

**MACIEL DONATO**

**MEDIDAS DIRETAS DE TENSÃO EM SOLO REFORÇADO  
COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre  
Março de 2007

**MACIEL DONATO**

**MEDIDAS DIRETAS DE TENSÃO EM SOLO REFORÇADO COM  
FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de março de 2007

**Prof. Américo Campos Filho**

Dr. Eng. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Orientador

**Prof. Nilo Cesar Consoli**

Ph.D. Concórdia University - Canadá  
Orientador

**Prof. Antônio Thomé**

Dr. Eng. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Co-orientador

**Prof. Fernando Schnaid**

Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Cláudio Renato Rodrigues Dias (Fundação Universidade Federal de Rio Grande)**

Dr. Eng. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Pedro Domingos Marques Prietto (Universidade de Passo Fundo)**

Dr. Eng. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Samir Maghous (Universidade Federal do Rio Grande do Sul)**

D.Sc. pela Ecole Nationale des Ponts et Chaussees - França

**Prof. Fernando Schnaid (Universidade Federal do Rio Grande do Sul)**

Ph.D. pela University of Oxford - Inglaterra

Dedico este trabalho aos que se esforçam pelas nossas universidades. Aos que as tornaram hoje o que elas são.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho. Dos que tiveram as grandes idéias aos que colocaram a mão na massa. Dos profissionais aos familiares que de certa forma trabalharam junto comigo.

Ao CNPq pela bolsa de estudo, a Fitesa Fibras e Filamentos S/A, pelas fibras cedidas para esta pesquisa, à UFRGS e à UPF pelo acolhimento incondicional.

Mas de forma especial, gostaria de agradecer aos professores da UPF e da UFRGS que tornaram possível a concretização deste trabalho, seja como orientadores ou como formadores destas duas universidades que me acolheram e me deram totais condições de desenvolver uma pesquisa de ponta.

Aos laboratórios, laboratoristas, funcionários e estagiários. Aos meus amigos de trabalho e aos meus familiares, OBRIGADO!!!!

## RESUMO

DONATO, M. **Medidas Diretas de Tensão em Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Este trabalho tem como objetivo estudar a distribuição de tensões em um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno através de ensaios de prova de carga em placa circular, com medidas diretas de tensão pelo uso de células de tensão total. Busca-se investigar a influência da adição de fibras no comportamento carga-recalque de camadas compactadas de solo, avaliando o efeito do teor de fibras. Calibrações em laboratório foram realizadas para avaliar os fatores que afetam as medições de tensões em células de tensão total inseridas no solo. Utilizou-se também o Método dos Elementos Finitos (MEF) para simular numericamente a distribuição de tensões dentro de câmaras de calibração. Ensaios de provas de carga em placa de 0,30 m de diâmetro sobre camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras, foram realizados, buscando a investigação do comportamento carga-recalque destas misturas, dos mecanismos de ruptura e da distribuição de tensões no interior das camadas e no contato solo/placa. A análise dos resultados mostra que a distribuição das tensões verticais na câmara de calibração é função do seu fator de forma e que as constantes de calibração também são função da posição de instalação das células de tensão. Nos ensaios de placa pode-se observar que o comportamento carga-recalque do solo arenoso é significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte e alterando os mecanismos de ruptura. As medidas de tensões mostram uma mudança na distribuição de tensões com a inclusão do reforço.

**Palavras-chave:** medidas de tensão total; solo reforçado; ensaios de placa.

## ABSTRACT

DONATO, M. **Direct Stress Measurement in Polypropylene Fiber-reinforced Soil**. 2007. Thesis (Doctorate in Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The aim of this work is to study the polypropylene fiber-reinforced sand stress distribution through circular plate load tests, with direct stress measurement using total stress cells. The influence of fiber inclusion in load-settlement behavior of thick compacted soil layers was investigated and the fiber content effect evaluated. Laboratory calibrations were carried out in order to evaluate the factors that affect the stress measurements in total stress cells inserted in the soil. The Finite Element Method (FEM) was applied to simulate the numerical stress distribution inside the calibration chambers. Plate load tests with 0.30 m diameter plate bearing on compacted sand reinforced and non-reinforced layers were carried out to investigate the load-settlement behavior, failure mechanisms and stress distributions inside the sand layers and in the soil/plate contact. The analysis of the results shows that the vertical stress distribution inside the calibration chambers is a function of the high/diameter relationship and the calibration constants are a function of the stress cells installation position. It can be observed that the sand load-settlement behavior is significantly influenced by fiber inclusion, increasing bearing capacity and changing failure mechanisms. The stress measurements indicate an alteration in the stress distribution with the fiber inclusion.

**Key-words:** total stress measurement, fiber-reinforced soil, plate load tests.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LEGENDA</b> .....	<b>XV</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Problema e relevância da pesquisa .....	1
1.2 Objetivo geral .....	3
1.2.1 Objetivos Específicos .....	4
1.3 Contribuições ao estado da arte .....	4
1.4 Desenvolvimento da pesquisa .....	5
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>6</b>
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1 Considerações iniciais .....	6
2.2 Medidas de tensões totais em solos .....	6
2.2.1 Tipos de Células .....	7
2.2.2 Calibração em Laboratório .....	8
2.2.3 Estudos Experimentais .....	10
2.3 Solos reforçados .....	15
2.3.1 Estabilização e Reforço de Solos.....	15
2.3.2 Tipos de Fibras Empregadas como Reforço.....	17
2.3.2.1 Fibras naturais .....	18
2.3.2.2 Fibras poliméricas .....	18
2.3.2.3 Fibras minerais .....	20
2.3.2.4 Fibras metálicas .....	20
2.3.3 Estudos Experimentais .....	21
2.3.4 Alterações nas Propriedades dos Solos pela Inclusão de Fibras .....	30
2.3.4.1 Compactação .....	31
2.3.4.2 Resistência ao cisalhamento de pico .....	32
2.3.4.3 Resistência ao cisalhamento pós-pico .....	34
2.3.4.4 Deformabilidade .....	34
2.3.4.5 Modo de ruptura .....	34
2.3.4.6 Variação volumétrica.....	35

2.3.4.7 Rigidez inicial.....	35
2.4 Provas de carga em placa.....	36
2.4.1 Considerações Iniciais .....	36
2.4.2 Estudos Experimentais .....	37
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>43</b>
PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	43
3.1 Considerações iniciais .....	43
3.2 Variáveis investigadas .....	43
3.2.1 Ensaio de Resistência à Compressão Confinada.....	44
3.2.2 Ensaio de Calibração.....	45
3.2.3 Análise Numérica .....	46
3.2.4 Ensaio de Placa .....	47
3.3 Materiais utilizados.....	48
3.3.1 Areia .....	48
3.3.2 Fibras .....	50
3.3.3 Células de Tensão Total .....	51
3.4 Métodos de ensaio e equipamentos utilizados.....	52
3.4.1 Ensaio de Compressão Confinada .....	53
3.4.2 Ensaio de Calibração.....	54
3.4.2.1 Equipamentos utilizados.....	54
3.4.2.2 Método de ensaio.....	57
3.4.3 Ensaio de Placa .....	59
3.4.3.1 Equipamentos utilizados.....	60
3.4.3.2 Processos de mistura e construção das camadas .....	63
3.4.3.3 Método de ensaio.....	64
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>66</b>
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	66
4.1 Considerações iniciais .....	66
4.2 Ensaio de compressão confinada .....	66
4.2.1 Influência do Teor e Comprimento das fibras .....	66
4.2.2 Influência do Teor de Umidade .....	68
4.3 Análises numéricas .....	69
4.4 Calibrações em laboratório .....	71
4.4.1 Calibração em Ar.....	71
4.4.2 Calibração em Areia Seca.....	73
4.4.2.1 Células internas .....	73
4.4.2.2 Células de contato.....	81



4.4.3 Calibrações em Areia e Areia-fibra .....	83
4.4.3.1 Células internas .....	84
4.4.3.2 Células de contato.....	85
4.5 Ensaio de placa .....	87
4.5.1 Mecanismos de Ruptura e Exumação dos Ensaio.....	88
4.5.2 Ensaio sem Fibras .....	93
4.5.2.1 Areia seca (w: 0 %) .....	94
4.5.2.1 Areia (w: 10 %) .....	101
4.5.3 Ensaio com Fibras .....	107
4.5.3.1 Areia com 0,25 % de fibras .....	107
4.5.3.2 Areia com 0,5 % de fibras .....	113
4.5.4 Análise Global .....	118
4.5.4.1 Influência do teor de umidade .....	118
4.5.4.2 Influência do teor de fibras .....	122
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>130</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>130</b>
5.1 Conclusões.....	130
5.2 Sugestões .....	131
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>133</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>144</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: principais fatores que afetam as medições das tensões totais em solos.....	11
Tabela 2.1: principais fatores que afetam as medições das tensões totais em solos.....	12
Tabela 3.1: variáveis iniciais investigadas nos ensaios de calibração em areia .....	45
Tabela 3.2: variáveis investigadas nos ensaios de calibração .....	46
Tabela 3.3: valores dos parâmetros adotados nas simulações numéricas.....	46
Tabela 3.4: variáveis investigadas nos ensaios de placa .....	48
Tabela 3.5: índices físicos da areia de Osório .....	49
Tabela 3.6: resumo das propriedades mecânicas das fibras .....	50
Tabela 3.7: características das células de tensão total .....	52
Tabela 4.1: constantes obtidas através de calibração em ar .....	72
Tabela 4.2: valores calculados de CAF no centro das três câmaras de calibração.....	80
Tabela 4.3: valores calculados de CAF para as quatro células de tensão total.....	83
Tabela 4.4: valores de CAF das células internas .....	85
Tabela 4.5: valores de CAF das células de contato .....	86
Tabela 4.6: comparação entre valores de carga para areia e areia-fibras obtidos para distintos níveis de deslocamento .....	124

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: tipos básicos de células de tensão total: (a) célula diafragma; (b) célula hidráulica (Dunnicliff, 1988).....	7
Figura 2.2: câmara de calibração por fluidos para células de pressão do tipo interna (Dunnicliff, 1988).....	8
Figura 2.3: (a) câmara de calibração para células de pressão do tipo interna; (b) série de células no plano central (Dunnicliff, 1988).....	9
Figura 3.1: curva granulométrica da areia.....	49
Figura 3.2: aspecto das fibras de polipropileno de 100 dtex com 50 mm de comprimento (fonte: FITESA S/A).....	51
Figura 3.3: representação esquemática da câmara de calibração grande: $H/D = 0,8$ .....	54
Figura 3.4: vistas da câmara de calibração grande: $H/D = 0,8$ .....	55
Figura 3.5: representação esquemática da câmara de calibração média: $H/D = 0,4$ .....	56
Figura 3.6: vistas da câmara de calibração média: $H/D = 0,4$ .....	56
Figura 3.7: representação esquemática da câmara de calibração pequena: $H/D = 1,2$ .....	57
Figura 3.8: vistas da câmara de calibração pequena: $H/D = 1,2$ .....	57
Figura 3.9: detalhe da calibração das células de tensão total em ar.....	58
Figura 3.10: moldagem dos corpos-de-prova para calibração em areia seca.....	58
Figura 3.11: moldagem dos corpos-de-prova para calibração em areia e areia-fibra.....	59
Figura 3.12: distribuição das células de tensão total na placa de aço.....	60
Figura 3.13: corte esquemático da caixa de acomodação e células de tensão total.....	61
Figura 3.14: sistema de medição de deslocamentos.....	62
Figura 3.15: vista do ambiente de ensaio.....	62
Figura 3.16: detalhes da execução das camadas de solo.....	63
Figura 3.17: detalhes da exumação das camadas de areia.....	65
Figura 4.1: curvas tensão desvio <i>versus</i> deformação axial para a areia reforçada com fibras de comprimento: (a) 24 mm e (b) 50 mm.....	67
Figura 4.2: curvas de capacidade de absorção de energia <i>versus</i> deformação axial para a areia reforçada com fibras de comprimento: (a) 24 mm e (b) 50 mm.....	68
Figura 4.3: influência do teor de umidade: (a) na tensão desvio e (b) na capacidade de absorção de energia da areia.....	68
Figura 4.4: distribuição de tensões nas câmaras: (a) grande; (b) média e (c) pequena.....	70
Figura 4.5: distribuição de tensões nas câmaras: (a) grande; (b) média e (c) pequena.....	70
Figura 4.6: calibração em ar das células de tensão total do tipo interna.....	71
Figura 4.7: calibração em ar das células de contato.....	72
Figura 4.8: repetibilidade das leituras.....	73

Figura 4.9: influência do índice de vazios nas leituras de tensão.....	74
Figura 4.10: tensão aplicada <i>versus</i> tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento central da câmara de calibração grande .....	75
Figura 4.11: tensão aplicada <i>versus</i> tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento lateral da câmara de calibração grande .....	75
Figura 4.12: tensão vertical medida e estimada ao longo da profundidade para a câmara de calibração grande .....	76
Figura 4.13: tensão aplicada <i>versus</i> tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento central da câmara de calibração média .....	77
Figura 4.14: tensão aplicada <i>versus</i> tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento lateral da câmara de calibração média .....	77
Figura 4.15: tensão vertical medida e estimada ao longo da profundidade para a câmara de calibração média .....	78
Figura 4.16: tensão aplicada <i>versus</i> tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento central da câmara de calibração pequena.....	78
Figura 4.17: tensão medida ao longo da profundidade <i>versus</i> tensão estimada numericamente para a câmara pequena .....	79
Figura 4.18: tensão vertical medida e estimada ao longo da profundidade para todas as câmaras no alinhamento central .....	79
Figura 4.19: tensão aplicada <i>versus</i> tensão medida em diferentes posições no fundo da câmara de calibração media.....	81
Figura 4.20: tensão medida e estimada nas diferentes posições no fundo da câmara .....	82
Figura 4.21: constantes de calibração das células internas: (a) BE5KUS 0001; (b) BE5KUS 0002; (c) BE10KC 6102 e (d) BE10KC 6304.....	84
Figura 4.22: constantes de calibração das células de contato: (a) BE10KHS 0001; (b) BE10KHS 0002; (c) BE10KD 7204 e (d) BE10KD 7209.....	86
Figura 4.23: mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia sem fibras: (a) vista superior e (b) vista lateral .....	89
Figura 4.24: mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia com 0,25 % de fibras: (a) vista superior e (b) vista lateral .....	89
Figura 4.25: mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia com 0,5 % de fibras: (a) vista superior e (b) vista lateral .....	89
Figura 4.26: exumação das camadas de areia sem fibra: (a) vista frontal e (b) vista das células instaladas .....	91
Figura 4.27: exumação das camadas de areia com 0,25 % de fibras: (a) vista frontal e (b) vista das células instaladas.....	91
Figura 4.28: exumação das camadas de areia com 0,5 % de fibras: (a) vista frontal e (b) vista das células instaladas.....	91
Figura 4.29: desalinhamento dos sensores no ensaio em areia sem fibras .....	92
Figura 4.30: formação da cunha no ensaio em areia sem fibras.....	92
Figura 4.31: campos de deslocamentos da ruptura localizada (Lopes, 1979).....	93

Figura 4.32: curvas tensão <i>versus</i> deslocamento das células de tensão total .....	94
Figura 4.33: curva carga <i>versus</i> deslocamento .....	95
Figura 4.34: deslocamentos fora da placa .....	96
Figura 4.35: curvas tensão <i>versus</i> deslocamento ao longo da profundidade.....	96
Figura 4.36: distribuição de tensões ao longo da profundidade .....	97
Figura 4.37: curvas tensão <i>versus</i> deslocamento no alinhamento horizontal.....	98
Figura 4.38: distribuição de tensões no alinhamento horizontal .....	98
Figura 4.39: curvas tensão <i>versus</i> deslocamento na placa de aço .....	99
Figura 4.40: distribuição de tensões na placa de aço.....	100
Figura 4.41: curvas tensão <i>versus</i> deslocamento das células de tensão total .....	101
Figura 4.42: curva carga <i>versus</i> deslocamento .....	102
Figura 4.43: deslocamentos fora da placa .....	103
Figura 4.44: curvas tensão <i>versus</i> deslocamento ao longo da profundidade.....	103
Figura 4.45: distribuição de tensões ao longo da profundidade .....	104
Figura 4.46: curva tensão <i>versus</i> deslocamento no alinhamento horizontal .....	105
Figura 4.47: distribuição de tensões no alinhamento horizontal .....	105
Figura 4.48: curva tensão <i>versus</i> deslocamento na placa de aço.....	106
Figura 4.49: distribuição de tensões na placa de aço.....	106
Figura 4.50: curvas tensão <i>versus</i> deslocamento do solo com fibras .....	108
Figura 4.51: curva carga <i>versus</i> deslocamento da areia com 0,25 % de fibras .....	108
Figura 4.52: deslocamento fora da placa do solo reforçado com 0,25 % de fibras.....	109
Figura 4.53: curva tensão <i>versus</i> deslocamento ao longo da profundidade .....	109
Figura 4.54: distribuição de tensões ao longo da profundidade .....	110
Figura 4.55: curva tensão <i>versus</i> deslocamento no alinhamento horizontal .....	110
Figura 4.56: distribuição de tensões no alinhamento horizontal .....	111
Figura 4.57: curva tensão <i>versus</i> deslocamento na placa de aço.....	111
Figura 4.58: distribuição de tensões na placa de aço.....	112
Figura 4.59: curvas tensão <i>versus</i> deslocamento do solo com 0,5 % de fibras.....	113
Figura 4.60: curva carga <i>versus</i> deslocamento da areia com 0,5 % de fibras .....	114
Figura 4.61: deslocamento fora da placa do solo reforçado com 0,5 % de fibras.....	114
Figura 4.62: curva tensão <i>versus</i> deslocamento ao longo da profundidade .....	115
Figura 4.63: distribuição de tensões ao longo da profundidade .....	115
Figura 4.64: curva tensão <i>versus</i> deslocamento no alinhamento horizontal .....	116
Figura 4.65: distribuição de tensões no alinhamento horizontal .....	116
Figura 4.66: curva tensão <i>versus</i> deslocamento na placa de aço.....	117

Figura 4.67: distribuição de tensões na placa de aço.....	117
Figura 4.68: influência do teor de umidade: (a) na curva carga-deslocamento, (b) na capacidade de absorção de energia das areias .....	118
Figura 4.69: comparação da distribuição vertical de tensões entre a areia e a areia seca: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado .....	119
Figura 4.70: comparação da distribuição horizontal de tensões entre a areia e a areia seca: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado .....	121
Figura 4.71: comparação da distribuição de tensões entre a areia e a areia seca na placa de aço: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado .....	122
Figura 4.72: influência do teor de fibras na curva carga-recalque das areias.....	123
Figura 4.73: influência do teor de fibras na energia de deformação absorvida das areias .....	125
Figura 4.74: normalização da energia de deformação absorvida .....	125
Figura 4.75: influência do teor de fibras na distribuição vertical de tensões: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado .....	126
Figura 4.76: influência do teor de fibras na distribuição horizontal de tensões: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado .....	127
Figura 4.77: influência do teor de fibras na distribuição de tensões na placa: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado .....	129

## LEGENDA

$\epsilon_a$ : Deformação axial

$\phi$ : Ângulo de atrito interno

$\gamma$ : Deformação cisalhante

$\gamma_d$ : Peso específico aparente seco

$\nu$ : Coeficiente de Poisson

$\tau$ : Tensão de cisalhamento

$\rho$ : Massa específica do solo

$\rho_z$ : Recalque da área carregada

$\sigma_v$ : Tensão vertical

$\sigma_1, \sigma_3$ : Tensões principais máxima e mínima

$\sigma_a, \sigma_r$ : Tensões principais - axial e radial

$\psi$ : Ângulo de dilatância

$\omega$ : Teor de umidade

$a$ : Raio da placa circular

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

B: Parâmetro de poro-pressão de Skempton

$c$ : Coesão

CBR: California Bearing Ratio

$C_u$ : Coeficiente de uniformidade

D: Diâmetro da câmara de calibração

$D$ : Diâmetro da célula

$d$ : Diâmetro da placa

$d$ : Diâmetro do diafragma da célula

$d/10$ : Critério de recalque máximo (norma inglesa)

$d/30$ : Critério de recalque máximo (norma brasileira)

$D_{10}$ : Diâmetro efetivo das partículas

$D_{50}$ : Diâmetro médio

dtex: Unidade que representa a espessura dos filamentos (1 dtex = 1g/10000m)

$e$ : Índice de vazios

$e_0$ : Índice de vazios inicial

E: Módulo de elasticidade ou Módulo de Young

$E$ : Espessura da célula

$E_{def}$ : Energia de deformação ou tenacidade

$h$ : espessura da placa

$H$ : Altura da câmara de calibração

$H/D$ : Relação entre altura e diâmetro da câmara de calibração

$L_1$ : Primeira leitura após a aplicação do estágio de carregamento

$L_n$ : Leitura em um instante  $n$  qualquer

$L_{n-1}$ : Leitura imediatamente anterior à leitura  $L_n$

LVDT: Linearly variable differential transformer

NBR: Norma Brasileira

$p_{av}$ : Média de tensões aplicada pela placa

PET: Polietileno tereftalato

$q$ : Tensão desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )

---



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Problema e relevância da pesquisa

A procura de soluções técnicas que tornem as obras de engenharia mais econômicas e que minimizem a agressão ao meio ambiente são metas das pesquisas em desenvolvimento na área de Estruturas/Geotecnia do PPGE/UFGRS. Na natureza é comum a ocorrência de espessos perfis de solos que apresentam deficiências do ponto de vista de resistência e estabilidade volumétrica. A solução utilizada para suportar as cargas das construções nestes locais, geralmente, são fundações profundas. Estas atravessam o material menos resistente e são assentes em camadas subjacentes de maior capacidade de suporte. No entanto, este tipo de solução técnica pode inviabilizar, por exemplo, as obras de conjuntos habitacionais de baixo custo, nos quais o investimento na execução das fundações pode vir a ser uma grande parcela do valor total do empreendimento. Uma técnica alternativa que vem sendo estudada é a de substituir as fundações profundas por fundações superficiais, assentes em camadas tratadas.

Nos casos em que o engenheiro geotécnico se depara com materiais de baixa qualidade, uma das alternativas disponíveis é fazer uso de técnicas de estabilização de solos. As técnicas de estabilização alteram significativamente as propriedades físicas e mecânicas dos solos, transformando-os em novos materiais geotécnicos. O tipo de estabilização escolhido em qualquer projeto depende da natureza da estrutura e das propriedades geotécnicas e físico-químicas do solo envolvido.

Nas áreas de Construção Civil e Geotecnia, o desenvolvimento de materiais alternativos é de fundamental importância, pela capacidade que estas áreas têm de utilizá-los em grandes quantidades. No caso de países em desenvolvimento como o Brasil, o interesse no desenvolvimento da tecnologia de novos materiais deve-se à necessidade de ampliação das malhas rodoviárias, ao grande déficit habitacional e à redução de custo de pavimentos urbanos.

As propriedades de um solo podem ser alteradas através de diferentes processos, entre os quais pode-se citar a compactação mecânica, a estabilização por processos físico-químicos e o reforço de solos com a inclusão de elementos resistentes, como geotêxteis, fibras, grelhas, tiras.

A inclusão de fibras aos solos tem sido meta de estudo de diversos pesquisadores nos últimos anos para as mais diversas aplicações, desde estruturas de contenção até a estabilização de solos sob fundações e pavimentos (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Freitag, 1986; Maher & Gray, 1990; Fatani et al., 1991; Maher & Ho, 1993; Santoni et al., 2001; Tingle et al., 2002; Zornberg, 2002; Michalowski & Cermak, 2003; Shenbaga et al., 2003; Yetimoglu & Salbas, 2003; Ghazavi & Sakhi, 2005). A nível nacional tem-se também muita experiência na área de reforço de solos (Silva et al., 1995, 2006; Lima et al., 1996; Bueno et al., 1996; Teodoro & Bueno, 1998; Teodoro, 1999; Leocádio et al., 2005, 2006; Bento & Carvalho, 2006), podendo-se destacar os estudos desenvolvidos pelo PPGEC/UFRGS (Ulbrich, 1997; Consoli et al., 1997-b, 1998-a, 1999, 2002, 2003-a, 2003-b, 2003-c, 2004, 2005-a, 2005-b; Montardo, 1999; Feuerharmel, 2000; Specht, 2000; Casagrande, 2001, 2005; Montardo et al., 2002; Homem, 2002; Heineck, 2002; Casagrande & Consoli, 2002, 2004, 2006; Casagrande et al., 2002, 2004; Specht et al., 2002; Heineck & Consoli, 2002, 2004; Donato, 2003; Donato et al., 2002, 2004; Vendruscolo, 2003; Heineck et al., 2003-a, 2003-b, 2005 e Santos, 2004).

Alguns estudos realizados a partir de provas de carga em solos reforçados com fibras (Consoli et al., 2003-b; Vendruscolo, 2003 e Casagrande, 2001, 2005) sugerem que as fibras distribuem as tensões em uma área maior, inibindo a propagação de fissuras e conseqüentemente aumentando a capacidade de suporte. Esta hipótese pode ser comprovada através da medida direta de tensões com o uso de células de tensão total, podendo-se compreender melhor a distribuição de tensões em espessas camadas de solo estabilizado com fibras.

A distribuição de pressões no interior de camadas de solo e no contato entre diferentes estruturas vem sendo amplamente estudada com a utilização de células de tensão total. Estas, por serem constituídas de material com rigidez diferente do meio onde são inseridas, causam uma redistribuição de pressões no seu entorno, justificando assim, intensos estudos e análises detalhadas, principalmente quanto à calibração destes sensores.

Células de pressão, também conhecidas como células de tensão total, são utilizadas em diversas obras da engenharia, como aterros, galerias de drenagens, túneis, minas, estacas, fundações superficiais, muros de arrimo, silos e são motivos de diversos temas de pesquisas (Minkov *et al.*, 1981; Weiler e Kulhawy, 1982; Hanna, 1985; Dunicliff, 1988; Clayton e Bica, 1993; Jarrett *et al.*, 1995; Bica & Clayton, 1998; Garnier *et al.*, 1999; Cai *et al.*, 2000; Dewoolkar *et al.*, 2000; Take e Valsangkar, 2001; Kaiser *et al.*, 2001; Clayton *et al.*, 2002; Mashimo e Ishimura, 2003), destacando os recentes trabalhos brasileiros em silos de armazenagem de grãos (Freitas & Callil Jr., 2002 e Gomes & Júnior, 2002) e em pistas experimentais (Gonçalves, 2003 e Gonçalves *et al.*, 2003).

Não apenas na área de engenharia as células de pressão são empregadas para a determinação da tensão atuante em um determinado local, mas também na agricultura para determinar a compactação dos solos por máquinas agrícolas. Segundo Bailey *et al.* (1988), uma compactação excessiva pode causar efeitos indesejáveis como a diminuição da infiltração de água, restrição quanto ao crescimento da raiz e aumento do escoamento superficial, levando à redução no rendimento da colheita e ao aumento na erosão do solo. Vários estudos foram desenvolvidos onde células de pressão foram usadas para medir a tensão abaixo de rodas e pneus (Bailey *et al.*, 1988; Bailey e Burt, 1988; Block *et al.*, 1994; Way *et al.*, 1995; Pearman *et al.*, 1996; Kishimoto *et al.*, 1998) e também estudos numéricos com análises paramétricas (Kirby, 1994, 1999-a e 1999-b).

Neste contexto, este trabalho busca contribuir para a compreensão da distribuição de tensões no interior de espessas camadas de solo e solo reforçado com fibras, bem como no contato entre a estrutura, através de medida direta de tensão e também a compreensão do comportamento mecânico deste solo reforçado.

## **1.2 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é estudar a distribuição de tensões numa placa de aço e abaixo desta, em ensaios de prova de carga em placa circular, em solo arenoso e em solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno aleatoriamente distribuídas, através de medidas diretas de tensão, com uso de células de tensão total.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Para atingir os objetivos da pesquisa foram estabelecidos alguns objetivos específicos aqui relatados:

- Identificar e avaliar os fatores que afetam as medições de tensões em células de tensão total através de calibrações em laboratório, no mesmo material em que as células serão inseridas nos ensaios de placa;
- Avaliar alguns fatores que afetam as medições de tensões em células de tensão total, através do uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), com o programa comercial ANSYS 5.4;
- Medir tensões totais verticais em solo arenoso a partir de ensaios de placa instrumentados, realizados em laboratório, avaliando os efeitos do teor de fibras nos compósitos reforçados.

### 1.3 Contribuições ao estado da arte

Dentre os vários estudos realizados, onde se confirmam algumas hipóteses e outras não, este trabalho contribui ao estado da arte no conhecimento atual de solos reforçados e medidas de tensões, com estudos originais nos seguintes tópicos:

- Ensaios de placa em fibras de polipropileno com elevado comprimento (50 mm) e alta rugosidade. Trabalhos nesta área vêm sendo realizados, por diversos autores, com fibras lisas e comprimento máximo usual de 24 mm;
- Estudo conjunto de calibração de células de tensão total e utilização destas células em ensaios de grande escala, como as provas de carga. Os trabalhos já realizados apresentam apenas estudo de utilização destas células ou calibração destas, sem que haja uma comprovação da eficácia da calibração mediante ensaios com utilização destes sensores;
- Uso de células de tensão total em solo reforçado com fibras aleatoriamente distribuídas. Utilização tanto em ensaios de placa quanto em calibrações.

## 1.4 Desenvolvimento da pesquisa

A presente pesquisa foi executada em cinco etapas, a seguir descritas: (1) identificação do problema e objetivos da pesquisa; (2) revisão da literatura existente sobre o assunto; (3) planejamento e execução do programa experimental; (4) análise e discussão dos resultados e (5) redação final.

A primeira etapa consistiu na discussão a respeito dos benefícios relacionados à estabilização de solos com fibras e também sobre a utilização de células de tensão total para medida direta de tensão. A partir daí delineou-se um projeto de pesquisa, cujos objetivos foram apresentados no item 1.2.

A segunda etapa consistiu na revisão da literatura existente a respeito do tema deste trabalho, priorizando trabalhos científicos que pudessem fornecer subsídios para o desenvolvimento de um programa experimental adequado à pesquisa proposta. Tal revisão é apresentada no Capítulo 2.

Na terceira etapa, que consiste no planejamento e execução do programa experimental, foram determinados quais fatores seriam relevantes à verificação da eficácia, ou não, da adição de fibras ao solo e quais os fatores relevantes na obtenção de constantes de calibração corretos das células de pressão. No Capítulo 3 é apresentada a descrição do programa experimental, além da descrição dos materiais utilizados na pesquisa, dos detalhes a respeito da preparação dos corpos de prova e dos métodos utilizados para a realização dos ensaios.

No Capítulo 4 são apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos no programa experimental.

As principais conclusões que representam a síntese de todo o conhecimento adquirido durante a realização deste trabalho são apresentadas no Capítulo 5.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 Considerações iniciais**

No decorrer deste Capítulo é apresentada uma sucinta revisão da literatura sobre medidas de tensão total em solos com uso de células de tensão total. Algumas definições, tipos de células, métodos de calibração e alguns trabalhos experimentais são relatados. Na seqüência é apresentada uma revisão sobre as definições e propriedades gerais relacionadas com a melhoria e o reforço de solos. Aspectos técnicos sobre os mecanismos de interação entre solo e reforço e as alterações do comportamento dos solos causadas pela adição de fibras também são abordados. Finalmente, são apresentados estudos experimentais e generalidades sobre ensaios de prova de carga em placa.

#### **2.2 Medidas de tensões totais em solos**

Medidas de tensões totais em solos sempre caem em duas categorias básicas: medidas dentro da massa de solo e medidas na face do elemento estrutural (Dunnicliff, 1988; USACE, 1995). As células de tensão para medidas internas são instaladas dentro de aterros, por exemplo, para determinar a distribuição, magnitude e direção da tensão total. As células para medidas no contato são utilizadas para medidas de tensão total contra muros de arrimo, galerias de drenagem, estacas e sob fundações superficiais (Dunnicliff, 1988).

Na prática não se distinguem tais células, internas ou de contato, ambas podem ser utilizadas para o mesmo fim. Dunnicliff (1988) cita alguns casos que são exceção: a célula hidráulica com a face ativa fina, pois é difícil de instalar este tipo de célula completamente nivelada com a superfície da estrutura e a célula diafragma com uma única face ativa.

### 2.2.1 Tipos de Células

Há dois tipos básicos de células de tensão total, tanto internas quanto de contato: células de diafragma e células hidráulicas. Na Figura 2.1 são apresentados os dois tipos de células.

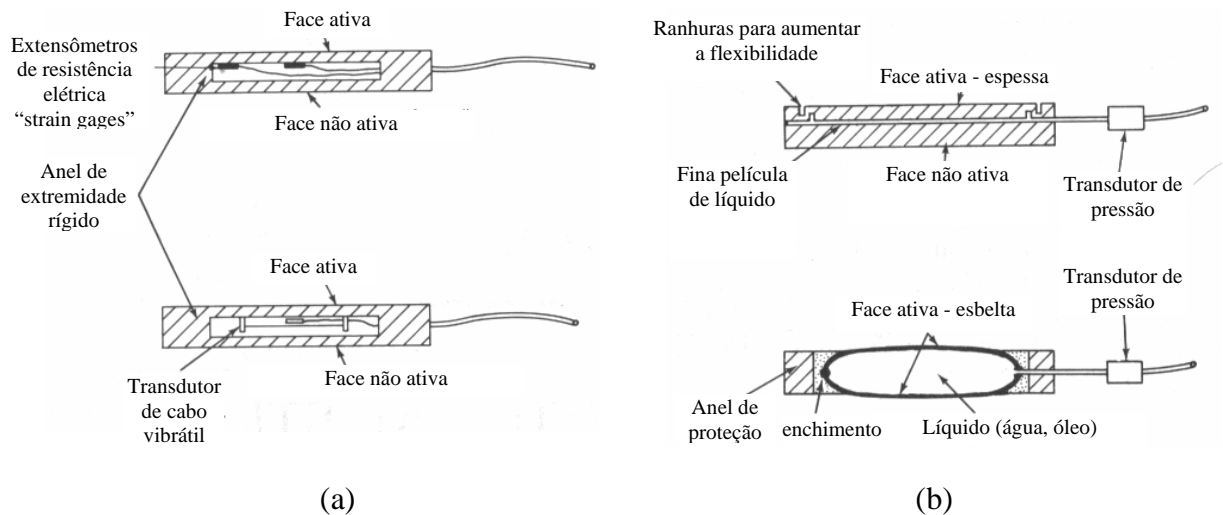


Figura 2.1: tipos básicos de células de tensão total: (a) célula diafragma; (b) célula hidráulica (Dunnicliff, 1988)

No tipo diafragma, uma membrana circular rígida, apoiada em um anel de borda rígido, é deformada pela pressão externa do solo. Esta deformação é registrada por um extensômetro de resistência elétrica ("*strain gage*"), colado diretamente na face interior da célula ou por um transdutor de cabo vibrátil. A célula diafragma pode ter uma ou duas superfícies ativas independentes, e no caso onde haja duas medidas independentes é possível avaliar a qualidade da sua instalação (Dunnicliff, 1988).

A célula do tipo hidráulica consiste de duas placas de aço, circulares ou retangulares, unidas por solda na sua periferia e preenchidas com fluido. Um tubo de aço de alta pressão conecta a cavidade entre as placas a um transdutor de pressão colocado junto à célula. A tensão total atuante no exterior da célula é equilibrada por uma pressão induzida no fluido interno. É essencial que este tipo de célula seja preenchida com fluidos sem ar dissolvido e que não fiquem bolhas de ar dentro da cavidade durante o preenchimento (Dunnicliff, 1988).

### 2.2.2 Calibração em Laboratório

Cada célula deve ser calibrada sob pressão de fluido para garantir que está funcionando corretamente e não está vazando, e muitas células de pressão comercializadas fornecem um gráfico de calibração, usando água ou ar como fluido.

Selig (1980), citado por Dunicliff (1988), descreveu uma câmara de calibração simples e barata para uso em laboratório. A câmara é construída com camadas de metal, madeira compensada e borracha, como pode ser visto na Figura 2.2.

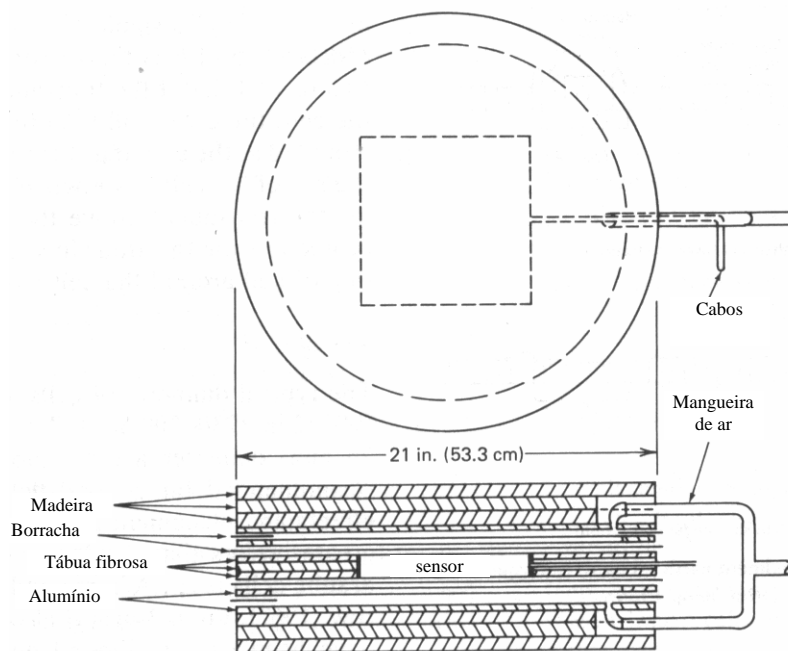


Figura 2.2: câmara de calibração por fluidos para células de pressão do tipo interna (Dunicliff, 1988)

A menos que a célula seja utilizada em argila mole, a calibração por pressão de fluido é insuficiente. Para uma maior precisão do sistema de medida, cada célula deve ser calibrada em uma grande câmara de calibração, usando o mesmo solo em que ela será utilizada. A câmara deve ser pelo menos três vezes (preferencialmente cinco vezes) maior do que o diâmetro da célula (Dunicliff, 1988). A Figura 2.3 apresenta uma câmara usada por Hadala (1967), citado por Dunicliff (1988).



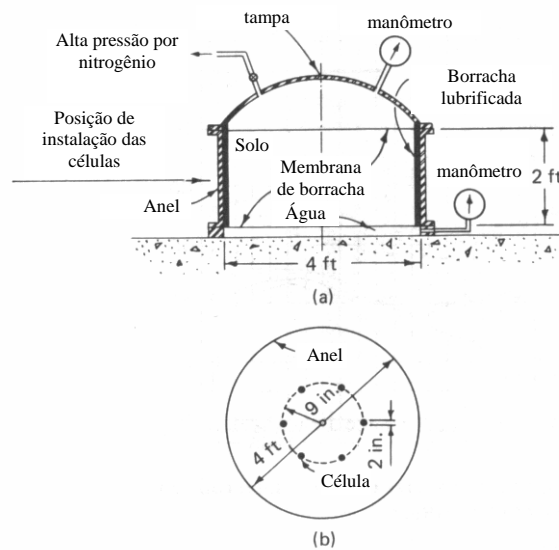


Figura 2.3: (a) câmara de calibração para células de pressão do tipo interna; (b) série de células no plano central (Dunnicliff, 1988)

Clayton e Bica (1993) utilizaram uma câmara de aço para calibrar em solo células de contato. A câmara possuía uma placa na qual a célula era inserida e ficava nivelada com a superfície desta placa. O corpo-de-prova era circular com 25,2 cm de diâmetro e 4,2 cm de altura. O diâmetro da célula era de 2,4 cm. A aplicação de carga era realizada através de água que transmitia a pressão a uma membrana de borracha. Calibrações em câmara triaxial também foram realizadas com diferentes trajetórias de tensão e os autores concluíram que os valores das constantes de calibração são incorretos quando outras trajetórias de tensão, que não a trajetória  $K_0$ , são utilizadas para calibrar tais sensores.

A rigidez da célula tem um papel importante na interpretação das medidas de tensão normal no contato entre o solo e a estrutura. A maneira comum de calibrar estas células é a aplicação de pressão na sua face ativa. Estes resultados são frequentemente usados para interpretar medidas de tensão normal no contato entre o solo e a estrutura. No entanto, este procedimento pode causar erros na estimativa da tensão normal. O deslocamento interno da face ativa da célula altera a distribuição de tensões no solo, em especial nas suas proximidades. O valor da tensão normal que a célula mede é então diferente do valor que o solo deveria aplicar ao elemento estrutural na ausência da célula. Quanto maior esse deslocamento interno, maior é a redistribuição de tensões nas suas proximidades, e conseqüentemente, maiores são os erros de medida (Clayton e Bica, 1993).

Para quantificar esses erros de medida, Taylor (1947) propôs a utilização de um fator de atuação da célula (CAF), que é a razão entre o valor da tensão normal medida pela célula e o valor que deveria estar sendo aplicado na sua ausência.

Clayton *et al.* (2002) realizaram ensaios de calibração em células de contato em três fases distintas. A primeira feita em ar, através de uma câmara de um metro de diâmetro. A segunda através da inserção da célula em um pequeno bloco pré-moldado e na terceira fase a calibração foi realizada em laboratório nas condições reais de trabalho.

Gonçalves (2003), para reproduzir as condições nas quais as células de pressão deveriam se encontrar em campo, utilizou uma câmara de calibração construída em aço, de forma circular, com 50 cm de diâmetro e 40 cm de profundidade, utilizando ar comprimido para a aplicação da carga.

### **2.2.3 Estudos Experimentais**

Minkov *et al.* (1981) mediram as tensões verticais abaixo de placas circulares e quadradas, em provas de carga, através de células de tensão total. As células utilizadas eram do tipo hidráulica com 7 cm de diâmetro e 1 cm de espessura. Várias células foram instaladas no interior do solo em diferentes posições ao longo de linhas verticais e horizontais. O objetivo era estudar a distribuição das tensões abaixo destas áreas carregadas em solo natural e também em solo estabilizado com cimento em sistema de dupla camada sendo a superior cimentada. Os autores concluíram que foi possível averiguar através da medida direta das tensões que houve uma maior redistribuição das tensões devido à estabilização da camada superior de solo.

Muitos estudos já foram realizados sobre os fatores que afetam as medições das tensões totais em solos por meio de células de tensão total. A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos principais fatores e dos métodos de correção apresentados por Weiler & Kulhawy (1982).

Tabela 2.1: principais fatores que afetam as medições das tensões totais em solos (adaptada de Weiler & Kulhawy, 1982).

Fator	Descrição do erro	Método de correção
Razão entre a espessura e o diâmetro da célula (fator de forma)	A espessura da célula altera o campo de tensões a sua volta	Usar células relativamente finas ( $E/D < 1/10$ )
Razão entre rigidez solo-célula	A variação da rigidez do solo pode causar uma calibração não linear	Projetar células para alta rigidez e usar fatores de correção
Tamanho da célula	Células muito pequenas apresentam problemas de escala. Células muito grandes, problemas na instalação	Usar células de tamanho intermediário (230 a 300 mm de diâmetro)
Deflexão do diafragma	Deflexões excessivas alteram a distribuição de tensões em torno da célula	Usar células para baixa deflexão
Comportamento tensão-deformação do solo	As medidas de tensão da célula são influenciadas pelas condições de confinamento	Calibrar a célula sob condições próximas das de campo
Efeitos de colocação	A colocação da célula e o posterior re-aterro alteram o campo de tensões	Usar técnicas de colocação que minimizem a alteração das propriedades do solo
Excentricidades, cargas não uniformes, cargas pontuais	Causados por grãos de tamanho muito grande em relação à célula utilizada	Aumentar o diâmetro da face ativa da célula
Proximidade com estruturas ou outros instrumentos	Há uma interação entre o campo de tensão e os instrumentos, causando erros	Usar espaçamento adequado
Medidas dinâmicas de tensões	Tempo de resposta, frequência natural e inércia da célula causam erros	Usar calibrações dinâmicas
Orientação da célula	Mudança na orientação durante o re-aterro causa registro de pressão em local diferente do projetado	Usar métodos de colocação que minimizem mudanças na orientação
Concentração de tensão normal nas bordas da célula	Causa alteração no registro, para mais ou para menos, dependendo da rigidez relativa entre a célula e o solo	Para células diafragma, usar uma relação $d/D \approx 0,6$

Tabela 2.1: principais fatores que afetam as medições das tensões totais em solos (adaptada de Weiler & Kulhawy, 1982).

Tensão de compactação	Tensões muito altas durante a compactação provocam danos permanentes na célula	Checar a resistência de projeto da célula e do transdutor de pressão
Corrosão e umidade	Pode causar falha por ataque do material da célula	Usar materiais apropriados e com alta qualidade de impermeabilização
Temperatura	Mudança de temperatura causa mudança na leitura	Se a variação de temperatura é muito alta, meça-a e aplique fatores de correção determinados durante a calibração

$E$  = espessura da célula;  $D$  = diâmetro da célula;  $d$  = diâmetro do diafragma.

Na agricultura, muitos estudos têm sido desenvolvidos onde células de tensão total são usadas para medir a tensão abaixo de rodas e pneus e também no interior do solo para determinar a tensão atuante neste quando da compactação por máquinas durante o cultivo. Transdutores de estado de tensão são muito utilizados para este fim. Estes transdutores consistem em seis pequenas células de pressão, disponíveis comercialmente, do tipo diafragma. Cada célula de pressão é montada, nivelada com uma determinada superfície e embutida em um núcleo sólido.

Bailey *et al.* (1988) utilizaram dois transdutores de estado de tensão para medir a tensão no solo abaixo de um pneu em movimento, em laboratório. Os resultados mostraram que as tensões de pico ocorreram próximo ao local onde o pneu encontrou-se com o transdutor. O tamanho dos transdutores teve efeito significativo nas tensões calculadas, onde o maior apresentou leituras de tensões maiores do que o transdutor menor. Os autores atribuem isto às diferentes quantidades de solo que será deformado (arqueado) atrás da superfície do transdutor. Selig (1964) dizia que quanto menor o arqueamento de solo na superfície de transdutores maiores, maiores seriam as leituras de tensão.

Clayton & Bica (1993) apresentaram os resultados de estudos experimentais e numéricos (MEF) no projeto de células de contato. Foram utilizados diferentes materiais e diferentes métodos de calibração para estes sensores. Os autores mostraram que não bastava apenas satisfazer a condição de que a rigidez do diafragma (razão entre o diâmetro da célula e o deslocamento central do seu diafragma) fosse maior do que 2000 para garantir que a pressão

lida não fosse menor que a pressão aplicada e que a forma mais apropriada para projetar células de contato era avaliar a relação rigidez do diafragma e rigidez do solo. Observaram também que materiais com alto módulo, como areias densas, apresentavam valores menores de CAF nas calibrações realizadas.

