga na vertical ($\alpha = 0^0$): (a) Ensaios com configurações em camada; (b) Ensaios com configurações em U invertido (c) Ensaios com configurações envelopadas.

A Tabela 4.6 apresenta os níveis de tensão (σ) registrados pela célula 02 nos ensaios com e sem reforço com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$), para um nível de carga de 1,42 kN (carregamento final no ensaio de referência). Nesta tabela apresentam-se ainda as relações entre as tensões em ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}), além dos valores de d atingidos para esse nível de carregamento.

Tabela 4.6. Comparações entre tensões registradas pela célula 02 nos ensaios com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$) para um nível de carga de 1,42 kN.

Ensaio	σ (kPa)	σ/σ_{sr}	d (mm)
0-SR	109,86	1,00	50,0
0-GG-C	40,55	0,37	84,7
0-GG-C(R)	21,22	0,19	105,1
0-GT-C	31,38	0,29	87,0
0-GG-U	34,64	0,32	92,0
0-GT-U	35,67	0,32	83,3
0-GG-E	44,16	0,40	85,9
0-GT-E	57,52	0,52	85,8

Observa-se que nos ensaios sem reforço (0-SR) as tensões registradas pela célula 02 são superiores às registradas pela célula 01. Isso ocorre pelo fato da célula 02 se encontrar mais próxima da superfície do aterro, onde a influência das cargas é maior. No entanto, apesar dessa influência ser maior na região da célula 02, observa-se que nela as relações entre as tensões em ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}) são menores. Neste caso, chega a haver reduções de tensão de até 81% no ensaio 0-GG-C(R) em comparação ao ensaio de referência. Isto se deve ao fato da inclusão alterar favoravelmente o estado de tensões no maciço e, provavelmente também, devido a um mecanismo do tipo “efeito membrana”, como observado em estradas não-pavimentadas reforçadas sobre solos moles (Palmeira, 1993). Os resultados obtidos mostram os benefícios da utilização de reforço no maciço.

As Figuras 4.15a a c apresentam os registros efetuados pela célula de tensões 03. Esta célula registrou as tensões horizontais na região lateral do tubo (Fig. 4.11). Os registros da célula de tensões 03 também mostraram reduções nos níveis de tensão no maciço nos ensaios reforçados.

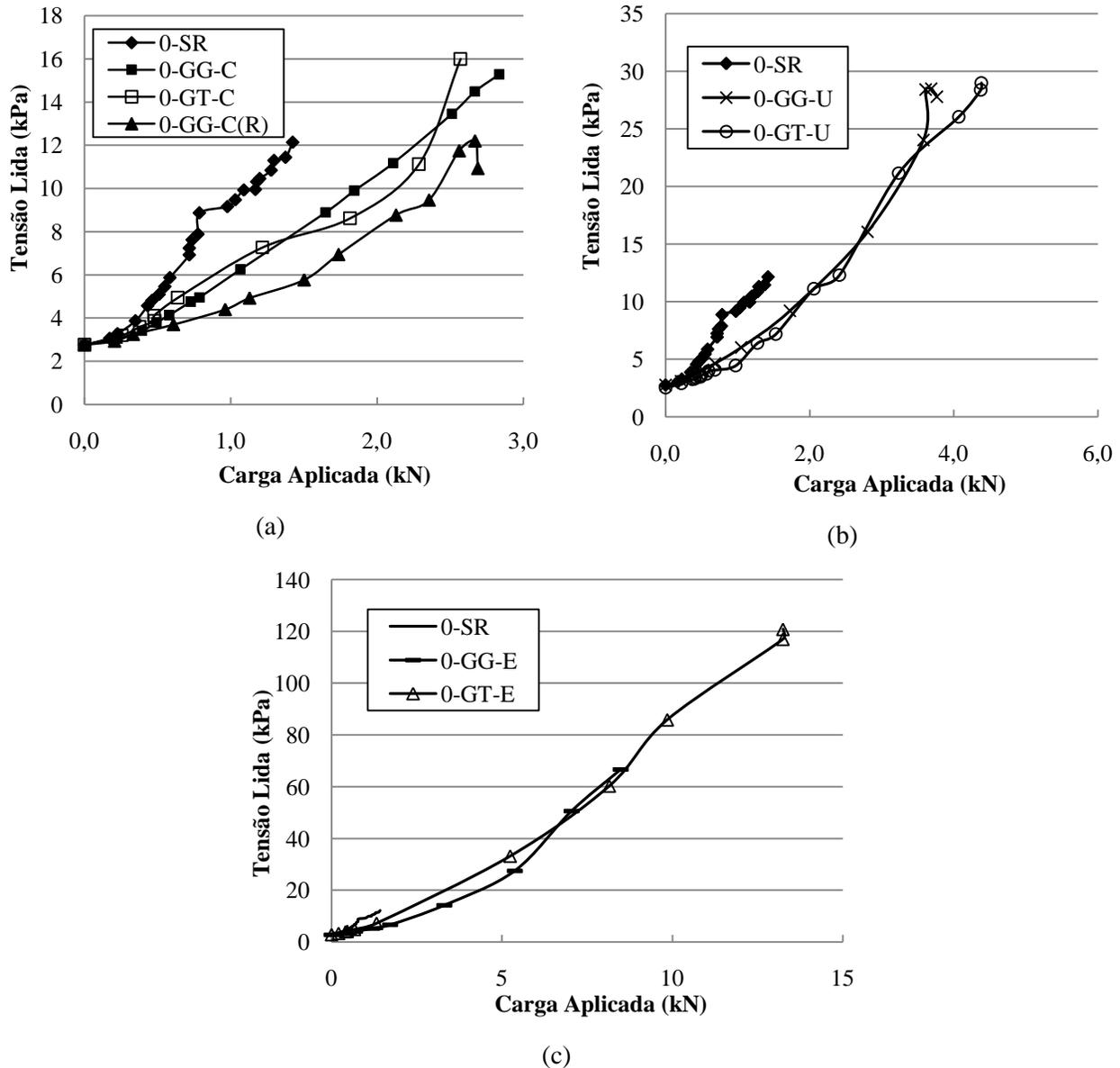


Figura 4.15. Registros da célula de tensão 03 para ensaios com aplicação de carga na vertical ($\alpha = 0^0$): (a) Ensaios com configurações em camada; (b) Ensaios com configurações em U invertido (c) Ensaios com configurações envelopadas.

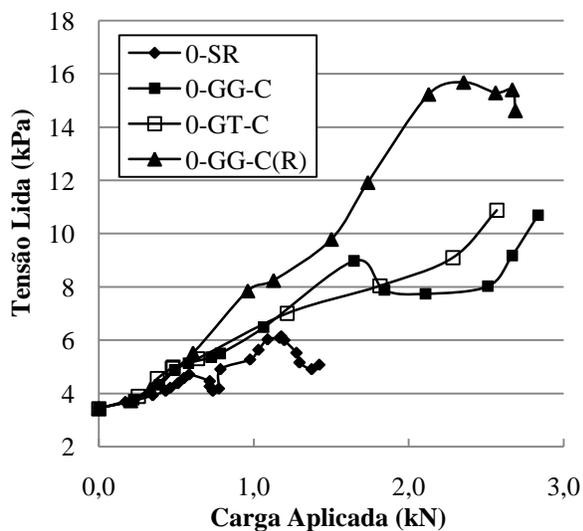
A Tabela 4.7 apresenta os níveis de tensão (σ) registrados pela célula 03 nos ensaios com e sem reforço, com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$), para um nível de carga de 1,42 kN (carregamento final no ensaio sem reforço). Nela, apresentam-se ainda as relações entre as tensões em ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}), além dos valores de d atingidos para aquele nível de carregamento. Os resultados da Tabela 4.7 mostram os benefícios da presença do reforço na redução das tensões horizontais na vizinhança do tubo. Estas reduções chegaram a ser da ordem

de 50% para os ensaios 0-GG-C(R) e 0-GG-E. Viana (2003) constatou que a redução das tensões sobre a parede do duto contribui para reduzir todos os esforços provocados por estas tensões, tais como, deformações, momentos, tensões de compressão nas paredes, etc.

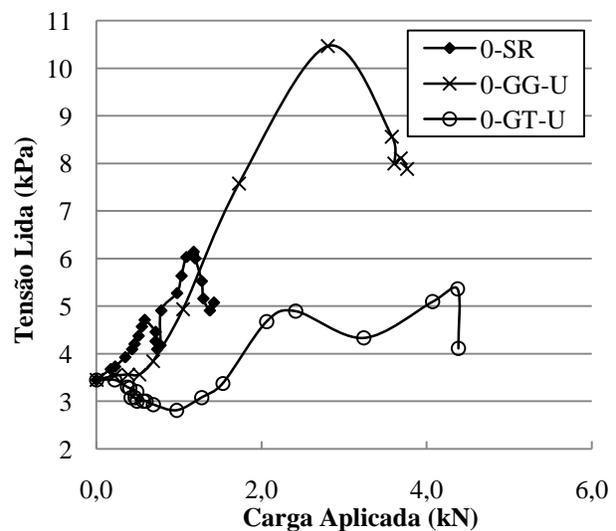
Tabela 4.7. Comparações entre tensões registradas pela célula 03 nos ensaios com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^\circ$) para um nível de carga de 1,42 kN.

Ensaio	σ (kPa)	σ/σ_{sr}	d (mm)
0-SR	12,13	1,00	50,0
0-GG-C	7,86	0,65	84,7
0-GG-C(R)	5,58	0,46	105,1
0-GT-C	7,72	0,64	87,0
0-GG-U	7,77	0,64	92,0
0-GT-U	6,84	0,56	83,3
0-GG-E	5,83	0,48	85,9
0-GT-E	7,91	0,65	85,8

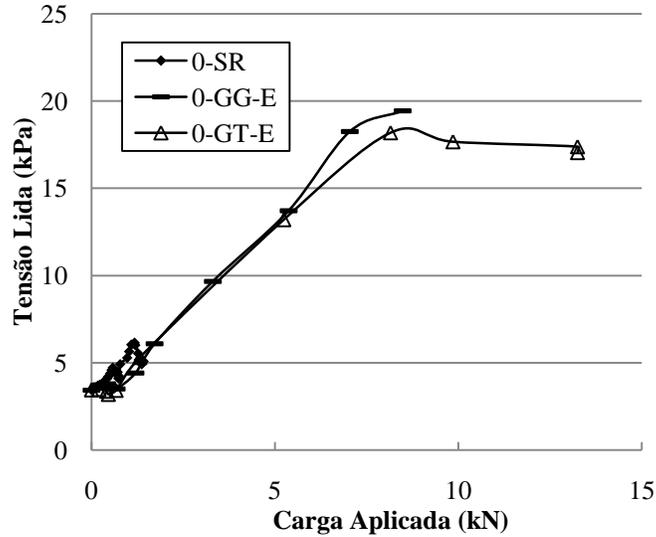
Os registros da célula de tensão 04 (Fig. 4.11) estão expressos nas Figuras 4.16a a c. Estes resultados indicam, na maioria dos ensaios, aumentos das tensões na região lateral do tubo em comparação ao ensaio de referência.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.16. Registros da célula de tensão 04 para ensaios com aplicação de carga na vertical ($\alpha = 0^0$): (a) Ensaios com configurações em camada; (b) Ensaios com configurações em U invertido (c) Ensaios com configurações envelopadas.

A Tabela 4.8 apresenta os níveis de tensão (σ) registrados pela célula 03 nos ensaios com e sem reforço para um nível de carga de 1,42 kN (carregamento final no ensaio sem reforço). Nela, apresentam-se ainda as relações entre as tensões em ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}), além dos valores de d atingidos para esse nível de carregamento.

Tabela 4.8. Comparações entre tensões registradas pela célula 04 nos ensaios com carregamento aplicado na vertical ($\alpha = 0^0$) para um nível de carga de 1,42 kN.

Ensaio	σ (kPa)	σ/σ_{sr}	d (mm)
0-SR	5,08	1,00	50,0
0-GG-C	8,01	1,58	84,7
0-GG-C(R)	9,46	1,86	105,1
0-GT-C	7,36	1,45	87,0
0-GG-U	6,38	1,26	92,0
0-GT-U	3,25	0,64	83,3
0-GG-E	5,13	1,01	85,9
0-GT-E	5,51	1,08	85,8

Pode-se observar que, com exceção do ensaio 0-GT-U, a presença do reforço implicou o aumento nos níveis de tensão vertical na região lateral onde a célula 04 era instalada. Esse aumento pode ser consequência de redistribuições de tensões do topo para a lateral do aterro devido à presença do geossintético, uma vez que houve reduções significativas das tensões na região do topo do tubo nos ensaios reforçados. É importante observar que o aumento das tensões foi menor nas configurações em U invertido e envelopado, onde o reforço adentra o maciço atingindo a cota onde a célula foi instalada.

4.3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 16° ($\alpha=16^{\circ}$)

Neste item, serão apresentadas as leituras das células de tensões totais para os ensaios sem reforço e reforçados (geotêxtil tecido e geogrelha) com a aplicação de carga fazendo um ângulo α de 16° com a vertical. Como comentado no item 4.2.2, neste caso os ensaios reforçados foram realizados apenas com configuração envelopada. Serão apresentados os resultados obtidos para a situação em que a direção de penetração do OC passa pelo centro do tubo e aquela em que a direção de penetração do OC passa pela lateral do tubo.

As Figuras 4.17a e 4.17b apresentam os registros da célula de tensão 01 (Fig. 4.11). Na Figura 4.17a estão os registros efetuados nos ensaios com e sem reforço para a situação em que a direção de penetração do OC passa pelo centro do tubo. Na Figura 4.17b estão os registros efetuados nos ensaios com e sem reforço para a situação em que a direção de penetração do OC passa pela lateral do tubo. Os resultados dos ensaios realizados para a primeira situação (Figura 4.17a) mostram que as tensões no maciço foram reduzidas devido à presença do reforço. Para os ensaios realizados na segunda situação (Figura 4.17b), observa-se que as reduções de tensões devido à presença do reforço só foram percebidas para carregamentos de até aproximadamente 0,8 kN. A partir desse valor nota-se que os registros de tensão são maiores para o ensaio reforçado. No entanto, é importante observar que os níveis de tensão atingidos nos ensaios para a situação em que a direção de penetração do OC passa na lateral do tubo são significativamente inferiores àqueles atingidos na situação em que a direção de penetração do OC passa pelo centro do tubo. Esse fato pode ser decorrência de que, na segunda situação, a célula 01 está instalada mais distante da direção de penetração do OC e, assim, os incrementos de cargas são menos sentidos nesta região. No caso dos ensaios reforçados, observa-se também que o OC não toca o

reforço, requerendo assim menos força para atingir a penetração máxima, o que diminui os incrementos de tensões no maciço.