Harris e Bakker (1994) desenvolveram um transdutor de tensão para medir tensão normal em seis diferentes direções, e conseqüentemente, obter o estado de tensão total em um determinado solo. Procedimentos de calibração foram desenvolvidos para assegurar uma leitura correta da tensão atingida. Uma amostra de solo contendo o transdutor no seu centro foi comprimida isotropicamente, garantindo assim que as tensões em qualquer ponto dentro da massa de solo fossem iguais. Todos os sensores subestimaram as tensões aplicadas para teores de umidade do solo entre 31 e 41%. Entretanto, quando o teor de umidade foi aumentado para 55%, os sensores registraram tensões iguais às aquelas geradas através de calibração em ar, comprovando assim, segundo os autores, a existência de um teor de umidade crítico, onde as tensões lidas são iguais às tensões aplicadas. Com isso os autores concluem que a presença do transdutor no solo não afeta a distribuição de tensões neste, uma vez que este teor de umidade seja alcançado.

Análises de calibração de sensores em função da umidade do solo são incomuns e sujeitas a algumas críticas. O aumento de teor de umidade em um solo pode levá-lo a um estado próximo a saturação e conseqüentemente um carregamento isotrópico pode ser comparado a um carregamento hidrostático, onde as tensões geradas são iguais em todos os pontos do solo e iguais a pressão aplicada. Solicitando-se uma célula de tensão total com carregamento hidrostático, sua constante de calibração deverá ser igual à calibração feita em fluido.

Kishimoto *et al.* (1998) mediram tensões de contato entre um solo fofo e um pneu de trator. Foram investigadas em três posições na face do pneu. Foram avaliadas diferentes cargas de operação e diferentes pressões de inflação do pneu. Três transdutores foram embutidos na face externa de uma das orelhas do pneu, no centro, na extremidade e outro entre os dois primeiros. O efeito da pressão de inflação do pneu é mais significativo na distribuição de tensões do que a carga de operação. O aumento de carga corresponde apenas a um aumento no nível de tensões. Na menor pressão de inflação, a máxima tensão diminui e a distribuição de pressões torna-se mais uniforme do que para altas pressões de inflação. A máxima tensão ocorre próximo do centro do pneu, com alta pressão de inflação.

Kirby (1999) analisou as tensões no entorno de transdutores posicionados abaixo de áreas de carregamento circular através do Método dos Elementos Finitos. Foram consideradas na análise áreas amolgadas em torno dos transdutores, gradiente de tensões, profundidade, tamanho da área de carregamento e presença de camadas de solo adjacentes muito duros. Foram considerados dois tipos de transdutores, os transdutores verticais, que medem tensão vertical e os transdutores de estado de tensão, que medem tensão tridimensional. As tensões estimadas na face dos transdutores foram altamente influenciadas pela rigidez do solo da área amolgada. Com relação às tensões reais teóricas (àquelas estimadas sem a presença dos transdutores no meio), as tensões verticais foram superestimadas quando a rigidez da área amolgada era maior que 10% da rigidez do solo e subestimadas quando a área amolgada tinha menor rigidez. Quando não havia área amolgada, a tensão na face vertical era superestimada em 16% para os transdutores verticais e 40% para os transdutores de estado de tensão. Quanto à influência da profundidade de inserção dos transdutores, foi concluído, conforme o esperado, que as tensões diminuem com o aumento da profundidade.

Freitas & Callil Jr. (2002) utilizaram células de pressão para obtenção das pressões verticais e horizontais em um silo piloto com relações  $h/d=1,25$  e  $h/d=1,49$ . Utilizaram como material de carregamento uma areia. Observaram que a relação entre pressões,  $K$ , não era constante ao longo da altura e diminuía com a profundidade.

Para o estudo das ações impostas em estruturas de armazenamento, Gomes & Júnior (2002) utilizaram células de tensão total para medir a tensão vertical e horizontal em silos de concreto. Os autores concluíram que há grande variação dos resultados entre os modelos teóricos propostos e as medidas de tensão obtidas pelas células de tensão total.

A falta de calibração de células de tensão está presente em grande parte dos trabalhos realizados com esses instrumentos. Erros na medida de tensão, devido a esta ausência de estudo, podem ocorrer quando se utilizam células mal projetadas ou pouco desenvolvidas. Conclusões tiradas a partir de medidas de tensão, onde não se calibrou adequadamente os sensores utilizados, deveriam ser tratadas com cautela.

Clayton *et al.* (2002) avaliaram os fatores que afetam o desempenho de células de tensão em revestimentos de túneis em concreto projetado. Apresentaram dados de monitoramento de campo, modelagem numérica e ensaios de calibração. Modelagem numérica foi realizada para investigar a influência do tipo de fluido da célula no fator de atuação da célula (CAF), e na

sensibilidade à temperatura da célula instalada. Segundo os autores, as células quando bem projetadas devem apresentar valores de CAF próximos à unidade. Observaram que as mudanças de temperatura, imediatamente após a instalação da célula, são muito grandes e juntamente com a alta taxa de contração, que ocorre durante o início da cura do concreto projetado, impedem a medida de tensões durante esse período. Mudanças sazonais de temperatura causam mudanças na leitura da célula. Deformações devido à contração do concreto podem também aumentar significativamente as medidas de tensão.

Mashimo & Ishimura (2003) realizaram medidas de campo em duas proteções de túnel em rocha com o intuito de avaliar a carga atuante no seu revestimento. Para tanto foram utilizadas células de pressão de diferentes dimensões, uma circular com 16 cm de diâmetro e outra retangular de 65 x 32 cm<sup>2</sup>. Os autores salientam a importância de se avaliar com precisão a carga atuante em proteções de túneis visando projetos mais racionais e econômicos.

Um recente uso de células de tensão total em duas seções de pavimentos flexíveis carregados por um simulador linear de tráfego é descrito por Gonçalves *et al.* (2003). Todas as células utilizadas neste estudo foram submetidas a intensos ensaios de calibração em campo e em laboratório. Uma câmara de aço de 50 cm de diâmetro e 40 cm de profundidade foi utilizada em laboratório para realizar ensaios de calibração do tipo  $K_0$  em argila compacta e areia fofa. A argila apresentou um fator de atuação da célula CAF de 0,38 e a areia fofa de 1,1. Os autores justificam este baixo valor de CAF para a argila devido ao seu alto módulo resiliente (cerca de 230 MPa). Os ensaios de campo foram realizados nas pistas experimentais carregadas com um dos pneus do simulador de tráfego que foi posicionado próximo às células. Os resultados mostram que há uma boa concordância quando a tensão vertical, estimada dentro da camada de argila, é comparada com os dados da calibração interpretados de acordo com o valor de CAF = 0,38.

## **2.3 Solos reforçados**

### **2.3.1 Estabilização e Reforço de Solos**

A técnica de reforçar solos com fibras encontra-se inserida na tecnologia dos materiais compósitos, a qual vem despertando um interesse cada vez maior no meio científico. Prova

disso se encontra em alguns dos livros mais recentes de engenharia dos materiais, onde os materiais compósitos fibrosos são abordados em capítulos específicos (Taylor, 1994; Hannant, 1994; Hollaway, 1994; Illston, 1994; Johnston, 1994 e Budinski, 1996).

Entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Procura-se o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes.

Segundo Van Impe (1989), os processos de estabilização podem ser classificados como temporários, permanentes e permanentes com adição de novos materiais. A estabilização temporária consiste naquela limitada a um curto espaço de tempo, geralmente o tempo de execução de uma certa fase da obra, como por exemplo, o congelamento de solos e o rebaixamento do nível freático por drenos ou eletro-osmose. A estabilização permanente sem adição consiste em processos de compactação e tratamento térmico, como a compactação superficial ou profunda. A estabilização permanente de solos com adição de novos materiais normalmente combina a compactação com adição de um novo material, como estabilização com cal e cimento, injeção de materiais estabilizantes, colunas de brita ou areia, pré-carregamento e uso de drenos verticais, reforços com tiras metálicas ou geossintéticos. Este processo de reforço de solo consiste em se introduzir no maciço elementos que possuam resistência à tração elevada (fitas metálicas, mantas, geotêxteis, geogrelhas, malhas de aço, fibras, etc.).

A utilização de geossintéticos no Brasil data do final dos anos 70 e início dos anos 80, com obras não só envolvendo aplicações em drenagem e filtração, mas também no reforço de solos. Apesar do substancial crescimento do interesse em geossintéticos no país nos últimos anos, este ainda pode ser considerado tímido. Para Palmeira (1992) o desenvolvimento da pesquisa sobre geossintéticos tem contribuído para a utilização destes materiais na geotecnia.

Palmeira (1995) aborda os tipos de geossintéticos disponíveis, sendo estes classificados em geotêxteis, geogrelhas, geomalhas, geomembranas, tiras, fibras, e geocompostos. Os geotêxteis são os mais tradicionalmente conhecidos, sendo compostos de fibras têxteis ordenadas ou dispostas aleatoriamente, e utilizados como elementos de reforço, separação, drenagem, filtração e proteção. As geogrelhas são grelhas plásticas utilizadas como elementos



de reforço. As geomalhas são estruturas planas com elevado volume de vazios para utilização como meio drenante. As geomembranas constituem elementos de baixíssima permeabilidade para utilização como barreiras impermeáveis em obras de engenharia civil. Geocomposto foi um termo criado para denominar o material originado da combinação de dois ou mais geossintéticos.

O fibrossolo consiste na mistura de solo e fibras sintéticas para utilização em pavimentos (Specht, 2000; Homem, 2002), aterros sobre solos moles, estabilidade de taludes (Zornberg, 2002) e em fundações superficiais (Casagrande *et al.*, 2002).

### **2.3.2 Tipos de Fibras Empregadas como Reforço**

Existe uma ampla variedade de fibras utilizadas em compósitos fibrosos. As características de comportamento de cada uma delas, as propriedades físicas, químicas e mecânicas, que por sua vez irão afetar o comportamento do material compósito, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação.

Portanto, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante.

Várias pesquisas têm demonstrado que o uso de materiais de reforço com maior capacidade de alongação tem conduzido a melhores resultados do que quando se utilizam fibras com módulo muito elevado, como fibras de aço (Taylor, 1994). Algumas características relevantes devem ser consideradas na escolha da fibra para reforço de materiais: a fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável, não sofrer ataque de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana, além de apresentar características físicas e mecânicas adequadas.

As fibras podem ser classificadas em quatro grandes classes: naturais, poliméricas, minerais e metálicas, abordadas individualmente a seguir.

### 2.3.2.1 *Fibras naturais*

Os primeiros tipos de fibras a serem empregados na história da humanidade foram as fibras naturais. As fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar (Hannant, 1994). Algumas destas fibras podem atingir grandes resistências, como por exemplo, as fibras do bambu que atingem normalmente resistências acima de 100 MPa, com módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa.

A avaliação da durabilidade dos compostos formados com fibras vegetais é o principal problema a ser investigado, pois podem ser degradadas pela adição de fungos e microorganismos. Segundo Teodoro (1999), a exposição das fibras vegetais em ambientes alcalinos causa uma rápida degradação das fibras. Como por exemplo, o emprego das fibras vegetais como reforço de materiais cimentados com cimento Portland comum.

### 2.3.2.2 *Fibras poliméricas*

Para ser empregada como reforço de solos, a família das fibras poliméricas talvez seja a mais promissora. Os polímeros, de acordo com sua estrutura química, apresentam diferentes denominações e comportamentos, dando origem a diferentes tipos de fibras.

Atualmente vários formatos de fibras poliméricas têm sido empregados como reforço de solos. Têm-se as chamadas fibriladas, que são as fibras que apresentam um formato trançado quando esticadas transversalmente, projetadas para que se “abram” durante o processo de mistura com o solo.

Vários autores têm estudado tais fibras, a citar Al Wahab & Al-Qurna (1995), Al Wahab & El-Kedrah (1995) e Nataraj *et al.* (1996). Outro formato também utilizado por alguns autores (McGown *et al.*, 1978; Morel & Gourc, 1997) e que se diferencia um pouco do formato de fibra, são as malhas, que proporcionam um maior intertravamento com as partículas do solo. Outro tipo, desenvolvido na França, chamado de Texsol, consiste em um filamento contínuo que é distribuído aleatoriamente dentro da massa de solo.

As fibras poliméricas podem ser divididas em fibras de polipropileno, de polietileno, de poliéster e fibras de poliamida, descritas a seguir:

- Fibras de Polipropileno: as fibras de polipropileno são constituídas de um tipo de material que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura, denominado termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma a que possam deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994). Essas fibras possuem uma grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição; seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa (menor que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (Taylor, 1994). Tais características conferem aos materiais a que estas fibras são incorporadas uma substancial resistência ao impacto;
- Fibras de Polietileno: as fibras de polietileno têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentada e altamente resistentes aos álcalis. Sua durabilidade é alta, mas apresentam maiores deformações por fluência, o que significa que, se elas forem utilizadas para suportar tensões altas permanentemente em um compósito fissurado, consideráveis alongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo (Hannant, 1994). Procurando minimizar o problema da baixa aderência e módulo, tem sido desenvolvido o polietileno de alta densidade;
- Fibras de Poliéster: o poliéster apresenta alta densidade, rigidez e resistência, conferindo tais características às fibras feitas deste material. Essas fibras possuem um aspecto bastante similar às de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações (Taylor, 1994). O poliéster atualmente mais conhecido é o polietileno tereftalato, cuja sigla é PET. É o material constituinte das garrafas plásticas de refrigerantes, águas minerais e óleos de cozinha, entre outros;
- Fibras de Poliamida (Kevlar): polímeros contendo longas cadeias de moléculas geralmente possuem baixa resistência e rigidez, uma vez que suas moléculas são espiraladas e dobradas. Entretanto, se estas moléculas forem esticadas e reforçadas durante o processo de manufatura, altas resistências e módulos de elasticidade podem ser alcançados, como é o caso do Kevlar (Taylor, 1994). A fibra de poliamida aromática, comercialmente conhecida por Kevlar, é a fibra orgânica de maior sucesso. Existem dois tipos de Kevlar, o Kevlar 29, cuja resistência mecânica é da ordem de 3000 MPa e o módulo de elasticidade médio é de aproximadamente 64 GPa, e o Kevlar 49, cuja resistência é a mesma do anterior, mas seu módulo é de 300 GPa (Hollaway, 1994).

### 2.3.2.3 Fibras minerais

Dentre as fibras minerais, podem-se citar as de carbono, vidro e amianto, apresentadas a seguir:

- Fibras de Carbono: baseada na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza destas, as fibras de carbono apresentam alta resistência à tração e módulo de elasticidade em torno de 420 GPa. Características que tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras (Taylor, 1994).
- Fibras de Vidro: as fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, isto é, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. O diâmetro dos filamentos individuais é geralmente da ordem de 10  $\mu\text{m}$  (Taylor, 1994). Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo E, que é susceptível ao ataque dos álcalis.
- Fibras de Amianto: as fibras de amianto apresentam resistência à tração em torno de 1000 MPa e módulo de elasticidade em torno de 160 GPa, e apresentam uma ótima aderência com uma matriz composta por cimento. Seu diâmetro é muito pequeno, da ordem de 1  $\mu\text{m}$  (Taylor, 1994). Esta fibra, quando cortada, libera partículas muito pequenas, em função do seu reduzido diâmetro, que danificam os alvéolos pulmonares se aspiradas pelo homem. Em função disso, sua utilização na construção civil é proibida em muitos países.

### 2.3.2.4 Fibras metálicas

As fibras de aço conduziram a um número considerável de pesquisas como método de melhoria das propriedades mecânicas de materiais de construção. As fibras de aço utilizadas na construção civil apresentam fator de forma na faixa de 30 a 50, comprimento variando de 01 a 7,62 cm e diâmetro entre 0,13 e 0,9 mm. A ruptura do compósito é normalmente associada ao arrancamento da fibra e não à sua ruptura.

A resistência à tração da fibra é da ordem de 1100 MPa e o módulo de elasticidade é de 200 GPa. Este tipo de fibra tem uma grande variedade de formatos para aumentar a resistência ao arrancamento. Dependendo do meio a que estão inseridas, podem apresentar problemas de corrosão. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel (Taylor,

1994). Seu formato pode ser bastante variável, de forma a aumentar sua aderência com a matriz (Hannant, 1994).

### 2.3.3 Estudos Experimentais

Como grande parte dos autores concentraram seus esforços em comparar o comportamento de solos reforçados com o de solos não reforçados através dos respectivos parâmetros de resistência ou deformabilidade, têm-se analisado principalmente as conseqüências em detrimento das causas. Pretende-se, então, na presente revisão, focalizar e identificar as causas, ou seja, os mecanismos que regem o comportamento do material compósito, sem desprezar as conseqüências, pois elas nos permitem identificar quando ocorrem mudanças nos mecanismos.

Os fatores que afetam o comportamento do compósito solo-fibra são muito complexos. São inúmeras as combinações de variáveis que alteram de forma significativa os mecanismos de interação. Para uma dada combinação de variáveis, o resultado obtido pode ser o desejado para uma dada aplicação do compósito, porém, pode não ser para outra. Conhecendo-se as mudanças na estrutura do material reforçado com fibras em relação ao solo sem fibras, ter-se-á base para avaliar até que ponto o comportamento mecânico dos solos reforçados pode ser explicado pelas mudanças nos parâmetros usuais empregados para solos não reforçados.

As características de resistência e deformabilidade do elemento de reforço têm uma influência fundamental no comportamento tensão x deformação do solo reforçado. McGown *et al.* (1978) propuseram a divisão de reforço de solos em inclusões extensíveis e não-extensíveis. O elemento de reforço extensível tem deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração no solo sem reforço. Sua principal função é de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós-pico, além do acréscimo de resistência mecânica. Já o elemento de reforço não-extensível tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, confere ganho de resistência mecânica, porém, rupturas catastróficas podem ocorrer se o reforço romper.

Um modelo teórico para prever o comportamento de uma areia reforçada com fibras foi proposto por Gray & Ohashi (1983). Ensaio de cisalhamento direto foram executados com areia, nos estados fofo e denso, reforçada com fibras naturais, sintéticas e metálicas. Os resultados mostraram que a inclusão da fibra aumentou a resistência ao cisalhamento de pico

e reduziu a queda pós-pico. Foi possível observar a existência de uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, as fibras são arrancadas e, acima desta, as fibras são alongadas. As fibras com módulo baixo comportaram-se como uma inclusão extensível, ou seja, não romperam durante o ensaio. O aumento do comprimento das fibras resultou num aumento da resistência, porém, esse aumento é verificado até um certo limite, a partir do qual, este efeito não é mais observado.

Freitag (1986) examinou os efeitos da inclusão de fibras na resistência à compressão simples de um solo residual de calcário compactado segundo uma larga faixa de teores de umidade. Foram usadas três fibras sintéticas diferentes: uma de nylon (descartada no início dos trabalhos por dificuldades de mistura), uma de polipropileno (com 0,20 mm de diâmetro) e outra também de polipropileno chamada Fibermesh (0,10 mm de diâmetro). As fibras mediam 20 mm de comprimento e o teor adicionado foi de 1% em volume. Os resultados indicaram que houve aumento da resistência à compressão não confinada, principalmente para teores de umidade próximos à ótima e no ramo úmido da curva de compactação. As curvas tensão x deformação mostraram que o solo reforçado rompe em uma deformação bem superior à do solo não reforçado, sendo capaz de absorver maior energia de deformação.

McGown *et al.* (1988) estudaram a influência da adição de malhas de polipropileno na resistência de um solo granular. A adição do reforço aumentou de forma considerável a resistência do solo obtida em ensaios triaxiais e ensaios de placa em escala reduzida. O intertravamento entre o solo e o reforço alterou os parâmetros de resistência e de deformabilidade, sendo mais pronunciado para teores maiores de reforço.

Gray & Maher (1989) salientam que uma massa de solo reforçada com fibras discretas distribuídas aleatoriamente utiliza processos tradicionais de mistura do solo estabilizado com cimento, cal ou outro aditivo. O mesmo pode-se dizer para o processo de compactação. Uma das principais vantagens de fibras distribuídas aleatoriamente é a manutenção da resistência isotrópica e a ausência de planos de fraqueza que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientado. Neste trabalho foi analisada a influência de diversos parâmetros das fibras e dos solos sobre o comportamento tensão-deformação das misturas. Os autores verificaram a existência de uma tensão de confinamento crítica, onde o aumento da relação  $l/d$  resulta na redução desta tensão de confinamento crítica e torna mais efetiva a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento, porém, o crescimento da resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de fibra é observado até um certo limite.

Shewbridge & Sitar (1989) avaliaram o mecanismo de desenvolvimento da zona de cisalhamento de um solo granular reforçado com vários tipos de fibras. Foram realizados ensaios em equipamento de cisalhamento direto cujas dimensões eram maiores que as convencionais. Para o solo reforçado, a zona de cisalhamento era mais larga e aumentava com a concentração, rigidez e aderência entre o solo e o reforço.

A técnica de reforço alvo de grande parte dos trabalhos mais recentes é o emprego de fibras discretas aleatoriamente distribuídas, pois ela possui duas grandes vantagens em relação aos solos reforçados com inclusões orientadas, contínuas ou não: minimiza o surgimento de qualquer tipo de anisotropia e não induz planos preferenciais de fraqueza (Maher & Gray, 1990). As características almejadas com a inclusão de fibras nem sempre dizem respeito a um aumento da capacidade de suporte do material. Vários outros aspectos, como maior capacidade de absorção de energia (maior resistência ao impacto), queda na redução de resistência pós-pico (para o caso de materiais mais frágeis), maior capacidade de absorver deformações até atingir a resistência última, entre outros, são exemplos disso.

Fatani *et al.* (1991) realizaram ensaios de cisalhamento direto para avaliar o comportamento de uma areia siltosa reforçada. Os elementos de reforço consistiam de fibras metálicas flexíveis, semi-rígidas e rígidas. A influência da orientação das fibras segundo o plano de cisalhamento foi investigada. Reforços posicionados a 90° em relação ao plano de cisalhamento e distribuídos aleatoriamente são mais efetivos no aumento da resistência.

As propriedades mecânicas e hidráulicas de um compósito caulinita/fibra foram estudadas por Maher & Ho (1994) através de ensaios de compressão não confinada, compressão diametral, flexão e condutividade hidráulica. Foram utilizadas fibras de polipropileno, vidro e celulose. Observou-se que a inclusão aleatória das fibras aumentou significativamente a resistência e a ductilidade do compósito, sendo este aumento mais pronunciado para baixos teores de umidade. Para o mesmo teor de reforço, fibras mais curtas são mais numerosas dentro da matriz e existe uma maior possibilidade de elas estarem presentes na superfície de ruptura contribuindo para o aumento da resistência. Porém, após a ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas mais facilmente, o que denota a importância de fibras mais longas quando se deseja melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia. A adição de reforços fibrosos aumentou a permeabilidade da argila estudada, sendo mais pronunciada para maiores teores de fibra.

Silva *et al.* (1995) realizaram ensaios de compactação, compressão não-confinada e ensaios de placa para verificar a influência da inclusão de fibras (laminetes plásticos de 3,6 mm de largura; 0,2 mm de espessura com 5, 10 e 20 mm de comprimento) em um solo argiloso e outro arenoso. Os autores verificaram que não há mudanças significativas nos parâmetros de compactação quando as fibras são adicionadas, nem problemas para compactar os solos estudados. A resistência à compressão não confinada do solo argiloso reforçado com inclusões foi sempre superior ao valor correspondente ao solo sem inclusões, independente do teor e do comprimento das inclusões. O solo arenoso é sensível às variações de comprimento e teor, e várias combinações destas duas variáveis podem determinar um comportamento melhor ou pior do solo reforçado em relação ao do solo sem inclusões. Ensaio de placa também acusaram aumento da capacidade de suporte dos solos quando reforçados com os laminetes plásticos.

Para tensões confinantes baixas, a inclusão de fibras afeta a parcela friccional da resistência. Para tensões maiores existe um ponto que define uma clara mudança no mecanismo de interação solo-fibra a partir da qual a parcela friccional atinge o mesmo patamar do solo sem reforço, correspondendo a alteração de comportamento somente à parcela coesiva. A tensão de confinamento correspondente à mudança no mecanismo de interação solo-fibra é então definida como a tensão de confinamento crítica, caracterizando o ponto onde a resistência ao cisalhamento, desenvolvida na interface solo-fibra, se iguala ou supera a resistência à tração da fibra. Abaixo da tensão crítica, a resistência última à tração da fibra é maior e a forma de ruptura nas zonas de cisalhamento do material compósito se dá por deslizamento entre solo e fibra.

Ranjan & Charan (1996) realizaram uma série de ensaios de compressão triaxial em solos granulares reforçados com fibras naturais e sintéticas distribuídas aleatoriamente para estudar a influência das características das fibras (teor, relação  $l/d$ , superfície de fricção) e das propriedades dos solos na resistência ao cisalhamento. Baseados nos resultados obtidos os autores constataram a existência da tensão confinante crítica e que, aumentando a relação  $l/d$ , a tensão confinante crítica reduz de valor, ou seja, as fibras são suscetíveis ao arrancamento somente em um intervalo pequeno de tensão de confinamento.

Nataraj *et al.* (1996) apresentaram os resultados de uma série de ensaios de laboratório em um solo arenoso e outro argiloso reforçados com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente. Com a adição de fibras não houve alterações significativas nos parâmetros de



compactação do solo, porém, houve um aumento da resistência ao cisalhamento das areias, sendo o aumento mais pronunciado para maiores teores de fibras. Independentemente do solo estudado, foi observado que a inclusão das fibras aumentou a resistência à compressão não confinada. Tanto o solo arenoso quanto o argiloso apresentaram valores de CBR maiores com a inclusão das fibras.

Ulbrich (1997) e Consoli *et al.* (1998-a) avaliaram o efeito da inclusão de fibras de vidro em um solo arenoso artificialmente cimentado e não cimentado através de ensaios de compressão não-confinada, diametral e triaxiais drenados. Fibras relativamente rígidas (vidro e PET) exercem efeito mais pronunciado na resistência de pico, ao passo que fibras relativamente flexíveis (polipropileno) exercem efeito mais pronunciado no modo de ruptura e no comportamento último. Considerações semelhantes também foram feitas por Consoli *et al.* (2002) quando avaliaram os efeitos da inclusão de fibras distribuídas aleatoriamente e da adição de cimento sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um compósito solo-cimento-fibra.

Teodoro & Bueno (1998) avaliaram o comportamento de dois solos reforçados com fibras curtas de polipropileno. Foram avaliados diferentes teores e comprimentos de fibras através de ensaios de compressão não-confinada e triaxiais não-drenados. Foram executados painéis de compósitos fibrosos para estudar o padrão de fissuramento deste material quando submetidos à variação térmica. Os autores verificaram que a inclusão de fibras curtas de polipropileno ao solo melhora, no geral, sua resistência ao cisalhamento e reduz a queda de resistência pós-pico. Observou-se que no solo arenoso as envoltórias tendem a ser bilineares à medida que o teor e o comprimento das fibras aumentam. O efeito da inclusão de fibras nos painéis executados com o solo argiloso foi o de reduzir a dimensão das trincas, sem, no entanto, evitar o fissuramento.

Murray *et al.* (2000) executaram ensaios de compactação e de compressão triaxial para avaliar as características de compactação e o potencial de deformação de um solo silto-arenoso reforçado com fibras de carpete recicladas e fibras de polipropileno fibriladas, distribuídas aleatoriamente. Inclusões de fibras discretas aumentaram a resistência de pico significativamente reduzindo a perda de resistência pós-pico, mudando em alguns casos, o comportamento do material, de rígido para dúctil. Os ensaios de compactação indicaram que o peso específico seco máximo diminuiu, aumentando o teor de umidade ótimo, com o aumento do teor de fibra. Os ensaios triaxiais revelaram que ambos os tipos de fibras aumentaram a

resistência na ruptura e modificaram a taxa de deformação de um solo silto-arenoso. Não foi observado um teor de fibra ideal para o material reforçado com fibras de carpete recicladas, porém, para as fibras de polipropileno, esse teor é de aproximadamente 1%, e as perdas de resistência referentes à saturação são reduzidas no solo reforçado.

Feuerharmel (2000) estudou o comportamento de uma argila caulínica, artificialmente cimentada e não-cimentada, reforçada com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo. Comparando a influência da adição dessas fibras a dois outros solos (um arenoso e outro areno-siltoso), concluiu-se que: (1) a adição de fibras de polipropileno provocou reduções no módulo de deformação inicial do solo, sendo que a intensidade das alterações depende do tipo e das características de cada solo. Para misturas não-cimentadas, os solos menos rígidos foram os mais afetados enquanto que as alterações na areia foram pequenas; (2) quanto à resistência ao cisalhamento, o comportamento resistente dos solos não-cimentados reforçados pode ser dividido em três etapas, uma inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo, uma etapa intermediária, na qual o comportamento do material compósito é comandado juntamente pela matriz e pelos elementos de reforço, e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado exclusivamente pelas fibras; (3) para os solos não-cimentados, cujas deformações se distribuem por toda a amostra, as fibras constituem uma estrutura entrelaçada que impõe uma resistência às deformações radiais na amostra, aumentando assim as deformações de compressão do solo. Este efeito depende da adesão entre o solo e as fibras, sendo que para a areia, onde esta adesão é inferior aos demais solos, não se observa alterações significativas na variação volumétrica.

Estudos experimentais realizados por Casagrande (2001) e Casagrande & Consoli (2002) em areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno mostraram um crescimento constante da resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Segundo os autores, as fibras passaram a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo da resistência a partir de 2,5% de deformação axial.

Zornberg (2002) propôs uma metodologia para analisar o equilíbrio limite de solos reforçados através de uma caracterização estrutural independente, do solo e das fibras, baseando-se em um equacionamento de estruturas discretas. Tal metodologia contrapõe a análise tradicional de solo reforçado com fibras, que usa ensaios de laboratório para a caracterização das propriedades deste, ou seja, este método tem por finalidade analisar distintamente as

características do solo (peso específico, coesão e ângulo de atrito), e das fibras (comprimento, diâmetro e peso específico), a fim de estudar as suas atribuições para a análise de distribuição de tensões. Porém uma discussão proposta por Heineck & Consoli (2004), mostra que a precisão de parâmetros através deste equacionamento somente é válida quando a ruptura é governada pelo arrancamento das fibras, não pela ruptura destas, em tensões superiores à crítica, havendo uma superestimação do intercepto coesivo, enquanto o ângulo de atrito permanece praticamente inalterado. Segundo os autores citados, a diferença entre os parâmetros obtidos experimentalmente e analiticamente é possivelmente causada por características das fibras e aspectos distintos do programa de ensaios utilizado.

O comportamento hidráulico e mecânico de novos materiais geotécnicos compósitos, tentando adequar suas características à utilização em barreiras hidráulicas, foi analisado por Heineck (2002). Fibras de polipropileno de 24 mm de comprimento e bentonita foram adicionadas a amostras compactadas de solo, cinza, areia e caulim. Uma análise conjunta com ensaios de condutividade hidráulica indicou a utilização do material compósito (caulim e fibras) como *liners* de cobertura ou de fundo, até mesmo em casos de resíduos perigosos. Prosseguindo o estudo, Heineck *et al.* (2003-a) e Heineck *et al.* (2005) avaliaram a contribuição de fibras para grandes deformações de cisalhamento (ensaios de *ring shear*), acima dos valores usuais em testes padrões de laboratório, bem como a influência da inserção de fibras em solos para pequeníssimas deformações (ensaios triaxiais com *bender elements*). Os resultados mostraram que a influência do reforço fibroso nos solos continua após grandes deformações de cisalhamento, não havendo perda de resistência mesmo para deslocamentos horizontais da ordem de 250 mm e que a introdução de fibras de polipropileno não influencia a rigidez inicial dos materiais estudados.

O estudo realizado por Donato (2003), seguido por Donato *et al.* (2002 e 2004), teve como propósito avaliar o comportamento mecânico de concreto compactado com rolo com adição de fibras de polipropileno. A partir dos resultados de ensaios de resistência à compressão simples e triaxial pode-se observar que as fibras provocam uma queda do módulo inicial dos compósitos estudados, tanto para os cimentados, quanto para os não cimentados, levando a uma melhoria significativa na resistência à compressão e na ductilidade do material reforçado, bem como reduções da rigidez inicial e do índice de fragilidade do material, sendo estas modificações de comportamento tão mais efetivas quanto mais fina a granulometria da matriz. Além disso, um aumento considerável da resistência à tração foi observado através dos resultados de ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Vendruscolo (2003) verificou a influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de um solo arenoso cimentado e não cimentado através de ensaios triaxiais e concluiu que a influência desta inclusão sobre as propriedades mecânicas do compósito depende fundamentalmente das propriedades da matriz, onde o efeito da adição de fibras é mais evidente para maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais pronunciado para materiais compósitos com maiores densidades. O autor cita também que a influência das fibras na resistência de pico e última do material depende do diâmetro das fibras e da distribuição granulométrica do solo.

Um amplo estudo realizado por Consoli *et al.* (2004) avaliou o comportamento de uma areia cimentada e não cimentada reforçada com fibras de vidro, de poliéster e de polipropileno. A influência das fibras de poliéster e vidro é perceptível na redução da rigidez e no aumento do ângulo de atrito interno de ambas as matrizes (cimentada e não cimentada) e a redução da fragilidade e do valor de intercepto coesivo se acentua para o compósito cimentado. Por outro lado, as fibras de polipropileno reduziram drasticamente o índice de fragilidade da areia cimentada, mudando o modo de ruptura de frágil a dúctil, para o maior comprimento de fibra estudado (36 mm), com o aumento da capacidade de energia absorvida, fato este não observado para os outros tipos de fibra estudados. Ou seja, não é possível estabelecer regras de comportamento sem o conhecimento prévio das propriedades dos materiais envolvidos.

Santos (2004) desenvolveu um equipamento de compressão confinada com medição de tensão lateral e avaliou o comportamento, sobre a trajetória de tensões  $K_o$ , de uma areia e de misturas de areia-fibra, considerando a influência da adição de fibras de diferentes comprimentos. Os resultados mostraram que: (1) a inclusão de fibras torna-se cada vez mais significativa com o aumento das tensões e que a variação do comprimento das fibras também tem efeito sobre a trajetória de tensões, sendo maior a influência quanto maior for o comprimento destas; (2) a tensão lateral diminui com a inclusão de fibras, sendo esta redução cada vez mais significativa com o aumento das tensões verticais e proporcional ao comprimento das fibras; (3) a presença de fibras modifica o comportamento tensão-deformação no carregamento principalmente nas tensões iniciais e praticamente mantém a mesma forma da curva da areia sem fibras nas tensões maiores e no descarregamento e (4) os valores de  $K_o$  diminuem com a inclusão de fibras e com o aumento do comprimento das mesmas para todos os níveis de tensão tanto no carregamento quanto no descarregamento, mantendo-se praticamente constantes no carregamento e crescendo no descarregamento.

Casagrande (2005) estudou o comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno, submetidos a grandes deformações, que possuíam características adequadas para o emprego em *liners* de cobertura de aterros sanitários e aterros sobre solos moles. Foram realizados ensaios triaxiais consolidados drenados com distintas trajetórias de tensões e isotrópicos com aplicação de altas tensões, em amostras de areia e areia-fibra, como também em ensaios de cisalhamento do tipo *ring shear* e provas de carga em placa de 0,30 m de diâmetro sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras. Nesta pesquisa buscou-se investigar o comportamento tensão-deformação de misturas reforçadas, os efeitos do comprimento, porcentagem, diâmetro e alongamento/ruptura das fibras, tensão de confinamento, granulometria do solo e densidade das misturas, nas propriedades mecânicas do material reforçado, bem como a influência da adição de fibras no comportamento carga-recalque e nos mecanismos de ruptura de uma areia reforçada. A adição de fibras influenciou o comportamento compressivo da areia, aumentou os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico das matrizes estudadas após grandes deslocamentos horizontais, sem quedas significativas de resistência pós-pico no caso da matriz arenosa. O efeito da inclusão de fibras foi mais evidente para baixas tensões efetivas médias iniciais, menores diâmetros, maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais pronunciado para misturas mais densas. O comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte deste e alterando mecanismos de ruptura.

A seguir são apresentadas, resumidamente, as conclusões obtidas por diversos pesquisadores a respeito da influência dos principais fatores mencionados acima no comportamento de solos reforçados. Alguns aspectos apresentaram resultados antagônicos, dependendo diretamente do tipo de fibra utilizada.

- Teor de fibra: quanto maior o teor de fibra, maior é o acréscimo de resistência mecânica, até um certo limite, a partir do qual este efeito não é mais observado (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; McGown *et al.*, 1988; Maher & Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Specht, 2000; Santoni *et al.*, 2001; Vendruscolo, 2003); o aumento do teor de fibra provoca aumento do índice de fragilidade e da capacidade de absorção de energia de deformação (Maher & Ho, 1993); a inclusão de fibras diminui o índice de fragilidade e aumenta a capacidade de absorção de energia (Gray & Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Montardo *et al.*, 2002).

- Comprimento da fibra: quanto maior o comprimento da fibra maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico (Gray & Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Santoni *et al.*; 2001; Heineck, 2002; Vendruscolo, 2003); o aumento do comprimento da fibra provoca redução do índice de fragilidade e aumento da capacidade de absorção de energia (Crockford *et al.*, 1993; Ulbrich, 1997; Montardo *et al.*, 2002); o aumento do comprimento provoca diminuição da resistência de pico e aumento da capacidade de absorção de energia (Maher & Ho, 1994).
- Orientação das fibras: os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo (McGown *et al.*, 1978; Morel & Gourc, 1997; Fatani *et al.*, 1991); fibras distribuídas aleatoriamente mantêm a resistência isotrópica, não sendo observados planos potenciais de fragilidade (Gray & Al-Refeai, 1986; Gray & Maher, 1989).
- Rugosidade: as fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada (Taylor, 1994).
- Módulo de elasticidade da fibra: fibras com módulo baixo comportam-se como reforços idealmente extensíveis (Gray & Ohashi, 1983; Specht, 2000); fibras com módulo baixo não contribuem para o aumento da resistência mecânica (Montardo, 1999; Specht, 2000); quanto maior for o módulo do reforço mais facilmente as fibras poderão ser arrancadas (Shewbridge & Sitar, 1990).
- Tensão confinante: foi verificada uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, os elementos de reforço são arrancados (Gray & Ohashi, 1983; Teodoro, 1999; Morel & Gourc, 1997; Kaniraj & Havanagi, 2001; Heineck, 2002). A tensão confinante crítica é sensível a alguns parâmetros do compósito solo-fibra como fator de forma das fibras ( $l/d$ ), coeficiente de uniformidade e forma das partículas do solo (Gray & Maher, 1989).

#### **2.3.4 Alterações nas Propriedades dos Solos pela Inclusão de Fibras**

A seguir são descritas algumas alterações que ocorrem no solo devido à inclusão de fibras. Diversos autores já relataram em seus trabalhos algumas mudanças que ocorrem no comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras. Estas mudanças são relacionadas à

compactação, resistência, deformabilidade, modo de ruptura, variação volumétrica e rigidez inicial.

#### 2.3.4.1 Compactação

Hoare (1979) estudou a influência da adição de fibras de polipropileno na compactação de um cascalho com areia. Observou que as fibras conferem uma certa resistência à compactação, resultando em porosidades maiores da mistura, para as mesmas energias de compactação, sendo este aumento linear em relação à quantidade de fibra e independente do tipo de compactação empregada. Resultados de ensaios empregando-se dois tipos de reforços diferentes sugeriram ainda que a influência na compactação é comandada pela interação entre solo e reforço, atentando para aspectos como a granulometria do solo, forma das partículas, textura e área superficial do reforço.

Al Wahab & Al-Qurna (1995) avaliaram os efeitos da inclusão de vários teores de fibra (zero; 0,5; 1 e 2% em peso do solo seco) na curva de compactação de uma argila. Os resultados encontrados demonstraram um decréscimo da densidade e um acréscimo na umidade ótima para a adição de 2% de fibra, considerados não muito significativos.

Bueno *et al.* (1996) observaram o mesmo comportamento com relação à umidade para um solo arenoso, ao contrário do solo argiloso, onde não foi observada nenhuma alteração na umidade ótima. Em ambos os casos, a densidade máxima não sofreu alterações com a inclusão de fibras.

Vários outros autores relataram também não ter encontrado nenhuma alteração significativa com a inclusão de fibras (*e.g.* Maher e Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Consoli *et al.*, 1999; Casagrande, 2001; Heineck, 2002).

Leocádio (2005) observou um aumento significativo na densidade seca máxima de um solo laterítico quando reforçado com fibras de sisal tratadas superficialmente com EPS. Aumento no teor de umidade ótimo também foi observado quando se aumentou o teor das fibras, com redução deste aumento da umidade ótima com o tratamento superficial. O autor justifica que o tratamento com EPS reduz a absorção de umidade das fibras de sisal.

#### 2.3.4.2 Resistência ao cisalhamento de pico

Estudos comparativos entre um material granular e um coesivo realizado por Bueno *et al.* (1996) mostraram que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras. Análises baseadas em ensaios triaxiais revelaram um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras.

Ranjan & Charan (1996) observaram que a curva tensão x deformação de uma areia fina reforçada exibia tendências a crescimento mesmo a deformações axiais da ordem de 20 %. Teodoro (1999) observou um aumento na resistência de uma areia siltosa com o aumento no comprimento das fibras de polipropileno de 0 para 30 mm, comportamento este distinto do solo argiloso, que apresentou um máximo de resistência para fibras de 15 mm.

O estudo realizado por Maher e Gray (1990), utilizando duas composições de bolas de vidro em lugar do solo, ambas com granulometrias uniformes, porém diferentes diâmetros médios das partículas, mostrou que o aumento do tamanho das partículas ( $D_{50} = 0,25$  mm para 0,6 mm) não alterou a tensão de confinamento crítica, mas diminuiu a contribuição das fibras para a resistência.

Acréscimos na resistência pela inclusão de fibras ao solo foram relatados por vários autores. Alguns constataram um aumento da resistência de forma linear com o aumento da quantidade de reforço (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986), por outro lado, outros constataram um aumento não linear (Shewbridge & Sitar, 1989; Jewell & Wroth, 1987; Teodoro, 1999).

Montardo (1999) relatou o aumento do ângulo de atrito interno de uma areia uniforme com e sem cimentação artificial, reforçada com diferentes tipos de fibras. Com relação ao intercepto coesivo, o autor somente encontrou um aumento para a areia não cimentada reforçada com fibras de polipropileno.

O aumento do ângulo de atrito e do intercepto coesivo com a inclusão de fibras e com o aumento do teor de fibras também foi relatado por diversos pesquisadores (Hoare, 1979; Gray & Ohashi, 1983; Bueno *et al.*, 1996; Nataraj *et al.*, 1996; Stauffer & Holtz, 1996). Porém, Teodoro (1999) e Casagrande (2001) observaram somente o aumento da parcela coesiva de uma areia siltosa reforçada, sem alterações significativas no ângulo de atrito. Por outro lado, Heineck (2002) e Casagrande (2005) constataram uma bi-linearidade na envoltória de ruptura de uma areia siltosa reforçada com fibras. A parte inicial da envoltória possui um intercepto



coesivo praticamente inexistente e um ângulo de atrito que supera o dobro do valor correspondente ao solo sem reforço. Já na segunda parte da envoltória, acima da tensão confinante crítica, o ângulo de atrito é semelhante ao do solo sem reforço, entretanto, houve um acréscimo razoável do intercepto coesivo. A bi-linearidade foi também observada por vários autores (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Maher & Gray, 1990; Stauffer & Holtz, 1996; Morel & Gourc, 1997; Kaniraj & Havanagi, 2001). Gray & Al Refeai (1986). Foi observado ainda que quanto menor for a rugosidade ou aderência da interface solo-fibra, maior é a tensão de confinamento crítica. Fibras mais rugosas tendem a ser mais efetivas no aumento da resistência.

Segundo Vendruscolo (2003), as fibras possuem a característica de conferir um intercepto coesivo ao solo arenoso, além de proporcionarem um aumento do ângulo de atrito, já para o solo cimentado, as fibras têm uma influência maior sobre a coesão última e o ângulo de atrito último.

Montardo (1999) e Consoli *et al.* (2002) constataram o aumento do ângulo de atrito de uma areia uniforme cimentada e não cimentada reforçada com vários tipos de fibra. Acréscimos da coesão somente foram verificados para a areia não cimentada reforçada com fibras. Resultados semelhantes também foram obtidos por Heineck (2002) para uma areia reforçada com fibras. Não foi constatada pelos autores a existência de uma tensão de confinamento crítica para estes materiais.

Com relação à granulometria do solo, Stauffer & Holtz (1996) realizaram vários ensaios triaxiais em duas areias reforçadas com distribuições granulométricas distintas, uma bem graduada e uma uniforme, porém com mesmo diâmetro médio ( $D_{50}$ ) dos grãos do solo. Os autores observaram um aumento maior de resistência na areia bem graduada com a adição de fibras. A forma das partículas também é um fator que influencia na resistência do solo reforçado com fibras (Gray & Maher, 1989). A contribuição das fibras na resistência diminui com o aumento do índice de esfericidade das partículas, ou seja, partículas de solo mais arredondadas prejudicam a eficiência do reforço.

Teodoro (1999) observou um aumento da resistência com o aumento do comprimento das fibras (comprimento máximo igual a 30 mm) de uma areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno. Distinto comportamento o mesmo autor observou para um solo argiloso, onde o máximo de resistência foi alcançado para um comprimento de 15 mm.

#### 2.3.4.3 Resistência ao cisalhamento pós-pico

Praticamente todos os trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos da resistência concluíram que a adição de fibras reduz a queda da resistência pós-pico (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Fatani *et al.*, 1991; Ranjan *et al.*, 1996; Consoli *et al.*; 1997-b, 1999, 2002-b; Donato *et al.*, 2004 e Casagrande, 2005).

#### 2.3.4.4 Deformabilidade

Foi observado por McGown *et al.* (1988), através de um ensaio de placa de pequenas dimensões, uma grande parcela de deformação recuperada com o descarregamento, referente a 20% da deformação total imposta.

McGown *et al.* (1988), para areias e Maher & Ho (1994) e Nataraj *et al.* (1996), para argilas, relataram um aumento no módulo de deformação, tanto maior quanto maior o teor de fibras. Contrariamente, Ulbrich (1997) e Consoli *et al.* (1999) obtiveram redução do módulo com a inclusão de fibras, para areias cimentadas e não cimentadas.

Stauffer e Holtz (1996) relataram que a adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, sendo este aumento mais pronunciado para uma areia mal graduada que para uma bem graduada (ambas com mesmo diâmetro  $D_{50}$  dos grãos).

Para Heineck (2002) e Heineck *et al.* (2003-a), a taxa de deformação onde as fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência ao cisalhamento depende do tipo de matriz.

#### 2.3.4.5 Modo de ruptura

O aumento da ductilidade do solo com a adição de fibras é uma observação feita em caráter unânime pelos vários autores que avaliaram este parâmetro (Hoare, 1979; McGown *et al.*, 1988; Maher & Ho, 1993; Nataraj *et al.*, 1996; Consoli *et al.*, 1999), sendo este aumento mais pronunciado quanto maior a quantidade de fibras.

O modo de ruptura de areias reforçadas por malhas de polipropileno foi estudado por Morel & Gourc (1997) em um ensaio biaxial. Os resultados mostraram que a inserção do reforço não modifica a posição da banda de cisalhamento, porém, modifica o comportamento de ruptura.

Em função da ductilidade do reforço, mesmo após a formação da banda de cisalhamento, as tensões continuam a crescer, pois parte da carga passa a ser absorvida pelo reforço. O desenvolvimento da banda também é diferente, pois após um nível de deformações limite, elas se tornam menos ativas com o aumento das deformações. Mas por outro lado, na medida em que as deformações progridem, bandas de cisalhamento secundárias se iniciam e vão se tornando mais largas, localizadas próximas da primeira banda.

Segundo Feuerharmel (2000), a forma de ruptura do solo é grandemente alterada pela inclusão de fibras de polipropileno, reduzindo a fragilidade dos solos. A amplitude dessas alterações depende fundamentalmente de uma boa adesão solo-fibra, que pode ser atingida pela ação de um agente cimentante, formando uma estrutura cimentada bastante resistente ou por uma combinação apropriada dos fatores comprimento das fibras e tensões efetivas médias normais atuantes.

#### *2.3.4.6 Variação volumétrica*

A adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, segundo relatos de Stauffer & Holtz (1996), sendo este aumento mais pronunciado para uma areia uniforme do que para uma areia bem graduada, ambas com mesmo diâmetro médio ( $D_{50}$ ).

O aumento da compressibilidade do solo com a inclusão de fibras também foi observado por Bueno *et al.* (1996). Segundo Shewbridge & Sitar (1989), a deformação volumétrica aumenta com o acréscimo da quantidade de reforço, porém, de forma não linear, similar ao observado por Nataraj *et al.* (1996).

#### *2.3.4.7 Rigidez inicial*

McGown *et al.* (1988), para areias, Maher & Ho (1994) e Nataraj *et al.* (1996), para argilas, relataram aumento no módulo de deformação, tanto maior quanto maior o teor de fibras. Contrariamente, Ulbrich (1997), Consoli *et al.* (1999) e Casagrande (2001) obtiveram redução do módulo com a inclusão de fibras.

Portanto, o efeito do reforço fibroso na rigidez inicial do compósito depende das características do mesmo. Michalowski & Cermák (2003) observaram que a adição de uma fibra sintética em um solo arenoso causou uma queda da rigidez inicial, por outro lado, a

adição de fibras de aço aumentou a rigidez inicial. Para Feuerharmel (2000) a intensidade das alterações no módulo de elasticidade depende também do tipo e das características de cada solo. Estudos realizados pelo autor em argila e areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno indicaram grande redução do módulo, enquanto que, os resultados de ensaios realizados em areia reforçada mostraram pequenas alterações no módulo. Entretanto, considerando misturas cimentadas reforçadas com fibras, as reduções do módulo foram bastante acentuadas para os três solos analisados.

Os resultados de ensaios dinâmicos utilizando *bender elements* realizados por Heineck (2002) não indicaram alteração do  $G_0$  do solo arenoso quando da inclusão das fibras.

## **2.4 Provas de carga em placa**

### **2.4.1 Considerações Iniciais**

A prova de carga sobre placa se constitui na realidade em um modelo reduzido de uma fundação superficial. Nasceu antes das conceituações da Mecânica dos Solos e foi uma das primeiras aplicações dos ensaios *in situ*, aplicada empiricamente na tentativa de obtenção de informações sobre o comportamento e determinação das propriedades de deformação e de ruptura do solo. Este tipo de ensaio tem sido utilizado em geotecnia não só especificamente em projeto de fundações, mas também no estudo do comportamento de pavimentos.

As provas de carga em placa possuem a principal vantagem de serem mais econômicas em relação às provas de carga em verdadeira grandeza. Outros fatores que podem levar a utilização desse tipo de ensaio são:

- O ensaio tem se mostrado adequado para o estudo do comportamento de fundações superficiais, devido ao fato de que, em ambos os casos, o solo é submetido ao mesmo tipo de carregamento;
- O ensaio permite a observação da forma de ruptura que experimenta o solo quando carregado pela fundação (interação solo-estrutura);

- A existência de um grande número de soluções matemáticas fechadas e procedimentos empíricos e semi-empíricos, que podem ser utilizados para interpretar os resultados experimentais;
- As condições geométricas do problema são perfeitamente conhecidas, facilitando a aplicação de soluções analíticas, especialmente o Método dos Elementos Finitos.

#### 2.4.2 Estudos Experimentais

Segundo Terzaghi & Peck (1967), os resultados das provas de carga somente representam as características do solo até aproximadamente dois diâmetros abaixo da placa. Portanto, os resultados não podem ser extrapolados a sapatas de maiores diâmetros quando a mesma solicita camadas de distintas características às do ensaio. Para evitar este problema, é necessário conhecer a estratigrafia do local em estudo.

A crescente utilização dos ensaios de campo, segundo Mitchell & Katti (1981), é devido principalmente à habilidade para determinar as propriedades de solos que não podem ser facilmente amostrados no estado natural, à eliminação das dificuldades dos ensaios de laboratório (tais como amolgamento da amostra e simulação das condições *in situ*) e ao volume de solo envolvido no ensaio ser muito maior que o correspondente a um ensaio de laboratório. Os mesmos autores executaram as fundações de uma usina de energia no estado de Illinois (EUA) sobre solos siltosos estabilizados com 3% de cal hidratada e 2% a 5% de cinza volante, formando uma camada tratada de 7,6 m de espessura e observaram que a resistência à compressão simples da mistura alcançada, após 4 dias de cura a 38°C, foi de 1000 kPa a 1400 kPa. Os autores descreveram também a utilização de uma camada de solo-cimento de 3,6 m de espessura para suportar um edifício de 38 pavimentos no estado da Flórida (EUA), em substituição ao uso de fundações profundas, a qual é uma técnica usual local.

Resultados de ensaios de placa circulares e quadradas, com áreas variando de 0,04 m<sup>2</sup> a 4,0 m<sup>2</sup>, realizadas sobre um solo argiloso e outro solo siltooso, ambos estabilizados com cimento, foram apresentados por Minkov *et al.* (1981). As tensões abaixo das placas foram determinadas através de células de pressão e os autores concluíram que a camada estabilizada redistribui as tensões e aumenta consideravelmente a capacidade de suporte. Os recalques observados foram reduzidos cerca de 3 a 6 vezes quando utilizada uma camada cimentada de

1,5 m de espessura e para a camada de 2 m de espessura de solo cimentado houve uma redução de 5 a 11 vezes dos recalques.

De acordo com Pells (1983), os ensaios de placa podem ser classificados de acordo com o material a ser ensaiado, areias, argilas e rochas, e de acordo com a forma de execução do ensaio, ensaio de placa na superfície; placa carregada na superfície por um tensor ancorado centralmente à placa, fora ou na zona de influência; placa sobre a base de um furo no terreno, carregado horizontalmente, sobre bloco de concreto embutido ou múltiplas placas. O mesmo autor salienta que a placa pode ser flexível ou rígida. Quanto aos deslocamentos, podem ser medidos sobre a placa, no centro de uma placa flexível, em pontos sobre a superfície do terreno fora da área carregada, ou no interior da área carregada através de extensômetros.

Hilmer (1983) removeram 600.000 m<sup>3</sup> de solo siltoso mole para substituição por pedregulho compactado a fim de ser construído no local uma fábrica de manufaturados. Além dos ensaios dinâmicos, em vista das altas cargas produzidas pelas máquinas, foram realizadas 270 provas de carga em placa com diâmetros de 0,30; 0,40; 0,50 e 0,76 m. Os resultados mostraram que o módulo de deformação tem uma relação com o diâmetro da placa, isto é, o aumento do diâmetro da placa causou um decréscimo do módulo.

Mellios (1985) apresenta os resultados de ensaios de placa executados em um solo poroso. Os ensaios foram realizados com placas circulares de 0,80 m de diâmetro a profundidades que variam de 0,60 a 1,20 m. O autor conclui que, considerando o estado de baixa compacidade destes solos, o processo de carregamento representa mais um processo de adensamento do solo do que propriamente a clássica ruptura por cisalhamento de superfícies geometricamente definidas. O comportamento das curvas é bastante similar ao do ensaio de adensamento, o que sugere um tratamento análogo. Assim, considerou-se como tensão de ruptura o que corresponderia a pressão de pré-adensamento.

Evstatiev *et al.* (1985) estudaram o comportamento de uma torre de TV com 190 m de altura apoiada sobre uma camada de 4,5 m de espessura de solo estabilizado com 5% de cimento. Os autores observaram uma melhora significativa da estabilidade sísmica da estrutura apoiada sobre esta camada. Os autores conseguiram uma boa previsão dos recalques através da utilização do Método dos Elementos Finitos.

Segundo Robertson (1986), os ensaios *in situ* também possuem suas limitações, como por exemplo, a trajetória de tensões pode não ser controlada durante a execução do ensaio sendo

diferente daquela do problema real; as condições de drenagem não podem ser controladas independentemente e não são consideradas possíveis futuras modificações nas condições do solo.

Cudmani (1994) realizou ensaios de placa em solo natural. Os ensaios foram realizados a diferentes profundidades e com vários tamanhos de placa. A partir dos resultados, o autor observou que: (1) a dispersão dos resultados foi inversamente proporcional ao diâmetro da placa. O autor atribui esta dispersão ao amolgamento produzido durante a preparação do ensaio e à heterogeneidade do solo; (2) o efeito da profundidade foi comprovado, ou seja, uma mesma placa sob dada pressão apresentou recalques menores a maiores profundidades; (3) as curvas carga x recalque não apresentaram uma carga de ruptura definida, isto é, uma magnitude de carga constante a contínuas deformações. Este comportamento é característico de rupturas por punção; (4) as deformações elásticas são de pequena magnitude quando comparadas com as deformações plásticas; (5) a tensão de fluência determinada através dos ensaios de placa coincide com a tensão de pré-adensamento avaliada no ensaio de compressão confinada; (6) a relação carga-recalque é praticamente linear até a tensão de fluência; (7) a previsão da capacidade de suporte pela teoria proposta por Terzaghi (1943) considerando a redução dos parâmetros resistentes, conduz a boas previsões dos valores experimentais; (8) a previsão de recalques do solo estudado através de procedimentos empíricos embasados em resultados de provas de carga se mostrou adequada.

Vendruscolo (1996) realizou ensaios de placa de 0,30 m de diâmetro sobre camadas de solo residual compactado e de solo tratado com cimento (teor de 5 % de cimento), ambas com 0,60m de espessura. Os resultados dos ensaios de placa sobre camadas de solo melhorado demonstraram que houve um aumento significativo da capacidade de suporte, além de uma redução considerável dos recalques, quando comparadas ao comportamento carga x recalque do solo natural (Cudmani, 1994). A análise do comportamento de fundações superficiais assentes em solos estratificados, através de simulações numéricas, demonstrou ser eficiente na previsão do comportamento carga x recalque das mesmas.

Consoli *et al.* (1997-a) mostraram a eficiência do método dos elementos finitos na previsão do comportamento carga x recalque de fundações superficiais assentes em camadas superficiais de solo compactado.

Sales (1998) estudou a influência de diferentes espessuras da camada estabilizada sobre as curvas carga x recalque através de ensaios de placa. Segundo o autor, para uma mesma relação entre a espessura da camada tratada e o tamanho da placa, os resultados dos ensaios de placa podem ser normalizados quando plotados na forma tensão x recalque relativo.

Tessari (1998) executou provas de carga sobre cinza pesada de carvão misturada com 5% de cimento, compactada em camadas delgadas na superfície do solo de baixa capacidade de suporte. As provas de carga foram executadas com placas de 0,30; 0,60 e 0,90 m de diâmetro sobre camadas de cinza pesada-cimento com 0,15 e 0,30 m de espessura, sendo comparados com resultados de provas de carga sem camada de cinza pesada-cimento. Observou-se que as fundações assentes sobre a camada compactada de cinza pesada-cimento apresentaram menor recalque e maior capacidade de suporte que as fundações de mesmo diâmetro assentes sobre o solo natural. Além disto, quanto maior a relação entre a espessura da camada tratada e o diâmetro da placa (H/D), maiores eram estas diferenças de recalque e capacidade de suporte, fato também comprovado por Vendruscolo (1996) e Sales (1998). A ruptura se deu sob a forma de puncionamento, comprovado pelas trincas em torno da placa e pela medição dos recalques ao lado da mesma.

Consoli *et al.* (1998-b) discutiram aspectos relacionados à interpretação de provas de carga de fundações superficiais assentes em camadas de solo tratadas com cimento. Foram analisados a influência da espessura de camadas de solo-cimento e também o efeito do tamanho do elemento de fundação no comportamento carga-recalque. A base de dados foi obtida através de resultados de ensaios em placas circulares de 0,30 e 0,60 m de diâmetro assentes sobre camadas de solo-cimento de diferentes espessuras, fixadas de forma a obter-se quatro valores distintos da relação espessura da camada tratada/diâmetro da placa (H/D) correspondentes a 0, 0,5; 1,0 e 2,0. Foi verificado um mecanismo de ruptura por puncionamento em todos os ensaios realizados, independente do tamanho da placa e da espessura de camada tratada. Os autores concluíram que o efeito do diâmetro da área carregada (D) e da espessura da camada superficial (H), no espaço que relaciona tensão normalizada x recalque relativo (razão entre o recalque e o diâmetro da placa), é desprezível para as várias relações H/D analisadas. Foi proposto então, um método numérico de interpretação baseado no processo de ajuste da curva experimental obtida em ensaios de placa, obtendo-se valores otimizados representativos do módulo de elasticidade e dos parâmetros de resistência da camada de solo-cimento, sendo possível estimar o comportamento de elementos de fundação de diferentes diâmetros assentes sobre camadas tratadas de diversas espessuras.



Thomé (1999) estudou o comportamento de fundações superficiais apoiadas em sistema de dupla camada, quando a superior é cimentada. Foram construídos aterros experimentais utilizando misturas de resíduos industriais como cinza pesada e cal de carbureto na estabilização de um solo residual de arenito Botucatu, e sobre esses aterros foram executadas provas de carga em placa. O autor concluiu que o comportamento de fundações superficiais sobre solos cimentados é controlado pela relação espessura da camada cimentada e diâmetro da fundação. O ângulo de atrito e o módulo de elasticidade da camada cimentada não influenciaram os resultados de prova de carga. A ruptura da fundação é função de dois mecanismos progressivos, os quais são função das tensões de tração geradas na parte inferior da camada cimentada e das tensões cisalhantes existentes logo abaixo das bordas de fundação.

A influência da adição de fibras numa camada superficial de solo compactado através de ensaios de placa foi estudada por Casagrande (2001). Observou-se que a camada compactada reforçada com fibras apresentou um comportamento mais rígido e mais resistente do que a camada compactada sem reforço. Segundo Casagrande *et al.* (2002), no solo compactado sem reforço foi observada uma banda de cisalhamento vertical abaixo da borda da placa, fato não observado na camada de solo-fibra. Para Consoli *et al.* (2003-b), as fibras permitem uma redistribuição de tensões em uma área mais ampla aumentando a capacidade de suporte.

Um método semi-empírico de previsão do comportamento de fundações superficiais apoiadas sobre sistemas de dupla camada, sendo a superior cimentada, foi proposto por Thomé *et al.* (2002). Com este método foi possível prever com boa precisão a capacidade de carga e a curva carga x recalque de fundações superficiais.

Vendruscolo (2003) estudou a influência de camadas compactadas de areia estabilizada com cimento e também da mistura areia-cimento reforçada com fibras de polipropileno, no comportamento carga-recalque de fundações superficiais. Ensaio de placas circulares de 0,30 m de diâmetro foram executados sobre camadas compactadas de 0,30 m de espessura. Observou-se um aumento da capacidade de suporte, resistência e rigidez da camada de areia-cimento. Verificou-se também um comportamento frágil com relação ao modo de ruptura, e depois de atingida a resistência de pico, a capacidade de carga caiu para aproximadamente o mesmo valor da capacidade de carga obtida no ensaio de placa para o solo residual. A inclusão de fibras na mistura de areia-cimento manteve a capacidade de carga máxima obtida anteriormente praticamente inalterada, porém, notou-se um comportamento pós-pico notadamente mais dúctil. O mecanismo de ruptura observado no campo para o ensaio de placa

relativo à camada de areia-cimento mostrou trincas de tração verticais que se propagaram da base para o topo da camada, especialmente na borda da placa. Já o reforço com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na mistura de areia-cimento mudou completamente o comportamento do mecanismo de ruptura, ou seja, a ruptura ocorreu pela formação de faixas espessas de cisalhamento ao redor da borda da placa (*shear bands*), permitindo que as tensões se espalhassem por uma área maior na interface da camada subjacente.

Casagrande (2005) realizou ensaios de prova de carga em placa com o objetivo de investigar a contribuição de fibras de polipropileno na mobilização de resistência, para diferentes níveis de densidade de compactação. Os resultados mostraram que as camadas compactadas com maior densidade apresentaram características relacionadas ao mecanismo de ruptura generalizada e para as menores densidades foi observada ruptura localizada, constituída por superfícies de deslizamento em forma de cunha, que se iniciaram junto às bordas da placa, com um levantamento expressivo do solo ao redor desta após grandes deslocamentos. Foi verificado que a inclusão do reforço fibroso melhorou significativamente a resposta do solo e a variação da densidade relativa das camadas teve um forte efeito sobre a resistência do material reforçado com fibras, onde o ganho de resistência era mais pronunciado quanto mais densa fosse a mistura. Segundo o autor as fibras inibem a propagação de fissuras, distribuindo as tensões em uma área maior, conseqüentemente, o acréscimo de resistência pela adição das fibras ao solo se deve à inibição da formação e propagação de possíveis bandas de cisalhamento.

## **CAPÍTULO 3**

### **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Considerações iniciais**

O programa experimental estabelecido teve como objetivo principal investigar a resposta de células de tensão total submetidas a carregamento na trajetória de tensões  $K_0$ , etapa de calibração, bem como sua resposta em trajetória de ruptura em ensaios de placa.

As etapas do programa experimental proposto são detalhadamente descritas neste capítulo, bem como a descrição dos materiais utilizados na pesquisa, os métodos utilizados na preparação dos ensaios, detalhes de execução dos ensaios e equipamentos.

O programa experimental está baseado em três etapas. Na primeira etapa foram realizados os ensaios preliminares de caracterização, englobando ensaios de granulometria e índices de vazios máximos e mínimos. Ainda como preliminares foram realizados ensaios de resistência à compressão confinada. Na segunda etapa foi realizada a calibração das células de tensão total, tanto em ar quanto em solo e solo-fibra e por fim, na terceira etapa, a realização dos ensaios de placa em solo e solo-fibra.

#### **3.2 Variáveis investigadas**

Muitos estudos já foram realizados sobre os fatores que afetam as medições das tensões totais em solos por meio de células de tensão total, conforme visto no capítulo anterior, mas grande parte dos trabalhos se concentrou na busca ideal de tamanho, forma e material das células, ou seja, estudos direcionados ao projeto de células de tensão total, onde a idéia original seria desenvolvê-las de forma a atingir resultados de fator de atuação da célula (CAF) próximos à unidade. Como o objetivo deste trabalho não é projetar ou desenvolver células de pressão, as variáveis estudadas não são as mesmas daquelas estudadas por outros autores. Hoje já existem células comercializadas que foram desenvolvidas com o objetivo de se atingir valores de CAF

muito próximos à unidade. Este trabalho se concentra na busca de valores reais de CAF e na forma correta de obtê-los, avaliando-se, portanto, o tipo de câmara de calibração e a posição de inserção das células nestas câmaras.

Diversos autores destacam que o comportamento tensão-deformação de compósitos reforçados com fibras é influenciado tanto por fatores relacionados à matriz (granulometria, índice de vazios, umidade, etc.) quanto ao reforço (módulo, comprimento, espessura, rugosidade, orientação, teor e formato). Embora todos os fatores sejam importantes, o presente trabalho se restringe ao estudo da influência do comprimento de fibra e do teor de fibra. A escolha destas variáveis, bem como da sua faixa de variação, decorreu da necessidade de delimitação do trabalho e foi baseada em estudos já realizados e mencionados no capítulo anterior (*e.g.* Casagrande, 2001 e 2005; Heineck, 2002 e Vendruscolo, 2003).

Uma vez identificadas as variáveis mais importantes, avalia-se a influência destas, variando-as de forma controlada enquanto mantêm-se as demais variáveis fixas. As faixas de variação possíveis para as variáveis investigadas referentes aos ensaios realizados são apresentadas nos itens subseqüentes.

### **3.2.1 Ensaios de Resistência à Compressão Confinada**

A grande maioria dos trabalhos realizados com solos reforçados com fibras pelo grupo PPGEC/UFRGS utilizou fibras lisas de polipropileno com 3,3 dtex e comprimento de 24 mm. Com a nova produção de fibras de polipropileno corrugadas e com maiores comprimentos surgiu a necessidade de se estudar preliminarmente os efeitos da inserção destas fibras no solo em questão.

As novas fibras são comercializadas com diâmetro de 100 dtex e comprimentos de 24 e 50 mm, ambas corrugadas. Os ensaios preliminares de compressão confinada foram realizados variando-se o teor (0; 0,25 e 0,5 %) de fibras, o comprimento (24 e 50 mm) de fibras e o teor de umidade do solo (0 e 10 %). A influência da umidade foi avaliada devido à variação da umidade nos ensaios de calibração. A tensão confinante adotada foi de 13 kPa, limitada pela capacidade mínima do equipamento triaxial.

### 3.2.2 Ensaios de Calibração

Os ensaios de calibração em laboratório das células de tensão total foram divididos em três etapas, a primeira realizada apenas em ar para verificar possíveis defeitos em algumas células e confirmar a calibração dada pelo fabricante. Na segunda etapa, um extenso programa de ensaios em uma única célula de cada tipo, contato e interna, foi realizado para calibrá-las apenas em areia, com o objetivo de se avaliar a câmara e a posição ideal para a calibração das demais células. Por fim, a calibração de todas as células em uma única câmara e única posição de instalação, em areia e nos compósitos areia-fibra.

Para os ensaios em areia foram variados: a posição das células de tensão total, sendo que para as células do tipo contato variou-se à posição horizontal e para as células do tipo interna variou-se a posição vertical e horizontal; a densidade relativa do solo (0; 50 e 100 %); o tamanho da câmara de calibração (três diferentes tamanhos, ver Tabela 3.1) e o tipo das células (interna e contato). Nesta fase de estudo os ensaios foram realizados em areia seca em virtude da sua versatilidade e possibilidade de trabalho no índice de vazios máximo.

Tabela 3.1: variáveis iniciais investigadas nos ensaios de calibração em areia seca

Material	Tamanho câmara (D x H) cm	Tipo de célula	Densidade relativa (%)	Posição vertical	Posição horizontal	Total de ensaios
Areia	Pequena (15x18)	Interna	0	Topo (0 cm)	Centro	3
				Centro (9 cm)		
	Média (50x20)	Interna	0	Topo (0 cm)	Centro	6
				Centro (10 cm)		
	Contato	0	Inferior (20 cm)	Centro	24	
				Interm. Borda		
	Grande (50x40)	Interna	0; 50; 100	Topo (0 cm)	Centro	14
Interm. (10 cm)						
Centro (20 cm)						
Interm. (30 cm)						
Inferior (40 cm)						
					total	47

Para a última etapa de calibrações foi variado o teor de fibras, sendo 0; 0,25 e 0,5 %, conforme Tabela 3.2. Foi variado também o teor de umidade (0 e 10%) para avaliação deste efeito na calibração, visto que os ensaios iniciais ocorreram em solo seco e os ensaios de placa na umidade de 10%. Foram mantidos fixos o tamanho da câmara (médio), a densidade relativa em 50 % e o comprimento das fibras em 50 mm.

Tabela 3.2: variáveis investigadas nos ensaios de calibração (2ª etapa)

Material	Tipo de célula	Teor de fibras (%)	Teor de umidade (%)	Total de ensaios
Areia	Interna	0	0 e 10	8
	Contato	0	0 e 10	8
Areia-fibra	Interna	0,25 e 0,5	10	8
	Contato	0,25 e 0,5	10	8
			total	16

### 3.2.3 Análise Numérica

A etapa de análise numérica foi realizada apenas para os ensaios de calibração com o objetivo de se avaliar a distribuição das tensões verticais nas diferentes câmaras de calibração, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), na areia seca e sem fibras.

O modelo constitutivo utilizado para representar o solo foi o modelo elástico perfeitamente plástico, com critério de ruptura de Drucker-Prager e lei de fluxo não-associada, com a utilização do programa comercial ANSYS (versão 5.4). Os parâmetros do modelo ( $c'$ ,  $\phi'$ ,  $E$ ,  $\nu$ ,  $\psi$ ) foram obtidos a partir de ensaios triaxiais realizados por Vendruscolo (2003). A Tabela 3.3 apresenta os valores dos parâmetros utilizados nas simulações.

Os parâmetros de resistência efetivos ( $c'$  e  $\phi'$ ) foram obtidos a partir da envoltória de resistência de pico. O valor do módulo de elasticidade secante foi obtido para uma deformação axial de 0,1 % do ensaio de menor tensão confinante, pois este valor representa muito bem as curvas carga-recalque de ensaios de placa retroanalizados (Thomé *et al.*, 1998).

Tabela 3.3: valores dos parâmetros adotados nas simulações numéricas

Parâmetro	Valor
Coesão efetiva ( $c'$ )	0 kPa
Ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ )	36 °
Módulo de elasticidade (E)	34 MPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,25
Ângulo de dilatação ( $\psi$ )	0 °

O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,25, pois Cudmani (1994) realizou análises paramétricas e verificou que este coeficiente não influencia significativamente os resultados em análises numéricas.

### 3.2.4 Ensaios de Placa

Esta pesquisa busca também contribuir para o desenvolvimento do conhecimento sobre o uso de fibras distribuídas aleatoriamente na massa de um solo arenoso, verificando o comportamento carga-recalque e a distribuição de tensões, através de provas de carga assentes sobre camadas de solo reforçado.

Devido a algumas restrições encontradas em ensaios de prova de carga em placa realizados em campo, como condições meteorológicas e custos, os ensaios de placa desta pesquisa foram executados em grande escala, porém, em laboratório experimental, na Universidade de Passo Fundo - RS.

Cinco ensaios de placa foram realizados sobre camadas de areia e areia-fibra compactadas no interior de uma caixa de acomodação. Estabeleceu-se que seria utilizada uma placa circular de 0,30 m de diâmetro e, também, foi mantida fixa a densidade relativa de 50 % e o comprimento das fibras de 50 mm. A Tabela 3.4 apresenta as variáveis investigadas nestes ensaios. Esclarecendo que, para efeito de comparação, as camadas de areia e de areia-fibra foram executadas de forma a atenderem às mesmas densidades relativas, porém, foram

calculadas em função dos índices de vazios inicial (mínimo e máximo) distintos para areia e areia-fibra.

Tabela 3.4: variáveis investigadas nos ensaios de placa

Material	Teor de umidade (%)	Teor de fibras (%)	Total de ensaios
Areia	0	0	1
	10	0	2
Areia-fibra	10	0,25 e 0,5	2
total			5

### 3.3 Materiais utilizados

#### 3.3.1 Areia

A areia utilizada neste estudo é proveniente de uma jazida localizada no município de Osório – RS. Este material caracteriza-se por ser uma areia fina (NBR 6502 – ABNT, 1995; ASTM D 2487, 1993), limpa e de granulometria uniforme que, segundo Spinelli (1999), tem o quartzo como material correspondente a 99% da sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. Não foi observada a presença de matéria orgânica. Este material teve sua curva granulométrica e índices físicos determinados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade de Passo Fundo, conforme apresentados na Figura 3.1 e na Tabela 3.5.



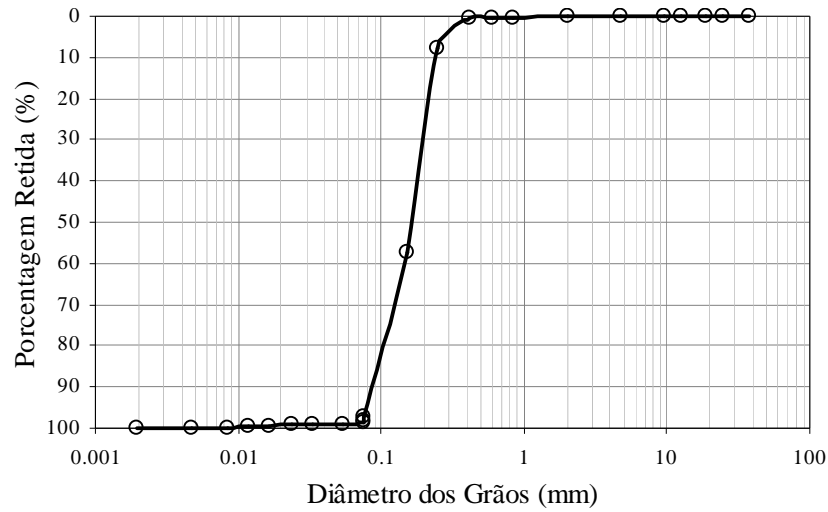


Figura 3.1: curva granulométrica da areia

Tabela 3.5: índices físicos da areia e areia-fibra

<b>Índices Físicos</b>	<b>Areia de Osório</b>
Peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ )	26,3 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente de uniformidade, $C_u$	2,1
Coefficiente de curvatura, $C_c$	1,0
Diâmetro efetivo, $D_{10}$	0,09 mm
Diâmetro médio, $D_{50}$	0,16 mm
Índice de vazios, $e_{mínimo}$	0,59
Índice de vazios, $e_{máximo}$	0,88
<b>Índices Físicos</b>	<b>Areia de Osório em misturas Areia-Fibra*</b>
	0,5% de fibras de 50 mm de comprimento
Índice de vazios, $e_{mínimo}$	0,61*
Índice de vazios, $e_{máximo}$	0,93*

\* Utilizados para a obtenção de mesma densidade na execução das camadas reforçadas para ensaios de placa

### 3.3.2 Fibras

As fibras utilizadas como elemento de reforço foram fibras poliméricas de polipropileno, que estão disponíveis no mercado em forma de pequenos filamentos. Estas fibras foram escolhidas por apresentarem características uniformes e bem definidas, por serem inertes quimicamente e por estarem disponíveis em grande quantidade no comércio, o que possibilita a sua aplicação em ensaios com grandes dimensões ou extrapolação de resultados para projetos de engenharia.

Estas fibras são produzidas pela Fitesa Fibras e Filamentos S/A e foram doadas para esta pesquisa. A grandeza que representa a espessura dos filamentos, na indústria têxtil, é o título, cuja unidade é o dtex ( $1 \text{ dtex} = 1\text{g}/10000\text{m}$ ). As fibras utilizadas nesta pesquisa são corrugadas e possuem título de 100 dtex e comprimento de 24 e 50 mm.

A Tabela 3.6 apresenta as principais características das fibras utilizadas. A Figura 3.2 apresenta as fibras de polipropileno de 50 mm de comprimento e um detalhe mostrando sua rugosidade.

Tabela 3.6: resumo das propriedades mecânicas das fibras

Propriedades mecânicas	Fibras 100 dtex
Espessura	100 $\mu\text{m}$
Densidade relativa	0,91
Módulo de elasticidade	3 GPa
Resistência à tração última	120 MPa
Deformação na ruptura	80%







Figura 3.2: aspecto das fibras de polipropileno de 100 dtex com 50 mm de comprimento (fonte: FITESA S/A)

### 3.3.3 Células de Tensão Total

No total oito células de tensão total foram utilizadas nesta pesquisa, quatro células do tipo interna e quatro células de contato, todas da marca Kyowa. A Tabela 3.7 apresenta algumas características das células, dadas pelo fabricante. Estas células foram escolhidas por serem hidráulicas, pois quando comparadas às de diafragma, apresentam um deslocamento interno da sua face ativa menor e que segundo Clayton & Bica (1993), quanto menor esse deslocamento interno, menor será a redistribuição de tensões nas suas proximidades, e conseqüentemente, menores serão os erros de medida.

Tabela 3.7: características das células de tensão total

Nome	Imagem / Tipo	Dimensões (DxE)	Capac. (kPa)	Tensão de excitação (Volt)	Ganho	Constante de calibr. (kPa/Volt)
BE10KC 6102	 interna	3 x 0,65 cm	1000	2,5	1000	1369,86
BE10KC 6304		3 x 0,65 cm	1000	2,5	1000	1388,88
BE5KUS 0001	 interna	5 x 0,9 cm	500	10	300	122,73
BE5KUS 0002		5 x 0,9 cm	500	10	300	132,17
BE10KHS 0001	 contato	6,5 x 0,8 cm	1000	10	600	133,55
BE10KHS 0002		6,5 x 0,8 cm	1000	10	600	133,01
BE10KD 7204	 contato	3 x 0,65 cm	1000	2,5	1000	1361,30
BE10KD 7209		3 x 0,65 cm	1000	2,5	1000	1379,31

### 3.4 Métodos de ensaio e equipamentos utilizados

A seguir serão apresentados os métodos de ensaio e demais procedimentos empregados durante o programa experimental. Para os ensaios que foram realizados baseando-se em procedimentos propostos em normas técnicas, será feita referência à mesma. No caso de modificação de algum procedimento descrito em norma ou na ausência de norma técnica referente ao assunto abordado, será realizada uma descrição mais detalhada do método adotado.

### 3.4.1 Ensaios de Compressão Confinada

A realização dos ensaios de resistência à compressão confinada seguiu os procedimentos semelhantes aos ensaios de compressão não-confinada, porém realizados em um equipamento de compressão triaxial. Tal adoção possibilitou a aplicação de uma pequena tensão confinante aos corpos-de-prova, representando melhor as condições de campo para os ensaios de placa. A realização destes ensaios em uma câmara triaxial possibilitou também a análise das tensões ao longo de toda a deformação do corpo-de-prova.

Após a montagem do corpo de prova na câmara triaxial a amostra foi submetida a uma tensão confinante de 13 kPa. Não houve saturação da amostra, pois se utilizaram nestes ensaios amostras com umidade igual a zero e também com 10 %. Não houve também medidas de variação volumétrica devido à falta de instrumentação em amostras não saturadas.

A velocidade de deformação adotada para a fase de cisalhamento foi de 9,15 mm/hora.

No cálculo da tensão desvio, foram aplicadas correções de área e membrana, seguindo a abordagem proposta por La Rochele *et al.* (1988).

O equipamento triaxial utilizado foi um equipamento tipo deformação controlada, marca Geonor. A seguir são relatadas as principais características do equipamento:

- Aquisição de dados: conversor analógico/digital (dataloger CIL 6580) da Helwett Packard e um microcomputador PC/AT 386;
- Medidor de pressão confinante: transdutor de pressão da marca Ademex tipo HP 200 com capacidade de 1000 kPa;
- Medidores de deformação: transdutor de deslocamento linear da marca Gefran, modelo LTM 505, como medidor externo;
- Medidores de força axial: célula de carga da marca Kratos, modelo KM, carga nominal de 10 kN.

### 3.4.2 Ensaio de Calibração

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS), em parceria com a Universidade de Passo Fundo (UPF), vem desenvolvendo um extenso programa de pesquisas que abrange as mais diversas questões e problemas geotécnicos. Dentro deste contexto surgiu a idéia da utilização do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UPF para a realização dos ensaios que fazem parte desta pesquisa.

#### 3.4.2.1 Equipamentos utilizados

Para a calibração das células de pressão foram utilizadas três câmaras de diferentes tamanhos e fatores de forma (H/D). A câmara maior, chamada de câmara grande, foi desenvolvida e utilizada por Gonçalves (2003). É uma câmara em aço de forma circular, com 50 cm de diâmetro e 40 cm de profundidade, com fator de forma igual a 0,8. A representação esquemática do equipamento é apresentada na Figura 3.3. A Figura 3.4 apresenta algumas vistas do equipamento.

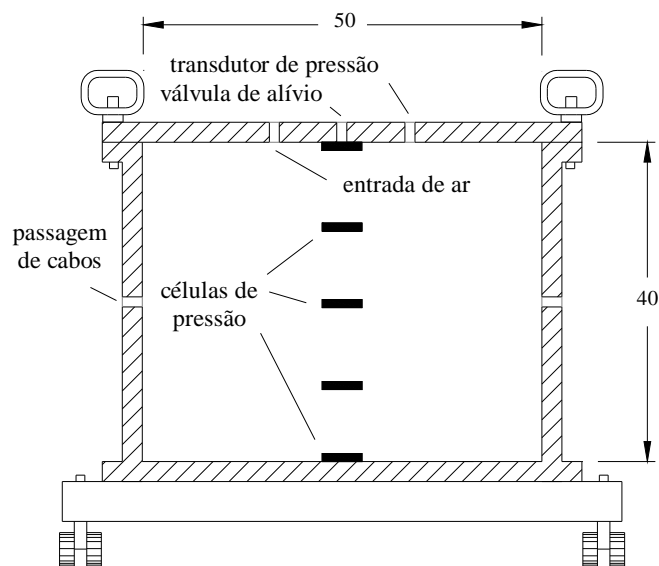


Figura 3.3: representação esquemática da câmara de calibração grande:  $H/D = 0,8$



Figura 3.4: vistas da câmara de calibração grande:  $H/D = 0,8$

Esta câmara permite aplicação de carga através de ar comprimido transmitido ao solo por uma membrana de borracha, que garante a distribuição uniforme de tensão na superfície do solo (Fig. 3.4). Um transdutor eletrônico de pressão da marca ASHCROFT, com capacidade de 1 MPa, instalado na tampa da câmara de calibração foi utilizado para a leitura da pressão aplicada, juntamente com um manômetro. O controle da pressão aplicada foi feito com uma válvula reguladora de precisão da marca NORGREN. Para maior segurança foi instalada uma válvula de alívio na tampa da câmara limitando a pressão aplicada em 700 kPa.

A câmara de tamanho intermediário, chamada de câmara média, é uma adaptação da primeira, onde a altura foi reduzida pela metade para a inserção das células de contato. Sua dimensão é de 50 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade, com fator de forma igual a 0,4. A representação esquemática do equipamento é ilustrada na Figura 3.5.

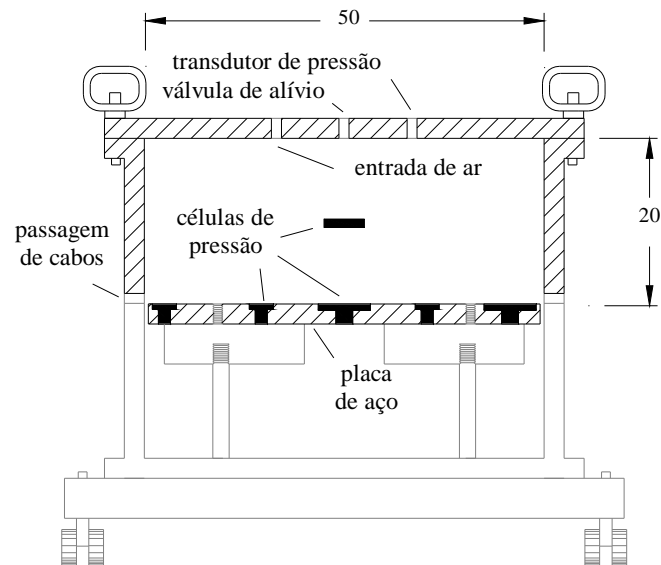


Figura 3.5: representação esquemática da câmara de calibração média:  $H/D = 0,4$

Uma placa de aço com diâmetro de 49 cm e espessura de 2,54 cm foi perfurada nas dimensões das células de contato. Estas ficaram embutidas na placa de forma que ambas ficassem perfeitamente niveladas. A Figura 3.6 apresenta algumas vistas do equipamento.

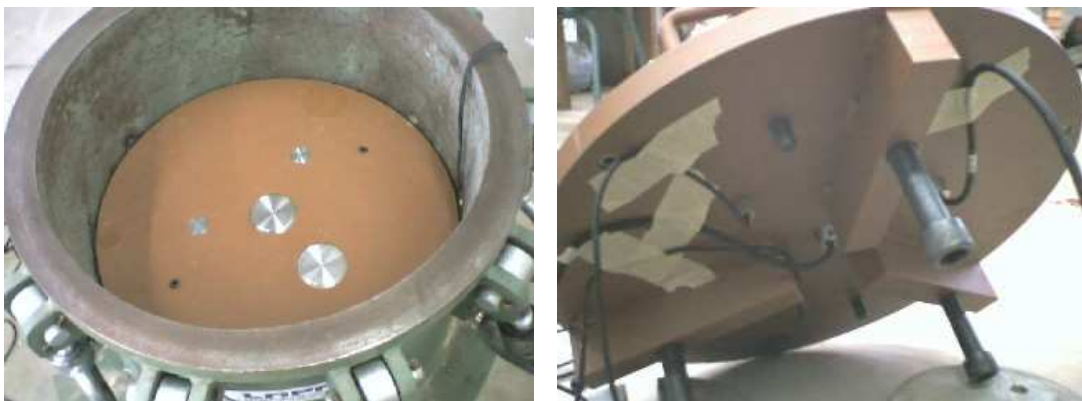


Figura 3.6: vistas da câmara de calibração média:  $H/D = 0,4$

A terceira câmara, chamada de câmara pequena, é um molde para ensaios de CBR, com dimensões de 15 cm de diâmetro e 18 cm de altura, conforme pode ser observado na Figura 3.7. Seu fator de forma (altura/diâmetro) é igual a 1,2. A Figura 3.8 apresenta algumas vistas do equipamento.



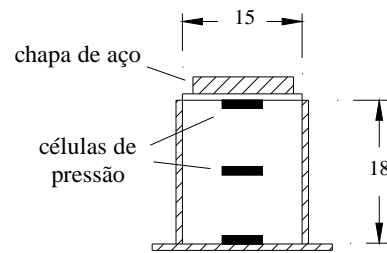


Figura 3.7: representação esquemática da câmara de calibração pequena:  $H/D = 1,2$



Figura 3.8: vistas da câmara de calibração pequena:  $H/D = 1,2$

Nesta câmara a aplicação de carga é feita por um parafuso sem fim instalado em um pequeno pórtico de aço. A leitura da carga aplicada foi realizada com uma célula de carga da marca KRATOS, com capacidade de 100 kN.

#### 3.4.2.2 Método de ensaio

A primeira etapa da calibração das células de tensão total foi a de calibração em ar, a qual permitiu avaliar a linearidade das leituras dos sensores, possíveis defeitos de fabricação e também a calibração em fluido dada pelo fabricante. Esta etapa foi realizada na câmara

grande, como pode ser observado na Figura 3.9. A utilização de gesso e silicone foi necessária para garantir a estanqueidade da câmara. A pressão máxima aplicada foi de 400 kPa.



Figura 3.9: detalhe da calibração das células de tensão total em ar

Na segunda etapa de ensaios foram efetuadas calibrações das células nos meios onde estas se encontrariam nos ensaios de placa, quais sejam, areia e areia-fibra. Inicialmente as calibrações ocorreram em areia seca pela facilidade de moldagem nas três densidades relativas estabelecidas (0; 50 e 100 %).

Para a moldagem na densidade relativa de 0 %, ou seja, no estado mais fofo possível da areia, foi utilizado um funil e o material foi lançado a uma altura de 1 cm do solo. Este mesmo procedimento foi adotado nas três câmaras de calibração (ver Figura 3.10). Para as densidades relativas de 50 e 100 % foi utilizado um vibrador de imersão e o controle da densidade se deu através da medida do peso de solo inserido no volume das câmaras.



Figura 3.10: moldagem dos corpos-de-prova para calibração em areia seca

A aplicação de pressão durante os ensaios foram feitas através de incrementos de 50 kPa onde a máxima pressão atingida foi de 400 kPa para todos os ensaios.

Após uma série de ensaios em areia seca onde se procurou avaliar vários fatores relevantes na calibração de células de tensão total, procedeu-se a calibração destes sensores exatamente nas mesmas condições encontradas nos ensaios de placa, com densidade relativa fixa em 50 % e teor de umidade em 10 %. Todos os ensaios desta etapa foram realizados na câmara de calibração média.

A moldagem dos corpos-de-prova nestas condições se deu de forma diferente da anterior. Foram moldados em camadas e compactados com soquete de madeira, semelhante ao procedimento adotado nos ensaios de placa, conforme pode ser visto na Figura 3.11.



Figura 3.11: moldagem dos corpos-de-prova para calibração em areia e areia-fibra

### 3.4.3 Ensaio de Placa

Dentro do mesmo contexto de parceria entre a UFRGS e a UPF surgiu a idéia do desenvolvimento e execução de ensaios de prova de carga em placa no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade de Passo Fundo, com início nos trabalhos desenvolvidos por Casagrande (2005).

### 3.4.3.1 Equipamentos utilizados

Para a realização dos ensaios de placa, utilizou-se uma placa rígida de aço de 2,54 cm de espessura e 30 cm de diâmetro. Três células de tensão total foram embutidas nesta placa de forma que estas ficassem perfeitamente niveladas com a placa. Na Figura 3.12 é possível visualizar a distribuição destas células na placa.



Figura 3.12: distribuição das células de tensão total na placa de aço

Para acomodar as misturas areia e areia-fibra, foi construída uma caixa de madeira, reforçada com cantoneiras de aço, com dimensões necessárias para garantir, do ponto de vista prático, um meio contínuo, no caso o solo, sem a interferência das paredes e do fundo da caixa. Uma das células de contato foi instalada no fundo da caixa para verificar se as tensões que chegariam ao fundo seriam significantes. As demais células de tensão total foram instaladas no interior das camadas de solo, como pode ser visto na Figura 3.13.

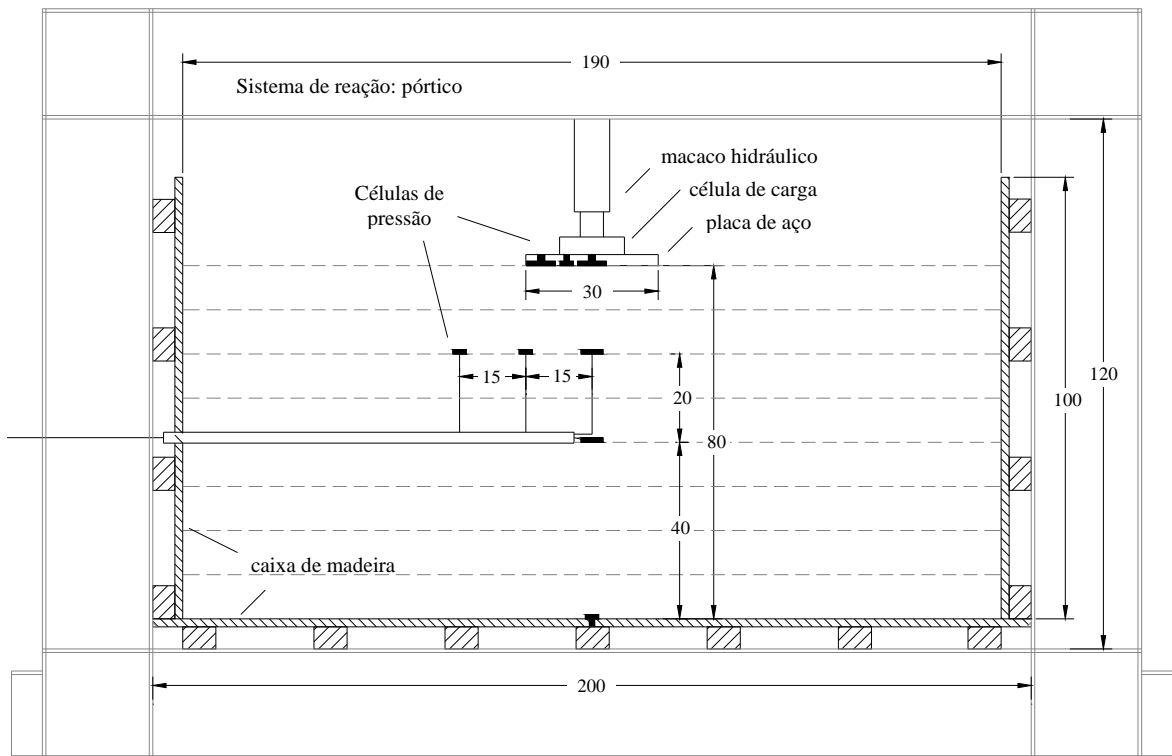


Figura 3.13: corte esquemático da caixa de acomodação e células de tensão total

O sistema de reação e transmissão de carga utilizado foi composto por um pórtico com carga de trabalho de até 250 kN, desenvolvido pelo Laboratório de Ensino de Sistemas Estruturais (LESE) da Universidade Passo Fundo, onde foram empregados perfis tipo I com espessura de 12,7 mm. O sistema de aplicação de carga se deu através do emprego de um macaco hidráulico com 250 kN de carga máxima, juntamente a uma bomba manual.