A Tabela 4.9 apresenta os níveis de tensão (σ) registrados pela célula 01 nos ensaios com e sem reforço para os níveis de carregamento final nos ensaios sem reforço para as duas condições. Nela apresentam-se ainda as relações entre as tensões em ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}), além dos valores de d atingidos para aquele nível de carregamento.

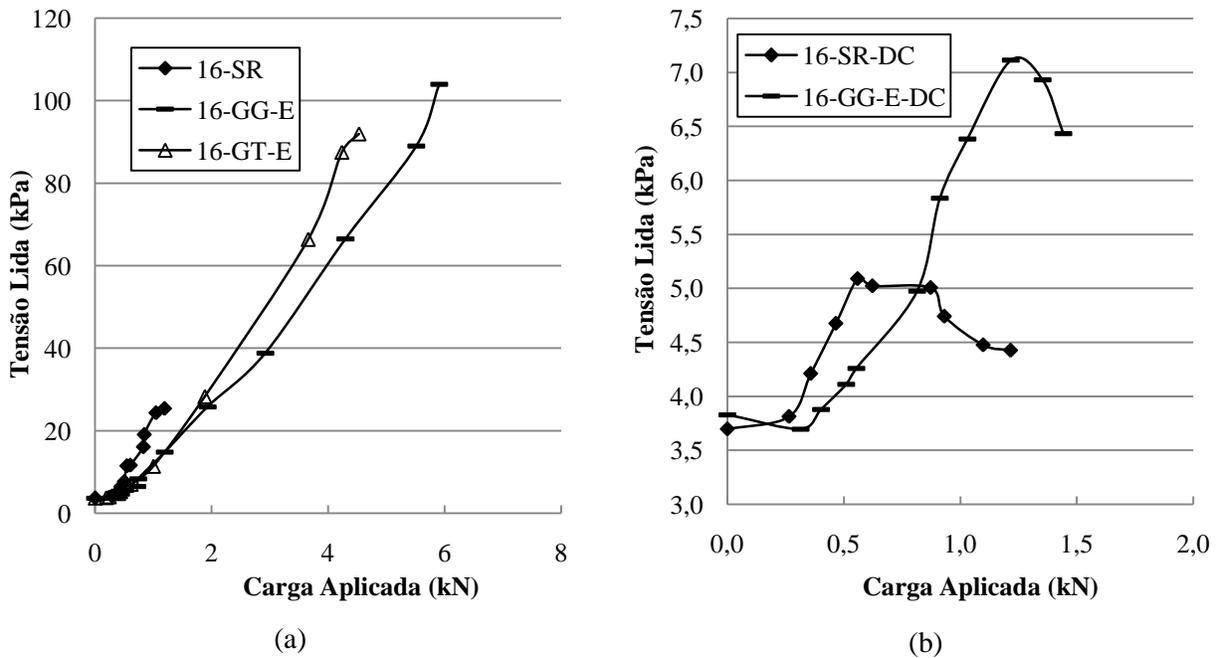


Figura 4.17. Registros da célula de tensão 01 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16^0 ($\alpha = 16^0$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.

Tabela 4.9. Comparações entre tensões registradas pela célula 01 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.

Ensaio	σ (kPa)	σ/σ_{sr}	d (mm)
16-SR	25,39	1,00	100,0
16-GG-E	14,81	0,58	129,0
16-GT-E	19,41	0,76	121,0
16-SR-DC	4,43	1,00	100,0
16-GG-E-DC	7,11	1,61	105,0

As Figuras 4.18a e 4.18b apresentam os registros da célula de tensão 02. Observam-se na Figura 4.18a reduções nos níveis de tensão na região acima do topo do tubo, onde a célula 02 foi instalada. Na Figura 4.18b, situação em que a direção de penetração do OC passa na lateral do tubo, percebe-se que não houve variações significativas de tensões nos ensaios com e sem reforço devido à penetração do OC.

A partir das relações entre as tensões em ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}), expressos na Tabela 4.10, pode-se visualizar os benefícios da presença do reforço no sentido de reduzir as tensões que atuaram no maciço. Nesta tabela verificam-se reduções da ordem de 40% nos ensaios 16-GG-E e 16-GT-E, em relação ao ensaio sem reforço.

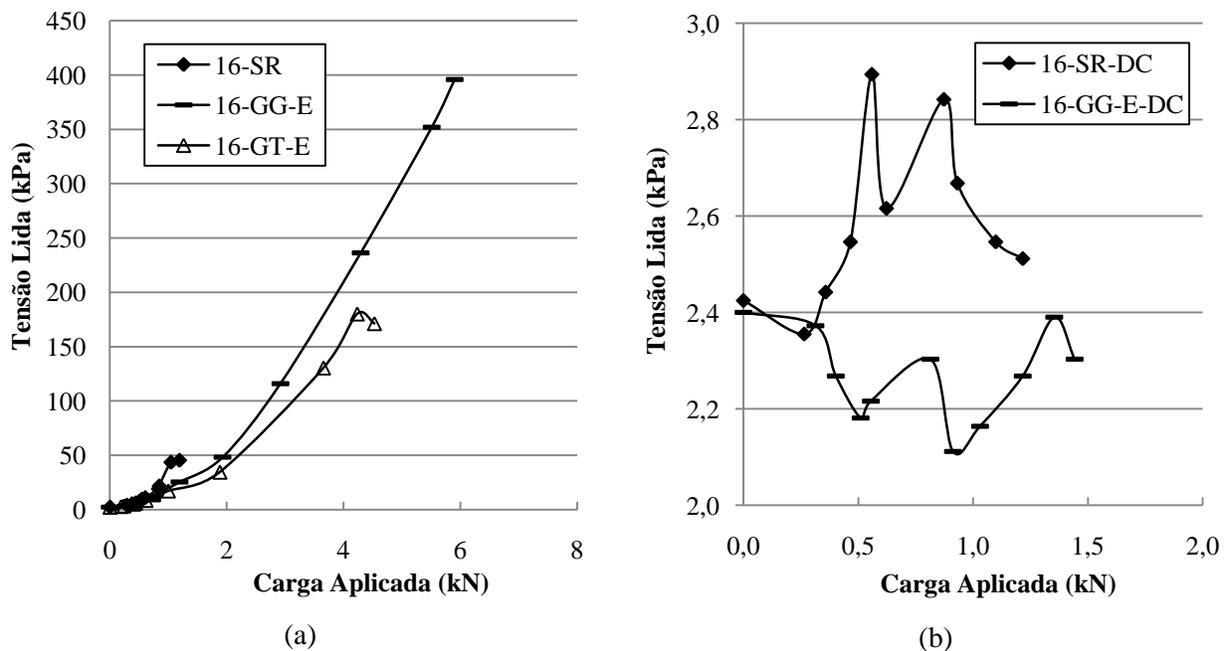


Figura 4.18. Registros da célula de tensão 02 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16° ($\alpha = 16^{\circ}$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.

Tabela 4.10. Comparações entre tensões registradas pela célula 02 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.

Ensaio	σ (kPa)	σ/σ_{sr}	d (mm)
16-SR	45,43	1,00	100,0
16-GG-E	25,41	0,56	129,0
16-GT-E	25,53	0,56	121,0
16-SR-DC	2,51	1,00	100,0
16-GG-E-DC	2,27	0,90	105,0

Os registros da célula de pressão 03 estão apresentados nas Figuras 4.19a e 4.19b. Observa-se, a partir destes registros, a redução das tensões horizontais na vizinhança do tubo em todos os ensaios reforçados. A Tabela 4.11 apresenta relações entre as tensões em ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}). Nela, observam-se reduções de até 24% com relação ao ensaio sem reforço.

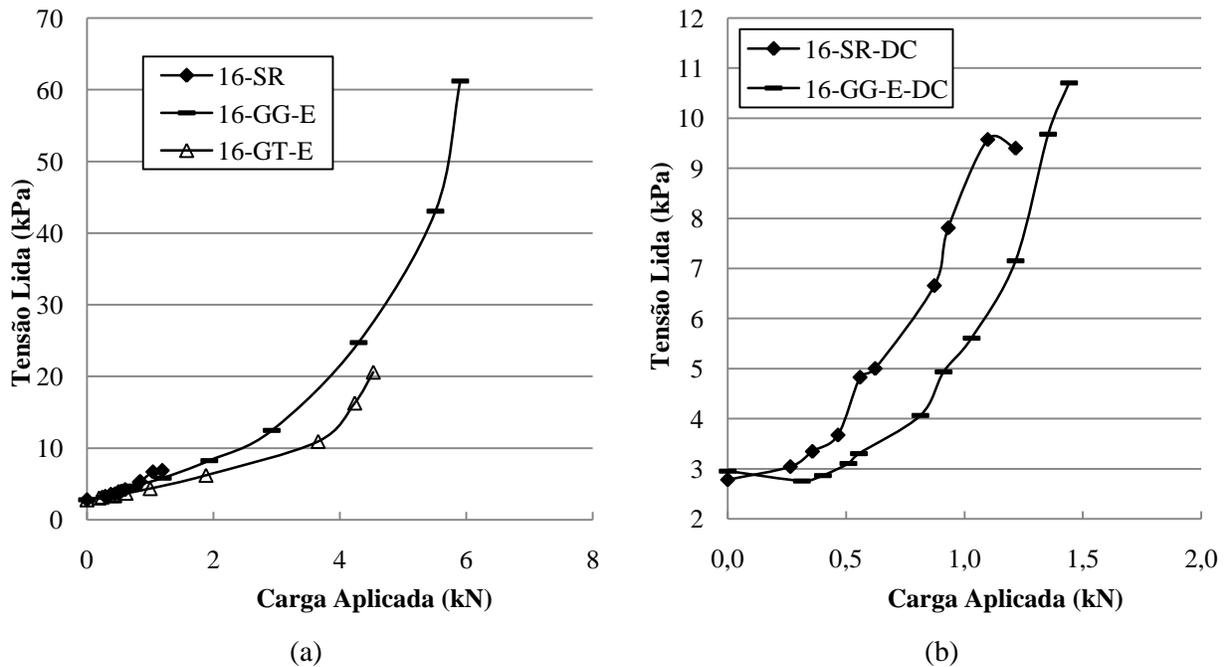


Figura 4.19. Registros da célula de tensão 03 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16^0 ($\alpha = 16^0$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.

Tabela 4.11. Comparações entre tensões registradas pela célula 03 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.

Ensaio	σ (kPa)	σ/σ_{sr}	d (mm)
16-SR	6,85	1,00	100,0
16-GG-E	5,81	0,85	129,0
16-GT-E	5,23	0,76	121,0
16-SR-DC	9,40	1,00	100,0
16-GG-E-DC	7,16	0,76	105,0

As Figuras 4.20a e 4.20b apresentam os registros da célula de tensão 04. Observa-se, em ambas as situações, que os registros de tensão são inferiores nos ensaios com reforço. É importante notar que nos ensaios reforçados, para a situação em que a direção de penetração do OC passa pelo centro do tubo (Figura 4.20a), os registros de tensões aproximam-se daqueles decorrentes do peso próprio do maciço, não havendo aumento das tensões com os incrementos de carga. Nota-se ainda, na Figura 4.20b, que os níveis de tensões atingidos na situação em que a linha de aplicação de cargas passa pela lateral do tubo são superiores àqueles atingidos na primeira situação. Isto se deve a uma maior proximidade entre a célula 04 e a direção de penetração do OC na segunda situação. A partir das relações entre as tensões em ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}), apresentados na Tabela 4.10, pode-se visualizar a influência da presença do reforço no sentido de reduzir as tensões que atuaram nesta região do maciço. Na tabela observam-se reduções de até 53% (ensaio 16-GT-E) com relação ao ensaio de referência.

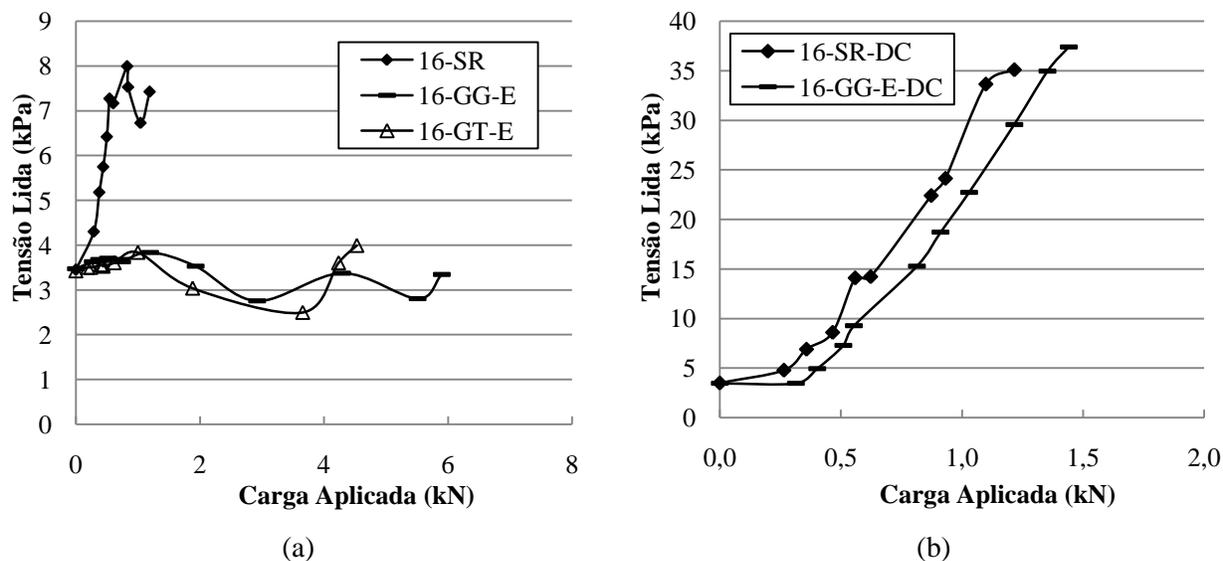


Figura 4.20. Registros da célula de tensão 04 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16^0 ($\alpha = 16^0$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.

Tabela 4.12. Comparações entre tensões registradas pela célula 04 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.