O sistema de medição de carregamentos foi composto por uma célula de carga com capacidade de 100 kN. O deslocamento da placa foi monitorado através de régua resistivas com curso de 50 mm e 0,01 mm de precisão. Para os deslocamentos externos foram utilizados defletômetros digitais. Previamente à execução dos ensaios foi realizada uma calibração dos medidores de deslocamento, bem como da célula de carga utilizada. O sistema de medição de deslocamentos pode ser observado na Figura 3.14, a seguir.



Figura 3.14: sistema de medição de deslocamentos

Os dados foram digitalizados através de uma placa conversora A/D (analógico para digital), onde foram monitorados cargas, recalques e tensões totais. A placa possui 16 canais com ganhos de amplificação de 1x, 50x, 100x, 300x, 600x e 1000x, ajustáveis individualmente.

A Figura 3.15 mostra um detalhe do ambiente de ensaio, para uma melhor visualização dos sistemas de preparação, reação e aquisição de dados.



Figura 3.15: vista do ambiente de ensaio

### 3.4.3.2 Processos de mistura e construção das camadas

A preparação das misturas foi executada com auxílio de uma betoneira de 350 litros. A areia foi pesada com auxílio de uma balança, com 100g de precisão e espalhada para secagem ao ar para posteriormente ser utilizada nas misturas. As fibras, assim como para os outros ensaios descritos, necessitaram ser previamente desfiadas para se obter um maior êxito na mistura, processo este executado manualmente.

A compactação se deu em camadas com 10 cm de espessura cada uma. A seqüência do lançamento de material para o interior da betoneira segue o mesmo procedimento adotado em laboratório, primeiramente a areia e as fibras, para uma melhor homogeneização da mistura, depois de alguns minutos se adicionava a água. Logo após a mistura, procedeu-se o lançamento desta no interior da caixa.

A instalação das células de tensão total no interior das camadas de solo se deu concomitantemente à execução das camadas. Os cabos foram protegidos por um tubo de PVC. A Figura 3.16 mostra alguns detalhes da execução das camadas, inclusive a utilização de areia tingida para posterior visualização das deformações das camadas de solo.



Figura 3.16: detalhes da execução das camadas de solo

Os parâmetros de compactação das camadas de areia e areia-fibra adotados para a execução dos ensaios de placa (como teor de umidade, pesos específicos aparente seco e densidade relativa), foram mencionados anteriormente, no item 3.2.4.

O controle da umidade e da densidade da mistura se deu através da extração de cilindros com solo do interior da caixa. Tal controle foi executado para todas as camadas. A faixa de variação de umidade monitorada foi entre 9,8% e 10,9%. Após a compactação, as camadas foram cobertas com lona plástica a fim de evitar perdas de umidade até o momento da execução do ensaio.

#### 3.4.3.3 Método de ensaio

Após a execução das camadas o sistema de reação e a placa de aço circular de 0,30 m de diâmetro eram posicionados para a execução de cada ensaio. As cargas foram aplicadas através de um macaco hidráulico e medidas em uma célula de carga, enquanto os recalques foram medidos por réguas resistivas, com divisões de 0,01 mm e 50 mm de curso.

As réguas resistivas foram fixadas a uma viga de referência apoiada em bases de madeira e estes foram conectados sobre a placa em três pontos dispostos 120° um do outro. Defletômetros digitais foram instalados sobre a camada tratada a distâncias de 5, 15 e 25 cm da borda da placa, conforme visto na Figura 3.14. As bases de madeira foram instaladas fora da área afetada pelo campo de deformações provocado pelo carregamento da placa.

A aplicação do carregamento foi realizada em estágios sucessivos. Os valores dos incrementos de carga seguiram as recomendações da NBR 6489 (ABNT, 1984-b), que limita o valor do incremento em no máximo 20% da carga de ruptura prevista.

A aplicação de um novo estágio de carregamento só era realizada após ser verificado o critério de estabilização dos recalques do estágio anterior, propostos pela MB 3472 (ABNT, 1991-a), a qual estabelece que:

$$L_n - L_{n-1} < 5 \% (L_n - L_1) \quad (3.2)$$

Onde:

$L_n$  = leitura em um instante  $n$  qualquer;

$L_{n-1}$  = leitura imediatamente anterior à leitura  $L_n$ ;



$L_1$  = primeira leitura após a aplicação do estágio de carregamento.

Durante os ensaios verificou-se que a estabilização dos deslocamentos ocorria rapidamente para primeiros incrementos de carga, em torno de quinze minutos, sendo que nos últimos incrementos a estabilização ocorria em uma ou duas horas.

Ao final de cada ensaio ocorria a exumação das camadas de areia, onde foi possível visualizar a deformação de cada camada após o ensaio devido à utilização de finas camadas de areia tingida, conforme visto na Figura 3.16, no método de execução das camadas. Devido à sucção existente no solo úmido foi possível executar um corte de 90° da primeira até a última camada de solo, como pode ser observado a seguir, na Figura 3.17.



Figura 3.17: detalhes da exumação das camadas de areia

## **CAPÍTULO 4**

### **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

#### **4.1 Considerações iniciais**

Nos itens seguintes serão apresentados, em primeira instância, os resultados dos ensaios preliminares de resistência à compressão confinada, que ajudaram na tomada de decisão para os ensaios posteriores, seguidos dos resultados das análises numéricas para as câmaras de calibração. Na seqüência os resultados e análises das calibrações feitas em laboratório para as células internas e de contato, tanto em ar, quanto em areia e areia-fibra. Por fim, os resultados e análises dos ensaios de placa.

#### **4.2 Ensaios de compressão confinada**

Como ensaios preliminares de caracterização, avaliou-se o efeito do teor e comprimento de fibras na resposta tensão-deformação dos compósitos, bem como a influência do teor de umidade nas areias não reforçadas. Nos itens subseqüentes serão apresentados os resultados e algumas análises qualitativas destes materiais, lembrando que foi mantida constante a tensão confinante, em 13 kPa, para todos os ensaios.

##### **4.2.1 Influência do Teor e Comprimento das fibras**

As curvas tensão desvio *versus* deformação axial obtidas nos ensaios de compressão confinada são apresentadas nas Figuras 4.1 (a) e 4.1 (b), para a areia reforçada com fibras de 24 mm de comprimento nos diferentes teores de fibras e para a areia reforçada com fibras de 50 mm de comprimento nos mesmos teores de fibras. O teor de umidade foi de 10%.

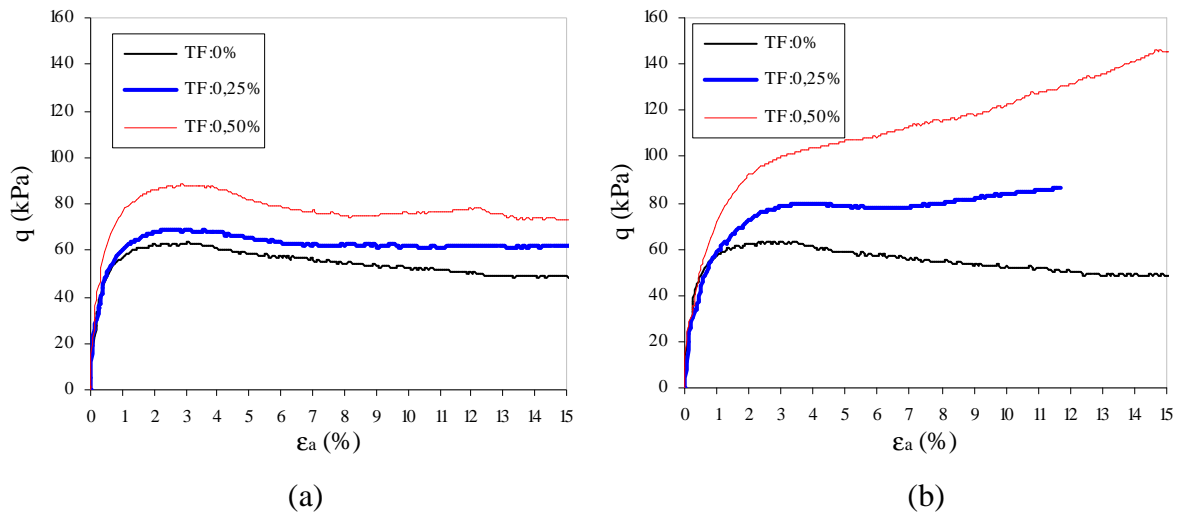


Figura 4.1: curvas tensão desvio *versus* deformação axial para a areia reforçada com fibras de comprimento: (a) 24 mm e (b) 50 mm

Em linhas gerais o comportamento tensão-deformação da areia não reforçada pode ser descrito como sendo dúctil apesar da pequena queda da tensão com o aumento da deformação. Todos os materiais apresentaram rupturas conhecidas como “*bulging*”, onde as deformações são distribuídas por toda a amostra.

Sobre o teor de fibras, é possível dizer que o seu aumento proporcionou um ganho de resistência para todos os materiais, porém com efeito mais pronunciado para fibras mais longas, inclusive podendo-se observar que o material reforçado com fibras de 50 mm (Figura 4.1 - b) apresentou um contínuo crescimento da tensão para níveis elevados de deformação.

Ganhos consideráveis de resistência com o aumento do teor ou comprimento de fibras já foram observados por diversos autores (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; McGown *et al.*, 1988; Maher & Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Specht, 2000; Santoni *et al.*, 2001; Heineck, 2002; Vendruscolo, 2003). Em grande parte dos estudos desenvolvidos com solos reforçados com fibras, pelo grupo de geotecnia do PPGEC/UFRGS, foram obtidos resultados satisfatórios para fibras com comprimento de 24 mm e diâmetro de 3,3 dtex. O estudo com fibras de diâmetro elevado (100 dtex) exigiu um aumento no comprimento das fibras (50 mm) para obtenção de maior ganho de resistência dos compósitos.

A área sob a curva tensão-deformação de um material é definida como capacidade de absorção de energia de deformação ( $E_{def}$ ), que é adotada para avaliar a tenacidade dos materiais, que expressa a energia absorvida pelo mesmo ao deformar-se. A Figura 4.2 apresenta as curvas de energia de deformação absorvida em função da deformação axial.

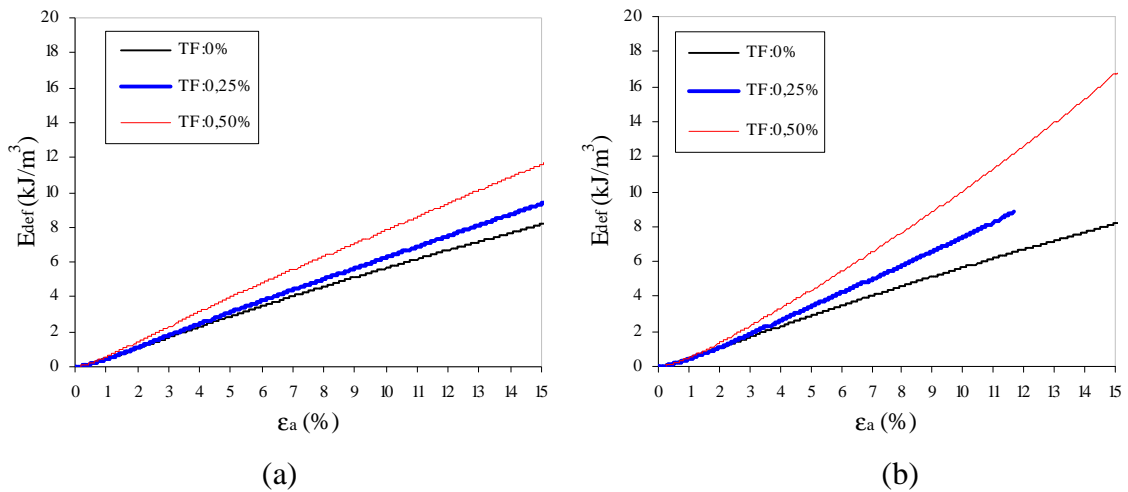


Figura 4.2: curvas de capacidade de absorção de energia *versus* deformação axial para a areia reforçada com fibras de comprimento: (a) 24 mm e (b) 50 mm

Na Figura 4.2 observa-se claramente que os maiores ganhos de capacidade de absorção de energia estão nos materiais reforçados com fibras de 50 mm de comprimento, onde este ganho chega a ser duplicado na areia reforçada com 0,5 % de fibras. A taxa de aumento da energia de deformação com a introdução de 0,5 % de fibras é praticamente constante.

#### 4.2.2 Influência do Teor de Umidade

A Figura 4.3 apresenta os resultados dos ensaios realizados em areia não reforçada com 0 e 10 % de umidade, bem como as análises de energia de deformação absorvida.

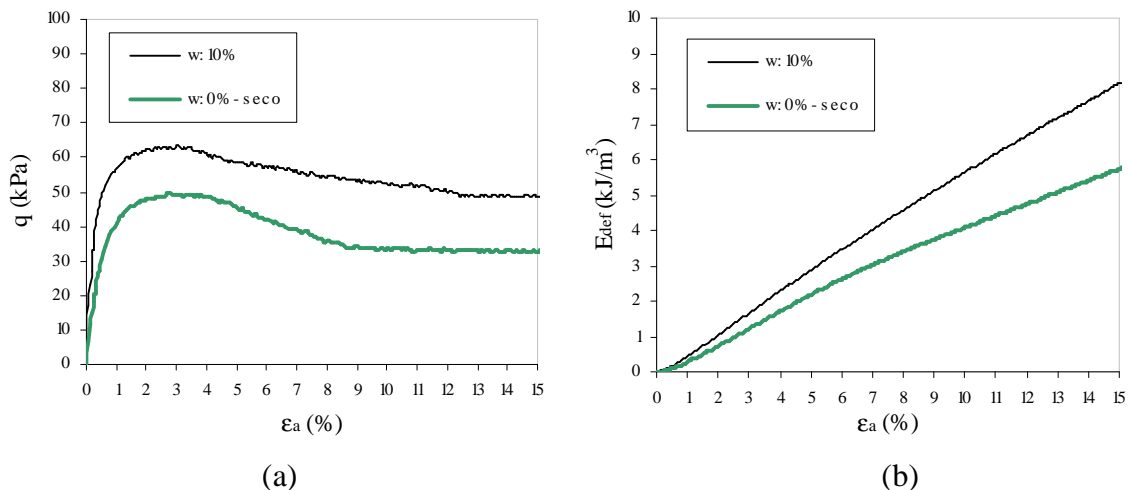


Figura 4.3: influência do teor de umidade: (a) na tensão desvio e (b) na capacidade de absorção de energia da areia

A análise da Figura 4.3 (a) mostra que a areia seca ( $w: 0\%$ ) e a úmida ( $w: 10\%$ ) apresentam comportamentos semelhantes, com a mesma forma de curva tensão-deformação porém em escalas diferentes, ou seja, a areia úmida apresenta um ganho de resistência devido, provavelmente, a sucção existente de 5,45 kPa, como a medida por Santos (2004).

A energia de deformação absorvida do material úmido também é elevada comparando-se com a areia seca e mantêm-se durante todo o carregamento.

Os ensaios de compressão confinada foram decisivos na tomada de decisão quanto ao comprimento das fibras a serem utilizadas nos demais ensaios, bem como nas comparações entre as semelhanças e diferenças entre os materiais reforçados e não reforçados, úmidos ou secos.

### 4.3 Análises numéricas

Para a interpretação dos resultados das calibrações em laboratório se fez necessária a utilização de ferramentas computacionais na análise da distribuição de tensões verticais no interior das diferentes câmaras de calibração.

Como se sabe, na interface de contato entre as paredes das câmaras e o solo não ocorre um deslocamento vertical livre quando o solo é solicitado com carregamento vertical. Se houvesse esta liberdade total de deslocamento a tensão vertical em todos os pontos no interior da câmara seria exatamente igual à tensão aplicada na sua superfície. O que ocorre é uma redistribuição de tensões, que é função principal da relação altura *versus* diâmetro da câmara ( $H/D$ ) e através dos Métodos dos Elementos Finitos é possível estimar estes valores.

As análises feitas considerando-se a impossibilidade de deslocamento vertical nas faces junto às paredes das câmaras estão apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5. Os resultados são apresentados para o último incremento de carga, referente a uma tensão de 400 kPa. Como as análises são axissimétricas, os gráficos apresentam-se com metade do diâmetro.

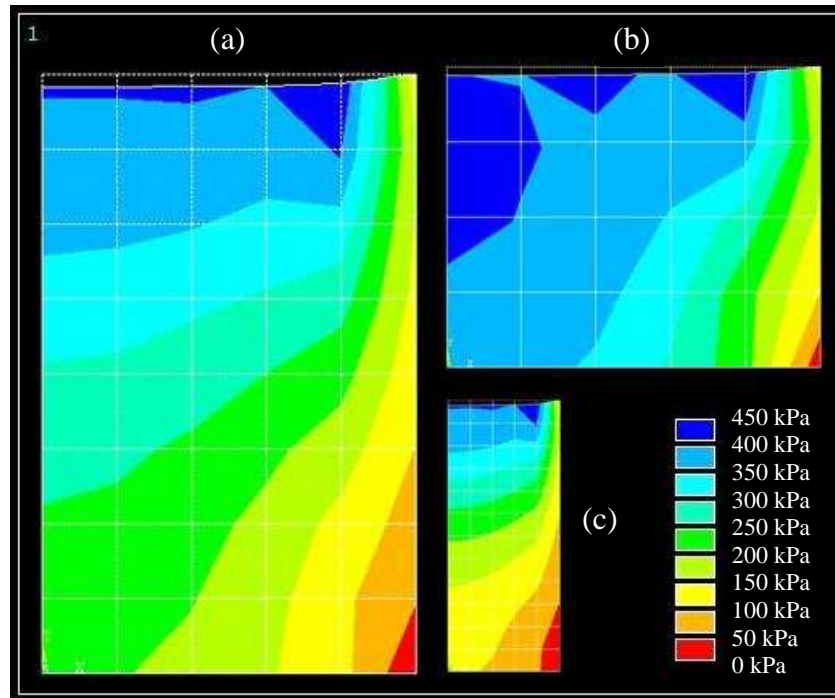


Figura 4.4: distribuição de tensões nas câmaras: (a) grande; (b) média e (c) pequena

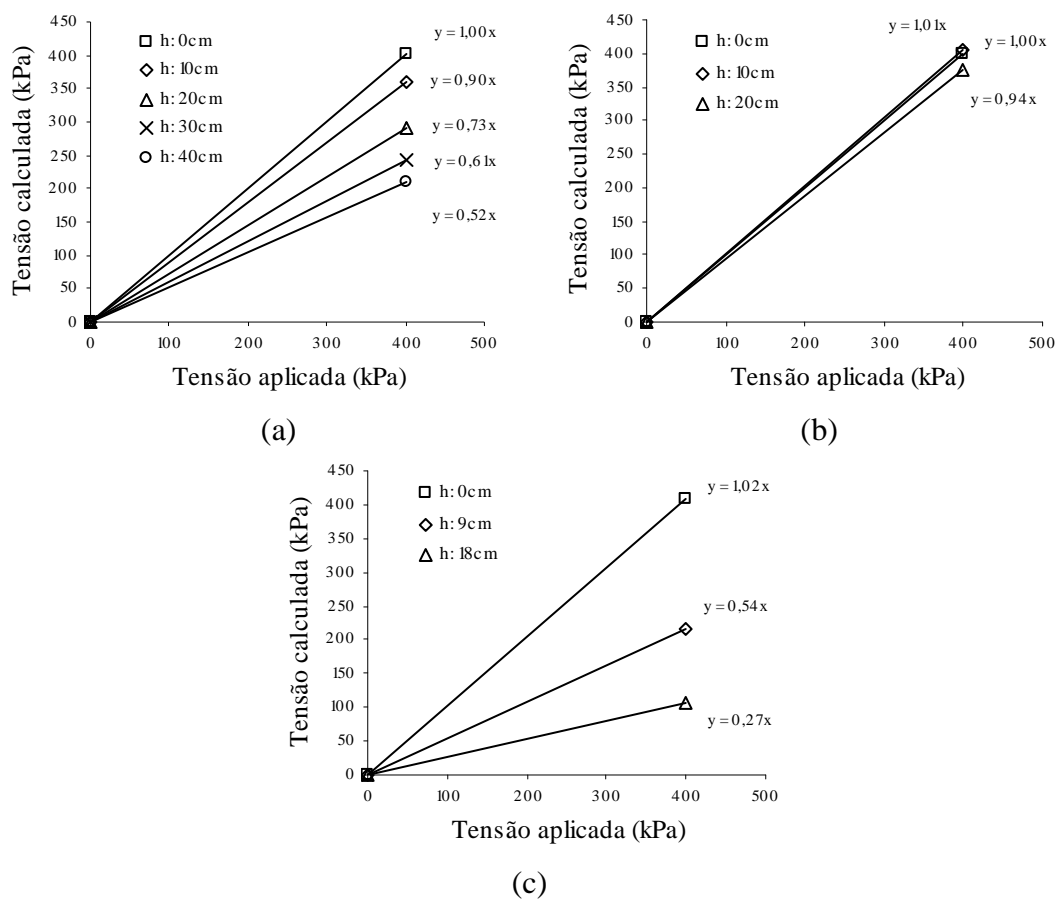


Figura 4.5: distribuição de tensões nas câmaras: (a) grande; (b) média e (c) pequena

É possível verificar que a distribuição das tensões verticais em cada câmara de calibração se dá de forma diferente, onde há uma redução da tensão que chega até o fundo da câmara na medida em que a relação H/D aumenta, ou seja, quanto mais esbelta a câmara, menor é a tensão que chega até o seu fundo. Sendo assim, a posição de inserção da célula na câmara e o seu fator de forma são relevantes na busca do valor correto de CAF.

#### 4.4 Calibrações em laboratório

Neste item são apresentadas primeiramente as calibrações das células de tensão total em ar, tanto as células internas quanto às de contato. Na sequência são apresentadas as calibrações feitas em areia seca, como estudo experimental para avaliação da câmara e posição ideal de calibração. Por fim os resultados das calibrações feitas na areia e nos compósitos areia-fibra.

##### 4.4.1 Calibração em Ar

A Figura 4.6 apresenta os resultados das calibrações em ar das quatro células internas utilizadas nesta pesquisa. Linhas de tendência linear foram utilizadas para mostrar a linearidade da resposta destes sensores, que apresentaram coeficientes de determinação  $R^2$  muito próximos à unidade.

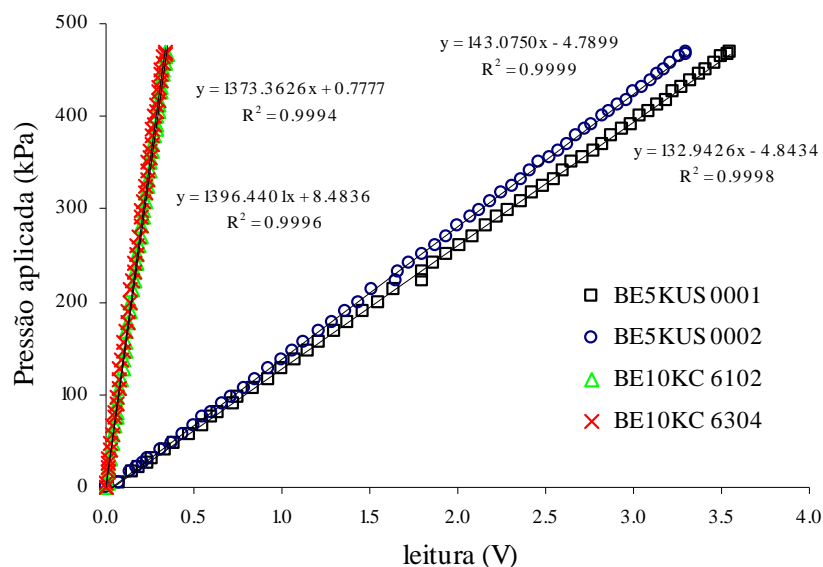


Figura 4.6: calibração em ar das células de tensão total do tipo interna

A Figura 4.7 apresenta os resultados das calibrações em ar das quatro células de contato utilizadas. Assim como nas células internas, cada par de células apresentou constantes de calibração muito semelhantes entre si.

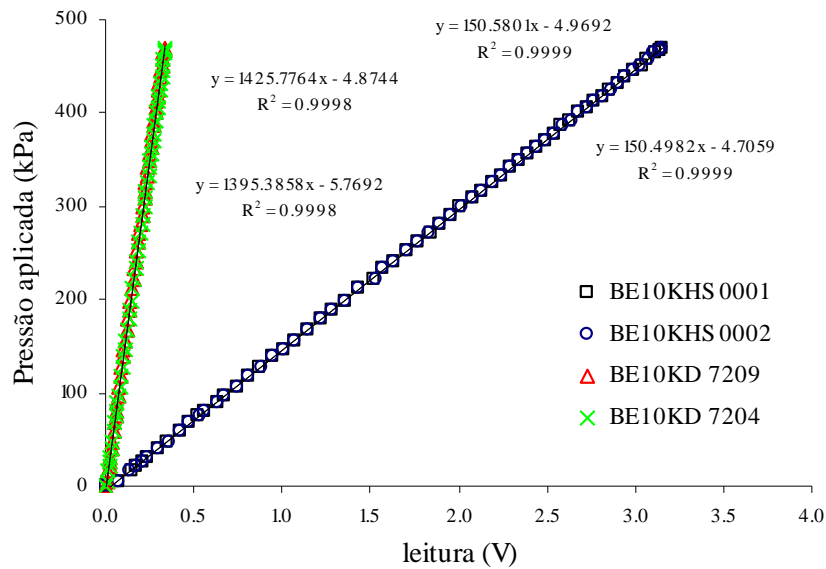


Figura 4.7: calibração em ar das células de contato

A Tabela 4.1 apresenta as constantes de calibração das células obtidas em laboratório e também as constantes dadas pelo fabricante.

Tabela 4.1: constantes obtidas através de calibração em ar

Nome	Tipo	Excitação nominal (Volt)	Constante de calibração obtido(kPa/Volt)	Constante de calibração dada pelo fabricante (kPa/Volt)
BE10KC 6102	interna	2,5	1373,36	1369,86
BE10KC 6304	interna	2,5	1396,44	1388,88
BE5KUS 0001	interna	5,0	132,94	122,73
BE5KUS 0002	interna	5,0	143,07	132,17
BE10KHS 0001	contato	10,0	150,58	133,55
BE10KHS 0002	contato	10,0	150,50	133,01
BE10KD 7204	contato	2,5	1395,38	1361,30
BE10KD 7209	contato	2,5	1425,77	1379,31



A calibração em ar se fez necessária para verificação de possíveis defeitos nos sensores e também para a verificação da calibração dada pelo fabricante, que diferiu da calibração feita nesta pesquisa. Todos os sensores apresentaram constantes de calibração superiores às aquelas dadas pelo fabricante, sendo que alguns apresentam diferenças de até 12 %. Isto provavelmente está associado a pequenas diferenças de voltagem na alimentação fornecida pela placa de aquisição de dados utilizada e aquela a qual o sensor foi calibrado pelo fabricante, juntamente com possíveis diferenças do ganho de sinal para leitura da voltagem de saída de cada sensor.

#### 4.4.2 Calibração em Areia Seca

##### 4.4.2.1 Células internas

Para o estudo da influência do tamanho da câmara de calibração, da posição de instalação das células, do índice de vazios da amostra, dentre outros fatores, na resposta das células internas foi utilizada a mesma célula para todos os ensaios, a BE5KUS 0001 escolhida aleatoriamente.

Com base nos ensaios realizados em areia, foi observada uma excelente repetibilidade dos valores medidos e também uma correlação do tipo linear das tensões lidas com o aumento das pressões aplicadas através do transdutor de pressão, como pode ser observado na Figura 4.8. Este ensaio foi realizado em areia no seu estado mais fofo possível, com índices de vazios variando entre 0,87 e 0,88, apresentando taxas de calibração variando entre 1,05 e 1,04.

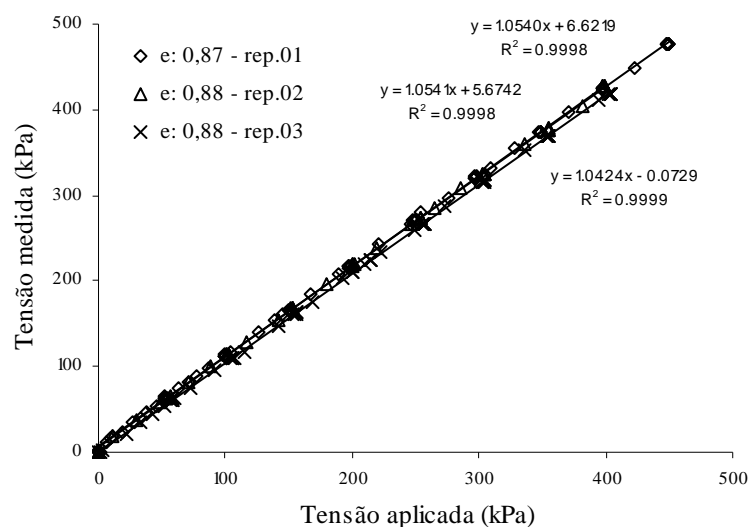


Figura 4.8: repetibilidade das leituras

A Figura 4.9 apresenta os resultados das calibrações em diferentes índices de vazios, representando o estado mais fofo possível, o mais compacto possível e um estado intermediário, com densidades relativas de 0, 50 e 100 %. A análise destes resultados mostra que praticamente não há diferenças de taxas de calibração com a variação de índices de vazios.

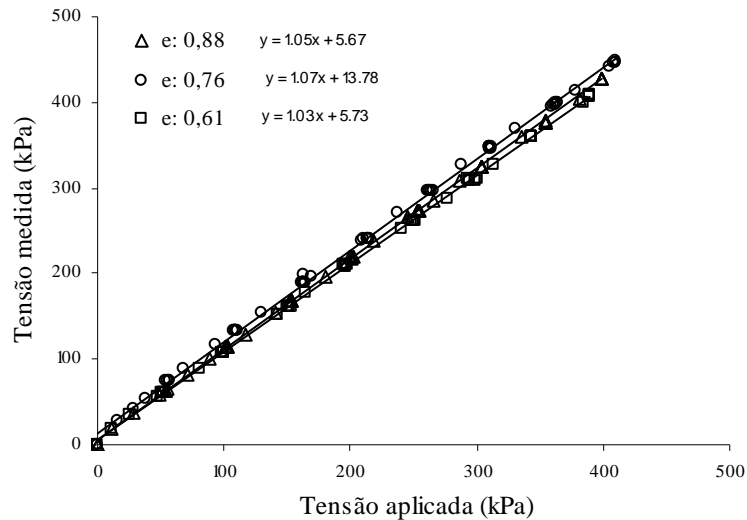


Figura 4.9: influência do índice de vazios nas leituras de tensão

Os ensaios anteriores, realizados na câmara de calibração maior, serviram de ensaios piloto para a definição do índice de vazios que seria utilizado para os próximos ensaios. Como não houve diferença nos resultados foi adotado o índice de vazios máximo para a execução de todos os ensaios posteriores, visto que, ensaios com índices de vazios tendendo ao mínimo, ou seja, ensaios realizados com a utilização de vibrador para a moldagem, apresentavam maior dispersão nos resultados.

Na seqüência do estudo é avaliada a resposta das células de tensão nas diferentes câmaras de calibração, sabendo-se, através de análises numéricas anteriores, que a configuração geométrica da câmara influencia nas tensões aplicadas aos sensores e conseqüentemente nas constantes de calibração destes sensores.

Tais sensores foram calibrados não apenas no alinhamento central das câmaras de calibração, mas também no alinhamento lateral junto à borda das câmaras, para verificar a tensão atuante nestes alinhamentos. As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam tais calibrações.

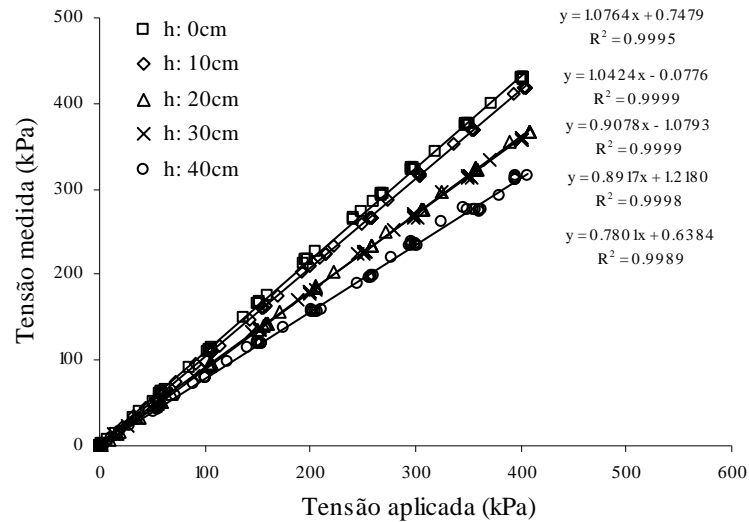


Figura 4.10: tensão aplicada *versus* tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento central da câmara de calibração grande

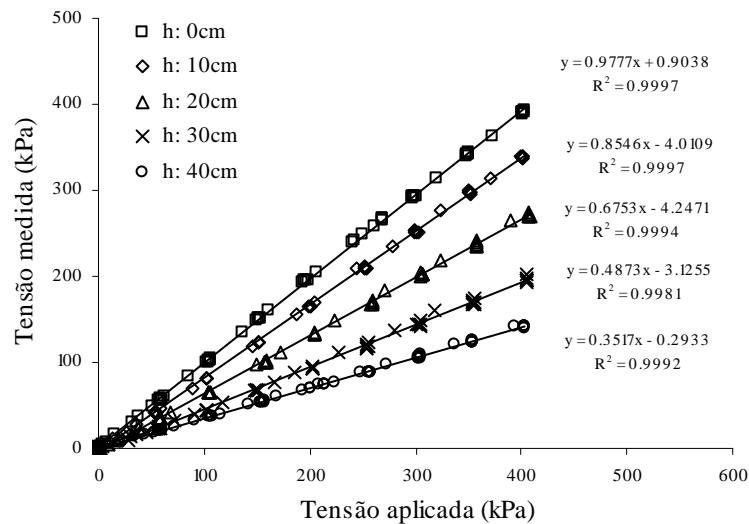


Figura 4.11: tensão aplicada *versus* tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento lateral da câmara de calibração grande

Duas análises podem ser feitas a partir destas figuras. A primeira está relacionada às diferentes respostas para as diferentes profundidades analisadas, onde se pode perceber a diminuição da tensão atuante com o aumento da profundidade de instalação das células. O segundo ponto diz respeito à distribuição horizontal de tensões. A utilização de uma membrana de borracha no contato entre o solo e o ar garante uma distribuição uniforme de tensões na superfície de toda a câmara de calibração, porém as paredes da câmara acabam influenciando nos resultados devido à impossibilidade de livre deslocamento vertical do solo no contato solo/parede.

A análise numérica ajuda neste sentido, onde se consegue entender melhor como ocorre a distribuição de tensões no interior destas câmaras. A Figura 4.12 apresenta um resumo das calibrações feitas em laboratório juntamente com as análises feitas numericamente. Como todas as calibrações são lineares, é possível representá-las em termos de porcentagem da tensão vertical medida pela aplicada por estes sensores, onde uma constante de valor 1,00 representa uma tensão medida de 100 % em relação a aplicada.

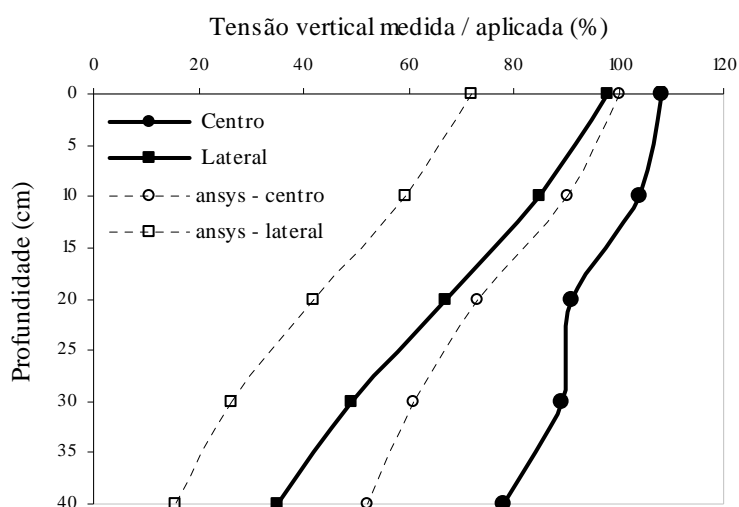


Figura 4.12: tensão vertical medida e estimada ao longo da profundidade para a câmara de calibração grande

A análise desta figura mostra claramente a influência da posição da célula na sua tensão vertical medida e estimada. A forma como as tensões medidas diminuem ao longo da profundidade é muito semelhante à forma estimada através das análises numéricas, tanto no alinhamento central quanto no alinhamento lateral.

Os resultados das tensões verticais medidas e estimadas não são exatamente iguais, lembrando que as tensões estimadas pela análise numérica foram realizadas sem a presença das células de tensão total, portanto realmente não deveriam ser iguais. Análises numéricas com a inserção de células de tensão ao solo deverão apresentar resultados de tensão vertical estimadas ligeiramente superiores às estimadas sem tais sensores, devido ao enrijecimento local provocado pela inserção de um elemento com módulo maior que o material original.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam os resultados das calibrações em laboratório na câmara de tamanho médio.

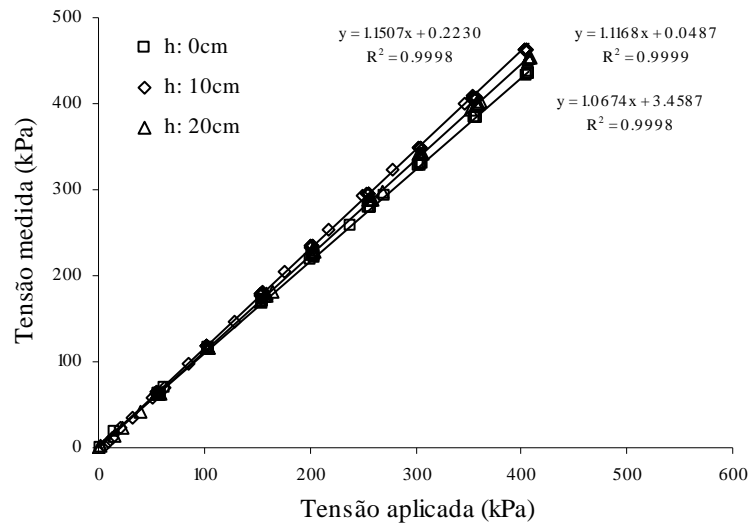


Figura 4.13: tensão aplicada *versus* tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento central da câmara de calibração média

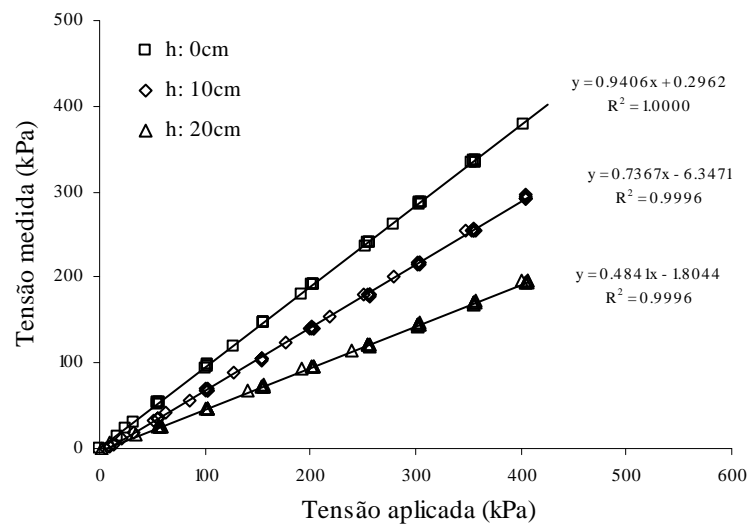


Figura 4.14: tensão aplicada *versus* tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento lateral da câmara de calibração média

Esta câmara é a que apresenta o menor fator de forma dentre as câmaras ( $H/D = 0,4$ ), ou seja, é a menos esbelta e que apresenta resultados mais expressivos. A análise da Figura 4.13 mostra um pequeno acréscimo de tensões com o aumento da profundidade, sugerindo um acúmulo de tensões da região central da câmara. Já nas laterais as tensões diminuem com o aumento da profundidade.

A Figura 4.15 mostra este aumento na leitura de tensões na região central da câmara juntamente com as simulações numéricas.

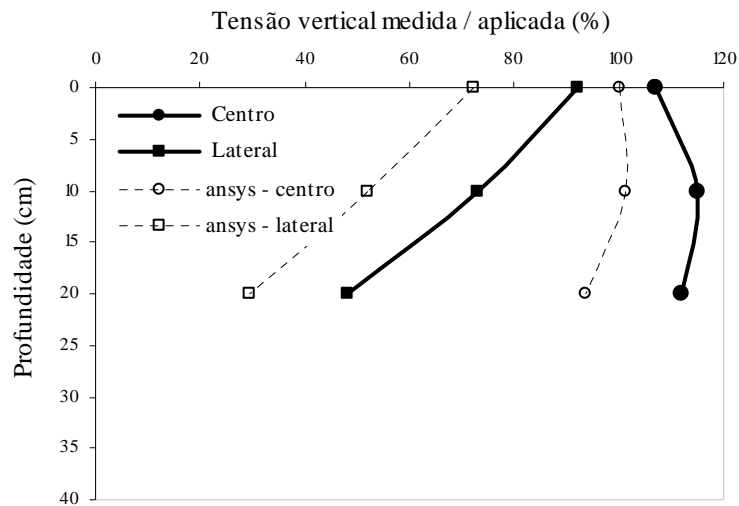


Figura 4.15: tensão vertical medida e estimada ao longo da profundidade para a câmara de calibração média

Assim como nos resultados da câmara anterior, esta apresentou uma boa concordância em termos qualitativos entre a tensão vertical medida em ensaios de laboratório e a tensão vertical estimada na análise numérica realizada no Ansys.

A Figura 4.16 apresenta os resultados das calibrações em laboratório realizadas na câmara menor. Devido ao tamanho reduzido desta câmara foram realizadas calibrações apenas ao longo do alinhamento central da câmara. Os resultados mostram uma grande redução das tensões medidas com o aumento da profundidade de instalação dos sensores.

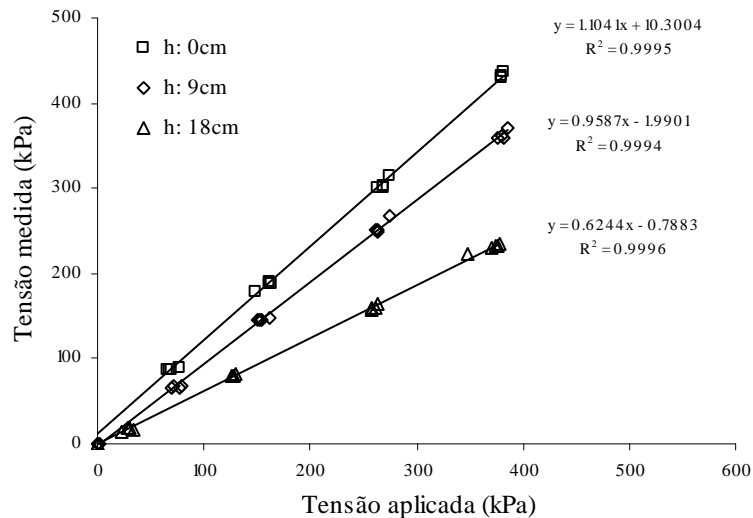


Figura 4.16: tensão aplicada *versus* tensão lida em diferentes profundidades no alinhamento central da câmara de calibração pequena

A tensão vertical medida ao longo da profundidade no alinhamento central da câmara de calibração pequena está apresentada na Figura 4.17. Nesta câmara a análise numérica apresentou a maior diferença entre tensões medidas e estimadas (Ansys) comparando-se com as outras câmaras, porém estas análises numéricas ainda representam qualitativamente bem a diminuição da tensão atuante com o aumento da profundidade.

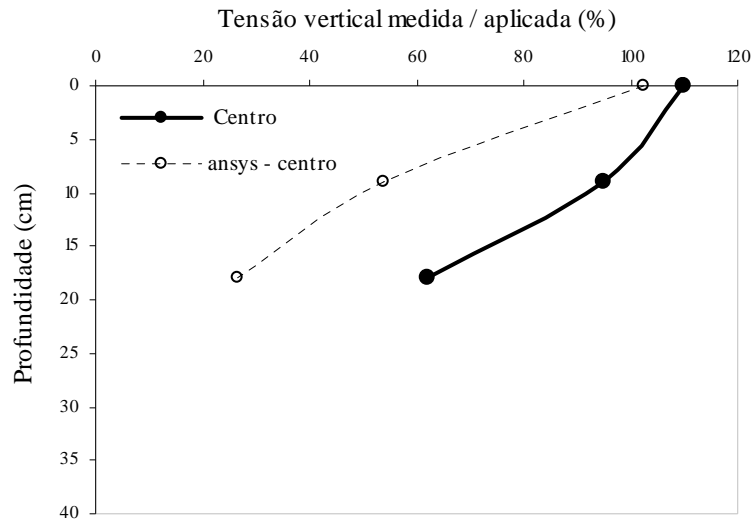


Figura 4.17: tensão medida ao longo da profundidade *versus* tensão estimada numericamente para a câmara pequena

Na Figura 4.18 está apresentado um gráfico resumo das calibrações em laboratório nas três câmaras juntamente com as análises numéricas no alinhamento central.

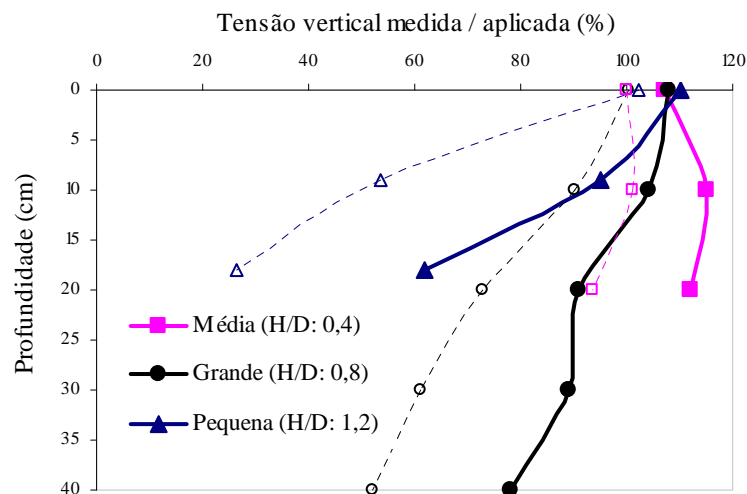


Figura 4.18: tensão vertical medida e estimada ao longo da profundidade para todas as câmaras no alinhamento central

Com a análise de todos os resultados em um mesmo gráfico é possível observar que a distribuição das tensões verticais é função do fator de forma das câmaras, onde a câmara com maior fator de forma (1,2) apresenta uma maior redução das tensões com o aumento da profundidade. Calibrar células de tensão total no centro de câmaras de calibração sem tomar cuidado com uma análise criteriosa de tensões atuantes nestas câmaras pode levar a erros no cálculo do fator de atuação das células (CAF) tanto para mais ( $H/D = 0,4$ ), quanto para menos ( $H/D = 1,2$ ).

Calcular o CAF sem uma análise de tensões atuantes nas células levaria a erros significativos, pois se teria que tomar a pressão aplicada como tensão atuante, o que já foi comprovado experimentalmente e numericamente que as duas tensões não são as mesmas. Porém é comum a adoção da tensão aplicada na célula pela tensão aplicada na superfície da câmara e tal simplificação incorre em erros no cálculo do CAF se a célula não estiver instalada na posição central da câmara e próximo à superfície de aplicação de pressão. Com esta simplificação os valores de CAF estariam entre 1,15 e 0,62 para a mesma célula, conforme a Figura 4.18.

Para efeito comparativo, calculou-se o valor de CAF no centro de cada câmara de calibração. Os valores estão apresentados na Tabela 4.2, com a utilização dos recursos das análises numéricas e também sem esta utilização.

Tabela 4.2: valores calculados de CAF no centro das três câmaras de calibração

Câmara	CAF (com análise numérica)	CAF (sem análise numérica)
Média	1,14	1,15
Grande	1,25	0,91
Pequena	1,77	0,95

Nota-se que o valor de CAF está variando conforme o tipo de câmara e a utilização ou não de análises numéricas, quando na verdade o valor de CAF deveria ser único, inclusive nas diferentes posições de instalação do sensor.



Com análises numéricas mais elaboradas é possível se chegar a um valor único de CAF para as diferentes câmaras de calibração e diferentes posições de instalação. Porém com os resultados analisados pode-se chegar a conclusão de que o valor de CAF mais próximo à realidade para esta célula de pressão pode ser calculado na posição central da câmara média, que apresenta uma distribuição de tensões verticais mais uniforme, comparativamente as demais.

Na prática, a utilização desta célula de tensão total com calibração apenas em ar, ou até mesmo sem calibração, utilizando apenas a constante dada pelo fabricante, estaria sujeita a erros de até 14 % abaixo dos valores corretos de tensão, tomando como CAF o valor de 1,14. Esse valor é pequeno devido a melhorias no projeto destes sensores, pois os fabricantes projetam estas células com o objetivo de se atingir valores de CAF muito próximos à unidade.

#### 4.4.2.2 Células de contato

Os ensaios de calibração das células de contato foram todos realizados na câmara média, que possibilitou a inserção destas células perfeitamente niveladas com o fundo da câmara, como observado no item 3.4.2.1 do programa experimental. A Figura 4.19 apresenta curvas tensão aplicada *versus* tensão medida em diferentes posições no fundo da câmara.

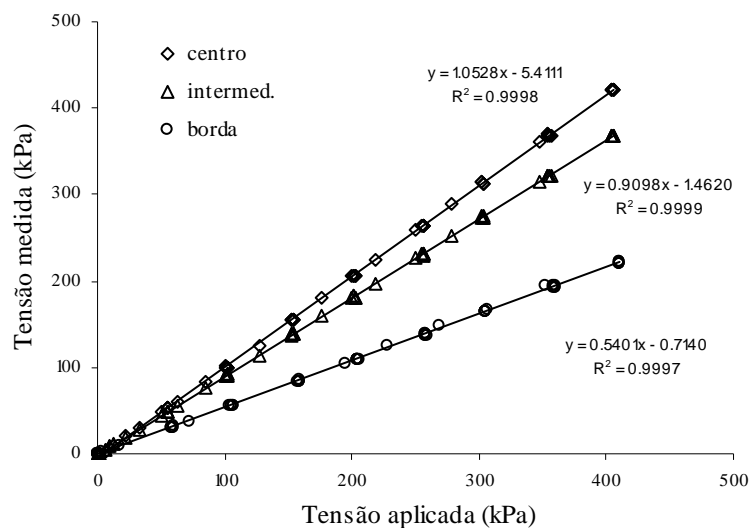


Figura 4.19: tensão aplicada *versus* tensão medida em diferentes posições no fundo da câmara de calibração média

Assim como para as células internas onde a distribuição de tensões verticais não era constante ao longo da profundidade, para as células de contato a distribuição de tensões verticais ao longo do alinhamento horizontal também não é constante, como pôde ser observada na figura anterior. As tensões verticais medidas no centro são maiores que as tensões medidas na borda do fundo da câmara de calibração.

A Figura 4.20 apresenta de forma gráfica a tensão atuante nas células nas suas diferentes posições de instalação, estimadas pelo Ansys, juntamente com as tensões medidas por elas. A razão entre a medida e a estimada é o fator de atuação da célula (CAF).

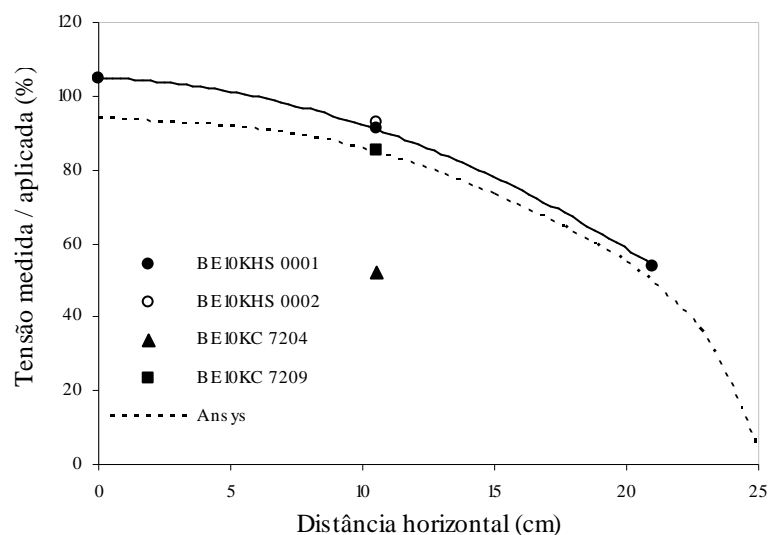


Figura 4.20: tensão medida e estimada nas diferentes posições no fundo da câmara

Os pontos plotados na Figura 4.20 representam a média de seis repetições de ensaios, onde se pode verificar os resultados individuais no anexo 1.

Há uma boa concordância entre as tensões medidas pelas células de contato e as tensões estimadas pela análise numérica, exceto para uma célula, a BE10KC 7204 que é idêntica a célula BE10KC 7209, que nas calibrações em ar apresentaram constantes de calibração muito semelhantes.

A calibração em solo se faz necessária também para identificação destes casos em que células idênticas apresentam respostas completamente distintas sob mesmas condições de carregamento. Estas diferenças podem estar associadas a diferentes níveis de deslocamento do diafragma para a mesma tensão aplicada, e que apenas com ensaios em ar, não são detectados.

A mesma pressão de ar (calibração em ar) pode provocar deslocamentos diferentes nos diafragmas de células semelhantes, não alterando a resposta de ambos os sensores. Porém, mesmos deslocamentos (calibrações em solo) podem significar respostas de tensões diferentes, pois estão associadas às calibrações feitas anteriormente em ar.

A Tabela 4.3 mostra os valores de CAF das quatro células de contato, calculados na posição de instalação intermediária, a 10,5 cm do centro da placa, onde há resultados de calibrações de todas as células.

Tabela 4.3: valores calculados de CAF para as quatro células de tensão total

Célula	CAF (com análise numérica)	CAF (sem análise numérica)
BE10KHS 0001	1,08	0,91
BE10KHS 0002	1,11	0,92
BE10KD 7204	0,62	0,52
BE10KD 7209	0,98	0,82

Valores de CAF calculados sem o auxílio de uma análise numérica incorreriam, neste caso, em erros de 16 % abaixo dos valores da Tabela 4.3, calculados com análise numérica.

#### 4.4.3 Calibrações em Areia e Areia-fibra

Nos itens anteriores foram definidos a melhor posição de instalação das células e a melhor câmara para calibração dos sensores, quais sejam, a meia altura do centro da câmara de calibração média. A partir dos resultados anteriores partiu-se para uma nova etapa de calibrações visando apenas a utilização dos valores de CAF para a correção das constantes de calibração das células de tensão total, para os materiais estudados nos ensaios de placa. A partir desta etapa as fibras de 24 mm de comprimento não serão mais utilizadas devido a sua pequena influência no ganho de resistência da areia comparativamente as fibras de 50 mm.

Os resultados serão apresentados nos próximos itens organizados em dois grupos, células internas e células de contato.

#### 4.4.3.1 Células internas

A figura 4.21 e a Tabela 4.4 apresentam o resultado das calibrações de todas as células internas em todos os materiais estudados, areia seca sem fibras, areia sem fibras, areia com 0,25 % de fibras e areia com 0,5 % de fibras.

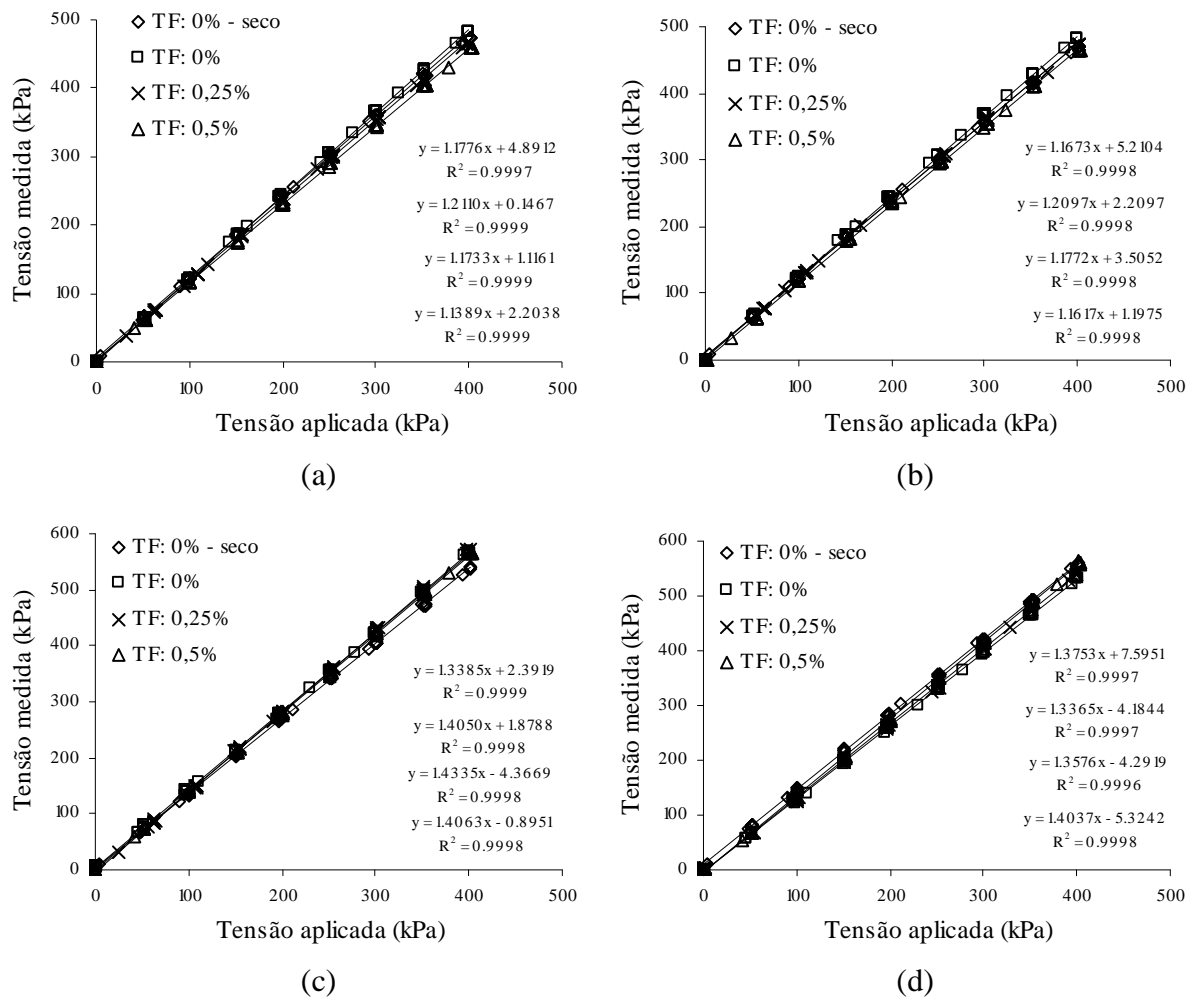


Figura 4.21: constantes de calibração das células internas:  
 (a) BE5KUS 0001; (b) BE5KUS 0002; (c) BE10KC 6102 e  
 (d) BE10KC 6304

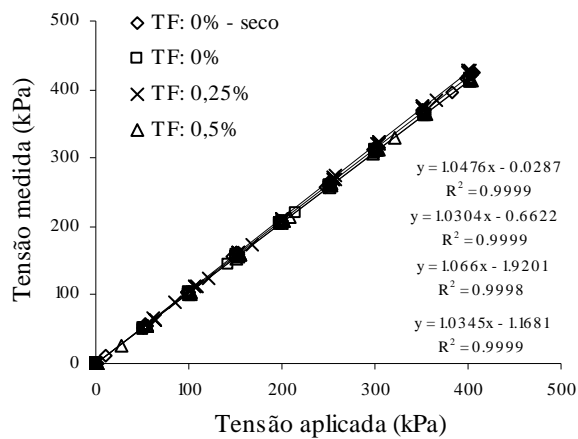
Tabela 4.4: valores de CAF das células internas

Teor fibras (%)	BE5KUS 0001		BE5KUS 0002		BE10KC 6102		BE10KC 6304	
	taxa	CAF	taxa	CAF	taxa	CAF	taxa	CAF
0 - seco	1,1776	1,163	1,1673	1,153	1,3385	1,322	1,3753	1,358
0	1,2110	1,196	1,2097	1,195	1,4050	1,388	1,3365	1,320
0,25	1,1733	1,159	1,1772	1,163	1,4335	1,416	1,3576	1,341
0,5	1,1389	1,125	1,1617	1,147	1,4063	1,389	1,4037	1,386
média		1,161		1,164		1,379		1,351

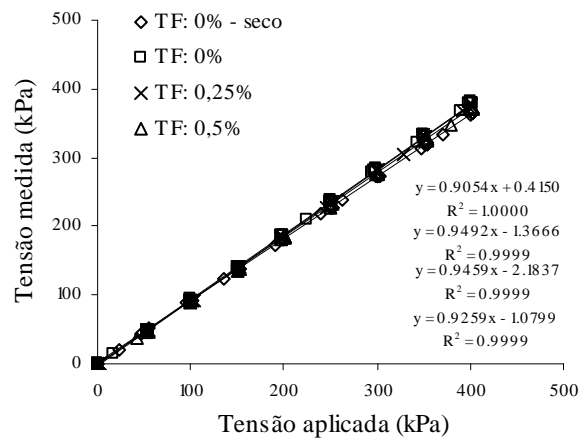
A análise da Figura 4.21 e o resumo dos resultados apresentados na Tabela 4.4 mostram claramente, para todas as células de tensão, que o tipo de material não influencia no resultado das calibrações destes sensores. A pequena variação nestas taxas é decorrente da dispersão natural deste tipo de ensaio. A atenção que se deve tomar é a ordem de grandeza destes resultados, onde a utilização de uma célula como a BE10KC 6102 (Figura 4.22 - c), sem a calibração em solo, levaria a erros de quase 40 % nas leituras de tensão (CAF = 1,379).

#### 4.4.3.2 Células de contato

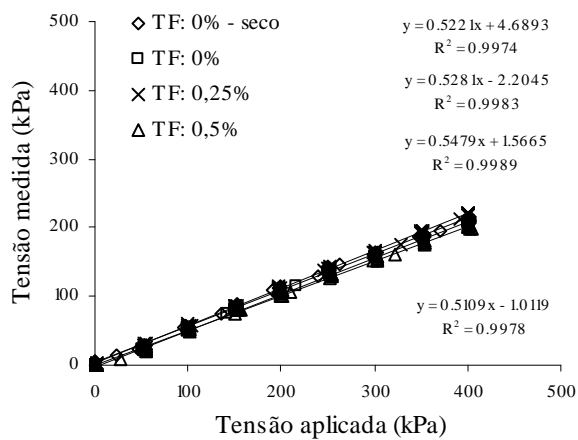
A figura 4.22 e a Tabela 4.5 apresentam o resultado das calibrações das células de contato nos materiais, areia seca, areia, areia com 0,25 % de fibras e areia com 0,5 % de fibras.



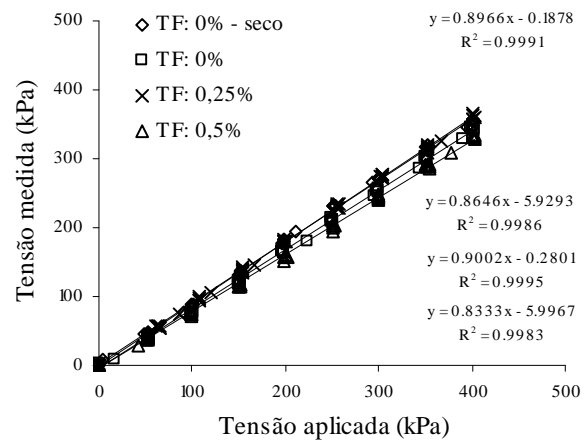
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.22: constantes de calibração das células de contato:  
 (a) BE10KHS 0001; (b) BE10KHS 0002; (c) BE10KD 7204 e  
 (d) BE10KD 7209

Tabela 4.5: valores de CAF das células de contato

	BE10KHS 0001		BE10KHS 0002		BE10KD 7204		BE10KD 7209	
Teor fibras (%)	taxa	CAF	taxa	CAF	taxa	CAF	taxa	CAF
0 - seco	1,0476	1,114	0,9054	1,078	0,5221	0,622	0,8966	1,067
0	1,0304	1,096	0,9492	1,130	0,5281	0,629	0,8646	1,029
0,25	1,0660	1,134	0,9459	1,126	0,5479	0,652	0,9002	1,072
0,5	1,0345	1,101	0,9259	1,102	0,5109	0,608	0,8333	0,992
média		1,111		1,109		0,628		1,040

Assim como para as células internas, a constante de calibração das células de contato não é influenciada pelo teor de umidade, nem pelo teor de fibras do solo. Este fato se deve aos aprimoramentos no projeto destas células que são desenvolvidas para a utilização em diversos tipos de solos com variações muito grandes de módulo de elasticidade, incluindo materiais cimentados.

Células para utilização em materiais com elevada rigidez, como estas células hidráulicas, são projetadas para desenvolverem toda a sua capacidade de carga com pequeníssimos deslocamentos da sua face ativa, em virtude da pequena deformação que um material rígido sofre quando é solicitado. Supondo agora uma célula do tipo diafragma, a qual necessita um deslocamento maior do seu diafragma para o desenvolvimento da mesma capacidade de carga da célula anterior, utilizada neste mesmo material com elevada rigidez. A pequena deformação deste material quando solicitado pode não ser suficiente para deslocar todo o diafragma da célula, que acusará na sua leitura uma tensão inferior a tensão de solicitação. Este é um caso típico de células de tensão que apresentam fatores de atuação das células (CAF) abaixo da unidade.

A célula BE10KD 7204, que apresentou resultados de CAF abaixo da unidade, não se enquadra no caso citado anteriormente, pois esta célula é hidráulica, ou seja, apresenta boa resposta a pequenos deslocamentos, e também foi utilizada em materiais com baixa rigidez, comparativamente a materiais cimentados. A causa de resultados de CAF tão baixos está provavelmente relacionada a diferentes níveis de deslocamento do diafragma para a mesma tensão aplicada, conforme visto no item 4.4.2.2.

## 4.5 Ensaio de placa

Os resultados experimentais dos ensaios de prova de carga em placa, realizados na Universidade de Passo Fundo, com o objetivo de investigar a distribuição de tensões verticais no interior das camadas de solo e no contato entre a estrutura, bem como a contribuição das fibras na mobilização de resistência, são apresentados neste item, assim como resultados dos deslocamentos na superfície fora da placa.

Os mecanismos de ruptura encontrados e a exumação dos ensaios são relatados, fotografados e apresentados em primeira instância. Na seqüência são apresentadas as curvas carga *versus*

recalque da areia seca e da areia úmida, ambas não reforçadas, e curvas tensão *versus* recalque lidos pelas células de tensão total com as análises de distribuição de tensão. Os resultados e análises dos materiais reforçados são apresentados na sequência. Uma análise global é apresentada no final deste capítulo mostrando as principais semelhanças e diferenças entre os materiais estudados.

#### **4.5.1 Mecanismos de Ruptura e Exumação dos Ensaios**

As Figuras 4.23 a 4.25 apresentam em detalhe, através de vistas superior (a) e lateral (b), os mecanismos de ruptura obtidos, respectivamente, para as camadas compactadas de areia, areia com 0,25 % de fibras e areia com 0,5 % de fibras, ambas com 50 mm de comprimento, durante o carregamento dos ensaios de placa, quando submetidos a um mesmo deslocamento final de aproximadamente 35 mm.

A exumação do ensaio em areia seca não foi possível de ser executada devida à falta de estabilidade do material. A umidade existente ( $w = 10\%$ ) nos outros ensaios garantiu a estabilidade suficiente para a execução das exumações.



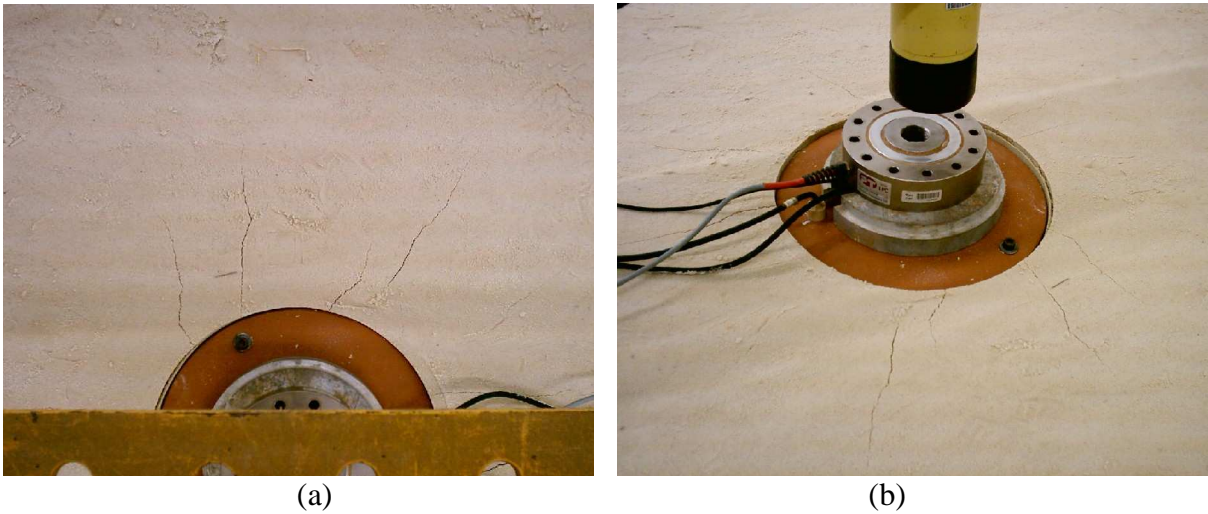


Figura 4.23: mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia sem fibras: (a) vista superior e (b) vista lateral



Figura 4.24: mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia com 0,25 % de fibras: (a) vista superior e (b) vista lateral

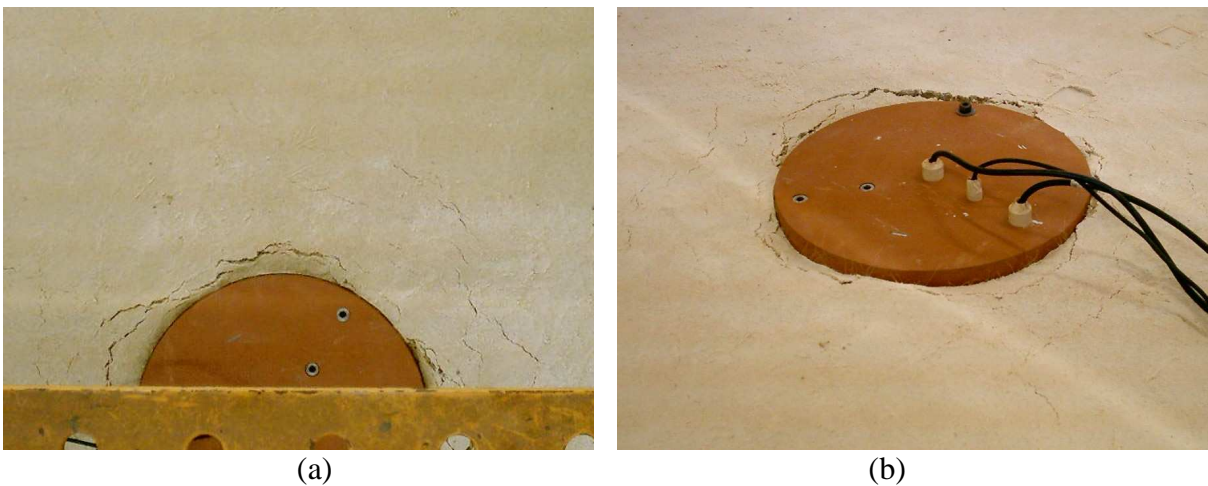


Figura 4.25: mecanismo de ruptura obtido para camadas de areia com 0,5 % de fibras: (a) vista superior e (b) vista lateral

A ruptura localizada é visível para as camadas sem adição de fibras (Figura 4.24), constituídas por superfícies de deslizamento em forma de cunha, que se iniciam junto às bordas da placa, sendo possível registrar um levantamento do solo ao redor desta.

A inclusão de fibras à matriz arenosa definitivamente atua no mecanismo de acréscimo de resistência do material, melhorando o comportamento carga-recalque, bem como influencia na mudança dos mecanismos de ruptura, entretanto, com características um pouco distintas daquelas descritas pela literatura.

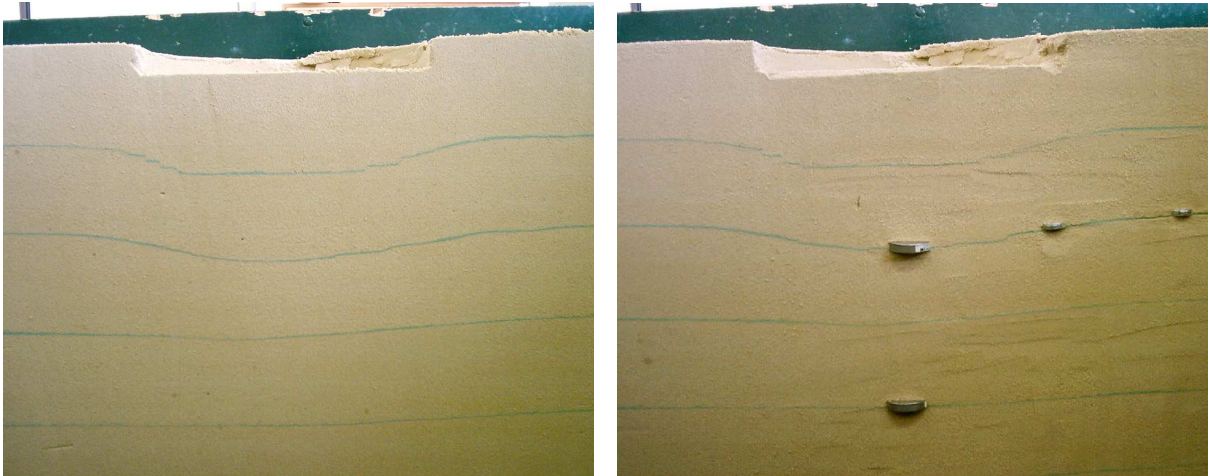
As tensões geradas durante o carregamento das camadas de areia resultam na formação de trincas perpendiculares ao redor da placa, abertas e divergentes, conforme observadas na Figura 4.24.

As trincas nas camadas de areia reforçada com fibras (Figura 4.24 e 4.25) se concentram de forma circular ao redor da placa, gerando a formação de uma zona de cisalhamento pelo acréscimo das cargas aplicadas, onde as fibras parecem inibir a propagação de fissuras, proporcionando um certo abaulamento da camada reforçada ao redor da placa. O aumento do teor de fibras na mistura reduz significativamente a formação destas trincas.

As Figuras 4.26 a 4.28 apresentam fotografias das exumações das camadas de solo, através de uma vista frontal e outra do posicionamento das células ao final dos ensaios, para a areia, areia-fibra-0,25% e areia-fibra-0,5%. O recalque máximo para todos os ensaios ficou limitado em aproximadamente 35 mm devido à capacidade máxima de carga da célula mais próxima da placa, assim como possíveis rompimentos de cabos quando submetidos a grandes deslocamentos.

A utilização de finas camadas de areia tingida de verde entre as camadas compactadas de solo se mostrou eficiente na visualização das deformações individuais de cada camada. Na Figura 4.26 (a) é possível observar uma deformação considerável das primeiras camadas de solo logo abaixo da placa de aço, sendo que a partir da quarta camada compactada não se observam deformações visíveis.

Nas camadas de areia reforçadas com fibras (Figura 4.27 e 4.28) observa-se uma deformação menos expressiva quando comparada com as camadas de areia não reforçada, sugerindo uma distribuição mais uniforme das deformações. As Figuras 4.27 (b) e 4.28 (b) mostram o perfeito alinhamento vertical das células instaladas nas diferentes camadas.



(a)

(b)

Figura 4.26: exumação das camadas de areia sem fibra: (a) vista frontal e (b) vista das células instaladas



(a)

(b)

Figura 4.27: exumação das camadas de areia com 0,25 % de fibras: (a) vista frontal e (b) vista das células instaladas



(a)

(b)

Figura 4.28: exumação das camadas de areia com 0,5 % de fibras: (a) vista frontal e (b) vista das células instaladas

As fotos das exumações apresentadas nas Figuras 4.26 (a) e (b) são resultados de uma repetição de ensaio devido a um erro de posicionamento das células no interior das camadas de solo, gerando um desalinhamento horizontal destes sensores. A Figura 4.29 apresenta a exumação do primeiro ensaio de placa da areia sem fibras. As linhas em preto indicam a posição onde deveriam ser instalados os sensores e o seu desalinhamento, de aproximadamente 5 cm, pode ser visualizado. Os erros de leitura nos sensores não permitiram a utilização destes resultados nas análises de distribuição de tensão, justificando assim a realização de uma repetição deste ensaio.



Figura 4.29: desalinhamento dos sensores no ensaio em areia sem fibras

A Figura 4.30 apresenta uma ampliação da Figura 4.26 (a) mostrando, em linhas pretas, as bandas de cisalhamento observadas a partir das linhas verdes cisalhadas nas primeiras camadas de areia sem fibras.

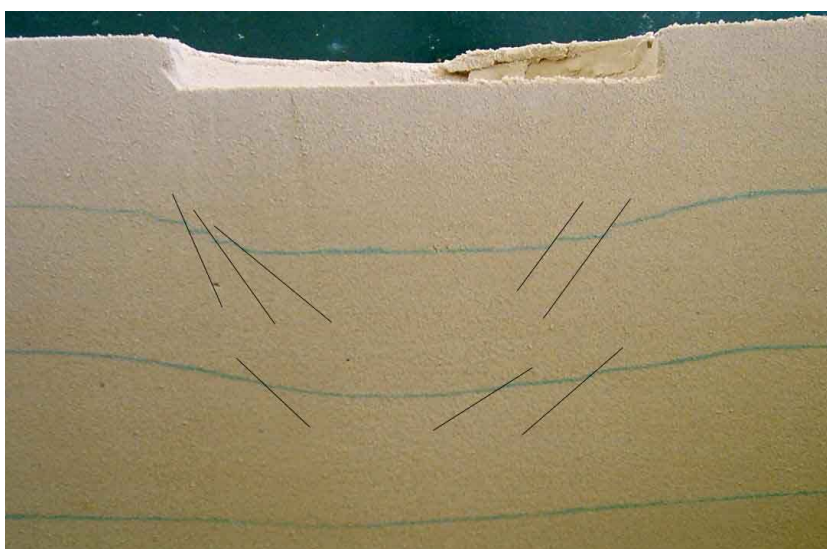


Figura 4.30: formação da cunha no ensaio em areia sem fibras

É possível notar que há uma tendência destas linhas convergirem a um ponto abaixo da placa situado entre a segunda e a terceira camada de solo, formando uma banda de cisalhamento muito semelhante a uma cunha, conforme descrito na literatura para rupturas localizadas.

Segundo Lopes (1979), a ruptura localizada é caracterizada por um modelo que é bem definido apenas imediatamente abaixo da fundação (Figura 4.31) e consiste de uma cunha e de superfícies de deslizamento que se iniciam junto às bordas da fundação, com a visível tendência de empolamento do solo ao redor da fundação depois de considerável deslocamento vertical. A compressão vertical sob a fundação é significativa e as superfícies de deslizamento terminam dentro do maciço, mobilizando a resistência de camadas mais profundas e, em geral, sem atingir a superfície do terreno. Somente depois de um deslocamento vertical apreciável as superfícies de deslizamento poderão tocar a superfície do terreno.

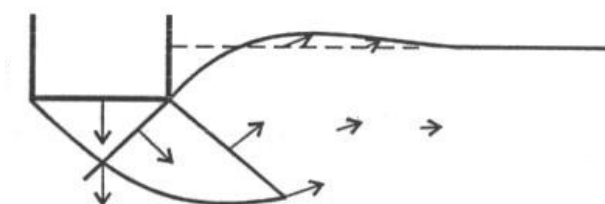


Figura 4.31: campos de deslocamentos da ruptura localizada (Lopes, 1979)

Apesar de acreditar-se que o mecanismo de ruptura da areia sem fibras e com fibras seja, por definição clássica, o mesmo, o solo reforçado não apresentou visualmente as bandas de cisalhamento. Isto se deve à capacidade que o reforço fibroso possui de absorver maiores deformações, distribuindo-as em áreas maiores e reduzindo a formação e propagação de fissuras.

#### 4.5.2 Ensaios sem Fibras

Neste item são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de placa obtidos para a areia seca ( $w$ : 0 %) e a areia úmida ( $w$ : 10 %), ambas sem fibras, através do comportamento carga *versus* deslocamento na placa e tensão *versus* deslocamento nas células de tensão total.

Numa primeira análise optou-se pela apresentação direta de todos os pontos obtidos pelo fato de que estes, quando salvos a cada 15 segundos, registraram todo o processo de estabilização

dos recalques e das cargas aplicadas, bem como as tensões lidas pelas células de tensão total. Verificou-se que a estabilização dos deslocamentos ocorreu rapidamente, nos primeiros incrementos de carga, sendo que para os maiores deslocamentos a estabilização foi mais lenta.

#### 4.5.2.1 Areia seca ( $w: 0\%$ )

A Figura 4.32 mostra as curvas tensão *versus* deslocamento, para os ensaios de placa em areia seca não reforçada. Os pontos em cor preta representam a tensão aplicada na placa e os demais pontos são referentes a todas as células de tensão instaladas no interior das camadas e no contato entre o solo e a placa.

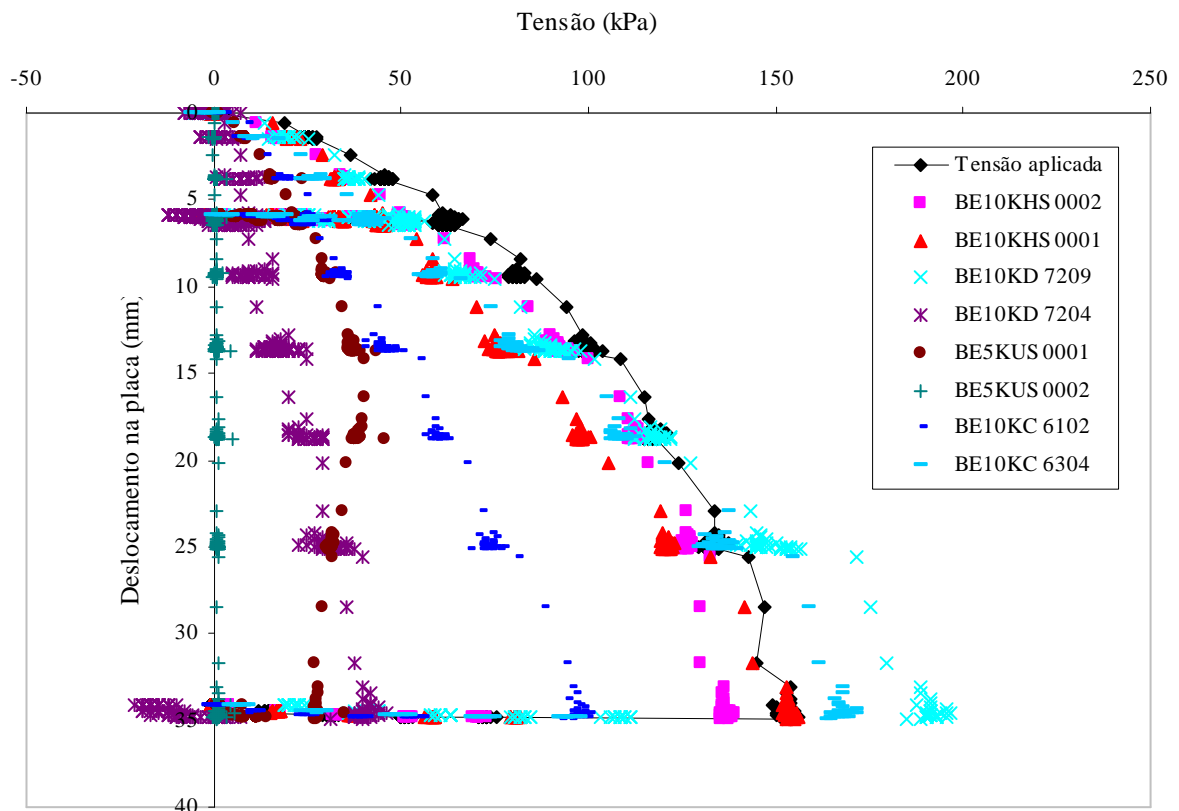


Figura 4.32: curvas tensão *versus* deslocamento das células de tensão total

A análise da Figura 4.32 mostra que todas as células de tensão responderam a tensão aplicada na placa de aço e que a magnitude destas leituras de tensão são função da posição de instalação de cada célula. Neste primeiro momento não se faz necessária à identificação da

posição de cada célula, pois as análises detalhadas da distribuição de tensões serão abordadas a seguir.

Para uma melhor visualização dos resultados, a Figura 4.33 apresenta a curva carga *versus* deslocamento registrado apenas na placa de aço. Todos os pontos de leitura anteriores à estabilização dos recalques, para cada incremento de carga, foram eliminados.

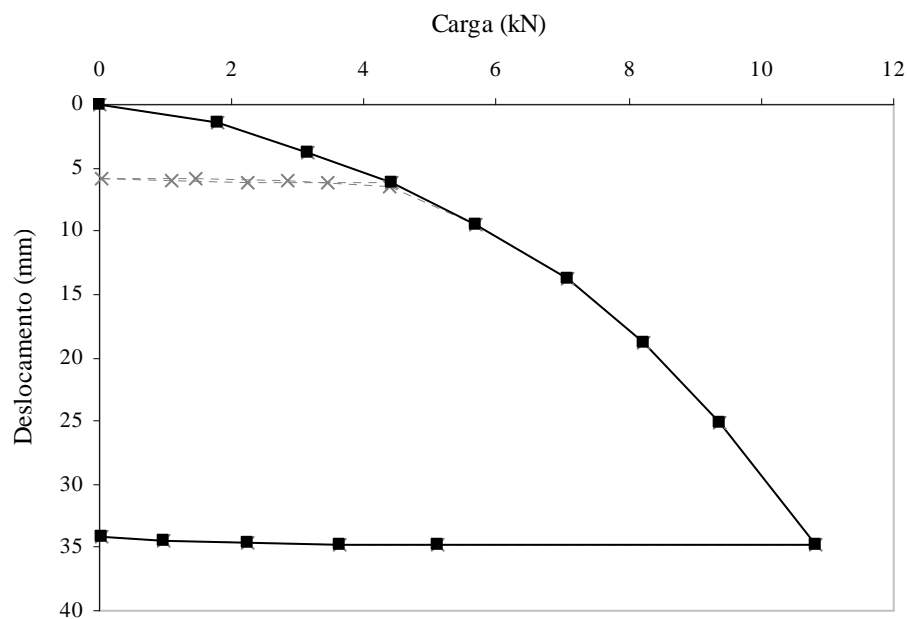


Figura 4.33: curva carga *versus* deslocamento

Na Figura 4.33 também está apresentada, em linhas tracejadas, o primeiro descarregamento e recarregamento realizado no terceiro estágio de carregamento, com aproximadamente 6 mm de recalque, escolhido aleatoriamente. O último incremento de tensão foi estimado para um recalque de apenas 35 mm para garantir a segurança dos sensores e de seus cabos.

A Figura 4.34 apresenta as leituras de deslocamentos fora da placa para três diferentes níveis de carregamento, 3,2; 8,12 e 10,8 kN, correspondentes a três níveis de deslocamentos abaixo da placa de 3,85; 18,76 e 34,86 mm, respectivamente. Os pontos de monitoramento ocorreram em distâncias de 5 e 25 cm da borda da placa. O solo próximo à borda da placa (5 cm) sofreu um recalque ao passo que o solo a 25 cm sofreu um pequeno empolamento.

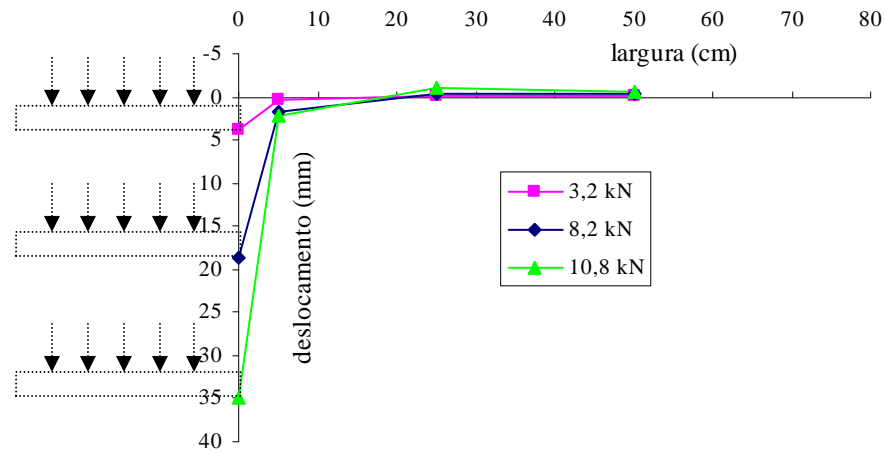


Figura 4.34: deslocamentos fora da placa

Para a apresentação dos gráficos das próximas análises de tensão *versus* deslocamento foram plotados apenas os pontos relativos à última leitura de deslocamento de cada incremento de tensão. Com isso os gráficos ficaram mais limpos facilitando a interpretação dos resultados dos ensaios.

A Figura 4.35 apresenta os resultados das leituras de tensão ao longo da profundidade das camadas de areia. A tensão média aplicada à placa de aço também é mostrada no mesmo gráfico para efeito de comparação entre as magnitudes de tensões lidas e aplicadas.

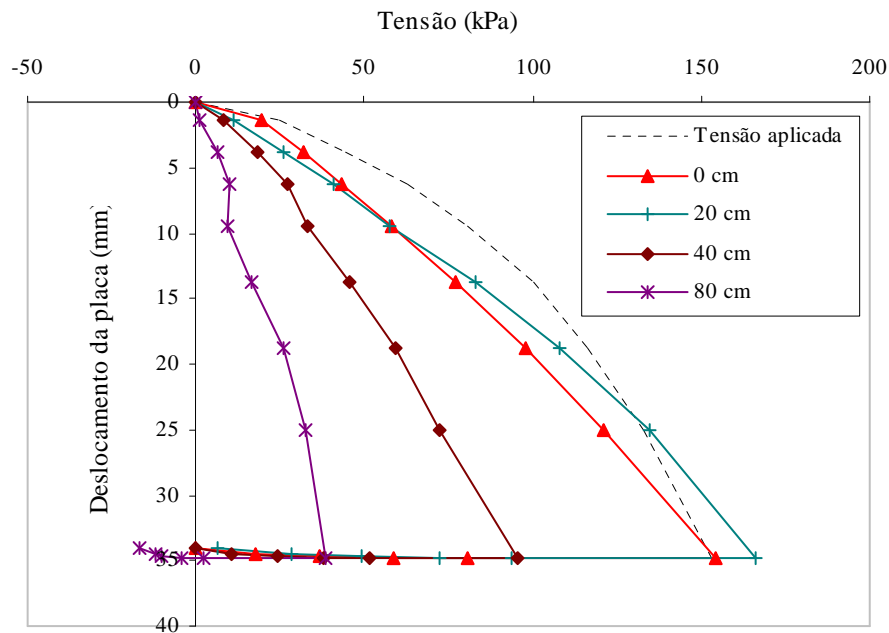


Figura 4.35: curvas tensão *versus* deslocamento ao longo da profundidade



Para melhor visualização desta distribuição de tensões a Figura 4.36 apresenta as tensões lidas pelas células de tensão total em diferentes posições de instalação. Os resultados são apresentados para cada incremento de tensão aplicada.