Ensaio	σ (kPa)	σ/σ_{sr}	d (mm)
16-SR	7,42	1,00	100,0
16-GG-E	3,84	0,52	129,0
16-GT-E	3,46	0,47	121,0
16-SR-DC	35,08	1,00	100,0
16-GG-E-DC	29,56	0,84	105,0

Por fim, as Figuras 4.21a e 4.21b apresentam os registros da célula 05. Observa-se também, neste caso, que houve reduções dos níveis de tensões nos ensaios reforçados em comparação com os ensaios sem reforço. É importante notar na Figura 4.21a que os ensaios reforçados apresentaram pequenos alívios de tensão. Esse fato pode ser consequência da movimentação superficial da massa do solo para a direita do tubo, diminuindo, assim, as tensões verticais à esquerda deste, onde a célula 05 era instalada. Essa movimentação pode ter ocorrido devido à atuação da componente horizontal da força aplicada. Na situação em que a direção de penetração do OC passa na lateral do tubo (Figura 4.21b), esses alívios de tensão não são observados devido à

posição da célula em relação à direção de penetração do OC. A Tabela 4.13 apresenta as relações entre as tensões em ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}), deixando mais clara a influência da presença do reforço.

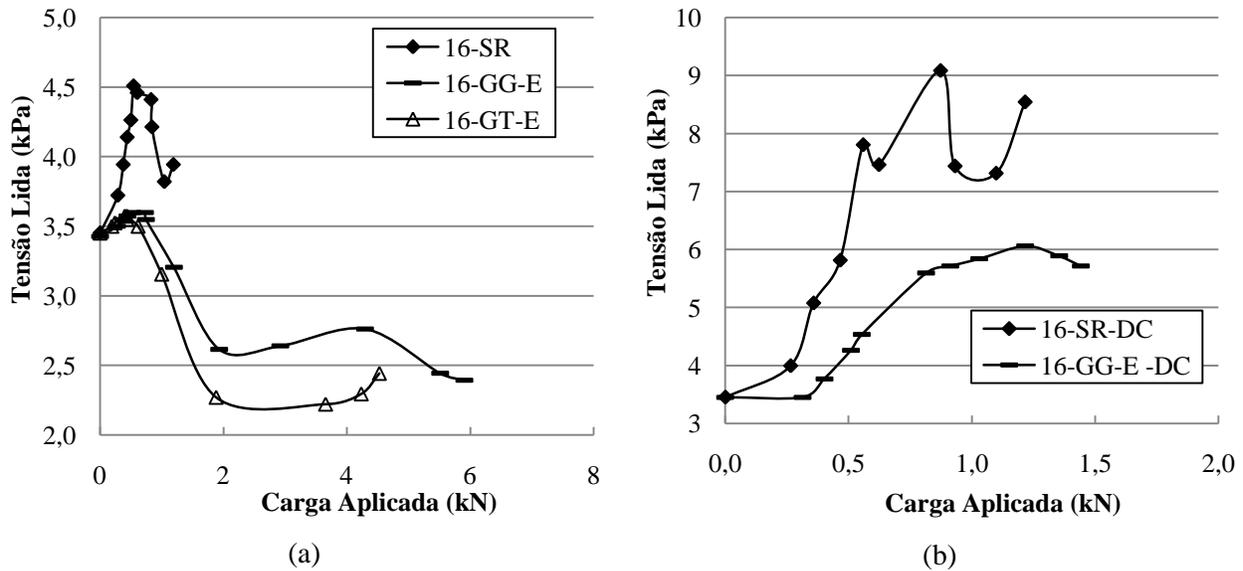


Figura 4.21. Registros da célula de tensão 05 para ensaios com ângulo de aplicação de carga de 16^0 ($\alpha = 16^0$): (a) Ensaios com a direção de penetração do OC passando pelo centro do tubo; (b) Ensaios com a direção de penetração do OC passando na lateral do tubo.

Tabela 4.13. Comparações entre tensões registradas pela célula 05 nos ensaios com carregamento aplicado fazendo ângulo de 16^0 com a vertical ($\alpha = 16^0$) para os níveis finais de carga dos ensaios de referência.

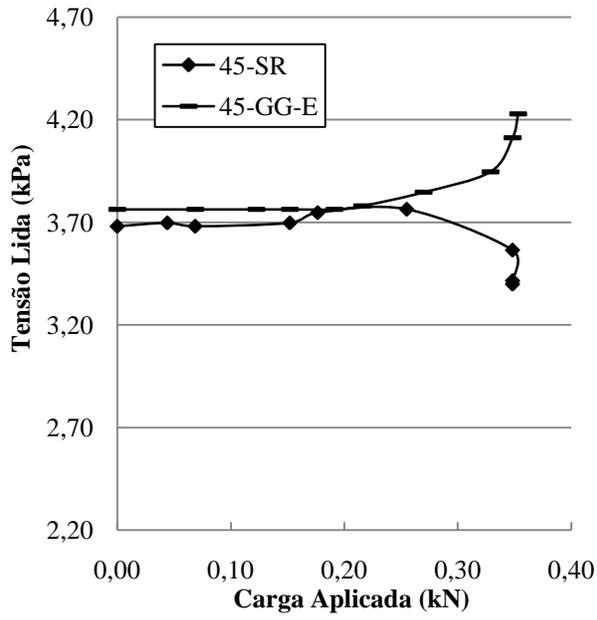
Ensaio	σ (kPa)	σ/σ_{sr}	d (mm)
16-SR	3,94	1,00	100,0
16-GG-E	3,20	0,81	129,0
16-GT-E	2,73	0,69	121,0
16-SR-DC	8,54	1,00	100,0
16-GG-E-DC	6,06	0,71	105,0

4.3.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 45^0 ($\alpha=45^0$)

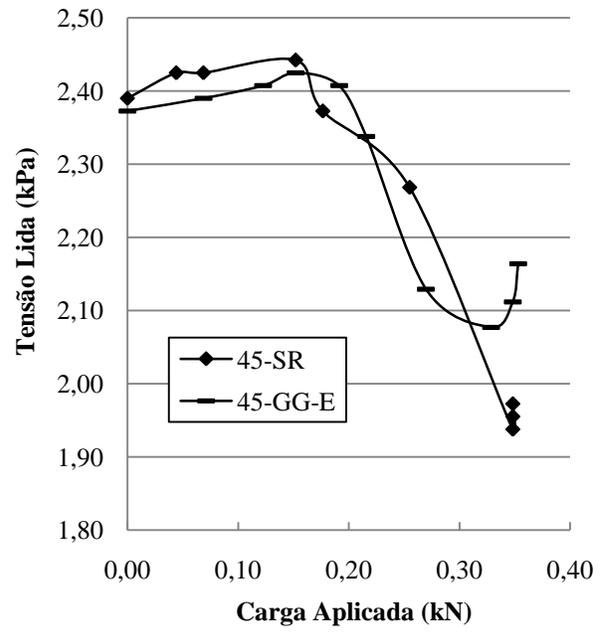
Neste item, serão apresentados os registros efetuados pelas células de tensão utilizadas no ensaio de referência (45-SR) e reforçado com geogrelha na geometria envelopada (45-GG-E) com carregamento aplicado a 45^0 .

A Figura 4.22 apresenta as leituras das cinco células efetuadas a partir dos incrementos de carga aplicados no maciço. De forma geral, observando esta figura, não se percebem grandes variações nas tensões desenvolvidas no maciço nos ensaios com e sem reforço. Este comportamento pode ser explicado devido ao fato do OC não chegar a tocar o reforço, mesmo atingindo seu nível máximo de penetração. Desta forma, o fato do reforço não ser solicitado significativamente à tração contribui para que o comportamento dos ensaios seja semelhante. Deve-se também notar que, tanto nesses resultados como nos anteriores, grandes deformações no maciço impõem rotações às células de tensões e tais rotações podem influenciar os valores fornecidos pelas mesmas.

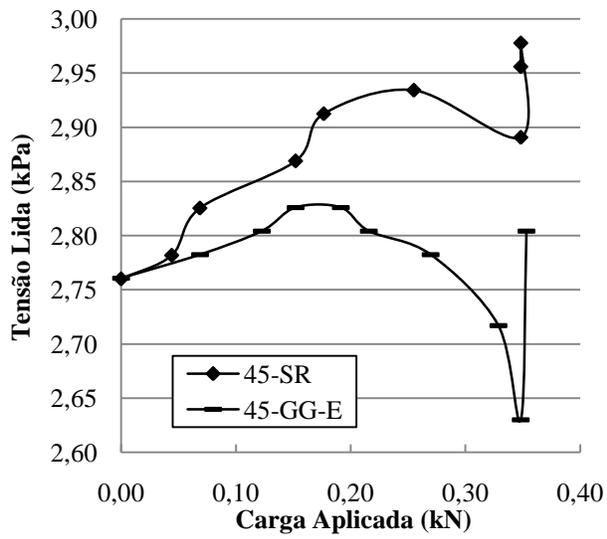
A Tabela 4.14 expõe os resultados das leituras das cinco células de tensão no ensaio com e sem reforço, obtidos a partir do carregamento final do ensaio de referência (0,35 kN). Nessa tabela apresentam-se as razões entre as tensões finais registradas pelas cinco células no ensaio de referência (σ_{sr}) e as tensões registradas no ensaio reforçado (σ).



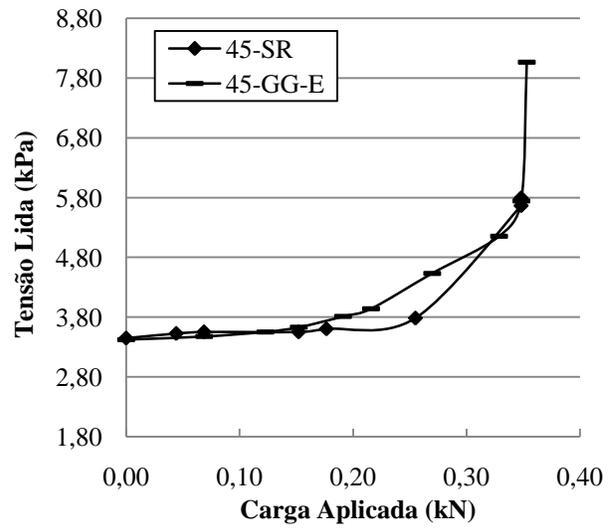
(a)



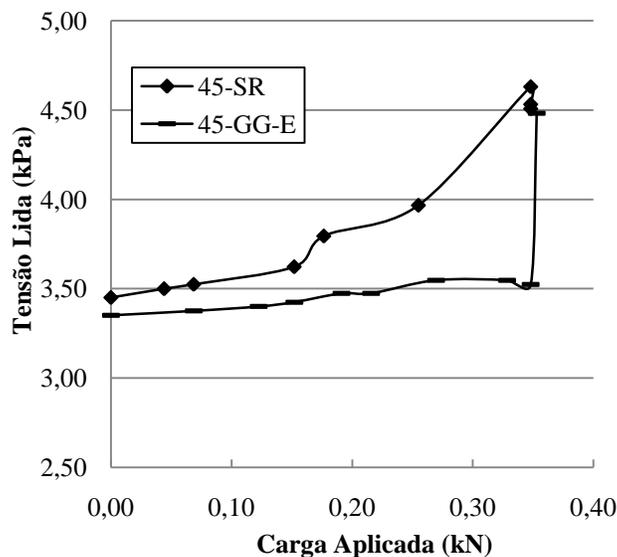
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.22. Registros das células de tensão instaladas nos ensaios com ângulo de aplicação de carga de 45° ($\alpha = 45^{\circ}$): (a) Registros da célula 01; (b) Registros da célula 02; (c) Registros da célula 03; (d) Registros da célula 04; (e) Registros da célula 05.

Tabela 4.14. Relações entre tensões atingidas nos ensaios com e sem reforço (σ/σ_{sr}) para um carregamento de 0,35 kN, registradas pelas células instaladas no maciço.

Ensaio	Célula 01	Célula 02	Célula 03	Célula 04	Célula 05	d (mm)
45-SR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	175,0
45-GG-E	1,21	1,08	0,89	1,00	0,93	175,0

CAPÍTULO 5

5. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DO REFORÇO NAS DEFORMAÇÕES NO TUBO DEVIDO À PENETRAÇÃO DO OBJETO CONTUNDENTE

5.1 INTRODUÇÃO

Como dito no Capítulo 4, para avaliar a influência da presença do geossintético como camada protetora foram executados experimentos em laboratório em escala reduzida utilizando um objeto contundente (OC), simulando uma ferramenta de escavação que era forçada a penetrar o maciço de areia, onde um tubo de aço instrumentado era enterrado. Neste capítulo serão avaliados os efeitos de tal penetração sobre o tubo por meio dos extensômetros elétricos instalados em vários pontos ao longo do seu perímetro.

5.2 ESTUDO DAS DEFORMAÇÕES DO TUBO

Para realizar o estudo dos efeitos da penetração do OC sobre o tubo serão utilizados os dados de deformações fornecidos por extensômetros elétricos fixados ao longo do perímetro do tubo, em sua seção central. Os resultados serão expressos por meio de gráficos, em que se adotou, como convenção, deformações de compressão com sinal negativo e de tração com sinal positivo.

Esses dados serão apresentados nos itens a seguir, agrupados de acordo com a inclinação de aplicação das cargas.

5.2.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA NA VERTICAL ($\alpha=0^{\circ}$)

Neste item, são apresentados os resultados das deformações sofridas pelo tubo nos ensaios com aplicação de carga na vertical.

A Figura 5.1 apresenta os registros das deformações em seis pontos de instalação dos extensômetros elétricos na seção central do tubo durante o ensaio de referência (0-SR). Na Figura 5.1a, estão expressos os valores das deformações sofridas pelo tubo em função dos carregamentos aplicados no maciço. Na Figura 5.1b, apresentam-se os valores das deformações

sofridas pelo tubo em função das variações de distância (d) entre a base do OC e o tubo. Nota-se, na Figura 5.1a, o aumento das deformações à medida que os incrementos de carga eram aplicados no maciço. De forma semelhante, também se observam aumentos de deformação à medida que o OC se aproxima do tubo (Figura 5.1b). Como seria de se esperar, o extensômetro 01, localizado na crista do tubo, foi o que apresentou maior magnitude de deformação.

Para a situação em que os carregamentos foram aplicados na vertical, observa-se que o sistema apresenta simetria entre deformações de pontos das laterais e os do topo e da base. Nota-se que, os extensômetros 03 e 06 deformam-se de maneira semelhante, ambos sendo tracionados na mesma proporção. Os extensômetros 01 e 05 também apresentam comportamentos semelhantes, ambos sendo comprimidos. No entanto, percebem-se deformações um pouco maiores no extensômetro 01, uma vez que este está mais susceptível à ação das cargas, dada sua maior proximidade com o OC em relação ao extensômetro 05. Esse fato também pode explicar os maiores níveis de deformação do extensômetro 02 em relação ao 04. Neste caso, observa-se que o extensômetro 02 é tracionado e o extensômetro 04 é comprimido.