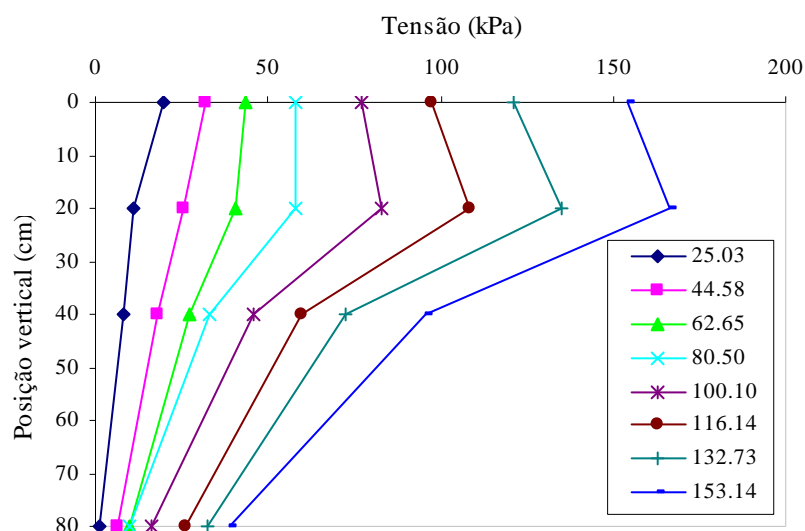


Figura 4.36: distribuição de tensões ao longo da profundidade

Para os primeiros incrementos de tensão aplicada à placa, as tensões lidas diminuem na medida em que aumenta a profundidade de instalação dos sensores, sendo que no fundo da caixa de acomodação (profundidade de 80 cm) as tensões são próximas a zero. Com o aumento das tensões aplicadas ocorre uma inversão na distribuição de tensões onde as tensões aumentam gradualmente a partir da placa até alcançar um valor máximo a uma determinada profundidade, com posterior queda da mesma, sugerindo a existência de um ponto de acúmulo de tensões.

Sitharam & Sireesh (2004), quando realizaram ensaios de placa em laboratório, observaram um pico de deformação horizontal em geogrelhas instrumentadas com “*strain gages*” na camada situada a 24 cm abaixo da placa de 30 cm de diâmetro. Curvas de deformação ao longo da posição vertical apresentaram configuração semelhante à Figura 4.36. Os autores utilizaram uma areia seca, bem graduada, na densidade relativa de 70 %.

As Figuras 4.37 e 4.38 apresentam os resultados e análises das tensões lidas em diferentes posições horizontais, todos na profundidade de 20 cm.

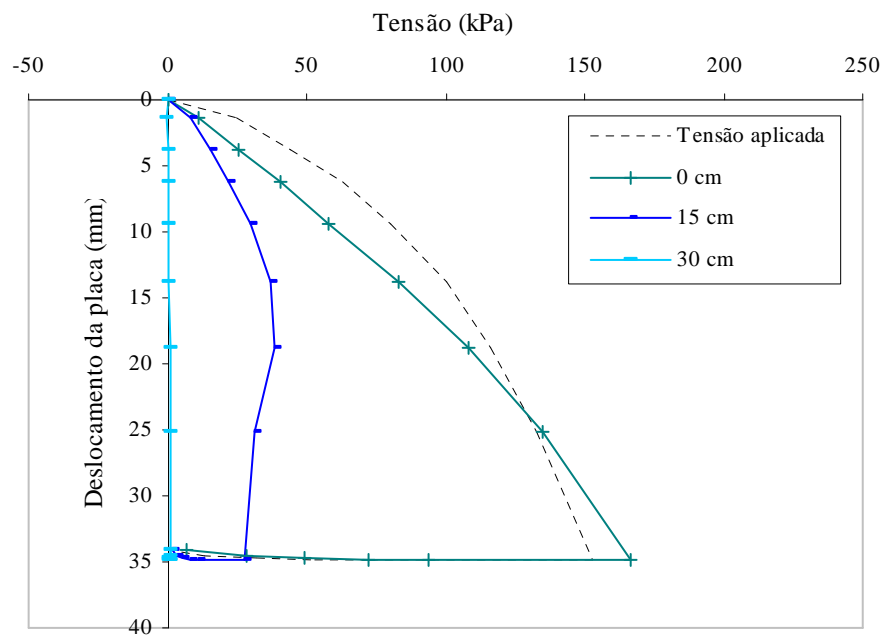


Figura 4.37: curvas tensão *versus* deslocamento no alinhamento horizontal

Alguns pontos são interessantes de se ressaltar na análise da Figura 4.37. O primeiro se refere à leitura de tensões nulas no ponto mais afastado da placa, a 30 cm do seu centro, mostrando a total dissipação das tensões provocada pela área carregada. As leituras a 15 cm do centro da placa apresentam uma incomum redução de tensões após certo nível de deslocamento, devido provavelmente a uma rotação desta célula dentro da massa de solo. Com essa rotação, a partir deste ponto, esta célula não estaria mais lendo tensões verticais e as análises com essas tensões deveriam ser tratadas com cautela.

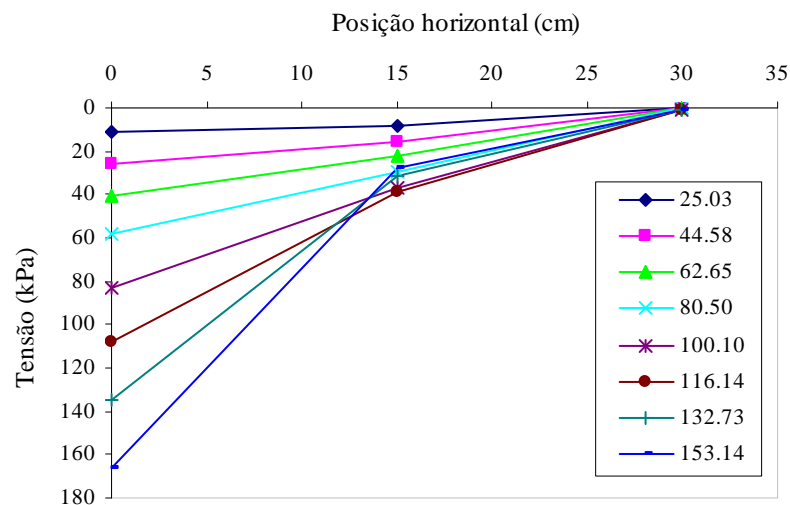


Figura 4.38: distribuição de tensões no alinhamento horizontal

De modo geral é possível observar que a distribuição das tensões verticais neste alinhamento horizontal se dá de forma suave, evidenciando um pequeno acréscimo de tensões no alinhamento central da placa para os últimos incrementos de carga.

A Figura 4.39 apresenta os resultados das tensões lidas pelas células de contato instaladas na placa de aço e a Figura 4.40 apresenta os mesmos resultados mostrando a distribuição de tensões verticais da placa de aço.

A rigidez de uma placa de fundação circular pode ser expressa numericamente pelo índice de rigidez,

$$K = \frac{E}{12E_s} \left( \frac{h}{d} \right)^3 \quad 4.1$$

sendo função do módulo de elasticidade da placa ( $E$ ), do módulo de elasticidade do solo ( $E_s$ ), da espessura da placa ( $h$ ) e do diâmetro da placa ( $d$ ). A norma alemã DIN 4018 admite que uma estrutura é rígida quando  $K > 0,5$  e flexível ou elástica quando  $0 < K < 0,5$ . Como o índice de rigidez é de 2,27 para a estrutura solo/placa deste trabalho, será considerada rígida a placa de aço que transmite o carregamento ao solo.

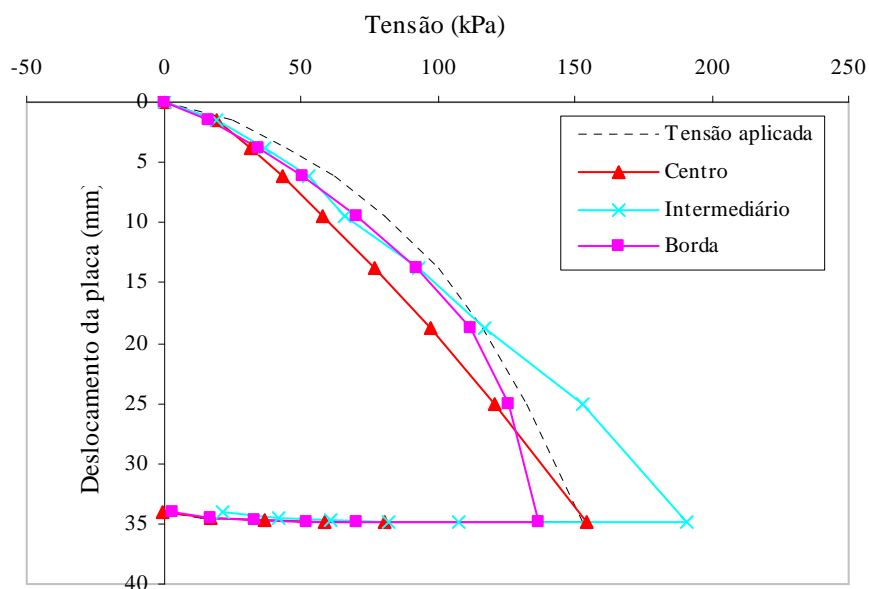


Figura 4.39: curvas tensão *versus* deslocamento na placa de aço

A apresentação dos resultados das tensões lidas pelos sensores juntamente com a tensão aplicada na placa de aço mostra claramente a capacidade que estas células têm de representar

a curva tensão-deslocamento, tanto em termos qualitativos quanto quantitativos. Percebe-se que as tensões lidas em três pontos distintos são muito próximas àquela aplicada na placa, do primeiro ao último estágio de carregamento, mostrando que estas tensões aplicadas são distribuídas uniformemente ao solo. Apenas nos últimos incrementos de tensão a célula localizada a 7,5 cm do centro da placa apresentou leituras de tensão um pouco superior às outras células, como pode ser visualizado melhor na Figura 4.40.

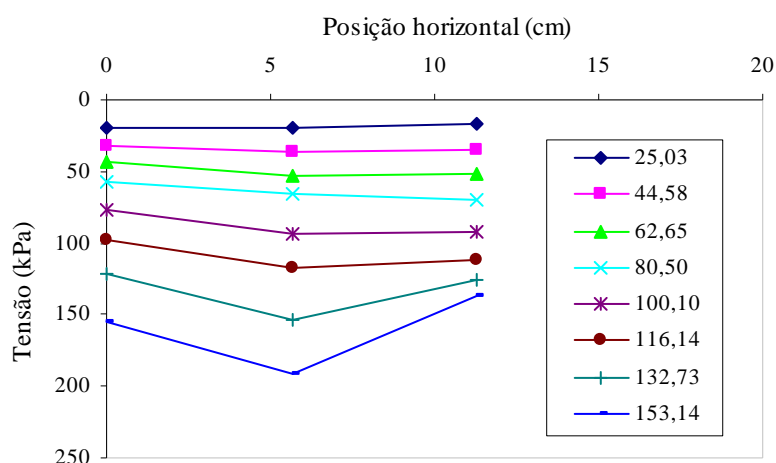


Figura 4.40: distribuição de tensões na placa de aço

Esse comportamento atípico desta célula pode ser atribuído a dois fatores que podem ocorrer separados ou simultaneamente. O primeiro pode ocorrer em todas as células, que é a falta de um contato perfeito entre a célula e o solo. Com esta falta de contato a célula poderá ler tensões abaixo da tensão real até um determinado deslocamento onde o contato seja pleno. O segundo fator está relacionado à sobreposição de tensões geradas por células adjacentes.

Toda a célula necessita de uma deformação, ou deslocamento, da sua face ativa para que os sensores elétricos registrem as diferenças de potencial que são traduzidas em tensões após as devidas calibrações. Essa deformação provoca um alívio das tensões na região central da face ativa da célula e conseqüentemente nas suas bordas ocorre um acréscimo de tensões. Células muito próximas podem sofrer influência destas regiões de carregamento, o que pode estar ocorrendo com a célula situada entre as duas outras maiores. Leituras de tensões maiores são registradas então, devido à sobreposição de tensões geradas nas bordas das células adjacentes. Esse efeito é tão mais visível quanto maior for a tensão aplicada à célula, pois maiores são as deformações e as regiões de alívio ou acúmulo de tensões.

#### 4.5.2.1 Areia ( $w: 10\%$ )

A Figura 4.41 mostra as curvas tensão *versus* deslocamento, para os ensaios de placa em areia não reforçada com teor de umidade 10%. Os pontos em cor preta representam a tensão aplicada na placa e os demais pontos são referentes a todas as células de tensão instaladas no interior das camadas e no contato entre o solo e a placa.

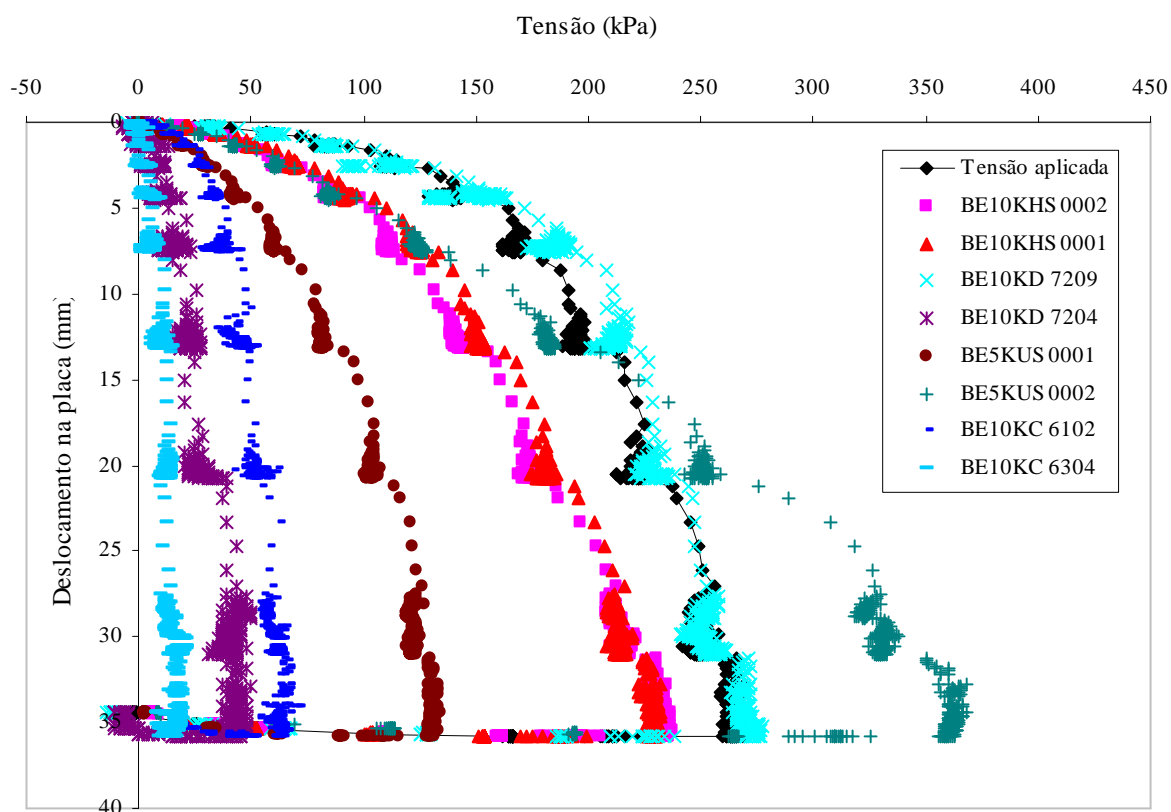


Figura 4.41: curvas tensão *versus* deslocamento das células de tensão total

Assim como no ensaio anterior, realizado em areia seca, a Figura 4.41 mostra que todas as células de tensão responderam a tensão aplicada na placa de aço e que a magnitude destas leituras de tensão são função da posição de instalação de cada célula.

Para uma melhor visualização dos resultados a Figura 4.42 apresenta a curva carga *versus* deslocamento registrado apenas na placa de aço. Todos os pontos de leitura anteriores à estabilização dos recalques, para cada incremento de carga, foram eliminados.

Na Figura 4.42 também está apresentada, em linhas tracejadas, a curva carga *versus* deslocamento do primeiro ensaio, que não foi utilizado para as análises de distribuição de

tensões. As linhas cheias representam o segundo ensaio, repetição do primeiro, o qual foi realizado nas mesmas condições do anterior. A diferença que pode ser observada entre as duas curvas se deve a dispersão natural deste tipo de ensaio, que por ser um ensaio de campo, não possibilita um controle tão rigoroso dos parâmetros que influenciam os resultados dos ensaios.

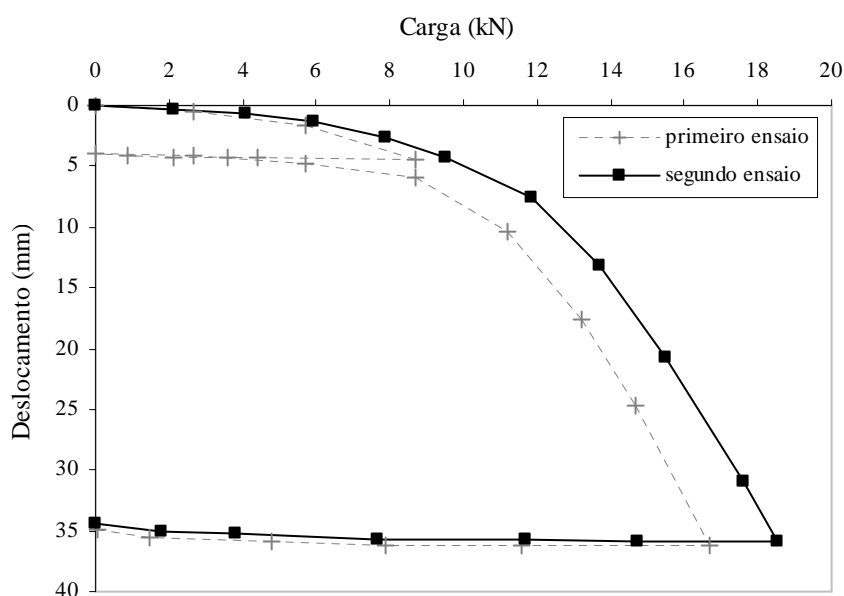


Figura 4.42: curva carga *versus* deslocamento

Os deslocamentos registrados fora da placa estão apresentados de forma gráfica na Figura 4.43. Os pontos de monitoramento ocorreram em distâncias de 5 e 25 cm da borda da placa.

A Figura 4.43 apresenta as leituras de deslocamentos fora da placa para três diferentes níveis de carregamento, 7,9; 13,68 e 18,53 KN, correspondentes a três níveis de deslocamentos abaixo da placa de 2,61; 13,21 e 35,83 mm, respectivamente. Observou-se um levantamento do solo ao redor da placa até uma distância de aproximadamente 50 cm da sua borda.

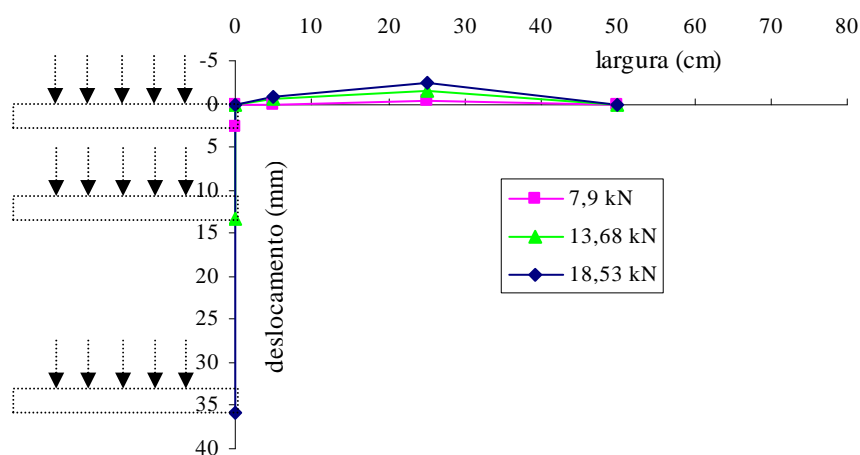


Figura 4.43: deslocamentos fora da placa

Para a apresentação dos gráficos das próximas análises de tensão *versus* deslocamento foram considerados apenas os pontos relativos à última leitura de deslocamento de cada incremento de tensão, para facilitar a interpretação dos resultados dos ensaios.

A Figura 4.44 apresenta os resultados das leituras de tensão ao longo da profundidade das camadas de areia, todas realizadas no alinhamento central da placa. A tensão média aplicada à placa de aço também é mostrada no mesmo gráfico para efeito de comparação entre as magnitudes de tensões lidas e aplicadas.

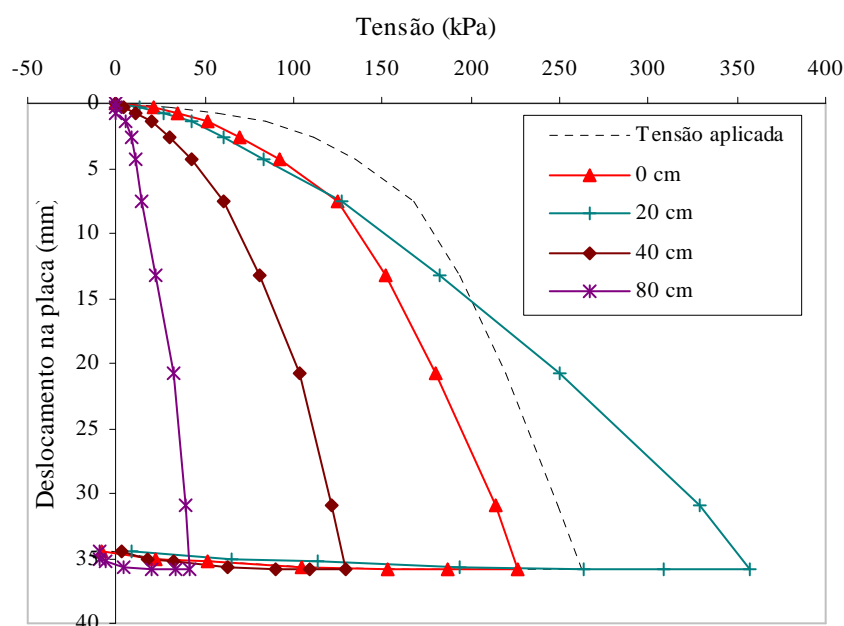


Figura 4.44: curvas tensão *versus* deslocamento ao longo da profundidade

Para melhor visualização desta distribuição de tensões a Figura 4.45 apresenta as tensões lidas pelas células de tensão total em diferentes posições de instalação. Os resultados são apresentados para cada incremento de tensão aplicada.

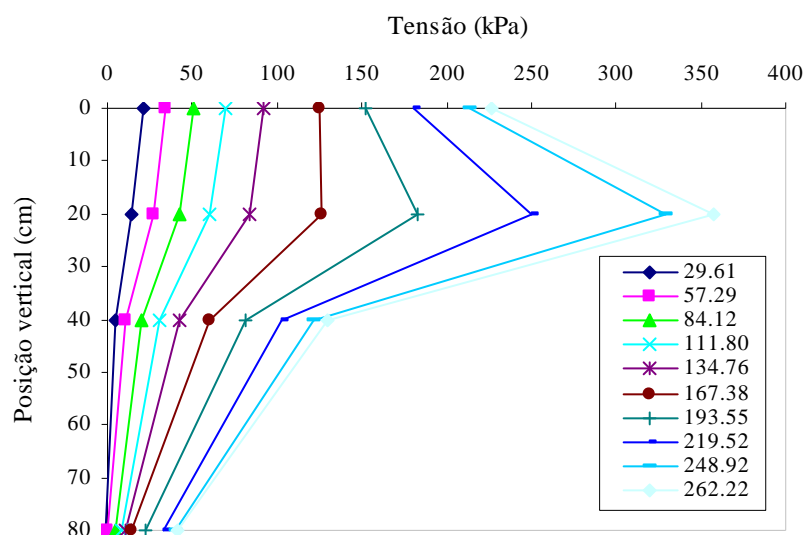


Figura 4.45: distribuição de tensões ao longo da profundidade

A análise da Figura 4.45 mostra uma redução de tensões com a profundidade até um determinado incremento de tensão com uma posterior mudança de comportamento, semelhante ao ensaio em areia seca onde as tensões aumentam com a profundidade até um determinado ponto, com posterior queda. Porém a característica mais importante deste ensaio é o acúmulo de tensões a 20 cm de profundidade, fato também observado por Sitharam & Sireesh (2004) em areia seca e por Minkov et al. (1981) em um solo argiloso e outro solo siltoso.

Esta mudança de comportamento e posterior acúmulo de tensões em uma determinada profundidade está relacionada com o nível de tensão aplicada e conseqüentemente com o nível de deslocamento atingido. Na medida em que o solo vai se deformando as tensões geradas no seu interior são governadas pelo mecanismo de ruptura existente. Considerando-se a ruptura localizada, este ponto de acúmulo de tensões situa-se exatamente na ponta de formação da cunha, conforme visualizado na Figura 4.30 do item mecanismos de ruptura.

As Figuras 4.46 e 4.47 apresentam os resultados e análises das tensões lidas em diferentes posições horizontais, na profundidade de 20 cm.



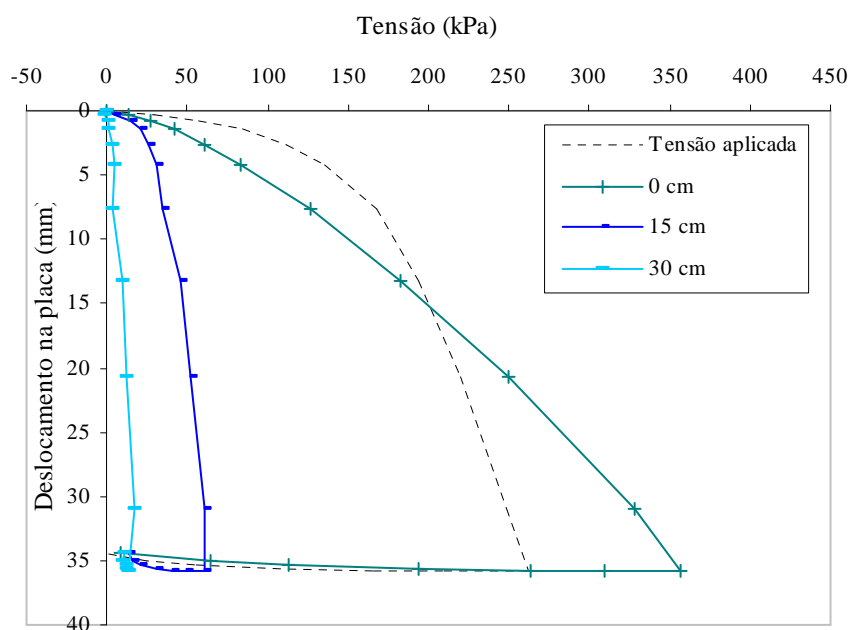


Figura 4.46: curva tensão *versus* deslocamento no alinhamento horizontal

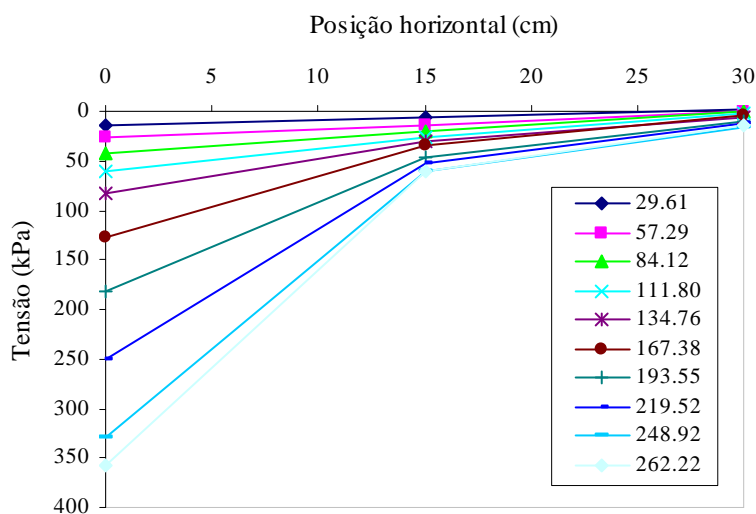


Figura 4.47: distribuição de tensões no alinhamento horizontal

Os pontos da posição horizontal de 0 cm estão localizados no alinhamento central da placa, já os pontos a 15 cm estão junto à borda da placa. As maiores tensões se concentram abaixo do centro da placa, reduzindo de valores abaixo da borda, chegando a tensões muito baixas a 30 cm do alinhamento central da placa.

Os valores das tensões lidas no alinhamento central da placa (0 cm) são os mesmos pontos de leitura da Figura 4.45 para a posição vertical de 20 cm, os quais ultrapassaram as tensões

aplicadas pela placa na superfície. De modo geral é possível observar que a distribuição das tensões verticais neste alinhamento horizontal não se dá de forma suave, evidenciando este acréscimo de tensões no centro da placa para os últimos incrementos de carga.

A Figura 4.48 apresenta os resultados das tensões lidas pelas células de contato instaladas na placa de aço e a Figura 4.49 apresenta os mesmos resultados mostrando a distribuição de tensões verticais da placa de aço.

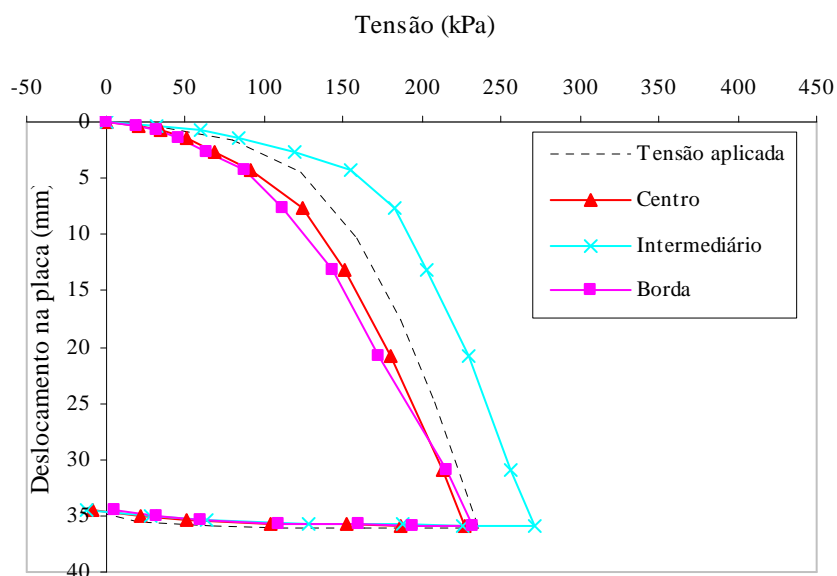


Figura 4.48: curva tensão *versus* deslocamento na placa de aço

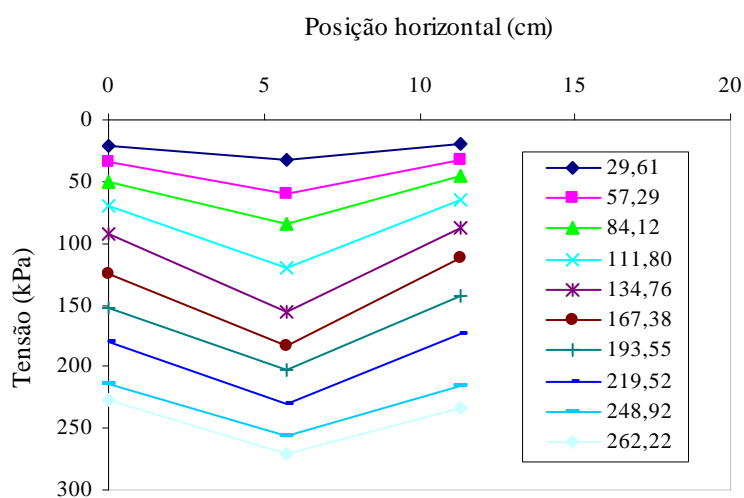


Figura 4.49: distribuição de tensões na placa de aço

Os resultados das Figuras 4.48 e 4.49 mostram uma distribuição uniforme de tensões entre o centro e a borda da placa, desconsiderando as leituras da célula intermediária, que pode estar sofrendo a influência da sobreposição de tensões geradas nas bordas das células vizinhas. Em condições ideais a célula intermediária deveria apresentar resultados intermediários de leituras de tensões das outras duas células.

### 4.5.3 Ensaio com Fibras

Neste item são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de placa obtidos para a areia com 0,25 e 0,5 % de fibras, através do comportamento carga *versus* deslocamento da placa e tensão *versus* deslocamento das células de tensão total.

#### 4.5.3.1 Areia com 0,25 % de fibras

Assim como para o ensaio sem fibras, optou-se pela apresentação direta de todos os pontos obtidos de tensão *versus* deslocamento, registrando todo o processo de estabilização dos recalques e das cargas aplicadas, bem como as tensões lidas pelas células de tensão total. A estabilização dos deslocamentos também ocorreu rapidamente no ensaio com fibras, nos primeiros incrementos de carga, sendo que para os maiores deslocamentos a estabilização foi mais lenta, conforme pode ser visualizado na Figura 4.50.

Os pontos em cor preta representam a tensão média aplicada na superfície do solo através da placa de aço e os demais pontos representam as leituras de tensão de todas as células de pressão.

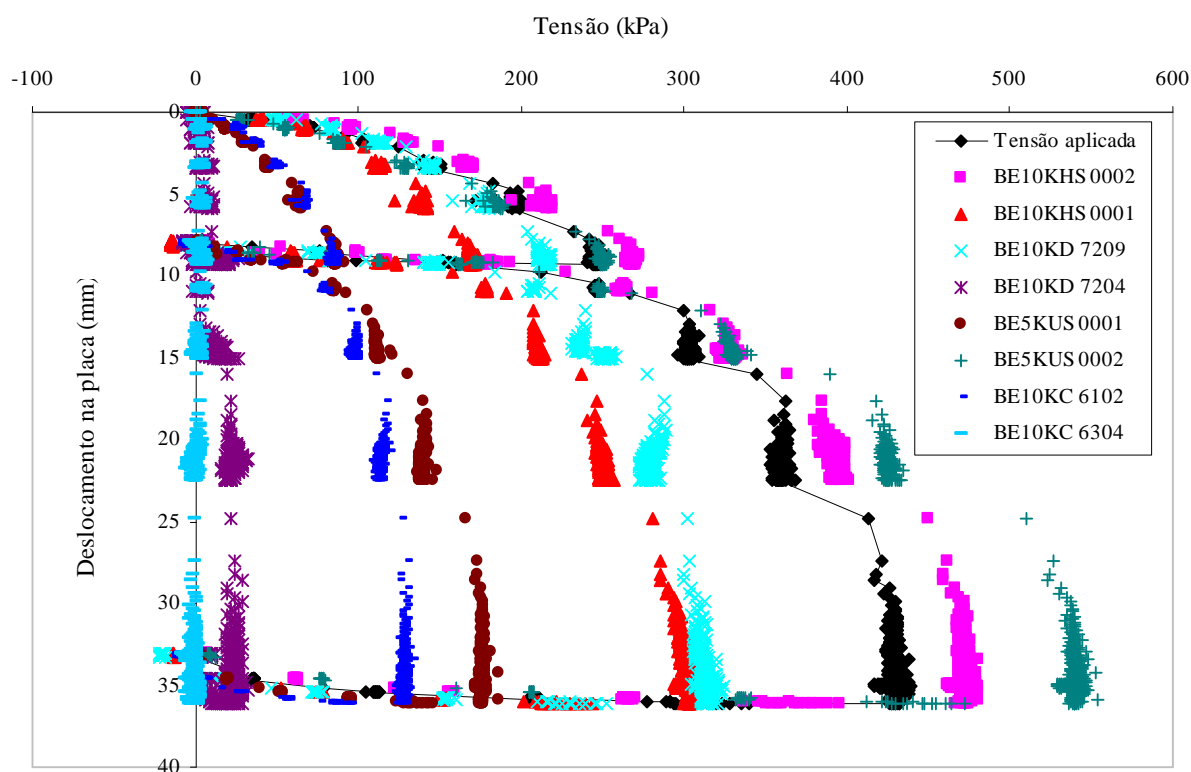


Figura 4.50: curvas tensão *versus* deslocamento do solo com fibras

A Figura 4.51 apresenta a curva carga *versus* deslocamento do solo reforçado, sendo que as linhas tracejadas representam uma fase de descarregamento e re-carregamento realizado durante o ensaio. Os deslocamentos registrados fora da placa estão apresentados de forma gráfica na Figura 4.52.

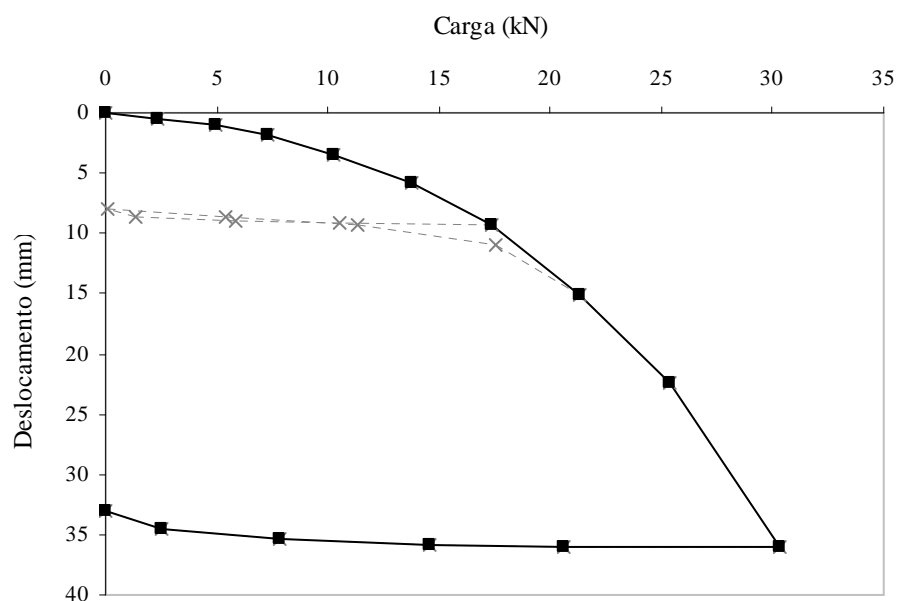


Figura 4.51: curva carga *versus* deslocamento da areia com 0,25 % de fibras

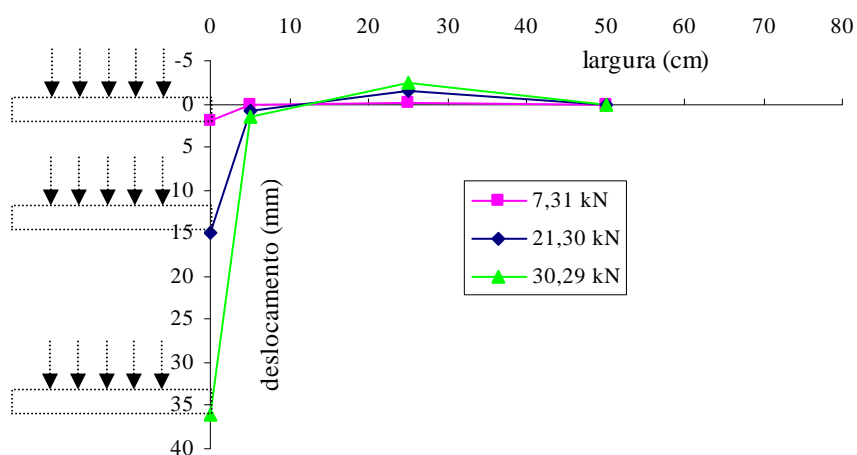


Figura 4.52: deslocamento fora da placa do solo reforçado com 0,25 % de fibras

Pela Figura 4.52 pode-se observar um mecanismo de deslocamento fora da placa diferente daquele observado para o solo sem fibras. O que ocorre é um afundamento do solo junto às bordas da placa na medida em que o solo recalca e ao mesmo tempo um levantamento do solo nas regiões mais afastadas.

A Figura 4.53 apresenta os resultados das leituras de tensão ao longo da profundidade das camadas de areia-fibra, juntamente com os resultados da tensão aplicada à placa de aço para efeito de comparação entre as magnitudes de tensões lidas e aplicadas.

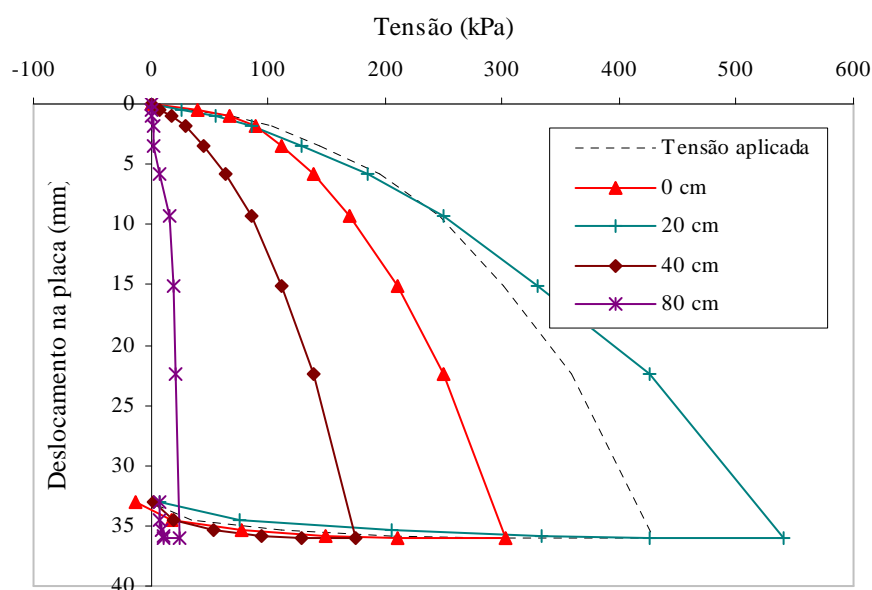


Figura 4.53: curva tensão *versus* deslocamento ao longo da profundidade

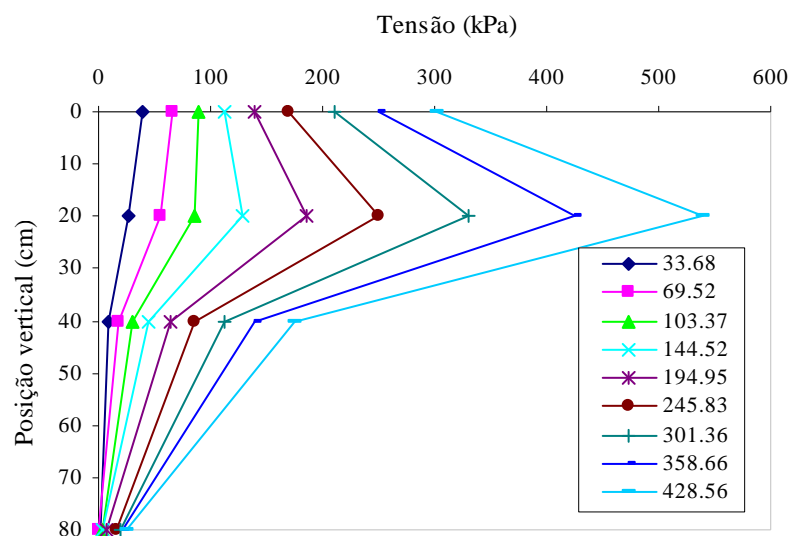


Figura 4.54: distribuição de tensões ao longo da profundidade

A Figura 4.54 apresentou as tensões lidas pelas células de tensão total em diferentes posições de instalação, facilitando a visualização da distribuição de tensões com a profundidade. Para os primeiros incrementos de carga, as tensões diminuem com profundidade de instalação dos sensores. Com o aumento das tensões aplicadas ocorre um aumento maior das tensões lidas pelo sensor instalado na profundidade de 20 cm, sugerindo um acúmulo de tensões neste ponto, assim como nos ensaios sem fibras.

As Figuras 4.55 e 4.56 apresentam os resultados e análises das tensões lidas em diferentes posições horizontais, na profundidade de 20 cm.

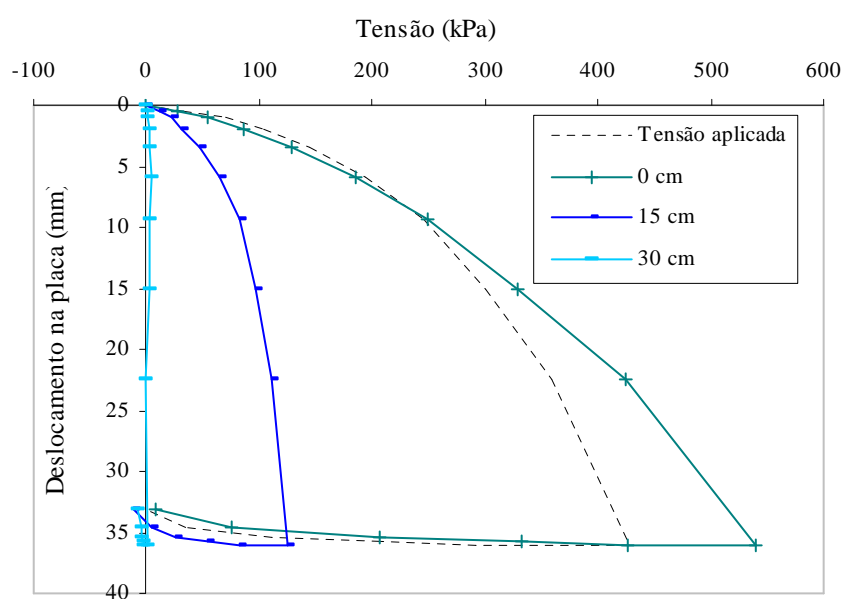


Figura 4.55: curva tensão *versus* deslocamento no alinhamento horizontal

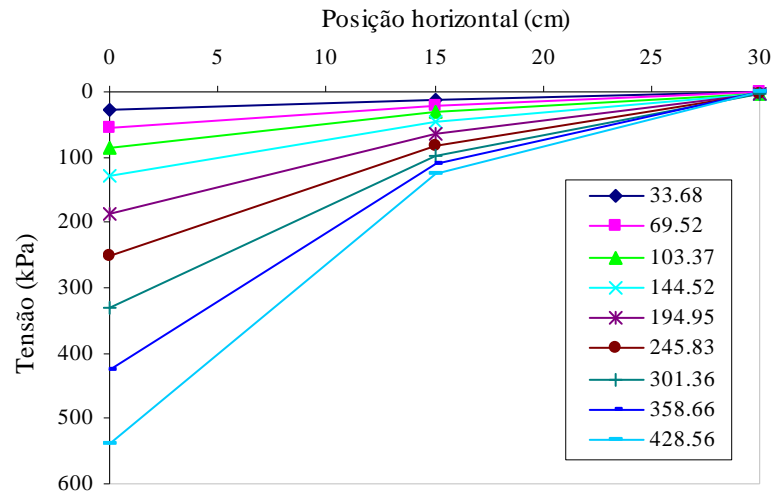


Figura 4.56: distribuição de tensões no alinhamento horizontal

As maiores tensões verticais lidas se concentram abaixo do centro da placa (0 cm), reduzindo de valores abaixo da borda (15 cm), chegando a tensões praticamente nulas a 30 cm do alinhamento central da placa.

A Figura 4.57 apresenta os resultados das tensões lidas pelas células de contato instaladas na placa de aço e a Figura 4.58 apresenta os mesmos resultados mostrando a distribuição de tensões da placa.

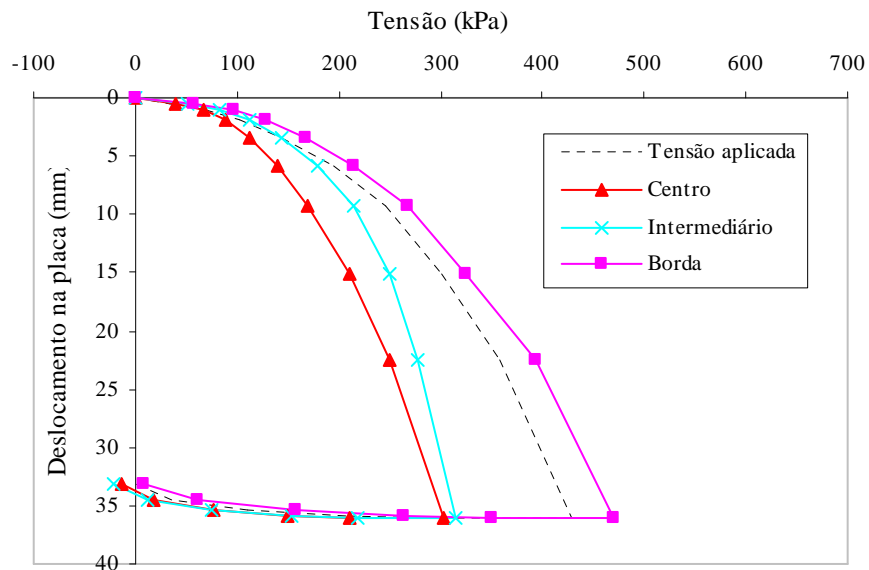


Figura 4.57: curva tensão *versus* deslocamento na placa de aço

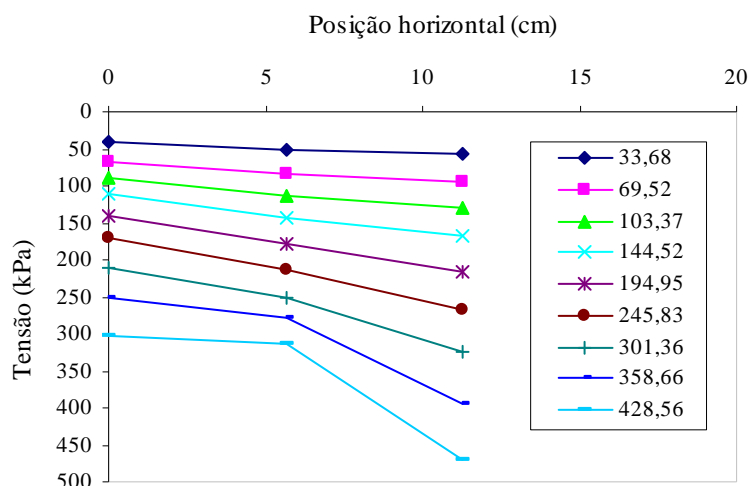


Figura 4.58: distribuição de tensões na placa de aço

Os resultados das medidas de tensões na placa sugerem uma distribuição de tensões não uniforme com uma concentração de tensões maiores nas bordas da placa. Note que este é o único ensaio em que a célula intermediária (5,7 cm) não apresentou leituras de tensões superiores às outras duas células e até mesmo a tensão média aplicada ao solo pela placa. Esta suposta concentração de tensões nas bordas pode estar relacionada ao primeiro fator relevante em leituras de tensão no contato entre célula e solo, já citado no item 4.4.2.1, que é a falta de contato pleno entre esses materiais.

Esta falta de contato entre uma célula e o solo, que acarreta em defasagens nas leituras de tensão, provoca uma concentração de tensões em outras regiões da placa, onde a resultante destes acúmulos e alívios de tensões é nula. Supondo então que a célula central estivesse localizada em uma região de falta de contato com o solo, apresentando leituras de tensões abaixo da tensão média aplicada, a célula próxima à borda estaria absorvendo esta defasagem de tensão e os resultados de leituras de tensão superiores nas bordas estariam justificados.

Estas conclusões são baseadas em suposições que não podem ser comprovadas sem uma identificação visual como aquela realizada ao final do ensaio, a exumação, que pôde comprovar a existência deste contato pleno entre as células e o solo apenas no último incremento de carga, ao final do ensaio.



#### 4.5.3.2 Areia com 0,5 % de fibras

A Figura 4.59 apresenta todos os pontos obtidos de leitura de tensão *versus* deslocamento para a areia reforçada com 0,5 % de fibras. Numa análise preliminar pode-se observar que além do processo de estabilização dos recalques, é possível acompanhar durante todo o carregamento e descarregamento a pequena dispersão nas leituras de tensões de cada célula. Isso é produto de um estudo onde buscou-se, através da variação na configuração da excitação e do ganho de sinal, a redução máxima dos ruídos produzidos pelo conjunto sistema de aquisição de dados e células.

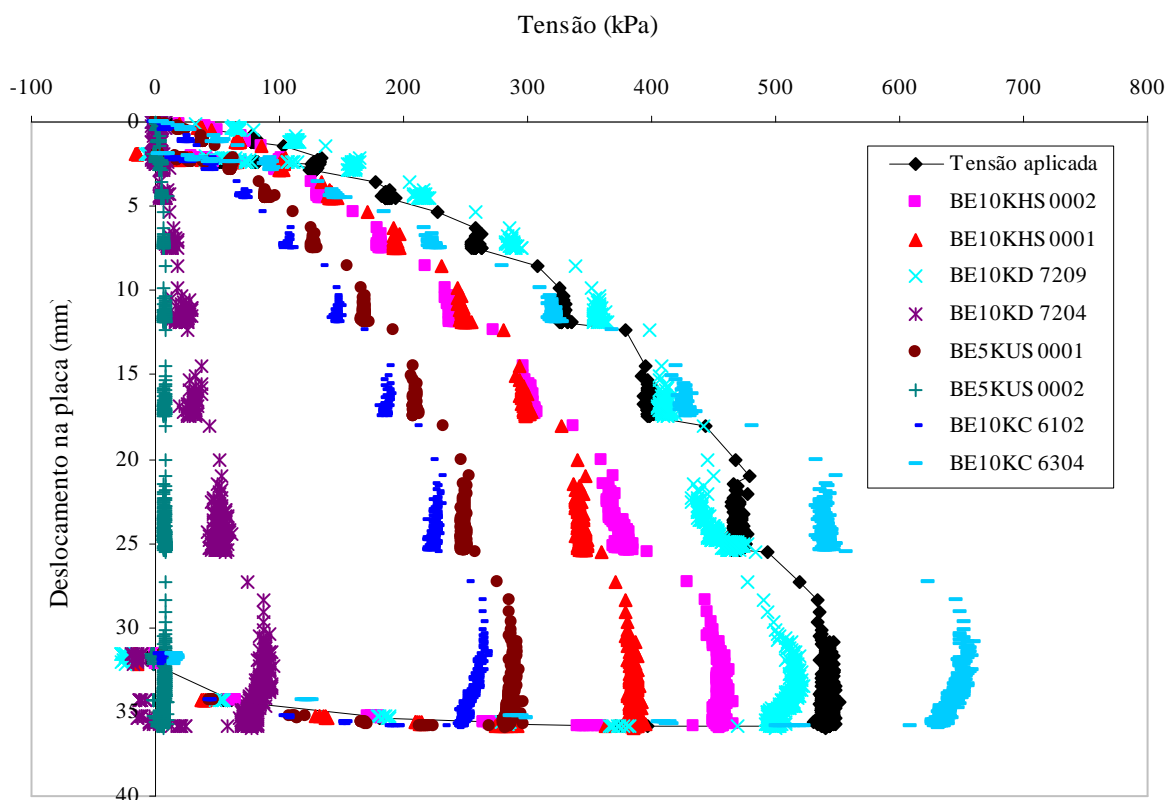


Figura 4.59: curvas tensão *versus* deslocamento do solo com 0,5 % de fibras

A Figura 4.60 apresenta a curva carga *versus* deslocamento do solo reforçado e em linhas tracejadas uma fase de descarregamento e re-carregamento realizado durante o ensaio.

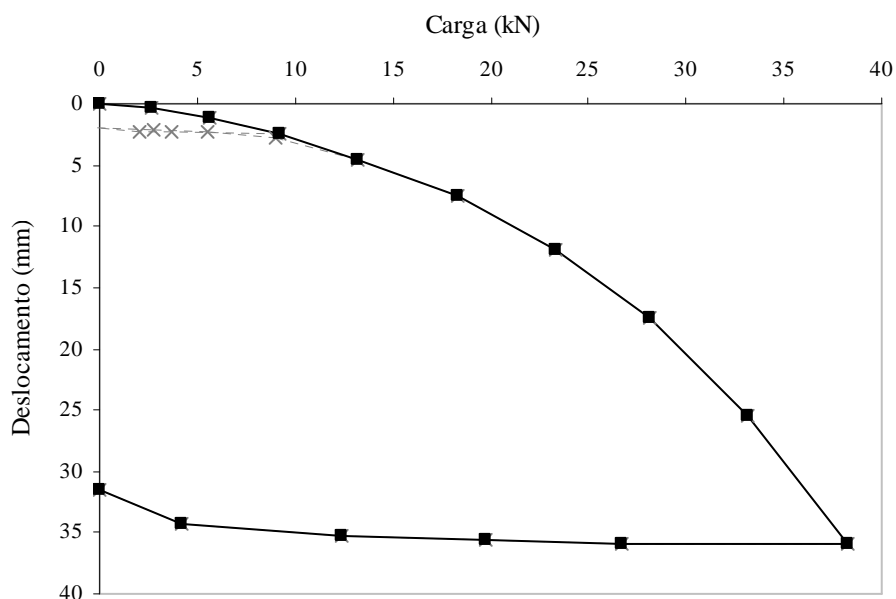


Figura 4.60: curva carga *versus* deslocamento da areia com 0,5 % de fibras

Os deslocamentos registrados fora da placa estão apresentados de forma gráfica na Figura 4.61, onde se pode observar um mecanismo de deslocamento semelhante aquele observado para o solo reforçado com 0,25 % de fibras. O que ocorre é um afundamento do solo junto às bordas da placa na medida em que o solo recalca e ao mesmo tempo um levantamento do solo nas regiões mais afastadas.

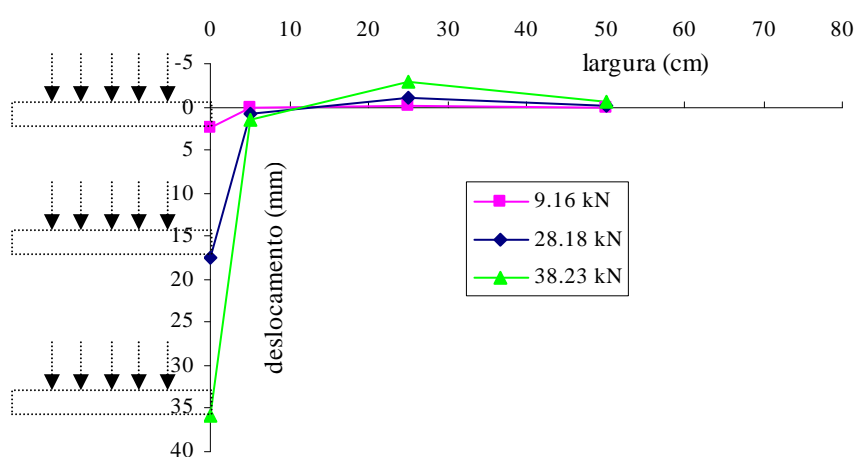


Figura 4.61: deslocamento fora da placa do solo reforçado com 0,5 % de fibras

A Figura 4.62 apresenta os resultados das leituras de tensão ao longo da profundidade das camadas de areia-fibra, juntamente com os resultados da tensão aplicada à placa de aço.

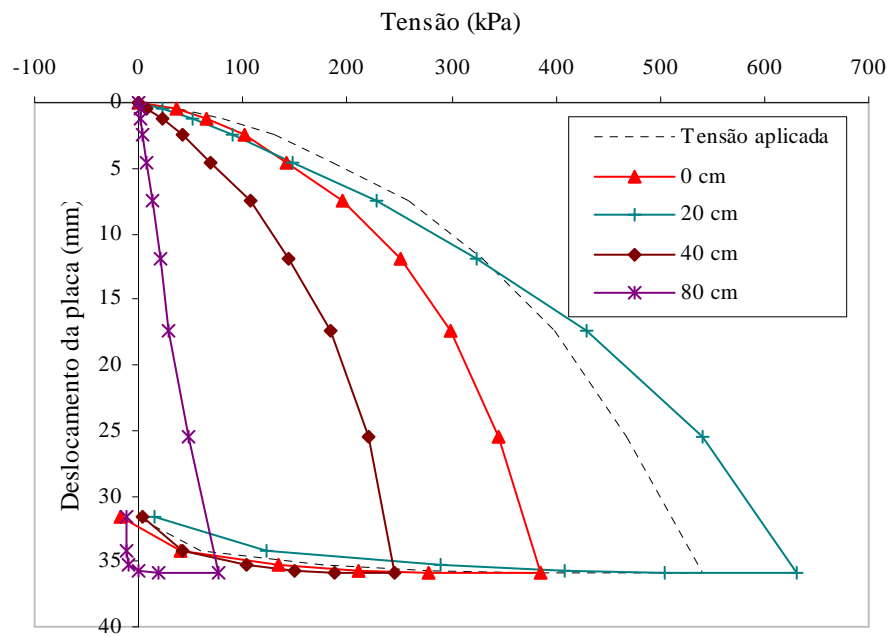


Figura 4.62: curva tensão *versus* deslocamento ao longo da profundidade

A análise da Figura 4.62, juntamente com a Figura 4.63, mostra novamente a tendência de formação de uma região de acúmulo de tensões ligeiramente abaixo do centro da placa. Diferenças entre as leituras destas tensões nos diferentes materiais estudados serão abordadas nos itens seguintes, na análise global.

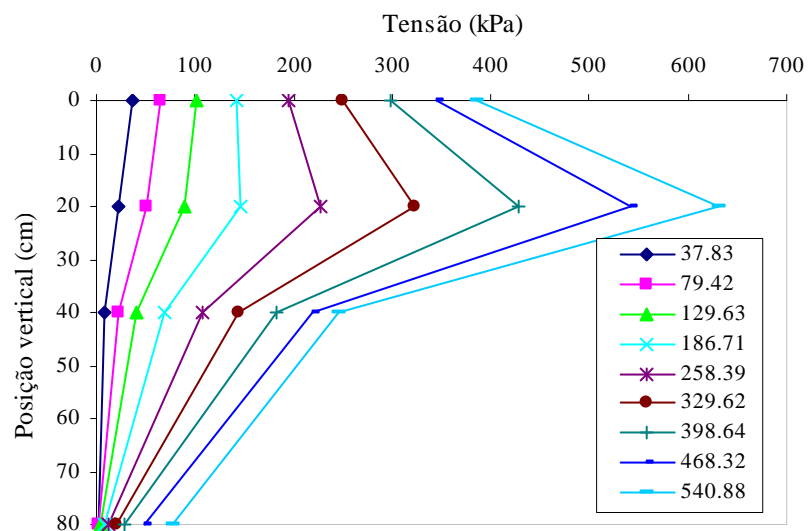


Figura 4.63: distribuição de tensões ao longo da profundidade

As Figuras 4.64 e 4.65 apresentam os resultados e análises das tensões lidas em diferentes posições horizontais, na profundidade de 20 cm.

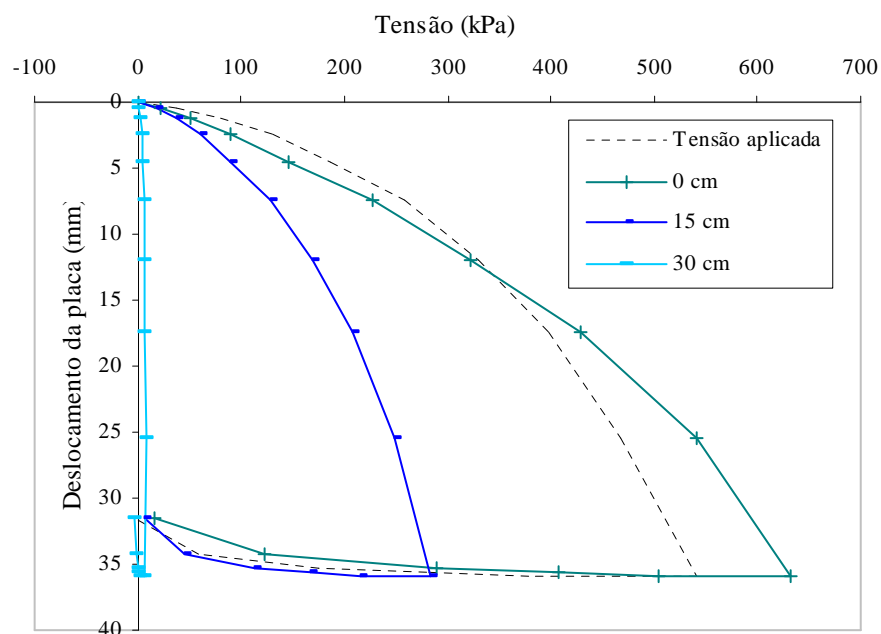


Figura 4.64: curva tensão *versus* deslocamento no alinhamento horizontal

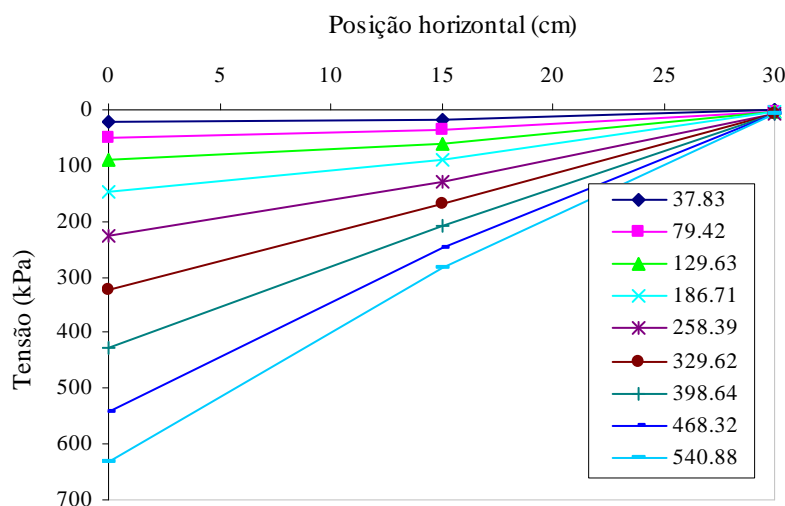


Figura 4.65: distribuição de tensões no alinhamento horizontal

Tensões maiores também se concentram abaixo do centro da placa para o solo reforçado com 0,5 % de fibras, porém a redução de tensões abaixo da borda não é tão significativa quanto para os outros materiais.

As Figuras 4.66 e 4.67 apresentam, de formas diferentes, os resultados das tensões lidas pelas células de contato instaladas na placa de aço, mostrando a distribuição de tensões na placa.

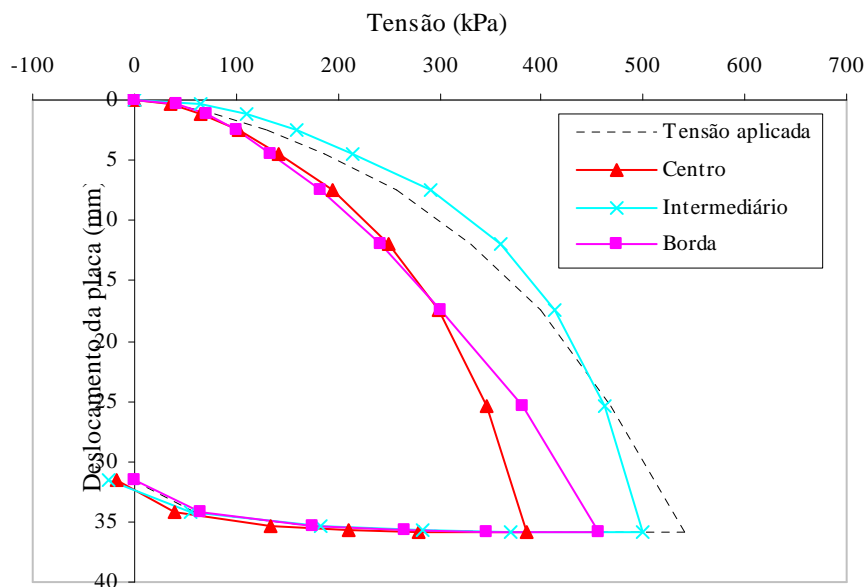


Figura 4.66: curva tensão *versus* deslocamento na placa de aço

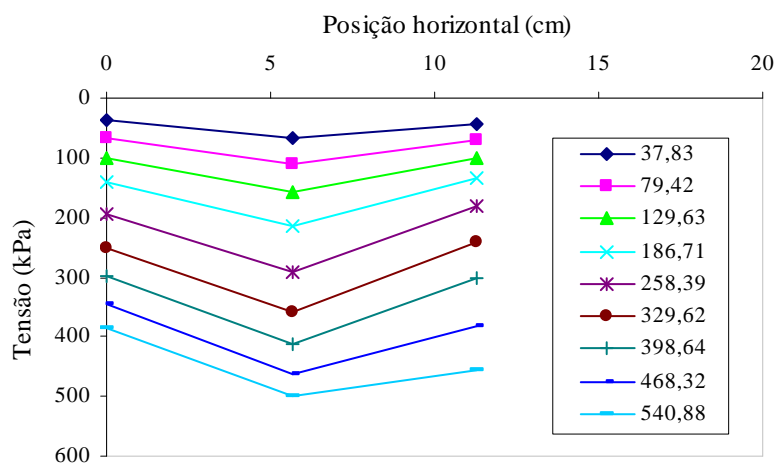


Figura 4.67: distribuição de tensões na placa de aço

Os resultados das Figuras 4.66 e 4.67 mostram uma distribuição de tensões uniforme entre a placa de aço e o solo, com um pequeno acréscimo de tensões lidas pela célula intermediária devido provavelmente à sobreposição de tensões geradas nas bordas das células vizinhas.

#### 4.5.4 Análise Global

Neste item são apresentados os resultados e análises dos ensaios de placa agrupados em dois sub-itens. No primeiro é abordada a influência do teor de umidade em aspectos relacionados ao comportamento carga-deslocamento, módulo de deformação secante, energia de deformação absorvida e distribuições de tensões verticais. O segundo aborda a influência do teor de fibras nestes mesmos fatores.

##### 4.5.4.1 Influência do teor de umidade

A Figura 4.68 apresenta, conjuntamente, os resultados das provas de carga para a areia seca ( $w = 0\%$ ) e a areia úmida ( $w = 10\%$ ).

A areia com teor de umidade de 10% apresenta uma resistência superior ao mesmo material sem umidade, ou seja, os recalques atingidos para o mesmo nível de carga são superiores quando a areia apresenta-se completamente seca (Figura 4.68 - a). Os ensaios de compressão confinada também apresentaram resultados semelhantes, como visto no item 4.2.2, onde se sugeriu que este efeito seria devido à pequena sucção existente no material com 10% de umidade. Elevada energia de deformação é observada na Figura 4.68 (b) para a areia com 10% de umidade, comparativamente a areia seca.

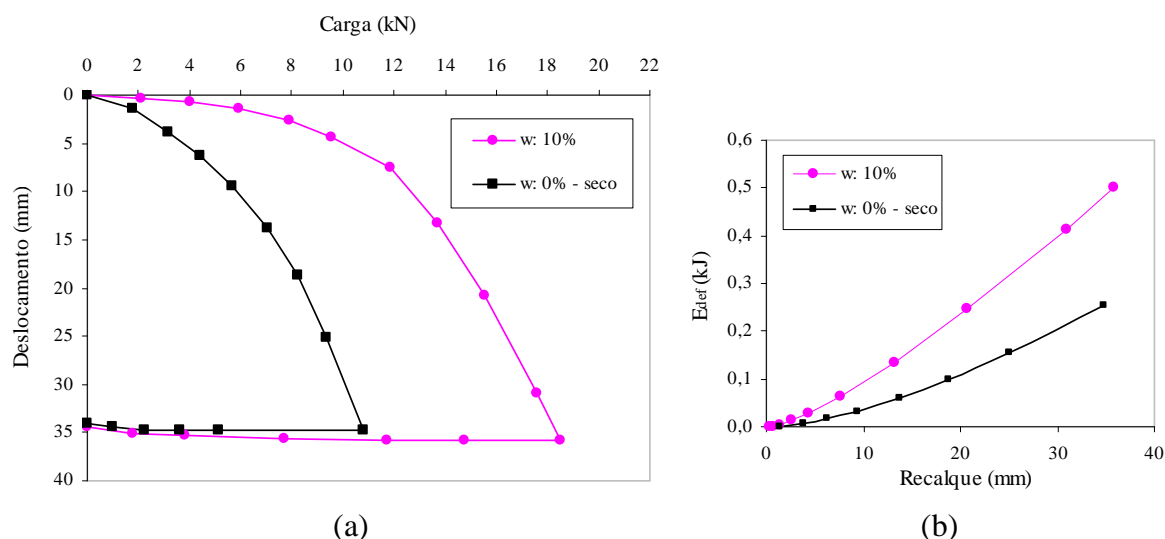


Figura 4.68: influência do teor de umidade: (a) na curva carga-deslocamento, (b) na capacidade de absorção de energia das areias

A distribuição vertical de tensões das areias seca e úmida pode ser comparada através da Figura 4.69, que apresenta estes resultados para o primeiro e último estágio de carregamento. Em linhas tracejadas está representada a distribuição de tensões teóricas, advinda da teoria da elasticidade, que apesar de ser questionável é amplamente utilizada neste meio por haver uma certa proporcionalidade entre as tensões e deformações, até determinado nível de tensões (Pinto, 2000). As tensões verticais foram calculadas no interior do solo (massa elástica, homogênea e isotrópica) devidas a carregamento uniformemente distribuído numa área circular, na superfície do terreno.

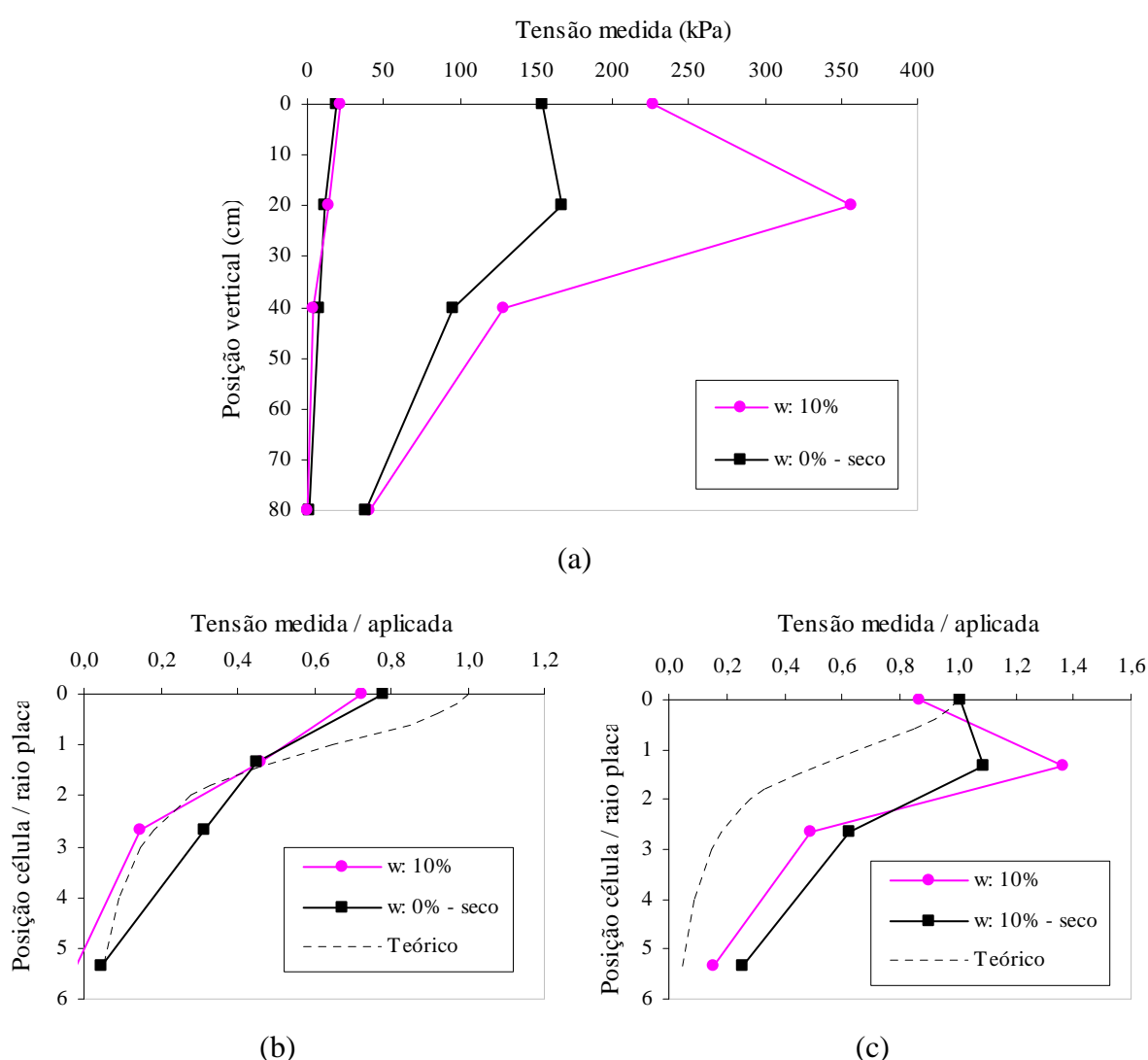


Figura 4.69: comparação da distribuição vertical de tensões entre a areia e a areia seca: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado

Para o primeiro estágio normalizado de carregamento (Figura 4.69 – b) é possível observar que as tensões medidas pelas células de tensão, ao longo da profundidade, são muito próximas às aquelas estimadas pela teoria da elasticidade, tanto para a areia seca quanto para a areia úmida, mostrando que para pequenos deslocamentos, ou pequenas tensões aplicadas, a teoria da elasticidade se mostra de grande valia na análise da distribuição de tensões verticais. No último estágio normalizado de carregamento as leituras de tensões são bastante distintas daquelas estimadas pela teoria da elasticidade devido as grandes deformações plásticas sofridas pelos solos. É possível observar também que para a areia seca aquele acúmulo de tensões a 20 cm de profundidade não é tão pronunciado e as tensões nas camadas inferiores são superiores ao solo úmido, sugerindo que o solo seco é solicitado a camadas mais profundas que o solo úmido. Este efeito pode estar associado a pequenas diferenças na forma de ruptura dos dois materiais, onde o solo seco estaria mais próximo a uma ruptura por puncionamento, solicitando também a região abaixo das bordas da placa, como pode ser visto na Figura 4.70.

A Figura 4.70 revela uma sutil diferença na distribuição horizontal de tensões entre os dois materiais, na camada situada a 20 cm da superfície. Comparativamente, o solo seco apresenta tensões mais elevadas na região próxima às bordas da placa, na posição situada a 15 cm do centro da placa.



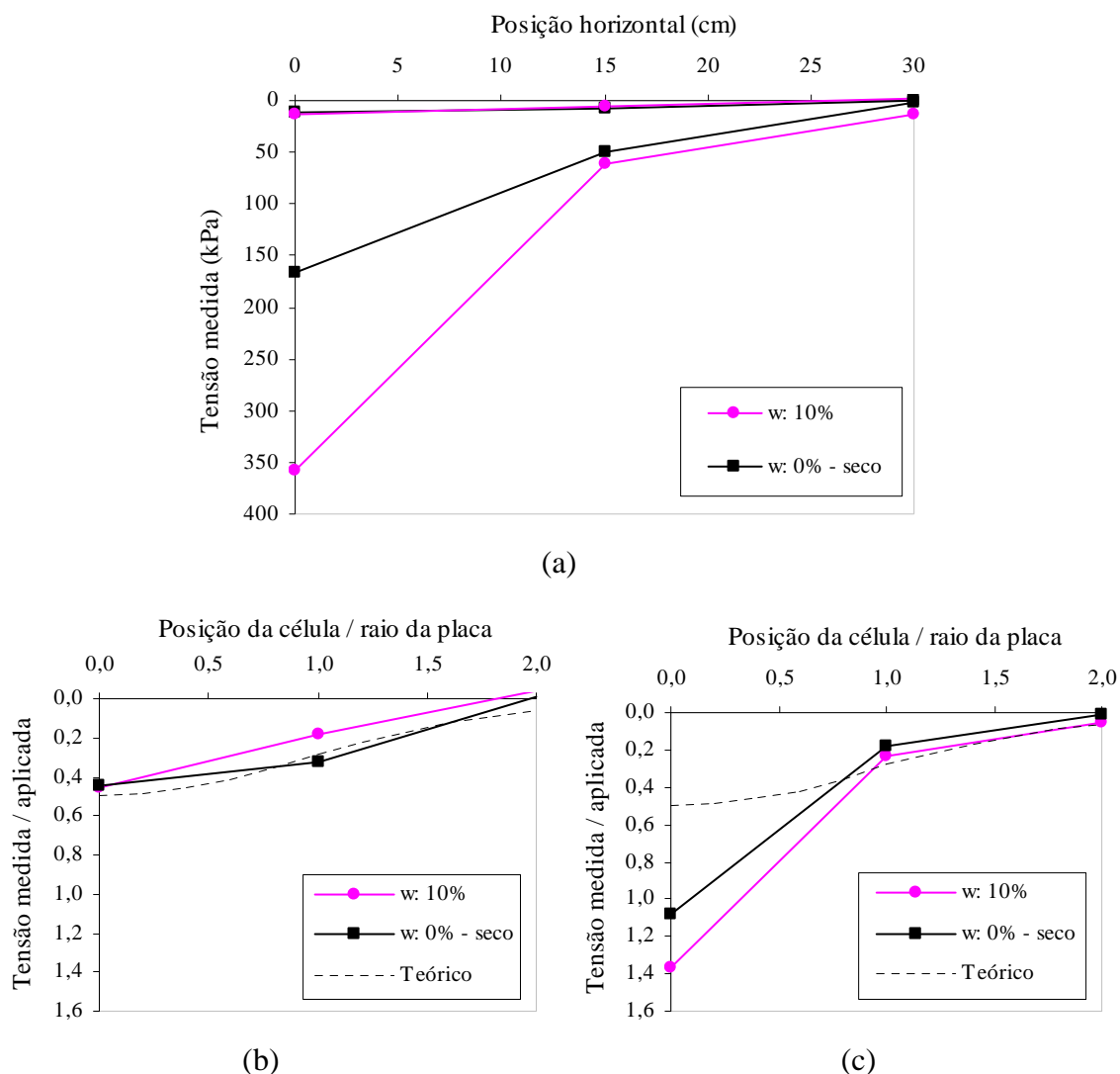


Figura 4.70: comparação da distribuição horizontal de tensões entre a areia e a areia seca: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado

A comparação dos resultados da distribuição de tensões, entre os dois materiais, na placa de aço, está representada na Figura 4.71, onde é possível observar uma distribuição uniforme de tensões, do primeiro ao último estágio de carregamento, para ambos os materiais.

Segundo Velloso e Lopes (1996) as pressões de contato são influenciadas pelas características das cargas aplicadas, pela rigidez relativa fundação-solo, pelas propriedades do solo e pela intensidade das cargas aplicadas. Pela teoria da elasticidade, as tensões nos bordos de uma sapata rígida são, teoricamente, infinitas, onde ocorre a plastificação do solo. Com o aumento da carga as tensões nos bordos se mantêm constantes e há um aumento das pressões de contato na parte central. Estas tensões infinitas nos bordos para os primeiros estágios de

carregamento com um aumento das tensões na parte central para os últimos estágios de carregamento não são observados para os materiais estudados.

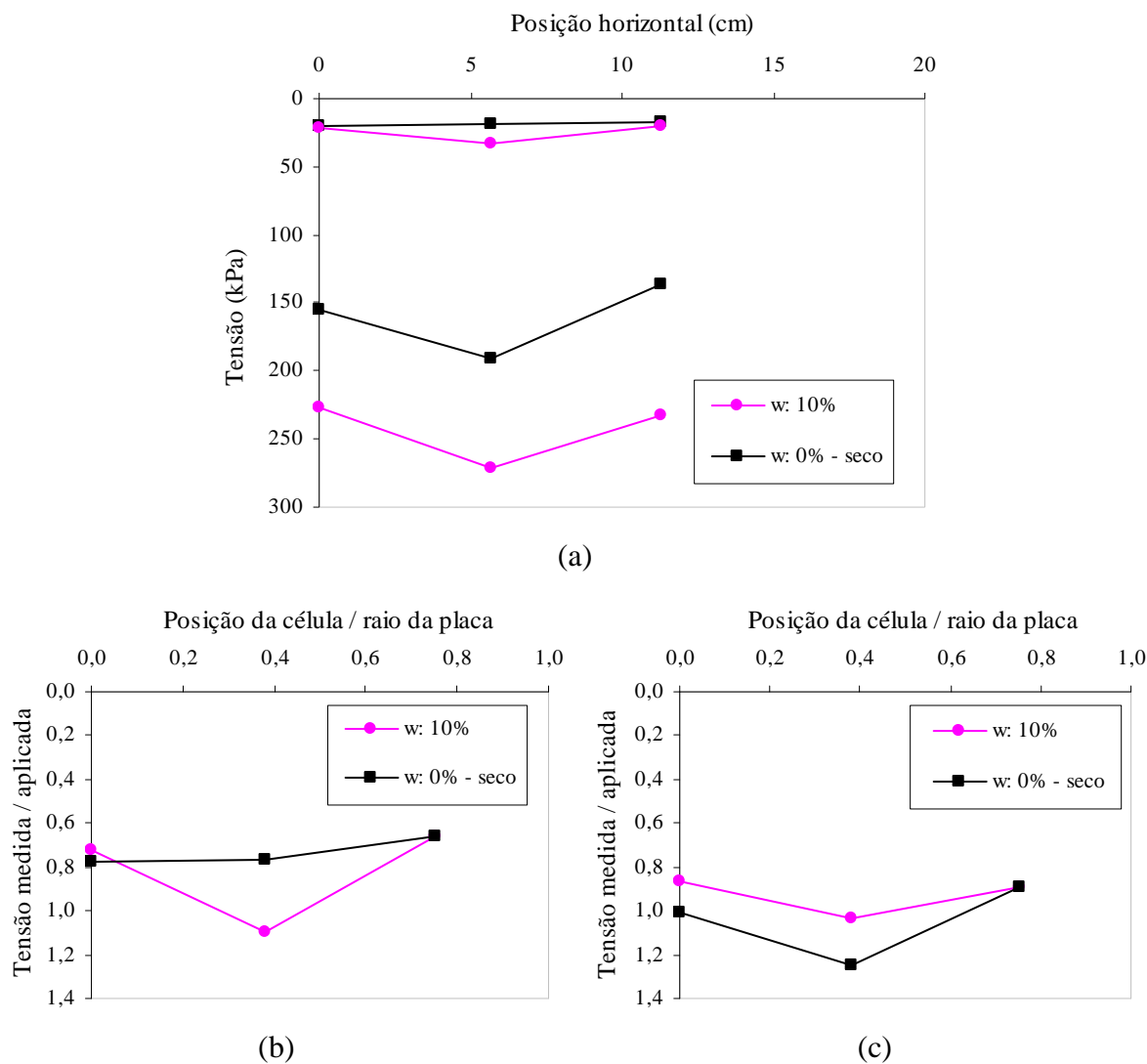


Figura 4.71: comparação da distribuição de tensões entre a areia e a areia seca na placa de aço: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado

#### 4.5.4.2 Influência do teor de fibras

Neste item são abordadas as principais semelhanças e diferenças entre os materiais com fibras e sem fibras em aspectos relacionados ao comportamento carga-recalque, módulo de deformação secante, energia de deformação absorvida e distribuição horizontal e vertical de tensões.

As curvas carga-recalque para a areia sem fibras e com 0,25 e 0,5 % de fibras de 50 mm de comprimento estão representadas na Figura 4.72.

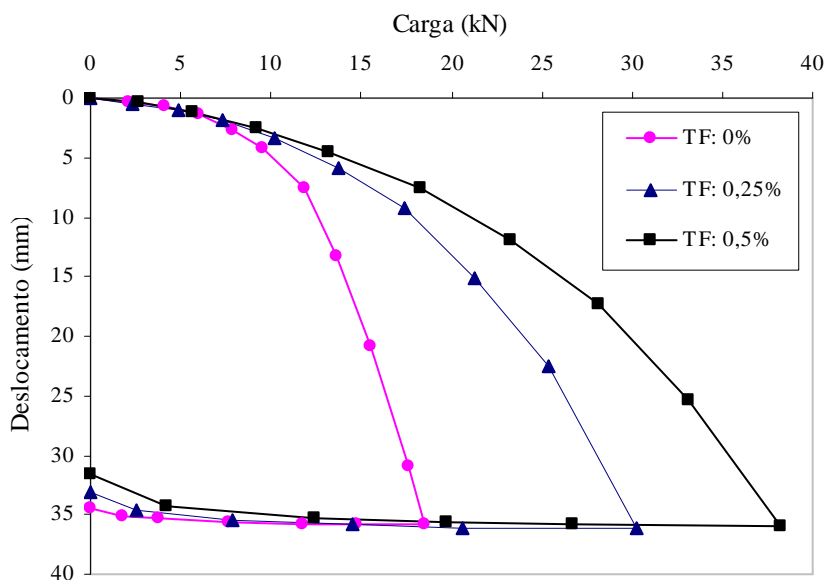


Figura 4.72: influência do teor de fibras na curva carga-recalque das areias

Verifica-se que a inclusão de reforços fibrosos melhorou significativamente a resposta do solo na redução dos recalques quando comparados com a areia sem reforço. É visível que o comportamento carga-deslocamento das areias com e sem reforços é similar no início do carregamento, até o momento em que a mobilização das fibras inseridas nas matrizes se mostra mais efetiva, a partir de um certo nível de recalque e carga aplicada, fato já observado também por Casagrande (2005), em ensaios de placa. Verifica-se também que o ganho de resistência é tão maior quanto maior for o teor de fibras.

A Tabela 4.6 apresenta uma comparação entre os valores de carga para areia e areia-fibra, a diferentes níveis de deslocamentos, correspondentes às normas brasileira ( $d/30$ ) e inglesa ( $d/10$ ).

Tabela 4.6: comparação entre valores de carga para areia e areia-fibra obtidos para distintos níveis de deslocamento

Material	Carga (kN) correspondente a 10 mm de deslocamento (d/30)	Carga (kN) correspondente a 30 mm de deslocamento (d/10)
Areia	12,5	17,3
Areia com 0,25 % de fibras	17,8	28,0
Areia com 0,5 % de fibras	21,0	35,3

A partir dos resultados expressos na Tabela 4.6 pode ser verificado que para deslocamentos maiores o efeito da inclusão de fibras na capacidade de suporte se torna mais expressivo. A inclusão de 0,25 % de fibras proporcionou um acréscimo de resistência de aproximadamente 42 % para 10 mm de recalque, alcançando cerca de 62 % de ganho para 30 mm de deslocamento, quando comparado ao solo sem reforço.

O efeito da inclusão de fibras também é mais expressivo para maiores teores de fibras. A inclusão de 0,5 % de fibras proporcionou um acréscimo de resistência de aproximadamente 68 % para 10 mm de recalque, alcançando 104 % de ganho para 30 mm de deslocamento, quando comparado ao solo sem reforço.

A energia de deformação absorvida é determinada a partir da integração das áreas correspondentes a cada uma das curvas carga-recalque, para pré-determinados níveis de recalque. Desta maneira também é possível observar a que nível de deslocamento o reforço começa a apresentar a contribuição no aumento da resistência do compósito. Na Figura 4.73 são apresentados os resultados da energia de deformação absorvida para diferentes níveis de recalque das areias reforçadas e não reforçada com fibras.

A partir destes resultados, observa-se novamente que, até certo limiar, o comportamento dos materiais reforçados e não reforçados são semelhantes e que a partir de determinado nível de recalque, os reforçados começam a apresentar um ganho de energia, tanto mais acentuado quanto maiores os teores de fibras.

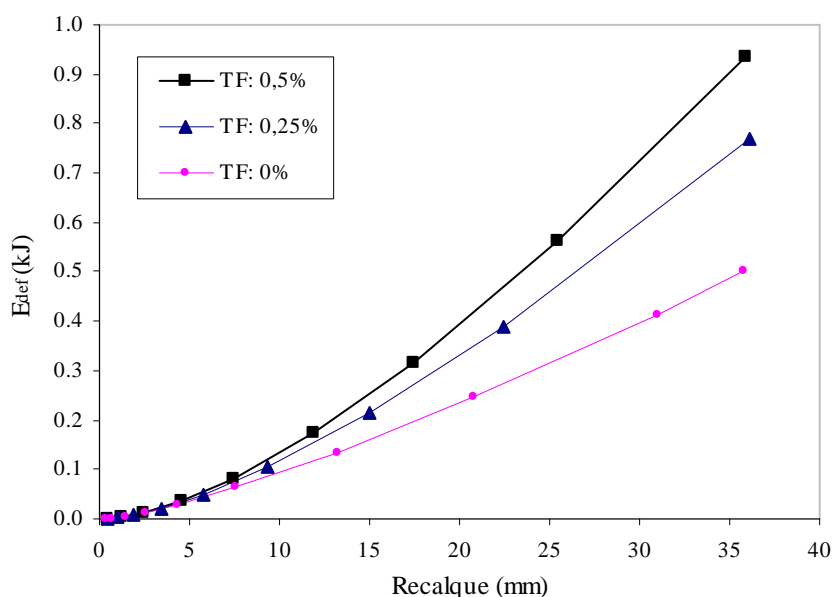


Figura 4.73: influência do teor de fibras na energia de deformação absorvida das areias

A Figura 4.74 mostra os níveis de recalque a partir de onde os reforços começam a apresentar ganho de energia, obtidos a partir da relação entre as energias de deformação absorvida das areias reforçadas pela areia não reforçada.

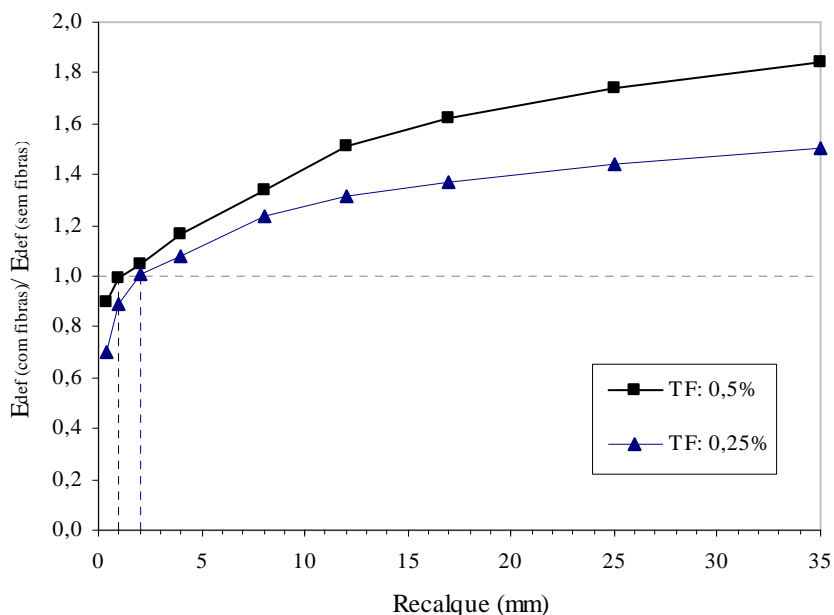


Figura 4.74: normalização da energia de deformação absorvida

Pode-se observar que, para maiores teores de fibras, recalques menores são necessários para que as fibras mobilizem ganhos de energia nos compósitos. Para que essa mobilização ocorra

são necessários 2 mm de recalque para a areia reforçada com 0,25 % de fibras e 1 mm para a areia com 0,5 % de fibras.