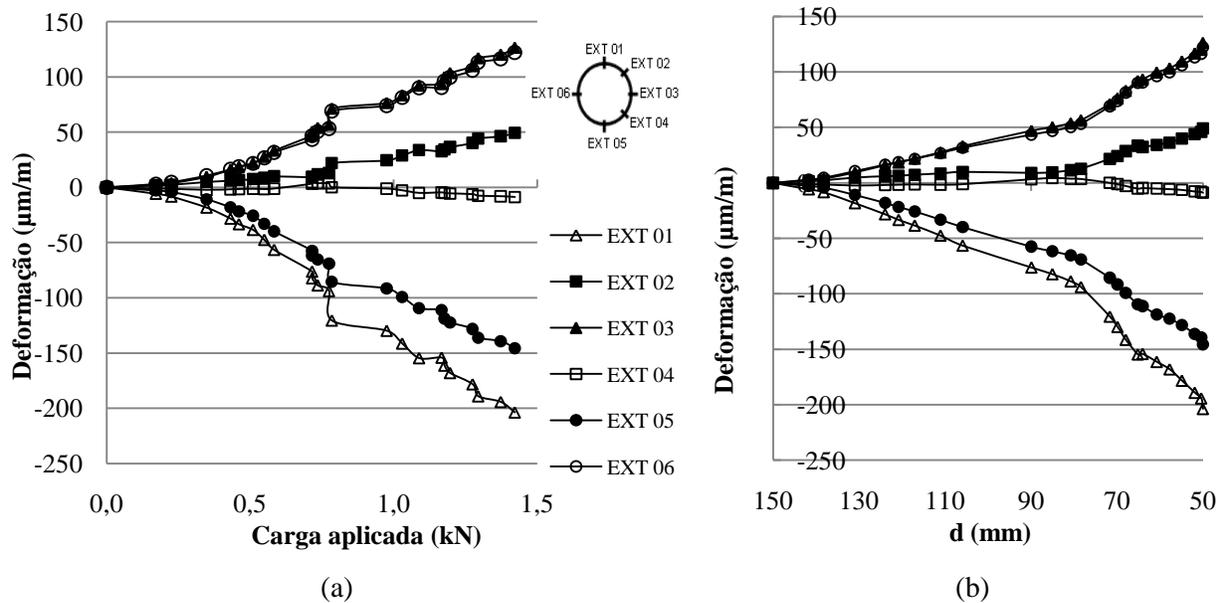


Figura 5.1. Deformações medidas em seis pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio de referência (0-SR): (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

A Figura 5.2 apresenta as deformações máximas ($\mu\text{m}/\text{m}$) sofridas pelo tubo nos pontos onde os extensômetros foram instalados, para o ensaio de referência, que atingiu um carregamento máximo de 1,42 kN. É importante frisar que a linha tracejada, nesta figura, representa um diagrama de deformações sofridas pelo tubo, não a sua forma deformada. A linha (em cinza) que delimita a área hachurada ilustra o contorno do tubo. Como convenção, adotou-se: pontos de compressão para dentro do contorno do tubo e pontos de tração para fora do contorno do tubo. Devido à simetria do sistema, as deformações dos extensômetros 02 e 04 foram rebatidas à esquerda do eixo central do tubo, a fim de que se pudesse completar o diagrama.

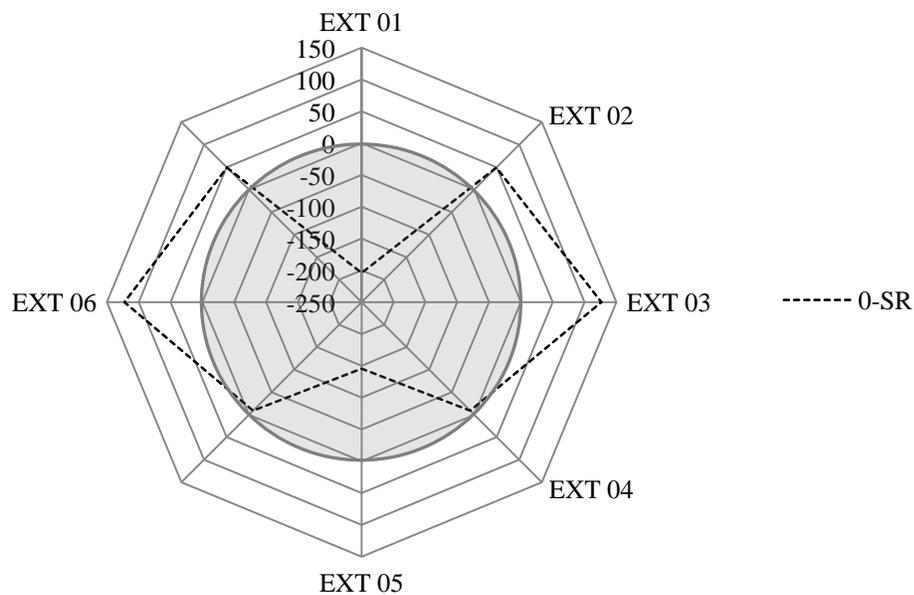


Figura 5.2. Deformações máximas registradas no tubo para o ensaio de referência (0-SR).

As Figuras 5.3 a 5.5 apresentam os pares de gráfico, deformação versus carga aplicada e deformação versus d , para os ensaios reforçados na configuração camada. De forma semelhante ao que aconteceu com o ensaio sem reforço, verifica-se que, em todos os ensaios reforçados com configuração em camada, o sistema também apresenta simetria entre as deformações nas laterais e no topo e na base. Em geral, os pontos onde os extensômetros 01 e 05 foram instalados foram comprimidos. Aqueles onde foram instalados os extensômetros 03 e 06 foram tracionados. Finalmente, os pontos onde foram instalados os extensômetros 02 e 04 apresentaram comportamentos opostos.

Comparando-se os resultados de deformações obtidos nos ensaios reforçados com configuração em camada (Figuras 5.3 a 5.5) com os obtidos no ensaio de referência (0-SR), verifica-se que houve maiores deformações nos ensaios reforçados. Esses maiores valores de deformação são explicados devido aos maiores níveis de carga requeridos para que o OC atingisse sua cota final.

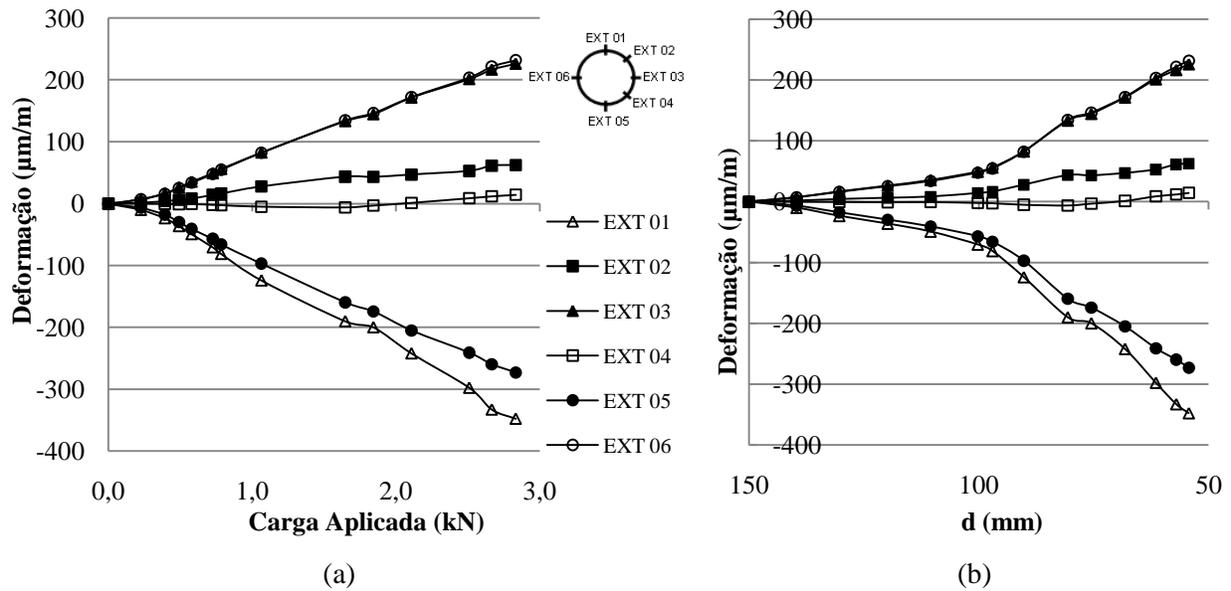


Figura 5.3. Deformações medidas em seis pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GG-C: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

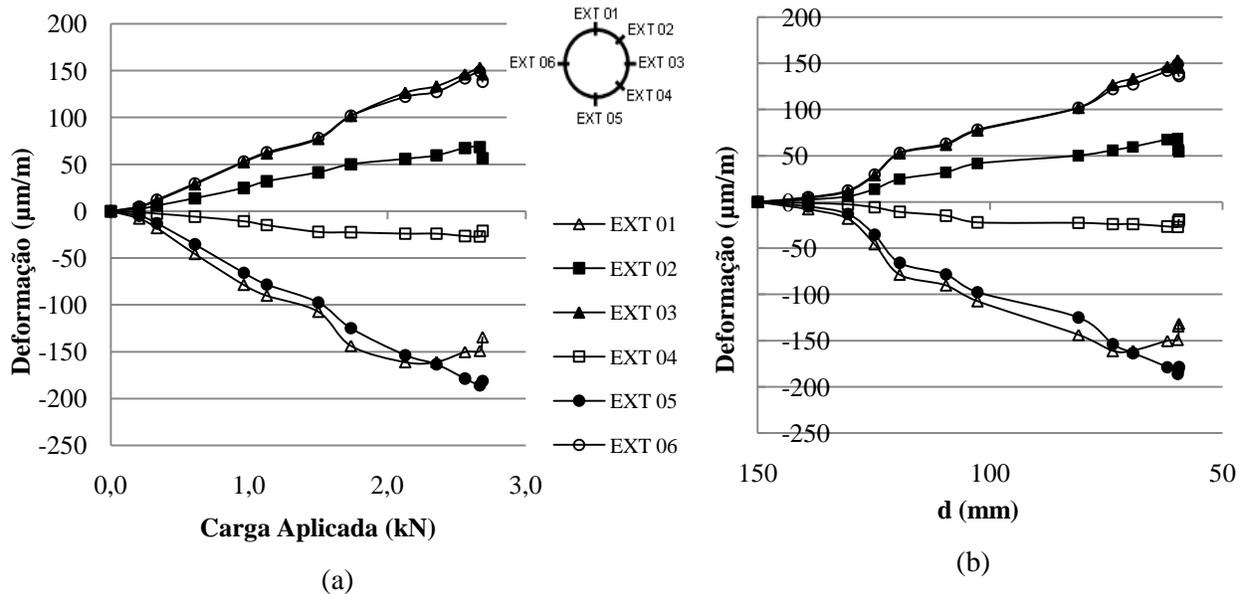


Figura 5.4. Deformações medidas em seis pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GG-C(R): (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

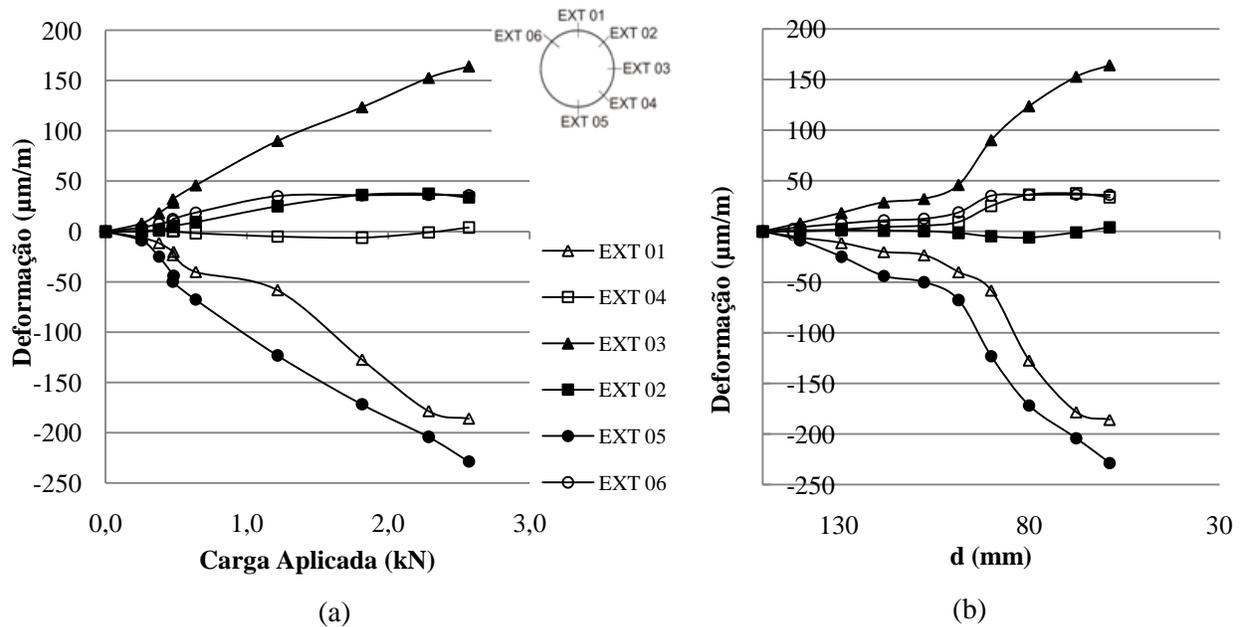


Figura 5.5. Deformações medidas em seis pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GT-C: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

A Figura 5.6 apresenta um diagrama comparativo entre as deformações (em μm/m) sofridas pelo tubo nos ensaios reforçados com configuração em camada e no ensaio de referência para o nível de carregamento final deste ensaio (1,42 kN). Verifica-se, na maioria dos casos, que as maiores deformações ocorreram no ensaio de referência (0-SR), principalmente no topo e na base do tubo.

A fim de quantificar os resultados expressos na Figura 5.6, a Tabela 5.1 apresenta razões (ϵ/ϵ_{sr}) entre as deformações dos cinco pontos registradas no ensaio de referência (ϵ_{sr}) e aquelas registradas nos ensaios reforçados (ϵ), com geometria em camada. Verificam-se reduções na maioria dos pontos dos ensaios reforçados em comparação com o ensaio sem reforço. As reduções de deformação, no topo do tubo chegaram a 60% no ensaio 0-GT-C. É importante lembrar que, como visto no item 4.3.1, apesar deste ponto estar mais próximo da extremidade do OC, as regiões do maciço que o circundavam apresentaram significativas reduções de tensão (registradas pela célula 02) devido à inclusão do reforço. Na lateral do tubo, as deformações chegaram a ser 42% inferiores no ensaio 0-GG-C(R) em relação ao ensaio de referência. Na base do tubo, houve reduções de 36% no ensaio 0-GG-C(R).

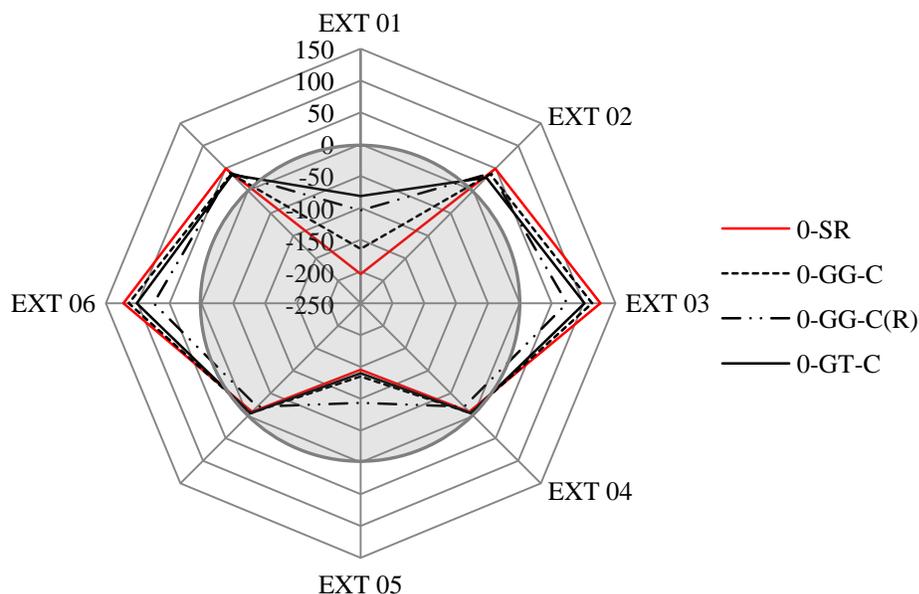


Figura 5.6. Comparações entre deformações medidas nos ensaios reforçados (geogrelha e geotêxtil tecido) e o ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN.

Tabela 5.1. Relações entre deformações medidas nos ensaios reforçados na configuração camada (geogrelha e geotêxtil tecido) e no ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN - ϵ/ϵ_{SR} .

	0-SR	0-GG-C	0-GG-C(R)	0-GT-C
EXT 01	1,00	0,81	0,51	0,40
EXT 02	1,00	0,76	0,80	0,59
EXT 03	1,00	0,90	0,58	0,80
EXT 04	1,00	0,66	2,32	0,61
EXT 05	1,00	0,93	0,64	0,96

Os resultados dos registros das deformações dos ensaios reforçados com geogrelha e geotêxtil tecido na configuração em U invertido (0-GG-U e 0-GT-U) estão apresentados na Figura 5.7 e 5.8. Neles, pode-se observar comportamento semelhante ao comportamento dos demais ensaios já apresentados. Nota-se que a simetria entre deformações continua a ocorrer.

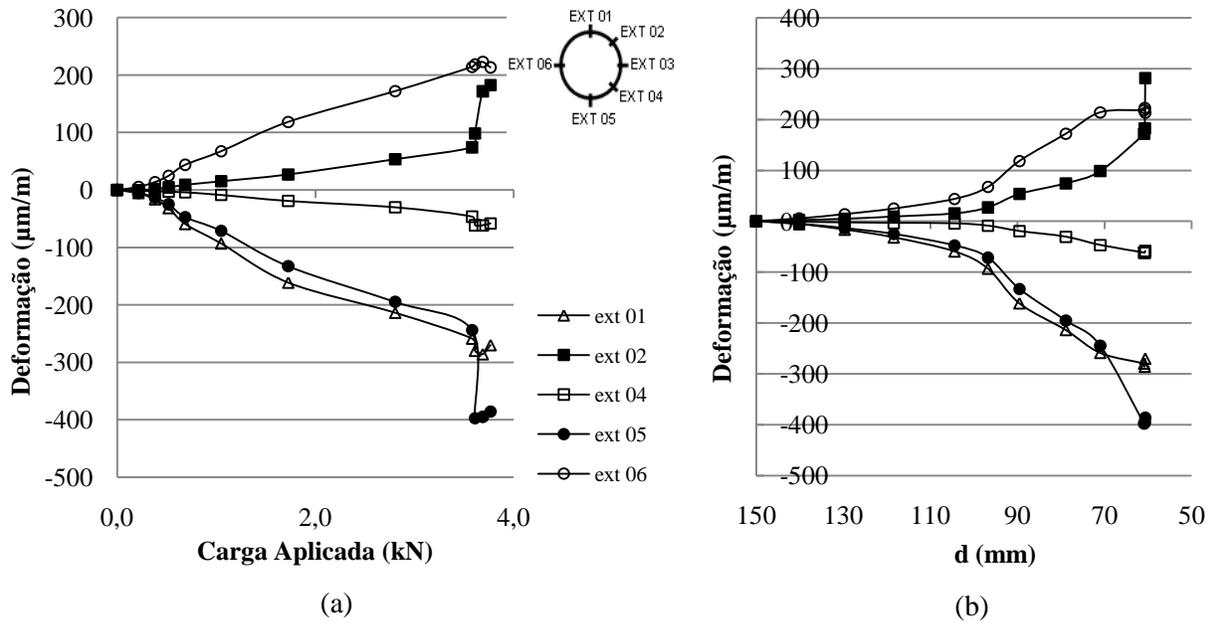


Figura 5.7. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GG-U: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

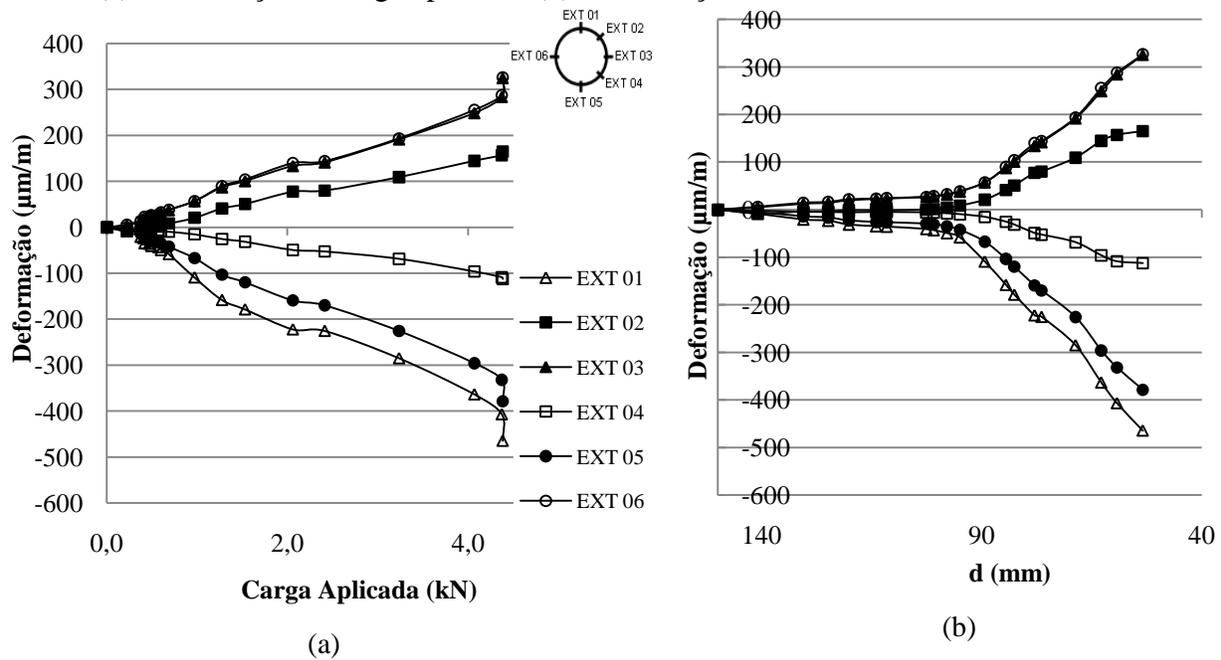


Figura 5.8. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GT-U: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

A Figura 5.9 apresenta um diagrama comparativo das deformações (em μm/m) sofridas pelo tubo nos ensaios reforçados com configuração em U invertido (0-GG-U e 0-GT-U) e aquelas registradas no ensaio sem reforço (0-SR), para um nível de carregamento de 1,42 kN. Observa-se

que o ensaio sem reforço apresenta as maiores deformações, sendo o topo e a base os pontos mais comprimidos e as laterais os pontos mais tracionados.

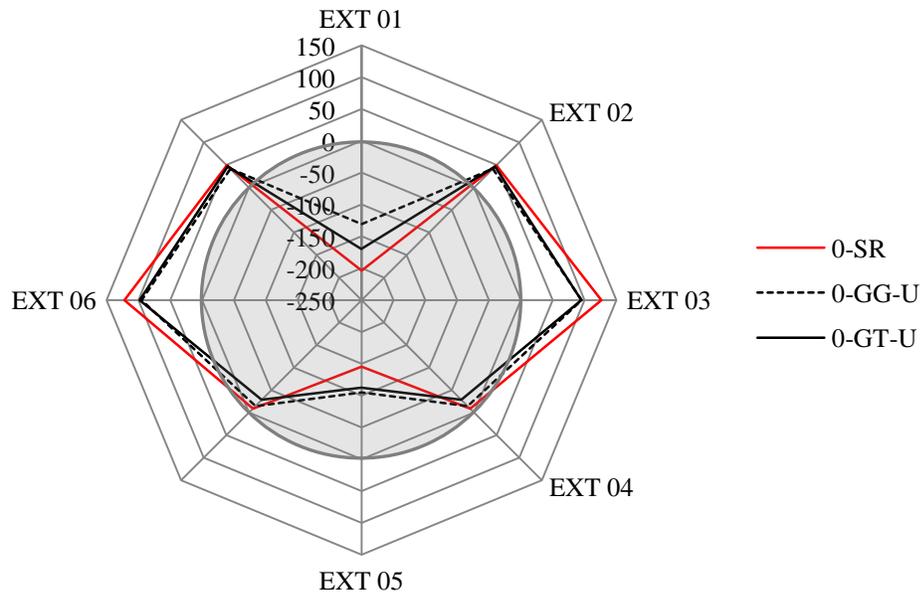


Figura 5.9. Comparações entre deformações medidas nos ensaios reforçados (geogrelha e geotêxtil tecido) com configuração em U invertido e o ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN.

A fim de facilitar a quantificação das deformações nos pontos de medida, expressos no diagrama da Figura 5.9, a Tabela 5.2 apresenta as razões entre as deformações nos ensaios reforçados (ϵ) e aquelas registradas no ensaio de referência (ϵ_{SR}). Observa-se que as deformações no topo sofreram reduções de até 36% no ensaio 0-GG-U. Na base, essas reduções chegaram a 28% no ensaio 0-GG-U quando comparadas ao ensaio 0-SR. Nas laterais, as reduções de deformação foram de aproximadamente 25% nos ensaios reforçados.

Tabela 5.2. Razões entre deformações medidas nos ensaios reforçados na configuração U invertido (geogrelha e geotêxtil tecido) e no ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN - ϵ/ϵ_{SR} .

	0-SR	0-GG-U	0-GT-U
EXT 01	1,00	0,64	0,83
EXT 02	1,00	0,85	0,95
EXT 03	1,00	0,76	0,75
EXT 04	1,00	1,65	3,26
EXT 05	1,00	0,72	0,77

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam as deformações registradas em seis pontos ao longo da seção central do tubo nos ensaios reforçados com geogrelha e geotêxtil tecido na configuração envelopada. Observa-se que, também para os ensaios reforçados na configuração envelopada, a simetria nos valores de deformação continua a existir. No entanto, percebe-se que, nestes ensaios, os pontos das ombreiras do tubo, onde os extensômetros 02 e 04 eram instalados, tendem a apresentar maiores deformações em relação aos demais ensaios. Esse fato pode ser conseqüência dos maiores níveis de carga atingidos nos ensaios envelopados, que implicaram maiores deformações nas laterais, no topo e na base do tubo.

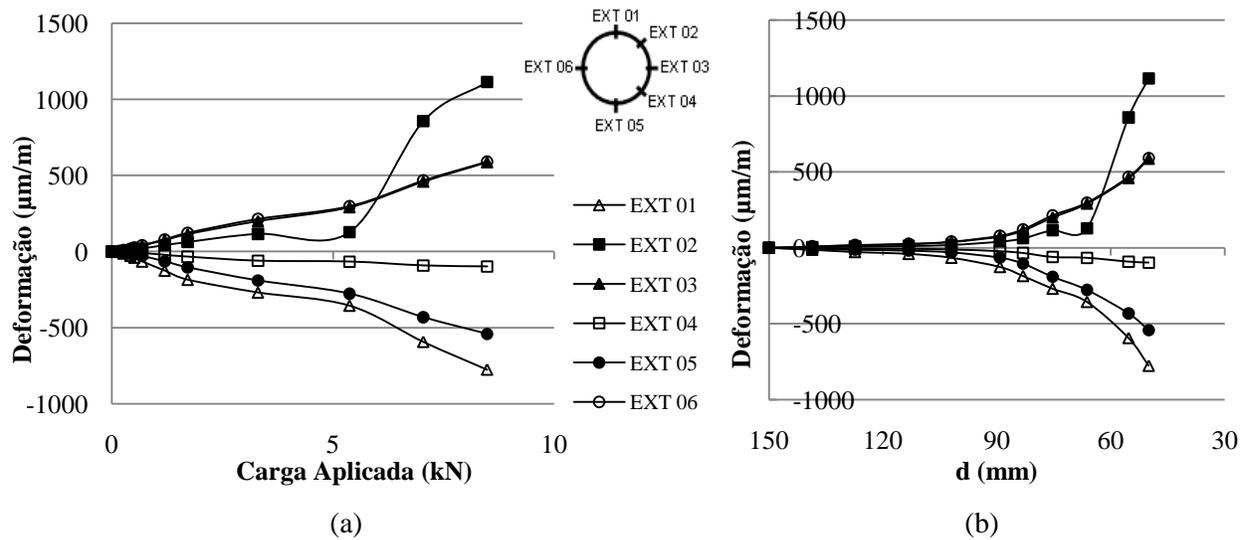


Figura 5.10. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GG-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