A Figura 4.75 mostra a comparação de distribuição vertical de tensões ao longo da profundidade das camadas compactadas entre a areia e as areias reforçadas com fibras. Os resultados apresentados são relativos ao primeiro e último estágio de carregamento, e em linhas tracejadas a distribuição teórica de tensões.

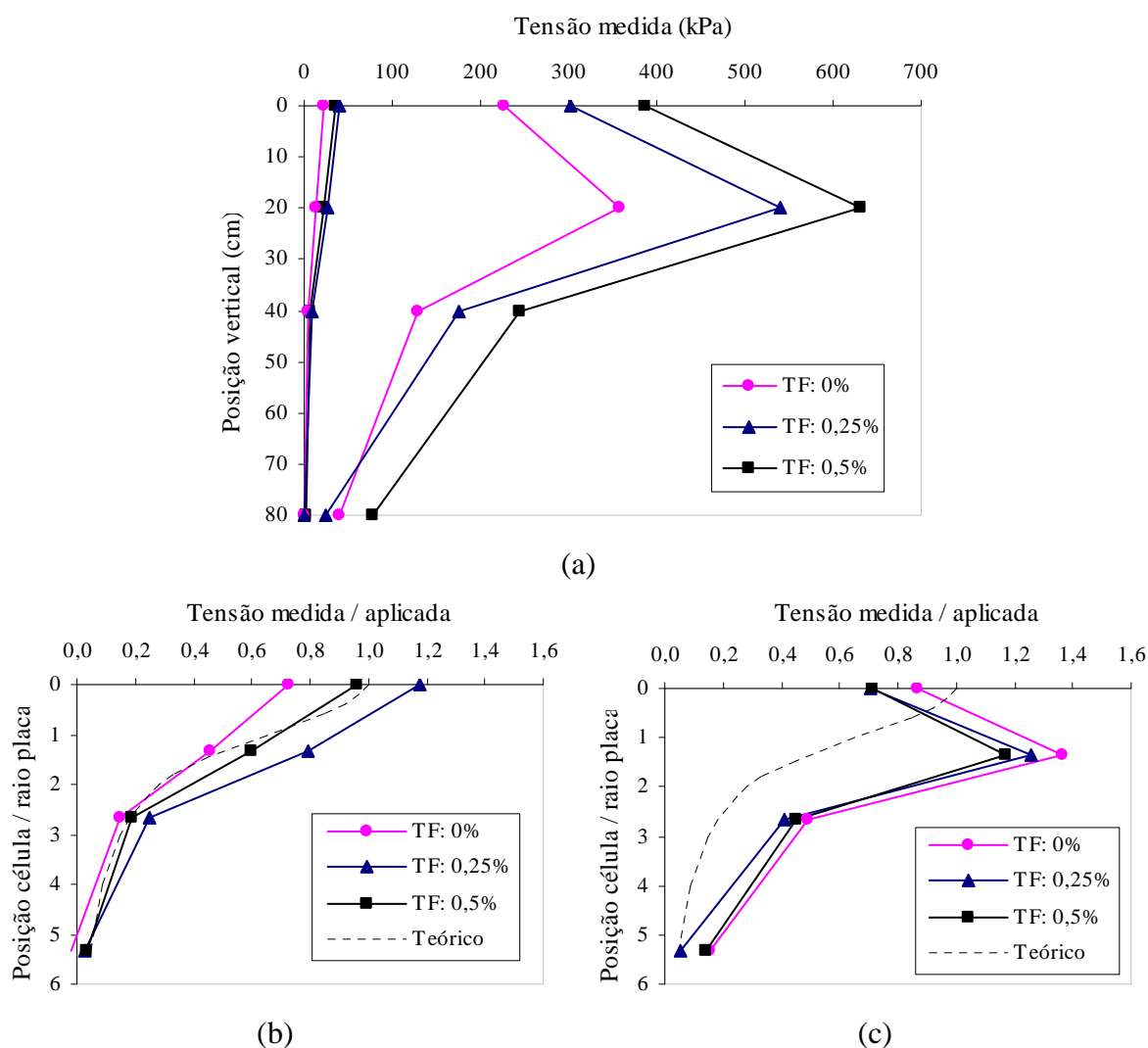


Figura 4.75: influência do teor de fibras na distribuição vertical de tensões: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado

Para o primeiro estágio normalizado de carregamento (Figura 4.75 – b) é possível observar, em uma análise qualitativa, que as tensões medidas pelas células de tensão, ao longo da profundidade, são muito próximas àquelas estimadas pela teoria da elasticidade. A pequena variação apresentada pode estar relacionada ao pequeno incremento de tensão aplicado neste

primeiro estágio de carregamento que provoca um pequeno deslocamento no solo e nas células de tensão.

Como esperado, as leituras de tensão no último estágio normalizado de carregamento são bastante distintas daquelas estimadas pela teoria da elasticidade, sendo que são muito próximas entre si, para os três materiais estudados, com uma sutil diferença, a 20 cm de profundidade. A concentração de tensões nesta região diminui com o aumento do teor de fibras na matriz e a Figura 4.76 – c corrobora com a hipótese de que pequenas diferenças na forma de ruptura vem ocorrendo com a inclusão destas fibras ao solo, onde o solo com maior teor de fibras estaria mais próximo a uma ruptura por puncionamento.

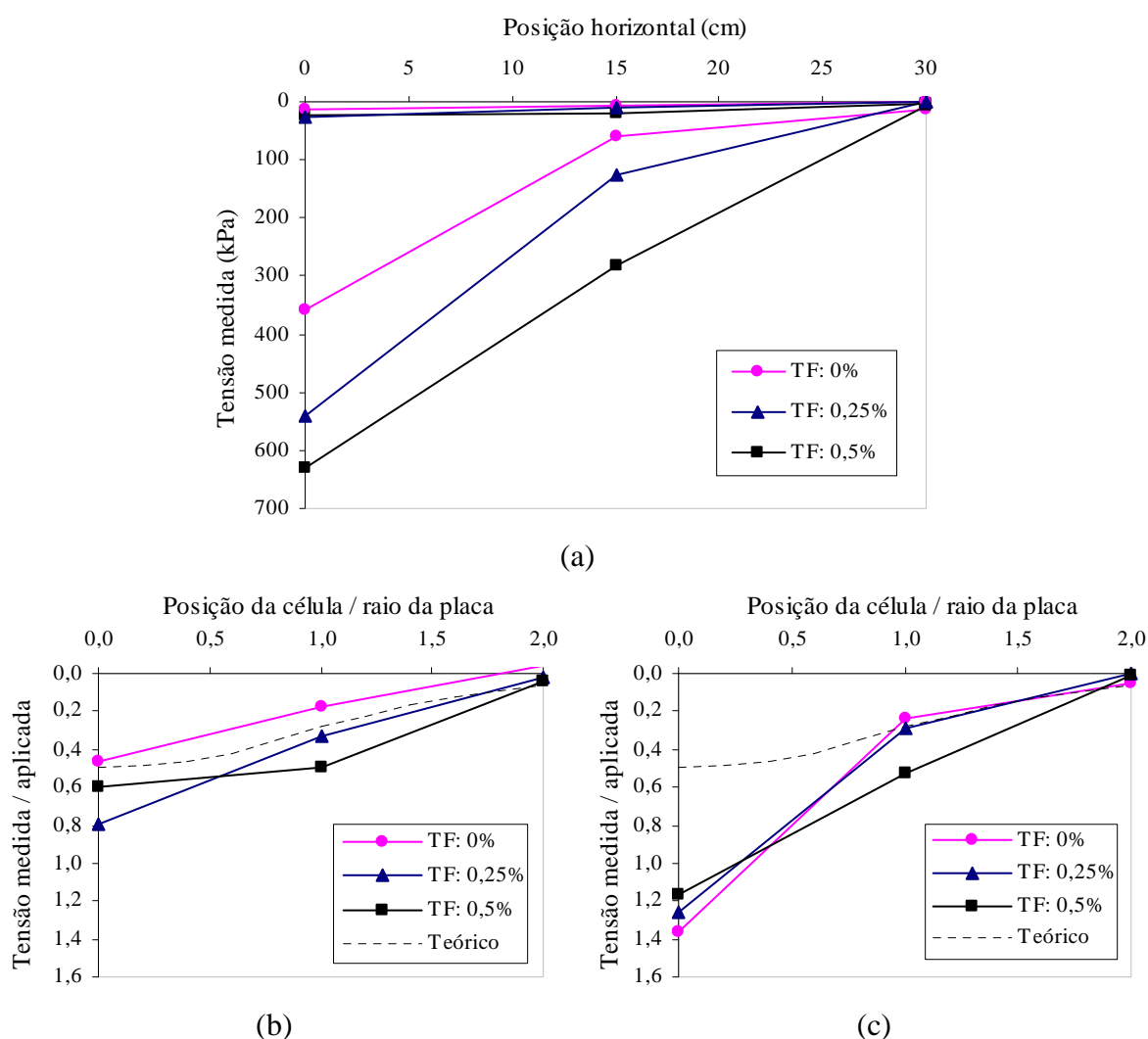


Figura 4.76: influência do teor de fibras na distribuição horizontal de tensões: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado

A Figura 4.76 – c mostra uma mudança na distribuição horizontal de tensões que inicia-se abaixo do centro da placa, cujas leituras de tensão são exatamente as mesmas referentes a Figura 4.75 – c a 20 cm de profundidade. Neste ponto, onde ocorre um acúmulo de tensões, a inclusão de fibras reduz este acúmulo na medida em que se aumenta o seu teor. Juntamente com esta redução de tensões abaixo do centro da placa de aço (0 cm) ocorre um aumento de tensões abaixo das bordas da placa (15 cm) quando se aumenta o teor de fibras do compósito. Estes aumentos e reduções de tensões refletem-se em uma forma diferente de distribuir as tensões quando os materiais possuem diferentes teores de fibras.

A resistência à tração que as fibras conferem aos compósitos pode estar influenciando na forma de ruptura dos materiais, mobilizando a resistência de solos mais afastados da região de carregamento comprovando assim que as fibras distribuem as tensões em uma área maior, com reflexos na inibição da propagação de fissuras e no aumento da capacidade de suporte.

A Figura 4.77 apresenta as medidas de tensão na placa de aço no primeiro e no último estágio de carregamento, para as areias reforçadas e não reforçadas.

Os resultados normalizados, onde as tensões medidas são divididas pelas tensões aplicadas, indicam uma distribuição de tensões uniformes entre o centro e as bordas da placa, para todos os materiais estudados. Pequenas variações nas tensões medidas são função das dificuldades de se instalar tais sensores e também do efeito que um provoca ao outro pela proximidade de instalação entre si.

Apesar das dificuldades de análise das tensões medidas na placa, em termos gerais e de forma qualitativa é possível concluir que a inclusão de fibras ao solo, bem como o aumento do seu teor, não altera a distribuição das tensões na placa de aço.



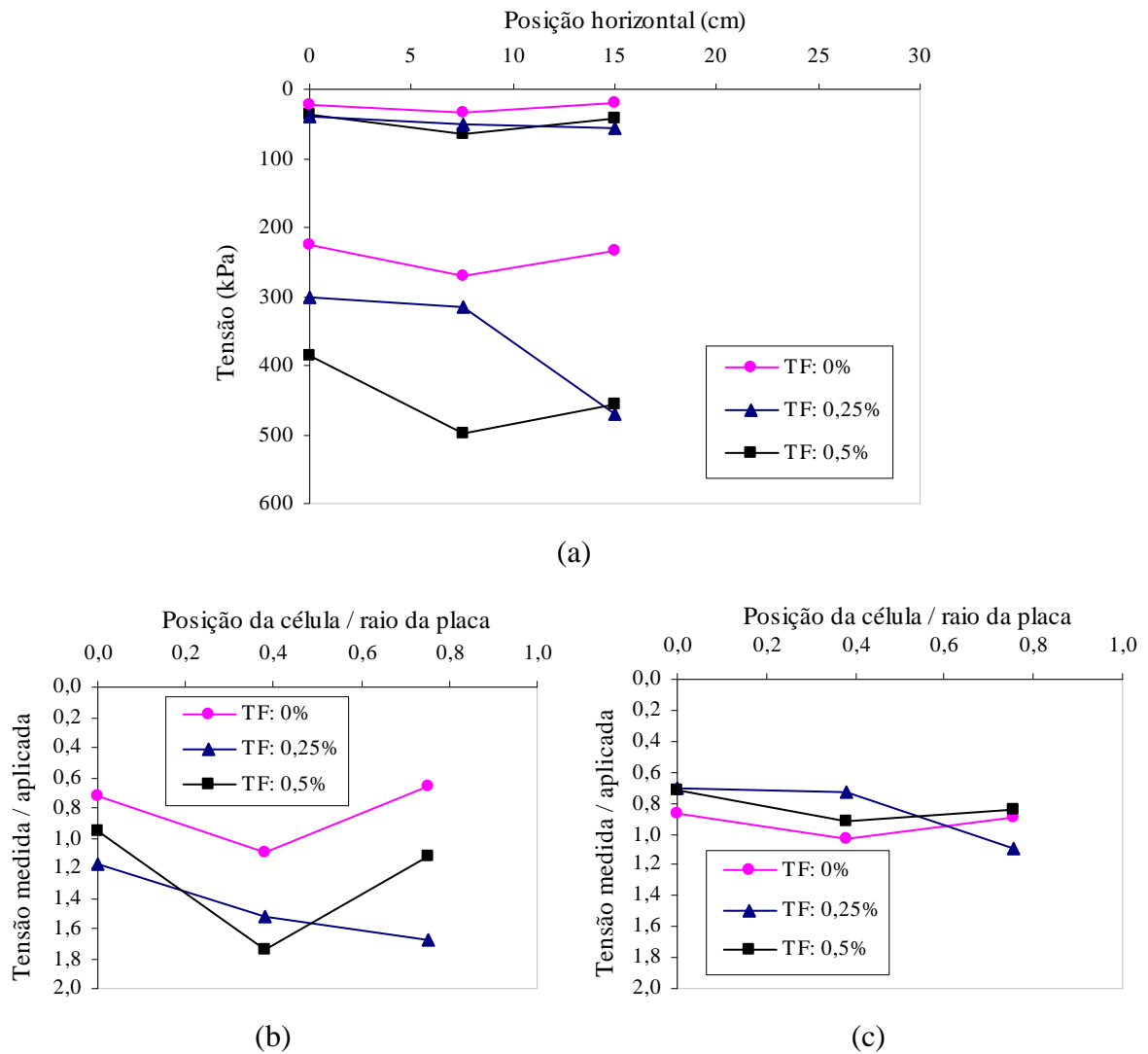


Figura 4.77: influência do teor de fibras na distribuição de tensões na placa: (a) primeiro e último estágio de carregamento, (b) primeiro estágio normalizado e (c) último estágio normalizado

## CAPÍTULO 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 5.1 Conclusões

A partir dos resultados e das análises apresentadas no capítulo anterior, foram estabelecidas algumas conclusões, muitas delas já citadas no decorrer do trabalho. As principais estão dispostas quanto aos ensaios de calibração e aos de placa:

*a) Quanto aos ensaios de calibração:*

- As células de tensão total estudadas apresentam uma excelente repetibilidade dos valores medidos e também uma correlação extremamente linear das tensões lidas com o aumento das pressões aplicadas;
- A variação da densidade relativa da areia analisada não influencia nas constantes de calibração das células de tensão total;
- As análises numéricas através do Método dos Elementos Finitos mostraram-se de grande valia na interpretação das distribuições de tensões nas câmaras de calibração;
- A distribuição das tensões verticais é função do fator de forma das câmaras, onde a câmara com maior fator apresenta uma maior redução das tensões com o aumento da profundidade analisada. Erros no cálculo do fator de atuação das células (CAF) podem ocorrer se não tomadas precauções quanto à escolha da forma da câmara de calibração e da posição de inserção das células de tensão total.

*b) Quanto aos ensaios de placa:*

- A inclusão aleatória de fibras de polipropileno melhora o comportamento carga-recalque do material, com influência na mudança dos mecanismos de ruptura da matriz arenosa;
- O comportamento carga-recalque da areia e das areias reforçadas é similar no início do carregamento, até o momento em que a mobilização das fibras inseridas na matriz se mostra mais efetiva, a partir de um certo nível de recalque e carga aplicada;
- Os materiais reforçados e não reforçados apresentaram comportamentos semelhantes quanto à distribuição vertical de tensões, onde ocorre um acúmulo de tensões, a 20 cm de profundidade, com o aumento da carga aplicada. A inclusão do reforço fibroso reduz este acúmulo de tensões, pronunciando-se para os maiores teores de fibras;
- Ocorre uma mudança na distribuição horizontal de tensões quando da inclusão do reforço fibroso ao solo, onde regiões mais afastadas do centro da placa são mais solicitadas quando se aumenta o teor de fibras, confirmando-se assim que as fibras distribuem as tensões em uma área maior;
- Quanto às tensões lidas na placa de aço, a inclusão do reforço fibroso não alterou sua distribuição de tensões.

## **5.2 Sugestões**

No decorrer deste trabalho muitas hipóteses foram levantadas e muitas sugestões tiveram que ser abandonadas por motivos diversos. Neste item ficam registradas as mais relevantes para a ampliação do conhecimento atual sobre medidas de tensão e solos reforçados:

- Com a atual tecnologia e aprimoramento constante, as células de tensão total apresentam valores de CAF cada vez mais próximos da unidade, valores onde teoricamente não seriam mais necessárias as calibrações. Diferentes densidades de solo até então apresentariam diferentes calibrações, fato comprovado por

vários trabalhos e que aqui não foi confirmado. De fundamental importância seria a realização deste programa experimental em diferentes tipos de solos com uma faixa de densidades maior, para que se possa concluir definitivamente que as células atuais são tão bem projetadas que deixariam de ser necessárias as análises, ou calibrações, para diferentes densidades de solo.

- Medir tensões no interior de solos com sistema de dupla camada, sendo a superior cimentada, bem como no contato entre as camadas, em ensaios de placa.
- Medir tensões horizontais, através de células de tensão total ou extensômetros de resistência elétrica “strain gages”, em provas de carga em solos reforçados e não reforçados com fibras.
- Realização de ensaios triaxiais em equipamento apropriado, que comporte o elevado comprimento das fibras aqui utilizadas. Avaliação de uma faixa maior de teor de fibras inseridas.
- Um tema promissor de análise numérica é o desenvolvimento de um modelo constitutivo para solos reforçados com fibras, visando a simulação de seu comportamento com diversas aplicações em obras geotécnicas.
- Outro tema bastante comentado no meio acadêmico é a análise do comportamento dos compósitos fibrosos quando solicitados a carregamentos permanentes.

## REFERÊNCIAS

- AL WAHAB, R.M.; AL-QURNA, H.H. Fiber Reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. In: GEOSYNTHETICS'95 CONFERENCE. 1995, Nashville. Proceedings ... v.2, p.433-466, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Prova de carga direta sobre terreno de fundação: NBR 6489. Rio de Janeiro, 1984-b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Análise granulométrica: NBR 7181. Rio de Janeiro, 13p, 1984-e.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solos – determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos: NBR 12004. Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Estaca – Prova de carga estática: MB 3472. Rio de Janeiro, 1991-a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solos – determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos: NBR 12051. Rio de Janeiro, 1991-b.
- BAILEY, A.C.; BURT, E.C. Soil stress states under various tire loadings. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v. 31, n. 3, p.672-676, 1988.
- BAILEY, A.C.; NICHOLS, T.A.; JOHNSON, C.E. Soil stress state determination under wheel loads. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v. 31, n. 5, p.1309-1314, 1988.
- BENTO, P.F.; CARVALHO, J.C. Estudo da utilização de fibras de polipropileno como reforço de solos estabilizados para pavimentação da região de Urucu-Am. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2006, Curitiba. Meio de divulgação: CD, 2006.
- BUDINSKI, K.G. Engineering materials, properties and selection. 5ed. New Jersey: Prentice Hall International, 653p., 1996.
- BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO N.J. Soil fiber reinforcement: basic understanding. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 1996, San Diego. Anais... v.1, p. 878-884, 1996.
- CASAGRANDE, M.D.T. Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais. Porto Alegre, 2001, 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- CASAGRANDE, M.D.T. Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Porto Alegre, 2005, 219p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

- CASAGRANDE, M.D.T; CONSOLI, N. Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.25, n.3, p.223-230, 2002.
- CASAGRANDE, M.D.T; CONSOLI, N.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P.D.M. Comportamento em campo e laboratório de um solo reforçado com fibras. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.25, n.3, p.247-255, 2002.
- CASAGRANDE, M. D. T., CONSOLI, N. C. Comportamento a grandes deformações cisalhantes de uma areia reforçada com fibras In: IV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Curitiba. Geosul' 2004. p.293–300, 2004.
- CASAGRANDE, M. D. T., KNOP, A., CONSOLI, N. C., THOMÉ, A. Provas de carga em placa e ring shear em uma areia reforçada com fibras de polipropileno. In: V Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE V – 2004. São Paulo, v.2. p.402 – 410, 2004.
- CASAGRANDE, M. D. T.; CONSOLI, N. C. Comportamento de uma areia reforçada com fibras submetida a ensaios ring shear. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2006, Curitiba. Anais... Curitiba: ABMS, 4v., v.1, p.531-535, 2006.
- CLAYTON, C.R.I.; BICA, A.V.D. The design of diaphragm-type boundary total stress cells. Géotechnique, v. 43, n. 4, p. 523-535, 1993.
- CLAYTON, C.R.I.; VAN DER BERG, J.P.; HEYMANN, G.; BICA, A.V.D. The performance of pressure cells for sprayed concrete tunnel linings. Géotechnique, v. 52, n. 2, p. 107-115, 2002.
- CONSOLI, N.C.; SCHNAID, F.; MILITITSKY, J.; VENDRUSCOLO, M.A. Design of shallow foundations on structured and compacted soils based on plate loading tests and finite element analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 14, Hamburgo. Proceedings... Rotterdam: A.A.Balkema, , p. 783-784, 1997-a.
- CONSOLI, N.C.; ULBRICH, L.A.; PRIETTO, P.D.M. Engineering behavior of randomly distributed fiber-reinforced cement soil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, p.481-486, 1997-b.
- CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.124, n.12, p. 1211-1214, 1998-a.
- CONSOLI, N.C.; SCHNAID, F.; MILITITSKY, J. Interpretation of plate load tests on residual soil site. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.124, n.9, p. 857-867, 1998-b.
- CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. The behavior of a fiber-reinforced cemented soil. Ground Improvement, ISSMGE, v.3 n.3, p.21-30, 1999.

- CONSOLI, N.C.; MONTARDO, J.P.; PRIETTO, P.D.M.; PASA, G. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.128, n.6, p. 462-472, 2002.
- CONSOLI, N.C.; VENDRUSCOLO, M.A.; PRIETTO, P.D.M. Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.129, n.1, p. 96-101, 2003-a.
- CONSOLI, N.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; PRIETTO, P.D.M.; THOMÉ, A. Plate load test on fiber-reinforced soil. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Reston - Virginia - USA, v. 129, n. 10, p. 951-955, 2003-b.
- CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; HEINECK, K. S. Large Strain Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Sandy Soil In:12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Boston, USA. *Soil America Rock 2003*. v.2. p.2201 – 2206, 2003-c.
- CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; DONATO, M.; PRIETTO, P. D. M. Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites. *Ground Improvement*, ISSMGE, v.8 n.2, p.77-90, 2004.
- CONSOLI, N. C. ; CASAGRANDE, M. D. T. ; COOP, M. R. Behavior of a fiber-reinforced sand under large shear strains. In: 16 International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2005, Osaka, Japan. 16 ICSMGE. Rotterdam : Millpress, v.3, p.1331-1334, 2005-a.
- CONSOLI, N. C., CASAGRANDE, M. D. T., COOP, M. R. The effect of fiber-reinforcement on the isotropic compression behavior of a sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.131, n.11, p.1434-1436, 2005-b.
- CROCKFORD, W.W.; GROGAN, W.P.; CHILL, D.S. Strength and life of stabilized pavement layers containing fibrillated polypropylene. *Transportation Research Record*, Washington D.C., n.1418, p.60-66, 1993.
- CUDMANI, R.O. Estudo do comportamento de sapatas assentes em solos residuais parcialmente saturados através de ensaios de placa. Porto Alegre, 1994. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- DEWOOLKAR, M.M.; KO, H.Y.; PAK, R.Y.S. Experimental developments for studying static and seismic behavior of retaining walls with liquefiable backfills. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 19, p. 583-593, 2000.
- DONATO, M. Comportamento Mecânico de Concreto Compactado com Rolo Reforçado com Fibras de Polipropileno. Porto Alegre, 2003. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- DONATO, M.; CERATTI, J.A.P.; CONSOLI, N.C. Comportamento mecânico de concreto compactado com rolo com adição de fibras de polipropileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, v.1, p.251-260, 2002.

- DONATO, M.; FOPPA, D.; CERATTI, J. A. P.; CONSOLI, N. C. Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos. *Solos e Rochas*, São Paulo, ABMS/ABGE, v.27, n.2, p. 161-179, 2004.
- DUNNICLIFF, J. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. A Wiley-Interscience Publication. p. 577, 1988.
- EVSTATIEV, D.; MILEV, G.; KARACHOROV, P. Settlement of TV tower built on stabilized loess. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 12., 1989, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rotterdam: A.A. Balkema, v.2, p.1209-1212, 1985.
- FATANI, M.N.; BAUER, G.E.; AL-JOULANI, N. Reinforcing soil with aligned and randomly oriented metallic. *Geotechnical Testing Journal*, Philadelphia, v.14, n.1, p. 78-87, 1991.
- FEUERHARMEL, M.R. *Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno*. Porto Alegre, 2000. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- FREITAS, E.G.A.; CALLIL JR., C. Estudo experimental do parâmetro K em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. *XXXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Salvador, 2002.
- FREITAG, D.R. Soil randomly reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.112, n.8, p. 823-826, 1986.
- GHAZAVI, M.; AMEL SAKHI, M. Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand. *Introduction Journal of Geomechanics*. ASCE, v.5, n.1, p.58-65, 2005.
- GOMES, F.C.; JÚNIOR, C.C. Avaliação das ações devidas aos produtos armazenados em silos horizontais. *XXXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Salvador, 2002.
- GONÇALVES, F.P. Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados. *PPGEC/ UFRGS*, Tese de Doutorado, p. 359, 2003.
- GONÇALVES, F.P.; CERATTI, J.A.P.; BICA, A.V.D. The use of embedded stress cells for monitoring pavement performance. *Geotechnical Testing Journal*. ASTM, v.26, n.4, p.363-372, 2003.
- GRAY, D.H.; AL-REFEAI, T. Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.112, n.8, p. 804-820, 1986.
- GRAY, D.H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.109, n.3, p. 335-353, 1983.
- GRAY, D.H.; MAHER, M.H. Admixture stabilization of sands with random fibers. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 12., 1989, Rio de Janeiro, *Proceedings...* Rotterdam: A.A. Balkema, v.2, p.1363-1366, 1989.



- HADALA, P.F. The effect of placement method on the response of soil stress gages. In: Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, The University of New Mexico Press, Albuquerque, NM, p.255-263, 1967.
- HANNA, T.H. Field instrumentation in geotechnical engineering. Trans Tech Publications. p. 843, 1985.
- HANNA, A.M.; MEYERHOF, G.G. Design charts for ultimate bearing capacity of foundation on sand overlying soft clay. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v.17, n.2, p.300-303, 1980.
- HANNANT, L. Polymers and polymers composites. In: J.M. ILLSTON. Construction materials: their nature and behavior. 2ed., London: J.M. Illston/E & FN Spon, p.359-403, 1994.
- HARRIS, H.D.; BAKKER, D.M. A soil stress transducer for measuring in situ soil stresses. Soil & Tillage Research, v. 29, p. 35-48, 1994.
- HEINECK, K.S. Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais. Porto Alegre, 2002. 251p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- HEINECK, K.S.; CONSOLI, N.C. Influência da adição de fibras na resistência última de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 12., 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, 3v., v.1, p.403-408, 2002.
- HEINECK, K. S., CONSOLI, N. C., BICA, A., CASAGRANDE, M. D. T. Comportamento de Solos Micro-Reforçados a Pequeníssimas e Grandes Deformações Cisalhantes. Solos e Rochas. São Paulo - SP, ABMS/ABGE, v.26, n.1, p.3-17, 2003-a.
- HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C.; BICA, A. V. D.; FLORES, J. A. Comportamento de misturas de cinza de carvão-bentonita e areia-bentonita. Geotecnia. Lisboa - Portugal: v.99, p.60 - 78, 2003-b.
- HEINECK, K. S.; CONSOLI, N. C. Discussion to Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. Géotechnique, London, v.54, n.1, p.72-73, 2004.
- HEINECK, K. S.; COOP, M.R.; CONSOLI, N.C. The effect of micro-reinforcement of soils from very small to large shear strains. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. New York, v.131, n.8, p.1024-1033, 2005.
- HILMER, K. Ground Improvement by soil replacement. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8., 1983, Helsinki. Proceedings ... Rotterdam: A. A. Balkema, v.1, p.37-43, 1983.
- HOARE, D.J. Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL REINFORCEMENT, 1979, Paris. Proceedings ... . v.1, p.47-52, 1979.

- HOLLAWAY, L. Polymers and polymer composites. In: Construction Materials; their nature and behavior. London: J. M. Illston/E. & F.N. Spon, 2ed., p.321-358, 1994.
- HOMEM, T.R. Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras. Porto Alegre, 2002. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- ILLSTON, J.M. Construction materials; their nature and behavior. 2ed. London: E & FN Spon, 518p., 1994.
- ISRM. Suggested methods for pressure monitoring using hydraulic cells rock characterization testing and monitoring, ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, p. 201-211, 1981.
- JEWELL, R.A.; WROTH, C.P. Direct shear tests on reinforced sand. Géotechnique, London, v.37, n.1, p.53-68, 1987.
- JOHNSTON, C.D. Fiber-reinforced cement and concrete. In: Advances in concrete technology. 2ed. Ottawa: V. M. Malhorta, p.603-673., 1994.
- KANIRAJ, S.R.; HAVANAGI, V.G. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.127, n.7, p.574-584, 2001.
- KIRBY, J.M. Soil stress measurement. Part 2: Transducer beneath a circular loaded area. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 73, p. 141-149, 1999.
- KISHIMOTO, H.J.; WAY, T.R.; TANIGUCHI, T. Three-directional contact stress distributions for a pneumatic tractor tire in soft soil. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v. 41, n. 5, p. 1237-1242, 1998.
- LA ROCHELLE, P.; LEROUÉIL, S.; TRAK, B.; BLAIS-LEROUX, L.; TAVENAS, F. Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests. In: SYMPOSIUM ON ADVANCED TRIAXIAL TESTING OF SOIL AND ROCK, 1986, Louisville. Proceedings... Philadelphia: American Society of Testing Materials, 1988. 1v., p.715-731.
- LEOCÁDIO, G. A. S. Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória tratadas superficialmente com EPS reciclado. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.
- LEOCÁDIO, G. A. S.; BOTARO, V. R.; RIBEIRO, L. F. M. Inclusão aleatória de fibras curtas de sisal tratadas com poliestireno expandido (EPS) reciclado para reforço de solos lateríticos. In: 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2005, Águas de Lindóia. 8º CBPol. v. 1, p. 408-409, 2005.
- LEOCÁDIO, G. A. S.; BOTARO, V. R.; RIBEIRO, L. F. M. Superficial treatment of sisal fiber with recycled EPS for use as reinforcement of lateritic soil. In: 41st INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MACROMOLECULES WORLD POLYMER CONGRESS – MACRO 2006.

- LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; THOMASI, L. The mechanical response of soil-lime mixtures reinforced with short synthetic fiber. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 3., 1996, San Diego. Proceedings... v.1, p.868-877, 1996.
- LOPES, F.R. The undrained bearing capacity of piles and plates studied by the Finite Element Method. Ph.D. Thesis – University of London, London, 1979.
- MAHER, M.H.; GRAY, D.H. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.116, n.11, p.1661-1677, 1990.
- MAHER, M.H.; HO, Y.C. Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads. Geotechnical Testing Journal, Philadelphia, v.16, n.3, p.330-338, 1993.
- MAHER, M.H.; HO, Y.C. Mechanical properties of Kaolinite/fiber soil composite. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.120, n.8, p. 1381-1393, 1994.
- MARSLAND, A.; EASON, B.J. Measurements of displacement in the ground below loaded plates in deep boreholes. In: BRITISH GEOTECHNICAL SOCIETY SYMPOSIUM ON FIELD INSTRUMENTATION, 1973, Butterworths. Proceedings. p.304-317, 1973.
- MASHIMO, H.; ISHIMURA, T. Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel Tunnelling and Underground Space Technology, v. 18, p. 233-241, 2003.
- MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; AL-HASANI, M.M. Effect of inclusion properties on the behavior of sand. Géotechnique, London, v.28, n.3, p.327-346, 1978.
- MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; HYTIRIS, N. MERCER, F.B. Soil strengthening using randomly distributed mesh elements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 11., São Francisco, Proceedings... v.3, p.1735-1738, 1988.
- MELLIOS, G.A. Provas de carga em solos porosos. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, 1985, São Paulo. Anais ... São Paulo: ABMS/ABEF, v.2, p.73-102, 1985.
- MEYERHOF, G.G. Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v. 11, n. 2, p. 223-229, 1974.
- MEYERHOF, G.G.; HANNA, A.M. Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v.15, n.4, p.565-572, 1978.
- MICHALOWSKI, R.L.; CERMÁK, J. Triaxial compression of sand reinforced with fibers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.129, n.2, p.125-136, 2003.
- MINKOV, M.; EVSTATIEV, D.; KARACHOROV, P. Stress and deformations in stabilized loess. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1981, Stockholm. Proceedings... Rotterdam: A.A.Balkema, 3v, v.2, p.193-197, 1981.

- MITCHELL, J.K.; KATTI, R.K. Soil improvement. State-of-the-art report. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1981, Stokholm., Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, v.4, p.261-317, 1981.
- MONTARDO, J.P. Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. Porto Alegre, 1999. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- MONTARDO, J.P.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M. Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.24, n.3, p.191-209, 2002.
- MOREL, J.C.; GOURC, J.P. Mechanical behaviour of sand reinforced with mesh elements. Geosynthetics International, Minnesota, v.4, n. 5, p.481-508, 1997.
- MURRAY, J.J.; FROST, J.D.; WANG, Y. Behavior of a sandy silt reinforced with discontinuous recycled fiber inclusions. In: PROC. OF THE 79<sup>TH</sup> ANNUAL MEETING TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Washington. 29p., 2000.
- NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; MCMANIS, K.L. Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 3., San Diego, 1996. Proceedings... Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, v.1, p.826-835, 1996.
- PALMEIRA, E.M. Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos. In: SEMINÁRIO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA. Geossintéticos 92... Brasília, p.1-20, 1992.
- PALMEIRA, E.M. Evolução dos geossintéticos no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS. Geossintéticos 95... Palestras especiais, p.5-15, 1995.
- PELLS, P.J.N. Plate loading tests on soil and rock. In: EXTENSION COURSE ON IN-SITU TESTING FOR GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS, 1983, Sydney. Proceedings ... Rotterdam: A. A. Balkema, p.73-85, 1983.
- PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. São Paulo: Oficina de Textos, 247p., 2000.
- RANJAN, G.R.; CHARAN, H.D. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.122, n.6, p.419-426, 1996.
- ROBERTSON, P.K. In situ testing and its application to foundation engineering. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v.23, p.537-588, 1986.
- SALES, L.F.P. Estudo do comportamento de fundações superficiais assentes em solos tratados. . Porto Alegre, 1998. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

- SANTONI, R.L.; TINGLE, J.S.; WEBSTER, S.L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.127, n.3, p.258-268, 2001.
- SANTOS, A.P.S. Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição de tensão lateral. Porto Alegre, 2004. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- SELIG, E.T. Soil stress gage calibration. *Geotechnical Testing Journal*. ASTM, v. 3, n. 4, p. 153-158, 1980.
- SHENBAGA R.; KANIRAJ, V.; GAYATHRI. Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions. *Geotext Geomembrane*. v.21, p.123-149, 2003.
- SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.115, n.8, p.1134-1147, 1989.
- SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. Deformation-based model for reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.116, n.7, p.1153-1170, 1990.
- SILVA, C.C.; BOSZCZOWSKI, R.B.; KORMANN, A.C.M.; PERNA, B.P.J.C.N. Estudo do comportamento de dois solos reforçados com fibras de polipropileno, PET, sisal e raspa de pneu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2006, Curitiba. Anais... Curitiba: ABMS, 4v., v.1, p.519-524, 2006.
- SILVA, M.A.; BUENO, B.S.; LIMA, D.C. Estabilização de solos com inclusões curtas aleatórias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS, 2., 1995. Geossintéticos 95... p.327-335, 1995.
- SITHARAM, T. G.; SIREESH, S. Model studies of embedded circular footing on geogrid-reinforced sand beds. *Ground Improvement, ISSMGE*, v.8 n.2, p.69-76, 2004.
- SPECHT, L.P. Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação. Porto Alegre, 2000. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- SPECHT, L.P.; HEINECK, K.S.; CERATTI, J.A.P.; CONSOLI, N.C. Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos. *Solos e Rochas*, São Paulo, ABMS/ABGE, v.25, n.1, p.15-34, 2002.
- SPINELLI, L.F. Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados. Porto Alegre, 1999. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- STAUFFER, S.D.; HOLTZ, R.D. Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand. *Transportation Research Record*, Washington, D.C., n.1474, p.82-95, 1996.
- TAYLOR, D.W. Pressure distribution theories, earth pressure cell investigations and pressure distribution data. US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1947.

- TAYLOR, G.D. *Materials in construction*. 2ed. London: Longman Scientific & Technical, 284p., 1994.
- TEODORO, J.M.; BUENO, B.S. Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11, Brasília, 1998. Anais... v.2., p.1093-1100, 1998.
- TEODORO, J.M. Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas. São Paulo, 1999. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de São Carlos/ USP.
- TERZAGHI, K. *Theoretical soil mechanics*. New York: John Wiley and Sons, 722p., 1943.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B. *Soil mechanics in engineering practice*. 2.ed. New York: John Wiley and Sons, 1967.
- TESSARI, M.A. Ensaio de placa em camadas de cinza pesada de carvão tratados com cimento. Porto Alegre, 1998. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- THOMÉ, A. Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais. Porto Alegre, 1999. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- THOMÉ, A.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M. Previsão do comportamento de fundações superficiais apoiadas em sistema de dupla camada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 12., 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: ABMS, 3v., v.3, p.1447-1456, 2002.
- TINGLE, J. S.; SANTONI, R. L.; WEBSTER, S. L. Full scale field tests of discrete fiber-reinforced sand. *Journal of Transactional Engineering*, ASCE, v.128, n.1, p.9-16, 2002.
- ULBRICH, L.A. Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras. Porto Alegre, 1997. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- U. S. Army Corps of Engineers. Instrumentation of Embankment Dams and Levees: EM 1110-2-1908. June 30, 1995. Disponível em: <<http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/>>. Acessado em: 18 de junho de 2001.
- VAN IMPE, W.F.V. *Soil improvement techniques and their evolution*. Rotterdam, A.A. Balkema, 125p., 1989.
- VENDRUSCOLO M.A. Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado. Porto Alegre, 1996. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- VENDRUSCOLO, M.A. Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno. Porto Alegre, 2003. 224p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

- VÉSIC, A.S. Bearing capacity of shallow foundations. *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, p.121-147, 1975.
- WEILER, W.A.; KULHAWY, F.H. Factors affecting stress cell measurements in soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, v. 108, p.1529-1548, 1982.
- YETIMOGLU, T.; SALBAS, O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete. *Geotextiles & Geomembrane*. v.21, p.103-110, 2003.
- ZORNBERG, J.G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. *Géotechnique*, London, v.52, n.8, p.593-604, 2002.

## **ANEXO**

**REPETIÇÃO DAS CALIBRAÇÕES DAS CÉLULAS DE CONTATO**



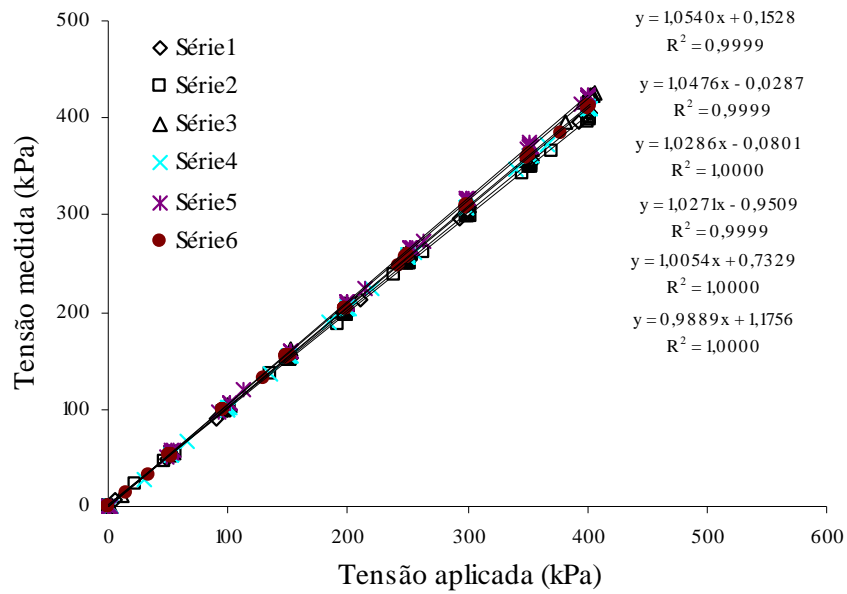


Figura 1: célula BE10KHS 0001 na posição central (0 cm) da câmara de calibração

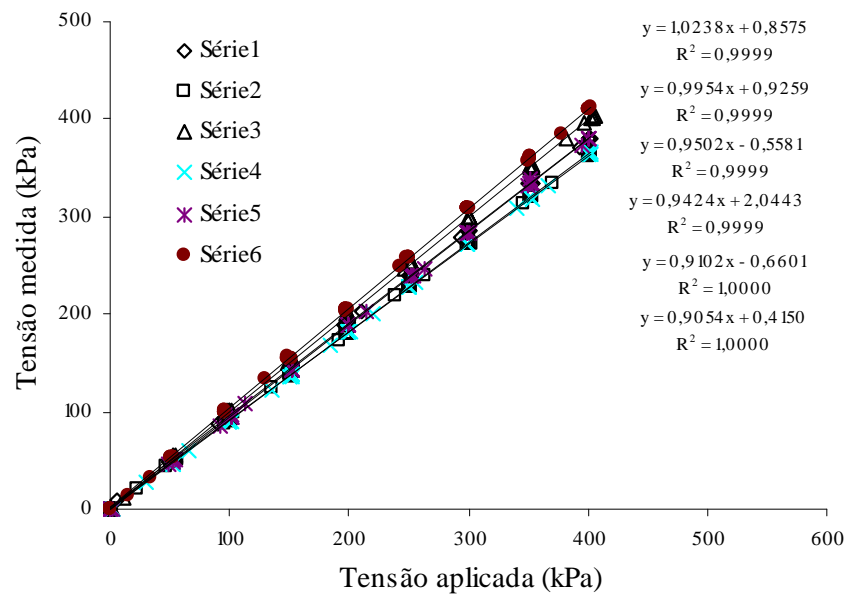


Figura 2: célula BE10KHS 0002 na posição intermediária (11 cm) da câmara de calibração

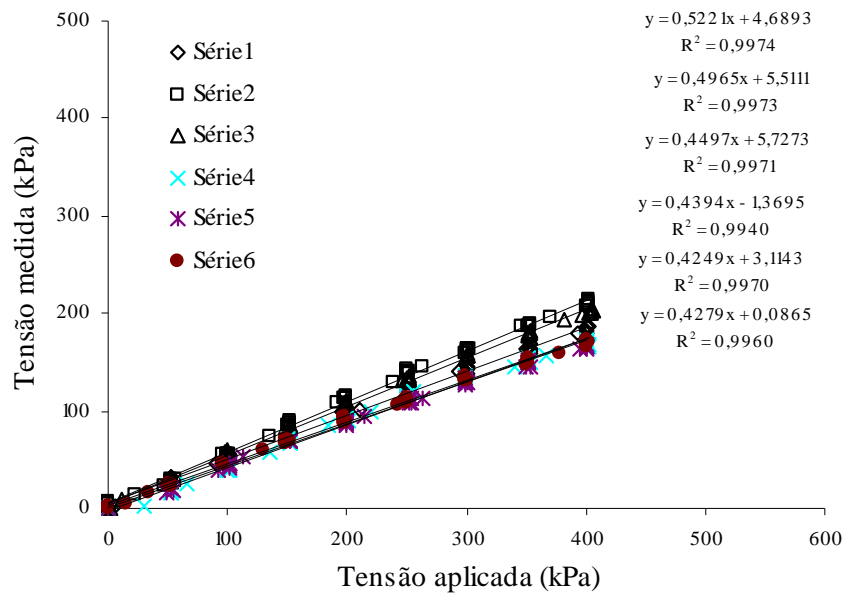


Figura 3: célula BE10KD 7204 na posição intermediária (11 cm) da câmara de calibração

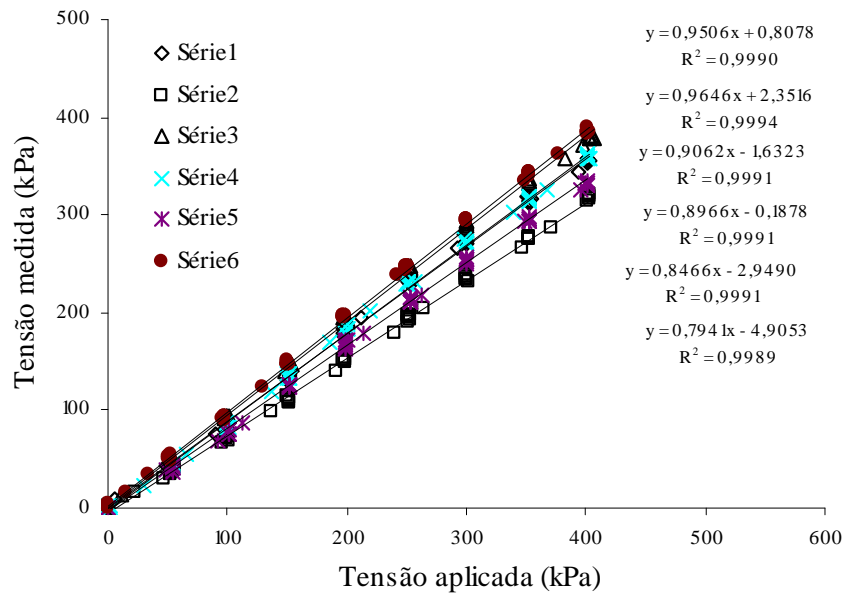


Figura 4: célula BE10KD 7209 na posição intermediária (11 cm) da câmara de calibração