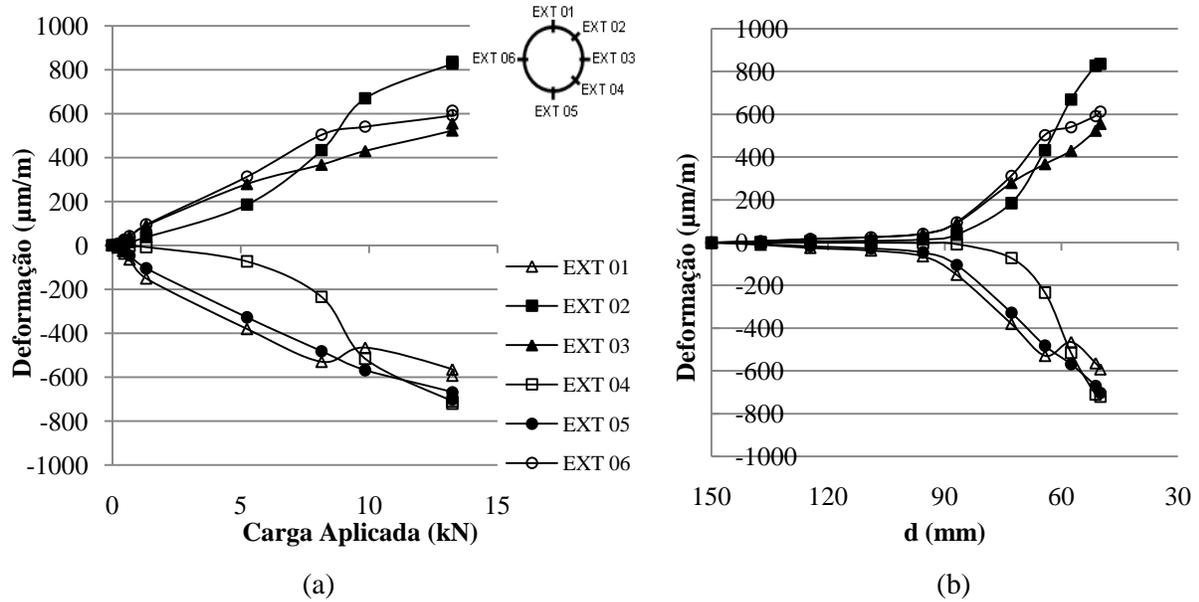


Figura 5.11. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 0-GT-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

A Figura 5.12 apresenta o diagrama comparativo de deformações (em $\mu\text{m/m}$) nos ensaios reforçados na configuração envelopada e o ensaio sem reforço para o nível de carregamento final registrado neste ensaio (1,42 kN). Observa-se, também nesta situação, que os ensaios realizados com a presença do reforço apresentaram menores deformações com relação ao ensaio de referência.

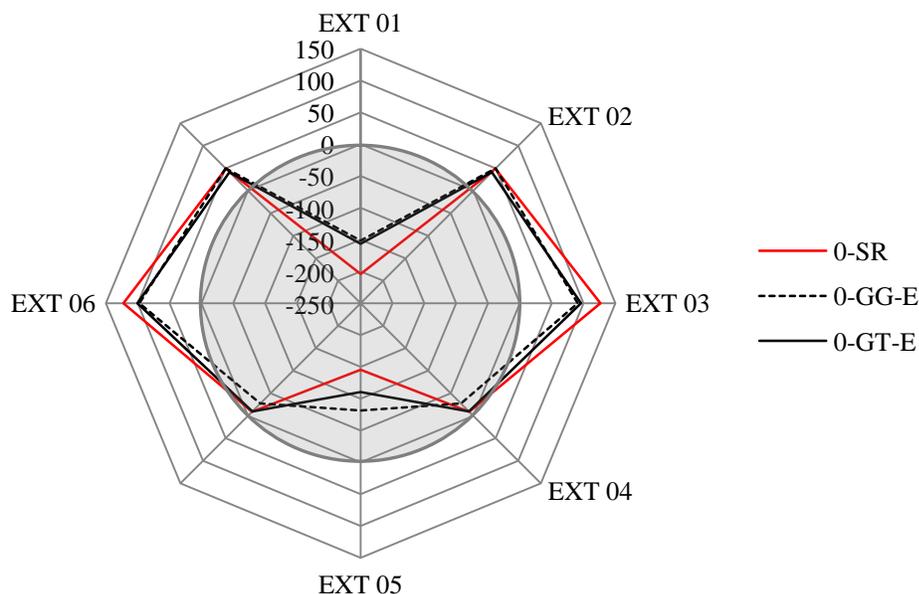


Figura 5.12. Comparações entre deformações medidas nos ensaios reforçados (geogrelha e geotêxtil tecido) com configuração envelopada e o ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN.

A Tabela 5.3 apresenta as razões entre as deformações nos ensaios reforçados (ϵ) e aquelas registradas no ensaio de referência (ϵ_{SR}) - ϵ/ϵ_{SR} - nos pontos de medida da seção central do tubo para um carregamento de 1,42 kN. Observa-se que as reduções no topo e na lateral foram da ordem de 20% nos ensaios reforçados. Na base, as reduções foram de 44% no ensaio 0-GG-E em comparação com o ensaio sem reforço.

Tabela 5.3. Razões entre deformações medidas nos ensaios reforçados na configuração envelopada (geogrelha e geotêxtil tecido) e no ensaio de referência para um carregamento de 1,42 kN - ϵ/ϵ_{SR} .

	0-SR	0-GG-E	0-GT-E
EXT 01	1,00	0,74	0,77
EXT 02	1,00	1,02	0,84
EXT 03	1,00	0,72	0,76
EXT 04	1,00	3,10	1,06
EXT 05	1,00	0,56	0,76

5.2.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 16^0 ($\alpha=16^0$)

Neste item serão apresentadas as deformações registradas ao longo dos ensaios sem reforço e reforçados com geogrelha em configuração envelopada com a aplicação de carga fazendo um ângulo α de 16^0 com a vertical. Serão apresentados os resultados obtidos para a situação em que a direção de penetração do OC passa pelo centro do tubo e aquela em que a direção de penetração do OC passa pela lateral do tubo.

A Figura 5.13 apresenta os registros das deformações efetuadas durante a realização do ensaio de referência para a situação em que a direção de penetração do OC passa pelo centro do tubo. Observa-se que o topo e a base do tubo, onde os extensômetros 01 e 05 foram instalados, foram comprimidos. As laterais, onde os extensômetros 03 e 06 foram instalados, foram tracionadas. O extensômetro 04, instalado na parte inferior direita do tubo não apresentou grandes deformações no decorrer do ensaio. Os extensômetros 02 e 07, instalados nas ombreiras superiores esquerda e direita, apresentaram comportamento relativamente simétrico, sendo o 02 tracionado e o 07 comprimido.

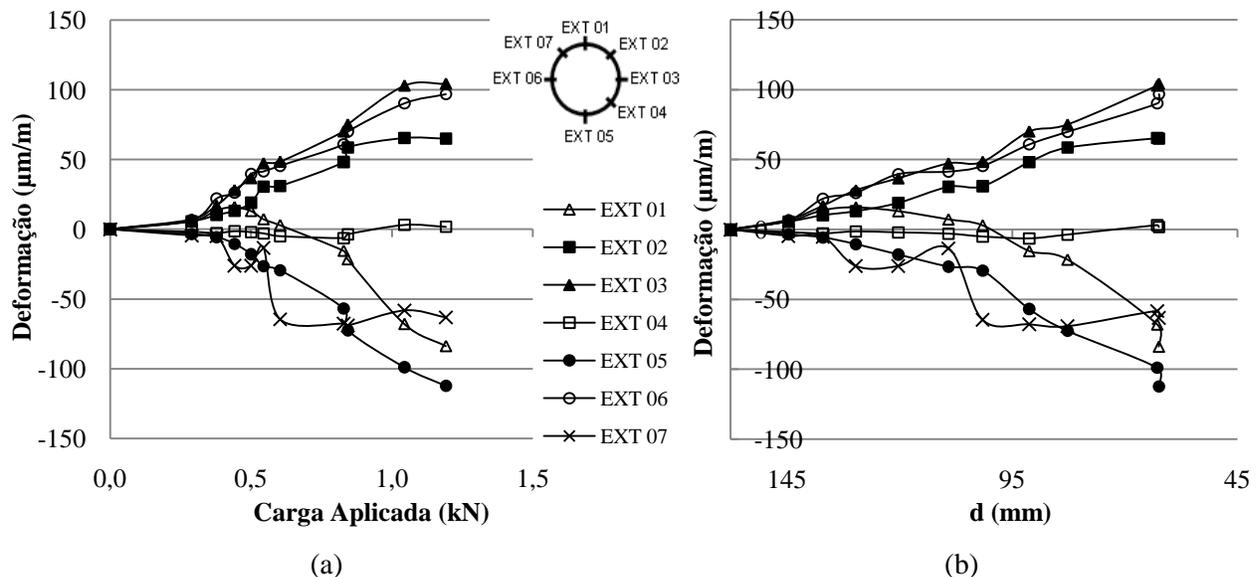


Figura 5.13. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-SR: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam os resultados das deformações registradas nos ensaios reforçados com geogrelha e geotêxtil tecido em configuração envelopada para situação em que a direção de penetração do OC passa pelo centro do tubo. Observa-se que os ensaios reforçados apresentaram comportamento similar ao ocorrido no ensaio sem reforço. No entanto, verifica-se que as deformações finais nos ensaios reforçados são superiores aquelas registradas ao fim do ensaio de referência. Esse fato se explica pelos maiores níveis de carga requeridos para que o OC atingisse sua cota final nos ensaios reforçados.

A fim de que se possa analisar a influência da presença do reforço nas deformações sofridas pelo tubo, apresenta-se na Figura 5.16 o diagrama das deformações (em $\mu\text{m}/\text{m}$) registradas pelos extensômetros nos ensaios reforçados e sem reforço para o nível de carga final deste (1,19 kN). Como dito no item 5.2.1, adotou-se como convenção, pontos de compressão para dentro do contorno do tubo e pontos de tração para fora do contorno do tubo. Pode-se observar que os ensaios reforçados apresentam menores deformações em relação ao ensaio de referência.

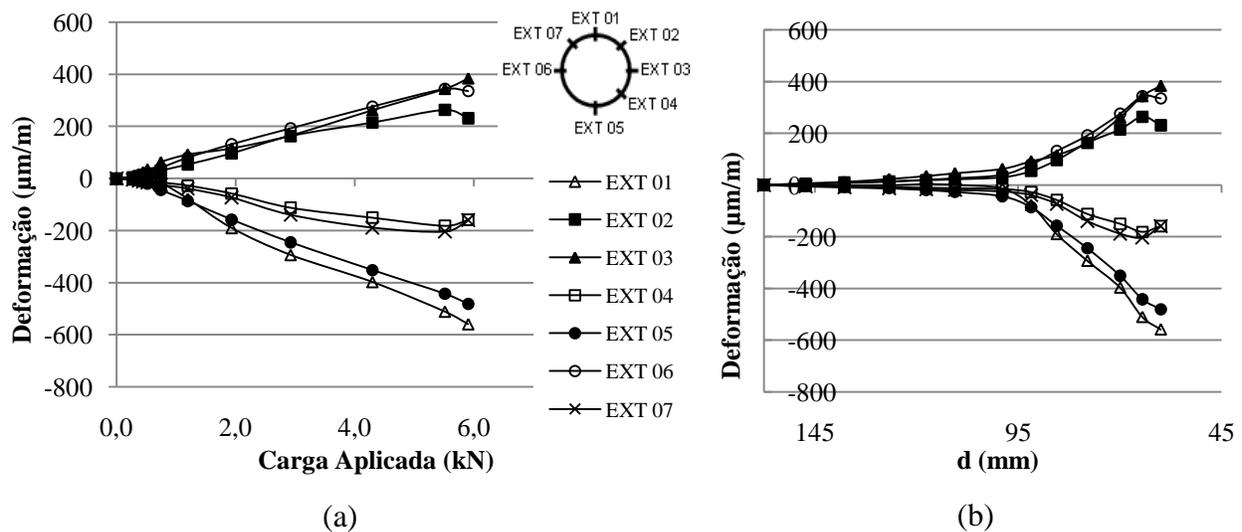


Figura 5.14. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-GG-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d .

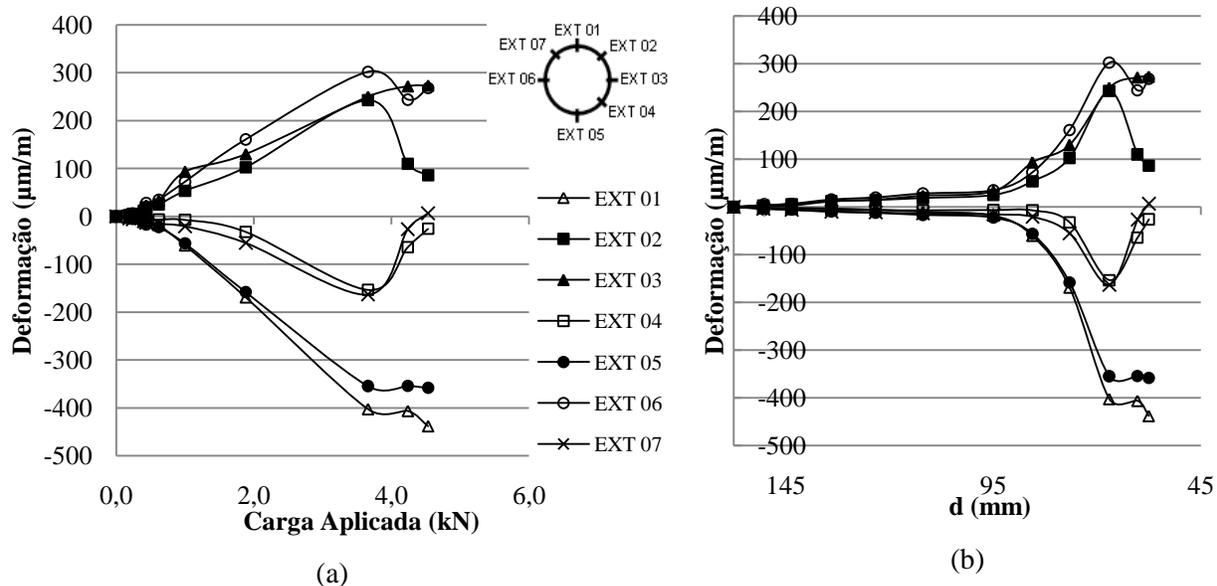


Figura 5.15. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-GT-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

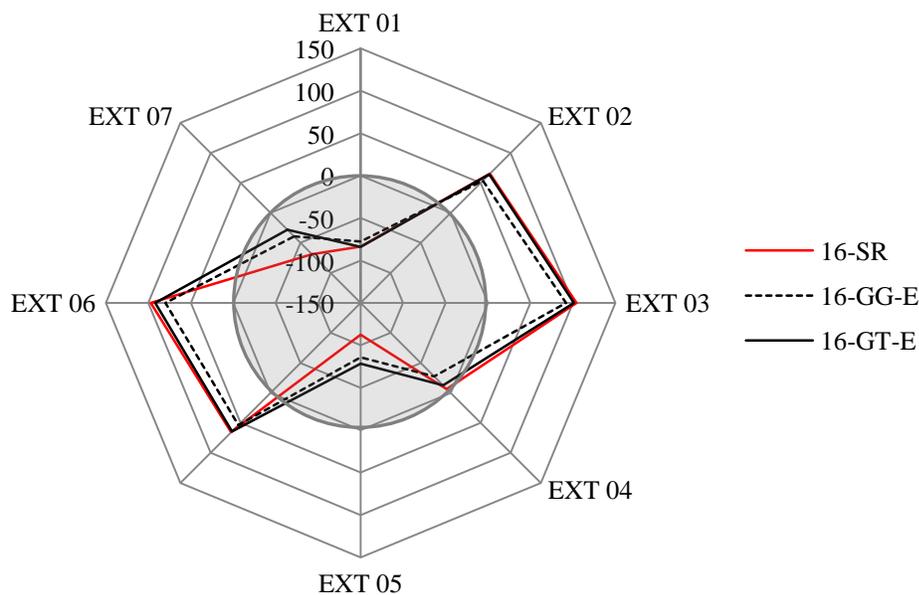


Figura 5.16. Comparações entre deformações medidas nos ensaios reforçados (geogrelha e geotêxtil tecido) com configuração envelopada e o ensaio de referência para um carregamento de 1,19 kN.

A Tabela 5.4 apresenta as razões entre as deformações nos ensaios reforçados, apresentadas na Figura 5.16, e aquelas registradas no ensaio de referência. Pode-se observar que as reduções mais

significativas ocorreram no ponto onde o extensômetro 07 foi instalado (ombreira superior esquerda). Apesar de este ser o ponto mais próximo da direção de penetração do OC, nota-se que nele são verificadas reduções de 59% no ensaio 19-GT-E e de 43% para o ensaio 16-GG-E em relação ao ensaio de referência. Os demais pontos, com exceção do extensômetro 04, também apresentam reduções, no entanto menos significativas.

Tabela 5.4. Razões entre deformações medidas nos ensaios reforçados na configuração envelopada (geogrelha e geotêxtil tecido) e no ensaio de referência para um carregamento de 1,19 kN - ϵ/ϵ_{SR} .

	16-SR	16-GG-E	16-GT-E
EXT 01	1,00	0,93	1,00
EXT 02	1,00	0,82	0,98
EXT 03	1,00	0,88	0,97
EXT 04	1,00	4,32	2,00
EXT 05	1,00	0,76	0,70
EXT 06	1,00	0,82	0,95
EXT 07	1,00	0,57	0,41

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam os resultados das deformações nos ensaios realizados na situação em que a linha de penetração do OC passa pela lateral do tubo. Nas Figuras 5.17a e 5.17b são apresentados os resultados do ensaio de referência. Nas Figuras 5.18a e 5.18b são apresentados os resultados do ensaio reforçado com geogrelha em configuração envelopada. Nota-se que no ensaio de referência (Figura 5.17) não se observa a simetria observada nas deformações registradas no ensaio 16-GG-E-DC (Figura 5.18). O ponto onde o extensômetro 03 foi instalado foi tracionado no ensaio 16-SR-DC e comprimido no ensaio 16-GG-E-DC. O ponto onde o extensômetro 05 foi instalado foi comprimido no ensaio 16-SR-DC e tracionado no ensaio 16-GG-E-DC. Esse fato pode sugerir que o tubo sofreu deslocamentos durante os ensaios.

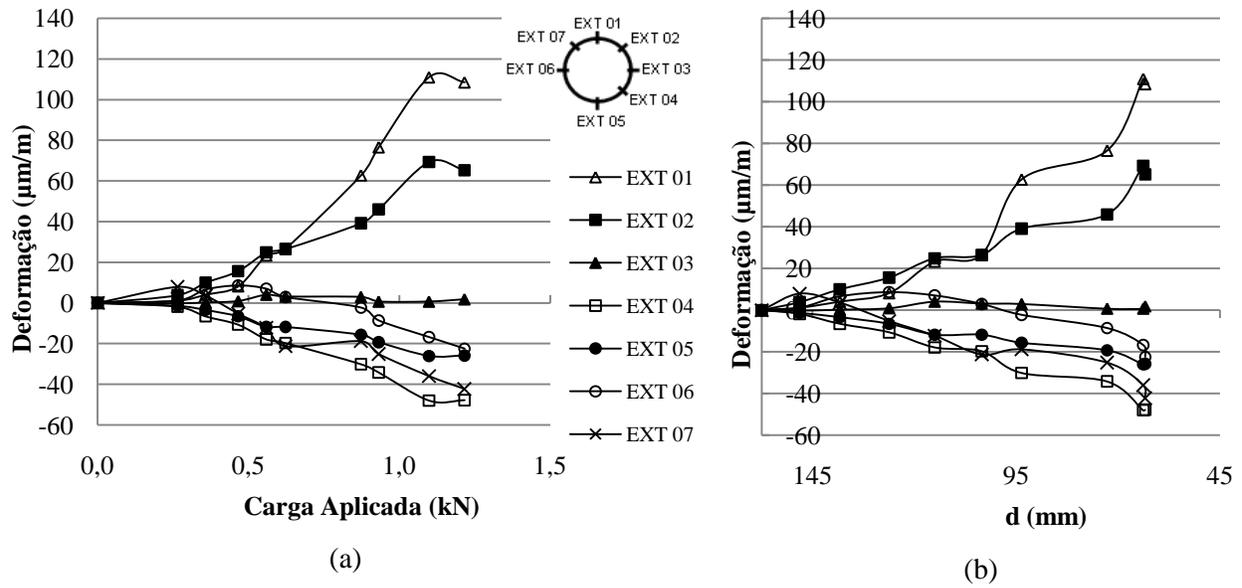


Figura 5.17. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-SR-DC: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d .

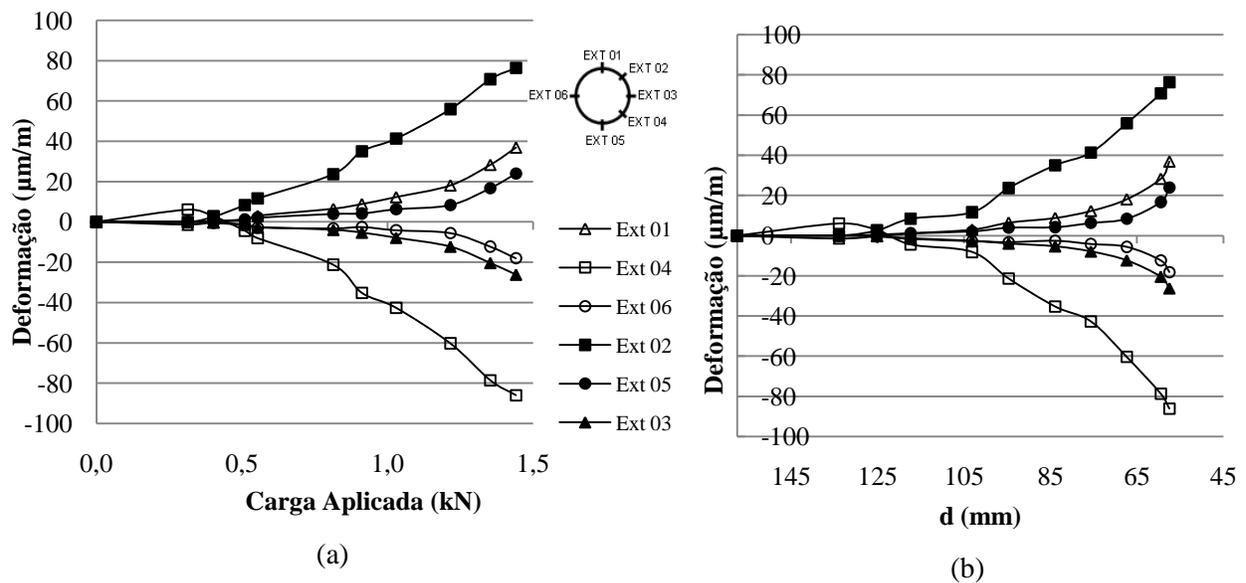


Figura 5.18. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 16-GG-E-DC: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d .

A Figura 5.19 apresenta o diagrama de deformações (em $\mu\text{m/m}$) sofridas pelo tubo em ambos os ensaios para o nível de carregamento final do ensaio de referência (1,22 kN). Devido à inclinação e excentricidade da direção de penetração do OC em relação ao centro do tubo, observa-se que o tubo deforma de forma diferente da observada nos ensaios analisados até aqui.

Os pontos das ombreiras são os que, em geral, apresentam as, maiores deformações. A Tabela 5.5 apresenta os valores das deformações e das razões entre deformações registradas pelos extensômetros apresentadas no diagrama da Figura 5.19. Pode se observar que, no ensaio reforçado, os extensômetros 01, 02 e 06 apresentaram reduções de deformações de 83, 14 e 75%, respectivamente, em relação ao ensaio sem reforço.

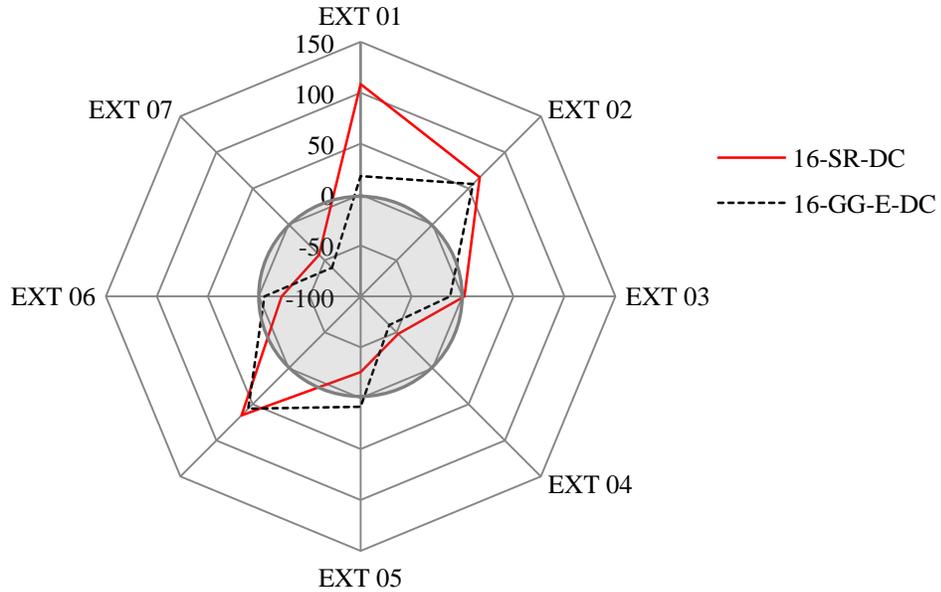


Figura 5.19. Comparações entre deformações medidas no ensaio reforçado com geogrelha em configuração envelopada e o ensaio de referência para um carregamento de 1,22 kN.

Tabela 5.5. Deformações e razões entre deformações medidas no ensaio reforçado com geogrelha em configuração envelopada e no ensaio de referência para um carregamento de 1,22 kN - ϵ/ϵ_{SR} .

	16-SR-DC	16-GG-E-DC	ϵ/ϵ_{SR}
	ϵ_{SR} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	
EXT 01	108.45	18,09	0,17
EXT 02	65,21	55,88	0,86
EXT 03	1,81	-12,29	-
EXT 04	-47,77	-60,29	1,26
EXT 05	-25,81	8,35	-
EXT 06	-22,42	-5,57	0,25

5.2.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CARGA APLICADA A 45^0 ($\alpha=45^0$)

Neste item serão tratadas as deformações registradas nos ensaios realizados com carga aplicada a 45^0 . No estudo realizado com esta inclinação foram efetuados um ensaio de referência e um ensaio reforçado em configuração envelopada. As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam os resultados dos registros de deformações para estes ensaios.

De forma semelhante ao que ocorreu nos ensaios realizados com carga aplicada a 16^0 , verifica-se que a deformação do tubo se modificou em relação àquela observada nos ensaios realizados com aplicação de carga na vertical. Neste caso, as compressões antes registradas no topo e na base são agora registradas nas ombreiras pelos extensômetros 04 e 07. A Figura 5.22 apresenta o diagrama das deformações (em $\mu\text{m/m}$) sofridas pelo tubo em ambos os ensaios para o carregamento final do ensaio de referência (0,35 kN).

A Tabela 5.6 apresenta os valores das deformações e razões entre deformações registradas pelos extensômetros e apresentadas no diagrama da Figura 5.22. Observa-se que as deformações registradas nos ensaios realizados com aplicação de carga a 45^0 são inferiores às registradas nos demais ensaios, visto que o nível de carregamento atingido também é inferior. Pode-se observar que os extensômetros 03, 05 e 06 praticamente não apresentaram deformações quando comparados ao ensaio de referência.

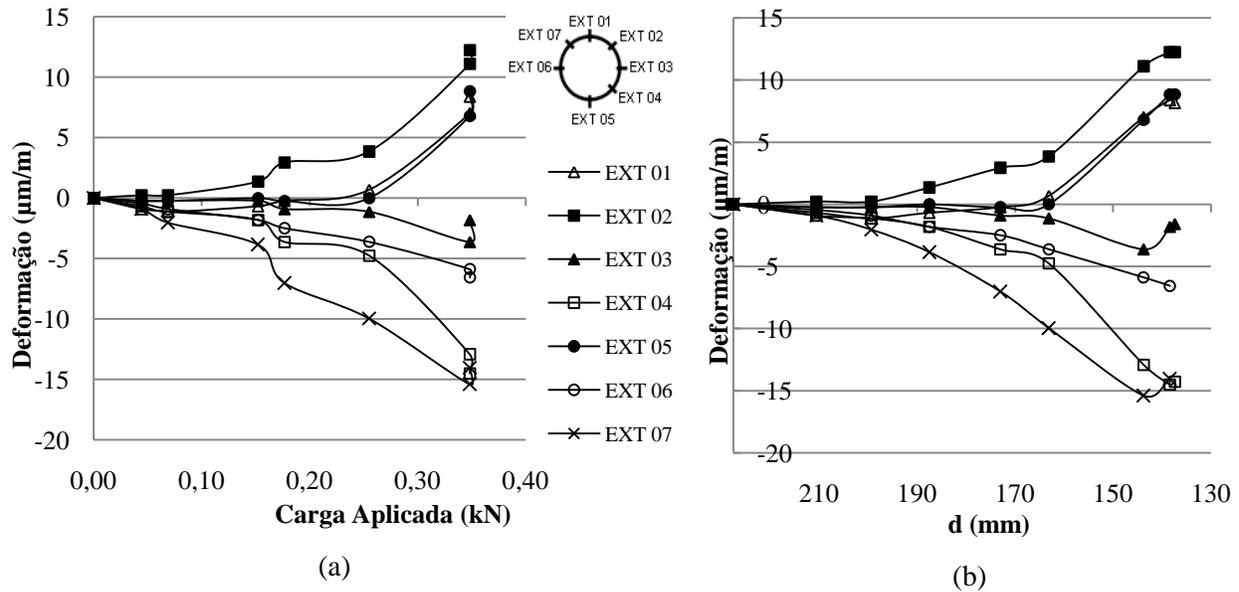


Figura 5.20. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 45-SR: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

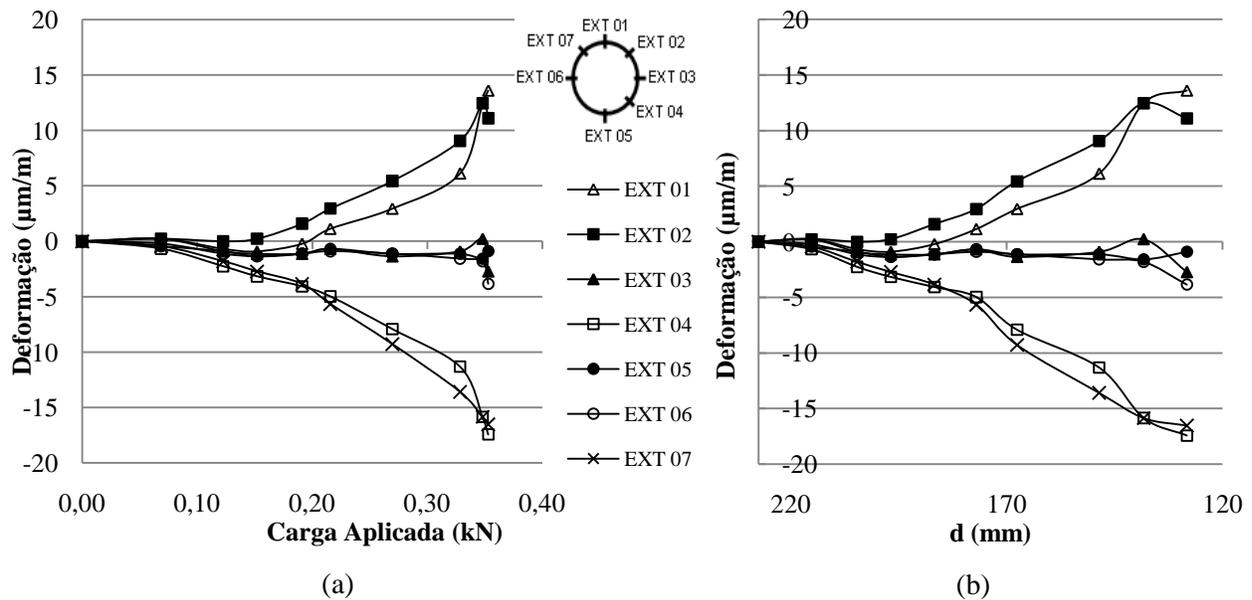


Figura 5.21. Deformações medidas em pontos ao longo do perímetro central do tubo no ensaio 45-GG-E: (a) Deformação x Carga aplicada; (b) Deformação x d.

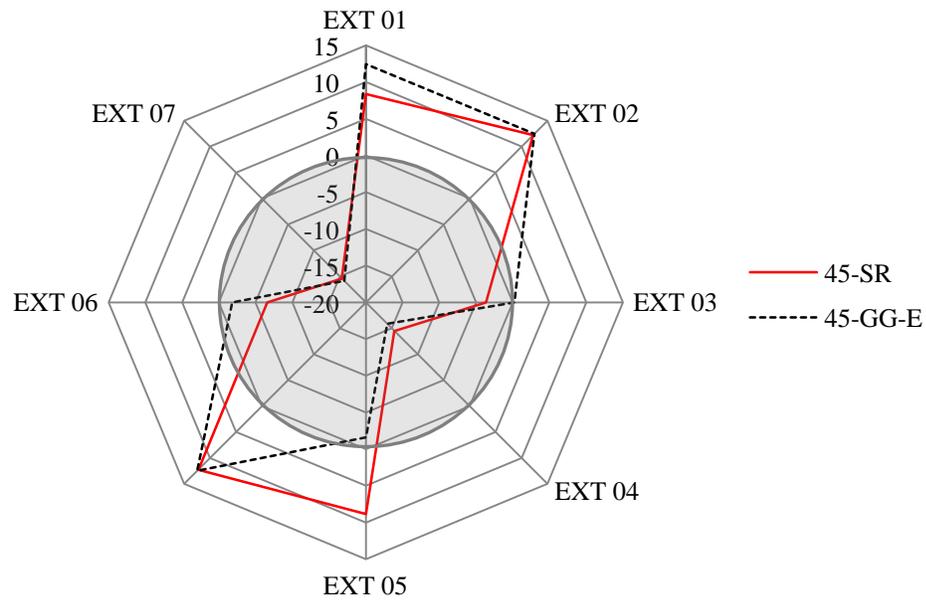


Figura 5.22. Comparações entre deformações medidas no ensaio reforçado com geogrelha em configuração envelopada e o ensaio de referência para um carregamento de 0,35kN.

Tabela 5.6. Deformações e razões entre deformações medidas no ensaio reforçado com geogrelha em configuração envelopada e no ensaio de referência para um carregamento de 0,35 kN - $\varepsilon/\varepsilon_{SR}$.

	45-SR	45-GG-E	
	ε_{SR}	ε	
	($\mu\text{m}/\text{m}$)	($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\varepsilon/\varepsilon_{SR}$
EXT 01	8,38	12,45	1,49
EXT 02	12,23	12,45	1,02
EXT 03	-3,62	0,23	-
EXT 04	-14,49	-15,85	1,09
EXT 05	8,83	-1,58	-
EXT 06	-6,57	-1,81	0,28
EXT 07	-15,40	-15,85	1,03

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo que buscou avaliar o uso de geossintéticos como camada protetora de tubulações enterradas contra danos provenientes de ferramentas de escavação. Mediante o proposto, foram realizados ensaios em laboratório com o intuito de verificar a influência da presença do reforço no sistema. As principais conclusões deste trabalho são apresentadas a seguir.

6.2 CONCLUSÕES

A metodologia e o equipamento empregados nos ensaios se mostraram adequados para os propósitos da pesquisa. Em que pese às limitações de ensaios em modelos reduzidos, os resultados obtidos permitiram a identificação e quantificação de mecanismos importantes para o problema. A instrumentação utilizada também apresentou desempenho satisfatório. O tubo instrumentado utilizado teve dimensões típicas de aplicações dessa natureza, mas também pode ser considerado como modelo para situações geométricas com maiores dimensões. Os reforços utilizados foram um geotêxtil não tecido e uma geogrelha. Tais materiais foram escolhidos com propriedades que permitissem simular razoavelmente protótipos de reforços com fator de escala, em relação às dimensões dos ensaios, de até 8.

Na maioria dos ensaios reforçados, para um mesmo nível de carga, a penetração do objeto contundente (OC) no terreno foi menor, quando comparada aos ensaios de referência (sem reforço). Em termos práticos, esse fato é importante, pois a necessidade de aplicação de maiores cargas para atingir a tubulação pode alertar o operador de um equipamento de escavação quanto à existência de uma tubulação enterrada no local. Além disso, com o avanço da tecnologia, o elemento de reforço pode incorporar um sistema de alerta (alarme) que seja acionado quando determinada deformação é atingida. Produtos com circuitos elétricos ou fibras óticas já são disponíveis para aplicações ambientais, por exemplo.

Embora os ensaios não tenham sido realizados especificamente para esse fim, os resultados obtidos permitem inferir que a presença do reforço também seria benéfica no caso de acidentes provocados por quedas de objetos sobre a linha de instalação do tubo. O mesmo pode-se dizer em relação a recalques localizados do terreno sobre a tubulação devido à ação de sobrecargas (equipamentos, veículos pesados, etc).

Nos ensaios realizados com aplicação de carga na vertical, a configuração que apresentou o maior ganho de resistência à penetração foi em arranjo envelopado com geotêxtil tecido (0-GT-E). Neste ensaio foi necessária uma carga aproximadamente nove vezes superior a do ensaio de referência para o OC atingir sua cota final. A configuração com arranjo envelopado com geogrelha (0-GG-E) também apresentou bons resultados. Neste ensaio, foi necessária uma carga aproximadamente seis vezes superior a do ensaio de referência para o OC atingir sua cota final.

Nos ensaios realizados com OC inclinado de 16° em relação à vertical e com direção de penetração passando pelo centro do tubo, os aumentos de resistência à penetração também foram expressivos. No ensaio envelopado com geogrelha, a força necessária a penetração do OC foi cinco vezes superior a do ensaio de referência. No ensaio envelopado com geotêxtil tecido essa força foi mais que três vezes superior.

A inclusão do reforço no conjunto alterou favoravelmente o estado de tensões no maciço, na maioria dos casos. Nos ensaios realizados com aplicação de cargas na vertical chegou a haver reduções de tensões totais de até 81% no topo do tubo no ensaio 0-GG-C(R) em comparação ao ensaio de referência.

No que diz respeito às deformações sofridas pelo tubo, nos ensaios realizados com aplicação de cargas na vertical, para o nível de carga final do ensaio de referência, verificou-se que as maiores deformações, ocorreram no topo. Nos ensaios reforçados houve reduções de até 60% neste ponto com relação ao ensaio sem reforço. Nos ensaios realizados com OC inclinado de 16° sobre direção passando pelo centro do tubo, as reduções mais significativas ocorreram no ponto onde o extensômetro 07 foi instalado (quadrante superior esquerdo). Apesar de este ser o ponto mais próximo da extremidade do OC, nele foram verificadas reduções de 59% no ensaio 16-GT-E e de 43% para o ensaio 16-GG-E. Entretanto, nesse caso, outros pontos da tubulação apresentaram reduções de deformações menores, devido à presença do reforço. Para a direção de penetração do

OC passando distante do centro do tubo (ensaio 16-GG-E-DC), as reduções de deformações variaram de 14% a 83% em relação à situação sem reforço, dependendo do ponto considerado no tubo. É importante frisar que nesse, como em outros ensaios, houve aumento da deformação no meio de quadrantes inferiores do tubo (extensômetro 04), dependendo do tipo de reforço utilizado e da orientação da penetração do OC. Entretanto, estes aumentos se deram sobre valores de deformações bastante menores que os medidos em outros pontos do tubo.

Os resultados obtidos mostraram o potencial da utilização de reforço geossintético como elemento de proteção de tubulações enterradas. Obviamente, por razões econômicas, tal utilização não se justificaria ao longo de todo o comprimento de uma tubulação longa. Entretanto, ela seria importante em regiões críticas em áreas industriais ou em regiões urbanas. Devido à complexidade e ao número de variáveis nesse tipo de estudo, mais pesquisas são necessárias sobre o tema e no próximo item algumas sugestões a esse respeito são apresentadas.

6.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As sugestões para pesquisas futuras estão listadas abaixo:

- Realizar análises numéricas visando uma melhor compreensão e previsão de danos a tubos com e sem a presença de camada de reforço.
- Realizar ensaios com outros tipos de solos e outros tipos de materiais e diâmetros de tubos.
- Realizar ensaios com a tubulação pressurizada.
- Realizar ensaios no campo em escala real.
- Realizar ensaios com aterros com seção transversal trapezoidal.
- Realizar ensaios variando a profundidade do tubo e dos reforços.
- Realizar ensaios com queda do objeto contundente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMENTO, M. & PEZZOLO, V. C. (2004). Aplicações em Proteção. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Editora Edgard Blucher, São Paulo, pp. 13-25.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12533. Geossintético - Terminologia. Rio de Janeiro, 2003, 3p.
- AGUIAR, P. R. & VERTEMATTI, J. C. (2004). Introdução. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Editora Edgard Blucher, São Paulo, pp. 1-12.
- ANP, 2001. Indústria Brasileira Gás Natural: Regulação Atual e Desafios Futuros. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 151p.
- BUENO, B. S. (2004). Matérias-primas. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Editora Edgard Blucher, São Paulo, pp. 13-25.
- BUENO, B. S. & VILAR, O. M. (2004). Propriedades, Ensaio e Normas. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Editora Edgard Blucher, São Paulo, pp. 25-62.
- CETESB, 2002. Emergências químicas. Acidentes ambientais. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/dutos/aa_causas.asp> Acesso em: 18 fev. 2009.
- CONCAWE (2002). Western European Cross-country Oil Pipelines - 30 Year Performance Statistics. Report n0. 1/02. Brussels: CONCAWE, 48 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.

- PALMEIRA, E.M. (1993). Curso de Estabilização e Reforço de Solos: Introdução à Utilização de Geossintéticos. Publicação G.AP-002B/93, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- PALMEIRA, E.M. (1996). Instrumentação Geotécnica. Publicação G.AP-005A/96, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (1999). Rupture and fire, Natural gas, Indianapolis, Indiana, July 21, 1997. Pipeline Accident Brief, Washington.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2000). Natural Gas Pipeline Rupture and Subsequent Explosion, St. Cloud, Minnesota, December 11, 1998. Pipeline Accident Report NTSB/PAR-00/01. Washington, 33 p.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2004). Rupture, explosion, and fire, Wilmington, Delaware, July 2, 2003. Pipeline Accident Brief NTSB/PAB-04/01. Washington, 7 p.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2007a). Pipeline break, explosion, and fire, Bergenfield, New Jersey, December 13, 2005. Pipeline Accident Brief, Washington, 13 p.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. (2007b). Pipeline rupture and leak with vapor cloud, Kingman, Kansas, October 27, 2004. Pipeline Accident Brief NTSB/PAB-07/02, Washington, 15 p.
- 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.
- VIANA, P.M.F. & BUENO, B.S. (1998). Conduitos Enterrados: Minimização de Esforços Sobre a Estrutura. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – XI COBRAMSEG, Brasília, pp. 1055 – 1061.

VIANA, P.M.F. (2003). Geoval: Um Novo Processo Construtivo Para Dutos Enterrados. Tese de Doutorado, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 238 p.